

EFEKTIVITAS ANGKUR EPOKSI TERHADAP KEKANGAN EKSTERNAL BALOK BETON BERTULANG DENGAN PERKUATAN CFRP

Dinar Gumilang Jati^{1,*}, Junaedi Utomo¹, Felix Adi Tanudjaja¹, Han Ay Lie²

¹Departemen Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, 55281, Indonesia

²Program Studi Teknik Sipil, Universitas Diponegoro, 50275, Indonesia

*Corresponding authors: dinar.gumilang@uajy.ac.id

Abstract: Externally Bonded Carbon Fiber Reinforced Polymer (EB-CFRP) with U-wrap is one of the alternative external strengthening of modern reinforced concrete beams, which has been proven effective in significantly increasing flexural and deformation capacities. Although quite effective in increasing the structural capacity, external reinforcement needs to be studied further about its failure behavior, the avoided failure is called debonding, an interface bond failure between the FRP composite material and the concrete material. Epoxy has a fairly high material resistance, but its use as a reinforcing composite bonding material needs further investigation. Adding epoxy anchors at the ends of CFRP can mobilize the tensile strength in CFRP, eliminating or delaying debonding failure. Epoxy anchors (epoxy-filled grooves) are expected to be effective and flexible for application to various forms of components of reinforced concrete structures that have been reinforced with EB-CFRP. Currently, there are no standards and guidelines for applying FRP anchors. However, research has been conducted on the failure pattern of FRP anchors with U-style wrapping which can avoid debonding so that failure with FRP rupture can be achieved. This study examines the effectiveness of epoxy anchorage in improving the external strengthening of reinforced concrete beams with EB-CFRP reinforcement. The behavior of epoxy anchors in reinforced concrete beams with EB-CFRP will be investigated through experimental tests.

Keywords: Externally Bonded Carbon Fiber Reinforced Polymer (EB-FRP), flexural capacity, beam deformation, epoxy anchors

Abstrak: Perkuatan eksternal menggunakan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) dengan pembungkusan tipe U (*U-wrap*) merupakan salah satu metode alternatif pengekangan eksternal balok beton bertulang modern, yang teruji efisien dalam meningkatkan kapasitas lentur serta deformasi balok. Meskipun demikian metode *Externally Bonded Carbon Fiber Reinforced Polymer* (EB-CFRP) tersebut perlu dipelajari lebih lanjut, terutama hal yang berkaitan dengan perilaku kegagalannya, dimana kegagalan yang dihindari merupakan kegagalan *debonding*, yaitu kegagalan yang terjadi pada epoksi jalinan antar muka material komposit FRP dengan material betonnya. Epoksi memiliki ketahanan material yang cukup besar, namun penggunaannya sebagai material ikat komposit perkuatan perlu diteliti lebih lanjut. Penambahan angkur epoksi pada ujung CFRP dapat memobilisasi kuat tarik didalam CFRP, sehingga dapat menghilangkan atau menunda kegagalan *debonding*. Angkur epoksi berbentuk coakan yang diisi material epoksi diperkirakan efisien serta fleksibel untuk diaplikasikan pada bermacam bentuk dan kondisi komponen struktur beton bertulang yang diperkuat dengan EB-CFRP. Saat ini standar dan panduan untuk aplikasi angkur FRP belum ada meskipun sudah ada penelitian tentang pola kegagalan angkur FRP dengan pembungkusan model U yang dapat menghindari *debonding* sehingga kegagalan dengan FRP *rupture* dapat dicapai. Penelitian ini menguji efektivitas angkur epoksi untuk meningkatkan kekangan eksternal pada balok beton bertulang dengan perkuatan EB-CFRP. Perilaku angkur epoksi pada balok beton bertulang yang telah diperkuat dengan EB-CFRP akan diteliti melalui uji eksperimental.

Kata kunci: : *Externally Bonded Carbon Fiber Reinforced Polymer* (EB-FRP), kapasitas lentur, deformasi balok, angkur epoksi

PENDAHULUAN

Externally Bonded Carbon Fiber Reinforced Polymer (EB-CFRP) dengan pembungkusan bentuk U (*U-wrap*) merupakan salah satu alternatif pengekangan eksternal balok beton bertulang modern, yang terbukti efektif untuk meningkatkan kapasitas lentur dan deformasi balok beton bertulang secara signifikan (Zeng dkk, 2020). Meskipun cukup efektif dalam meningkatkan kapasitas struktur, perkuatan eksternal perlu dipelajari lebih lanjut tentang perilaku-perilaku kegagalannya, dimana kegagalan yang ingin dihindari adalah *debonding* yaitu kegagalan epoksi antara ikatan antar muka material komposit FRP dengan material betonnya. Epoksi mempunyai ketahanan material yang cukup tinggi, akan tetapi penggunaannya sebagai material ikat komposit perkuatan perlu diteliti lebih lanjut (Aylie, 2018).

