

## Kapasitas Rekatan GFRP-S pada Balok Beton Akibat Perendaman Air Laut

**Rudy Djamaluddin**

Program Studi Teknik Sipil Universitas Hasanuddin Makassar  
Jl. Perintis Kemerdekaan KM 10 Makassar, E-mail: rudy0011@hotmail.com

**Rita Irmawaty**

Program Studi Teknik Sipil Universitas Hasanuddin Makassar  
Jl. Perintis Kemerdekaan KM 10 Makassar, E-mail: rita\_irmaway@yahoo.co.id

**Robby Kwandou**

Program Magister Teknik Sipil Universitas Hasanuddin Makassar  
Jl. Perintis Kemerdekaan KM 10 Makassar, E-mail: robykwandou@gmail.com

### Abstrak

*Glass Fiber Reinforced Polymer Sheet (GFRP-S) merupakan material perkuatan struktur yang non-korosif dan telah banyak digunakan untuk beragam jenis konstruksi, baik untuk gedung maupun struktur yang terekspos di lingkungan laut. Sifat non-korosif ini tentunya sangat menguntungkan apabila diterapkan pada konstruksi yang terekspos di lingkungan laut. Oleh karena itu dilakukan studi untuk menganalisis pengaruh air laut terhadap kapasitas rekatan GFRP-S. Benda uji berupa 12 balok beton berukuran 10 cm x 12 cm x 60 cm dengan perkuatan GFRP-S. Tiga balok tidak direndam dalam laut sedangkan tiga balok masing-masing direndam dalam laut selama 1 bulan, 3 bulan dan 6 bulan. Pemeriksaan dilakukan pada beban ultimit, lendutan, regangan GFRP-S dan regangan beton. Dari studi ini dapat disimpulkan bahwa terjadi penurunan nilai beban ultimit balok dan kapasitas rekatan GFRP-S seiring dengan meningkatnya waktu rendaman. Penurunan kapasitas lentur disebabkan oleh penurunan kapasitas rekatan GFRP-S. Hasil analisis menunjukkan terjadi penurunan kapasitas rekatan GFRP-S sekitar 15% setelah perendaman 6 bulan.*

**Kata-kata Kunci:** Air laut, GFRP-S, Kapasitas rekatan.

### Abstract

*Glass Fiber Reinforced Polymer Sheet (GFRP-S) is the non-corrosive material used for strengthening and has been widely used for many kinds of structures, such as buildings and structures exposed to marine environment. Its non-corrosive property is suitably purposed for the application of structures exposed to marine environment. Therefore, this study was conducted for analyzing the effect of sea water on bonding capacity of GFRP-S. Specimens were 12 concrete beams of 10 cm x 12 cm x 60 cm strengthened with GFRP-S. Three beams were not submersed in the sea while three beams were each submersed in the sea for 1 month, 3 months and 6 months, respectively. Testing was conducted on the ultimate load, the deflection, the GFRP-S strain and the concrete strain. From this study, it can be concluded that both the ultimate load and the bonding capacity of GFRP-S decreases along with the increasing of submersion period. The flexural capacity was decreased due to the decreasing of the bonding capacity of GFRP-S. The result of analysis indicates that the bonding capacity of GFRP-S decreased about 15% after submersed for 6 months in sea water.*

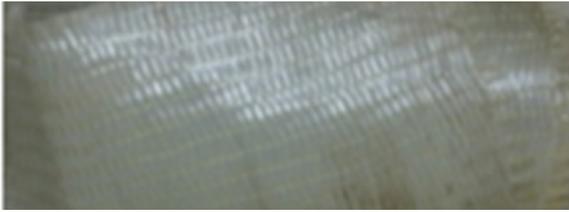
**Keywords:** Sea water, GFRP-S, Bonding capacity.

### 1. Pendahuluan

Salah satu metode perkuatan struktur yang cukup banyak digunakan saat ini yaitu metode perkuatan struktur secara eksternal dengan menggunakan *Fiber Reinforced Polymer* atau FRP (ACI Committee 440.2R-08, 2008). Material FRP ini memiliki banyak kelebihan antara lain kuat tarik yang tinggi, non-korosif, berat jenis yang ringan dan mudah diaplikasikan pada struktur (Bukorsyom, 2011). Studi yang dilakukan oleh

Alami (2010) menunjukkan bahwa penggunaan FRP pada balok beton bertulang dapat meningkatkan kapasitas beban bila dibandingkan dengan balok tanpa perkuatan FRP. Peningkatan ini terjadi seiring dengan meningkatnya jumlah lapisan FRP yang digunakan.

Aplikasi FRP dapat digunakan pada konstruksi gedung dan juga dapat digunakan pada jenis konstruksi lainnya yang terekspos di lingkungan laut seperti konstruksi dermaga dan jembatan (Djamaluddin dkk, 2011).



**Gambar 1. Lembaran GFRP (GFRP-S)**

Lingkungan laut merupakan salah satu jenis lingkungan agresif yang berperan terhadap penurunan dan kerusakan struktur beton bertulang (Sultan, dkk, 2014).

Menurut Tjudiningrat (2012) dan Armitha (2013), perubahan kapasitas lentur balok dengan perkuatan GFRP-S dipengaruhi oleh jarak ekspos terhadap lingkungan laut. Penelitian dilakukan dengan menempatkan beberapa balok pada titik lokasi berbeda menunjukkan bahwa kapasitas lentur terendah dihasilkan pada lokasi yang terdekat dengan lingkungan laut. Lingkungan laut juga berpengaruh terhadap penurunan kekuatan tekan kolom dengan perkuatan GFRP-S (Musdalifah, 2013). **Gambar 1** menunjukkan material GFRP dalam bentuk lembaran atau biasa disebut dengan GFRP-S.

