

PENGARUH LAPISAN MATERIAL UHPFRC SEBAGAI MATERIAL PERKUATAN KOLOM BETON BERTULANG

Ricky Bakara^{1*}, Johannes Tarigan², Badarol Hisham Abu Bakar³, Nursyamsi⁴

^{1,2,4} Master of Civil Engineering, Faculty of Engineering Universitas Sumatera Utara, Medan, Indonesia

³ School of Civil Engineering, Engineering Campus, Universitas Sains Malaysia, Penang, Malaysia

Email: *rickysro3bakara@gmail.com

Abstrak

Penggunaan beton sebagai bahan konstruksi telah menjadi lazim di era saat ini. Meskipun begitu, kerusakan pada struktur beton bertulang, terutama pada struktur kolom, tidak dapat dihindari. Hal ini seringkali disebabkan oleh gempa bumi dan beban yang melebihi daya dukung bangunan. Indonesia, sebagai negara yang terletak di wilayah rawan gempa, membutuhkan struktur bangunan yang kuat dan tahan gempa. Oleh karena itu, perbaikan struktur beton bertulang yang rusak menjadi suatu kebutuhan mendesak dalam industri konstruksi di Indonesia. Salah satu inovasi untuk meningkatkan kekuatan dan masa pakai struktur beton bertulang adalah penggunaan Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete (UHPFRC). Meskipun telah diakui sebagai bahan konstruksi yang berkembang, implementasi UHPFRC dalam struktur bangunan masih memerlukan konsep desain baru dan penerapan yang efektif. Penelitian ini bertujuan untuk menguji efektivitas UHPFRC dalam memperkuat kolom beton bertulang yang rusak. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan lapisan UHPFRC pada kolom beton bertulang meningkatkan beban maksimum yang dapat ditanggung oleh struktur. Dengan variasi ketebalan lapisan UHPFRC, terlihat bahwa peningkatan kekuatan mencapai 57,05%, 11,62mm pada CC-0; 114,58%, 14,58mm pada RCS-1; dan 269,54%, 20,59mm pada RCS-2 dibandingkan dengan kolom kontrol. Hasil ini memberikan indikasi bahwa perbaikan struktur beton bertulang dengan menggunakan UHPFRC merupakan solusi yang potensial dalam memperkuat kolom di daerah rawan gempa.

Kata kunci: kolom beton bertulang; uhpfrc; perkuatan; kuat tekan

Abstract

The prevalent use of concrete as a construction material underscores its significance in contemporary building practices. Unfortunately, damage to reinforced concrete structures, particularly columns, is inevitable, often resulting from seismic activity and excessive loads surpassing the structure's capacity. Indonesia, located in a seismic-prone region, underscores the necessity for robust structures in its construction landscape. To enhance the longevity of reinforced concrete structures, the development of robust methodologies, innovative models, and eco-friendly materials becomes imperative. Ultra-High Performance Fiber-

How to cite:	Ricky Bakara, Johannes Tarigan, Badarol Hisham Abu Bakar, Nursyamsi (2022) Pengaruh Lapisan Material Uhpfrc Sebagai Material Perkuatan Kolom Beton Bertulang, (7) 09, Doi 10.36418/syntax-literate.v7i9.14249
E-ISSN:	2548-1398
Published by:	Ridwan Institute

Reinforced Concrete (UHPFRC) emerges as an evolving construction material with ongoing research. However, its integration into structural construction faces hurdles, requiring novel design concepts and effective implementation. This study focused on reinforced concrete columns fortified with UHPFRC layers. A control column and three test columns, subjected to loads at 50% of the control's maximum capacity, were examined. The damaged columns underwent reinforcement using the UHPFRC overlay method, varying in thickness (10, 15, and 20 mm). Test results, graphically analyzed using fundamental formulas for reinforced concrete columns, revealed increased maximum loads for all UHPFRC-coated columns. The respective increases compared to the control column were 57.05%, 114.58%, and 269.54%. Additionally, the reinforced concrete columns with UHPFRC layers of different thicknesses were denoted as CC-0 (11.62 mm), RCS-1 (14.58 mm), and RCS-2 (20.59 mm). The observed enhancements in maximum load for each column suggest that reinforcing columns with UHPFRC layers is a viable method for fortifying reinforced concrete columns, particularly in seismic-prone areas.

Keywords: reinforced concrete columns; UHPFRC; reinforcement; compressive strength

Pendahuluan

Bangunan sipil umumnya dirancang untuk keamanan struktur akibat beban normal maupun ekstrim yang dapat menyebabkan kerusakan. Dengan terjadinya kerusakan pada struktur beton perlu dilakukan perkuatan. Kerusakan yang terjadi dapat diakibatkan dari pembebanan yang melebihi kapasitas ataupun akibat daya tahan beton yang berkurang serta diakibatkan oleh bencana alam, seperti gempa bumi dan kebakaran.

Gempa bumi menjadi salah satu faktor terbesar yang membuat kerusakan pada beton terutama pada struktur atas seperti kolom, balok, dan pelat. Pada konstruksi bangunan gedung, kekuatan struktur bagian atas diperoleh dari komponen utama yang berupa kolom dan balok. Dari kedua komponen tersebut, kolom memiliki peranan yang lebih besar dalam sistem struktur bangunan atas. Hal ini dikarenakan kolom memiliki fungsi sebagai penyangga utama beban aksial tekan vertikal. Sebagai penyangga utama beban aksial tekan vertikal, keruntuhan kolom dapat mengakibatkan runtuhnya komponen struktur lain yang terhubung dengan kolom tersebut, atau bahkan dapat menyebabkan keruntuhan total dari suatu bangunan gedung. Tingkat atau kondisi kerusakan akan menentukan apakah elemen struktur bangunan beton bertulang dapat diperbaiki, digunakan kembali atau tidak. Kerusakan yang terjadi dapat diperbaiki dengan tidak mengubah ataupun menghancurkan keseluruhan struktur (Li et al., 2017). Ada beberapa metode perbaikan yang dilakukan pada pengaplikasiannya. Metode yang digunakan akan selalu terkait dengan cara pengerjaannya, kepraktisan, kapasitas kekuatan sisa, tingkat kerusakan, perilaku struktural, daya tahan dan biaya perbaikan. Sehubungan dengan perbaikan atau perkuatan elemen struktur, selain metode, pemilihan bahan yang tepat untuk digunakan dalam perbaikan atau perkuatan juga sangat penting. Bahan-bahan yang dimaksud adalah polimer yang diperkuat serat (FRP), jaket baja, serat RC (FRC),

mortar yang diperkuat serat kekuatan tinggi (HSFM), beton kinerja sangat tinggi (UHPC), UHPFRC, dll.