Beberapa penelitian terkait telah mencoba menghindari ataupun menunda kegagalan *debonding* ini dengan menambahkan angkur pada ujung-ujung CFRP (Niemitz dkk, 2010). Saat ini standar dan panduan untuk aplikasi angkur FRP belum ada, meskipun sudah ada penelitian tentang pola kegagalan angkur FRP dengan pembungkusan model U yang dapat menghindari *debonding* sehingga kegagalan dengan FRP *rupture* dapat dicapai. Penggunaan angkur tertanam atau dengan penjangkaran seperti tipe fan dan stitch diketahui cukup efektif dalam mengatasi kegagalan tersebut, akan tetapi dalam aplikasinya mempunyai kendala tersendiri, dimana memerlukan metode pelaksanaan yang cukup kompleks dan adanya permasalahan ruang kerja yang terbatas jika tipe ini akan diterapkan pada suatu perkuatan struktural lapangan yang riil.

Dengan latar belakang permasalahan di atas, penelitian ini menawarkan tipe angkur baru yaitu angkur epoksi, sebagai alternatif pengankuran *Externally Bonded Carbon Fiber Reinforced Polymer* (EB-CFRP) dengan pembungkusan bentuk U (*U-wrap*), untuk mencegah kegagalan *debonding* sepanjang ujung-ujung perkuatan eksternal *U-wrap*. Pemilihan epoksi sebagai angkur didasari pada mutu materialnya yang cukup tinggi dan juga sekaligus digunakan sebagai elemen perekat material komposit FRP dan beton. Angkur epoksi ini berupa coakan yang diisi epoksi yang diterapkan sepanjang ujung pembungkusan FRP *U-wrap*. Berdasarkan bentuk dan material yang digunakan, angkur ini

diprakirakan efektif dan fleksibel untuk diaplikasikan pada berbagai bentuk komponen dari struktur beton bertulang yang telah diperkuat dengan EB-CFRP. Perilaku dan kapasitas angkur epoksi akan diteliti melalui pengujian eksperimental di laboratorium. Spesimen uji berupa balok beton bertulang yang diperkuat eksternal dengan FRP (EB-CFRP) dengan pembungkusan bentuk N (*U-wrap*). Pengujian lentur balok dilakukan dengan penerapan dua titik pembebanan (*two-point loading*) pada tengah bentang, sebagai representasi momen maksimum dan menghindari kegagalan geser pada balok. Pengamatan pengujian dilakukan terhadap beban puncak, deformasi, regangan material dan pola kegagalan yang terjadi.

Koutas dkk (2013) melakukan penelitian eksperimental tentang efektivitas berbagai variasi angkur jenis fan tertanam pada perkuatan *fiber reinforced polymer* (FRP) berbentuk *U-wrap* dalam rangka meningkatkan kapasitas geser balok-T beton bertulang. Pada penelitian tersebut digunakan CFRP string sebagai angkur fan, dengan variasi jarak angkur dan sudut penjangkaran pada beton. Hasil eksperimental menunjukkan angkur fan tertanam dapat meningkatkan kapasitas geser sampai dengan 100%. Angkur fan yang dijangkarkan dengan sudut kemiringan menunjukkan efektivitas yang lebih besar dibandingkan angkur yang tertanam secara horizontal. Penjangkaran angkur dirasa meningkatkan secara substansial regangan efektif dalam perkuatan eksternal berbentuk *U-wrap*, sehingga dapat secara signifikan meningkatkan kapasitas geser balok tersebut.

Eslami dkk (2020) mengusung angkur jahit (*stitching anchor*) untuk meningkatkan kapasitas geser balok beton bertulang yang diperkuat menggunakan FRP dengan bentuk *U-wraps*. Penelitian dilakukan secara eksperimental terhadap perilaku angkur ini. Angkur jahit diharapkan dapat meningkatkan kapasitas geser balok yang diperkuat eksternal dengan FRP, sekaligus mencegah kegagalan *debonding* yang seringkali terjadi pada penerapan perkuatan eksternal dengan bentuk *U-wrap*. Pengujian eksperimental dilakukan dengan variasi sudut penjangkaran angkur dan penggunaan coakan sebagai perletakan angkur jahit. Pengujian lentur dilakukan dengan menerapkan dua titik beban (*two-point loading*) pada balok specimen yang dibuat dengan skala 1:1, dan dilakukan pengamatan terhadap beban puncak dan defleksi balok. Hasil pengujian menunjukkan angkur

yang paling efektif merupakan angkur jahit horizontal yang diberi perkuatan coakan yang ditutup epoksi. Angkur tersebut dapat meningkatkan kapasitas beban puncak sebesar 38% dan peningkatan defleksi balok sebesar 207%.