Secara umum terdapat tiga jenis material FRP yaitu CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*), GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*) dan AFRP (*Aramid Fiber Reinforced Polymer*). Penggunaan GFRP dalam bentuk lembaran saat ini sangat banyak dijumpai karena harganya yang relatif lebih ekonomis bila dibandingkan jenis lainnya. Menurut Dai *et al* (2005) dan Guo *et al* (2005), kegagalan *debonding* sering dijumpai pada elemen struktur dengan perkuatan FRP. Kegagalan *debonding* dipengaruhi oleh rambatan retak lentur, terutama pada elemen struktur yang hanya diberi perkuatan FRP pada sisi tarik (Lu *et al*, 2007; Smith *et al*, 2005). *Debonding* dimulai dari retak lentur yang dominan kemudian merambat hingga ke ujung FRP (Mukhopadhyaya *et al*, 2001; Teng *et al*, 2007). Jenis *debonding* ini biasa disebut dengan *Intermediate Crack Debonding (IC Debonding)*. Menurut Sayed (2009) dan Sang (2003) permasalahan *debonding* pada elemen struktur lentur merupakan hal yang sangat penting untuk ditinjau, terutama karena pengaruh retak lentur yang dominan pada sisi tengah balok.

Penelitian yang dilakukan sehubungan dengan perendaman air laut masih sangat kurang dijumpai, mengingat pentingnya masalah perkuatan struktur pada konstruksi yang berada di lingkungan laut. Oleh karena itu, diperlukan adanya suatu penelitian mengenai masalah rekatan pada GFRP-S akibat pengaruh lingkungan laut. Penelitian ini memberikan informasi mengenai perubahan kapasitas rekatan yang terjadi pada GFRP-S akibat pengaruh lingkungan laut selama jangka waktu 1 bulan, 3 bulan dan 6 bulan.

## 2. Program Pengujian Eksperimental

### 2.1 Material

Beton *ready mix* digunakan dalam penelitian ini. Pengujian kuat tekan dan modulus elastisitas beton menggunakan silinder 10 cm x 20 cm sedangkan pengujian modulus keruntuhan atau modulus *rupture* beton menggunakan balok 10 cm x 10 cm x 40 cm. Seluruh sampel silinder dan balok di-*curing* selama 28 hari sebelum diuji.

**Tabel 1** menunjukkan karakteristik material beton yang digunakan dalam penelitian ini. Kuat tekan beton diperoleh 24,71 MPa dengan nilai modulus elastisitas sebesar 23,83 GPa. Nilai modulus *rupture* beton sebesar 3,34 MPa. Tulangan longitudinal balok menggunakan baja tulangan ulir diameter 13 mm dengan nilai tegangan leleh sebesar 473,03 MPa dan modulus elastisitas sebesar 210,24 GPa. Kuat tarik putus tulangan diperoleh 535,79 MPa. **Tabel 2** menunjukkan hasil pengujian tulangan secara keseluruhan.

**Tabel 3** menunjukkan hasil pengujian properti material GFRP-S yang dilakukan oleh pihak *supplier*. Jenis GFRP-S yang digunakan yaitu SEH-51A tebal 1,3 mm dengan nilai kuat tarik dan modulus elastisitas untuk masing-masing lembaran sebesar 575 MPa dan 26,1 GPa. Pemasangan GFRP-S pada permukaan beton dilakukan setelah masa *curing* 28 hari selesai. Permukaan beton terlebih dahulu dihaluskan dengan menggunakan gerinda agar GFRP-S dapat melekat dengan baik. Selanjutnya, permukaan beton dan GFRP-S dilapisi dengan *epoxy* dengan menggunakan *soft-roller*. GFRP-S lalu diletakkan di atas permukaan beton dan lapisan *epoxy* kembali ditambahkan di atasnya agar tidak ada udara yang terperangkap. Diperlukan waktu 3 hari agar *epoxy* dapat mengeras dengan sempurna setelah digunakan.

### 2.2 Deskripsi benda uji

Benda uji berupa 12 balok beton berukuran 10 cm x 12 cm x 60 cm yang diperkuat dengan GFRP-S. Tiga balok tidak direndam dalam laut sedangkan tiga balok masing-masing direndam dalam laut selama 1 bulan, 3 bulan dan 6 bulan.

