

DEBONDING FAILURE PADA BALOK BETON BERTULANG DENGAN PERKUATAN LEMBAR GFRP YANG DIPENGARUHI BEBAN BERULANG DAN RENDAMAN AIR LAUT

ArbainTata^{1*}, Anthonius Fredirik Raffel², Rudy Djamaluddin³

^{1*}Jurusan Teknik Sipil, Universitas Khairun, Jl. Gambesi, Ternate
arbatata@yahoo.co.id

²Jurusan Arsitektur, Universitas Khairun, Jl. Gambesi, Ternate
Frederik2465@yahoo.com

³Jurusan Teknik Sipil, Universitas Hasanuddin, Jl. Gambesi, Makassar
rudy0011@hotmail.com

Abstrak: Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis model kegagalan pada balok beton bertulang dengan perkuatan lembar GFRP yang dipengaruhi beban berulang dan rendaman air laut. Benda uji yang digunakan adalah balok beton bertulang dengan mutu beton f_c 25 MPa. Benda uji dengan perkuatan lembaran GFRP direndam dalam kolam yang berisi air laut dengan variasi waktu masing-masing hingga 12 (dua belas) bulan. Pengujian dilakukan dengan beban berulang hingga gagal. Dalam penelitian ini, dibuat benda uji balok dengan panjang tiga meter dan penampang 200 mm x 150 mm. Beton Normal (BN) jenis balok sebagai balok control, Balok beton normal yang telah diperkuat dengan GFRP (BFK) yang masing-masing dibebani dengan monotonik. Balok utama dengan perkuatan (BF) balok beton yang telah diperkuat dengan GFRP direndam dengan air laut dalam kolam perendaman, lalu masing-masing dibebani beban fatik. Pengujian beban fatik diterapkan pada beban minimum 4 kN dan beban maksimum 24 kN. Beban berulang pada balok beton dengan frekuensi 1,5 Hz. Pengujian ini menunjukkan balok BN mengalami kegagalan setelah 800.000 sedangkan BF mengalami kegagalan setelah 1.200.000 siklus. Kondisi tersebut menunjukkan terjadi peningkatan umur fatik yang signifikan akibat penguatan GFRP. Terjadi peningkatan kapasitas lentur pada benda uji yang diperkuat GFRP hingga 60% BF terhadap BN. Namun setelah adanya perendaman satu tahun terjadi penurunan kekuatan hingga 2%. Hal ini diindikasikan oleh melemahnya kapasitas rekatan GFRP-S yang dipengaruhi oleh rendaman air laut dan beban fatik. Terindikasi adanya penurunan kapasitas rekat yang menyebabkan proses debonding pada benda uji dan mempercepat terjadi kegagalan struktur.

Kata kunci: Beban berulang, *Debonding Failure*, Kapasitas lentur, Rendaman air laut.

I. PENDAHULUAN

Perbaikan struktur beton pada umumnya bertujuan untuk mengembalikan atau meningkatkan kekuatan elemen struktur agar mampu menahan beban sesuai dengan rencana. Fungsi perkuatan dengan sistem komposit FRP adalah untuk meningkatkan kekuatan atau memberikan peningkatan kapasitas lentur, geser, axial dan daktilitas, atau berbagai kombinasi diantaranya [1]. Carbon fiber reinforced polymers (CFRP) yang telah digunakan untuk perkuatan jembatan mampu meningkatkan ketahanan dan kapasitasnya [2]. Seiring dengan perkembangan teknologi bahan konstruksi dewasa ini, penggunaan bahan Fiber Reinforced Plastics (FRP) pada perbaikan dan perkuatan struktur bangunan telah dimanfaatkan dengan baik pada berbagai fungsi termasuk untuk perbaikan dan peningkatan kapasitas layan suatu struktur jembatan [3]. Bahan FRP merupakan jenis bahan dengan kelebihan utama seperti tegangan tarik yang tinggi, tidak berkarat serta ringan sehingga relative tidak menambah berat sendiri struktur [4]. Telah banyak penelitian yang telah dilakukan diterapkan dan diaplikasikan secara lebih luas untuk perbaikan atau peningkatan fungsi layan jembatan [5]. Namun demikian, pengujian kapasitas balok dengan perkuatan bahan FRP dengan melakukan penempelan pada sisi tarik dilakukan dengan menggunakan pembebanan statis secara monotonik. Kenyataannya, struktur jembatan termasuk girder-

girder jembatan pada prinsipnya memikul beban berulang akibat kendaraan yang melintas. Pada beberapa penelitian membuktikan bahwa beban berulang pada suatu struktur dapat menyebabkan keruntuhan atau kegagalan walaupun tingkat beban jauh dibawah kapasitas lentur ultimitnya [6]. Oleh karenanya, ketahanan suatu balok beton bertulang dengan perkuatan bahan FRP akibat beban fatik perlu dilakukan.

