Journal of Infrastructure and Construction Technology (2024), **2(1)**, 1–10
doi:10.56208/jictech.2.1.42-51

ARTICLE

Review Mengenai Peningkatan Kuat Tekan Beton Dengan Natural Fiber Reinforced Polymer (NFRP)

Rian Fajri Ramadanas,*[,1] Yomi Idriansyah,[2] and Muhammad Mufarizal[2]

[1]Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Riau Kampus Bina Widya, Jl HR Subrantas KM 12 Pekanbaru 28293, Indonesia
[2]Dinas Pertanahan dan Penataan Ruang, Kel. Bagan Besar, Kec. Bukit Kapur, Kota Dumai
*Corresponding author. Email: rian.fajri7149@grad.unri.ac.id

(Received 10 Februari 2024; revised 18 April 2024; accepted 20 Juni 2024; first published online 28 Juni 2024)

Abstract

Damaged buildings require structural reinforcement. This journal uses external restraints with Natural Fiber Reinforced Polymer (NFRP) material because Fiber Reinforced Polymer (FRP) material requires relatively expensive costs and a production process that is not environmentally friendly. This research review aims to determine the behavior of confined concrete with external Natural Fiber Reinforced Polymer (NFRP) and the increase in compressive strength due to confinement. The test is carried out by providing an axial load on the concrete test object which is restrained by NFRP. NFRP restrained specimens are made by wrapping the entire concrete in a circle using natural fibers and adhesives. The results obtained from this research review are the compressive strength of confined concrete using several types of natural fibers such as jute, hemp, cotton, abaca and basalt, it is found that the type of fiber and the number of layers of NFRP affect its compressive strength. NFRP showed a significant restraining effect on increasing the compressive strength and increasing the ductility of the concrete. The increase in strength and ductility will increase with an increase in the number of layers of Natural Fiber Reinforced Polymer (NFRP).

Keywords: FRP, NFRP, Compressive, strength, reinforcement

1. Pendahuluan

Penurunan kinerja struktural, kualitas beton bangunan lama yang tidak memenuhi standar, serta bencana alam tak terduga seperti gempa bumi, menjadi alasan perlunya perkuatan pada struktur bangunan. Di samping itu, peningkatan beban operasional juga memerlukan pengekangan eksternal untuk menahan gaya yang bekerja pada struktur (Ozbakkaloglu, Lim, and Vincent 2013; Wang et al. 2018). Oleh karena itu, diperlukan suatu teknik perkuatan guna meningkatkan kualitas beton dan daktilitasnya dalam merespons beban gempa. Salah satu teknik yang dapat diterapkan adalah dengan memberikan pengekangan dari luar pada beton. Beton yang terkekang menunjukkan peningkatan kemampuan dalam menahan guncangan gempa (Li and Fang 2004; Guo et al. 2019). Pengekangan eksternal terhadap beton mampu meningkatkan kekuatan dan daktilitas beton secara

© 2024. This is an Open Access article, distributed under the terms of the Creative Commons Attribution licence (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted re-use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

signifikan (Ozbakkaloglu, Lim, and Vincent 2013; Wang et al. 2018). Dengan menggunakan Fiber Reinforced Polymer (FRP) dapat dilakukan pengekangan eksternal beton.

FRP adalah salah satu jenis material komposit yang tersusun atas matriks resin polimer yang diperkuat oleh serat (Tamuzs, Tepfers, and Sparnins 2006). Dalam konteks perkuatan eksternal (external confinement) pada struktur beton, FRP berfungsi mengekang beton dari sisi luar. Sebagaimana dikemukakan oleh Lim and Ozbakkaloglu (2015), aplikasi pengekangan eksternal menggunakan FRP pada beton mampu meningkatkan kuat tekannya. Peningkatan tersebut tercatat sebesar 72,635% dengan satu lapis serat aramid, 101,464% dengan satu lapis serat karbon, dan 65,315% dengan satu lapis serat kaca. Di samping penggunaan FRP berbasis sintetis yang lazim, sejumlah penelitian juga menjajaki pemanfaatan material alternatif seperti polyethylene naphthalate dan basalt (Guo et al. 2019).