Kerusakan elemen struktur bangunan beton bertulang dapat terjadi pada pondasi, kolom, balok, sambungan balok-kolom, dinding geser, dll. Karena pentingnya dalam menahan beban kerja, maka diperlukan perbaikan atau perkuatan elemen struktur tersebut jika terjadi kerusakan apapun supaya bangunan tersebut dapat digunakan kembali. Walaupun telah banyak penelitian terkait penggunaan lapisan UHPC atau UHPFRC sebagai bahan perkuatan untuk meningkatkan kinerja struktur elemen yang rusak telah dilakukan, namun dalam tulisan ini penelitian lebih difokuskan pada perkuatan kolom beton bertulang rusak dengan menggunakan lapisan UHPFRC. Penelitian ini dikembangkan agar berbeda dari penelitian sebelumnya dan bertujuan untuk meneliti tentang penggunaan lapisan UHPFRC dengan berbagai ketebalan untuk meningkatkan kinerja struktur kolom beton bertulang rusak.

Metode Penelitian

1. Material dan Mix Design

Desain campuran beton mutu normal (NSC) telah sesuai dengan rekomendasi dari ACI 211.1–91 (A. Committee, 2002; Dixon et al., 1991). Beberapa campuran percobaan disiapkan campuran beton normal menggunakan semen Portland biasa (OPC), agregat halus (pasir sungai) dengan modulus kehalusan 2,4 dan agregat kasar (granit hancur) dengan ukuran maksimal 9,5 mm, dan rasio air/semen 0,54. Berdasarkan hasil uji sifat segar, nilai slump adalah 11,5 cm. Kemudahan pengerjaan campuran segar cukup baik tanpa segregasi. kuat tekan beton pada umur 28 hari sebesar 28,8Mpa. Sementara itu, desain campuran UHPFRC diadopsi dengan mengacu pada Tayeh et al. (2012, 2013). Bahan yang digunakan terdiri dari OPC (atau C), densified silica fume (SF), pasir tambang (MS), air (W), superplasticizer (SP) dan serat baja mikro (Stf). Keduanya mencampur proporsi di atas disajikan pada Tabel 1. Pada penelitian ini, desain campuran UHPFRC memiliki rasio pengikat air yang rendah yaitu 0,15. Ukuran partikel pasir penambangan berkisar antara 100 hingga 1180 μ m. Padat silika asap 25% dari berat semen digunakan, dan fraksi 2% volume baja mikro serat ditambahkan dengan tujuan meningkatkan perilaku tarik. Serat baja mikro memiliki diameter 0,2 mm, panjang 10 mm, dan kuat tarik rata-rata 2500 MPa. SP dosis 4,17% dari berat pengikat dijaga konstan untuk memastikan kecukupan workabilitas campuran UHPFRC segar. Untuk menilai sifat segar, uji flowabilitas dilakukan dengan menggunakan flow table menurut ASTM C 1437 (ASTM, 2007, p. 1437) dan Ahlborn et al. (2008). Hasil pengujian menunjukkan rata-rata diameter UHPFRC segar.

Tabel 1
Campuran

Material	NSC	UHPFRC
OPC	kg/m ³	kg/m ³

<i>Silica Fume</i>	300	768
Pasir Tambang	-	192
<i>Steel Fiber</i>	-	1140
Agregat Halus	-	157
Agregat Kasar	1050	-
Air	700	-
<i>Superplasticizer</i>	162	144

Campuran adalah 215 mm pada 20 pukulan, itu artinya bahwa sifat segar UHPFRC memenuhi persyaratan beton pemadatan sendiri, seperti yang diuraikan pada Tabel 2. Selain itu, UHPFRC memiliki kekuatan tekan dan lentur masing-masing 141,5 dan 22,8 MPa.

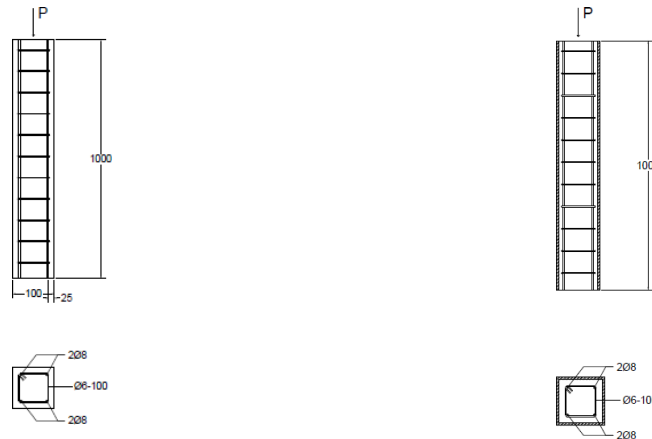
Tabel 2
Sifat Segar UHPFRC

Klasifikasi Aliran	Kasus I	Kasus II	Kasus III
	Kaku	Cair	Sangat Cair
Pengukuran rata-rata setelah 20 ketukan	<200 mm	200-250 mm	>250 mm

Sumber: (Graybeal, 2006; MDOT, 2008; Tayeh, 2013)

