

PERILAKU TEGANGAN-REGANGAN BETON YANG TERBUAT DARI AGREGAT RINGAN BUATAN YANG DIPERKUAT DENGAN CARBON FIBER REINFORCED POLYMER

Butje Alfonsius Louk Fanggi^{1*}, Budi Suswanto², Yuyun Tajunnisa³, Ahmad Basshofi Habieb², Jusuf Wilson Meynerd Rafael¹, Yudhistira Habibillah Asy'ari³, Adetya Rijiyawanto³, Galih Syifaul Ummah²

¹⁾ Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Kupang
Jl. Adi Sucipto-Penfui, Kupang 85111

²⁾ Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Perencanaan, dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Jl. Raya ITS Keputih, Sukolilo, Surabaya 60111

³⁾ Departemen Teknik Infrastruktur Sipil, Fakultas Vokasi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Jl. Manyar 8, Surabaya 60111

*)email: butje.loukfanggi@pnk.ac.id

Diterima : 09 November 2023
Direvisi : 16 November 2023

Disetujui : 21 November 2023
Diterbitkan : 30 November 2023

Abstract: *This paper describes the findings of a research study aimed at evaluating the impact of various parameters on the stress-strain behavior of concrete composed of artificial lightweight aggregates with rectangular cross-sections. The factors that were evaluated include the number of fiber-reinforced polymer (FRP) layers, the compressive strength of the concrete, and the cross-sectional shape of the concrete. A total of twenty-two test specimens were fabricated, wrapped with Fiber Reinforced Polymer (FRP), and subjected to concentric compressive loading for experimental evaluation. The experimental findings indicate that Fiber Reinforced Polymer (FRP) demonstrates an excellent wrapping technique for lightweight concrete composed of lightweight aggregate. In addition to this, the test findings indicate a positive correlation between the number of fiber-reinforced polymer (FRP) layers employed and the resultant ultimate stress and strain shown by concrete composed of artificial lightweight aggregate. The test results additionally demonstrate a clear relationship between the rise in ultimate stress and the compressive strength of concrete, while showing an inverse relationship with the ultimate strain observed. Similarly, the test results indicate that the utilization of Fiber Reinforced Polymer (FRP) wrapping has more efficacy when applied to round cross-sectional shapes as opposed to rectangular cross-sectional shapes.*

Keywords : *Fiber Reinforced Polymer, Artificial Lightweight Aggregate, Stress-strain, square cross section*

Abstrak: Tulisan ini menyajikan hasil tes dari riset yang sedang dilakukan untuk menilai efek dari beberapa parameter terhadap perilaku tegangan-regangan beton yang terbuat dari agregat ringan buatan berpenampang segi empat. Parameter yang dinilai adalah jumlah lapis FRP, kuat tekan beton, dan bentuk penampang beton. 22 buah benda uji dicetak, dibungkus dengan FRP, dan dites hingga hancur dengan menggunakan pembebanan tekan konsentrik. Hasil tes menunjukkan bahwa beton ringan yang terbuat dari agregat ringan dibungkus secara efektif oleh FRP. Selain itu, hasil tes juga menunjukkan bahwa semakin banyak lapis FRP yang digunakan, maka semakin besar pula tegangan ultimit dan regangan ultimit yang dihasilkan oleh beton yang terbuat dari agregat ringan buatan. Hasil tes juga mengindikasikan bahwa meningkatnya tegangan ultimit berbanding lurus dengan meningkatnya kuat tekan beton namun berbanding terbalik dengan regangan ultimit yang terjadi. Demikian juga, hasil tes menunjukkan bahwa pembungkusan dengan FRP lebih efektif dilakukan pada penampang yang berbentuk bulat dibandingkan dengan penampang yang berbentuk segi empat.

Kata kunci : Fiber Reinforced Polymer, Agregat ringan buatan, tegangan-regangan, penampang segi empat.

1. PENDAHULUAN

Beton ringan merupakan beton dengan berat isi kurang dari 1920 kg/m³ [1]. Dilihat dari beratnya, beton ringan cocok diaplikasi pada daerah rawan gempa karena penggunaan beton ini dapat mereduksi berat bangunan sehingga beban gempa yang bekerja pada struktur bangunan tersebut dapat berkurang [2,3].

Selain memiliki berat yang 30% kurang dari beton normal, beton ringan memiliki kelebihan lain yang tidak dimiliki oleh beton normal, seperti tahan panas dan juga tahan terhadap lingkungan agresif [2]. Akan tetapi beton ini memiliki beberapa kelemahan, seperti kekuatan dan daktilitasnya rendah jika dibandingkan dengan kekuatan dan daktilitas beton normal [3-5].

Salah satu cara yang dapat dilakukan untuk menghasilkan beton ringan adalah mengganti agregat kasar/ batu pecah alami dengan agregat ringan alami seperti batu apung, ataupun agregat ringan buatan (*artificial lightweight aggregate-ALWA*).

