



REVIEW MENGENAI PENINGKATAN KUAT TEKAN BETON YANG TERKEKANG SECARA SEMPURNA DENGAN EKSTERNAL NATURAL FIBER REINFORCED POLYMER (NFRP)

Nazira Suha Al Bakri^{a,*}, Taufiq Saidi^b, Muttaqin Muttaqin^b

^aMagister Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh

^bJurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh

*Corresponding author; email address: nazirasuha@mhs.unsyiah.ac.id

ARTICLE INFO

Article History:

Received 11 April 2022

Accepted 21 May 2022

Online 31 June 2022

Keywords:

Natural fiber reinforced polymer

Confined concrete

Varying number of ply

Compressive strength

External confinement

ABSTRACT

Structural strengthening is needed in buildings that experience a decrease in serviceability, inappropriate quality of existing concrete, and unexpected natural events such as earthquakes. One method that has been widely used for structural strengthening is external restraint using synthetic Fiber Reinforced Polymer (FRP). External restraints on concrete can significantly increase the strength and ductility of concrete. The use of Fiber Reinforced Polymer (FRP) material requires a relatively expensive cost and a production process that is not environmentally friendly, so alternative Natural Fiber Reinforced Polymer (NFRP) materials are needed that are environmentally friendly, renewable, and relatively cheaper, such as jute, hemp, cotton, abaca and basalt. 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).

©2022 Magister Teknik Sipil USK. All rights reserved

1. PENDAHULUAN

Struktural bangunan yang mengalami penurunan daya layan, mutu beton bangunan eksisting yang tidak sesuai, serta kejadian alam tak terduga seperti gempa, membuat struktural memerlukan perkuatan. Selain itu, dengan adanya peningkatan beban layan juga diperlukan pengekangan eksternal untuk menahan beban struktur (Ozbakkaloglu dkk, 2013 dan Wang dkk, 2018). Untuk mengatasi hal tersebut maka dibutuhkan suatu metode perkuatan untuk meningkatkan mutu beton dan daktilitasnya dalam menahan beban gempa. Salah satu metode yang dapat diaplikasikan adalah dengan memberikan pengekangan eksternal pada beton. Beton yang terkekang dapat meningkatkan ketahanan terhadap gempa (Li dkk, 2004 dan Guo dkk, 2019). Pengekangan eksternal terhadap beton mampu meningkatkan kekuatan dan daktilitas beton secara signifikan (Ozbakkaloglu dkk, 2013 dan Baasankhuu dkk, 2020). Pengekangan eksternal beton dapat dilakukan dengan menggunakan *Fiber Reinforced Polymer* (FRP).

FRP merupakan salah satu material komposit yang terdiri dari matrik resin polimer yang diperkuat dengan serat (Tamuzs dkk, 2006). FRP dapat digunakan untuk perkuatan eksternal (*external confinement*) pada struktur beton, dimana FRP mengekang beton dari luar. Seperti yang disebutkan pada (Lim dan Ozbakkaloglu, 2015) bahwa dengan pengekanan eksternal pada beton menggunakan FRP, kuat tekan beton mengalami peningkatan dengan menggunakan 1 lapis serat *aramid* sebesar 72,635%, 1 lapis serat *carbon* sebesar 101,464%, dan 1 lapis serat *glass* sebesar 65,315%. Selain penggunaan FRP berbahan sintesis yang umum digunakan, beberapa penelitian telah mengembangkan penggunaan material jenis lainnya seperti *polyethylene naphthalate* dan basalt (Guo dkk, 2019).

Penggunaan material FRP memerlukan biaya yang relatif mahal dan proses produksi yang tidak ramah lingkungan (Burgoyne dan Balafas, 2007). Oleh karena itu, diperlukan suatu alternatif pemakaian material FRP berbahan alami yang bersifat ramah lingkungan dan relatif lebih murah untuk diaplikasikan yaitu *Natural Fiber Reinforced Polymer* (NFRP). Beberapa serat alam yang dapat dijadikan sebagai material dasar NFRP diantaranya jute, hemp dan katun (Jirawattanasomkul dkk, 2019). Pada (Wang, 2018) menyebutkan bahwa pemakaian serat alami pada material komposit dapat mengurangi dampak terhadap lingkungan karena proses pembuatannya ramah lingkungan, jumlahnya berlimpah ruah, memiliki massa yang ringan, biaya produksi yang ekonomis, dan dapat diperbaharui.