Fiber reinforced polimer (FRP) telah banyak diaplikasikan dalam peningkatan kekuatan struktur. Carbon fiber reinforced polymers (CFRP) yang telah digunakan untuk perkuatan jembatan mampu dan efektif meningkatkan ketahanan dan kapasitasnya terhadap beban statik pada balok beton Elkenel, M and [7]. Seiring dengan perkembangan teknologi bahan konstruksi dewasa ini, penggunaan bahan Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP) pada perbaikan dan perkuatan struktur beton pada girder jembatan telah dimanfaatkan dengan baik pada berbagai fungsi termasuk untuk perbaikan dan peningkatan kapasitas layan suatu struktur jembatan [8], menyajikan sebuah studi eksperimental ke dalam perilaku statik dan *fatigue* dari tiga pasang girder jembatan beton bertulang skala kecil (RC), untuk menyelidiki pengaruh kelebihan beban pada efek penguatan kelelahan dari polimer yang diperkuat serat karbon terikat eksternal (CFRP) laminasi dan memahami mekanisme akumulasi kerusakan kelelahan di girder jembatan RC yang diperkuat CFRP di bawah kendaraan yang *overloading*.

Bahan GFRP merupakan jenis bahan dengan kelebihan utama seperti tegangan tarik yang tinggi, tidak berkarat serta ringan sehingga relatif tidak menambah berat sendiri struktur seperti yang diulas dalam [9]. Pemasangan GFRP dalam perbaikan struktur lebih mudah sehingga tidak membutuhkan biaya yang besar seperti pada bahan-bahan beton konvensional sehingga akan bersifat ramah lingkungan. Sudah banyak penelitian yang telah dilakukan, diterapkan dan diaplikasikan secara lebih luas untuk perbaikan atau peningkatan kapasitas pada elemen balok lentur [10], telah melaporkan hasil penelitian tentang efisiensi penguatan balok jembatan yang telah mengalami korosi pada bagian tulangnya. Terjadi peningkatan umur fatik pada balok yang telah diperkuat dibandingkan dengan balok tanpa perkuatan.

Namun demikian, masih banyak pengujian kapasitas balok dengan perkuatan bahan GFRP dengan penempelan pada sisi tarik masih dilakukan dengan hanya menggunakan pembebanan statik secara monotonik. Namun kenyataannya, pada girder jembatan pada prinsipnya memikul beban berulang akibat kendaraan yang melintas yang justru sangat dominan dalam proses keruntuhan jembatan. Pada beberapa penelitian yang lain membuktikan bahwa beban berulang pada suatu struktur dapat menyebabkan keruntuhan atau kegagalan walaupun tingkat beban jauh di bawah kapasitas lentur ultimate [11]. Berbeda dengan Parikh, K. dan C. Modhera, D., (2012) [12], Telah menggunakan Glass Fiber Reinforced Plastics (GFRP) untuk meningkatkan kekuatan lentur pada balok. Oleh karenanya, inovasi peningkatan ketahanan suatu balok beton bertulang dengan perkuatan bahan GFRP akibat beban fatik masih perlu diteliti lebih lanjut. Oleh karena itu dalam penelitian ini digunakan lembar GFRP sebagai penguat pada balok lentur dibawah beban fatik dan static serta melihat efek dari perendaman air laut.

II. KAJIAN PUSTAKA

Pedoman prosedur dalam mendesain balok dengan perkuatan FRP yang digunakan dalam penelitian ini mengacu pada standar ACI yaitu “ACI 440.2R-08 *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP System for Strengthening Concrete Structures*”. Kondisi tegangan-regangan penampang beton yang mengalami lentur seperti pada gambar berikut ACI Committee, 2008 [9].

