

## PENGGUNAAN LAMINASI CFRP SEBAGAI MATERIAL PERKUATAN PADA STRUKTUR BAJA: TINJAUAN LITERATUR

Fengky Satria Yoresta<sup>1\*</sup>  
<sup>1</sup>Institut Pertanian Bogor

\*E-mail: syfengky@gmail.com

Received: 13 November 2022

Accepted: 21 January 2023

Published : 31 January 2023

### Abstrak

Dalam beberapa dekade terakhir, penggunaan *carbon fiber reinforced polymer* telah menarik banyak perhatian dalam aplikasinya pada bidang teknik sipil (*civil engineering*). Material ini disukai karena mempunyai banyak keunggulan, diantaranya adalah rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi, ketahanan yang baik terhadap korosi, bobot ringan, serta mudah untuk diaplikasikan. Para peneliti telah mengeksplorasi lebih jauh mengenai pemanfaatannya untuk struktur beton. Banyak paper telah dipublikasikan dalam berbagai jurnal ilmiah. Namun demikian, penelitian mengenai efektivitasnya untuk memperkuat struktur baja masih sangat terbatas. Paper ini mereview hasil kajian eksperimental yang telah dilakukan oleh para peneliti mengenai pemanfaatan material CFRP dalam memperkuat elemen struktur baja. Topik yang dipilih untuk dibahas difokuskan pada kasus perkuatan kolom baja pendek (*short steel column*) dan juga kolom baja panjang (*long steel column*). Termasuk dalam pembahasan meliputi skema penerapan CFRP pada kolom baja, perlakuan pada permukaan baja, jenis material CFRP, tipe pembebanan, serta efek perkuatan bahan CFRP terhadap nilai kapasitas aksial kolom, penambahan kekuatan, dan perbaikan pada kekakuan dan bentuk model kegagalan. Kesimpulan singkat diakhir paper ini dapat berperan sebagai petunjuk awal yang baik bagi pihak yang berminat pada topik kajian ini.

**Kata Kunci:** CFRP, kolom baja pendek, kolom baja panjang, perkuatan CFRP, struktur baja

### Abstract

*In the last decades, the use of carbon fiber reinforced polymer has attracted many attentions for its application in civil engineering field. This material is preferred because it has many advantages, including high strength to weight ratio, good corrosion resistance, light weight, and easy to apply. Researchers have further explored about its use for concrete structures. Many papers have been published in various scientific journals. However, research on its effectiveness for strengthening steel structures is still very limited. This paper reviews the results of experimental studies that have been carried out by researchers regarding the use of CFRP material for strengthening steel structure elements. The topic chosen to be discussed is focused on the case of strengthening short steel columns and long steel columns. Included in the discussion are scheme of applying CFRP to steel columns, treatment of steel surface, types of CFRP materials, types of loading, and effect of CFRP strengthening on the value of the column's axial capacity, strength increase, and improving column's stiffness and shape of the failure modes. A brief conclusion at the end of this paper can serve as a good initial guide for those who are interested in this topic.*

**Keywords:** CFRP; short steel column; long steel column; CFRP strengthening; steel structures

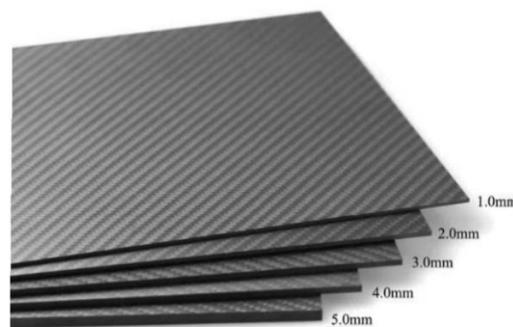
### To cite this article:

Fengky Satria Yoresta (2023). Penggunaan Laminasi CFRP sebagai Material Perkuatan pada Struktur Baja: Tinjauan Literatur. *Jurnal of Infrastructural in Civil Engineering*, Vol. (04), No. 01, pp: 01-09.

