

KAPASITAS REKATAN LEMBAR GFRP PADA BALOK LENTUR AKIBAT BEBAN BEBAN BERULANG DAN LINGKUNGAN LAUT

Arbain Tata¹, Dewi Sulistyorini¹, dan Rudy Djamiluddin²

¹Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Khairun, Ternate
E-mail: arbatata@yahoo.co.id

²Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Makassar
E-mail: rudy0011@hotmail.com

Abstrak. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik dan merumuskan model hubungan kapasitas rekatan perkuatan lembaran GFRP pada balok beton bertulang yang dipengaruhi air laut dan beban beban berulang. Penelitian dilakukan metode uji laboratorium dengan menggunakan sembilan benda uji balok lentur dengan mutu beton $f'c$ 25 MPa. Satu buah balok lentur beton normal (BN) dengan menggunakan beban beban berulang tanpa rendaman air laut dan perkuatan. Satu balok lentur dengan perkuatan GFRP-S tanpa rendaman air laut. Balok lentur yang lain diperkuat lembaran GFRP direndam dalam kolam yang berisi air laut dengan variasi waktu masing-masing, satu bulan dan tiga bulan serta dibebani beban berulang. Pengujian dilakukan dengan beban beban berulang sinusoidal *frekuensi 1,5 Hz* hingga gagal. Hasil penelitian menunjukkan terjadi penurunan kapasitas rekatan lembaran GFRP yang dipengaruhi oleh rendaman air laut. Kegagalan balok lentur terjadi pada 1.000.000 siklus untuk balok dengan perkuatan (BF). Model kegagalan yang terjadi pada balok lentur adalah kegagalan lekatan antara beton dengan lembaran GFRP pada pusat beban yang merambat secara perlahan menuju ke tumpuan hingga gagal (*debonding*). Dapat disimpulkan bahwa kapasitas rekatan yang terjadi dalam tiga bulan terjadi penurunan sebesar 6.78%. Kapasitas rekatan balok beton tersebut dapat didekati dengan persamaan *eksponensial*, yaitu $y = 0.12e^{-0.04t}$ dimana t adalah fariabel waktu rendaman.

Kata kunci: balok beton, *debonding*, beban berulang, karakteristik, perkuatan

I. PENDAHULUAN

Material komposit serat bertulang (FRP) telah berhasil digunakan dalam konstruksi baru dan untuk perbaikan dan rehabilitasi struktur yang ada. Ini adalah penggunaan terakhir dimana bahan FRP memegang peranan penting dalam meningkatkan kapasitas lentur pada balok. Penguatan atau perkuatan struktur beton bertulang dan beton pratekan dapat dilakukan sebagai keperluan untuk peningkatan dalam memikul beban, perubahan fungsi bangunan, degradasi struktur alami, kesalahan dalam perencanaan, atau cacat desain maupun konstruksi. Perbaikan dengan penguatan FRP dari sisi eksternal sangat menarik untuk dikembangkan karena kemudahan dan kecepatan pemasangan, efisiensi perbaikan struktural, ketahanan material, dan efek minimal yang dimiliki oleh material ini. Pada estetika dimensi struktural, dan fleksibilitas. Meskipun banyak penelitian telah dilakukan untuk menyelidiki penguatan elemen beton bertulang dengan

bahan komposit FRP, masih banyak aspek penggunaannya yang perlu diteliti. Perilaku kelelahan balok beton bertulang yang diperkuat dengan lembaran komposit FRP misalnya yang dijelaskan dalam makalah ini, memberikan informasi berharga mengenai kinerja jangka panjang sistem penguatan FRP.

Pada bangunan yang mengalami degradasi akibat korosi pada elemen struktur tentunya dapat menambah perlemahan pada struktur itu sendiri, bahkan dapat menyebabkan perlemahan pada tulangan hingga tulangan tersebut kehilangan kekuatannya (Erniati, 2014). Akibat dari korosi dan adanya kebutuhan untuk menghasilkan sistem yang lebih efektif sehingga keinginan untuk meningkatkan kemampuan layan, pada gedung di sepanjang pantai.