Yuan dkk (2020) menawarkan jenis angkur FRP baru, yaitu berupa angkur lubang epoksi. Pada penelitian ini menitikberatkan pada peningkatan ikatan antar muka (*bonding*) antara FRP sheet dan beton sebagai material komposit. Pengujian yang dilakukan merupakan uji geser langsung terhadap angkur epoksi, dengan detail spesimen uji berupa FRP sheet yang diangkurkan pada balok beton menggunakan lubang angkur yang diisi dengan epoksi. Variasi benda uji meliputi kedalaman lubang, ukuran diameter, jumlah angkur dan spasi angkur epoksi. Angkur lubang epoksi yang diusulkan ini dirasa mudah dalam pengerjaannya dan sangat fleksibel untuk diaplikasikan dalam suatu rekayasa perkuatan struktur. Bagian tertanam dari penjangkaran epoksi di beton membentuk ikatan mandiri untuk meningkatkan tahanan geser antarmuka. Hasil pengujian menunjukkan peningkatan tegangan geser puncak rata-rata sebesar 78,10%. Kegagalan geser yang terjadi berupa kombinasi dari kegagalan epoksi dan terlepasnya substrat material beton. Ukuran kedalaman penjangkaran dan diameter lubang angkur secara signifikan mempengaruhi ketahanan gesernya.

Baggio dkk (2014) melakukan penelitian mengenai perkuatan geser pada balok beton bertulang yang diperkuat dengan FRP, dengan variasi sistem pengangkur. Pada penelitian ini digunakan perkuatan geser bentuk *U-wrap* menggunakan tiga material FRP sheet yaitu *carbon FRP* (CFRP), *glass FRP* (GFRP) dan *fiber reinforced cementitious matrix* (FRCM). Dalam rangka memperkuat FRP pembungkus *U-wrap* balok, digunakan angkur FRP dua sisi dengan lubang menerus menggunakan variasi material CFRP dan GFRP. Pengujian lentur dilakukan dengan penerapan dua titik pembebanan (*two-point loading*), dengan pengamatan beban puncak dan defleksi yang terjadi pada balok. Semua spesimen menunjukkan kekakuan lentur yang serupa selama pengujian, terlepas dari jenis material, bentuk angkur maupun dimensi balok. Dari hasil pengujian disampaikan bahwa perkuatan *U-wrap* dengan material CFRP meningkatkan kapasitas balok yang lebih besar dibandingkan material yang lain. Sementara itu penggunaan material GFRP untuk angkur

menunjukkan hasil yang lebih baik dibandingkan material CFRP.

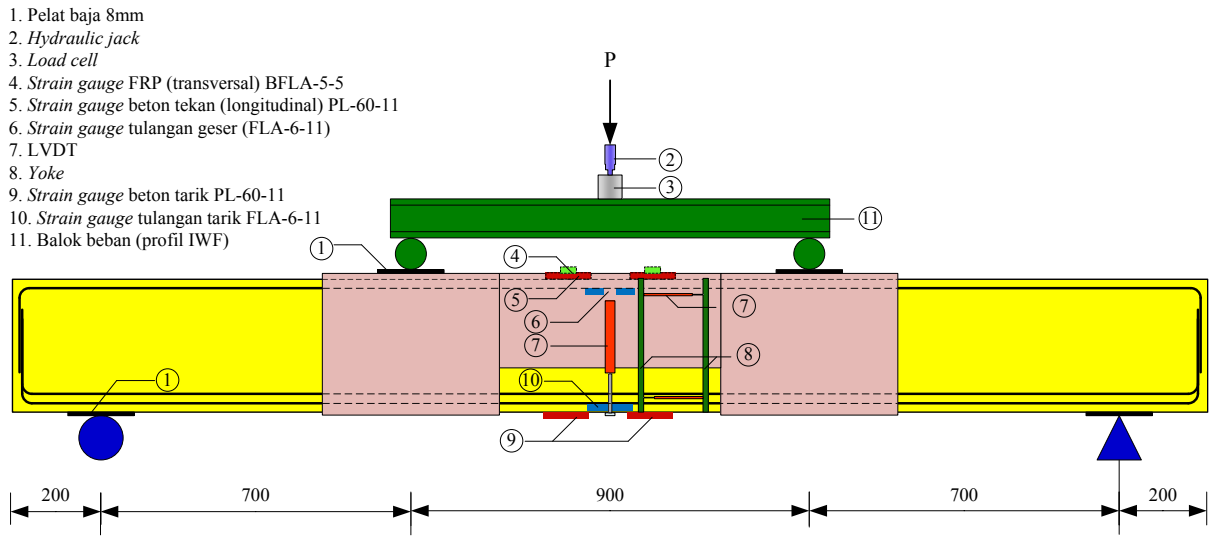
Penggunaan angkur dalam aplikasi EB-CFRP juga telah diamati secara numerik dan dapat meningkatkan performa perkuatan eksternal terlebih dalam mengatasi debonding yang merupakan kegagalan yang mendominasi penggunaan material perkuatan CFRP. (Biscaia 2014, Lee 2019)