Penggunaan material FRP memiliki kendala berupa biaya yang cenderung tinggi dan proses produksi yang kurang memperhatikan aspek lingkungan (Burgoyne and Balafas 2007). Sebagai alternatif, diperlukan pemanfaatan material FRP berbasis serat alami (Natural Fiber Reinforced Polymer atau NFRP) yang lebih ramah lingkungan dan berpotensi lebih ekonomis. Beberapa jenis serat alam yang dapat digunakan sebagai bahan dasar NFRP antara lain jute, hemp, dan katun (Jirawattanasomkul et al. 2019). Dalam penelitiannya, Wang et al. (2018) mengemukakan bahwa penggunaan serat alami dalam material komposit dapat meminimalisir dampak negatif terhadap lingkungan karena proses produksinya yang berkelanjutan, ketersediaannya yang melimpah, bobotnya yang ringan, biaya produksinya yang terjangkau, serta sifatnya yang dapat diperbarui.

Tinjauan penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk memahami karakteristik beton yang diperkuat dengan pengekangan eksternal menggunakan NFRP, serta mengidentifikasi peningkatan kuat tekan dan daktilitas yang dihasilkan dari pengekangan tersebut. Studi tinjauan ini disusun berdasarkan berbagai sumber referensi dan literatur yang relevan.

2. Tinjauan Pustaka

2.1 Serat Alam sebagai Material Penyusun Natural Fiber Reinforced Polymer (NFRP)

Serat adalah kumpulan material tipis menyerupai benang yang kemudian ditenun atau diatur hingga membentuk lembaran yang kohesif. Fiber Reinforced Polymer (FRP) merupakan material komposit yang tersusun dari dua komponen utama, yaitu resin sebagai matriks dan serat sebagai elemen penguat. Dalam beberapa tahun terakhir, teknologi pengolahan serat telah mengalami perkembangan signifikan, sehingga pemanfaatannya meluas dalam konstruksi dan perkuatan struktur bangunan, baik sebagai campuran dalam beton maupun sebagai material perkuatan eksternal.

Dalam aplikasi perkuatan struktur, jenis serat yang paling umum digunakan meliputi serat polimer, serat alam, dan serat sintetis. Serat alam diperoleh dari sumber tumbuhan, yang kemudian diproses sedemikian rupa untuk menghasilkan karakteristik, perilaku, dan kekuatan yang memenuhi standar persyaratan sehingga layak digunakan sebagai material perkuatan struktur. Menurut Mohammed et al. (2015), beberapa aspek penting yang perlu dipertimbangkan dalam pemilihan jenis serat antara lain adalah berat jenis (specific gravity), kuat tarik (tensile strength), mekanisme kegagalan akibat kelelahan (fatigue failure mechanism), konduktivitas termal (thermal conductivity), dan biaya produksi (cost). Pemanfaatan serat alam sebagai material komposit dalam struktur bangunan, khususnya sebagai perkuatan beton, terus mengalami pengembangan. Serat alam berpotensi menjadi alternatif pengganti FRP sintetis karena keunggulannya seperti sifat isolator, kemampuannya untuk diperbarui, karakteristiknya yang ramah lingkungan, serta biaya produksi yang lebih rendah, menjadikan serat alam sebagai pilihan material komposit yang patut dipertimbangkan (Codispoti et al. 2015). Komposisi kimia berbagai jenis serat alam dapat dilihat pada Tabel 1.

Berdasarkan data pada Tabel 1, dapat disimpulkan bahwa selulosa merupakan konstituen utama serat alam karena proporsinya yang paling dominan. Selulosa berperan penting dalam memberikan kekuatan struktural pada serat (Codispoti et al. 2015). Secara umum, serat-serat alami yang telah diuji

Table 1. Komposisi Kimia Serat Alam (Faruk et al. 2012)

Serat	Selulosa (wt%)	Hemiselulosa (wt%)	Ligning (wt%)	Waxes (wt%)
Ampas tebu	55,2	16,8	25,3	-
Bambu	26 - 43	30	21 - 31	-
Flax	71	18,6 - 20,6	2,2	1,5
Kenaf	72	20,3	9	-
Jute	61-71	14 - 20	12 - 13	0,5
Hemp	68	15	10	0,8
Ramie	68,6 - 76,2	13 - 16	0,6 - 0.7	0,3
Abaka	56 - 63	20 - 25	7 - 9	3
Sisal	65	12	9,9	2
Sabut	32 - 43	0,15 - 0,25	40 - 45	-
Kelapa sawit	65	-	29	-
Nenas	81	-	12,7	-
Curaua	73,6	9,9	7,5	-
Jerami	38 - 45	15 - 31	12 - 20	-
Sekam padi	35 - 45	19 - 25	20	-

kekuatan mekaniknya berpotensi untuk dimanfaatkan sebagai material penyusun NFRP. Karakteristik material serat alam dapat dilihat lebih lanjut pada Tabel 2.