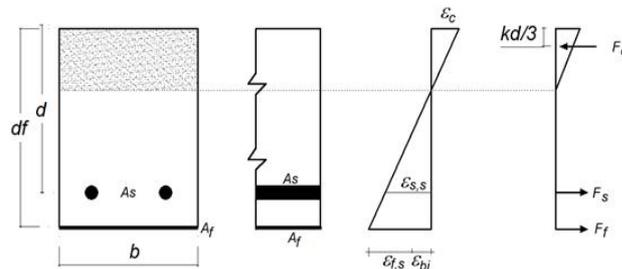
Meningkatnya lendutan pada balok beton bertulang disebabkan oleh menurunnya modulus fatik beton karena creep serta modulus beton itu sendiri. regangan creep di daerah tekan di bawah beban berulang tercatat sebagai faktor utama untuk meningkatkan defleksi dari balok

beton bertulang. Modulus fatik yang efektif dari elastisitas beton E_n diperhitungkan sebagai berikut:

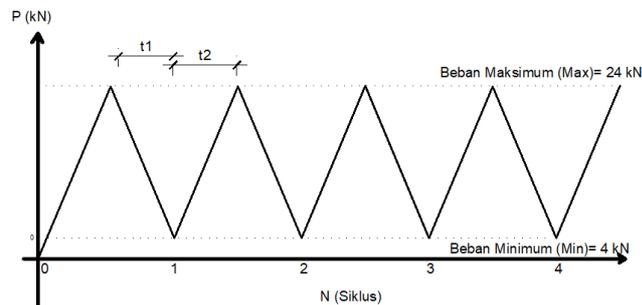
$$E_N = \frac{\sigma_{max}}{\frac{\sigma_{max}}{E_c} + E_{c,n}} \quad (1)$$

$$f_{r,N} = f_r \cdot \left(1 - \frac{\log_{10} n}{10,954}\right) \quad (2)$$

Di mana N adalah jumlah siklus, σ_{max} adalah tegangan tekan maksimum pada beton, E_c adalah modulus statis dari beton, E_n adalah regangan fatik dalam beton yang terdiri dari komponen regangan rata-rata yang dihasilkan dari tegangan rata-rata statis. dan komponen regangan fatik yang bergantung pada stress yang terjadi saat pembebanan fatik [13].



Gambar 1. Potongan, regangan, tegangan dan diagram gaya internal



Gambar 2. Beban yang diaplikasikan berupa beban berulang.



Gambar 3. Model aksi-reaksi tegangan GFRP-S setelah pembebanan

Model kegagalan yang terjadi pada balok beton yang diperkuat dengan FRP secara umum dapat dibedakan atas tiga yaitu rusak atau putusya FRP (FRP rupture), hancurnya beton pada sisi tekan (concrete crushing) dan lepasnya ikatan antara beton dengan FRP (debonding) [14].

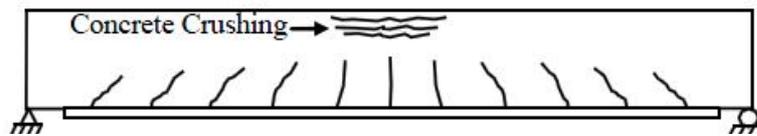
Gambar 3. secara berurutan menunjukkan model kegagalan berupa putusya lapisan GFRP yang terjadi setelah melelehnya tulangan dan hancurnya beton pada sisi tekan. Hancurnya beton pada sisi tekan terjadi sebelum tulangan tarik meleleh sehingga kondisi ini identik

dengan kondisi over-reinforced. Selain itu, terdapat pula kondisi dimana tulangan tarik telah meleleh namun disertai dengan hancurnya beton pada sisi tekan tanpa disertai putusya GFRP. Model kegagalan selanjutnya merupakan model kegagalan debonding.