**Tabel 1. Karakteristik material beton**

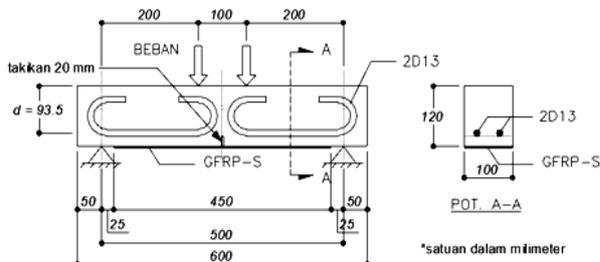
Keterangan	Nilai
Kuat tekan (MPa)	24,71
Modulus elastisitas (GPa)	23,83
Modulus <i>rupture</i> (MPa)	3,34

**Tabel 2. Karakteristik material tulangan**

Keterangan	Nilai
Tegangan leleh (MPa)	473,03
Modulus elastisitas (GPa)	210,24
Kuat tarik putus (MPa)	535,79

**Tabel 3. Karakteristik material GFRP**

Keterangan	Serat kaca	GFRP
Jenis	SEH-51A	
Kuat tarik (MPa)	3240	575
Modulus elastisitas (GPa)	72,4	26,1
Ketebalan (mm)	0,36	1,3



**Gambar 2. Dimensi dan geometri benda uji**

**Tabel 4. Kode benda uji**

Lama rendaman	Kode
0 bulan	B0-1
	B0-2
	B0-3
1 bulan	B1-1
	B1-2
	B1-3
3 bulan	B3-1
	B3-2
	B3-3
6 bulan	B6-1
	B6-2
	B6-3
Total	12

Balok diberikan *notch* atau takikan sebagai perlemahan pada sisi tengah balok untuk melokalisasi kegagalan balok pada tengah bentang. Benda uji juga sengaja tidak diberi tulangan tarik pada tengah bentang untuk memperoleh efek lentur yang hanya diakibatkan oleh GFRP-S. Berdasarkan nilai kedalaman *notch* 2 cm dan tinggi balok 12 cm dapat diperoleh rasio kedalaman *notch* terhadap tinggi balok sebesar 1/6 atau 0.17.

Selain *notch*, balok juga diberikan tulangan 2D13 (dua tulangan diameter 13 mm) pada sisi samping dengan kondisi terputus pada sisi tengah. Tulangan ini berfungsi juga dalam menghambat rambatan retak lentur pada sisi selain tengah balok. Dimensi dan geometri balok seperti yang telah diuraikan dapat lebih jelas dilihat dalam **Gambar 2**.

Panjang GFRP-S yang digunakan untuk seluruh balok yaitu 45 cm sedangkan jarak antartumpuan balok sebesar 50 cm. Hal ini untuk mencegah terjepitnya GFRP-S pada tumpuan balok dan secara tidak langsung mempengaruhi hasil penelitian. Selain itu, digunakan dua lapis GFRP-S dengan ketebalan masing-masing sebesar 1,3 mm.

Tujuan penggunaan dua lapis GFRP-S yaitu untuk memastikan terjadinya kegagalan *debonding* tanpa adanya kegagalan akibat putusya GFRP-S (*rupture failure*). Hal ini berhubungan dengan tujuan penelitian yang ingin diperoleh yaitu masalah kapasitas rekatan GFRP-S akibat pengaruh rendaman air laut. Perendaman balok dilakukan setelah *epoxy* mengeras atau 3 hari setelah pemasangan GFRP-S.

Lokasi perendaman balok berada di laut wilayah POP-SA, Makassar, Sulawesi Selatan, seperti dapat dilihat dalam **Gambar 3**. Gambar penginderaan jauh diperoleh dengan menggunakan bantuan *Google Earth*. Untuk memudahkan dalam mengidentifikasi hasil penelitian maka setiap benda uji diberikan kode. **Tabel 4** menunjukkan kode balok yang digunakan dalam penelitian ini. Kode B0, B1, B3 dan B6 menunjukkan lama rendaman balok untuk 0 bulan, 1 bulan, 3 bulan dan 6 bulan.

### 2.3 Persiapan pengujian

Pengujian lentur balok dilakukan dengan Tokyo Testing Machine kapasitas 1000 kN di Laboratorium Struktur dan Bahan Universitas Hasanuddin. Balok diletakkan di atas dua tumpuan sederhana dengan pembebanan *two-point load*. Jarak antar tumpuan balok sebesar 50 cm. Beban terpusat yang diberikan sejauh 20 cm diukur dari tumpuan balok. Perubahan lendutan diukur dengan menempatkan dua *Linear Variable Displacement Transducer* (LVDT) kapasitas 25 mm di tengah bentang.

**Gambar 4(a)** dan **Gambar 4(b)** secara berurutan menunjukkan detail dan model persiapan pengujian. Setiap balok dilengkapi dengan pemasangan *strain gauge* untuk mengukur nilai regangan yang terjadi. *Strain gauge* beton ditempatkan pada tengah balok sisi atas (daerah tekan) sedangkan *strain gauge* GFRP-S ditempatkan pada tengah balok sisi bawah (daerah tarik). Seluruh *gauge* ini dipasang sejajar dengan gaya tarik atau gaya tekan yang bekerja. Seluruh instrumentasi pengujian tersambung ke *data logger* untuk keperluan pembacaan dan penyimpanan data.

## 3. Hasil Pengujian dan Diskusi

Meskipun sejumlah data diperoleh selama pengujian, yaitu kadar klorida dan pH air laut, lendutan, regangan beton di serat terluar atas dan regangan tarik pada GFRP-S di tengah bentang, namun hanya data-data representatif yang ditampilkan dan didiskusikan dalam makalah ini.

