



PENGARUH BERLAWANAN KONFINEMEN *CFRP* DENGAN ADANYA *CHAMFER* DAN REDUKSI LUAS PENAMPANG PADA KOLOM BETON BERTULANG PERSEGI

COUNTERACTING EFFECTS OF CFRP CONFINEMENT AND CHAMFER-INDUCED AREA REDUCTION IN SQUARE REINFORCED CONCRETE COLUMNS

Panji Nugroho¹, Heri Khoeri^{2*}

¹ PT. Hesa Laras Cemerlang, <https://hesa.co.id>

² Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Tama Jagakarsa, Jakarta

Abstrak

Perkuatan kolom beton bertulang persegi menggunakan *Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)* merupakan metode yang efektif untuk meningkatkan kapasitas struktur eksisting. Pada kolom persegi, aplikasi *CFRP full jacket* memerlukan pembulatan sudut (*chamfer*) guna meningkatkan efektivitas konfinemen, namun pembesaran *chamfer* secara simultan menyebabkan pengurangan luas penampang beton efektif. Penelitian ini mengevaluasi keseimbangan pengaruh antara peningkatan kapasitas akibat konfinemen *CFRP* dan penurunan kapasitas akibat kehilangan luas penampang pada kolom beton bertulang persegi. Studi dilakukan pada kolom berukuran 400×400 mm dengan pembedaan 8D16, sengkang D10-150, mutu beton $f'_c = 25$ MPa, dan baja tulangan $f_y = 400$ MPa, yang diperkuat *CFRP* dua lapis dengan orientasi serat *hoop full jacket*. Variasi radius *chamfer* dianalisis mulai dari $r = 20$ mm hingga batas maksimum yang ditentukan oleh selimut beton eksisting. Kapasitas kolom dievaluasi menggunakan diagram interaksi aksial–momen (P_n-M_n) dengan mempertimbangkan beton terkekang dan pengurangan luas penampang efektif secara eksplisit. Hasil menunjukkan bahwa peningkatan radius *chamfer* meningkatkan efektivitas konfinemen *CFRP* dan kapasitas kolom secara keseluruhan, sementara pengaruh negatif akibat reduksi penampang relatif lebih kecil, meskipun kecenderungan *diminishing return* terlihat pada radius yang lebih besar.

Kata Kunci: *CFRP*; *chamfer*; kolom; konfinemen; retrofit

Abstract

Strengthening square reinforced concrete columns using *Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)* is an effective technique for enhancing the capacity of existing structures. In square columns, the application of a full *CFRP jacket* requires corner rounding (*chamfer*) to improve confinement efficiency; however, increasing the *chamfer* radius simultaneously reduces the effective concrete cross-sectional area. This study investigates the balance between capacity enhancement due to *CFRP* confinement and capacity reduction caused by the loss of effective concrete area in square reinforced concrete columns. The study considers a 400×400 mm column reinforced with 8D16 longitudinal bars, D10-150 ties, concrete compressive strength $f'_c = 25$ MPa, and steel yield strength $f_y = 400$ MPa, strengthened using two layers of hoop-oriented *CFRP*. The *chamfer* radius is varied from 20 mm to the maximum value limited by the existing concrete cover. Column capacity is evaluated using axial–moment (P_n-M_n) interaction diagrams, explicitly accounting for confined concrete behavior and effective area reduction. The results indicate that increasing the *chamfer* radius improves *CFRP* confinement efficiency and overall column capacity, while the negative effect of area reduction remains relatively minor, with a *diminishing return* observed at larger *chamfer* radii.

Keywords: capacity; *CFRP*; *chamfer*; column; confinement

PENDAHULUAN

Kolom beton bertulang merupakan elemen struktural utama yang berperan memikul beban aksial dan momen lentur pada bangunan. Pada struktur eksisting, peningkatan beban, perubahan fungsi bangunan, atau degradasi material sering menuntut dilakukannya perkuatan struktur. Salah satu metode perkuatan yang banyak digunakan adalah membungkus kolom dengan *Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)* karena memiliki keunggulan berupa rasio kuat terhadap berat yang tinggi, ketahanan korosi, dan

kemudahan aplikasi (ACI Committee 440, 2017), (Fédération Internationale du Béton (fib), 2001).