Dalam beberapa tahun terakhir, minat yang besar telah berkembang dalam perilaku kelelahan elemen beton bertulang. Ada beberapa alasan untuk minat ini. Penerapan, prosedur, perancangan dan penggunaan kekuatan yang lebih tinggi dan bahan yang lebih tahan

lama mengharuskan elemen beton pada tingkat stres tinggi untuk dapat memikul beban berulang dalam jangka yang lebih lama. Ada juga teori baru tentang efek beban berulang pada elemen balok, meskipun beban berulang tidak menyebabkan kegagalan kelelahan. Beban berulang dapat menyebabkan retak internal elemen yang menggunakan material beton bertulang sebagai bahan dasarnya. Kelelahan pada baja penguat disebabkan oleh *microcrack* yang memulai pada konsentrasi tegangan pada permukaan batang. Retakan secara bertahap merambat seiring peningkatan tegangan persiklus. Fraktur mendadak terjadi saat retakan mencapai panjang kritis dimana propagasinya menjadi tidak stabil. Dengan demikian, umur leleh baja penguat sama dengan waktu atau jumlah siklus untuk memecahkan inisiasi ditambah durasi pertumbuhan retak. Inisiasi retak biasanya terjadi pada lokasi konsentrasi stres terbesar biasanya di bentang tengah dari balok memanjang (Tata, 2015).

Carbon fiber reinforced polymers (CFRP) yang telah digunakan untuk perkuatan jembatan mampu meningkatkan ketahanan dan kapasitasnya hingga mencapai 55% (Sun, X, 2015).

Dalam penelitian ini Pedoman prosedur dalam mendesain balok dengan perkuatan FRP yang digunakan dalam penelitian ini dengan rujukan standar ACI (ACI 440.2R-08). Untuk analisa beban berulang mencari nilai kd digunakan Persamaan 1 dan kapasitas rekatan GFRP-S pada Persamaan 3.

$$kd = \frac{\varepsilon_c n}{\varepsilon_\rho + \varepsilon_c} \quad (1)$$

$$f_{s,s} = \frac{\left[M_s + \varepsilon_\rho A_\rho E_\rho \left(d_\rho - \frac{kd}{2} \right) \right] (d - kd) E_s}{A_s E_s \left(d - \frac{kd}{2} \right) (d - kd) + A_\rho E_\rho \left(d_\rho - \frac{kd}{2} \right) \left(d_\rho - kd \right)} \quad (2)$$

$$f_{f,s} = f_{f,s} \frac{E_\rho (d - kd) E_s - c E_f}{\left(d - \frac{kd}{2} \right)} \quad (3)$$

$f_{s,s}$ = Tegangan pada baja

$f_{f,s}$ = Kapasitas rekatan GFRP-S

Mengingat potensi jenis material GFRP untuk perkuatan yang telah dijelaskan di atas tetapi data teknis pedoman efektifitas pemanfaatannya masih perlu untuk dikembangkan lagi. Dalam penelitian ini digunakan GFRP-S untuk bahan perkuatan balok beton berulang. Sebagai objek penelitian selanjutnya diteliti tingkat ketahanan terhadap beban berulang yang dipengaruhi asam klorida. Jenis FRP yang digunakan dalam hal ini adalah lembaran serat karbon GFRP (*Gelas Fiber Reinforced Concrete*). Sedangkan mutu beton yang disyaratkan untuk riset ini adalah beton

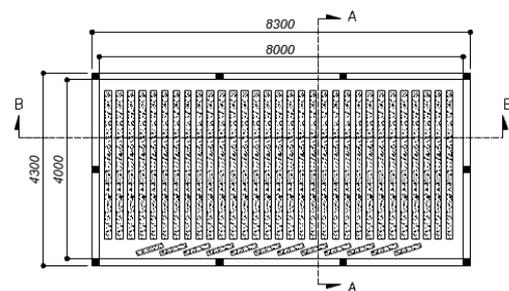
mutu normal.

Patut dikaji khususnya pada bangunan yang mengalami beban berulang seperti beban kendaraan atau tekanan ombak secara berulang. Beban berulang adalah salah satu penyebab kerusakan atau kegagalan yanserin terjadi pada struktur jembatan yang diakibatkan oleh beban seperti kendaraan, tekanan gelombang dan lain-lain. Atas pertimbangan tersebut sehingga menjadi penting untuk terus diadakan penelitian mengenai karakteristik dari beban berulang.