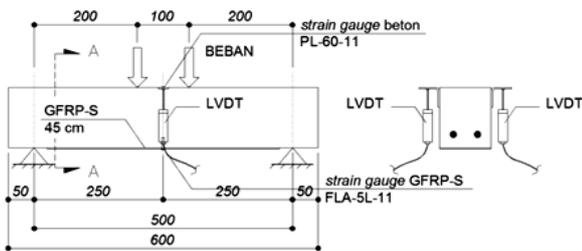
### 3.1 Gambaran lingkungan laut

#### 3.1.1 Kadar klorida dan pH air laut

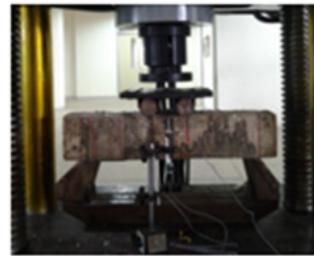
Pengujian kadar klorida dilakukan untuk menunjukkan nilai kadar klorida air laut yang terdapat dalam lokasi



Gambar 3. Lokasi perendaman di laut



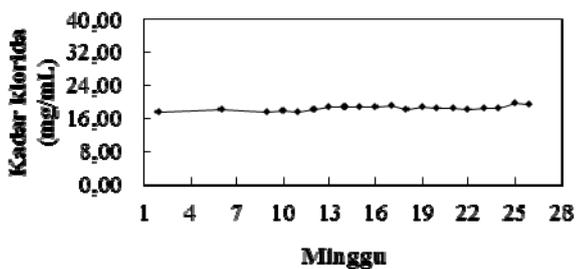
(a) Detail persiapan pengujian



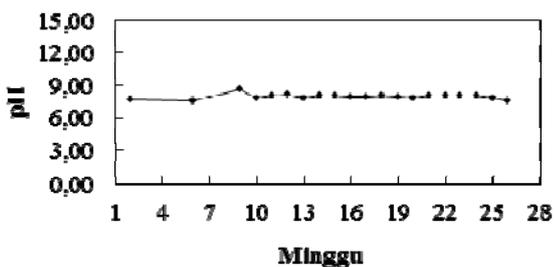
(b) Model persiapan pengujian

Gambar 4. Persiapan pengujian

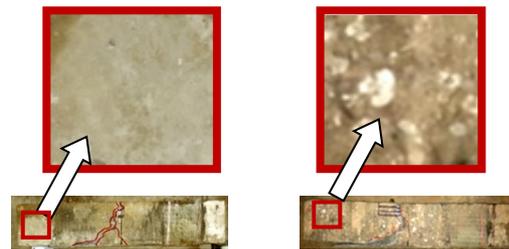
rendaman. Hal ini cukup penting, mengingat kadar klorida tidak selalu sama untuk laut pada lokasi yang berbeda. Selain kadar klorida, juga dilakukan pengujian pH air laut sebagai informasi pendukung. Kadar klorida dinyatakan dalam satuan mg/mL sedangkan pH tidak memiliki satuan. Gambar 5 dan Gambar 6 secara berurutan menunjukkan hasil pengujian kadar klorida dan pH air laut. Nilai rata-rata kadar klorida air laut sebesar 18,47 mg/mL sedangkan nilai pH sebesar 8,00. Perubahan kadar klorida air laut relatif stabil tanpa adanya fluktuasi yang signifikan.



Gambar 5. Kadar klorida air laut



Gambar 6. pH air laut



(a) Sebelum direndam

(b) Setelah direndam

Gambar 7. Perbedaan permukaan balok

Kestabilan nilai kadar klorida air laut cukup rasional, mengingat siklus hidrologi yang secara natural terjadi di laut. Siklus hidrologi secara natural menciptakan suatu keseimbangan jumlah volume air dalam laut sehingga volume air laut cenderung stabil. Kestabilan ini terjadi karena faktor penguapan air yang kecil sehingga cenderung tidak mampu mengubah kadar klorida air secara signifikan. Selain itu, terlihat nilai pH air laut juga cenderung stabil tanpa perubahan yang signifikan.

### 3.1.2 Pengaruh biota laut

Gambar 7 menunjukkan perbedaan kondisi permukaan balok tanpa direndam dengan balok yang direndam dalam laut. Berdasarkan pengamatan visual dapat terlihat adanya perbedaan antara kondisi permukaan beton tanpa perendaman dengan beton yang direndam dalam laut. Perbedaan kondisi permukaan balok dipengaruhi oleh faktor biota laut. Adanya biota laut berupa kerang yang menempel pada permukaan ditunjukkan oleh bintang putih pada permukaan beton.

Berdasarkan hasil identifikasi yang dilakukan di Laboratorium Ilmu Kelautan dan Lingkungan, Fakultas MIPA, Universitas Hasanuddin, Makassar, diketahui bahwa jenis kerang yang menempel merupakan jenis kerang dari spesies *pododesmus (monia) cepio*. Kerang jenis ini hidup di laut dangkal dan melekat pada substrat keras misalnya batu atau cangkang yang telah mati. Warna cangkang kerang jenis ini memiliki warna ekstrim putih dengan warna interior cangkang putih mengkilap. Hasil identifikasi jenis kerang ini diharapkan nantinya dapat bermanfaat bagi penelitian lain.

### 3.2 Kapasitas lentur

Nilai rata-rata pengujian ditunjukkan untuk setiap tiga data terlampir dengan kode B1, B3 dan B6. Perlu disampaikan bahwa tidak seluruh nilai digunakan dalam perhitungan rata-rata. Hal ini dipengaruhi oleh adanya perbedaan pada salah satu yang cenderung berbeda jauh sehingga dapat menyebabkan deviasi berlebih pada hasil hitungan rata-rata. Beban ultimit balok tanpa rendaman (B0) sebesar 26,95 kN. Sementara beban ultimit untuk balok rendaman selama 1 bulan (B1), 3 bulan (B3) dan 6 bulan (B6) sebesar 25,88 kN, 23,74 kN dan 22,99 kN. Hal ini menunjukkan adanya kecenderungan penurunan pada beban ultimit balok seiring dengan meningkatnya lama perendaman di laut.