2. Persiapan Benda Uji, Pembebanan, dan Pengujian Kolom

Dimensi kolom beton bertulang adalah 100 x 100 x 1000 mm, dengan dimensi tulangan diameter 8 mm dan tulangan sengkang diameter 6 mm. Detail dimensi dan penulangan kolom dapat dilihat pada Gambar 1. Perkuatan kolom beton bertulang dengan metode jacketing, yaitu dilakukan dengan melapisi UHPFRC pada keempat sisi panjang kolom beton bertulang. Kolom beton bertulang kontrol diuji tekan sampai runtuh. Sedangkan kolom beton bertulang lainnya, sebelum dilakukan tindakan perkuatan, diuji kuat tekan (strength) dengan diberi beban awal sebesar 50% dari beban maksimum kolom beton bertulang kontrol. Lalu benda uji kolom beton bertulang yang akan dilakukan tindakan perkuatan tersebut diberi lapisan UHPFRC dengan tebal yang bervariasi mulai dari 10, 15, dan 20 mm, kemudian diuji kembali sampai kolom runtuh. Benda uji kolom beton bertulang seluruhnya berjumlah 4, yaitu terdiri dari 1 benda uji kolom kontrol, dan 3 benda uji kolom yang keempat sisi tepanjangnya dilapisi dengan UHPFRC yang kemudian diuji sampai kolom hancur. Variasi benda uji bisa dilihat pada tabel.



Detail tulangan kolom beton bertulang

Detail tulangan kolom yang dilapisi UHPFRC

Gambar 1. Pemodelan peletakan benda uji dengan pengujian aksial

Tabel 3
Variasi benda uji

No	Type	Tipe Perkuatan UHPF RC	Tebal Lapisan UHPF RC	Dimensi (mm)	Tulangan Utama (mm)	Tulangan Sengkang (mm)
1		Kolom Kontrol	-	100 x 100	4Ø8	D6-100
2		Kolom UHPF RC	10 mm	120 x 120	4Ø8	D6-100
3		Kolom UHPF RC	15 mm	130 x 130	4Ø8	D6-100
4		Kolom UHPF RC	20 mm	140 x 140	4Ø8	D6-100

Setiap kolom beton bertulang diuji dengan tumpuan sederhana sendi-sendi. Untuk mengukur deformasi pada kolom beton bertulang, dipasang LVDT yang diletakkan tepat di atas kolom yang akan diuji. LVDT dan load cell terhubung ke data logger. Pembebanan tiap kolom dilakukan secara bertahap menggunakan jack hidraulic. Data untuk hubungan antara beban yang diterima kolom dan deformasi yang terjadi tersimpan pada PC yang tersedia di laboratorium, dan data deformasi beban diekspor dalam format MS Excel.

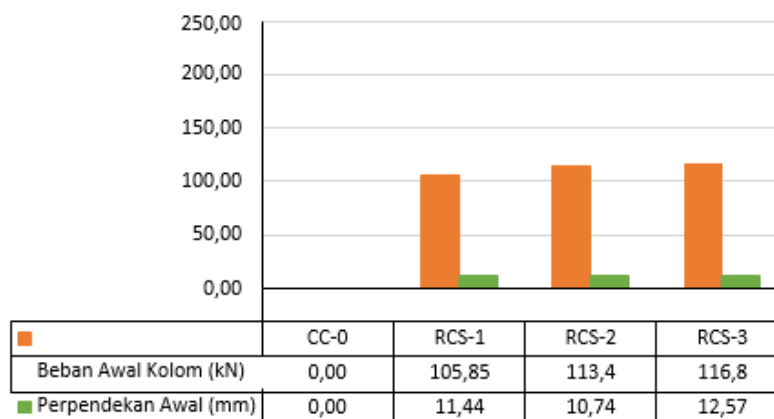
3. Perbaikan Kolom Beton Bertulang dengan UHPFRC

Untuk meningkatkan daya ikat (bonding) antara beton lama dengan material UHPFRC, maka sisi terpanjang kolom dikasarkan dengan metode sandblasting dengan memperhatikan permukaan kolom beton bertulang dikasarkan dengan baik dan

menyeluruh, sehingga daya ikat antara beton lama dengan UHPFRC mengikat sempurna. Dalam studi ini, permukaan yang dilapisi dengan UHPFRC adalah empat sisi terpanjang pada kolom bertulang dengan beberapa variasi ketebalan, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 3(b).

Hasil dan Pembahasan

Benda uji kolom yang diperkuat dengan UHPFRC menempatkan lapisan UHPFRC pada 4 sisi terpanjang dari kolom beton tersebut, 2 sisi samping kanan dan 2 sisi samping kiri. Pengujian kuat tekan beton yang dilakukan hanya pada dua buah benda uji yaitu RCS-1 dan RCS-2, dan pada RCS-3 tidak dilakukan pengujian, dikarenakan sudah melebihi kapasitas dari alat benda uji kolom. Pada benda uji kolom mengeluarkan data-data berupa beban yang terjadi, meliputi beban awal, beban maksimum dan beban runtuh. Beban awal adalah beban yang diberikan untuk memberikan kondisi kerusakan yang terjadi pada setiap benda uji kolom beton bertulang. Perpendekan awal merupakan nilai yang terjadi pada saat kolom beton bertulang diberikan beban awal. Beban awal dan pemendekan awal yang terjadi pada benda uji kolom yang dilapisi UHPFRC dapat dilihat pada Gambar 2.