## PENDAHULUAN

Upaya untuk memperkuat (*strengthening*) struktur baja pada dasarnya telah dikembangkan oleh banyak peneliti sejak dahulu kala. Metode konvensional yang sangat umum diterapkan adalah dengan penambahan pelat baja [1]. Pelat baja tambahan ini dipasang dengan cara dibaut atau dilas pada struktur baja yang akan diperkuat. Untuk kasus elemen baja yang mengalami korosi, bagian yang mengalami korosi tersebut dipotong kemudian digantikan dengan pelat baja yang baru. Teknik/metode perkuatan konvensional yaitu dengan memakai pelat baja tambahan seperti ini cenderung sulit dan sangat rumit untuk diaplikasikan karena memerlukan peralatan yang banyak dan berat dalam pemasangannya. Penerapan pelat baja tersebut juga menimbulkan masalah baru yaitu bahaya korosi itu sendiri serta menyebabkan bertambahnya bobot beban mati pada struktur secara keseluruhan. Selain itu, pengelasan pelat baja juga dapat menimbulkan tegangan termal yang bisa berefek buruk pada performa struktur, sementara pengencangan pelat baja (dengan baut) dapat menimbulkan konsentrasi tegangan [2].

Material Fiber Reinforced Polymer (FRP), khususnya Carbon Fiber Reinforced Polymer atau dikenal dengan sebutan CFRP (**Gambar 1**), saat ini banyak digunakan untuk memperkuat elemen struktur baja menggantikan pelat baja. Material ini lebih disukai karena memiliki sifat yang sangat baik, beberapa diantaranya adalah kuat, ringan, tahan terhadap korosi, serta mudah diaplikasikan [3]. Keunggulan material CFRP juga sebelumnya telah terbukti sangat efektif meningkatkan performa struktur beton bertulang [4]. Namun demikian, jumlah penelitian terkait aplikasinya untuk memperkuat struktur baja masih sangat terbatas dibandingkan dengan struktur beton. Pemahaman yang diperoleh tentang penerapan CFRP pada komponen struktur beton tidak bisa sepenuhnya langsung diterapkan untuk aplikasi CFRP pada struktur baja karena baja dan beton pada dasarnya mempunyai perilaku berbeda [5].



**Gambar 1.** Pelat CFRP (<http://m.nova-insulation.com>)

Tidak seperti pelat baja untuk perkuatan, CFRP dipasang pada struktur baja yaitu dengan cara menempelkannya pada permukaan baja menggunakan bahan perekat. Teknik ini dikenal dengan istilah *adhesively-bonding method* atau *externally-bonding method*. Dalam teknik ini, permukaan baja yang akan dipasangkan CFRP terlebih dahulu diberikan perlakuan (*treatment*), misalnya dengan *grit-blasting* agar CFRP dapat melekat pada permukaan baja dengan baik dan kuat.

Para peneliti mengeksplorasi penggunaan CFRP untuk memperbaiki kinerja struktur baja (dengan *adhesively/externally bonding method*) melalui berbagai aspek kajian. Misalnya adalah CFRP untuk meningkatkan kapasitas dan kinerja lentur balok baja, perilaku geser elemen dinding baja, kekuatan tarik pelat/batang baja, performa torsi elemen baja, pengujian terhadap kapasitas tekan kolom baja pendek (*short steel column*), dan kinerja tekuk (*buckling*) kolom baja panjang (*long steel column*). Paper ini bertujuan untuk mengulas hasil penelitian eksperimental yang telah dilakukan oleh para peneliti dalam rangka membuktikan/meneliti potensi material CFRP untuk perbaikan kinerja elemen baja tekan, yaitu kolom baja pendek dan kolom baja panjang.

## **METODOLOGI PENELITIAN**

Literatur yang digunakan dalam paper ini diperoleh dari berbagai basis data terutama yaitu *ScienceDirect*, *ASCElibrary*, dan juga *Canadian Science Publishing*. Selain tiga sumber tersebut, terdapat juga beberapa artikel yang diperoleh dari prosiding konferensi internasional. Artikel-artikel tersebut, baik investigasi pada kolom baja pendek maupun kolom baja panjang (*short or long steel column*), dipublikasikan dari 2006 dan merupakan investigasi eksperimental. Kata kunci dalam penelusuran artikel tersebut diantaranya: *CFRP steel columns*, *CFRP steel strengthening*, dan *steel columns CFRP*.

## **HASIL DAN PEMBAHASAN**

### **Kolom Baja Pendek yang Diperkuat CFRP**

Potensi material CFRP untuk memperkuat kolom baja pendek dibuktikan oleh Shaat and Fam (2006). Total ada sebanyak 27 kolom baja *square hollow structural section* (HSS) dengan kelangsingan 5 yang mereka uji. CFRP dipasang dengan orientasi serat karbon bervariasi dalam arah longitudinal dan transversal kolom baja. Perlakuan permukaan baja sebelum dipasang lembaran CFRP adalah *sand blasting*. Kemudian debu pada permukaan baja dibersihkan dengan cairan aseton sebelum pemasangan resin dan CFRP. Pengujian tekan yang

mereka lakukan menunjukkan bahwa kekuatan maksimum kolom baja berhasil dinaikkan 18%. Arah pemasangan CFRP secara transversal terbukti lebih efektif menahan tekuk lokal pada kolom baja tersebut[6].