Nilai lendutan balok pada beban ultimit sebesar 1,95 mm, 1,58 mm, 1,57 mm dan 1,62 mm secara berurutan untuk B0, B1, B3 dan B6. Perbedaan signifikan terlihat antara balok tanpa rendaman B0 bila dibandingkan dengan balok yang direndam (B1, B3 dan B6). Nilai lendutan balok menurun dari 1,95 mm ke 1,58 mm atau sebesar 18,97%. Sementara nilai lendutan pada beban ultimit untuk B1, B3 dan B6 tidak berbeda jauh. Hal ini menunjukkan bahwa lama rendaman tidak mempengaruhi nilai lendutan pada beban ultimit secara signifikan namun hanya dipengaruhi oleh kondisi balok yang direndam atau tidak. **Tabel 5** menunjukkan keseluruhan nilai beban ultimit dan lendutan balok pada beban ultimit.

### 3.3 Hubungan beban dan lendutan

**Gambar 8** menunjukkan hubungan beban-lendutan pada balok hasil rendaman selama 1 bulan, 3 bulan dan 6 bulan. Terlihat bahwa model kelengkungan grafik hubungan beban-lendutan balok cenderung sama. Selain itu, kekakuan balok tidak mengalami perubahan secara signifikan seiring dengan peningkatan waktu rendaman. Hal ini ditunjukkan oleh garis hubungan beban-lendutan yang hampir saling berhimpitan dengan pola yang hampir sama.

Pola hubungan beban-lendutan menunjukkan karakteristik kegagalan getas atau *brittle*. Hal ini didukung oleh hasil pengamatan pada kegagalan balok yang terjadi secara tiba-tiba. Selain itu, dapat terlihat juga dari

kemiringan grafik yang cenderung hampir linear tanpa disertai kelandaian yang besar pada grafik. Peningkatan beban disertai dengan peningkatan lendutan secara bersamaan.

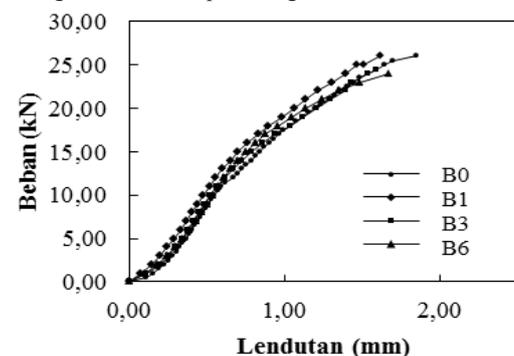
Rambatan retak lentur dominan terjadi pada tengah bentang. Karakteristik kegagalan ini merupakan ciri pola kegagalan beton akibat lentur. Pada pembebanan awal, beton dan GFRP-S bekerja bersama-sama dalam menahan gaya tarik yang bekerja. Pada tahap ini, beton masih mampu menahan gaya tarik dan gaya tarik yang diterima pada GFRP-S juga masih sedikit.

Peningkatan pembebanan menimbulkan adanya retak lentur pada tengah balok pada sepanjang *notch*. Saat beton telah retak, maka gaya tarik yang terjadi hanya disalurkan pada GFRP-S. Retak kemudian merambat hingga ke daerah tekan pada sisi atas balok. Balok akhirnya mengalami kegagalan saat kapasitas rekatan GFRP-S telah mencapai kapasitas ultimitnya.

**Tabel 5. Beban ultimit dan lendutan**

Kode benda uji	Beban ultimit, $P_u$ (kN)	Momen ultimit, $M_u$ (kN.m)	Lendutan pada $P_u$ (mm)
B0-1	26,19	2,63	2,04
B0-2	27,71	2,78	2,04
B0-3*	22,15*	2,22*	1,76*
B0	26,95	2,70	1,95
B1-1	27,65	2,98	1,78
B1-2	25,29	2,73	1,45
B1-3	24,70	2,71	1,52
B1	25,88	2,60	1,58
B3-1	24,76	2,70	1,62
B3-2*	7,80*	2,57*	0,40*
B3-3	22,71	2,75	1,53
B3	23,74	2,38	1,57
B6-1	21,52	2,64	1,32
B6-2	23,07	1,62	1,79
B6-3	24,39	2,67	1,74
B6	22,99	2,31	1,62

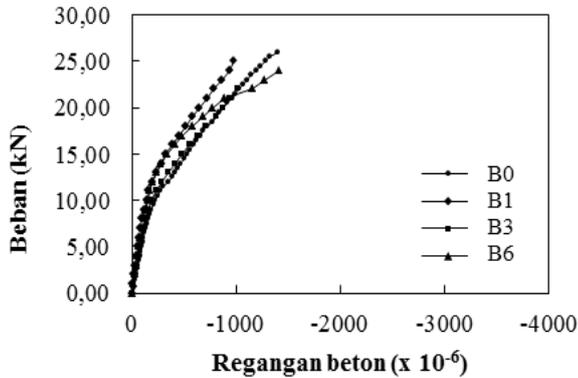
\*Tidak digunakan dalam perhitungan rata-rata