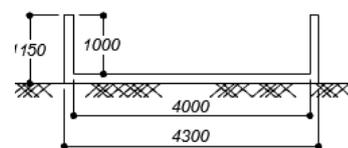
II. BENDA UJI

A. Kolam Perendaman

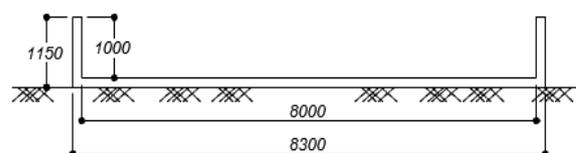
Kolam perendaman dibuat di lokasi yang berada 85 meter dari lab struktur dan bahan Fakultas Teknik Gowa Makassar. Kolam simulasi yang dibuat memiliki dimensi panjang 8,30 m dengan lebar 4,30 m dan tinggi 1.15 m. Dimensi kolam disesuaikan dengan ukuran balok lentur yang akan diteliti (Kwandau, 2015). Detail gambar kolam simulasi dapat dilihat pada Gambar 1.



(a) Model kolam simulasi



(b) Potongan A-A



(c) Potongan B-B

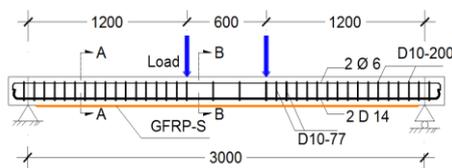
Gambar 1. Kolam perendaman

B. Bahan Uji dan Pembuatan Balok lentur

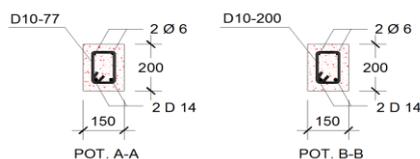
Ada 9 sampel balok lentur dengan mutu beton f'_c 25 MPa. Satu buah balok lentur beton normal (BN) dengan menggunakan beban berulang tanpa rendaman dan tanpa perkuatan GFRP-S. Ada satu balok lentur

yang lain telah direkatkan lembaran GFRP-S namun tidak direndam. Balok lentur yang lain diperkuat lembaran GFRP namun mengalami perendam dalam kolam yang berisi air laut dengan menggunakan variasi waktu yang berbeda yaitu, satu bulan dan tiga bulan. Hali ini dilakukan untuk meneliti seberapa besar penetrasi yang terjadi pada balok lentur akibat perendaman air laut. Pada epoksi resin juga diamati besar pengaruh daya rekat terhadap kulit beton yang tentunya mempengaruhi kapasitas lentur pada balok.

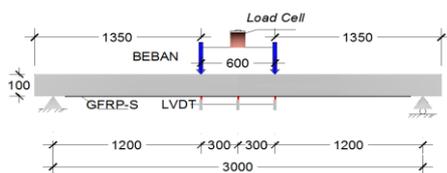
Gambar 2 menunjukkan data geometri pada balok serta rencana penempatan *record data*. Gambar 2(b) adalah potongan melintang penampang balok dengan menggunakan rasio tulangan minimum. Gambar 2c adalah penempatan *two poin load* serta LVDT untuk pembacaan besar lendutan yang terjadi pada balok lentur. Gambar 2d menunjukkan posisi masing-masing strain gauge sebagai alat *record data* yang terhubung langsung dengan data logger dan terhubung dengan PC *computer*. Dalam pengecoran balok lentur menggunakan *ready mix* dengan kuat tekan rencana ($f'c$) sebesar 25 Mpa agar kualitas beton tetap terjaga. Pada pemasangan GFRP digunakan metode *Wet Lay-up* berdasarkan (ACI 440.2R-08). Untuk balok lentur balok normal dan balok GFRP-S tanpa rendaman diberikan simbol masing-masing (BN dan BF).



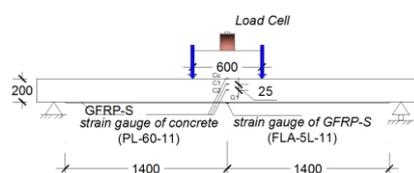
(a) Balok normal diperkuat GFRP-S (BF)



(b) Potongan penampang balok



(c) Balok GFRP-S dengan LVDT



(d) Record Data

Gambar 2. Balok lentur dan *Record Data*

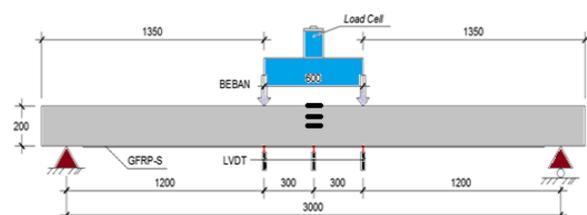
Tabel 1. Variabel balok lentur dan lama perendaman