Pada penelitian ini perkuatan eksternal CFRP menggunakan material *Sikawrap-231C*, dengan ketebalan lembaran sebesar 0,129 mm, kuat tarik ultimit mencapai 4300 MPa dan modulus elastis sebesar 225.000 MPa. Sementara perekat epoksi menggunakan *Sikadur-330* (PT Sika Indonesia, 2017).

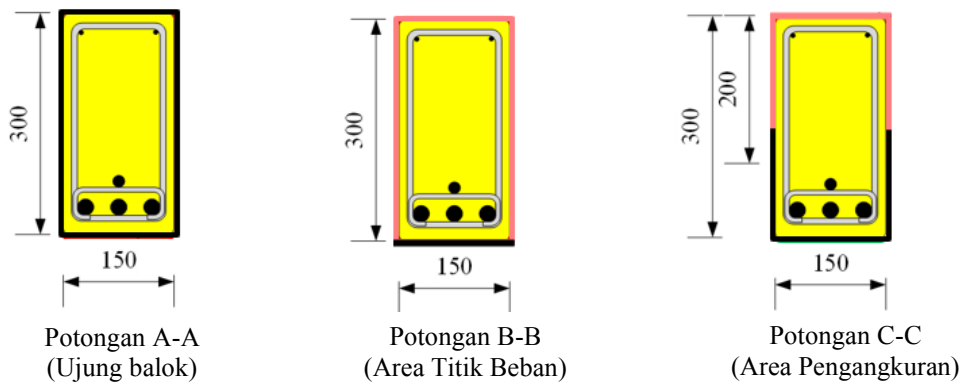
HASIL DAN PEMBAHASAN

Benda uji dalam penelitian ini berupa balok beton bertulang dengan lebar 150 mm, tinggi 300 mm, dan panjang 2700 mm yang direncanakan dengan asumsi tulangan tarik berlebih (*over-reinforced*) dengan mutu beton rencana 20 MPa. Pengujian dilakukan pada balok kontrol dengan *setting-up* balok awal dapat dilihat pada gambar 1 dan detail penulangan balok kontrol dapat dilihat pada gambar 2. Benda uji balok diberi perkuatan FRP *U-wrap* pada area desak dan diterapkan kondisi *over-reinforced* pada area tarik tanpa perkuatan FRP, untuk melihat pengaruh angkur epoksi terhadap kekangan beton. Untuk meningkatkan kekangan eksternal balok beton bertulang, ditambahkan angkur epoksi pada ujung-ujung CFRP agar dapat memobilisasi kuat tarik dalam CFRP sehingga dapat menghilangkan atau menunda kegagalan *debonding*. Angkur epoksi berupa coakan yang diisi dengan epoksi dengan detail pemasangan seperti pada gambar 3.

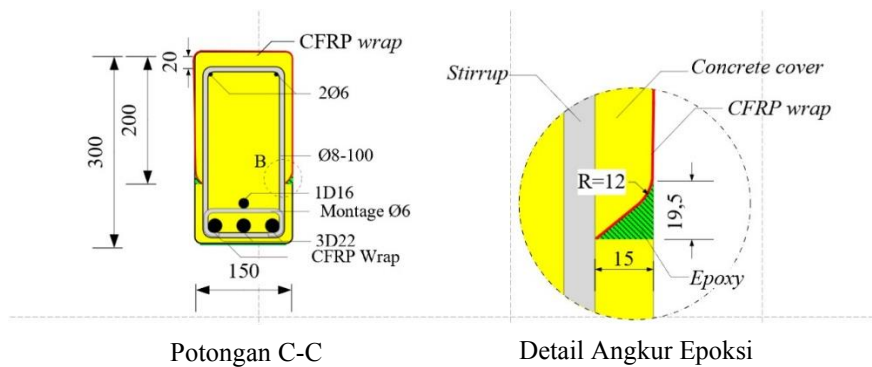
Dari hasil uji silinder beton, didapatkan kondisi mutu beton yang ada melebihi kuat beton rencana, dengan kuat tekan sebesar 35 MPa. Dengan kondisi mutu beton yang meningkat secara signifikan, dilakukan uji pendahuluan pada balok kontrol untuk memverifikasi asumsi balok *over-reinforced*. Dari hasil pengujian balok kontrol didapatkan tulangan tarik telah mengalami kelelahan ($\epsilon_t > \epsilon_y$), seperti yang terlihat melalui grafik hubungan beban dan regangan pada gambar 4, sehingga dalam hal ini asumsi *over reinforced* tidak terjadi.



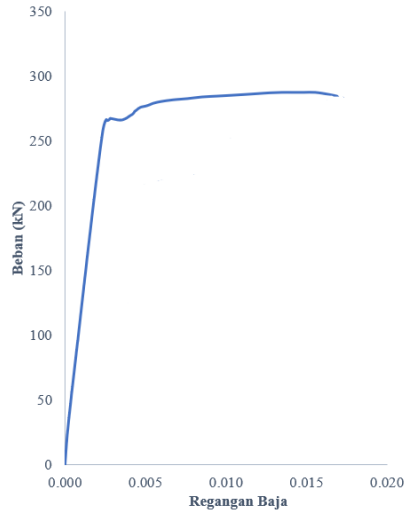
Gambar 1. Setting-up balok awal



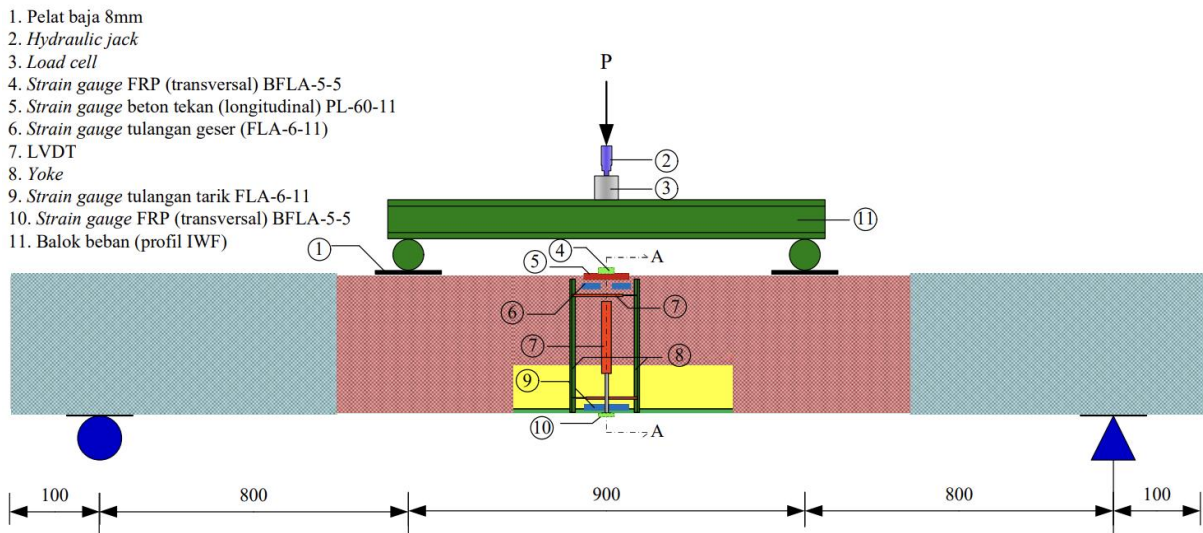
Gambar 2. Detail Penulangan Balok Kontrol



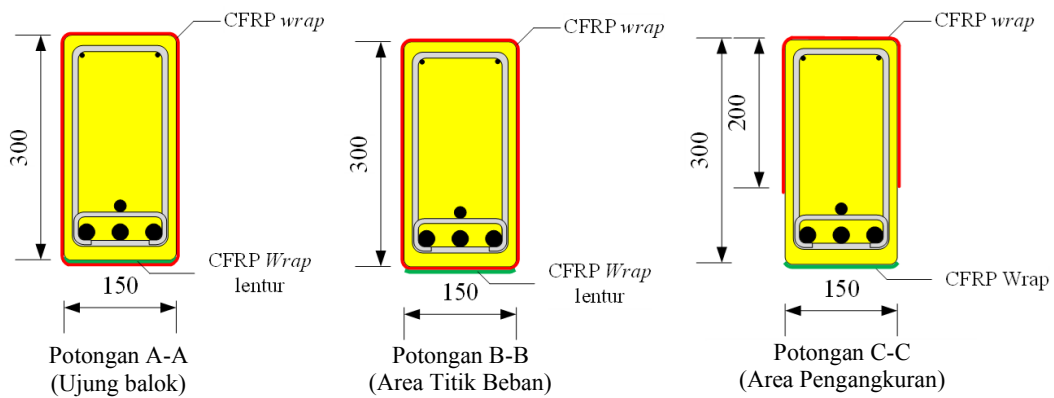
Gambar 3. Detail Pemasangan Angkur Epoksi