Model kegagalan debonding ini merupakan model kegagalan yang paling sering dijumpai pada balok yang diperkuat FRP. Debonding merupakan lepasnya ikatan antara beton dengan FRP. Perkuatan eksternal dengan menggunakan lembaran FRP merupakan cara dan metode perkuatan yang efektif dan populer digunakan untuk konstruksi beton bertulang saat ini. Kinerja FRP ini biasanya ditentukan dan dipengaruhi oleh masalah rekatan antara FRP dengan beton. Hal ini dibuktikan dengan banyaknya dijumpai kasus kegagalan debonding pada struktur yang diperkuat dengan GFRP. Oleh karena itu masalah debonding atau lepasnya ikatan antara GFRP dengan beton ini merupakan masalah yang kritis dan sangat penting dari penggunaan material GFRP dalam hal perbaikan dan perkuatan struktur. Bidang rekatan, dalam hal ini merupakan bidang antara GFRP dengan beton, biasanya merupakan bagian terlemah dimana debonding paling sering terjadi [14].



a. Putusnya FRP dan hancurnya beton pada sisi Tarik



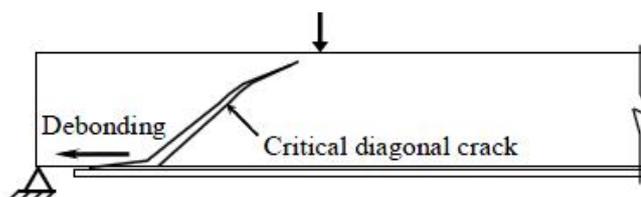
b. Putusnya FRP dan hancurnya beton pada sisi tekan



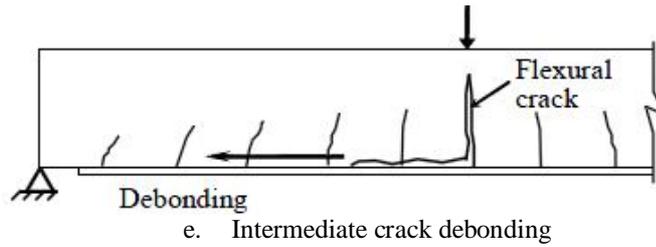
c. Cover debonding



d. FRP debonding from laminate end



d. Critical diaonal crack debonding



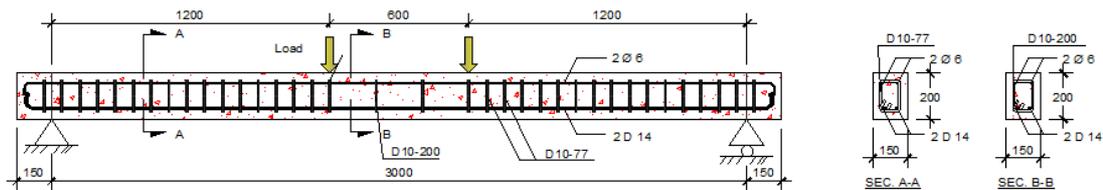
Gambar 4. Macam-macam debonding (Teng, J.G., dkk, 2007)

III. BENDA UJI

Beton yang digunakan adalah beton normal dengan kuat tekan rencana 25 MPa. Kuat tekan dan kuat lentur beton diperiksa melalui uji tekan silinder beton dan uji balok. Pengecoran dilakukan sesuai dengan standar pengecoran dan pembukaan cetakan dilakukan setelah beton berumur 3 hari dan selanjutnya dilakukan perawatan beton dengan membungkus karung basah selama 28 hari. Bahan uji balok beton bertulang direncanakan sesuai dengan prinsip perencanaan yang diatur dalam standar perencanaan. Gambar 3 memperlihatkan model detail bahan uji balok yang disiapkan untuk pengujian. Balok beton memiliki dimensi penampang 100 mm x 120 mm dengan panjang balok 3300 mm.

Balok direncanakan bertulang 2D14 sebagai tulangan tarik. 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.

Untuk mencegah terjadinya kegagalan geser maka digunakan tulangan diameter 6 mm sebagai sengkang. Dalam penelitian ini digunakan bahan FRP dengan bahan dasar serat gelas berbentuk lembaran yang disebut Glass fiber reinforced plastics-sheet (GFRP-S). Penyatuan bahan serat gelas dan epoxy resin akan membentuk penguat bahan GFRP-S pada balok. Parameter teknis GFRP-S ditunjukkan pada Tabel 1 dan parameter properties epoxy resin pada Tabel 2. Aplikasi bahan lembaran serat gelas sebagai perkuatan balok dilakukan setelah balok beton berumur 28 hari.