Fiber Reinforced Polymer (FRP) telah lama dikenal sebagai material untuk meningkatkan dan sekaligus memperbaiki kapasitas struktur yang kurang. Banyak penelitian telah dilakukan dengan cara membungkus beton normal dengan FRP. Hasil penelitian ini menunjukkan adanya peningkatan kekuatan dan daktilitas beton normal setelah dilakukan pembungkusan dengan menggunakan FRP [6-10].

Tabel 1. Detail benda uji

Benda Uji	Jumlah Lapis FRP	Kuat Tekan Beton, f_c (MPa)	Regangan pada Puncak Tegangan Beton, ϵ_{co} (%)	Jumlah Benda Uji
SC-15-1-1&2	1			2
SC-15-2-1&2	2	15	0,15	2
SC-15-3-1&2	3			2
SC-28-1-1&2	1			2
SC-28-2-1&1	2	28	0,19	2
SC-28-3-1&2	3			2
SC-38-1-1&2	1			2
SC-38-2-1&2	2	38	0,21	2
CC-38-1-1,2&3	1	38	0,21	3
CC-38-2-1,2&3	2			3

Salah satu upaya telah dilakukan untuk memperbaiki kelemahan beton ringan adalah dengan membungkusnya dengan FRP. Riset ini telah dilakukan oleh Zhou dkk [12-13] dan Louk Fanggi dkk [14-16]. Hasil penelitian diatas juga

telah mengkonfirmasi keefektifan penggunaan FRP sebagai pembungkus eksternal beton ringan.

Namun demikian, kedua riset diatas hanya meneliti sejauhmana keefektifitasan FRP dalam membungkus beton ringan yang terbuat dari agregat ringan buatan yang berpenampang bulat. Dengan demikian riset mengenai keefektifitasan FRP dalam membungkus beton yang terbuat dari agregat ringan buatan berpenampang segi empat masih kurang atau boleh dikatakan riset seperti ini laporannya belum ditemukan dalam publikasi manapun saat ini. Karena itu, penelitian ini merupakan penelitian pertama yang meneliti sejauhmana keefektifitasan penggunaan FRP dalam membungkus beton yang terbuat dari agregat ringan buatan berpenampang segi empat. Parameter yg dievaluasi adalah efek dari jumlah lapis FRP, kuat tekan beton, serta bentuk penampang beton.

2. METODE PENELITIAN

Benda Uji

Enam belas buah benda uji beton dengan tinggi 300 mm dan dengan penampang berbentuk segi empat, dengan ukuran penampang 150 mm X 150 mm, dengan sudut berbentuk lengkungan dengan radius lengkungan (r) sebesar 25 mm, dibuat dari agregat ringan buatan, dan dibungkus dengan *carbon fiber reinforced polymer*, digunakan dalam penelitian ini. **Tabel 1** menunjukkan detail dari masing-masing benda uji tersebut.

Pengaturan benda uji dilakukan sebagai berikut: untuk mengevaluasi efek dari penggunaan jumlah lapis FRP yang berbeda, benda uji dibungkus dengan 1, 2, dan 3 lapis. Untuk mengevaluasi efek dari bermacam-macam kuat tekan beton, benda uji dicetak dengan 3 nilai kuat tekan yang berbeda. Sedangkan untuk mengevaluasi efek dari bentuk penampang benda uji, 6 buah benda uji dengan bentuk penampang bulat dengan diameter 100 mm dan tinggi 200 mm juga dibuat dan dites dalam penelitian ini. Dengan demikian, total keseluruhan benda uji adalah 22 buah, seperti jumlah yang tertera pada **Tabel 1**. Nilai regangan (ϵ_{co}) yang ada pada tabel ini, diperoleh berdasarkan hasil perhitungan dengan menggunakan rumus yang dibuat oleh Tasdemir [17].

Benda uji dibuat dengan menggunakan 3 mix campuran beton. Silika fume dan superplastisizer digunakan pada benda uji dengan kuat tekan 28 MPa dan 38 MPa. Jumlah silika fume yang digunakan adalah 10% dari berat semen, demikian juga jumlah superplastisizer yang ditambahkan

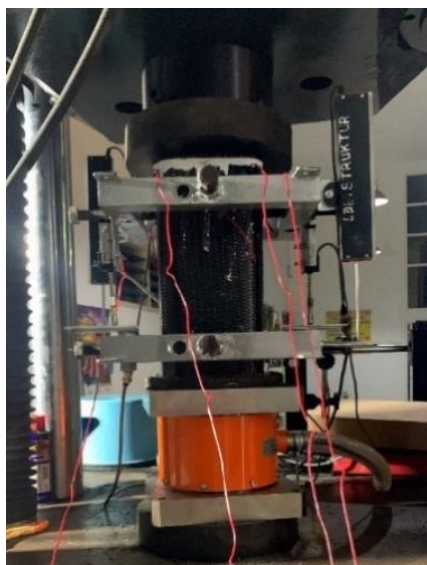
adalah 0.8% dari berat semen. Ukuran maksimum agregat ringan buatan adalah 10 mm, agregat ini biasa disebut ALWA Cilacap. Pasir menggunakan pasir alami asal Lumajang. Bentuk dari ALWA Cilacap dapat dilihat pada **Gambar 1**. Hasil pengujian fisik ALWA Cilacapa dapat dilihat pada **Tabel 2**.