Table 2. Material Properties Serat Alam (Jawaid and Abdul Khalil 2011)

Serat	Densitas (gr/cm^2)	Kuat tarik (MPa)	Modulus elastisitas (GPa)	Regangan (%)
Kelapa sawit	0,7 - 1,55	248	3,2	2,5
Flax	1,4	88 - 1500	60 - 80	1,2 - 1,6
Hemp	1,48	550 - 900	70	1,6
Jute	1,46	400 - 800	10 - 30	1,8
Ramie	1,5	500	44	2
Sabut	1,25	220	6	15 - 25
Sisal	1,33	600 - 700	38	2 - 3
Abaka	1,5	980	-	-
Katun	1,51	400	12	3 - 10
Kenaf (kulit kayu)	1,2	295	-	2,7 - 6,9
Kenaf (inti)	0,21	-	-	-
Ampas tebu	1,2	20 - 290	19,7 - 27,1	1,1
Hanequen	1,4	430 - 580	-	3 - 4,7
Nenas	1,5	170 - 1672	82	1 - 3
Pisang	1,35	355	33,8	53

Selain serat alam, matriks perekat juga merupakan komponen penting dalam Natural Fiber Reinforced Polymer (NFRP). Fungsi utama perekat adalah untuk mengikat NFRP pada permukaan beton. Jenis resin yang umum digunakan dalam pembuatan material komposit NFRP adalah resin epoksi dan hardener (pengeras). Epoksi sendiri merupakan polimer yang terbentuk melalui reaksi antara dua senyawa kimia yang berbeda, yang dikenal sebagai resin dan pengeras. Resin epoksi

memiliki sejumlah keunggulan, di antaranya adalah ketahanan panas yang baik, kekuatan mekanik yang tinggi, durabilitas yang baik terhadap beban berkelanjutan, serta kecenderungan retak yang relatif rendah selama proses pengeringan (curing). Karakteristik lebih rinci mengenai resin epoksi dapat dilihat pada Tabel 3.

Table 3. Karakteristik Resin Epoxy (Lim and Ozbakkaloglu 2015)

Karakteristik	Nilai
Kut tarik maksimum	50 MPa
Regangan tarik maksimum	2,5%
Modulus elastisitas	3000 MPa

Uji kuat tekan unaxial dilakukan pada benda uji silinder standar. Rata-rata kuat tekan beton di ukur 31 MPa setelah 28 hari pengerasan beton. Untuk pengaturan pengujian kuat lentur percobaan dilakukan dengan mengontrol perpindahan melebihi defleksi di tengah bentang sebesar 80 mm. Pembebanan statis dengan kapasitas 280 kN. Tampilan pengujian seperti pada Gambar 2.

2.2 Mekanisme Beton Terkekang

Ketika beton menerima beban tekan aksial, perkuatan eksternal memberikan pengekangan yang mencegah terjadinya ekspansi lateral pada inti beton. Pencegahan ekspansi lateral ini dilakukan dengan memberikan tegangan lateral pada inti beton, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 1, sehingga menciptakan kondisi terkekang pada beton. Beton yang berada dalam kondisi terkekang menunjukkan peningkatan baik pada kuat tekan maupun daktilitasnya dibandingkan dengan beton tanpa pengekangan (Lim and Ozbakkaloglu 2015; Antonius 2021).

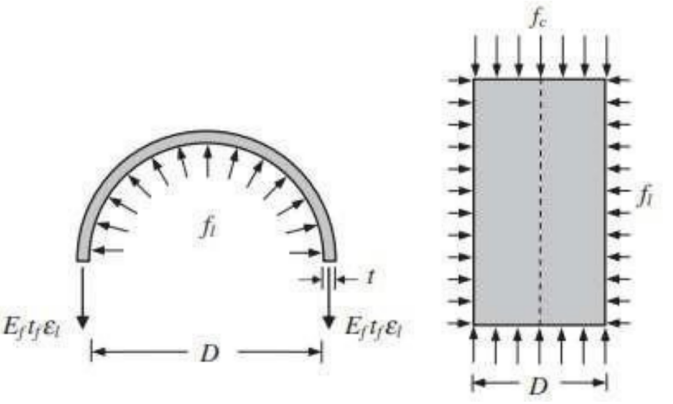


Figure 1. Mekanisme pengekangan (confinement mechanism) (Lim and Ozbakkaloglu 2015; Antonius 2021)