Review penelitian ini dilakukan bertujuan untuk mengetahui perilaku beton terkekang dengan eksternal NFRP serta peningkatan kuat tekan dan daktilitas akibat pengekanan beton. Review paper ini dikutip dari berbagai referensi dan literatur yang ada.

2. KAJIAN PUSTAKA

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

Serat (*fiber*) merupakan sekumpulan material halus berbentuk benang yang kemudian dianyam sehingga dapat membentuk suatu lembaran serat yang utuh. *Fiber Reinforced Polymer* (FRP) adalah material komposit yang terdiri dari dua material yaitu resin dan serat sebagai perkuatan. Beberapa tahun ini pengolahan serat telah diperbaharui sehingga bermanfaat dalam pembuatan dan perkuatan struktur bangunan sebagai campuran beton atau perkuatan beton.

Tabel 1. Komposisi Kimia Serat Alam

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	-

Sumber : Faruk (2012)

Serat yang paling sering digunakan dalam perkuatan struktur adalah serat polimer, serat alam dan serat sintetis. Serat alam didapatkan dari tumbuhan, kemudian serat tersebut diolah sedemikian rupa sehingga mempunyai sifat, perilaku, dan kekuatan yang sesuai persyaratan sehingga dapat digunakan untuk perkuatan struktur. Menurut Mohammed, dkk (2015), hal-hal yang harus diperhatikan dalam pemilihan serat yaitu berat jenis (*specific gravity*), kuat tarik (*tensile strength*), *fatigue failure mechanism*, *thermal conductivity*, dan biaya (*cost*). Penggunaan serat alam sebagai material komposit yang dimanfaatkan dalam struktur bangunan sebagai perkuatan beton masih terus dikembangkan. Serat alam dapat menjadi alternatif material FRP sintetis karena memiliki kelebihan antara lain adalah bersifat isolator, dapat diperbaharui, ramah lingkungan, dan memiliki biaya produksi yang lebih murah, membuat serat alam laik dipertimbangkan sebagai alternatif material komposit (Codispoti dkk, 2015). Komposisi kimia dari berbagai jenis serat alam dapat dilihat pada Tabel 1.

Berdasarkan Tabel 1 menunjukkan bahwa selulosa merupakan komponen utama dari serat alam karena kandungan selulosa yang paling tinggi. Selulosa merupakan komponen utama yang memberikan kekuatan pada serat (Codispoti dkk, 2015). Umumnya serat alami yang telah diteliti kekuatannya maka dapat digunakan untuk material NFRP. Material properties serat alam dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Material Properties Serat Alam

Serat	Densitas (g/cm ³)	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

Sumber : Jawaid dan Khalil (2011)

Selain serat alam, perekat juga merupakan salah satu material *Natural Fiber Reinforced Polymer* (NFRP). Peran perekat adalah untuk melekatkan NFRP terhadap beton. Resin yang digunakan untuk membuat material komposit NFRP adalah resin *epoxy* dan hardener. *Epoxy* adalah suatu polimer yang terbentuk dari dua bahan kimia berbeda, yang kemudian disebut sebagai resin dan pengeras. Resin *epoxy* memiliki beberapa kelebihan yaitu penahan panas yang baik, kekuatan yang tinggi, daya tahan yang baik terhadap pembebanan yang kontinyu, dan potensi keretakan selama pengeringan relatif kecil. Karakteristik resin *epoxy* dapat dilihat pada Tabel 3.

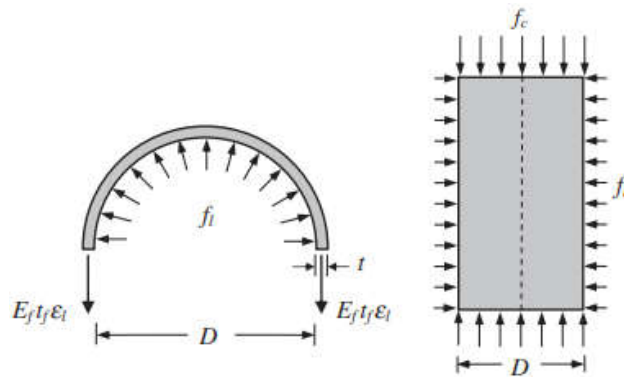
Tabel 3. Karakteristik Resin *Epoxy*

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

Sumber : Lim dan Ozbakkaloglu (2015)