Gambar 1. Bentuk ALWA Cilacap

Tabel 2. Hasil pengujian beberapa sifat fisik ALWA Cilcap

Agregat	Berat jenis	Berat Volume (Kg/m ³)	Kadar Air (%)	Kadar Resapan (%)
ALWA Cilacap	1,4	768,57	0,2	13,12



Gambar 2. Penempatan LVDT pada bagian tengah benda uji

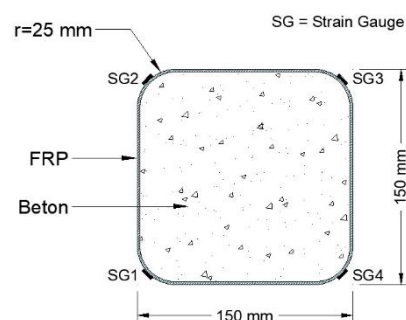
Seminggu sebelum pengetesan, benda uji dengan permukaan kering, dibungkus dengan *carbon fiber reinforced polymer* (CFRP). Serat carbon yang digunakan memiliki kuat tarik sebesar

4,00 GPa, dan modulus tariknya 230 GPa.

Penamaan benda uji dilakukan mengikuti bentuk sebagai berikut. Huruf pertama menunjukkan bentuk benda uji yaitu S merujuk pada penampang berbentuk segi empat dan C merujuk pada penampang berbentuk bulat. Huruf kedua C berikutnya menunjukkan jenis FRP yang digunakan yaitu CFRP. Selanjutnya angka 15, 28, dan 38 menunjukkan mutu beton yang digunakan. Berikutnya, angka 1, atau 2, atau 3 yang menunjukkan jumlah lapis FRP yang digunakan. Angka selanjutnya adalah 1, atau 2 atau 3 yang menunjukkan urutan benda uji. Angka 1 dari 1&2 menunjukkan benda pertama dari dua pasangan benda uji. Demikian juga angka ke 2 menunjukkan benda uji kedua dari dua pasangan benda uji. Demikian pula angka ke 3 yang menunjukkan benda uji ke 3 dari tiga pasang benda uji. Sebagai contoh benda uji dengan simbol SC-15-1-1 artinya benda uji berbentuk segi empat dilapisi dengan CFRP dengan jumlah lapis sebanyak 1 dan merupakan benda uji pertama dari 2 pasang benda uji.

Instrumentasi dan Pengetesan

Semua benda uji dites menggunakan mesin UTM servohidrolik dengan kapasitas 2000 kN. Sebelum dimulai pengetesan, benda uji di-*capping* dengan gypsum pada kedua ujungnya agar pembebanan dapat dilakukan secara merata dan selanjutnya benda uji dilengkapi dengan beberapa *strain gauge* (SG) dan *linear variable differential transformer* (LVDT). *Strain gauge* di tempelkan pada masing-masing sudut benda uji, seperti yang tampak pada **Gambar 3**. Data dari *strain gauge* ini nantinya akan diolah untuk mendapatkan data besaran regangan horisontal pada saat benda uji hancur.



Gambar 3. Penempatan strain gauge pada benda uji

Sebuah rangka yang dilengkapi dengan 4 buah LVDT seperti tampak pada **Gambar 2**, ditempelkan pada bagian tengah benda uji. Ke-empat LVDT ini ditempatkan pada bagian tengah dari setiap sisi permukaan sudut benda uji. Ke empat LVDT ini

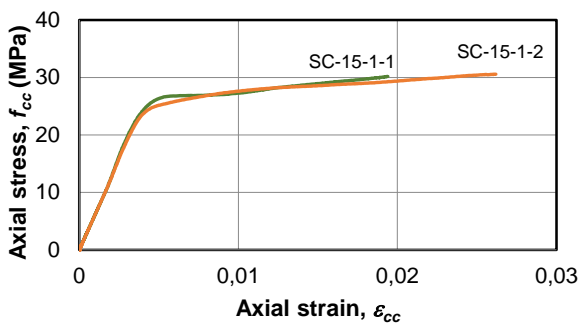
selanjutnya digunakan untuk memperoleh data regangan di sepanjang bagian tengah benda uji. Untuk data regangan sepanjang tinggi benda uji, diperoleh lewat LVDT yang terpasang pada mesin UTM. Kombinasi data regangan yang berasal dari rangka LVDT dan juga mesin UTM digunakan untuk menggambar keseluruhan regangan yang terjadi, mulai dari awal, bagian elastik, dan bagian non-elastik hingga akhir yaitu saat benda uji hancur.

Displacement control dengan kecepatan konstan sebesar 0,003 mm/detik digunakan sebagai beban pada pengetesan keseluruhan benda uji.