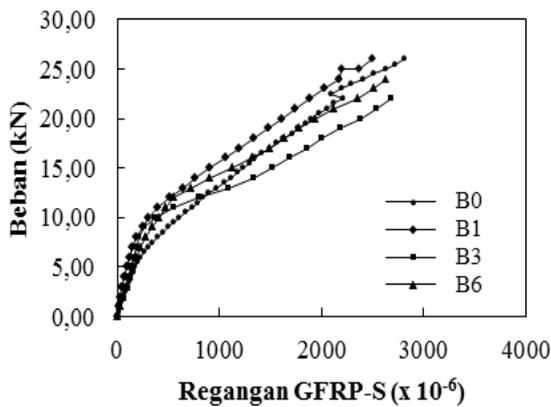
**Gambar 8. Hubungan beban-lendutan balok**

### 3.4 Regangan GFRP-S dan beton

Regangan beton yang dimaksud merupakan regangan tekan beton hasil pembacaan *strain gauge* yang terdapat pada tengah bentang. Sementara regangan GFRP-S yang diperoleh merupakan regangan tarik yang diperoleh dari pembacaan *strain gauge*, juga pada tengah bentang balok.



Gambar 9. Hubungan beban-regangan beton



Gambar 10. Hubungan beban-regangan GFRP-S



Gambar 11. Foto model kegagalan balok

Gambar 9 dan Gambar 10 secara berurutan menunjukkan hubungan beban-regangan beton dan hubungan beban-regangan GFRP-S. Terlihat secara jelas peningkatan nilai beban diikuti dengan peningkatan nilai regangan, baik untuk regangan beton maupun regangan GFRP-S. Nilai regangan tekan beton untuk kondisi beban ultimit sekitar  $1000 \times 10^{-6}$  untuk balok rendaman 1 bulan dan 3 bulan, sedangkan untuk 6 bulan regangannya sekitar  $1300 \times 10^{-6}$ .

Nilai regangan tarik GFRP-S sekitar  $2700 \times 10^{-6}$  untuk keseluruhan balok secara umum. Nilai regangan beton yang terjadi cenderung kecil, berbeda halnya dengan balok beton bertulang pada umumnya. Hal ini cukup rasional, mengingat kondisi balok yang dibuat dengan kondisi tulangan terputus di tengah sehingga kegagalan balok cenderung menyerupai kegagalan balok beton tanpa tulangan.

### 3.5 Model kegagalan balok

Seluruh balok mengalami model kegagalan yang cenderung sama yaitu balok patah di tengah dan lapisan GFRP-S terlepas dari beton (*debonding failure*). Gambar 11 menunjukkan foto kegagalan balok. Kegagalan balok diawali dengan rambatan retak lentur yang terjadi pada tengah bentang. Akibat adanya retak ini maka gaya tarik pada GFRP-S cenderung untuk diteruskan dari tengah bentang ke ujung GFRP-S. Gaya tarik yang bekerja pada balok ditahan sepenuhnya oleh GFRP-S setelah beton mengalami retak. Balok akhirnya mengalami kegagalan setelah GFRP-S mencapai kapasitas rekatan ultimitnya dan terlepas dari balok.

### 3.6 Kapasitas rekatan GFRP-S

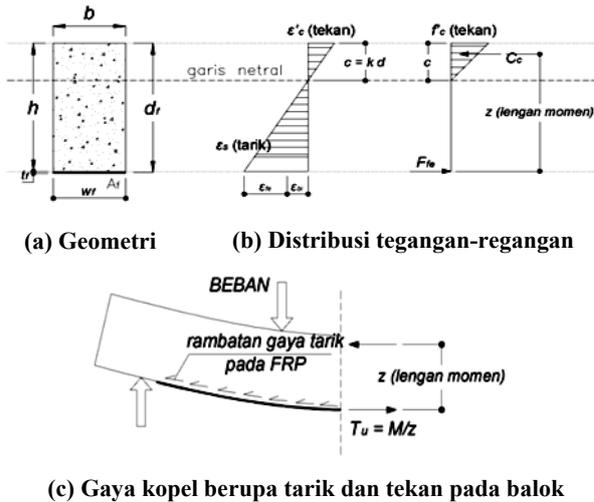
Kapasitas rekatan GFRP-S dipengaruhi oleh dua hal dalam kasus ini, yaitu gaya tekan pada beton dan gaya tarik pada GFRP-S. Gaya tekan pada beton dan gaya tarik pada GFRP-S berpengaruh terhadap nilai regangannya masing-masing yaitu regangan beton dan regangan GFRP-S. Gambar 12 menunjukkan model hubungan tegangan dan regangan yang digunakan dalam penelitian ini. Regangan beton yang terjadi pada kondisi beban ultimit masih relatif kecil yaitu sekitar 43% dari regangan ultimitnya sehingga dapat digunakan asumsi hubungan yang elastis berupa blok tegangan berbentuk segitiga pada beton.