Gambar5. Detail benda uji balok

Tabel 1. Spesifikasi GFRP-S tipe SHE-51A

Sifat-sifat material	Hasil tes
Tegangan tarik (GPa)	3,24
Modulus tarik (GPa)	72,40
Regangan maksimum (%)	4,5
Kerapatan (gr/cm ³)	2,55
Tebal fiber (mm)	0.36

Tabel 2. *Properties epoxy resin*

Sifat-sifat material	Hasil tes
Tegangan tarik (MPa)	72,40
Modulus young (GPa)	3,18
Tegangan rekat (MPa)	2,12

Proses aplikasi untuk perkuatan balok diperlihatkan pada Gambar 5 dengan prosedur yang sesuai dengan standar. Pertama-tama permukaan balok pada sisi tarik dibersihkan dengan cara dipolis. Selanjutnya lembaran serat gelas digunting sesuai dengan ukuran yang akan digunakan dan dilumuri dengan bahan *epoxy resin*. Selanjutnya lembaran serat gelas tersebut di tempelkan pada permukaan beton setelah permukaan betonnya juga dilumuri dengan bahan epoxy. Setelah bahan lembaran telah diposisikan dengan baik pada posisinya, selanjutnya bahan lembarannya dirapatkan dan diolesi lagi dengan epoxy menggunakan kuas rol sehingga seluruh permukaan lembaran menjadi jenuh dengan bahan epoxy. Selanjutnya bahan uji didiamkan agar bahan epoxy resin mengeras dan menyatu dengan bahan serat gelas membentuk GFRP-S yang menempel pada sisi tarik (sisi bawah) balok beton bertulang.

Pengujian fatik selanjutnya dilaksanakan pada benda uji balok beton yang telah direndam selama umur perendaman 1, 3, 6 dan 12 bulan. Pada saat pengujian fatik juga diadakan pemeriksaan pola retak yang terjadi dengan menggunakan *phi gauge*. Pembebanan dilakukan pada balok dengan *two poin load* pada BN dan BF, digunakan pembebanan *fatigue*. Beban fatik mampu menyebabkan kelelahan dan gagal, dengan frekuensikonstan sebesar 1,5 hz model beban sinus Gambar 3. Dalam pembebanan sinus diterapkan beban fatik 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 perkuatan (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 perkuatan GFRP-S dan tanpa perkuatan.

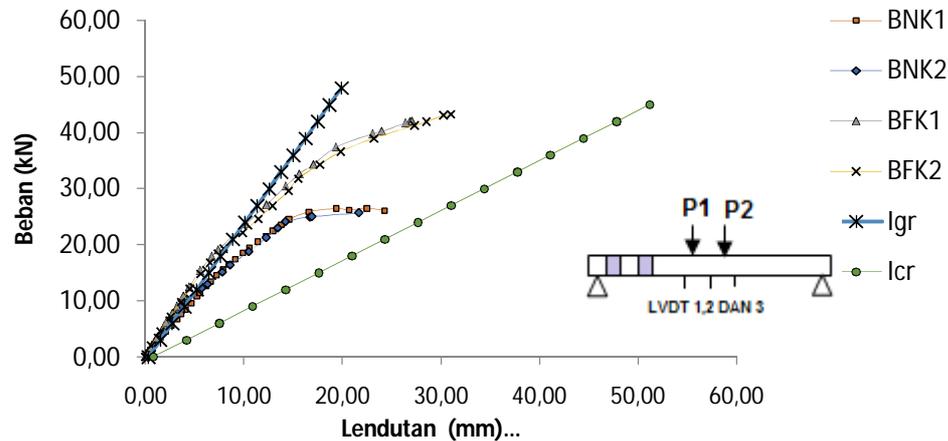
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sebelum jauh membahas menyangkut perilaku balok akibat beban fatik maka sebelumnya disajikan perilaku balok kontrol akibat beban monotonic. Hal ini dilakukan dengan tujuan untuk dapat melihat sejauh mana pengaruh beban fatik jika dibandingkan dengan pengaruh beban monotonic. Kekakuan untuk struktur merupakan suatu yang penting. Pembatasan kekakuan berguna untuk menjaga konstruksi agar tidak melendut lebih dari lendutan yang disyaratkan. Kekakuan didefinisikan sebagai gaya yang diperlukan untuk memperoleh satu unit displacement. Nilai kekakuan merupakan sudut kemiringan dari hubungan antara beban dan lendutan. Makin kaku suatu struktur makin besar nilai kekakuannya. Kekakuan balok beton merupakan fungsi dari modulus elastis (E) dan momen inersia (I). Inersia saat balok belum retak dipergunakan I_g , setelah mengalami retak dipergunakan I_{cr} , sedang nilai momen inersia efektif aktual disebut I_e yang nilainya diantara I_g dan I_{cr} .