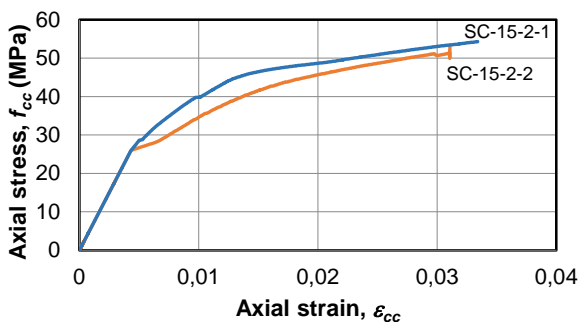
3. HASIL PEMBAHASAN

Perilaku tegangan regangan beton

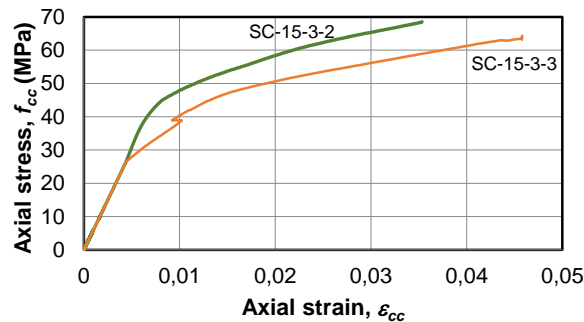
Perilaku tegangan-regangan dari beton yang terbuat dari agregat ringan buatan yang dibungkus dengan CFRP dapat dilihat pada **Gambar 4**. Gambar ini menunjukkan gambar tegangan-regangan dari semua benda uji yang hampir berbentuk dua garis garis lurus yaitu garis linear pertama pada bagian elastik dan garis linear kedua pada bagian setelah elastik yaitu dimulai dari ujung akhir bagian elastic hingga bagian akhir dari garis tersebut.