2.2 Mekanisme Beton Terkekang

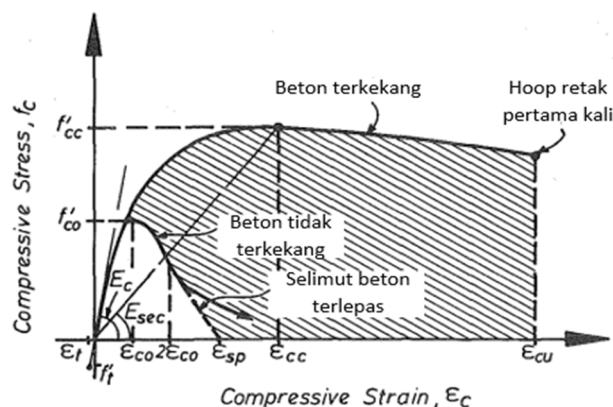
Pengekangan yang diberikan oleh perkuatan eksternal pada beton ketika beton menerima beban aksial tekan, beton akan mengalami ekspansi lateral pada inti beton. Ekspansi lateral dapat dicegah dengan cara memberikan tegangan lateral terhadap inti beton seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Hal ini membuat beton dalam kondisi terkekang. Beton yang terkekang akan memiliki kuat tekan dan daktilitas yang lebih tinggi dibanding beton tidak terkekang (Lim dan Ozbakkaloglu, 2015 dan Antonius, 2021).



Gambar 1. Mekanisme pengekangan (*confinement mechanism*)
 Sumber : Ozbakkaloglu, dkk (2015)

2.3 Perilaku Tegangan-Regangan Beton Terkekang

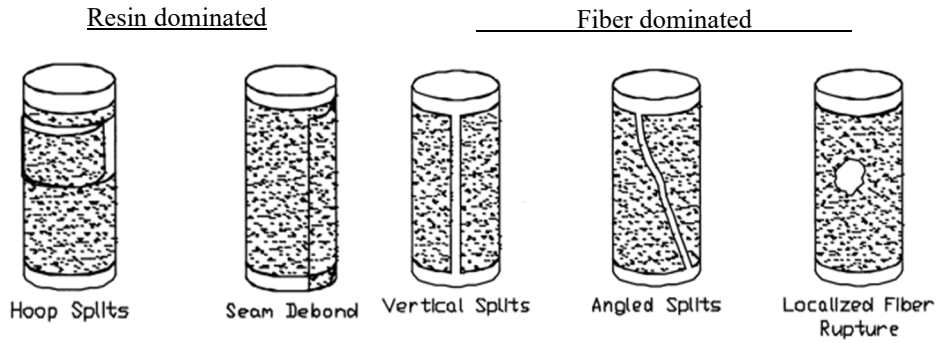
Beton yang dikekang dengan material FRP sangat tergantung pada ekspansi lateral beton akibat diberikannya tekanan aksial (Ozbakkaloglu dkk, 2013). Pelebaran beton akan meningkat seiring dengan meningkatnya regangan aksial dari peningkatan pemberian beban tekan. Ketika beton mulai terjadi retak, maka posisi beton tetap stabil karena beban aksial dikekang oleh material FRP. Dua manfaat pengekangan yang sangat relevan pada beton yaitu dapat meningkatkan kemampuan kuat tekan beton dan meningkatkan daktilitas. Beton tanpa pengekangan akan lebih cepat *collapse* dibandingkan dengan beton yang diberikannya pengekangan. Asumsi yang digunakan adalah bahwa beton akan mengalami retak setelah lewat dari nilai regangannya yaitu 0,003 dan kemudian pengekangan yang diberikan oleh FRP akan bekerja maksimal. Peningkatan dari tegangan lateral yang diberikan dari pengekang FRP akan meningkatkan daktilitas beton, yang ditandai dari semakin landainya kurva beton setelah beban ultimit dicapai (Mander, 1988).



Gambar 2. Kurva tegangan-regangan model kekangan
 Sumber : Antonius (2021)

2.4 Mode Kegagalan Beton Terkekang FRP

Ketika FRP diaplikasikan untuk perkuatan pada struktur beton ada beberapa mode kegagalan yang dapat terjadi menurut Cleary, dkk (2003), yang dapat dilihat pada Gambar 3.