2.3 Perilaku Tegangan-Regangan Beton Terkekang

Kinerja beton yang diperkuat dengan pengekangan FRP sangat dipengaruhi oleh besarnya ekspansi lateral yang terjadi akibat beban tekan aksial (Ozbakkaloglu, Lim, and Vincent 2013). Seiring dengan bertambahnya regangan aksial akibat peningkatan beban tekan, pelebaran beton juga akan meningkat. Namun, ketika beton mulai mengalami keretakan, material FRP yang berfungsi sebagai pengekang akan menjaga kestabilan beton dalam menahan beban aksial. Dua keuntungan utama dari pengekangan pada beton adalah peningkatan kapasitas kuat tekan dan peningkatan daktilitas. Beton

tanpa pengekangan cenderung mengalami keruntuhan lebih cepat dibandingkan dengan beton yang diberikan pengekangan. Asumsi yang mendasari adalah bahwa keretakan pada beton akan terjadi setelah melampaui nilai regangan 0,003, dan setelah itu, pengekangan dari FRP akan bekerja secara optimal. Peningkatan tegangan lateral yang diberikan oleh pengekang FRP akan berkontribusi pada peningkatan daktilitas beton, yang tercermin dari kemiringan kurva tegangan-regangan beton yang semakin landai setelah mencapai beban maksimum (Mander, Priestley, and Park 1988).

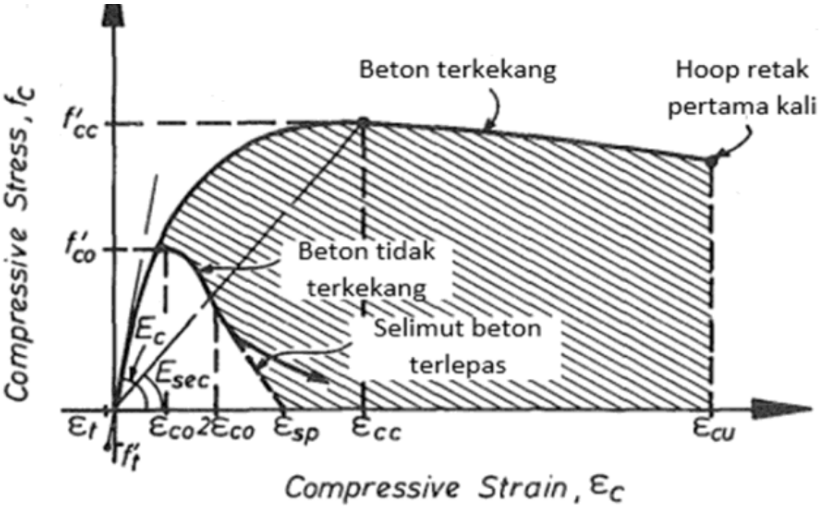
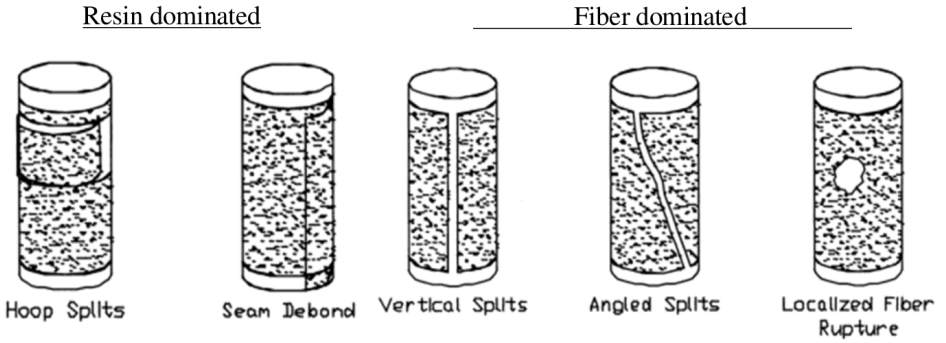


Figure 2. Kurva tegangan-regangan model kekangan (Antonius 2021)

2.4 Mode Kegagalan Beton Terkekang FRP

Menurut Cleary et al. (2003), aplikasi FRP sebagai perkuatan pada struktur beton dapat menimbulkan beberapa jenis mekanisme kegagalan, yang diilustrasikan pada Gambar 3.