Kapasitas momen  $M_u$  pada balok diperoleh dari aksi kopel antara gaya tekan beton  $C_c$  dengan gaya tarik GFRP-S  $T_f$ . Lengan momen  $z$  merupakan lengan momen yang menghubungkan kedua gaya tersebut dan merupakan nilai yang perlu dicari pertama kali. Dalam mencari lengan momen  $z$  dapat digunakan Persamaan (1). Tinggi blok tegangan segitiga  $c$  dapat dihitung menggunakan Persamaan (2) dengan memasukkan data regangan hasil eksperimental. Dengan memperoleh nilai  $z$  dan  $c$  maka dapat dihitung nilai kapasitas rekatan  $T_f$  menurut Persamaan (3).

$$z = \left(h - \frac{1}{3}c\right) \quad (1)$$

$$c = \frac{\varepsilon_c h}{\left(\varepsilon_f + \varepsilon_c\right)} \quad (2)$$

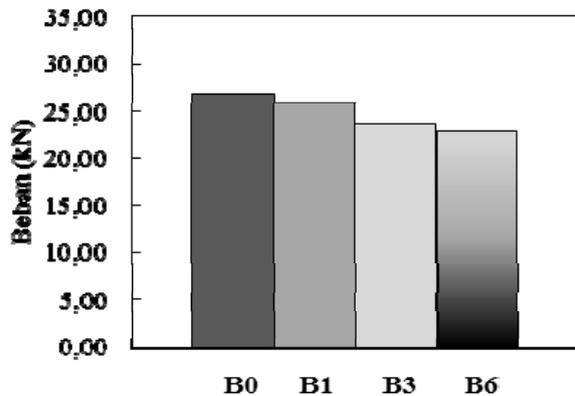
$$T_f = \frac{M_u}{\left(h - \frac{1}{3}c\right)} \quad (3)$$



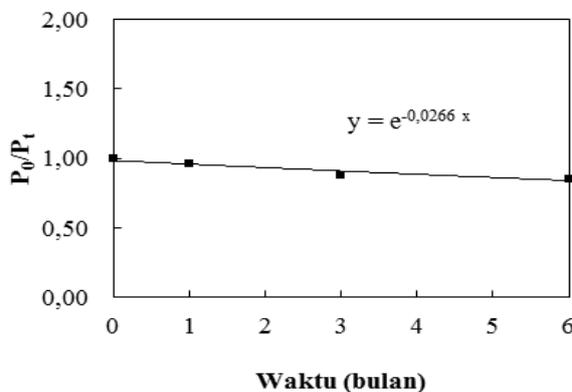
Gambar 12. Model tegangan-regangan GFRP-S

Tabel 6. Kapasitas rekatan GFRP-S

Kode	$P_{ult}$ (kN)	$M_{ult}$ (kN.m)	$\epsilon_c$ ( $\times 10^{-6}$ )	$\epsilon_f$ ( $\times 10^{-6}$ )	$T_f$ (kN)
B0	26,95	2,70	-1366	3085	24,62
B1-S	25,88	2,60	-1068	2400	23,61
B3-S	23,74	2,38	-1173	2990	21,48
B6-S	22,99	2,31	-1231	2799	20,97



Gambar 13. Histogram perubahan kapasitas beban



Gambar 14. Persamaan eksponensial kapasitas beban

Tabel 6 menunjukkan hasil analisis kapasitas rekatan GFRP-S berdasarkan data regangan yang diperoleh dari pengujian eksperimental. Terlihat adanya penurunan kapasitas rekatan GFRP-S seiring dengan peningkatan waktu rendaman. Persentase penurunan kapasitas rekatan GFRP-S sebesar 4,10%, 12,75% dan 14,82% untuk balok rendaman 1 bulan, 3 bulan dan 6 bulan terhadap balok tanpa rendaman.

### 3.7 Pengaruh waktu terhadap kapasitas balok

Gambar 13 menunjukkan histogram perubahan kapasitas beban balok berdasarkan waktu rendaman. Terlihat beban ultimit, baik untuk balok rendaman 1 bulan, 3 bulan maupun 6 bulan cenderung semakin menurun. Selain itu, tampak juga bahwa kapasitas beban balok tanpa direndam (kode B0) memiliki nilai kapasitas beban terbesar lalu semakin menurun seiring dengan peningkatan lama rendaman.

Persentase penurunan kapasitas beban balok yang direndam terhadap balok tanpa rendaman sebesar 3,97%, 11,91% dan 14,69% secara berurutan untuk balok rendaman 1 bulan, 3 bulan dan 6 bulan. Peningkatan lendutan tanpa diikuti beban menunjukkan adanya peningkatan kekakuan balok dipengaruhi oleh lama rendaman di laut.

Berdasarkan nilai kapasitas beban yang diperoleh dapat dibuat suatu persamaan untuk memprediksi pengaruh jangka panjang lingkungan laut terhadap kapasitas beban yang terjadi. Gambar 14 menunjukkan persamaan yang dihasilkan. Pola kecenderungan garis yang terbentuk merupakan pola eksponensial yang menurun terhadap waktu, seperti yang dapat dilihat dalam Persamaan (4).

Persamaan (4) dapat diperluas dengan mengganti variabel  $x$  dan  $y$ . Variabel  $x$  merupakan variabel waktu rendaman ( $t$ ) yang dinyatakan dalam satuan bulan. Variabel  $y$  merupakan perbandingan kapasitas beban akibat pengaruh waktu terhadap kapasitas beban awal ( $P_t/P_0$ ). Variabel ini dinyatakan dalam satuan kN. Dengan mengubah variabel  $x$  dan  $y$  maka dapat diperoleh suatu persamaan baru yaitu Persamaan (5). Apabila nilai kapasitas beban awal  $P_0$  dalam Persamaan (5) ini dipindahkan ke ruas kanan maka akan diperoleh Persamaan (6).

$$y = e^{-0,0266 x} \quad (4)$$

$$\frac{P_t}{P_0} = e^{-0,0266 x} \quad (5)$$

$$P_t = P_0 e^{-0,0266 t} \quad (6)$$

Persamaan (6) ini merupakan persamaan akhir yang diharapkan mampu digunakan dalam memprediksi nilai kapasitas beban balok dengan perkuatan GFRP-S akibat pengaruh waktu selama direndam dalam laut.