Gambar 4. Hubungan Beban dan Regangan Pada Balok Kontrol



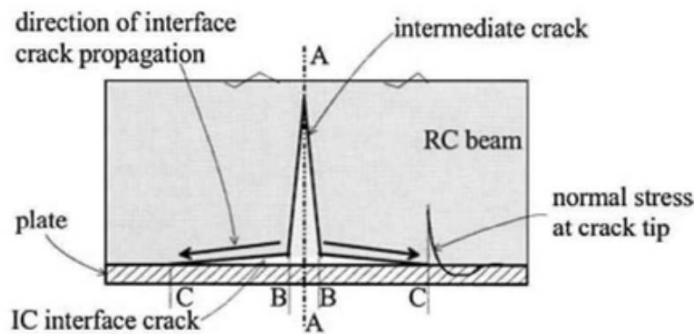
Gambar 5. Setting-up Balok Perkuatan CFRP



Gambar 6. Detail Perkuatan CFRP Tanpa Angkur

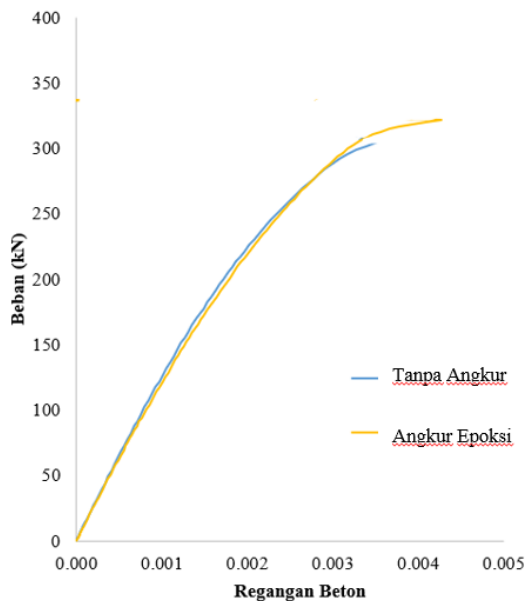
Penyesuaian ulang pada benda uji eksperimen dilakukan dengan menerapkan mutu beton aktual sebesar 35 MPa dan melakukan perkuatan eksternal tambahan. Untuk tetap dapat memberikan efek kekangan pada angkur epoksi maka dilakukan perkuatan lentur eksternal menggunakan CFRP di bagian dasar balok, hal ini dilakukan untuk menurunkan garis netral balok, sehingga dapat memperluas area tekan atau *stress block* pada balok. Perkuatan dengan lilitan penuh CFRP juga dilakukan pada ujung-

ujung tumpuan balok untuk menghindari kegagalan geser. Penyesuaian benda uji ini dapat dilihat pada gambar 5 dan gambar 6. Pengujian dengan metode *load-control* dilakukan pada spesimen baru yang telah diberikan perkuatan lentur dengan CFRP tanpa angkur dan dengan angkur epoksi gambar 3. Saat beban dinaikan secara bertahap, terjadi retak lentur dan retak geser yang menjadi pemicu terjadinya *intermediate crack* antara ikatan beton dengan CFRP seperti pada ilustrasi gambar 7.



Gambar 7. Mekanisme *Intermediate crack* (Oehler, Serasino 2009)

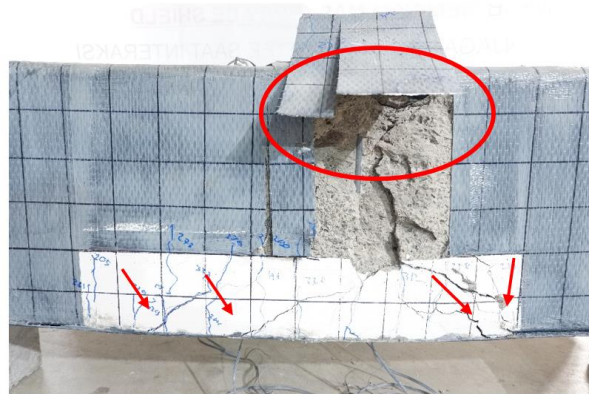
Intermediate crack menyebabkan disintegrasi pada tampang balok, akibat dari lepasnya CFRP lentur yang dibuktikan dengan grafik beban-regangan beton tekan yang relatif sama antara balok dengan angkur epoksi maupun tanpa angkur, seperti terlihat pada gambar 8 dan diperkuat dengan gambar pola *retakan intermediate crack* pada gambar 9 dan 10.