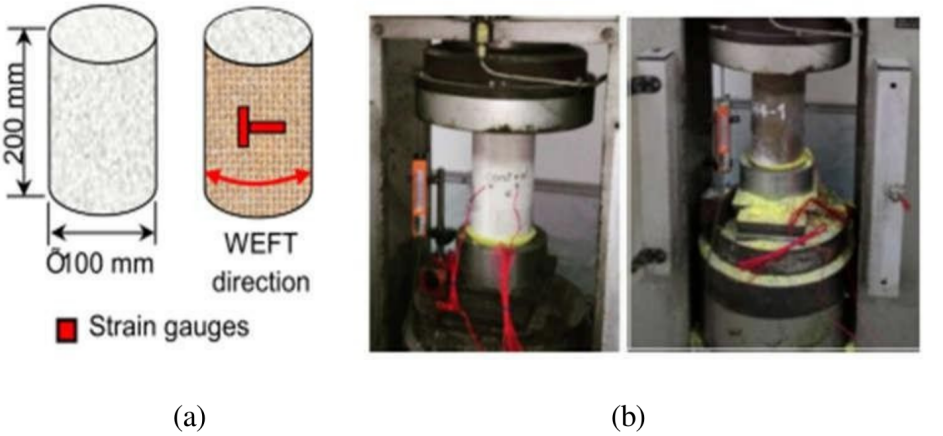
(Cleary et al. 2003)

Figure 3. Mode kegagalan pada silinder beton terkekang

3. Survey Literatur

Jurnal ini menyajikan tinjauan literatur mengenai aplikasi serat alami sebagai material pengekang pada beton. Kriteria pemilihan studi literatur didasarkan pada jenis serat yang digunakan serta variasi jumlah lapisan pengekang. Beberapa penelitian telah mengkaji beton terkekang, salah satunya adalah studi oleh Jirawattanasomkul et al. (2019) yang bertujuan untuk mengeksplorasi perilaku beton dengan pengekangan eksternal menggunakan NFRP, peningkatan kuat tekan akibat pengekangan, serta karakteristik material komposit NFRP. Dalam penelitian tersebut, benda uji yang digunakan berbentuk silinder berukuran 100 x 200 mm dengan mutu rencana 21 MPa. Sebanyak 21 benda uji diberikan pengekangan eksternal NFRP, sementara 3 benda uji lainnya berfungsi sebagai kontrol tanpa pengekangan.

Setelah proses pengecoran, beton menjalani perawatan selama 28 hari untuk meminimalisir risiko retak akibat hidrasi. Pasca perawatan, spesimen beton dililit dengan berbagai jenis serat alam, yaitu jute, hemp, dan katun. Dalam penelitian ini, pengekangan eksternal menggunakan FRP serat alam diterapkan pada beton dengan cara melilitkan serat secara rapat mengelilingi seluruh permukaan silinder beton dari bawah hingga atas. Proses pembungkusan NFRP dilakukan secara berkelanjutan dengan memanfaatkan resin epoksi dan hardener, dengan variasi jumlah lapisan serat sebanyak 1, 2, dan 3 lapis. Selama pembungkusan, serat ditekan kuat untuk memastikan adhesi yang optimal dengan resin epoksi pada permukaan beton. Pada bagian akhir setiap lapisan serat, diberikan overlap sepanjang 150 mm. Pengukuran regangan pada benda uji dilakukan menggunakan dua buah strain gauge yang ditempelkan pada NFRP di tengah ketinggian beton (½ h beton). Ilustrasi detail benda uji dapat dilihat pada Gambar 4.



(Jirawattanasomkul et al. 2019)

Figure 4. (a) Beton silinder dan (b) Set-up benda uji

Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan beton dengan pengekangan eksternal NFRP oleh Jirawattanasomkul et al. (2019) , teridentifikasi beberapa mekanisme kegagalan. Di antaranya adalah rupturnya NFRP di luar area overlap, serta terjadinya pengelupasan lapisan pengekang beton (delaminasi) pada lapisan NFRP di area overlap akibat panjang overlap yang kurang optimal. Delaminasi ini teramati pada beton yang dikekang dengan kombinasi lapisan NFRP katun dan NFRP jute dengan jumlah 4 hingga 6 lapis. Fenomena ini diduga disebabkan oleh karakteristik NFRP katun dan NFRP jute yang cenderung lebih tebal dan kaku dibandingkan dengan NFRP hemp. Oleh karena itu, potensi delaminasi antara NFRP dan beton menjadi aspek yang sangat penting untuk diperhatikan. Lebih lanjut, pengaruh jumlah lapisan NFRP sebagai pengekang terbukti signifikan

dalam meningkatkan respons tegangan-regangan tekan beton terkekang. Jenis serat dan jumlah lapisan serat NFRP secara substansial memengaruhi kuat tekan beton. Di antara ketiga jenis serat alam yang digunakan sebagai pengekang beton, NFRP jute menunjukkan kinerja yang paling unggul. Peningkatan jumlah lapisan serat berkorelasi positif dengan peningkatan kuat tekan beton. Tegangan lateral yang dihasilkan oleh NFRP juga meningkat seiring dengan peningkatan tegangan tekan aksial pada silinder beton. Kegagalan NFRP akan terjadi ketika tegangan lateral melampaui batas kuat tarik maksimum material tersebut.