No	Kode benda uji	Benda uji	Sistem beban	Lama direndam (Bulan)
1	BNK ₁₋₀	1	Monotonik	0
2	BFK ₁₋₃	1	Monotonik	3
3	BN	1	Beban berulang	0
4	BF	2	Beban berulang	0
5	BF ₁ bulan	2	Beban berulang	1
6	BF ₃ bulan	2	Beban berulang	3

Besar lendutan, regangan, retak vertical pada balok lentur langsung tercatat pada *computer*. Hasil data dianalisa dengan menggunakan interpolasi untuk menentukan beban maksimum, minimum dan beban menengah. Dalam satu siklus dibutuhkan suatu pembebanan berulang dri beban maksimum hingga beban minimum kemudian kembali pada beban maksimum atau beban sinusoidal.

C. Metode Pengetesan Balok lentur BN dan BF

Gambar 3 merupakan *set-up* pengujian yang diilustrasikan pada balok lentur dengan beban poin load secara berulang hingga balok mengalami keruntuhan. Untuk regangan pada tulangan diagonal dan longitudinal, juga permukaan beton, dipasang beberapa *strain gauge* pada posisi-posisi tertentu. Pengujian beban berulang selanjutnya dilaksanakan pada balok lentur balok beton yang telah direndam selama umur perendaman 0, 1, dan 3 bulan. Beban beban berulang mampu menyebabkan kelelahan dan gagal, dengan frekuensi konstan sebesar 1,5 hz model beban sinus. Dalam pembebanan sinus diterapkan beban beban berulang dengan beban, 1 siklus, 10 siklus, 100 siklus, 1000 siklus, 10,000 siklus, lalu kelipatan 50,000 siklus hingga hancur atau sampai pada 1,000,000 siklus. Beban diberikan dengan beban minimum dan beban maksimum untuk masing-masing balok tanpa kekuatan (BN) dengan balok yang diperkuat oleh GFRP-S (BF) yaitu, 4 kN-19 kN dan 4 kN-24 kN. Beban minimum didapat dari estimasi beban mati pada balok beton. Beban maksimum yaitu 19 kN atau 24 kN didapat dari estimasi 45% $f'c$ balok kontrol dari masing-masing untuk kekuatan GFRP-S dan tanpa kekuatan.



Gambar 3. Setup balok lentur

III. HASIL

A. Karakteristik Tarik Baja Tulangan

Mutu baja direncanakan menggunakan tulangan memanjang $f_y = 400$ MPa dan untuk tulangan sengkang $f_y = 240$ MPa. Setelah dilakukan pengujian tarik baja tulangan dimana masing-masing hasil pemeriksaan kuat tarik baja tulangan dapat dilihat pada Tabel 2.

Dari hasil pengujian besi ulir D14 untuk tulangan tarik menunjukkan tegangan leleh rata-rata sebesar 421,7 MPa, sedang tulangan sengkang digunakan tulangan D10 diperoleh tegangan leleh 410,2 MPa. Dari hasil pengujian tersebut nampak bahwa antara awal bulan dibandingkan dengan uji kuat tarik besi ulir D14 setelah 12 bulan tidak terjadi perbedaan yang signifikan. Dapat juga disimpulkan bahwa hasil uji material baja tidak berbeda jauh dengan nilai tegangan leleh rencana yaitu 400 MPa.

Tabel 2. Karakteristik tulangan baja

Diameter sampel (mm)	F_y (MPa)	F_u (MPa)	E_s (GPa)
ø 6	240,5	417,2	15,0
ø 10	410,2	611,6	20,9
D 14	421,7	671,3	21,9

B. Karakteristik Beton

Hasil pengujian karakteristik beton berupa uji kuat tekan, kuat lentur dan modulus elastisitas dituangkan dalam Tabel 3.

Tabel 3. Karakteristik rata-rata beton normal

Karakteristik beton (MPa)		Modulus elastisitas (GPa)	Lama perendaman (bulan)
Tekan (f'_c)	Lentur (f'_r)	(E_c)	(bulan)
25,00	3,34	24,20	0
24,95	-	24,16	3

Kuat tekan rata-rata sebesar 25 MPa dan modulus elastis sebesar 24,2 MPa dan kuat lentur rata-rata sebesar 3,34 MPa. Dari hasil pengujian karakteristik beton setelah umur 28 hari, tanpa perendaman dibanding dengan benda uji yang telah direndam tiga bulan nampak tidak terjadi perbedaan yang signifikan. Dari hasil nilai pengujian karakteristik balok lentur tersebut menunjukkan bahwa yang paling berperan penting dalam hal ini adalah beban berulang.

C. Pengaruh Beban Beban berulang dan Air Laut Pada Balok Lentur

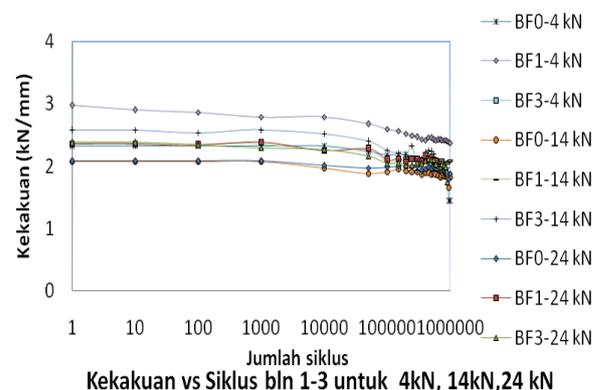
Didasarkan pada hasil pengujian di laboratorium yang dilakukan pada sembilan balok lentur balok beton bertulang. Ada sembilan balok lentur yang dibebani beban fatigue gelombang sinus yang dibahas. Adapun umur kelelahan masing-masing balok lentur dapat

dilihat dalam Tabel 4. Dari hasil pengambilan data LVDT yang telah dipasangkan di bawah balok beton dengan tujuan melihat pengaruh beban beban berulang dan kontak dengan air laut terhadap balok beton BF. Gambar 4 adalah pengaruh beban beban berulang terhadap lendutan balok dengan GFRP-S (BF0, BF1, dan BF3). Pada pengujian ini balok dibebani oleh beban beban berulang hingga mencapai satu juta siklus setelah direndam didalam kolam dengan air laut dengan masing-masing tingkat perendaman hingga perendaman tiga bulan. Pada balok lentur ini juga digunakan balok dengan kekuatan GRP-S pada sisi lentur balok. Beban beban berulang diterapkan pada balok dengan model grafik sinusoidal yaitu, $P_{min} = 4$ kN, $P_{mid} = 14$ kN dan $P_{max} = 24$ kN pada BN maupun BF. Pengaruh beban berulang terhadap BF disajikan dalam bentuk grafik.

Tabel 4. Regangan dan lendutan maksimum balok lentur

Tipe Balok	ϵ_c (μ)	ϵ_f (μ)	δ (mm)	Umur Kelelahan (Siklus)
BN	851	-	12,67	635.100
BF0	903	1600	13,40	1.231.860
BF1	847	1963	11,62	1.000.000
BF3	1085	1858	13,71	1.000.000

Balok BF0 setelah dibebani beban berulang maka balok lentur hancur pada 1,231,860 siklus. Telah diuraikan sebelumnya bahwa ledutan pada balok BF0 pada tingkat beban minimum yaitu 4 kN lendutan minimum yang terjadi adalah 1,72 mm dan lendutan maksimum adalah 2,76 mm. Peningkatan lendutan oleh beban yaitu 60%. Pada beban 14 kN terlihat lendutan minimum adalah 6,74 mm dan lendutan maksimum adalah 8,45 mm jadi kenaikan lendutan sebesar 25%. Ada penambahan lendutan setelah balok mengalami beban berulang sebanyak 1.231.860 siklus.