Gambar 8. Grafik Beban – Regangan Beton Tekan

Intermediate crack yang terjadi memicu *debonding* awal pada CFRP yang menyebabkan disintegrasi pada tampang balok dan mengakibatkan kegagalan angkur epoksi (Ombres, 2010). Sehingga, efektivitas angkur epoksi terhadap kekangan beton tidak dapat sepenuhnya dievaluasi pada penelitian ini, didukung dengan diagram beban puncak yang dapat ditahan pada balok tanpa angkur dan dengan angkur epoksi pada gambar 12.

Adanya perkuatan lentur FRP di dasar balok pada spesimen baru (gambar 7) telah menimbulkan komplikasi, sehingga efektivitas angkur epoxy tidak dapat sepenuhnya dikuantifikasi. Komplikasi timbul akibat adanya *intermediate crack* yang memicu *debonding* antara FRP lentur dengan beton pada area tarik. meskipun perkuatan lentur FRP tidak lagi melekat pada dasar balok, tetapi perkuatan lentur FRP *wrap* tetap berpengaruh terhadap kapasitas lentur balok, dengan bekerja sebagai batang tarik pada dasar balok. Hal tersebut terjadi karena ujung perkuatan lentur FRP yang diangkur oleh *wrap* FRP. Berkaitan dengan kondisi tersebut maka diperlukan penelitian lanjutan terhadap spesimen yang tidak memakai perkuatan lentur *wrap* pada dasar balok.



Gambar 9. Kegagalan spesimen balok tanpa angkur

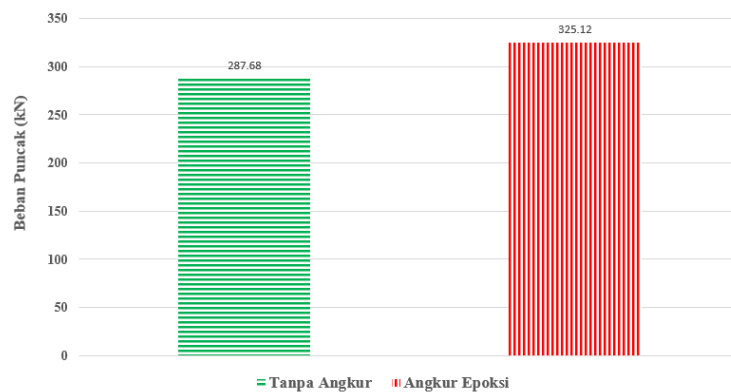


Gambar 10. Kegagalan spesimen balok dengan angkur epoksi

Pada semua benda uji juga terjadi kegagalan *debonding* pada perkuatan *U-wrap* FRP, baik pada benda uji tanpa angkur maupun dengan angkur epoxy. Terlihat pada gambar 9 dan gambar 10, kegagalan *debonding* terjadi pada substrat beton, hal ini diperkirakan akibat dari kuat tarik beton yang jauh lebih rendah daripada epoksi. Dimana kuat tarik beton sebesar 3,2MPa, sementara kuat epoksi mencapai 30MPa.

Berdasarkan hasil pengujian terlihat bahwa beban puncak yang dapat ditahan oleh balok dengan angkur epoksi mengalami peningkatan bila dibandingkan dengan balok tanpa

angkur, meskipun nilainya tidak signifikan, dimana balok tanpa angkur dapat menerima beban 287,68 kN, sementara balok dengan angkur epoksi 325,12 kN. Berdasarkan hasil dan pengamatan dalam studi eksperimental tersebut diperlukan penelitian lanjutan sesuai rencana awal spesimen, yaitu tanpa menggunakan perkuatan lentur pada bagian dasar balok yang mengalami tarik, sehingga masalah *debonding* awal CFRP pada bagian tarik balok yang menyebabkan komplikasi dalam interpretasi hasil penelitian tidak terjadi.



Gambar 12. Perbandingan Beban Puncak Balok Tanpa Angkur dan dengan Angkur Epoksi

KESIMPULAN

Penggunaan angkur epoksi sebagai perkuatan eksternal balok beton bertulang memberikan efek kekangan yang lebih besar dibandingkan dengan pembungkusan *U-wrap* secara konvensional. Hal ini didasarkan pada hasil pengujian eksperimental, dimana kapasitas beban balok bertulang dengan aplikasi angkur epoksi lebih besar daripada balok beton bertulang tanpa angkur epoksi.

Efektivitas angkur epoksi, dalam meningkatkan kekangan beton desak saat diuji dalam kondisi balok *over reinforced* (tulangan tarik berlebih) belum dapat dievaluasi sepenuhnya dikarenakan pada saat pengujian spesimen dilakukan, terjadi retak lentur dan geser yang menyebabkan *intermediate crack* pada dasar balok yang memicu *debonding* awal pada CFRP sehingga menyebabkan disintegrasi pada tampang balok yang diikuti dengan lepasnya angkur epoksi.

Karena kegagalan *U-wrap* terjadi pada substrat beton, bukan pada epoksi atau FRP, maka dari penelitian ini dapat diambil kesimpulan bahwa pada kondisi *over reinforced*, mutu beton tidak bisa ditingkatkan dengan mobilisasi kekangan dari *U-wrap*.

DAFTAR PUSTAKA

- ACI 440.2R-08. (2008). *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*. American Concrete Institute, Farmington Hills
- Aylie H., Gan, B. S., Budipriyanto, A. (2018). Shear-bond behavior of fiber reinforced polymer (FRP) rods and sheets. *MATEC Web of Conferences Vol. 195*
- Baggio, D., Soudki, K., and Noël, M. (2014). Strengthening of shear critical RC beams with various FRP systems. *Constr. Build. Mater.*, 66:634-644. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.05.097
- Biscaia, H.C., Micaelo, R., Teixeira, J., Chastre, C. (2014). Numerical analysis of FRP anchorage zones with variable width. *Composites Part B: Engineering*, 67:410-426. DOI: 10.1016/j.compositesb.2014.07.031
- Eslami, A., Moghavam, A., Shayegh, H. R., and Ronagh, H. R. (2019). Effect of FRP stitching anchors on ductile performance of shear-deficient RC beams retrofitted using FRP U-wraps. *Structures*, 23:407-414. DOI:10.1016/j.istruc.2019.11.007
- Koutas, L. and Triantafillou, T. C. (2012). Use of anchors in shear strengthening of reinforced concrete T-beams with FRP. *Proc. 6th Int. Conf. FRP Compos. Civ. Eng. CICE 2012*.
- Lee, J., Lopez, M.M. (2019). Frictional bond-slip model for the concrete-FRP interface under the FRP U-wrap region. *Construction and Building Materials*, 194:226-237. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2018.11.018
- Niemitz, C.W., James, R., and Breña, S.F. (2010). Experimental Behavior of Carbon Fiber-Reinforced Polymer (CFRP) Sheets Attached to Concrete Surfaces Using CFRP Anchors. *Journal of Composites for Construction*, 14(2). DOI:10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000064
- Shomali, A., Mostofinejad, D., and Esfahani, M. R. (2020). Experimental and numerical investigation of shear performance of RC beams strengthened with FRP using grooving method. *Journal of Building Engineering*, 31(2):101409. DOI:10.1016/j.job.2020.101409
- Oehlers, D. J. and Seracino, R. (2004). Design of FRP and Steel Plated RC Structures - Retrofitting Beams and Slabs for Strength, Stiffness and Ductility. *Elsevier Science*.
- Ombres, L. (2010). Prediction of intermediate crack debonding failure in FRP-strengthened reinforced concrete beams. *Composite Structures*, 92(2):322-329. DOI:10.1016/j.compstruct.2009.08.003
- Tudjono, S., Lie, H. A., and Hidayat, B. A. (2015). An experimental study to the influence of fiber reinforced polymer (FRP) confinement on beams subjected to bending and shear. *Procedia Eng*, Vol. 125.
- Yuan, C., Chen, W., Pham, T. M., Hao, L., Chen, L., and Zhang, M. (2020). New epoxy anchor for better bonding between FRP sheets and concrete. *Constr. Build. Mater.*, 248:118628. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.118628.

Zeng, Y., Li, X., Ahmed, A. H. A., Wu, G. (2020). Comparative study on the flexural strengthening of RC beams using EB CFRP sheets, NSM CFRP bars, P-SWRs, and their combinations. *Advances in Structural Engineering*, 24:1009-1023.

PT. Sika Indonesia. (2017). *SikaWrap-231C@ and Sikadur-330@Product Data Sheets*, <https://idn.sika.com/in/documents-resources/pds.html>.