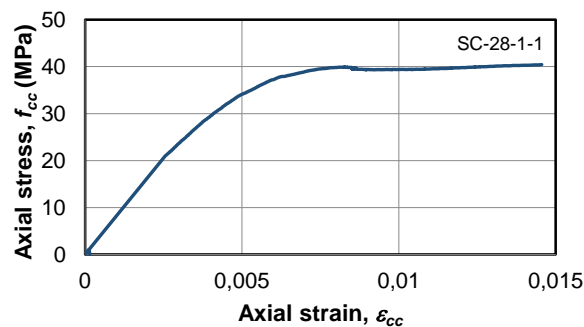
(a) SC-15-1&2



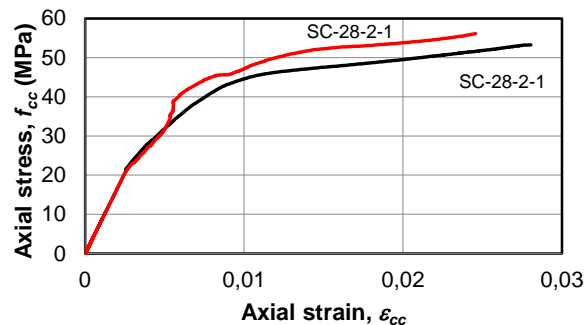
(b) SC-15-2-1&2



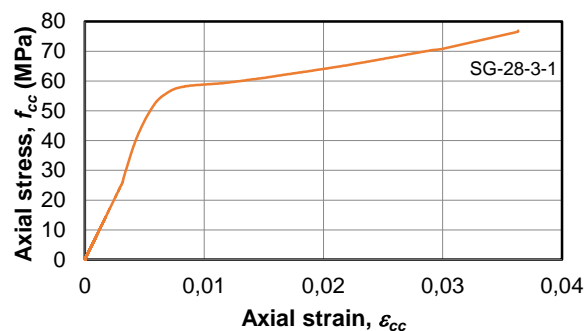
(c) SC-15-3-1&2



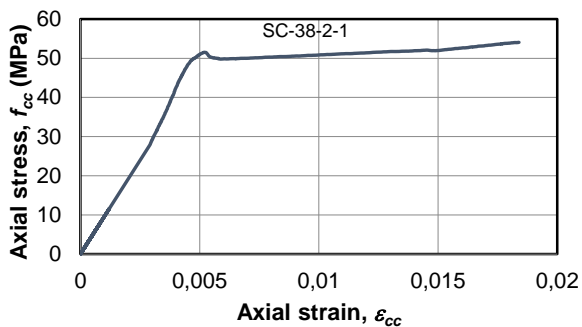
(d) SC-28-1-1



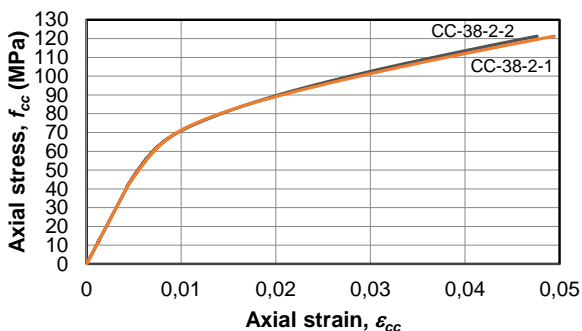
(e) SC-28-2-1&2



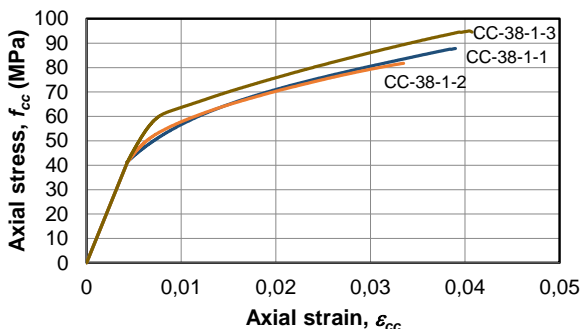
(f) SC-28-3-1



(g) SC-38-2-1



(h) CC-38-2-1&2

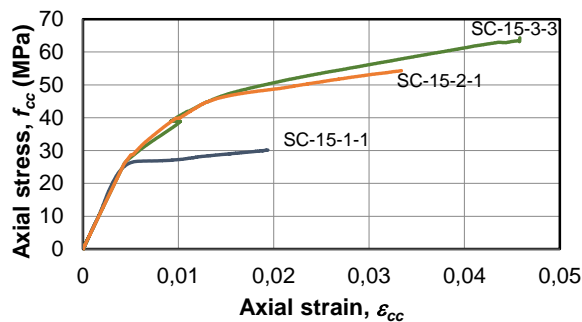


(i) CC-38-1-1,2&3

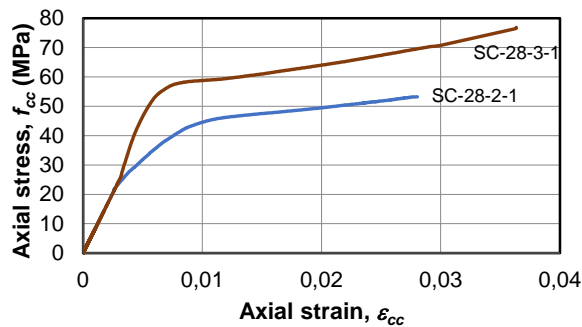
Gambar 4. Perilaku tegangan-regangan beton yang terbuat dari agregat ringan buatan yang dibungkus dengan CFRP

Efek Jumlah Lapis FRP

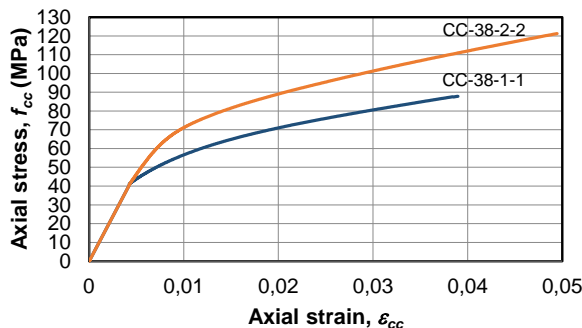
Gambar 5 menunjukkan efek dari jumlah lapis CFRP yang digunakan pada pembungkusan benda uji. Gambar 5a menunjukkan efek jumlah lapis 1, 2, dan 3 CFRP pada benda uji dengan penampang berbentuk segi empat dengan kuat tekan 15 MPa ($f_c=15$ MPa). Gambar 5b menunjukkan efek jumlah lapis 2 dan 3 CFRP pada benda uji dengan penampang berbentuk segi empat dengan kuat tekan 28 MPa ($f_c=28$ MPa). Gambar 5c menunjukkan efek jumlah lapis 1 dan 2 CFRP pada benda uji dengan penampang berbentuk bulat dengan kuat tekan 38 MPa ($f_c=38$ MPa).



(a) Benda uji dengan $f_c=15$ MPa



(b) Benda uji dengan $f_c=28$ MPa



(c) Benda uji dengan $f_c=38$ MPa

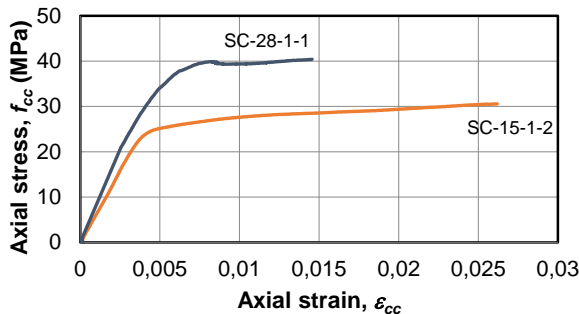
Gambar 5. Pengaruh jumlah lapis CFRP

Ketiga gambar ini menunjukkan bahwa peningkatan tegangan dan regangan berbanding lurus dengan peningkatan jumlah lapis CFRP. Hal yang sama juga dapat dilihat pada Tabel 3. Observasi ini menunjukkan bahwa semakin besar jumlah lapis yang digunakan, maka semakin besar pula tegangan ultimit (f_{cu}) atau regangan ultimit (ϵ_{cu}) yang terjadi. Observasi yang sama juga telah dilaporkan dalam riset terdahulu [12-16].