Bambach et al. (2009) juga melakukan uji pada kolom baja pendek *square hollow section* (SHS) untuk menelusuri pengaruh penggunaan CFRP sebagai material perkuatan baja. Hasil penelitian yang mereka peroleh menyimpulkan bahwa penggunaan CFRP dapat meningkatkan kapasitas aksial kolom baja hingga menjadi dua kali lipat. Selain itu, terjadi juga perbaikan pada nilai *strength-to-weight ratio* yaitu sekitar 1.5 kali, sebagai akibat dari adanya pengekangan oleh CFRP terhadap perkembangan defleksi tekuk (*elastic buckling*)[7].

Efek perkuatan CFRP pada *circular steel tubular short columns* diinvestigasi oleh Haedir dan Zhao (2011). Metode pemasangan bahan CFRP untuk perkuatan adalah direkatkan dalam arah ortogonal (melingkar dan longitudinal) baja tabung tersebut. Tidak ada keraguan bahwa kapasitas tekan aksial dapat meningkat dengan adanya CFRP. Namun, efektivitas penguatan terbaik diperoleh dari aplikasi CFRP gabungan antara arah melingkar dan longitudinal. Terbukti dari kondisi ini kapasitas leleh tabung baja dapat dicapai. Peningkatan pada tegangan leleh kolom baja mengurangi batas kelangsingan leleh (*yield slenderness limit*). Selain itu, kekuatan kolom baja lebih besar pada spesimen dengan CFRP lebih banyak[8].

Sundarraja et al. (2014) mempelajari efek perkuatan CFRP pada kolom baja HSS dengan skema perkuatan yang berbeda. Delapan belas dari total 21 spesimen diperkuat dengan CFRP yang direkatkan dalam arah transversal (dengan lebar 50 mm). CFRP tersebut diletakkan dengan jarak yaitu 20mm dan 30 mm. Berdasarkan hasil penelitian, mereka menyimpulkan bahwa CFRP yang direkatkan tersebut terbukti dapat secara efektif mengurangi pemendekan secara aksial yang terjadi pada spesimen. Kontribusi ini terjadi melalui proses pengekangan terhadap deformasi elastis spesimen. Keberadaan bahan CFRP juga berkontribusi terhadap tertundanya tekuk lokal pada kolom baja pendek HSS tersebut[9].

Ghaemdoust et al. (2016) mengeksplorasi penggunaan CFRP untuk perbaikan sekaligus perkuatan kolom baja SHS pendek (*short SHS steel columns*) yang mempunyai kerusakan awal (*initial deficiencies*). Kerusakan tersebut terdapat dalam arah horizontal dan vertikal. Selain arah, dimensi kerusakan awal tersebut juga berbeda. CFRP yang digunakan untuk perkuatan terbuat dari serat baja *unidirectional* yang mempunyai kekuatan tinggi (*high-strength*). Hasil investigasi mereka menyimpulkan bahwa penerapan CFRP dapat mengembalikan kekuatan spesimen yang hilang akibat kerusakan awal tersebut. Selain itu, penggunaan CFRP dapat menambah kapasitas beban dan menunda tekuk lokal[10].

Senada dengan penelitian Ghaemdoust et al. (2016), Karimian et al. (2017) juga melakukan pengujian kolom baja pendek yang mempunyai *deficiencies* dengan perkuatan CFRP. Baja yang digunakan adalah *circular hollow section* (CHS). Empat lapis CFRP yang merupakan gabungan antara arah longitudinal dan transversal kolom dipilih untuk digunakan. Hasil pengujian mereka juga menunjukkan bahwa penurunan kekuatan kolom baja yang mempunyai *initial deficiencies* mampu dikembalikan dengan adanya perkuatan CFRP. CFRP berhasil menunda tekuk lokal dan meningkatkan kapasitas tahanan beban[11].