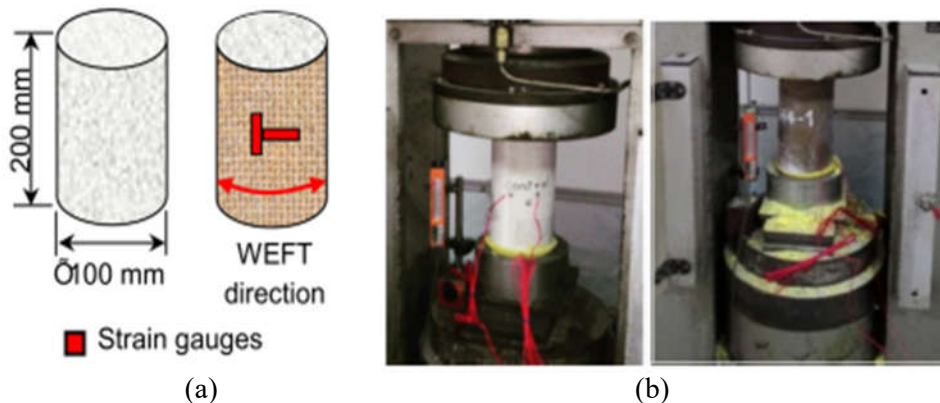


Gambar 3. Mode kegagalan pada silinder beton terkekang
 Sumber : Cleary, dkk (2003)

3. SURVEY LITERATUR

Jurnal ini merupakan suatu kajian literatur pustaka mengenai pengekangan beton menggunakan serat alami. Kriteria pemilihan jurnal didasarkan dari jenis serat yang digunakan serta variasi jumlah lapisnya. Terdapat beberapa jurnal mengenai beton terkekang seperti penelitian yang dilakukan oleh Jirawattanasomkul, dkk (2019) bertujuan untuk mengetahui perilaku beton terkekang dengan eksternal NFRP dan peningkatan kuat tekan akibat pengekangan serta material properties dari komposit NFRP. Benda uji yang digunakan pada penelitian ini berbentuk silinder dengan ukuran 100 x 200 mm dengan mutu rencana 21 MPa yang berjumlah 21 benda uji yang diberi kekangan eksternal NFRP dan 3 benda uji tanpa adanya kekangan pada beton.

Beton yang telah di cor kemudian dilakukan perawatan selama 28 hari untuk menghindari terjadinya retakan akibat proses hidrasi beton. Setelah dilakukannya perawatan, beton akan dibungkus dengan beberapa jenis serat alam yaitu jute, hemp dan katun. Pada penelitian ini dilakukan kekangan eksternal FRP serat alam pada beton dengan cara membungkus melingkari seluruh beton sehingga membuat beton tertutup rapat dari bawah ke atas. Pembungkusan NFRP pada beton dilakukan secara kontinu dengan menggunakan resin *epoxy* dan hardener serat disesuaikan dengan variasi jumlah lapis serat yaitu 1 lapis, 2 lapis dan 3 lapis. Pada saat pembungkusan serat ditekan kuat agar perekat resin *epoxy* yang digunakan memenuhi luasan serat pada sisi beton. Pada bagian akhir lapis serat diletakkan 150 mm (daerah *overlap*). Pada benda uji, regangan diukur dengan 2 buah *strain gauge* yang ditempelkan ke NFRP pada ketinggian tengah beton ($\frac{1}{2} h$ beton). Gambar benda uji dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. (a) Beton silinder dan (b) Set-up benda uji
 Sumber : Jirawattanasomkul, dkk (2019)

Hasil pengujian kuat tekan beton terkekang eksternal NFRP oleh Jirawattanasomkul, dkk (2019), diketahui bahwa mode kegagalan yang terjadi yaitu pecahnya NFRP di luar daerah *overlap* serta terjadi