Dalam penelitian ini disajikan 4 buah balok sebagai balok kontrol dibebani beban monotonic hingga balok mengalami retak dan hancur secara tiba-tiba seiring dengan penambahan beban. Keempat benda uji antara lain: BNK1, BNK2, BFK1 dan BFK2 dapat dilihat pada Gambar 6.

Benda uji BFK1, bahwa hubungan beban pada awal pembebanan masih berupa garis linier yang memperlihatkan perilaku elastis penuh hingga beban 8,00 kN dengan besar lendutan 3,88 mm. Peningkatan beban membuat baja tulangan mengalami leleh. Peningkatan lendutan yang besar tanpa diikuti peningkatan beban yang berarti dimana nilai beban adalah 31,24 kN, dengan lendutan sebesar 15,64 mm, kurva hubungan nonlinier menjadi jauh lebih datar dibandingkan dengan sebelumnya. Hal ini terjadi sampai balok mencapai beban maksimum

42,33 kN dan besar lendutan adalah 26,40 mm. Benda uji BFK2, perilaku elastis penuh pada beban 8,02 kN dengan besar lendutan 3,61 mm. Sejalan dengan peningkatan beban, baja tulangan mengalami leleh yang ditandai peningkatan lendutan yang besar tanpa diikuti oleh peningkatan beban yang berarti nilai beban adalah 33,65 kN dengan lendutan sebesar 15,52 mm, kurva hubungan jauh lebih datar dibandingkan dengan sebelumnya. Hal ini terjadi sampai balok mencapai beban maksimum 43,73 kN dan besar lendutan 27,29 mm.



Gambar 6. Hubungan beban dengan lendutan beton tekan untuk balok beton BNK1, BNK2, BFK1 dan BFK2.

Tabel 3. Beban dan kapasitas momen BNK dan BFK

Uraian	Analisa					
	P_{crack}	M_{crack}	P_{leleh}	M_{leleh}	$P_{Ultimit}$	$M_{Ultimit}$
BNK	5.13	2.44	25.57	16.15	26.09	16.46
BFK	8.08	3.99	30.30	18.98	42.61	26.37

Tabel 4. Beban dan kapasitas momen BNK dan BFK

Uraian	Hasil Pengujian					
	P_{crack}	M_{crack}	P_{leleh}	M_{leleh}	$P_{Ultimit}$	$M_{Ultimit}$
BNK	5.07	3.85	22.90	14.54	26.44	16.84
BFK	8.00	5.60	31.24	20.99	42.33	27.04

Dari tabel di atas menunjukkan bahwa hasil Analisa dengan hasil pengujian tidak begitu jauh berbeda, ada kenaikan signifikan pada kapasitas dari balok beton tanpa perkuatan (BF) terhadap balok beton perkuatan (BN) sebesar 60%.

Mekanisme keruntuhan balok beton

Bahan uji direncanakan untuk mengalami kegagalan dengan pola kegagalan balok bertulangan lemah (under reinforcement). Kegagalan akan dimulai dengan tulangan meleh kemudian diakhiri dengan hancurnya beton pada sisi tekan. Berdasarkan pengujian statis pada balok, maka beban maksimum untuk balok normal adalah 24 kN dan beban maksimum untuk balok dengan perkuatan GFRP-S adalah 42 kN. Dalam pengujian fatik beban maksimum yang diberikan adalah 19 kN untuk balok normal dan beban maksimum untuk balok dengan GFRP-S adalah 42 kN. Walaupun beban maksimum fatik yang diberikan

hanya sekitar 45% dari beban ultimit balok, balok mengalami kegagalan setelah dibebani berulang sebanyak 800 ribu hingga 1 juta siklus. Gambar. 7 menunjukkan kondisi balok yang mengalami kegagalan setelah pembebanan fatik. Untuk balok normal kegagalan berupa gagal 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.



a. Kegagalan tekan balok BN b. Kegagalan tekan balok BF0

Gambar 38. Pola kegagalan akibat pembebanan fatik BN dan BF0.



a. Pola kegagalan akibat pembebanan fatik (BF1).



b. Pola kegagalan akibat pembebanan fatik (BF-3).



c. Pola kegagalan akibat pembebanan fatik (BF6).



d. Pola kegagalan akibat pembebanan fatik (BF12).

Gambar 7. Pola kegagalan akibat pembebanan fatik BF1, BF3, BF6, BF12.

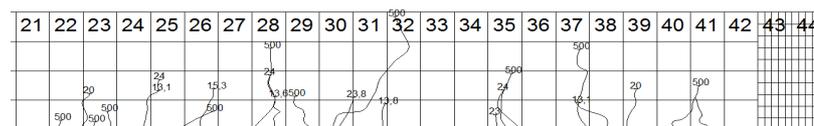
Kapasitas rekatan GFRP terhadap balok beton

Data yang dikumpulkan dari pengukur regangan digunakan untuk menggambarkan bentuk distribusi regangan. Setiap kurva diplot pada tingkat beban yang diberikan. Pada awal tahap pembebanan, kurva memiliki bentuk *nonlinier*. Regangan menurun seiring dengan bertambahnya jarak tengah bentang. Seiring peningkatan beban, grafik cenderung untuk mencapai bentuk linear. Pada tingkat beban tertentu, kurva distribusi regangan menjadi linear yang berarti sendi mulai gagal. Ini sesuai dengan hubungan kapasitas rekatan sepanjang bagian permukaan GFRP yang menerima pembebanan.

Kegagalan rekatan terjadi pada tahap yang ditunjukkan oleh distribusi regangan, Bentuk kurva regangan menjadi horizontal pada awal kegagalan rekatan yang berarti bahwa tulangan sudah tidak dapat mentransfer beban, sehingga pembebanan ditransfer ke GFRP. Strain gauge yang jauh dari yang tengah bentang membaca regangan seiring dengan meningkatnya pembebanan, ini berarti transfer beban pada GFRP bergeser sepanjang permukaan GFRP dengan beton sampai terjadi proses debonding [16]. Kegagalan yang terjadi akibat beban fatik cenderung membentuk segitiga pada tengah bentang yang dapat diklasifikasikan sebagai *Intermediate crack debonding*.

Table 4. Maximum crack width due to static and fatigue loads just before collapsing

Specimens	Live Fatigue (Cycles)	Maximum failure mode (mm) Static Loads			Maximum failure mode (mm) Fatigue Loads		
		4 kN	11.5 kN	19 kN	4 kN	14 kN	24 kN
BN	800,000	0,06005	0,16996	0,27297	-	-	-
BF0	1,230,000	-	-	-	0,02918	0,10577	0,30050
BF1	1,000,000	-	-	-	0,01267	0,06062	0,10223
BF3	1,000,000	-	-	-	0,01974	0,07316	0,12234
BF6	1,000,000	-	-	-	0,02431	0,08763	0,12770
BF12	900,000	-	-	-	0.03575	0.13041	0.22957



Gambar 8. Typical Failure due to fatigue loads on BF 500,000 cycles (BF12).

V. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian dan pembahasan dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

Ada peningkatan kapasitas momen sebesar 60 % dan peningkatan daktilitas sebesar 14% dari kekuatan lembar GFRP pada balok lentur. Terjadi penurunan kapasitas rekatan akibat beban