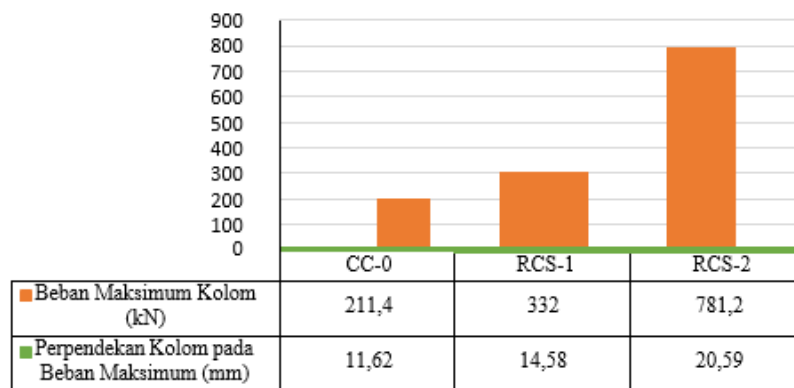


Gambar 2. Grafik beban & deformasi awal kolom UHPFRC

Pemberian beban pada alat uji kuat tekan dilakukan dengan menggunakan alat jack hidrolik yang dioperasikan secara manual (Gambar 4.10), menjadikan besaran beban awal sebesar 50% dari beban maksimum benda uji kolom kontrol yang diberikan pada benda uji kolom yang akan diberi lapisan perkuatan UHPFRC tidak dapat ditetapkan pada angka yang sama untuk setiap benda uji, namun pada kisaran angka yang mendekati. Grafik pada Gambar 2 di atas menunjukkan adanya sedikit perbedaan besaran beban awal yang terjadi pada masing – masing benda uji. Beban awal yang diberikan seharusnya sebesar 105,70 kN yang diperoleh dengan mengambil 50% dari nilai 211,4 kN, yang merupakan nilai beban maksimum yang diperoleh dari pengujian benda uji kolom kontrol. Besaran beban awal yang terjadi pada masing–masing kolom adalah sebesar 105,85; 113,40; dan 116, 80 kN. Pemberian beban awal ini menimbulkan nilai pemendekan awal yang terjadi pada semua benda uji kolom beton bertulang. Nilai

perpendekan yang terjadi mencapai 10,74–12,57 mm. Besaran beban yang diterima oleh benda uji dan juga pemendekan awal yang terjadi pada benda uji kolom, menyebabkan adanya kerusakan pada tiap-tiap benda uji kolom beton bertulang.

Setelah benda uji kolom beton bertulang mengalami kerusakan akibat beban awal yang diterimanya, seterusnya benda uji kolom tersebut diberikan lapisan UHPFRC pada keempat sisi terpanjang kolom yang berfungsi sebagai perkuatan. Setelah proses perkuatan selesai dengan melapisi UHPFRC, kemudian dilakukan uji kuat tekan kembali pada benda uji kolom yang diperkuat UHPFRC dengan pemberian beban sampai kolom benar-benar runtuh. Pengujian kuat tekan tersebut nantinya menghasilkan beban maksimum yang dapat dipikul oleh masing-masing benda uji. Besaran beban maksimum yang dihasilkan pada setiap benda uji kolom beton bertulang yang dilapisi UHPFRC dapat dilihat pada Gambar 3.

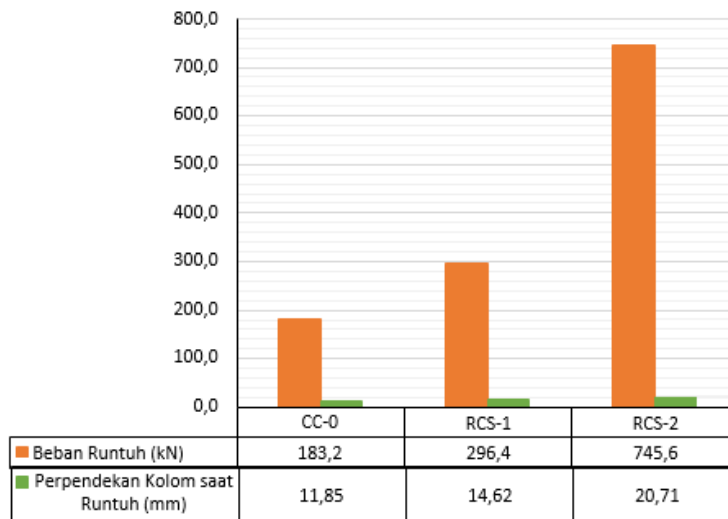


Gambar 3. Beban Maksimum pada Kolom Beton Bertulang dengan UHPFRC

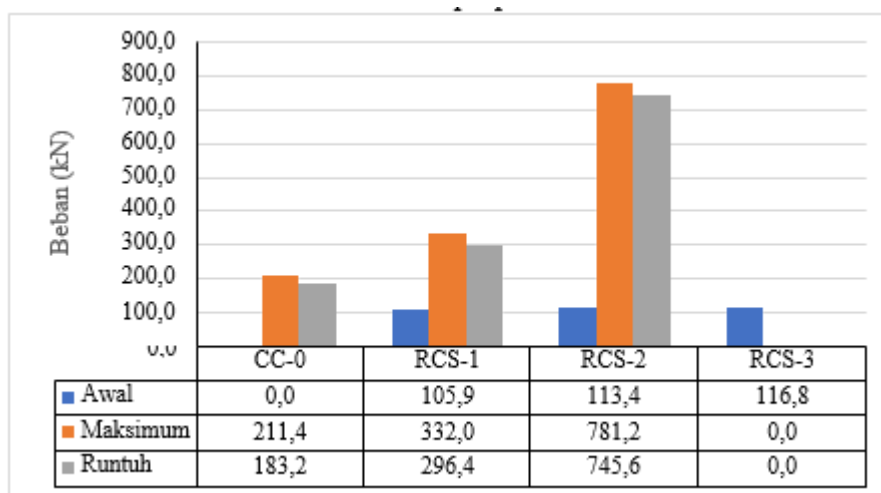
Gambar 3 Grafik beban & perpendekan maksimum kolom dilapisi UHPFRC. Semakin tebal lapisan perkuatan yang diberikan, maka menghasilkan beban maksimum yang semakin besar juga. Penyebab hal ini terjadi adalah pengaruh dari lapisan perkuatan UHPFRC yang diberikan (Nursyamsi, et al; 2022; C.-I. Lu., et al; 2023; X. Yang., et al; 2023). Terlihat bahwa kekuatan superior dari UHPFRC memberikan andil bagi kekuatan baru pada kolom bertulang yang ada. Dimana hasil yang diperoleh adalah semakin tebal lapisan perkuatan UHPFRC yang diberikan pada kolom benda uji, maka akan semakin besar juga beban maksimum yang dihasilkan. Hal ini sejalan dengan semakin besar dimensi total dari kolom beton bertulang yang telah dilapisi lapisan perkuatan UHPFRC. Jika dibandingkan dengan kolom kontrol, diketahui bahwa beban yang diperoleh dari keseluruhan benda uji kolom tersebut, menghasilkan beban yang lebih besar dari beban maksimum yang diperoleh kolom kontrol yaitu sebesar 211,4 kN. Benda uji RCS-1, RCS-2, dan RCS-3 masing-masing menghasilkan beban terjadi sebesar 332,00; 781,20kN. Beban maksimum yang terjadi pada benda uji kolom beton bertulang menyebabkan terjadinya deformasi maksimum. Perpendekan pada benda uji kolom kontrol mencapai sebesar 13,58 mm. Semakin besar tebal lapisan yang diberikan terhadap benda kolom uji, semakin besar pula nilai perpendekan yang terjadi pada kolom benda uji tersebut.