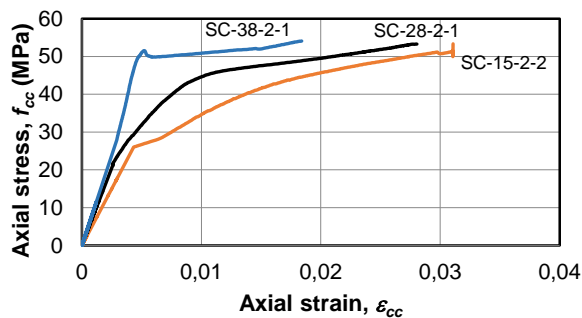
Efek Kuat Tekan Beton

Gambar 6 menunjukkan pengaruh dari beberapa variasi kuat tekan terhadap benda uji yang dibungkus dengan CFRP. Gambar 6a memperlihatkan efek dari meningkatkan kuat tekan beton yang terbuat dari agregat ringan buatan pada benda uji yang dibungkus dengan 1 lapis CFRP. Gambar 6b mengidentifikasi efek dari meningkatkan kuat tekan beton dari 15 hingga 38

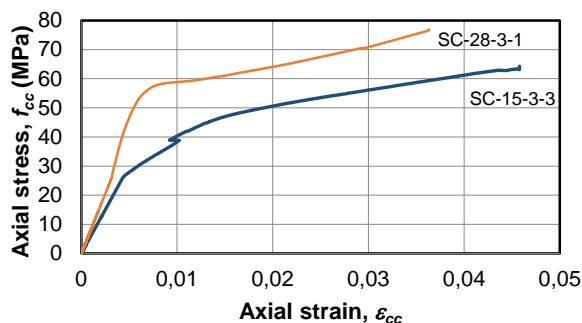
MPa pada benda uji yang dibungkus dengan 2 lapis CFRP. **Gambar 6c** menunjukkan efek meningkatkan kuat tekan beton dari 28 menjadi 38 MPa pada benda uji yang dibungkus dengan 3 lapis CFRP.



(a) Benda uji satu lapis CFRP



(b) Benda uji dua lapis CFRP



(c) Benda uji tiga lapis CFRP

Gambar 6. Pengaruh kuat tekan beton

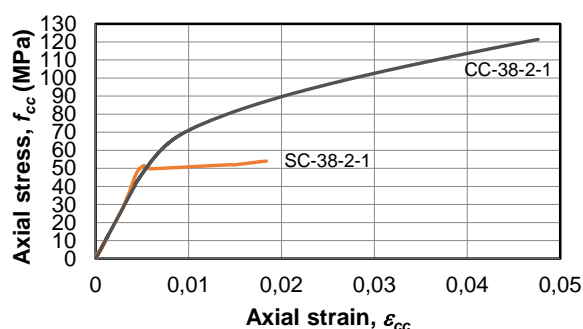
Ketiga gambar ini menunjukkan adanya peningkatan tegangan ultimit (f'_{cu}) bersamaan dengan peningkatan jumlah lapisan CFRP. Namun dari gambar-gambar ini juga dapat dilihat bahwa adanya penurunan regangan ultimit (ϵ_{cu}) ketika jumlah lapis CFRP ditingkatkan. Hal ini mengindikasikan bahwa semakin tinggi kuat tekan beton yang digunakan, maka semakin tinggi pula tegangan ultimit (f'_{cu}) yang dihasilkan, namun sebaliknya regangan ultimit (ϵ_{cu}) yang terjadi akan

menurun seiring dengan peningkatan kuat tekan beton tersebut. Observasi ini juga nampak pada publikasi yang dilakukan oleh Zhou dkk [12-13]. Hal ini dapat disebabkan oleh karakteristik dari beton itu sendiri dimana beton dengan kuat tekan yang lebih tinggi akan bersifat getas dibandingkan dengan beton dengan kuat tekan yang lebih rendah. Namun jika **Tabel 3** diobservasi lebih teliti, tampak bahwa walaupun terjadi peningkatan regangan ultimit (ϵ_{cu}) ketika jumlah lapis CFRP ditingkatkan, rasio peningkatan tegangan (f'_{cu}/f'_c) mengalami penurunan. Hal ini menunjukkan bahwa keefektifitasan pembungkusan dengan CFRP menurun ketika kuat tekan beton meningkat.

Observasi mengenai meningkatkan tegangan ultimit (f'_{cu}) dan menurunnya regangan ultimit (ϵ_{cu}) ketika jumlah jumlah lapis CFRP meningkat akan sedikit berbeda dengan detail yang ada pada **Tabel 3** jika membandingkan tegangan (f_{cu}) antara benda uji SC-28-2-1 dengan benda uji SC-15-2-1 dimana tampak bahwa f_{cu} yang terjadi pada benda uji dengan kuat tekan 28 MPa (SC-28-2-1) sedikit lebih rendah dari f_{cu} yang terjadi pada benda uji SC-15-2-1. Demikian juga perbandingan antara benda uji dengan kuat tekan 38 MPa (SC-38-2-1) dan 15 MPa (SC-15-2-2). Nilai f_{cu} yang lebih rendah atau hampir sama dengan benda yang memiliki kuat tekan yang lebih rendah atau berbeda dengan observasi diatas, disebabkan oleh proses yang tidak sempurna pada saat pelaksanaan proses pembungkusan benda uji dengan FRP.