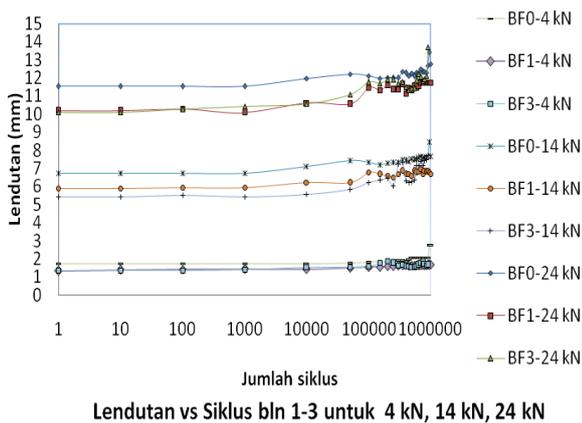


Gambar 4. Hubungan lendutan balok pada jumlah siklus

Pada balok BF1 telah dibebani hingga mencapai 1,000,000 siklus. Pada balok BF1 tingkat beban minimum, yaitu 4 kN terjadi lendutan 0,89 mm dan lendutan maksimum adalah 1,67 mm sehingga peningkatan lendutan 47%. Pada beban 14 kN, nilai

lendutan minimum adalah 6,38 mm dan lendutan maksimum adalah 8.70 mm. Peningkatan lendutan setelah balok mengalami beban beban berulang 27%. Pada beban 24 kN pengaruh beban beban berulang lendutan minimum adalah 10.74 mm dan lendutan maksimum adalah 11.74 mm. Lendutan makin besar setelah dibebani beban beban berulang sebanyak satu juta kali yaitu 18.5%.

Pada beban 24 kN pengaruh beban beban berulang lendutan minimum adalah 11,53 mm dan lendutan maksimum adalah 13,40 mm. Dari data yang dihasilkan besar kenaikan lendutan sebesar 16%. Jadi kecenderungan peningkatan besar lendutan seiring dengan penambahan jumlah siklus, namun setelah mencapai lendutan maksimum secara tiba-tiba balok mengalami kegagalan.



Gambar 5. Hubungan kekakuan balok pada jumlah siklus

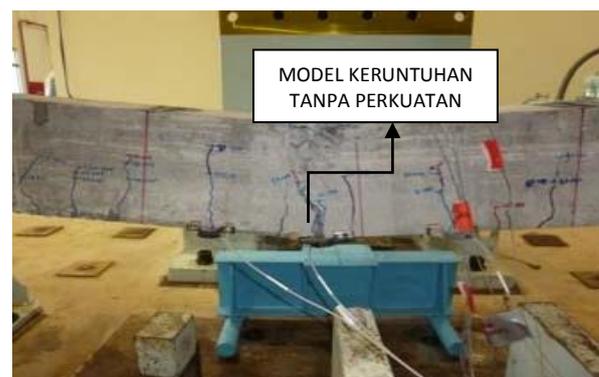
Pada balok BF3 telah hancur pada 1.000.000 siklus. Pada Gambar 4 dapat dilihat pengaruh beban beban berulang terhadap lendutan balok dengan GFRP-S direndam selama 3 bulan (BF3). Pada pengujian ini balok dibebani oleh beban beban berulang hingga mencapai 1.000.000 siklus setelah direndam didalam kolam dengan air laut selama tiga bulan. Pada beban 4 kN lendutan minimum yang terjadi adalah 1.26 mm dan lendutan maksimum adalah 1.64 mm dengan peningkatan lendutan sebesar 30%. Pada beban 14 kN, terlihat lendutan minimum adalah 7.69 mm dan lendutan maksimum adalah 10.04 mm dengan peningkatan sebesar 31%. Pada beban 24 kN pengaruh beban berulang dengan lendutan minimum adalah 11.56 mm dan lendutan maksimum adalah 12.6 mm peningkatan lendutan sebesar 1%. Pada Gambar 4 menunjukkan pertambahan lendutan setelah direndam air laut di kolam selama 3 bulan dibandingkan dengan perendaman satu bulan atau tanpa perendaman. Semakin lama perendaman kekakuan semakin berkurang ditandai dengan perendaman satu bulan cenderung nilai kekakuan lebih besar dibanding perendaman tiga bulan. Pengaruh lendutan dan kekakuan telah ditunjukkan pada Tabel 4.