Perpendekan pada benda uji kolom masing-masing sebesar RCS-1 15,61; RCS-2 21,73 mm seperti yang terlihat pada grafik dalam Gambar 3 di atas. Selain beban awal dan beban maksimum, pengujian kuat tekan pada benda uji kolom juga menghasilkan beban runtuh. Besaran beban runtuh yang diperoleh pada kolom kontrol dan benda uji kolom perkuatan UHPFRC dapat dilihat pada Gambar 4.

Gambar 5 menampilkan perbandingan hasil beban dan pemendekan yang terjadi pada seluruh benda uji perkuatan UHPFRC dengan benda uji kolom kontrol, mulai dari awal sampai akhir pembebanan diberikan. Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa beban yang terjadi semakin meningkat sejalan dengan semakin tebal lapisan perkuatan UHPFRC yang diberikan. Sejalan dengan itu, nilai perpendekan pada kolom juga semakin besar seiring dengan semakin besarnya beban yang dapat dipikul oleh masing – masing benda uji.



Gambar 4. Grafik beban & perpendekan runtuh kolom UHPFRC



Gambar 5. Grafik Perbandingan Hasil Beban Yang Terjadi Pada Tiap Benda Uji Kolom Beton Bertulang UHPFRC

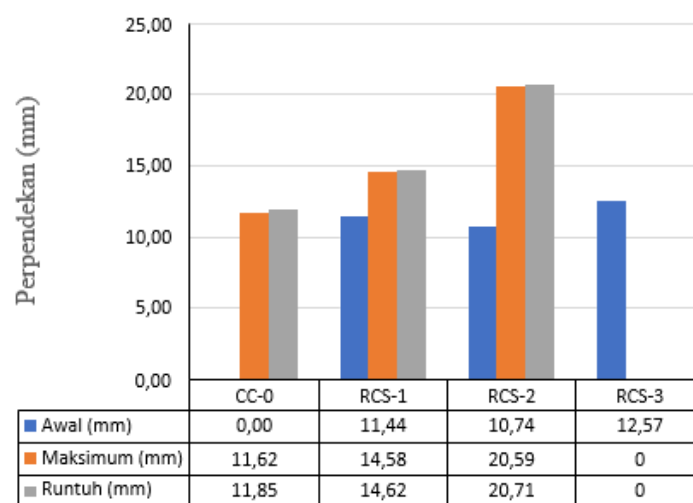
Untuk penambahan tebal lapisan pada benda uji kolom RCS-1 10 mm; RCS-2 15 mm; dan RCS-3 20 mm masing-masing diperoleh peningkatan beban maksimum berurutan sebesar 57,05%; dan 269,54%. Benda uji RCS-3 tidak dilakukan pengujian karena sudah melebihi kapasitas beban alat uji tekan itu sendiri.

Semakin tebal lapisan UHPFRC yang diaplikasikan pada benda uji kolom beton bertulang, maka semakin tinggi beban maksimum yang diperoleh, terlihat pada gambar 5 di atas. Tebel perbandingan beban maksimum benda uji kolom UHPFRC terhadap kolom kontrol dapat dilihat pada tabel 4 berikut.

Tabel 4.
Perbandingan Hasil Beban Maksimum Kolom Perkuatan UHPFRC terhadap Kolom Kontrol

No	Tipe	Dimensi	Beban Maksimum Kolom	Peningkatan kapasitas beban maksimum terhadap balok kontrol
		(mm)	(kN)	(%)
1	CC-0	100 x 100 x 1000	211,40	0,00
2	RCS-1	120 x 120 x 1000	332,00	57,05
3	RCS-2	130 x 130 x 1000	781,20	269,54
4	RCS-3	140 x 140 x 1000	-	-

Kemudian perpendekan yang terjadi adalah, semakin besar beban yang diterima oleh kolom benda uji maka semakin besar nilai perpendekan yang terjadi pada kolom tersebut. Terlihat pada grafik dan tabel di bawah.



Gambar 6. Grafik perbandingan hasil perpendekan yang terjadi pada tiap benda uji kolom beton bertulang dilapisi UHPFRC

Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang sudah dilakukan dapat disimpulkan, bahwa material UHPFRC efektif digunakan sebagai lapisan perkuatan. Terlihat dari kapasitas beban maksimum (ultimate) dari semua kolom bertulang yang diperkuat lapisan UHPFRC menghasilkan beban maksimum (ultimate) yang lebih tinggi dibandingkan dengan kolom kontrol. Hal ini disebabkan oleh lapisan UHPFRC memberikan kontribusi kekuatan tambahan pada kolom.