Ghalieh et al. (2017) melakukan studi untuk mengevaluasi pengaruh variasi jumlah lapisan serat rami dan rasio kelangsingan beton terhadap efektivitas pengekangan. Jumlah lapisan serat rami yang digunakan bervariasi antara 1, 2, dan 4 lapis. Rasio kelangsingan beton divariasikan menjadi 1,5, 2, 2,5, dan 3, dengan tinggi beton yang berbeda namun diameter yang konstan. Serat rami digunakan sebagai material pengekang beton. Spesimen uji berbentuk silinder dengan variasi dimensi 200 x 300 mm, 200 x 400 mm, 200 x 500 mm, dan 200 x 600 mm. Permukaan spesimen dilapisi epoksi sebelum aplikasi serat alam, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 5 (a) dan (b). Selama pengujian pembebanan tekan, empat buah Linear Variable Differential Transducer (LVDT) digunakan untuk mengukur regangan aksial. LVDT diposisikan dengan interval 90° dan ditempatkan di tengah ketinggian spesimen, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6. Pengujian tekan dilakukan sesuai standar ASTM C39, menggunakan mesin MTS dengan laju perpindahan konstan 3 mm/menit. Semua spesimen dikenai beban aksial hingga mencapai kegagalan, dan data hasil dicatat menggunakan data logger.

(Ghalieh et al. 2017)

Figure 5. (a) Persiapan permukaan beton dan (b) Proses pembalutan serat rami

Temuan dari studi yang dilakukan oleh Ghalieh et al. (2017) menunjukkan bahwa kuat tekan aksial dan daktilitas beton yang diperkuat dengan pengekangan serat rami mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya jumlah lapisan pengekang. Peningkatan kuat tekan aksial yang tercatat untuk spesimen dengan variasi jumlah lapisan 1, 2, dan 4 lapis secara berurutan adalah 9%, 13%, dan 22%. Daktilitas dievaluasi berdasarkan karakteristik kehancuran spesimen uji. Dengan demikian, peningkatan daktilitas berkorelasi dengan peningkatan kuat tekan maksimum yang dapat dicapai beton. Indeks daktilitas spesimen dengan jumlah lapisan 1, 2, dan 4 lapis, jika dibandingkan dengan spesimen tanpa pengekangan, secara berturut-turut adalah 2,78, 3,95, dan 6,98. Selain itu, rasio kelangsingan beton juga memengaruhi kuat tekan dan daktilitasnya, di mana keduanya cenderung menurun seiring dengan peningkatan rasio kelangsingan. Mekanisme kegagalan yang teramati pada spesimen uji adalah terbentuknya retakan sejajar dengan arah beban aksial dan tegak lurus terhadap orientasi serat.

(Ghalieh et al. 2017)

Figure 6. Set-up benda uji

Studi mengenai beton terkekang juga dilakukan oleh Baasankhuu, Choi, and Ha (2020) yang memanfaatkan serat alam. Dalam penelitian eksperimentalnya, Baasankhuu, Choi, and Ha (2020) bertujuan untuk menginvestigasi pengaruh pengekangan terhadap kuat tekan, mekanisme kegagalan, serta panjang area overlap pada beton yang diperkuat dengan variasi jumlah lapisan serat. Jenis serat alam yang digunakan adalah polyethylene naphthalate fiber reinforced polymer (PEN FRP) dan basalt fiber reinforced polymer (BFRP). Variasi jumlah lapisan yang diterapkan adalah 1, 2, dan 3 lapis untuk PEN FRP, serta 2, 4, dan 6 lapis untuk BFRP. Total sampel benda uji yang digunakan dalam studi ini berjumlah 25 buah, dengan dimensi masing-masing 150 x 300 mm.

Lembaran serat PEN dan basalt dipotong sesuai dengan panjang yang telah ditentukan. Sebelum aplikasi serat pada beton, seluruh permukaan beton dilapisi dengan perekat untuk meningkatkan adhesi antara kedua material tersebut. Selanjutnya, serat dililitkan pada beton secara manual menggunakan metode wet lay-up. Seluruh ketinggian beton dilapisi serat, kecuali area sepanjang 10 mm pada ujung atas dan bawah. Untuk semua spesimen beton BFRP, digunakan panjang overlap sebesar 50 mm. Namun, panjang overlap pada spesimen beton PEN FRP bervariasi: 150 mm untuk 1 lapisan, 50 mm untuk 2 lapisan, dan tanpa overlap untuk 3 lapisan. Pengaruh variasi panjang overlap pada beton PEN FRP juga menjadi fokus evaluasi dalam studi ini.