Dari fenomena yang muncul pada balok akibat beban beban berulang terjadi kecenderungan lendutan bertambah dan kehilangan kekakuan seiring dengan

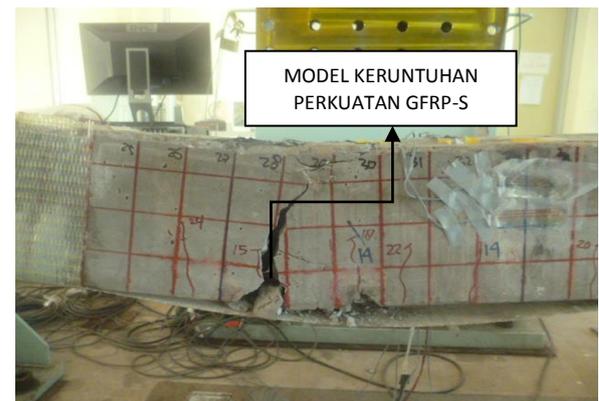
bertambahnya jumlah siklus. Bertambahnya waktu perendaman air laut di kolam perendaman, terindikasi kecenderungan bertambahnya lendutan yang terjadi dan kekakuan balok makin berkurang terhadap balok tidak direndam (BF0) seperti pada Gambar 5.

D. Pola Retak Pada Balok Beton

Untuk mengukur lebar retak maka pada retak awal ditentukan tiga titik pemasangan *pie gauge* (P1, P2 dan P3). Pada nol siklus diadakan pembacaan data pada P1, P2 dan P3 dengan pembebanan minimum hingga 24 kN lalu beban turun hingga minimum kembali sesuai dengan beban sinus. Peningkatan lebar retak seiring dengan peningkatan beban dan dipengaruhi jumlah siklus yang diterapkan dari beban beban berulang.



(a) Kegagalan tekan balok BN



(b) Kegagalan tekan balok BF0



(c) Kegagalan tekan balok BF1



(d) Kegagalan tekan balok BF3

Gambar 6. Pola kegagalan akibat pembebanan beban berulang BN dan BF0

Pola retak ditunjukkan pada Gambar 6. Pada balok BN mekanisme kegagalan yang terjadi agak berbeda dengan BF ditentukan berdasarkan hasil pengujian balok normal, sekitar 45% dari beban ultimit balok kontrol.

E. Model Keruntuhan Balok

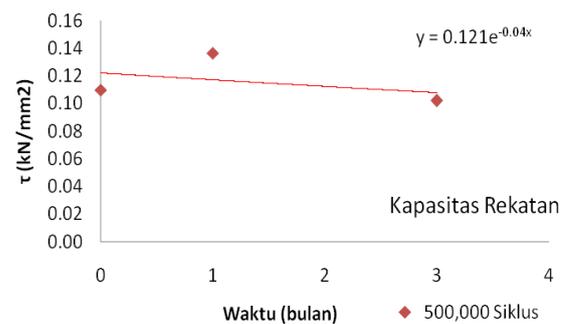
Gambar 6(a) dan Gambar 6(b) menunjukkan foto balok yang mengalami kegagalan setelah pembebanan beban berulang. Untuk balok normal kegagalan pada beton dengan hancurnya beton pada sisi tekan. Sedangkan pada balok dengan GFRP-S kegagalan didahului dengan terlepasnya GFRP-S pada sisi tarik balok dan disusul dengan hancurnya beton pada sisi tekan.

Pada balok dengan GFRP-S kegagalan didahului dengan terlepasnya GFRP-S pada sisi tarik balok dan disusul dengan hancurnya beton pada sisi tekan. Peristiwa terlepasnya GFRP-S pada sisi tarik balok yang merambat dari tengah bentang menuju ke sisi perletakan disebut debonding. Setelah debonding terjadi leleh pada tulangan baja pada sisi tarik balok beton lalu secara tiba-tiba struktur *failure* dengan lepasnya GFRP-S pada kulit beton disisi tekan dengan bunyi yang keras.

F. Kapasitas Rekatan GFRP-S Akibat Kontak Air Laut & Beban Beban berulang

Pengaruh lingkungan laut terhadap kapasitas balok dapat dilihat dari besar kapasitas rekatan GFRP-S masing-masing struktur balok beton. Dengan menggunakan Persamaan 3 maka didapatkan besar kapasitas rekatan yang terjadi pada GFRP-S terhadap permukaan kulit beton yang dilekatkan dengan epoksi. Dapat ditunjukkan pada Gambar 7 bahwa kapasitas rekatan dari GFRP-S semakin menurun seiring dengan waktu rendamannya. Hal ini menunjukkan bahwa efektifitas perkuatan GFRP-S dipengaruhi oleh rendaman air laut yang mengakibatkan kekuatan epoksi semakin berkurang. Pada beban awal, kapasitas dari regangan GFRP-S terlihat masih stabil baik itu untuk balok GFRP-S yang tidak direndam maupun balok GFRP-S yang direndam selama 1 dan 3 bulan. Namun