Semakin tebal lapisan yang diberikan, menghasilkan beban maksimum yang semakin besar juga. Hal ini sejalan dengan semakin besarnya dimensi kolom yang telah diberi lapisan perkuatan UHPFRC. Pemberian perkuatan UHPFRC dengan tebal 10 mm pada kolom RCS-1, dan 15 mm pada kolom RCS-2 masing-masing 57,05%; dan 269,54%. Semakin tebal lapisan UHPFRC yang diaplikasikan, maka semakin besar peningkatan beban maksimum yang diperoleh masing-masing benda uji.

BIBLIOGRAFI

- A. Alsalman, C.N. Dang, J.R. Martí-Vargas, W.M. Hale, Mixture-proportioning of economical UHPC mixtures, *J. Build. Eng.* 27 (2020), 100970.
- Abdulkareem OM, Fraj AB, Bouasker M, Khelidj A. Mixture design and early age investigations of more sustainable UHPC. *Constr Build Mater* 2018;163:235–46.
- Alkaysi M, El-Tawil S. Factors affecting bond development between Ultra High Performance Concrete (UHPC) and steel bar reinforcement. *Constr Build Mater* 2017;144:412–22.
- Alkaysi M, El-Tawil S. Effects of variations in the mix constituents of ultra highperformance concrete (UHPC) on cost and performance. *Material Structure* 2016;49(10):4185–200.
- Al-Osta, M. A. *et al.* (2017) ‘Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with ultra-high performance fiber reinforced concrete’, *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 134, pp. 279–296.
- Al-Osta, M. A. (2018) ‘Exploitation of Ultrahigh-Performance Fibre-Reinforced Concrete for the Strengthening of Concrete Structural Members’, *Advances in Civil Engineering*, 2018, pp. 1–12.
- ASTM C 1437-07 (2007) ‘Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar’, *ASTM International*, pp. 6–7.
- Badan Standardisasi Nasional (2019) *Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung Dan Penjelasannya (ACI 318M-14 Dan ACI 318RM-14,MOD)- SNI 2847:2019*, BSN.Jakarta.
- C.C. Hung, H.S. Lee, S.N. Chan, Tension-stiffening effect in steel-reinforced UHPC composites: constitutive model and effects of steel fibers, loading patterns, and rebar sizes, *Compos. B Eng.* 158 (2019) 269–278.
- C.C. Hung, C.Y. Chueh, Cyclic behavior of UHPFRC flexural members reinforced with high-strength steel rebar, *Eng. Struct.* 122 (2016) 108–120.
- C.C. Hung, P.L. Hsieh, Comparative study on shear failure behavior of squat highstrength steel reinforced concrete shear walls with various high-strength concrete materials, *Structure* 23 (2020) 56–68.
- C.C. Hung, H. Li, H.C. Chen, High-strength steel reinforced squat UHPFRC shear walls: cyclic behavior and design implications, *Eng. Struct.* 141 (2017) 59–74.

- C.C. Hung, Y.T. Chen, C.H. Yen, Workability, fiber distribution, and mechanical properties of UHPC with hooked end steel macro-fibers, *Construct. Build. Mater.* 260 (2020), 119944.
- Chun-ling Lu , Kang Ouyang a, Cheng Guo a, Qiang Wang, Hou-qiong Chen a, Wan- xu Zhu, Axial compressive performance of RC columns strengthened with prestressed CFRP fabric combined with UHPC jacket *Engineering Structures* 275 (2023) 115113.
- Fehling E, Schmidt M, Walraven J, Leutbecher T, Fröhlich S. Ultra-high performance concrete UHPC: *Fundamentals, design, examples*. John Wiley & Sons; 2014.
- Ferrier E, Agbossou A, Michel L. Mechanical behaviour of ultra-high-performance fibrous-concrete wood panels reinforced by FRP bars. *Compos B Eng* 2014;60:663–72.
- Ferrier E, Confrere A, Michel L, Chanvillard G, Bernardi S. Shear behaviour of new beams made of UHPC concrete and FRP rebar. *Compos B Eng* 2016;90:1–13.
- Graybeal, B. (2006) ‘Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete’, *Fhwa*, (FHWA-HRT-06-103), p. 186.
- Graybeal, B. *et al.* (2020) ‘International Perspective on UHPC in Bridge Engineering’, *Journal of Bridge Engineering*, 25(11), p. 04020094. doi: 10.1061/(asce)be.1943-5592.0001630.
- Graybeal, B. A. and Hartmann, J. L. (2003) ‘Strength and Durability of Ultra-High Performance Concrete Benjamin A. Graybeal, PE, PSI, Inc.,
- McLean, VA Joseph L. Hartmann, PE, Federal Highway Administration, McLean, VA’, *Concrete Bridge Conference*.
- Graybeal, B. A., Ph, D. and Asce, M. (2014) ‘Flexural Behavior of an Ultrahigh-Performance Concrete I-Girder’, *Journal of Bridge Engineering*, 0702(May), pp. 602–610.
- Hariato Hardjasaputra, 2009. “Aspek – aspek Teknis Beton – Ultra High Performance Concrete (UHPC)”.
- Hassan AMT, Jones SW, Mahmud GH. Experimental test methods to determine the uniaxial tensile and compressive behaviour of ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC). *Constr Build Mater* 2012;37:874–82.
- He S, Mosallam AS, Fang Z, Zou C, Feng W, Su J. Experimental study on CFSC encased shear connectors in steel-concrete composite joints with UHPC grout. *Constr Build Mater* 2018;173:638–49.