fatik dan perendaman air laut sebesar 2% selama 12 bulan. Kegagalan yang terjadi akibat beban fatik cenderung membentuk segitiga pada tengah bentang yang dapat diklasifikasikan sebagai ***Intermediate crack debonding***. Adanya pengaruh yang signifikan terhadap bertambahnya regangan pada desak beton serta bertambahnya regangan baja tulangan akibat beban fatik serta rendaman air laut. Indikasi perlemahan struktur akibat fatik dan rendaman air laut diindikasikan oleh terjadinya perlemahan hubungan rekatan antara kulit beton dengan lembaran GFRP dimana aksi komposit lembaran GFRP semakin melemah seiring dengan bertambahnya jumlah siklus, hal itu terindikasi oleh mekanisme debonding yang terjadi pada GFRP saat mengalami keruntuhan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Gunes, O., E. Karaca, et al. (2006). *Design of Frp Retrofitted Flexural Members Against Debonding Failures*. Proceedings of the 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, California.
- [2] Elkenel, M and John J. Myers, F. (2009), Fatigue Performance of CFRP Strengthened RC Beams Under Environmental Conditioning and Sustained Load, *Journal of Composites for Construction (ASCE)*, Vol 13, No. 2, 93-1002.
- [3] Fikri Alami, Ratna Widyawati (2010), *Studi Eksperimental Perkuatan Geser Balok Beton Bertulang Dengan GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer)*, Jurnal Rekayasa, Volume 14 No, 2: 109-124.
- [4] Barnes, R. A., et all., (1999) "Fatigue Performance of Concrete Beams Strengthened with CFRP Plates," American Society of Civil Engineers (ASCE), *Journal of Composites for Construction*, Vol 3, No 2, pp. 63-72
- [5] Masoud, K. Soudki, and T. Topper (2001). "CFRP-Strengthened and Corroded RC Beams under Monotonic and Fatigue Loads," *Journal of Composites for Construction*, vol. 5, no. 4, ASCE, November.
- [6] Vladimir A. Volnyy and Chris P. Pantelides,(1999), *Bond Length of CFRP Composite Attached to Precast Concrete Walls*, *Journal of Composites for Construction (ASCE)*, Vol. 3, No. 4; 168 – 176.
- [7] Sobhy M, Soudki, K.dan Topper, T. (2002),CFRP-Strengthened and Corroded RC Beams Under Monotonic and Fatigue Loads, *Journal of Composites for Construction (ASCE)*Vol.5; No. 4. 0228-0236.
- [8] Sun, X. Y. Dai, J. G. Wang, H. L. dan Chong Xu (2015). Static and Fatigue Behaviour of CFRP-Strengthened RC Bridge Girders Subjected to Vehicle Overloading. *Advanced Steel Construction* Vol. 11, No. 3, pp. 359-371.
- [9] 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.
- [10] Song, L & Zhiwu, Y. (2015) Fatigue Flexural Behaviour of Corroded RC Beams Strengthened with CFRP Sheets, *Indian Journal of Engineering & Material Sciences*, Vol. 22, February pp. 77-84.
- [11] Richard, A. Barnes. and Geoffrey, C. Mays. (1999), Fatigue Performance of Concrete Beams Strengthened with CFRP Plates,*Journal of Composites for Construction (ASCE)* Vol. 3. No. 2, Paper No. 18334.
- [12] Parikh, K. dan C. D. Modhera. (2012). Application of GFRP on preloaded retrofitted beam for enhancement in flexural strength, *International Journal of Civil and Structural Engineering*,
- [13] C. Papakonstantinou, G. M. Petrou, F. K. Harries A. (2001)., Fatigue Behavior of RC Beams Strengthened With GFRP-Sheet, *J. of Composites for Construction*, **5**, 4, pp.246-252
- [14] Lam, L. Hussain, O. Joyklad, P. and Pim, A. (2015). Behaviour of RC Deep Beams Strengthened in Shear using Glass Fiber Reinforced Polymer with Mechanical Anchors, International Conference on Environment and Civil Engineering (ICEACE'2015) April 24-25, Pattaya (Thailand) Volume 2, No 4, pp. 1070-1080.
- [15] Teng, J.G., Chen, J.F, (2007), "Debonding Failures of RC Beams Strengthened with Externally Bonded FRP Reinforcement: Behaviour and Modelling" presented at Asia-Pasific Conference on FRP in Structures (APFIS 2007).
- [16] A. Tata, R. Djamaluddin, H. Parung, W. Tjaronge(2015), Ultimate Experiment of Ruptured Concrete Beams Strengthened Using GFRP-Sheet after Fatigue Loads, *J. of Eng. and Tech., Constr. and Env. Eng. (IACSIT)*, **7**, 1, pp. 45-49.