Digunakan 2 buah strain gauge arah horizontal dan 2 buah strain gauge arah aksial. Strain gauge ditempel pada beton sebelum beton dibalut dengan serat dan 3 buah Linear Variable Differential Transducer (LVDT) arah vertikal untuk mengukur perpindahan aksial serta 3 buah Linear Variable Differential Transducer (LVDT) arah horizontal untuk mengukur perpindahan lateral yang terjadi. Pada tingkat beban aksial yang sama, pembacaan regangan dari LVDT secara umum sedikit lebih besar daripada pembacaan dari pengukur regangan. Untuk interpretasi hasil pengujian, pembacaan strain gauge diprioritaskan dan digunakan semaksimal mungkin.

Temuan dari studi yang dilakukan oleh Baasankhuu, Choi, and Ha (2020) mengindikasikan bahwa kuat tekan beton yang diperkuat dengan pengekangan BFRP (2 – 6 lapis) dan PEN FRP (1 – 3 lapis) menunjukkan peningkatan dibandingkan dengan beton tanpa pengekangan. Kekuatan maksimum beton yang dililit dengan PEN FRP tercapai pada tingkat regangan aksial dan regangan lateral yang jauh lebih besar dibandingkan dengan beton yang dikekang menggunakan BFRP. Penelitian ini juga menyertakan variasi panjang area overlap untuk mengevaluasi efektivitasnya dalam memberikan pengekangan pada beton. Variasi panjang overlap yang diuji adalah 150 mm,

(a) (b) (c)

(Baasankhuu, Choi, and Ha 2020)

Figure 7. Set-up pengujian benda uji (a) Benda uji silinder, (b), BFRP dan (c) PEN FRP

50 mm, dan 0 mm. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa mekanisme kegagalan pada overlap 150 mm adalah rupturnya serat pada beton terkekang. Sementara itu, pada overlap 50 mm terjadi delaminasi (pelepasan serat dari beton) yang diikuti dengan putusnya serat. Pada overlap 0 mm, mekanisme kegagalannya adalah delaminasi (pelepasan serat dari beton) yang mengakibatkan serat tidak berfungsi secara optimal.

4. Kesimpulan dan Saran

Berdasarkan kajian studi literatur terkait riview perkuatan struktur balok beton bertulang dengan metode jacketing reinforcement, steel plate bonding, carbon fiber reinforced polymer (CFRP) dapat disimpulkan antara lain meliputi:

- Pemanfaatan serat alam seperti rami, basalt, katun, dan abaka berpotensi menjadi alternatif material komposit penyusun NFRP. Keunggulan serat alam meliputi ketersediaannya yang melimpah, biaya produksi yang relatif rendah, serta kekuatan tarik yang tinggi.
- NFRP memberikan efek pengekangan yang signifikan, yang berujung pada peningkatan kuat tekan dan daktilitas beton. Sebagaimana dikemukakan oleh Jirawattanasomkul et al. (2019) dan Ghalieh et al. (2017), peningkatan jumlah lapisan NFRP berkorelasi positif dengan peningkatan kekuatan dan daktilitas beton.
- Menurut Ghalieh et al. (2017), tegangan ultimit yang mampu dicapai oleh beton yang dikekang serat dipengaruhi oleh rasio kelangsingan beton. Peningkatan rasio kelangsingan cenderung menurunkan kuat tekan dan juga mengurangi peningkatan daktilitas.
- Berdasarkan temuan pengujian oleh Baasankhuu, Choi, and Ha (2020), panjang area overlap yang direkomendasikan adalah antara 50 mm hingga 150 mm.

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan untuk melakukan eksplorasi lebih lanjut dengan menggunakan variasi serat alam yang lebih beragam sebagai alternatif material NFRP dalam aplikasi pengekangan eksternal pada beton.

References

Antonius. 2021. *Perilaku dasar dan desain beton bertulang berdasarkan sni-2847-2019.* Semarang: UNISSULA PRESS (Penerbit Universitas Islam Sultan Agung).

Baasankhuu, Batzaya, Donguk Choi, and Sangsu Ha. 2020. Behavior of small-scale concrete cylinders in compression laterally confined by basalt fiber and pen fiber reinforced polymer composites. *International Journal of Concrete Structures and Materials* 14, no. 1 (February): 8. ISSN: 2234-1315. https://doi.org/10.1186/s40069-019-0384-6.