- Hung C-C, Chueh C-Y. Cyclic behavior of UHPFRC flexural members reinforced with high-strength steel rebar. *Eng Struct* 2016;122:108–20.
- Hung C-C, Li H, Chen HC. High-strength steel reinforced squat UHPFRC shear walls: Cyclic behavior and design implications. *Eng Struct* 2017;141:59–74.
- Hor Y, Teo W, Kazutaka S. Experimental investigation on the behaviour of reinforced concrete slabs strengthened with ultra-high performance concrete. *Constr Build Mater* 2017;155:463–74.
- H.O. Shin, Y.S. Yoon, S.H. Lee, W.D. Cook, D. Mitchell, Effect of steel fibers on the performance of ultrahigh-strength concrete columns, *J. Mater. Civ. Eng.* 27 (4) (2014), 04014142.
- H. Aoude, W.D. Cook, D. Mitchell, Behavior of columns constructed with fibers and self-consolidating concrete, *ACI Struct. J.* 106 (3) (2009) 349.
- Hung CC, Hu FY. Behavior of high-strength concrete slender columns strengthened with steel fibers under concentric axial loading. *Constr Build Mater* 2018;175:422–33.
- Jonbi, Anang Kristianto dan A.R. Indra Tjahjani, 2013. “Studi Komparasi Pengaruh Nanosilika Alam dan Nanosilika Komersil Terhadap Beton (228M)”.
- Kaize Ma, Xiwang Cao , Jiabin Song , Xiangyu Meng , Lei Qiao Axial compressive behavior of concrete-filled steel tubes with GFRP-confined UHPC cores, *Journal of Constructional Steel Research* 200 (2023) 107632.
- Khaksefidi, S., Ghalehnovi, M., & De Brito, J. Bond behaviour of high-strength steel rebars in normal (NSC) and ultra-high performance concrete (UHPC). *J. Build. Eng.*, 33, 101592.
- Li, X. *et al.* (2017) ‘Cyclic behavior of damaged reinforced concrete columns repaired with high-performance fiber-reinforced cementitious composite’, *Engineering Structures*. Elsevier Ltd, 136, pp. 26–35.
- Lei Voo, Y. and Foster, S. J. (2010) ‘Characteristics of ultra-high performance “ductile” concrete and its impact on sustainable construction’, *IES Journal Part A: Civil and Structural Engineering*, 3(3), pp. 168–187.
- Liu J, Wu C, Su Y, Li J, Shao R, Chen G, et al. Experimental and numerical studies of ultra-high performance concrete targets against high-velocity projectile impacts. *Eng Struct* 2018;173:166–79.
- Li J, Wu C, Hao H, Liu Z. Post-blast capacity of ultra-high performance concrete columns. *Eng Struct* 2017;134:289–302.

- Lampropoulos AP, Paschalis SA, Tsioulou OT, Dritsos SE. Strengthening of reinforced concrete beams using ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC). *Eng Struct* 2016;106:370–84.
- M. A. Sakr, T.M. El Korany, B. Osama, Analysis of RC columns strengthened with ultra-high performance fiber reinforced concrete jackets under eccentric loading, *Eng. Struct.* 220 (2020) 111016.
- M. Deng, Y. Zhang, Q. Li, Shear strengthening of RC short columns with ECC jacket: cyclic behavior tests, *Eng. Struct.* 160 (2018) 535–545.
- Meng W, Khayat KH. Improving flexural performance of ultra-high-performance concrete by rheology control of suspending mortar. *Compos B Eng* 2017;117:26–34.
- Mészöly T, Randl N. Shear behavior of fiber-reinforced ultra-high performance concrete beams. *Eng Struct* 2018;168:119–27.
- M. Schmidt, E. Fehling, Ultra-High performance concrete: *research development and application in Europe, The 7th International Symposium on the Utilization of High-Strength/High-Performance Concrete* (2005) 51–78.
- M. Soman, J. Mohan, Rehabilitation of RC columns using ferrocement jacketing, *Construct. Build. Mater.* 181 (2018) 156–162.
- Nursyamsi Nursyamsi, Johannes Tarigan, Muhammad Aswin, Badorul Hisham Abu Bakar, Harianto Hardjasaputra, Structural behaviour of the strengthened reinforced concrete beams using ultra high-performance fibre reinforced concrete layer, *Construction Innovation* © Emerald Publishing Limited 1471-4175 DOI 10.1108/CI-10-2021-0183.
- P. Acker, M. Behloul, Ductal1 technology: a large spectrum of properties, ultra-High performance concrete, Kassel, Germany (2004) 11–23.
- Paschalis, S. A. (2021) ‘Developments in the use of Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete as strengthening material’, *Engineering Structures*, 233.
- Paschalis, S. A., Lampropoulos, A. P. and Tsioulou, O. (2018) ‘Experimental and numerical study of the performance of ultra high performance fiber reinforced concrete for the flexural strengthening of full scale reinforced concrete members’, *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 186, pp. 351–366.
- Palacios G, Chao SH, Nojavan A, Schultz A. Performance of full-scale ultra-high performance fiber-reinforced concrete (UHP-FRC) column subjected to extreme earthquake- type loading. In: *HPFRCC-7 Proceedings of the 7th RILEM workshop on high performance fiber reinforced cement composites*, Stuttgart, Germany; 2015.