pada beban dimana tulangan mulai mengalami leleh, nampak perbedaan kapasitas regangan GFRP-S dari balok yang tidak direndam terhadap balok yang direndam. Kondisi ini terlihat kecenderungan kapasitas rekatan GFRP-S pada balok yang tidak direndam lebih besar dan penurunan masing-masing kapasitas regangan dari balok GFRP-S yang direndam selama 1 hingga 3 bulan terhadap balok GFRP-S yang tidak direndam. Dari hasil pengolahan data berdasarkan nilai regangan yang dihasilkan dari masing-masing balok lentur, menunjukkan bahwa terjadi kecenderungan penurunan kapasitas rekatan dari balok uji GFRP-S rendaman 1 hingga 3 bulan. Nilai kapasitas rekatan yang dihasilkan dari BF0, BF1, dan BF3 terjadi penurunan kapasitas rekatan 6.78%.



Gambar 7. Hubungan kapasitas rekatan pada 500.000 siklus terhadap lama rendaman

Pada Gambar 7 dapat dilihat pendekatan kapasitas rekatan dari balok lentur yang semakin menurun seiring dengan lama waktu rendaman air laut. Hasil ini diambil dari beban beban berulang pada 500.000 siklus karena pada saat itu dianggap kondisi balok masih dalam keadaan stabil.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan dalam artikel ini dapat disimpulkan sebagai berikut yaitu: Terjadi kecenderungan bertambahnya lendutan serta penurunan kekakuan akibat perendaman air laut dan beban beban berulang pada balok yang direndam satu bulan (BF1) dan rendaman tiga bulan (BF3) masing-masing terhadap balok tidak direndam (BF0). Hal ini diindikasikan oleh melemahnya kapasitas rekatan GFRP-S yang dipengaruhi oleh rendaman air laut dan beban beban berulang. Efektifitas rekatan balok GFRP-S akibat rendaman air laut dan beban beban berulang cenderung turun dibandingkan balok GFRP-S yang tidak direndam air laut hingga 6.78%. Untuk menghitung nilai rekatan balok beton bertulang yang diperkuat GFRP-S akibat rendaman air laut dan beban beban berulang di dalam kolam perendaman dapat didekati dengan model persamaan $y = 0.121e^{-0.04t}$ dimana t adalah variabel waktu rendaman.

DAFTAR PUSTAKA

- ACI Committee. 2008. *ACI 440.2R-08: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP System for Strengthening Concrete Structures*. USA: Farmington Hills.
- Erniati; Tjaronge M. W; Djamaluddin, R & Sampebulu, V., 2014, Microstructure Characteristics of Self Compacting Concrete using Sea Water, *International Journal of Applied Engineering Research*, India.
- Kwandauo, R. S, 2015, *Pemodelan Laboratorium Pengaruh Rendaman Air Laut Terhadap Kapasitas Rekatan GFRP-S Pada Balok Beton Bertulang*, Tesis: Universitas Hasanuddin, Makassar.
- Li Song & Zhiwu Yu, 2015, "Fatigue Flexural, Behaviour of Corroded RC Beams Strengthened with CFRP Sheets", *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, Vol. 22, Hlm. 77-84, Indian.
- Mulheron, M. 2014, *Evaluation Of The Fatigue And Toughness Of Fiber Reinforced Concrete For Use As A New Highway Pavement Design*, dalam tesis Computing and Engineering, University of. Missouri-Kansas City.
- Sun, X; Dai, J; Wang, H & Chong Xu, 2015, "Static and Fatigue Behavior of CFRP-Strengthened RC Bridge Girders Subjected to Vehicle Overloading", *Advanced Steel Construction* Vol. 11, No. 3, hlm. 359-371.
- Tata, A; Parung, H; Tjaronge, W & Djamaluddin, R, 2015, 'Ultimate Experiment of Ruptured Concrete Beams Strengthened Using GFRP-Sheet after Fatigue Loads' dalam Abdul Razaque, *IACSIT Internasional Journal of Engineering and Technologi*, hlm 45-49, Singapore.