Burgoyne, Chris, and Ioannis Balafas. 2007. Why is frp not a financial success. In *Proc. 8th intl. conf. on frp reinforcement for reinforced concrete structures, frprcs-8, univ. of patras, patras, greece.*

Cleary, Douglas B., Christopher D. Cassino, Rosie Tortorice, James A. Newell, and Bradley W. Tyers. 2003. Effect of elevated temperatures on a fiber composite used to strengthen concrete columns. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 22 (10): 881–895. https://doi.org/10.1177/0731684403022010002.

Codispoti, Rosamaria, Daniel V. Oliveira, Renato S. Olivito, Paulo B. Lourenço, and Raul Fangueiro. 2015. Mechanical performance of natural fiber-reinforced composites for the strengthening of masonry. *Composites Part B: Engineering* 77:74–83. ISSN: 1359-8368. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.03.021.

Faruk, Omar, Andrzej K. Bledzki, Hans-Peter Fink, and Mohini Sain. 2012. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. Topical Issue on Polymeric Biomaterials, *Progress in Polymer Science* 37 (11): 1552–1596. ISSN: 0079-6700. https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003.

Ghalieh, Lea, Elie Awwad, George Saad, Helmi Khatib, and Mounir Mabsout. 2017. Concrete columns wrapped with hemp fiber reinforced polymer – an experimental study. 3rd International Conference on Natural Fibers: Advanced Materials for a Greener World, ICNF 2017, 21-23 June 2017, Braga, Portugal, *Procedia Engineering* 200:440–447. ISSN: 1877-7058. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.062.

Guo, Yong-Chang, Wan-Yang Gao, Jun-Jie Zeng, Zhi-Jian Duan, Xiang-Yu Ni, and Kai-Di Peng. 2019. Compressive behavior of frp ring-confined concrete in circular columns: effects of specimen size and a new design-oriented stress-strain model. *Construction and Building Materials* 201:350–368. ISSN: 0950-0618. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.183.

Jawaid, M., and H.P.S. Abdul Khalil. 2011. Cellulosic/synthetic fibre reinforced polymer hybrid composites: a review. *Carbohydrate Polymers* 86 (1): 1–18. ISSN: 0144-8617. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.04.043.

Jirawattanasomkul, Tidarut, Tamon Ueda, Suched Likitlersuang, Dawei Zhang, Nat Hanwiboonwat, Nattamet Wuttiwannasak, and Krittapon Horsangchai. 2019. Effect of natural fibre reinforced polymers on confined compressive strength of concrete. *Construction and Building Materials* 223:156–164. ISSN: 0950-0618. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.217.

Li, Yeou Fong, and Tsang Sheng Fang. 2004. A constitutive model for concrete confined by steel reinforcement and carbon fiber reinforced plastic sheet. *Structural Engineering and Mechanics* 18 (1): 21–40.

Lim, Jian C., and Togay Ozbakkaloglu. 2015. Hoop strains in frp-confined concrete columns: experimental observations. *Materials and Structures* 48, no. 9 (September): 2839–2854. ISSN: 1871-6873. https://doi.org/10.1617/s11527-014-0358-8.

Mander, J. B., M. J. N. Priestley, and R. Park. 1988. Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of Structural Engineering* 114 (8): 1804–1826. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804).

Mohammed, Layth, M. N. M. Ansari, Grace Pua, Mohammad Jawaid, and M. Saiful Islam. 2015. A review on natural fiber reinforced polymer composite and its applications. *International Journal of Polymer Science* 2015 (1): 243947. https://doi.org/10.1155/2015/243947.

Ozbakkaloglu, Togay, Jian C. Lim, and Thomas Vincent. 2013. Frp-confined concrete in circular sections: review and assessment of stress–strain models. *Engineering Structures* 49:1068–1088. ISSN: 0141-0296. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.06.010.

Tamuzs, V., R. Tepfers, and E. Sparnins. 2006. Behavior of concrete cylinders confined by carbon composite 2. prediction of strength. *Mechanics of Composite Materials* 42, no. 2 (March): 109–118. ISSN: 1573-8922. https://doi.org/10.1007/s11029-006-0022-7.

Wang, Daiyu, Zhenyu Wang, Tao Yu, and Hui Li. 2018. Seismic performance of cfrp-retrofitted large-scale rectangular rc columns under lateral loading in different directions. *Composite Structures* 192:475–488. ISSN: 0263-8223. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.03.029.