Investigasi yang dilakukan oleh Chen et al. (2018) mencoba menganalisis efek perkuatan CFRP pada perilaku kolom baja pendek yang telah sebelumnya mengalami kerusakan akibat tumbukan lateral (*lateral impact-damaged steel short columns*). Penyelidikan mereka dilakukan pada kolom baja dengan penampang lingkaran (*circular*) dan persegi (*square*). Hasil pengujian tekan mereka pada kolom baja pendek tersebut sukses menunjukkan bahwa kapasitas tahanan aksial kolom dapat diperbaiki dengan adanya material CFRP. Selain itu, perbaikan kekuatan pada kolom lingkaran lebih baik dibandingkan kolom persegi[12].

### **Kolom Baja Panjang yang Diperkuat CFRP**

Shaat dan Fam (2009) memperkuat kolom baja langsing menggunakan pelat CFRP yang mempunyai nilai modulus tinggi, 313 MPa (*high-modulus CFRP*). Total ada sebanyak 18 kolom HSS diuji tekan dengan pembebanan kosentris. Kolom tersebut memiliki rasio kelangsingan 46, 70, dan 93. Skema perkuatan CFRP-nya adalah sama untuk semua kolom. CFRP yang dipakai adalah jenis *unidirectional pultruded plates* yang memiliki ketebalan 1.4 mm dan lebar 50 mm. Berdasarkan hasil penelitian ini mereka berhasil menunjukkan efektifitas sistem perkuatan CFRP dalam meningkatkan kekuatan aksial kolom. Kapasitas beban meningkat sebesar 6, 35, dan 71 persen masing-masing untuk kolom dengan nilai rasio kelangsingan 46, 70, dan 93. Selain itu, kekakuan aksial kolom juga meningkat 10, 16, dan 17 persen masing-masing untuk kolom dengan nilai rasio kelangsingan 46, 70, dan 93[13].

Tamai et al. (2012) menguji penggunaan CFRP untuk meningkatkan kapasitas tekuk baja siku. Skema perkuatan yaitu dengan merekatkan CFRP ke permukaan bagian luar dari kolom baja siku tersebut. Dua jenis serat karbon digunakan untuk pelat CFRP yaitu serat karbon ketahanan tinggi dan serat karbon modulus sedang. Kedua tipe pelat CFRP tersebut mempunyai ketebalan yang sama yaitu 2 mm. Hasil pengujian tekan terhadap 12 spesimen kolom dengan berbagai panjang (yaitu: 0.8, 1, 1.17, 1.3, 1.5, dan 1.6 m) menunjukkan

peningkatan pada kapasitas kolom baja siku. Selain kapasitas, dapat dikonformasi juga adalah peningkatan kekakuan lentur kolom[14].

Pengujian eksperimental terhadap kolom baja HSS dilakukan oleh Haydaroglu dan Celik (2012). Penelitian mereka melibatkan spesimen skala besar, yaitu: satu buah spesimen sebagai kontrol dan dua spesimen lain diperkuat dengan CFRP. Pada spesimen yang diperkuat tersebut posisi CFRP adalah ditengah bentang (*partially wrapped*). Panjang kolom yang diperkuat adalah 450 mm dan 900 mm. Pengujian siklik dilakukan dengan mengacu pada protokol ATC-24. Mereka menyimpulkan, berdasarkan hasil penelitian ini, bahwa perkuatan CFRP adalah cara yang efektif untuk mencegah tekuk lokal ditengah bentang[15].

Penelitian mengenai pengaruh perkuatan CFRP pada perilaku tekuk global baja dengan penampang lingkaran dilakukan oleh Gao et al. (2013). Berdasarkan pada hasil kajian mereka, perkuatan dengan CFRP yang direkatkan efektif meningkatkan kekakuan serta kekuatan aksial baja tersebut. Nilai peningkatan relatif kekuatan dan kekakuan berkisar antara 28-124% dan 25-105% bergantung pada jumlah lapisan CFRP yang digunakan. Hasil analisis baik eksperimen dan numerik menunjukkan bahwa peningkatan kekuatan mempunyai korelasi langsung dengan jumlah lapisan CFRP yang digunakan. Selain itu, ketidaksempurnaan (*imperfection*) dari spesimen juga berpengaruh pada kekakuan baik lateral maupun aksial spesimen baja tersebut[16].