- P.Y. Blais, M. Couture, Precast, prestressed pedestrian Bridge - *world's first reactive powder concrete structure*, *PCI J.* 44 (5) (1999) 60–71.
- Ricker M, Häusler F, Randl N. Punching strength of flat plates reinforced with UHPC and double-headed studs. *Eng Struct* 2017;136:345–54.
- Randl, N. *et al.* (2014) ‘Development of UHPC mixtures from an ecological point of view’, *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 67(PART C), pp. 373–378.
- R. Mahmud, K.S. Ahmed, Interface dependency of reinforced concrete jacketing for column strengthening, *Proc. Inst. Civ. Eng. Struct. Build.* 173 (2020) 31–41.
- Sayadi, A. A., Tapia, J. V., Neitzert, T. R., & Clifton, G. C. (2016). Effects of expanded polystyrene (EPS) particles on fire resistance, thermal conductivity and compressive strength of foamed concrete. *Construction and Building Materials*, 112, 716–724. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.218>
- Safdar, M., Matsumoto, T. and Kakuma, K. (2016) ‘Flexural behavior of reinforced concrete beams repaired with ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC)’, *Composite Structures*. Elsevier Ltd, 157, pp. 448–460.
- S.H. Chu, A.K.H. Kwan, 2019. “Mixture design of self-levelling ultra-high performance FRC” *Construction and Building Materials* 228 (2019) 116761
- Shafieifar M, Farzad M, Azizinamini A. A comparison of existing analytical methods to predict the flexural capacity of Ultra High Performance Concrete (UHPC) beams. *Constr Build Mater* 2018;172:10–8.
- S.J. Foster, On behavior of high-strength concrete columns: *cover spalling, steel fibers, and ductility*, *Struct. J.* 98 (4) (2001) 583–589.
- S. Sugano, H. Kimura, K. Shirai, Study of New RC structures using ultra-high strength fiber-reinforced concrete (UFC), *J. Adv. Concr. Technol.* 5 (2) (2007) 133–147.
- S. He, Z. Deng, J. Yao, Seismic behavior of ultra-high performance concrete long columns reinforced with high-strength steel, *J. Build. Eng.* 32 (2020), 101740.
- S. Aaleti, S. Sritharan, Quantifying bonding characteristics between UHPC and normal-strength concrete for bridge deck application, *J. Bridge Eng.* 24 (6) (2019), 04019041.
- Tayeh, B. A. *et al.* (2012) ‘Mechanical and permeability properties of the interface between normal concrete substrate and ultra high performance fiber concrete overlay’, *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 36, pp. 538–548.

- Tayeh, Bassam A., Abu Bakar, B. H., *et al.* (2013a) 'Evaluation of bond strength between normal concrete substrate and ultra high performance fiber concrete as a repair material', *Procedia Engineering*. Elsevier B.V., 54(Farhat 2010), pp. 554–563.
- Tayeh, Bassam A., Abu Bakar, B. H., *et al.* (2013b) 'Evaluation of bond strength between normal concrete substrate and ultra high performance fiber concrete as a repair material', *Procedia Engineering*. Elsevier B.V., 54, pp. 554–563.
- Tayeh, Bassam A., Bakar, B. H. A., *et al.* (2013) 'Flexural Strength Behavior of Composite UHPFC - Existing Concrete', *Advanced Materials Research*, 701(May), pp. 32–36. Tayeh, B. A. (2013) *Interfacial bonding characteristics between normal concrete substrate and ultra high performancen fibre concrete repair material. Ph.D thesis*. Universiti Sains Malaysia.
- Tayeh, Bassam A *et al.* (2013) 'Utilization of ultra-high performance fibre concrete (UHPFC) for rehabilitation a review', in *Procedia Engineering*. Elsevier B.V., pp. 525–538.
- Tayeh, B. A., Abu Bakar, B. H. and Megat Johari, M. A. (2012) 'Mechanical properties of old concrete - UHPFC interface', *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting III - Proceedings of the 3rd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, ICCRRR 2012*, (September), pp. 1035–1040.
- Tayeh, B. A., Abu Bakar, B. H. and Megat Johari, M. A. (2013) 'Characterization of the interfacial bond between old concrete substrate and ultra high performance fiber concrete repair composite', *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 46(5), pp. 743–753.
- Tanarslan HM, Alver N, Jahangiri R, Yalçınkaya Ç. Flexural strengthening of RC beams using UHPFRC laminates: Bonding techniques and rebar addition. *Constr Build Mater* 2017;155:45–55.
- T. Chrysanidis, I. Tegos, Axial and transverse strengthening of R/C circular columns: conventional and new type of steel and hybrid jackets using high-strength mortar, *J. Build Eng.* 30 (2020) 101236.
- Wille K, Naaman AE, El-Tawil S. Optimizing ultra-high performance fiber-reinforced concrete. *Concr Int* 2011;33(9):35–41.
- Xu Yang , Bing Zhang , Ao Zhou , Huinan Wei , Tiejun Liu Axial compressive behaviour of corroded steel reinforced concrete columns retrofitted with a basalt fibre reinforced polymer-ultrahigh performance concrete jacket *Composite Structures* 304 (2023) 116447.
- Yang IH, Joh C, Kim BS. Structural behavior of ultra high performance concrete beams subjected to bending. *Eng Struct* 2010;32(11):3478–87.

Wang R, Gao X, Huang H, Han G. Influence of rheological properties of cementmortar on steel fiber distribution in UHPC. *Constr Build Mater* 2017;144:65–73.

Yoo DY, Banthia N, Yoon YS. Flexural behavior of ultra-high-performance fiberreinforced concrete beams reinforced with GFRP and steel rebars. *Eng Struct* 2016;111:246–62.

Zhang, H. *et al.* (2018) ‘Mechanical behavior of ultra-high performance concrete (UHPC) using recycled fine aggregate cured under different conditions and the mechanism based on integrated microstructural parameters’, *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 192, pp. 489–507.

Zhang, Y., Li, X., *et al.* (2020) ‘Experimental study on flexural behavior of damaged reinforced concrete (RC) beam strengthened by toughness-improved ultra-high performance concrete (UHPC) layer’, *Composites Part B: Engineering*. Elsevier Ltd, 186(January), p. 107834.

Zhang, Y., Zhu, P., *et al.* (2020) ‘Interfacial bond properties between normal strength concrete substrate and ultra-high performance concrete as a repair material’, *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 235, p. 117431.

Copyright holder:

Ricky Bakara, Johannes Tarigan, Badarol Hisham Abu Bakar, Nursyamsi (2022)

First publication right:

Syntax Literate: Jurnal Ilmiah Indonesia

This article is licensed under:

