



Studi Numerik Perilaku Kolom Pendek yang Diperkuat dengan CFRP Menggunakan Metode “Pushover Analysis”

Yoyong Arfiadi, Made Abitya Candra Wibawa

Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Indonesia

Email: yoyong.ar@uajy.ac.id, 235119741@students.uajy.ac.id

Abstrak:

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh perkuatan CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) terhadap kinerja seismik kolom pendek beton bertulang dalam sistem portal sederhana, khususnya dalam hal kapasitas geser, kekakuan lateral, dan daktilitas, melalui analisis *pushover* menggunakan *OpenSees*. Kolom pendek yang memiliki rasio tinggi terhadap dimensi penampang relatif kecil, cenderung mengalami kegagalan geser dan perilaku rapuh saat beban gempa. Model portal sederhana satu bentang satu tingkat dibangun dengan elemen nonlinear *forceBeamColumn*, material beton tak terkekang dan terkekang dimodelkan dengan *Concrete02*, serta baja tulangan dimodelkan dengan *Steel02*. Tahapan analisis meliputi pendefinisian geometri dan material, pembuatan *fiber section*, penerapan beban gravitasi, beban lateral bertahap, serta perekaman respons struktur. Model yang dianalisis terdiri atas tiga skenario, yakni tanpa CFRP, satu lapis CFRP, dan dua lapis CFRP. Hasil analisis menunjukkan bahwa perkuatan CFRP meningkatkan kapasitas geser, kekakuan lateral, dan daktilitas struktur. *Base shear* naik sebesar 2,2% pada satu lapis dan 3,4% pada dua lapis CFRP dibandingkan tanpa perkuatan, menegaskan efektivitas CFRP dalam meningkatkan kinerja seismik kolom pendek serta menahan keruntuhan geser.

Kata kunci: CFRP, kolom pendek, analisis *pushover*

Abstract

This research aims to evaluate the effect of Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) strengthening on the seismic performance of reinforced concrete short columns within a simple portal frame system, particularly in terms of shear capacity, lateral stiffness, and ductility, through a pushover analysis using OpenSees. Short columns, which have a relatively small height-to-section ratio, tend to experience shear failure and exhibit brittle behavior under seismic loading. A single-span, single-story portal frame model was developed using nonlinear forceBeamColumn elements, where unconfined and confined concrete were modeled using Concrete02, and reinforcing steel was modeled using Steel02. The analysis procedure included defining the geometry and material properties, constructing the fiber section, applying gravity loads, incrementally increasing lateral loads, and recording the structural responses. Three modeling scenarios were analyzed: without CFRP, with one layer of CFRP, and with two layers of CFRP. The results indicate that CFRP strengthening enhances the shear capacity, lateral stiffness, and ductility of the structure. The base shear increased by 2.2% with one CFRP layer and by 3.4% with two layers compared to the unstrengthened model, confirming the effectiveness of CFRP in improving the seismic performance of short columns and resisting shear failure.

Keywords: CFRP, short column, pushover analysis

Corresponding: Yoyong Arfiadi

E-mail: yoyong.ar@uajy.ac.id



PENDAHULUAN

Dalam rekayasa struktur, kolom pendek merupakan elemen struktur yang memiliki rasio tinggi terhadap dimensi lateral yang kecil. Kolom jenis ini sering ditemukan pada bangunan dengan lantai rendah atau struktur dengan pembatas seperti dinding geser, *basement*, dan tempat parkir (Alraqad et al., 2022; Hua et al., 2022; Moretti & Tassios, 2007). Karena ukurannya yang lebih pendek dibandingkan kolom biasa, kolom pendek cenderung mengalami gaya geser yang besar saat terjadi gempa atau beban lateral lainnya, yang dapat menyebabkan kegagalan geser sebelum mencapai kapasitas lentur maksimal (Murugan dan Sengupta, 2024).

Salah satu metode untuk meningkatkan kinerja kolom pendek terhadap beban lateral adalah dengan memperkuatnya dengan menggunakan material komposit seperti *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP). CFRP merupakan material berbasis serat karbon yang memiliki kekuatan tarik tinggi, ringan, dan tahan korosi, sehingga menjadi pilihan yang efektif dalam perkuatan struktur beton bertulang. Penelitian Dengan penggunaan CFRP, diharapkan kolom pendek dapat memiliki kapasitas geser yang lebih tinggi, meningkatkan daktilitas, serta memperpanjang umur layan struktur (Pawlak et al. 2022; Teng dan Smith, 2002; Wang et al., 2023). Dengan demikian, penerapan CFRP dianggap sebagai solusi efektif dan efisien dalam memperkuat elemen struktur.