Persamaan ini digunakan dengan memasukkan waktu rendaman  $t$  dan kapasitas beban awal  $P_0$ , seperti yang ditunjukkan dalam **Persamaan (6)**.

#### **4. Kesimpulan**

Berdasarkan observasi yang telah dilakukan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Pengaruh rendaman di laut berdampak terhadap penurunan kapasitas lentur balok. Penurunan ini cenderung disebabkan oleh penurunan kapasitas rekatan GFRP-S pada beton.
2. Persentase penurunan kapasitas beban balok yang direndam terhadap balok tanpa rendaman sebesar 3,97%, 11,91% dan 14,69% secara berurutan untuk balok rendaman 1 bulan, 3 bulan dan 6 bulan.
3. Persentase penurunan kapasitas rekatan GFRP-S sebesar 4,10%, 12,75% dan 14,82% untuk balok rendaman 1 bulan, 3 bulan dan 6 bulan terhadap balok tanpa rendaman.
4. Hubungan kapasitas beban dengan waktu rendaman menunjukkan pola hubungan eksponensial yang cenderung menurun terhadap waktu.

#### **Ucapan Terima Kasih**

Dalam kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada PT. Graha Citra Anugerah Lestari atas bantuan material GFRP-S tipe SEH-51A. Tak lupa pula ucapan terima kasih diberikan kepada staf Laboratorium Struktur dan Bahan Universitas Hasanuddin serta para mahasiswa yang turut membantu sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik.

#### **Daftar Pustaka**

ACI Committee 440.2R-08, 2008, *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP System for Strengthening Concrete Structures*. USA: Farmington Hills.

Alami, F., 2010, *Perkuatan Lentur Balok Beton Bertulang dengan Glass Fiber Reinforced Polymer*, Seminar dan Pameran HAKI: 1-12.

Armitha, F.L., 2013, Pengaruh Jangka Panjang Lingkungan Laut Tropis terhadap Efektifitas GFRP-S sebagai Bahan Penguat Elemen Lentur, *Jurnal Tugas Akhir Jurusan Teknik Sipil UNHAS*.

Bukorsyom, F., 2011, *Studi Perkuatan Lentur Balok Beton Bertulang Pasca Kerusakan dengan Menggunakan Glass Fiber Reinforced Polymer Sheet*. Tesis tidak diterbitkan. Makassar: Program Pascasarjana FTJS – UNHAS

Dai, J., Ueda, T. and Sato, Y., 2005, Development of the Nonlinear Bond Stress–Slip Model of Fiber Reinforced Plastics Sheet–Concrete Interfaces with a Simple Method, *ASCE 2005 Vol. 9*: 52-62.

Djamaluddin, R., Akkas, M. and Hasanuddin, H.A., 2011, *Debonding Behavior of GFRP Sheet Reinforced Concrete*. EACEF 2013: SC-136.

Guo, Z.G., Cao, S.Y., Sun, W.M. and Lin, X.Y. 2005. *Experimental Study on Bond Stress-Slip Behaviour Between FRP Sheets and Concrete*, BBFS 2005: 77-84.

Lu, X.Z., Teng, J.G., Ye, L.P. and Jiang, J.J., 2007, Intermediate Crack Debonding in FRP-Strengthened RC Beams. *ASCE 2007*: 161-174.

Mukhopadhyaya, P. and Swamy, N., 2001, Interface Shear Stress: A New Design Criterion for Plate Debonding. *ASCE 2001 Vol. 5*: 35-43.

Musdalifah, 2013, Pengaruh Jangka Panjang Lingkungan Laut Tropis Terhadap Kuat Tekan dan Modulus Elastisitas pada Kolom Silindris Terkekang GFRP, *Jurnal Tugas Akhir Jurusan Teknik Sipil UNHAS*.

Sultan, M.A., Parung, H., Tjaronge, W., dan Djamaluddin, R., 2014, *Effect of Marine Environment to the Concrete Beams Strengthened Using GFRP Sheet*, ICCEM 2014: 150-153.

Sang, L.K., 2003, *Effect of Beam Size and FRP Thickness on Interfacial Shear Stress Concentration and Failure Mode in FRP-Strengthened Beams*, Unpublished thesis. Singapore: Master Degree of Engineering National University of Singapore.

Sayed, E.Y., Bakay, R. and Shrive, N.G., 2009, Bond Strength of FRP-Laminates to Concrete : State-of-the-Art Review, *Electronic Journal of Structural Engineering* 9: 45-61.

Smith, S.T. and Gravina, R.J., 2005, Critical Debonding Length in FRP Flexurally Strengthened RC Members. *BBFS 2005*: 277-282.

Teng, J.G. and Chen, J.F., 2007, Debonding Failures of RC Beams Strengthened with Externally Bonded FRP Reinforcement. *APFIS 2007*: 33-42.

Tjiudiningrat, N.T., 2012, Studi Pengaruh Air Laut Terhadap Efektifitas GFRP Sheet Sebagai Bahan Penguat Elemen Lentur, *Jurnal Tugas Akhir Jurusan Teknik Sipil UNHAS*.