Ritchie et al. (2015) melakukan pengujian tekan terhadap 12 kolom baja berpenampang S yang memiliki kelangsingan 197 untuk meneliti efek perkuatan CFRP. Spesimen uji kolom baja tersebut hanya diperbolehkan menekuk ke arah sumbu lemah dalam pengujian dengan kondisi ujung pin-pin. Mereka mengungkapkan dari penelitian ini bahwa peningkatan kekuatan aksial kolom baja dengan adanya CFRP bervariasi dari 11% hingga 29%. Kapasitas beban aksial kolom berkurang seiring meningkatnya *imperfections*, namun kemudian perkuatan CFRP menjadi lebih efektif seiring *imperfections* meningkat. Defleksi lateral kolom berkurang seiring meningkatnya nilai modulus Young dari CFRP yang digunakan. Selain itu, diperoleh panjang optimal pelat CFRP untuk perkuatan kolom yang dikedua ujungnya pin adalah antara sepertiga dan dua pertiga dari panjang kolom dan ditempatkan ditengah-tengah bentang[1].

Keykha et al. (2015) mengemukakan hasil penelitian mereka mengenai perilaku kolom baja *hollow* (SHS) yang diperkuat dengan CFRP baik secara parsial maupun penuh (*full*). Beberapa skema perkuatan CFRP yang diterapkan adalah 20%, 30%, 40%, 50%, dan 100% dari panjang kolom baja. Kesimpulan yang mereka dapatkan adalah bahwa kapasitas

maksimum kolom baja dipengaruhi langsung oleh panjang CFRP yang diterapkan. Berdasarkan hasil penelitian ini jelas bahwa skema perkuatan terbaik adalah dengan penerapan CFRP 100% panjang kolom baja. Selain itu, semua kolom baja mengalami tekuk global (*overall buckling*)[17].

Kumar dan Senthil (2016) menguji CFRP untuk memperkuat kolom CHS yang mempunyai rasio kelangsingan 30, 35, dan 40. Total ada 54 spesimen yang diuji dengan beban aksial statik dan siklik. Dari hasil uji terungkap bahwa dengan meningkatnya nilai rasio kelangsingan, kekuatan aksial tekan kolom menurun. Kapasitas aksial kolom baja yang diperkuat CFRP naik sebesar 39.47% pada pembebanan statik dan 41.02% di pembebanan siklik. Keberadaan CFRP terbukti mampu memperbaiki kapasitas tahanan kolom, daktilitas, kekakuan, dan menunda tekuk global kolom baja tersebut. Selain itu, model kegagalan untuk semua rasio kelangsingan adalah sama baik pada pembebanan statik maupun siklik[18].

Efisiensi perkuatan CFRP untuk perbaikan kinerja tekuk kolom baja yang dibebani secara eksentris diteliti oleh Sayed-ahmed et al. (2018). Mereka mempersiapkan sebanyak 30 spesimen kolom baja HSS untuk diuji dengan eksentrisitas beban bervariasi, yaitu 25 mm, 50 mm, dan 100 mm. Melalui penelitian ini mereka telah berhasil membuktikan efektifitas perkuatan CFRP dalam meningkatkan kapasitas beban aksial dan juga momen lentur kolom baja HSS. Kapasitas aksial kolom meningkat hingga 107%. Kolom dengan kelangsingan sedang mempunyai peningkatan tertinggi dalam hal kapasitas beban. Selain itu, bentuk kegagalan yang terjadi adalah CFRP pada kolom diperkuat mengalami *debonding*[19].

## **SIMPULAN**

Paper ini menyajikan ulasan tentang hasil penelitian eksperimental penggunaan material CFRP untuk perbaikan/perkuatan kinerja elemen baja tekan yaitu kolom baja pendek dan kolom baja panjang. Dari ulasan tersebut terungkap bahwa CFRP adalah bahan yang sangat efektif untuk perkuatan atau perbaikan kinerja kolom baja. CFRP bisa meningkatkan kapasitas beban, kekakuan, kekuatan, serta daktilitas kolom baja. Tingkat kesuksesan fungsi CFRP tersebut akan sangat bergantung pada parameter-parameter penelitian yang digunakan, seperti kelangsingan kolom, jumlah lapisan CFRP, panjang CFRP, penampatan CFRP, eksentrisitas pembebanan, jenis pembebanan dan sebagainya. Selain itu, model kegagalan kolom dapat berupa misalnya tekuk global ataupun *debonding* rekatan antara CFRP dan permukaan baja. Meskipun CFRP telah terbukti efektif memperbaiki kinerja kolom baja, jumlah penelitian yang ada hingga saat ini masih terbatas. Penelitian yang melibatkan lebih banyak sampel dan