pengelupasan selimut beton terkekang (delaminasi) pada lapisan NFRP di daerah *overlap* karena panjang *overlap* yang tidak memadai. Delaminasi diamati pada beton terkekang antara lapisan NFRP katun dan NFRP jute dengan jumlah lapisan yaitu 4-6 lapisan. Hal ini karena NFRP katun dan NFRP jute lebih tebal dan kaku daripada NFRP hemp. Oleh karena itu, delaminasi antara NFRP dan beton harus sangat diperhatikan. Selain itu, efek kekangan NFRP dari jumlah lapisan yang berbeda sangat berpengaruh terhadap peningkatan perilaku tegangan-regangan tekan beton terkekang secara signifikan. Jenis serat dan jumlah lapisan serat NFRP secara signifikan mempengaruhi kekuatan tekan beton. Dari ketiga jenis serat alam yang digunakan sebagai pengekangan beton, didapatkan bahwa NFRP jute adalah yang paling baik. Dengan meningkatnya jumlah lapis maka meningkat pula kuat tekannya. Tegangan lateral NFRP juga meningkat ketika tegangan tekan aksial silinder beton meningkat. Ketika tegangan lateral melebihi kekuatan tarik maksimum NFRP, maka akan terjadi kegagalan NFRP.

Ghalieh, dkk (2017) melakukan penelitian untuk melihat pengaruh variasi jumlah lapisan dan rasio kelangsingan beton sebagai efektivitas dalam pengekangan beton. Jumlah lapisan yang digunakan bervariasi yaitu 1, 2 dan 4 lapis. Variasi rasio kelangsingan beton yaitu 1,5, 2, 2,5 dan 3 dengan tinggi beton yang berbeda namun diameter beton yang sama. Serat alami yang digunakan untuk pengekangan beton yaitu serat rami. Benda uji berbentuk silinder dengan variasi ukurannya adalah 200 x 300 mm, 200 x 400 mm, 200 x 500 mm dan 200 x 600 mm. Pada permukaan benda uji dibalur *epoxy* kemudian serat alam diaplikasikan pada beton seperti terlihat pada Gambar 5 (a) dan (b). Saat dilakukan pembebanan pada beton, digunakan Empat buah *Linear Variable Differential Transducer* (LVDT) untuk melihat regangan aksial yang terjadi. LVDT diposisikan setiap jarak 90° dan ditempatkan pada ketinggian sedang benda uji seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6. Uji tekan dilakukan menurut ASTM C39, menggunakan mesin MTS dengan tingkat perpindahan konstan 3 mm/menit. Semua benda uji diberi pembebanan secara aksial hingga gagal dan kemudian pembacaan data hasil menggunakan data logger.



Gambar 5. (a) Persiapan permukaan beton dan (b) Proses pembalutan serat rami
Sumber : Ghalieh, dkk (2017)



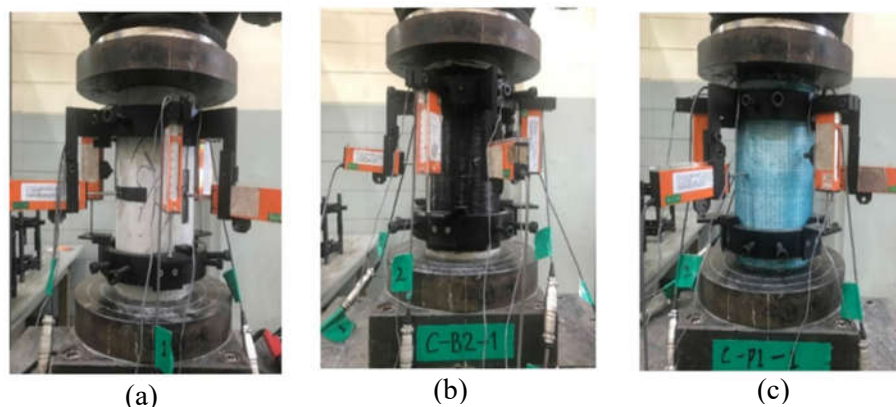
Gambar 6. Set-up benda uji
Sumber : Ghalieh, dkk (2017)

Hasil penelitian yang telah dilakukan Ghalieh, dkk (2017) adalah kuat tekan aksial dan daktilitas beton yang dikekang dengan serat rami meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah lapisan pengekok. Peningkatan kuat tekan aksial untuk benda uji dengan variasi jumlah lapisan 1, 2, dan 4 lapis berturut-turut adalah 9%, 13%, dan 22%. Daktilitas diukur dari kehancuran benda uji. Dengan demikian, peningkatan daktilitas menyebabkan peningkatan kuat tekan beton yang mampu dicapai. Indeks daktilitas benda uji dengan jumlah lapisan 1, 2, dan 4 lapis yang dibandingkan dengan benda uji tidak terkekang berturut-turut adalah 2,78, 3,95, dan 6,98. Rasio kelangsingan beton juga mempengaruhi kuat tekan beton dan daktilitasnya. Kuat tekan dan daktilitas beton akan berkurang seiring dengan meningkatnya rasio kelangsingan. Selain itu, Kegagalan yang terjadi pada benda uji yaitu retak sejajar dengan arah aksial pembebanan dan tegak lurus dengan arah serat.