Analisis *pushover* merupakan metode analisis non-linier statik yang digunakan untuk mengevaluasi kinerja struktur terhadap beban lateral secara bertahap dan telah banyak digunakan oleh para peneliti (Mahesh dan Pandit, 2020; Murugan dan Sengupta, 2024; Teng et al., 2015). Metode ini banyak digunakan dalam penilaian ketahanan bangunan terhadap gempa, karena mampu menggambarkan mekanisme kegagalan struktur hingga mencapai kondisi runtuh. Dalam konteks perkuatan CFRP pada kolom pendek, analisis *pushover* dapat digunakan untuk mengetahui seberapa besar peningkatan kapasitas geser dan daktilitas setelah perkuatan dilakukan.

Selain itu, berbagai penelitian terdahulu telah membuktikan bahwa penggunaan material CFRP secara efektif dapat meningkatkan kapasitas beton bertulang melalui efek pengekanan (Altin Karataş & Gökkaya, 2018; Ozkan et al., 2020; Tan et al., 2024; Zhou et al., 2019). Studi eksperimental oleh Wang dan Wu (2007) menunjukkan bahwa radius sudut pada penampang kolom berpengaruh terhadap kemampuan CFRP dalam memberikan pengekanan, di mana sudut yang lebih tumpul menghasilkan peningkatan kapasitas yang lebih besar. Lisantono dan Pinang (2017) meneliti perilaku kolom beton bertulang persegi tanpa sudut bundar yang diperkuat dengan CFRP, bahwa CFRP tetap mampu meningkatkan kapasitas aksial dan lentur kolom.

Melalui penelitian dan analisis *pushover* pada kolom pendek yang diperkuat dengan dilapisi penuh oleh CFRP, diharapkan dapat diperoleh pemahaman yang lebih mendalam mengenai efektivitas perkuatan ini. Dalam hal ini CFRP dapat diterapkan pada struktur bangunan untuk meningkatkan ketahanan terhadap beban lateral seperti gempa bumi.

Meskipun banyak penelitian eksperimental menunjukkan efektivitas CFRP dalam meningkatkan kekuatan tekan dan daktilitas beton, masih diperlukan kajian numerik yang sistematis untuk memahami pengaruh jumlah lapisan CFRP terhadap respons global struktur, terutama pada kolom pendek dalam sistem portal sederhana. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini difokuskan untuk menjawab bagaimana pengaruh jumlah lapisan CFRP terhadap kapasitas geser kolom portal sederhana dengan kolom pendek berdasarkan hasil analisis *pushover* menggunakan *OpenSees*.

Tujuan dari penelitian ini adalah mengevaluasi pengaruh jumlah lapisan CFRP terhadap kinerja seismik struktur portal sederhana dengan kolom pendek melalui analisis *pushover* menggunakan perangkat lunak *OpenSees*. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan perubahan kapasitas geser, tegangan ultimit, serta kapasitas rotasi struktur akibat penambahan lapisan CFRP pada kolom. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk memberikan

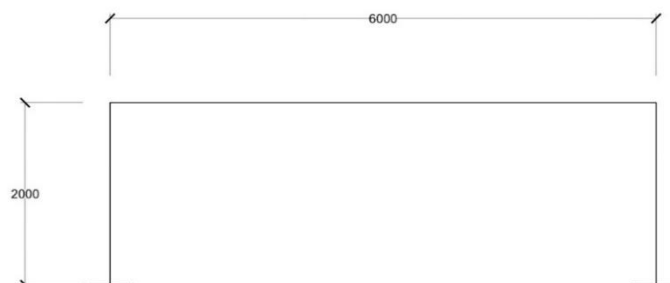
gambaran kuantitatif dan komparatif antara model tanpa perkuatan, model dengan satu lapis CFRP, dan model dengan dua lapis CFRP, sehingga dapat disimpulkan efektivitas perkuatan CFRP terhadap peningkatan kinerja struktur.

Penelitian ini memberikan manfaat, baik secara teoritis maupun praktis. Secara teoritis, penelitian ini memberikan kontribusi pada pengembangan metode numerik, khususnya pemodelan non-linier dengan OpenSees, untuk mensimulasikan efek pengekangan CFRP pada elemen beton bertulang dalam skala struktur sederhana. Secara praktis, hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi panduan atau acuan bagi para praktisi rekayasa struktur dan perencana dalam merancang perkuatan struktur bangunan yang efektif dan ekonomis terhadap beban gempa. Selain itu, hasil kajian ini juga dapat menjadi data referensi bagi penelitian selanjutnya yang berfokus pada optimasi penggunaan CFRP atau bahan komposit lainnya untuk perkuatan struktur bangunan yang lebih kompleks.

METODE PENELITIAN

Data dan Material

Penelitian ini dilakukan secara numerik menggunakan perangkat lunak *OpenSees* dengan pendekatan metode elemen hingga. Obyek yang dinalisis berupa portal sederhana dua dimensi satu lantai dengan tinggi kolom 2000 mm dan bentangan balok 6000 mm, seperti terlihat pada Gambar 1. Struktur terdiri dari dua kolom dan satu balok dengan dimensi penampang dan tulangan yang sama pada setiap model. Variasi model terdiri dari tiga kondisi, seperti pada Tabel 1.



Gambar 1. Portal Sederhana

Sumber: Analisis Penulis, 2024

Tabel 1. Parameter Struktur

Model	Dimensi Kolom (mm)	Dimensi Balok (mm)	Lapisan CFRP
K	500x500	300x600	0
K1	500x500	300x600	1
K2	500x500	300x600	2

Sumber: Analisis Penulis, 2024

Kolom pada portal memiliki penampang 500x500 mm dengan tulangan longitudinal sebanyak 12D16. Balok memiliki dimensi 300x600 mm dengan tulangan utama 3D25 pada bagian atas dan bawah. Penerapan CFRP dilakukan dengan metode *wrapping* penuh sepanjang kolom, dengan radius sudut penampang sebesar 15 mm. Pada model K1, kolom dibungkus dengan 1 lapis, sedangkan pada model K2 digunakan 2 lapis CFRP. Spesifikasi detail kolom

dan balok dapat dilihat pada Tabel 1. Untuk memperjelas geometri, pada Gambar 2 ditampilkan detail kolom yang digunakan dalam penelitian ini.

KOLOM	TULANGAN TUMPUAN	K1	TULANGAN TUMPUAN	K2	TULANGAN TUMPUAN
					
UKURAN KOLOM	500 x 500 mm	UKURAN KOLOM	500 x 500 mm	UKURAN KOLOM	500 x 500 mm
TULANGAN UTAMA	12D16	TULANGAN UTAMA	12D16	TULANGAN UTAMA	12D16
CARBON FIBER	0	CARBON FIBER	1	CARBON FIBER	2
RADIUS CORNER	0	RADIUS CORNER	15	RADIUS CORNER	15

Gambar 2. Detail Kolom

Penelitian ini menggunakan tiga jenis material utama, yaitu beton, baja tulangan, dan CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) sebagai material perkuatan eksternal. Beton dimodelkan dalam dua kondisi, yaitu beton tidak terkekang (*unconfined*) yang mempresentasikan selimut beton tanpa pengaruh pengekangan, dan beton beton terkekang (*confined*) yang menggambarkan inti beton dengan pengekangan oleh tulangan *transversal* serta lapisan CFRP. Model material yang digunakan dalam *OpenSees* untuk simulasi numerik adalah *Concrete02*, karena mampu mempresentasikan perilaku tekan dan tarik beton termasuk penurunan kekuatan setelah melewati beban puncak. Parameter utama beton yang digunakan mencakup kuat tekan (f'_c), tegangan ultimit (f_u), regangan ultimit (ϵ_{cu}), kuat tarik (f_t), serta modulus elastisitas (E). Nilai parameter tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter Material Beton

Parameter	Unconfined	Confined	Satuan
f'_c	25	30	MPa
f_u	5	6	MPa
f_t	2,5	3	MPa
E	1250	1500	MPa

Sumber: Analisis Penulis, 2024

Selain beton, struktur juga diperkuat dengan baja tulangan longitudinal dan geser. Baja dimodelkan menggunakan *Steel02* pada *OpenSees*, yang mampu menggambarkan perilaku nonlinier baja termasuk efek *strain hardening* dan histeris. Parameter baja yang digunakan terdiri dari tegangan leleh (f_y), modulus elastis (E), rasio *strain hardening* (b), serta parameter transisi kurva histeris ($R0$, $cR1$, dan $cR2$). Nilai parameter baja tulangan ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Parameter Material Baja Tulangan

Parameter	Nilai	Satuan
f_y	420	MPa
E	210000	MPa
b	0,005	-
$R0$	25	-
$cR1$	0,925	-
$cR2$	0,25	-

Sumber: Analisis Penulis, 2024

Material perkuatan yang digunakan adalah lembaran CFRP, yang diaplikasikan dengan metode *wrapping* pada kolom. CFRP dipilih karena memiliki kekuatan tarik tinggi, ringan serta tahan korosi. Dalam pemodelan numerik, CFRP dimodelkan sebagai elemen dengan ketebalan tertentu, namun pengaruh lekatan tidak diperhitungkan. Selanjutnya, untuk memperhitungkan pengaruh pengekanan akibat CFRP, parameter beton dimodifikasi sebagai parameter beton *confined* melalui f'_c dan ϵ_{cu} . Adapun spesifikasi material CFRP yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Parameter Material CFRP

Parameter	Nilai	Satuan
t_{frp}	0,166	mm
E_{frp}	230000	MPa
ϵ_{frp}	0,015	-

Sumber: Analisis Penulis, 2024

Material pada Model K1 dan K2

Pada model K1 dan K2, perbedaan utama terletak pada jumlah lapisan CFRP yang digunakan untuk memperkuat kolom. Lapisan CFRP berfungsi memberikan pengekanan tambahan pada beton inti, sehingga meningkatkan kuat tekan beton (f'_c), regangan ultimit (ϵ_{cu}), dan kekakuan awal. Perhitungan parameter beton terkekang dilakukan berdasarkan persamaan empiris Lam dan Teng (2003), di mana kontribusi CFRP dimasukkan melalui ketebalan lapisan (t_{frp}), modulus elastisitas CFRP (E_{frp}), serta regangan ultimit CFRP (ϵ_{frp}).

Pada model K1, kolom diperkuat dengan satu lapis CFRP. Berdasarkan Lam dan Teng (2003) tegangan ultimit beton (f'_c) dengan CFRP menunjukkan peningkatan dari 30 MPa menjadi 34,374 MPa, dan regangan ultimit meningkat dari 0,010 menjadi 0,012. Modulus elastis dalam keadaan tarik beton terkekang juga bertambah dari 1500 MPa menjadi 1718 MPa. Peningkatan ini menunjukkan bahwa satu lapisan CFRP sudah memberikan pengaruh nyata terhadap peningkatan kapasitas deformasi beton inti.

Pada model K2, kolom diperkuat dengan dua lapis CFRP. Peningkatan lebih signifikan terjadi pada parameter material, di mana kuat tekan beton terkekang mencapai 38,749 MPa, regangan ultimit naik hingga 0,014, dan modulus elastis dalam keadaan tarik meningkat menjadi 1937 MPa. Dengan demikian, dua lapis CFRP mampu memberikan pengekanan yang lebih besar sehingga meningkatkan kapasitas beton terkekang dibandingkan dengan model K1 maupun model tanpa CFRP.

Tabel 5. Hasil Perhitungan Parameter Beton Terkekang

Model	f'_c (MPa)	f_u (MPa)	ϵ_{cu}	E (MPa)
K	30	6	0,010	1500
K1	34,374	6,87	0,012	1718
K2	38,749	7,74	0,014	1937

Sumber: Analisis Penulis, 2024

Dari Tabel 5 dapat dilihat bahwa setiap penambahan jumlah lapisan CFRP menghasilkan peningkatan pada kekuatan tekan dan regangan ultimit beton terkekang. Peningkatan regangan ultimit ini sangat penting dalam konteks ketahanan gempa, karena struktur dengan daktilitas

yang lebih tinggi akan mampu menyerap energi gempa lebih baik sebelum mencapai kondisi keruntuhan.

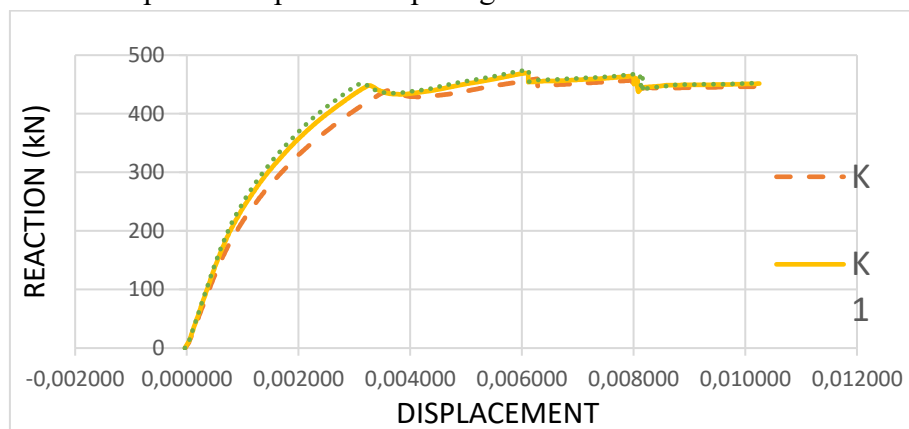
HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah dilakukan analisis *pushover*, didapatkan sejumlah hasil penting yang menggambarkan kinerja struktur terhadap beban gempa. Hasil utama yang diperoleh adalah kurva kapasitas, yaitu antara gaya geser dasar (*base shear*) dan perpindahan lateral pada titik kontrol. Kurva ini memberikan gambaran perilaku nonlinier struktur, mulai dari kondisi elastis, awal leleh, hingga mencapai kapasitas maksimum dan keruntuhan

Kurva Kapasitas

Berdasarkan hasil analisis *pushover* yang telah dilakukan, diperoleh kurva kapasitas (*capacity curve*) dalam bentuk hubungan antara gaya geser dasar (*base shear*) terhadap simpangan atap (*roof displacement*). Kurva tersebut menunjukkan bahwa penggunaan CFRP sebagai perkuatan pada kolom memberikan pengaruh terhadap peningkatan kapasitas struktur.

Kurva kapasitas struktur berdasarkan hasil analisis *pushover* OpenSees pada portal sederhana dan kolom pendek dapat dilihat pada grafik berikut :



Gambar 3. Hasil Kurva Kapasitas antara K, K1, dan K2

Sumber: Hasil Simulasi OpenSees, 2024

Gambar 3 menunjukkan kurva kapasitas struktur hasil analisis *pushover* untuk tiga kondisi perkuatan kolom, yaitu tanpa CFRP (K), dengan satu lapis CFRP (K1), dan dua lapis CFRP (K2). Sumbu horizontal menunjukkan simpangan (*displacement*) pada titik kontrol, sedangkan sumbu vertikal menunjukkan gaya reaksi (*base shear*) sebagai representasi kapasitas lateral struktur.

Dari grafik tersebut, terlihat bahwa struktur tanpa CFRP (K) memiliki kapasitas beban maksimum (*base shear*) yang lebih rendah dibandingkan dua model lainnya. Kurva (K) mencapai puncaknya 459,553 kN pada *displacement* 0,010220 m. Hal ini menunjukkan bahwa struktur tanpa perkuatan mempunyai kapasitas yang lebih rendah dibandingkan dengan dua model yang lain.

Sebaliknya, pada model satu lapis CFRP (K1), terjadi peningkatan kapasitas hingga 469,770 kN pada *displacement* 0,010251 m. Peningkatan ini menunjukkan bahwa perkuatan CFRP meningkatkan kapasitas lateral dan deformabilitas struktur.

Model dua lapis CFRP (K2) menunjukkan performa terbaik di antara ketiganya, dengan kapasitas maksimum sebesar 475,065 kN pada *displacement* 0,010261 m. Kurva K2 tidak hanya menunjukkan peningkatan kekuatan, tetapi juga kemampuan deformasi yang lebih besar. Secara lebih detail perilaku ketiga model tersebut dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Perbandingan Peningkatan

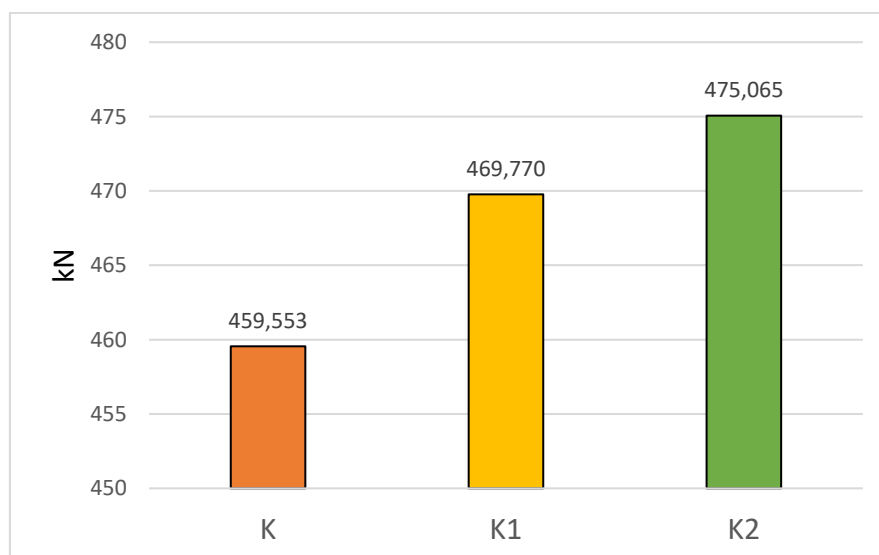
Model	f_c (MPa)	Vmax (kN)	Displacement (m)	Peningkatan Kapasitas (%)
K	30	459,553	0,010220	-
K1	34,37	469,770	0,010251	2,2%
K2	38,749	475,065	0,010261	3,4%

Sumber: Analisis Penulis, 2024

Pengaruh Perkuatan CFRP terhadap Kapasitas Geser Struktur

Analisis *pushover* dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh penggunaan material CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) sebagai bahan perkuatan pada kolom terhadap kapasitas geser struktur. Parameter utama yang diamati adalah nilai gaya geser dasar maksimum (*base shear max*), yang mencerminkan kemampuan struktur dalam menahan beban lateral maksimum sebelum terjadi keruntuhan.

Pada model struktur tanpa perkuatan CFRP (K), *base shear* maksimum yang dicapai sebesar 459,553 kN. Setelah dilakukan perkuatan dengan satu lapis CFRP (K1), nilai *base shear* meningkat menjadi 469,770 kN, menunjukkan adanya peningkatan kapasitas geser sebesar 2,2% dibandingkan model awal. Sementara itu pada model dengan dua lapis CFRP (K2), *base shear* maksimum mencapai 475,065 kN. Hal ini menunjukkan adanya peningkatan kapasitas lebih besar dari model (K1) yaitu sebesar 3,4% dibandingkan dengan struktur tanpa CFRP.

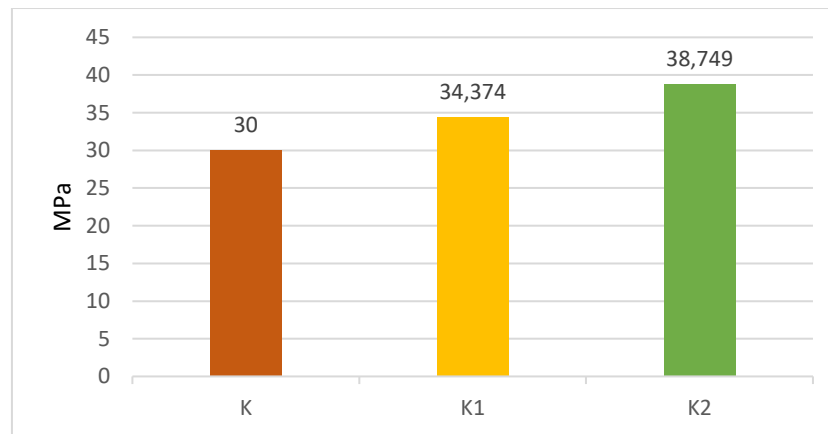


Gambar 4. Diagram Perbandingan *Base Shear Max*

Sumber: Hasil Simulasi OpenSees, 2024

Pengaruh Perkuatan CFRP terhadap Tegangan Ultimit Beton

Dari hasil tersebut terlihat bahwa semakin banyak jumlah lapisan CFRP yang digunakan, maka semakin tinggi pula nilai tegangan ultimit beton yang diperoleh, seperti ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Diagram Perbandingan *Ultimate Stress*

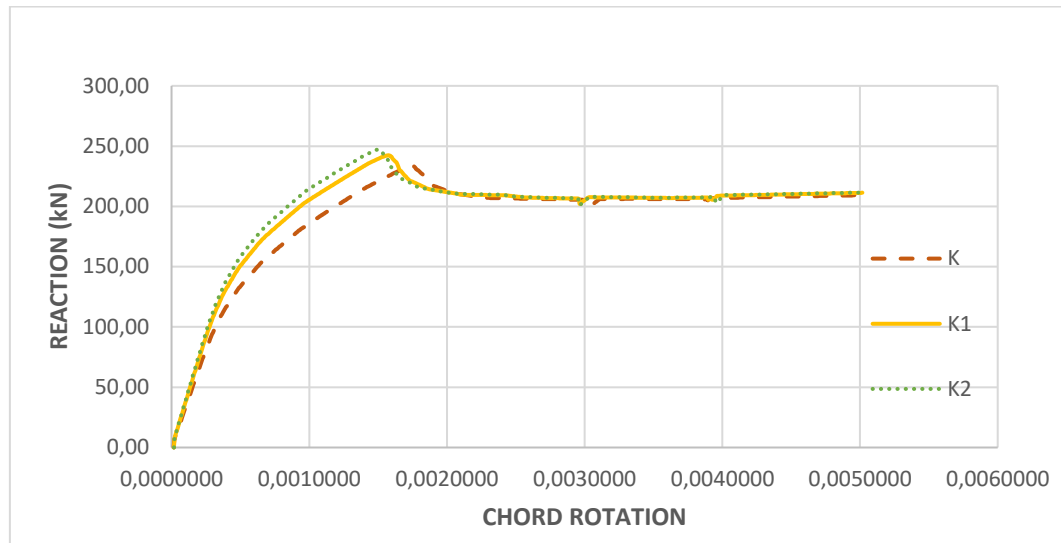
Sumber: Hasil Simulasi OpenSees, 2024

Pada model satu lapis CFRP (K1), nilai f'_c meningkat sebesar 14,6% dibandingkan dengan beton yang tidak dilapisi CFRP. Sedangkan pada model dua lapis CFRP (K2), nilai f'_c meningkat sebesar 29,2% dibandingkan dengan beton yang tidak dilapisi CFRP.

Model tanpa CFRP (K) mencapai gaya geser maksimum sebesar 233,58 kN, sedangkan model dengan CFRP (K1) dan (K2) masing-masing mencapai 242,36 kN dan 247,21 kN. Ini menunjukkan bahwa perkuatan CFRP meningkatkan kapasitas geser kolom sebesar 3,76% untuk satu lapis (K1) dan 5,84% untuk dua lapis (K2) dibandingkan tanpa CFRP.

Analisis Kapasitas Geser dan Rotasi Kolom

Gambar 6 memperlihatkan kurva kapasitas lokal kolom berupa hubungan antara gaya geser total (*global force*) dan rotasi sendi plastis (*chord rotation*) untuk ketiga model.



Gambar 6. Kurva Kapasitas Kolom

Sumber: Hasil Simulasi OpenSees, 2024

Pada fase awal pembebanan lateral, ketiga model menunjukkan respons linier elastis yang serupa. Namun setelah mencapai titik tertentu, terjadi perbedaan kapasitas antara masing-masing model, yang merefleksikan efek perkuatan CFRP terhadap perilaku kolom. Secara lebih rinci hasil analisis *pushover* dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Perbandingan Peningkatan pada Kolom

Model	Vmax (kN)	Peningkatan Kapasitas (%)	Rotasi Plastis maksimum (rad)
K	233,58	-	0,0050153
K1	242,36	3,76	0,0050173
K2	247,21	5,84	0,0050179

Sumber: Analisis Penulis, 2024

Dari hasil pada Tabel 6 dan Tabel 7, pada *displacement* dan rotasi yang relatif konstan, kolom dengan CFRP menunjukkan peningkatan kapasitas geser. Hal ini penting dalam konteks kinerja seismik, dimana peningkatan kapasitas geser dapat mempengaruhi kekuatan struktur dalam menahan gaya gempa.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis pushover terhadap struktur portal sederhana dengan elemen kolom pendek yang diperkuat dengan CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer), dapat disimpulkan bahwa perkuatan CFRP secara signifikan meningkatkan kinerja seismik struktur. Pertama, CFRP meningkatkan kapasitas lateral struktur, di mana model tanpa CFRP (K) memiliki gaya geser dasar maksimum sebesar 459,553 kN, sedangkan model dengan satu lapis CFRP (K1) dan dua lapis CFRP (K2) masing-masing mencapai 469,770 kN dan 475,065 kN, menunjukkan peningkatan kapasitas sebesar 2,2% dan 3,4%. Kedua, CFRP meningkatkan kuat tekan beton terkekang (f'_c) sebesar 14,6% untuk satu lapis dan 29,2% untuk dua lapis, yang