komprehensif masih sangat diperlukan dimasa yang akan datang untuk dapat memahami perilaku perkuatan CFRP lebih lanjut.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Ritchie, A. Fam, and C. MacDougall, "Strengthening long steel columns of S-sections against global buckling around weak axis using CFRP plates of various moduli," *J. Compos. Constr.*, vol. 19, no. 4, p. 4014074, 2015.
- [2] I. Grabovac, R. A. Bartholomeusz, and A. A. Baker, "Fibre composite reinforcement of metallic plates of varying thickness and contour," in *International Conference of Aircraft Damage Assessment and Repair, Melbourne, Australia*, 1991, vol. 26, no. 28, pp. 231–238.
- [3] F. S. Yoresta, R. Maruta, G. Mieda, and Y. Matsumoto, "Unbonded CFRP strengthening method for buckling control of steel members," *Constr. Build. Mater.*, vol. 241, p. 118050, 2020.
- [4] W. K. M. Frhaan, B. H. Abu Bakar, N. Hilal, and A. I. Al-Hadithi, "CFRP for strengthening and repairing reinforced concrete: a review," *Innov. Infrastruct. Solut.*, vol. 6, no. 2, pp. 1–13, 2021.
- [5] X.-L. Zhao, Y. Bai, R. Al-Mahaidi, S. Rizkalla, and others, "Effect of dynamic loading and environmental conditions on the bond between CFRP and steel: state-of-the-art review," *J. Compos. Constr.*, vol. 18, no. 3, 2014.
- [6] A. Shaat and A. Fam, "Axial loading tests on short and long hollow structural steel columns retrofitted using carbon fibre reinforced polymers," *Can. J. Civ. Eng.*, vol. 33, no. 4, pp. 458–470, 2006.
- [7] M. R. Bambach, H. H. Jama, and M. Elchalakani, "Axial capacity and design of thin-walled steel SHS strengthened with CFRP," *Thin-Walled Struct.*, vol. 47, no. 10, pp. 1112–1121, 2009.
- [8] J. Haedir and X.-L. Zhao, "Design of short CFRP-reinforced steel tubular columns," *J. Constr. steel Res.*, vol. 67, no. 3, pp. 497–509, 2011.
- [9] M. C. Sundarraja, P. Sriram, and G. Ganesh Prabhu, "Strengthening of hollow square sections under compression using FRP composites," *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2014, 2014.
- [10] M. R. Ghaemdoost, K. Narmashiri, and O. Yousefi, "Structural behaviors of deficient steel SHS short columns strengthened using CFRP," *Constr. Build. Mater.*, vol. 126, pp. 1002–1011, 2016.
- [11] M. Karimian, K. Narmashiri, M. Shahraki, and O. Yousefi, "Structural behaviors of deficient steel CHS short columns strengthened using CFRP," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 138, pp. 555–564, 2017.
- [12] Y. Chen, J. Wan, and K. He, "Experimental investigation on axial compressive strength of lateral impact damaged short steel columns repaired with CFRP sheets," *Thin-Walled Struct.*, vol. 131, pp. 531–546, 2018.
- [13] A. Shaat and A. Z. Fam, "Slender steel columns strengthened using high-modulus CFRP plates for buckling control," *J. Compos. Constr.*, vol. 13, no. 1, pp. 2–12, 2009.
- [14] H. TAMAI, A. HATTORI, Y. OZAWA, T. HAITANI, and T. TAKAMATSU, "Design formula for rehabilitated angle steel member using carbon fiber reinforced plastic plates," *Proc. 15th WCEE, Lisboa*, 2012.
- [15] C. Haydaroglu and O. C. Celik, "Experimental investigation of partially CFRP wrapped steel HSS braces for seismic performance improvement," 2012.

- [16] X. Y. Gao, T. Balendra, and C. G. Koh, "Buckling strength of slender circular tubular steel braces strengthened by CFRP," *Eng. Struct.*, vol. 46, pp. 547–556, 2013.
- [17] A. H. Keykha, M. Nekooei, and R. Rahgozar, "Experimental and theoretical analysis of hollow steel columns strengthening by CFRP," *Civ. Eng. Dimens.*, vol. 17, no. 2, pp. 101–107, 2015.
- [18] A. Punitha Kumar and R. Senthil, "Axial behaviour of CFRP-strengthened circular steel hollow sections," *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 41, no. 10, pp. 3841–3850, 2016.
- [19] E. Y. Sayed-Ahmed, A. A. Shaat, and E. A. Abdallah, "CFRP-strengthened HSS columns subject to eccentric loading," *J. Compos. Constr.*, vol. 22, no. 4, p. 4018025, 2018.