Efek Bentuk Penampang

Gambar 7 menunjukkan pengaruh perbedaan bentuk penampang antara benda uji yang berbentuk segi empat dan bulat yang dibungkus dengan dua lapis CFRP. Gambar ini memperlihatkan nilai f'_{cu} dan ϵ_{cu} dari benda uji yang berbentuk bulat (CC-38-2-1) jauh lebih besar dari benda uji yang berbentuk segi empat (SC-38-2-1). Perbedaan ini dapat disebabkan karena faktor bentuk dimana tekanan yang diberikan oleh FRP pada permukaan benda uji yang bulat merata pada setiap permukaannya dibandingkan dengan bentuk penampang segi empat. Selain itu, rasio tekanan pembungkusan (f_i/f'_c) dari penampang berbentuk bulat lebih besar hamper dua kali lipat akibat penggunaan benda uji dengan ukuran diameter 100 mm dan tinggi 200 mm dibandingkan dengan yang terjadi pada benda uji berpenampang segi empat.



Gambar 7. Pengaruh bentuk penampang

Tabel 3. Kondisi ultimate tegangan dan regangan beton yang terbuat dari agregat ringan yang dibungkus dengan CFRP

Specimen	Specimen	f_c/f'_c	f'_{cu} (MPa)	Avg. f'_{cu} (MPa)	f'_{cu}/f'_c	Avg. f'_{cu}/f'_c	ϵ_{cu} (%)	Avg. ϵ_{cu} (%)	$\epsilon_{cu}/\epsilon_{co}$	Avg. $\epsilon_{cu}/\epsilon_{co}$
SC-15-1-1		0,28	30,18	30,37	2,01	2,02	2,05	2,34	13,88	15,81
SC-15-1-2		0,28	30,56		2,04		2,62		17,74	
SC-15-2-1		0,57	53,34	53,85	3,56	3,59	3,11	3,23	21,05	21,83
SC-15-2-2		0,57	54,35		3,62		3,34		22,61	
SC-15-3-1		0,85	68,55	66,44	4,57	4,43	3,53	4,13	23,90	27,93
SC-15-3-2		0,85	64,32		4,29		4,72		31,95	
SC-28-1-1		0,15	39,37	39,91	1,41	1,43	1,46	1,46	-	-
SC-28-1-2		0,15	40,44		1,44		-		-	-
SC-28-2-1		0,30	53,26	54,71	1,90	1,95	2,80	2,63	14,77	14,77
SC-28-2-2		0,30	56,16		2,01		2,46		-	-
SC-28-3-1		0,46	76,30	75,71	2,73	2,70	3,63	3,30	19,15	17,41
SC-28-3-2		0,46	75,12		2,68		2,97		15,66	-
SC-38-1-2		0,11	46,82	45,71	1,23	1,20	-	-	-	-
SC-38-1-2		0,11	44,59		1,17		-		-	-
SC-38-2-1		0,22	54,09	56,02	1,42	1,47	1,84	1,84	8,59	8,59
SC-38-2-2		0,22	57,95		1,53		-		-	-
CC-38-1-1		0,24	87,83	88,05	2,31	2,32	3,90	3,88	18,20	18,13
CC-38-1-2		0,24	81,77		2,15		3,58		16,71	-
CC-38-1-3		0,24	94,55		2,49		4,17		19,46	-
CC-38-2-1		0,48	121,36	120,93	3,19	3,19	4,76	4,85	22,22	22,64
CC-38-2-2		0,48	121,29		3,19		4,94		23,06	-
CC-38-2-3		0,48	120,15		-		-		-	-

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Tulisan ini telah menyajikan hasil tes dari 22 benda uji yg terbuat dari agregat ringan buatan yang diperkuat dengan FRP. Efek dari jumlah lapis FRP, kuat tekan beton, serta bentuk penampang benda uji dari beton yang terbuat dari agregat ringan butan yang diperkuat dengan CFRP menjadi parameter yang diteliti dalam penelitian ini. Berdasarkan pembahasan yang disajikan terlebih dahulu, maka ada beberapa hal yang secara jelas dapat disimpulkan berkaitan dengan perilaku tegangan-regangan beton yang terbuat dari agregat ringan buatan yang dibungkus dengan CFRP. Beton yang

terbuat dari agregat ringan buatan dibungkus secara efektif dengan menggunakan CFRP. Semakin besar jumlah lapis CFRP maka semakin besar pula tegangan ultimit (f'_{cu}) dan regangan ultimit (ϵ_{cu}) yang terjadi. Peningkatan tegangan ultimit (f'_{cu}) berbanding lurus dengan jumlah lapis FRP namun berbanding terbalik dengan regangan ultimit (ϵ_{cu}) yang terjadi. Efek pembungkusan dengan FRP lebih efektif pada penampang yang berbentuk bulat dibandingkan dengan penampang yang berbentuk segi empat.