Selain itu, penelitian mengenai beton terkekang juga dilakukan oleh Baasankhu, dkk (2020) dengan menggunakan serat alam. Baasankhu, dkk (2020) melakukan penelitian eksperimental untuk mengetahui pengaruh pengekokan terhadap kuat tekan, mode kegagalan serta panjang daerah *overlap* pada beton terkekang dengan menggunakan variasi jumlah lapisan serat. Serat alam yang digunakan yaitu *polyethylene naphthalate fiber reinforced polymer* (PEN FRP) dan *basalt fiber reinforced polymer* (BFRP). Variasi jumlah lapisan yang digunakan adalah 1, 2, dan 3 lapisan untuk PEN FRP dan 2, 4, dan 6 lapisan untuk BFRP. Jumlah sampel benda uji yang digunakan dalam penelitian ini adalah 25 benda uji dengan dimensi 150 x 300 mm.

Lembaran serat PEN dan basalt dipotong dengan panjang yang telah ditentukan. Sebelum beton dibalut serat, beton terlebih dahulu diolesi perekat ke seluruh permukaan beton untuk meningkatkan ikatan antara beton dan serat. Kemudian beton dibalut serat secara manual dengan metode wet lay-up. Seluruh tinggi beton dibalut kecuali panjang 10 mm di ujung atas dan bawah beton. Untuk semua beton BFRP memiliki panjang *overlap* 50 mm. Namun, panjang *overlap* bervariasi untuk beton PEN FRP: panjang *overlap* untuk 1 lapisan adalah 150 mm, 50 mm untuk 2 lapisan, dan nihil untuk 3 lapisan. Pengaruh panjang *overlap* yang berbeda-beda pada beton PEN FRP juga dievaluasi.

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.



Gambar 7. Set-up pengujian benda uji (a) Benda uji silinder, (b), BFRP dan (c) PEN FRP
Sumber : Baasankhu, dkk (2020)

Hasil penelitian yang dilakukan oleh Baasankhu, dkk (2020) menunjukkan bahwa peningkatan kuat tekan beton yang terkekang dengan BFRP menggunakan 2 – 6 jumlah lapis dan PEN FRP menggunakan 1 – 3 jumlah lapis adalah dapat meningkat dari beton yang tidak terkekang. Kekuatan beton yang dibalut dengan PEN FRP dicapai pada regangan aksial dan regangan lateral yang jauh lebih tinggi dari beton yang dikekang dengan BFRP. Terdapat tambahan benda uji dengan variasi panjang daerah tumpang tindih (*overlap*) pada penelitian ini untuk mengetahui efektivitasnya dalam pengekangan beton. Variasi panjang daerah tumpang tindih (*overlap*) adalah 150 mm, 50 mm dan 0 mm. Didapatkan bahwa mode kegagalan yang terjadi untuk variasi 150 mm yaitu putusya serat pada beton terkekang sedangkan untuk variasi 50 mm yaitu delaminasi (pengelupasan serat dari beton) dan serat putus serta untuk variasi 0 antoniusmm yaitu delaminasi (pengelupasan serat dari beton) sehingga serat tidak bekerja secara maksimal.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan yang dapat diambil dari beberapa paper mengenai kuat tekan beton terkekang dengan eksternal FRP serat alami sebagai berikut:

1. Pemakaian serat alam seperti rami, basalt, katun dan abaka dapat menjadi alternatif sebagai material komposit penyusun NFRP karena memiliki berbagai kelebihan diantaranya jumlahnya berlimpah ruah, biaya produksi yang ekonomis serta memiliki kuat tarik yang tinggi.
2. NFRP menunjukkan efek pengekangan yang signifikan pada peningkatan kuat tekan dan peningkatan daktilitas beton. Berdasarkan jirawattanasomkul dkk (2019) dan Ghalieh, dkk (2017) menyebutkan bahwa peningkatan kekuatan dan daktilitas akan meningkat dengan peningkatan jumlah lapisan NFRP.
3. Tegangan ultimit yang dicapai oleh beton terkekang serat menurut Ghalieh, dkk (2017) dipengaruhi oleh rasio kelangsingan beton. Kuat tekan akan berkurang dengan meningkatnya rasio kelangsingan. Peningkatan daktilitas juga menurun dengan meningkatnya rasio kelangsingan.
4. Berdasarkan hasil pengujian Baasankhu, dkk (2020) panjang daerah tumpang tindih (*overlap*) disarankan diantara 50 mm sampai 150 mm.