secara langsung berkontribusi pada peningkatan daya dukung kolom. Ketiga, pada tingkat elemen, CFRP meningkatkan kapasitas geser kolom, dengan V_{max} model K sebesar 233,58 kN meningkat menjadi 242,36 kN (3,76%) pada K1 dan 247,21 kN (5,84%) pada K2, yang menunjukkan peningkatan ketahanan terhadap gaya lateral. Keempat, CFRP memperlambat degradasi kapasitas struktur setelah mencapai beban puncak, di mana model K2 menunjukkan penurunan kekuatan pasca-puncak yang lebih lambat dibandingkan model tanpa perkuatan, mengindikasikan peningkatan kinerja pasca-leleh (*post-peak performance*) struktur.

DAFTAR PUSTAKA

- Alraquad, M., Allouzi, R., & Alkloub, A. (2022). Finite element modeling of reinforced concrete short columns subjected to shear in two perpendicular directions. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*, 18(4). <https://doi.org/10.1108/MMMS-04-2022-0052>
- Altin Karataş, M., & Gökkaya, H. (2018). A review on machinability of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite materials. *Defence Technology*, 14(4), 318–326. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2018.02.001>
- Hua, J. J., Gu, X. L., Eberhard, M. O., & Wouagabe, J. (2022). Influence of lateral loading direction on seismic behavior of shear-critical reinforced concrete intermediate short columns. *Engineering Structures*, 252, 113573. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113573>
- Lam, L., & Teng, J. G. (2003a). Design-oriented stress–strain model for FRP-confined concrete in rectangular columns. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 22(13), 1149–1186. <https://doi.org/10.1177/073168403035429>
- Lam, L., & Teng, J. G. (2003b). Design-oriented stress–strain model for FRP-confined concrete. *Construction and Building Materials*, 17, 471–489.
- Lisantono, A., & Pinang, P. S. (2018). Axial and flexural strength of square RC columns with no-rounded corners wrapped with CFRP under eccentric loading. *International Journal of Engineering and Technology Innovation*, 8(1), 38–48.
- Mahesh, U., & Pandit, P. (2020). A review on pushover analysis for irregular structures. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 10, 26835–26838.
- Moretti, M., & Tassios, T. P. (2007). Behaviour of short columns subjected to cyclic shear displacements: Experimental results. *Engineering Structures*, 29(8), 1881–1894. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.11.001>
- Murugan, K., & Sengupta, A. K. (2024). Modeling of column shear hinges in pushover analysis and experimental validation. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 29(3). American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/PPSCFX.SCENG-1341>
- Ozkan, D., Gok, M. S., & Karaoglanli, A. C. (2020). Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composite materials, their characteristic properties, industrial application areas and their machinability. In *Advanced Structured Materials* (Vol. 124, pp. 417–445). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-39062-4_20
- Pawlak, A. M., Górny, T., Dopierała, L., & Paczos, P. (2022). The use of CFRP for structural reinforcement: A literature review. *Metals*, 12(9), 1470. <https://doi.org/10.3390/met12091470>

- Tan, C., Jiang, X., Qiang, X., & Fan, M. (2024). Flexural performance of carbon fiber-reinforced polymer prestressed spun high-strength concrete pile. *Applied Sciences*, 14(16), 7170. <https://doi.org/10.3390/app14167170>
- Teng, J. G., Lam, L., Lin, G., Lu, J. Y., & Xiao, Q. G. (2015). Numerical simulation of FRP-jacketed RC columns subjected to cyclic and seismic loading. *Journal of Composites for Construction*, 20(1). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000584](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000584)
- Wang, L., & Wu, Y. (2008). Effect of corner radius on the performance of CFRP-confined square concrete columns: Test. *Engineering Structures*, 30, 493–505.
- Wang, Y., Chen, W., Li, D., Xu, H., Zhang, F., & Guo, X. (2023). Experimental and numerical investigations of the seismic performance of reinforced concrete frames strengthened with CFRP sheets. *Buildings*, 13, 2195. <https://doi.org/10.3390/buildings13092195>
- Zhou, F., Zhang, J., Song, S., Yang, D., & Wang, C. (2019). Effect of temperature on material properties of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) tendons: Experiments and model assessment. *Materials*, 12(7), 1025. <https://doi.org/10.3390/ma12071025>