Saran

Jika melihat hasil tes yang dilakukan, nampak adanya kapasitas dari benda uji yang kurang dari

yang diharapkan. Hal ini berkaitan dengan kurang bagusnya proses pembungkusan FRP yang dilakukan terhadap benda uji. Karena itu, proses pembungkusan semestinya menjadi perhatian penting dan harus dilakukan secara benar sehingga hasil tes yang diperoleh dapat menunjukkan kapasitas sesungguhnya dari benda uji yang dites.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) dan Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) yang telah mendanai seluruh kegiatan dalam penelitian ini.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Grzeszczyk, S., dan Grzegorz Janus, G., 2020. *Reactive powder concrete with lightweight aggregates*. Construction and Buildings Materials, 263, 120164.
- [2]. Xi, L., Tao, W., dan Yang, L., 2019. *Stress-strain relationship for plain and fibre-reinforced lightweight aggregate concrete*. Construction and Buildings Materials, 225, 256-272.
- [3]. Ahmad, M. R., Bing, C., dan Shah, S. F. A., 2019. *Investigate the Influence of Expanded Clay aggregate and silica fume on the properties of lightweight concrete*, Construction and Building Materials, 220, 253-266.
- [4]. Hui, W., Tao, W., Xiu, L., dan Run, Z., 2020. *Investigation of stress-strain relationship for confined lightweight aggregate concrete*. Construction and Building Materials, 256, 119432.
- [5]. Xiu, L., Tao, W., Huaxin, C., dan Yang, L., 2020. *Compressive stress-strain behavior of CFRP-confined lightweight aggregate concrete reinforced with hybrid fibers*, Construction and Building Materials, 244, 112288.
- [6]. Zeng, J. J., Lin, G., Teng, J. G., dan Li, J., 2018. *Behavior of large-scale FRP-confined rectangular RC columns under axial compression*, Engineering Structures, 174, 629-645.
- [7]. Rodsin, K., Hussain, Q., Suparp, S., dan Nawaz, A., 2020. *Compressive behavior of Extremely low strength concrete confined with low-cost glass FRP composites*. Case Studies in Construction Materials, 13, 1-14.
- [8]. Hadi, M. N. S., Wang W., dan Sheikh, M. N., 2015. *Axial compressive behaviour of GFRP tube reinforced concrete columns*. Construction and Building Materials, 81, 198-207.
- [9]. Zhang, T., Niu, D., dan Rong, C., 2018. *GFRP-confined coral aggregate concrete cylinders: The experimental and theoretical analysis*. Construction and Building Materials, 218, 206-213.
- [10]. Liu, X., Wu, T., Chen, H., dan Liu, Y., 2020. *Compressive stress-strain behavior of CFRP-confined lightweight aggregate concrete reinforced with hybrid fibers*. Composite Structures, 244, 112288.
- [11]. Yanlei Wang, Guipeng Chen, Baolin Wang, Gaochuang Cai dan Yiwen Zhang. 2020. *Behavior of circular ice-filled self-luminous FRP tubular stub columns under axial compression*. Construction and Building Materials, 232, 117287.
- [12]. Zhou, Y., Liu, X., Xing, F., Li, D., Wang, Y., dan Sui, L., 2016. *Axial compressive behavior of FRP-confined lightweight aggregate concrete: an experimental study and stress-strain relation model*. Construction and Building Materials, 119, 1-15.
- [13]. Zhou, Y., Liu, X., Xing, F., Cui, H., dan Sui, L., 2017. *Behavior and modeling of FRP-concrete-steel double-skin tubular columns made of full lightweight aggregate concrete*. Construction and Building Materials, 119, 52-63.
- [14]. Louk Fanggi, B. A., Lake, A. G., Dumin, L., Wadu, A., Lada, Y. A. A., dan Mauota, M. C. 2021. *Effect of FRP thickness on axial compressive behavior of Glass Fiber Reinforced Polymer-confined lightweight concrete cylinders*. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering , 1-5.
- [15]. Louk Fanggi, B. A., Muda, A. H., Mata, A. E., Umbu Nday, A. A., Bria, M., dan Wayan, A. R. L., 2018. *Kuat tekan beton ringan yang diperkuat dengan carbon reinforced polymer tube*. Jurnal Teknik Sipil (JuTeks), 259-265.
- [16]. Louk Fanggi, B. A., Moata, M. R. S., Wayan, A. R. L., Mata, A. E., dan Benu, M., 2019. *Influence of Number of FRP layer on Compressive Behavior of FRP-Confined Lightweight Concrete*. Proceedings of the 1st International Conference on Engineering, Science, and Commerce, ICESC 2019. Labuan Bajo, Nusa Tenggara Timur: EAI.
- [17]. Tasdemir, M. A., Tasdemir, C., Jefferson, A. D., Lydon, F. D., dan Barr, B. I. G., 1998. *Evaluation of strains at peak stresses in concrete: A three-phase composite model*

approach. Cement Concr. Res., 20, 4, 301–
318.