Saran untuk penelitian lanjutan diharapkan agar dapat melakukan penelitian dengan menggunakan lebih banyak variasi serat alam sebagai alternatif material NFRP pada pengekangan eksternal beton.

DAFTAR PUSTAKA

- Antonius. 2021. *Perilaku dasar dan desain beton bertulang berdasarkan SNI-2847-2019*, UNISSULA PRESS, Semarang, pp. 24.
- Baasankhu, B., Choi, D., Ha, Sangsu. 2020. Behavior of small-scale concrete cylinders in compression laterally confined by basalt fiber and pen fiber reinforced polymer composites. *International journal of concrete structure and material*. 14(8), pp. s40069-019-0384-6.
- Burgoyne, C., Balafas, I. 2007. Why is FRP not a financial success?. In *Proc. 8th Intl. Conf. on FRP Reinforcement for Reinforced Concrete Structure, FRPCS-8*, Univ. of Patras, Patras, Greece.
- Cleary, D. B., Cassino, C. D., Tortorice, R. 2003. Effect of elevated temperatures on a fiber composite used to strengthen concrete columns. *Journal of Reinforced Plastics And Composites*, 22 (10), pp. 881-895.
- Codispoti, R. 2015. *Mechanical of natural fiber-reinforced composites for the strengthening of masonry. Composites Part B*. 77, pp. 74-83.
- Faruk, O., Bledzki, AK, Sain, M. 2012. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. *Progress in Polymer Science*. 37(11), pp. 1552–1596.

- Ghalieh, L., Awwad, E., Saad, G., Khatib, H., Mabsout, M. 2017. Concrete columns wrapped with hemp fiber reinforced polymer. *The 13rd International Conference on Natural Fibers: Advanced Materials for a Greener World, ICNF*. University of Beirut, Lebanon.
- Guo, Y.C., Gao, W.Y., Zeng, J., Duan, Z., Ni, Z., Peng, K. 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*. 201(20), pp. 350-368.
- Jawaid, M., Khalil, Abdul HPS. 2011. Cellulosic/synthetic Fibre Reinforced Polymer hybrid composites: A review. *Carbohydrate Polymers*, 86(1), pp. 1–18.
- Jirawattanasomkul, T., Ueda, T., Likitlersuang, S., Zhang, D., Hanwiboonwat, N., Wuttiwannasak, N., Horsangchai, K. 2019. Effect of natural Fibre Reinforced Polymers on confined compressive strength of concrete. *Construction and Building Material*. 223, pp.156–164.
- Li, Yeou-Fong, Fang, Tsang-Sheng, Chern, Ching-Churn. 2004. A constitutive model for concrete cylinder confined by steel reinforcement and carbon fibre sheet. *Structural Engineering and Mechanics*. 18(1), pp. 21-40.
- Lim, Jian-Chin, Ozbakkaloglu, T. 2015. Hoop strains in FRP-confined concrete columns: Experimental observations. *Material and Structures*. 48, pp. 2839–2854.
- Mander, J., B., Priestley, M., J., N., Park, R. 1988. Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete. *ASCE*.
- Mohammed, Layth, Ansari, MNM, Pua, Grace, Jawaid, Mohammad, Islam, M.S. 2015. A review on natural fiber reinforced polymer composite and its applications. *International Journal of Polymer Science*. 243947, pp. 15.
- Ozbakkaloglu, T., Lim, Jian Chin, Vincent, T. 2013. FRP-confined concrete in circular sections: Review and assessment of stress–strain models. *Eng Struct*. 49, pp.1068–1088.
- Tamuzs, V., Tepfers, R., Sparnins, E. 2006. Behavior of concrete cylinder confined by carbon composite. *Mechanics of Composite Material*. 42(2), pp. 109–118.
- Wang, D., Wang, Z., Yu, T., Li, H. 2018. Seismic performance of CFRP-retrofitted large-scale rectangular RC columns under lateral loading in different direction. *Composites Structure*. 192(15), pp. 475-488.