Pada kolom persegi, penerapan *CFRP full jacket* memerlukan pembulatan sudut (*chamfer*) untuk menghindari konsentrasi tegangan pada serat *CFRP*. Penelitian eksperimental dan analitis menunjukkan bahwa kegagalan *CFRP* pada kolom persegi sering diawali oleh konsentrasi tegangan di sudut tajam, sehingga efektivitas konfinemen menjadi lebih rendah dibanding kolom lingkaran (Teng et al., 2002), (Lam & Teng, 2003). Temuan eksperimental 10

(*)Corresponding author

Telp : 08158255374

E-mail : heri.khoeri@umj.ac.id, <https://hesa.co.id>

<http://doi.org/10.33506/rb.v12i01.5405>

Received 31 Januari 2026; Accepted 31 Maret 2026; Available online 30 April 2026

E-ISSN: 2614-4344 P-ISSN: 2476-8928

tahun terakhir juga menegaskan bahwa peningkatan radius sudut (*chamfer*) meningkatkan regangan ultimit jaket *CFRP* serta efisiensi konfinemen pada kolom persegi/persegi panjang (de Diego et al., 2022a), (de Diego et al., 2019a). Karenanya, berbagai panduan, termasuk ACI, mensyaratkan radius sudut minimum tertentu sebelum aplikasi *CFRP* (ACI Committee 440, 2017).

Di sisi lain, *chamfer* menyebabkan terpotongnya kolom beton di keempat sudutnya, yang berakibat berkurangnya luas penampang beton efektif dan momen inersia. Beberapa studi menunjukkan bahwa reduksi luas penampang ini mempengaruhi kapasitas aksial dan perilaku pasca-elastik kolom, khususnya pada kolom langsung atau kolom dengan *sway* signifikan (Rochette & Labossière, 2000), (ACI Committee 318, 2019). Dengan demikian, terdapat mekanisme yang saling berlawanan antara peningkatan kuat tekan akibat konfinemen *CFRP* dan penurunan kapasitas akibat pengurangan geometri penampang.

Sebagian besar penelitian sebelumnya berfokus pada pengaruh jumlah lapisan, orientasi serat, dan mutu *CFRP* terhadap kapasitas kolom (Teng et al., 2002), (Samaan et al., 1998), (Xiao & Wu, 2000), (Khoeri, 2021). Sementara penelitian ini menawarkan kontribusi baru yaitu mengevaluasi pengaruh variasi radius sudut (r) pada kolom yang diperkuat *FRP*, mulai dari minimum yang disyaratkan dalam *data sheet* material *CFRP* hingga maksimum yang dibatasi selimut beton eksisting. Studi ini juga memperhitungkan reduksi luas penampang efektif akibat *chamfer* dalam penyusunan diagram interaksi aksial–momen. Dengan demikian, dapat memberikan pemahaman yang lebih realistis mengenai *trade-off* antara peningkatan kuat tekan akibat konfinemen *CFRP* dan kehilangan kapasitas akibat reduksi geometri penampang, serta mengidentifikasi rentang radius sudut yang optimum dan praktis untuk perencanaan retrofit kolom beton bertulang.

KAJIAN PUSTAKA

Konfinemen Beton dengan *FRP*

Konfinemen beton menggunakan *CFRP* telah banyak diteliti sebagai metode efektif untuk meningkatkan kuat tekan dan daktilitas beton.

Pada kolom berbentuk lingkaran, konfinemen *CFRP* menghasilkan tekanan lateral yang relatif seragam, sehingga peningkatan kuat tekan beton dapat dimodelkan secara langsung menggunakan hubungan empiris antara tekanan konfinemen dan kuat tekan beton terkekang. Untuk kolom dengan pembungkus *CFRP*, tekanan konfinemen lateral ideal dapat dinyatakan sebagai (Teng et al., 2002), (Samaan et al., 1998):

$$f_l = \frac{2t_f E_f \varepsilon_{fe}}{D} \quad (1)$$

dengan:

f_l = tekanan konfinemen lateral *CFRP* (MPa)

t_f = tebal efektif lapisan *CFRP* (mm)

E_f = modulus elastisitas *CFRP* (MPa)

ε_{fe} = regangan efektif *CFRP*

D = diameter ekuivalen kolom (mm)

Untuk kolom berbentuk persegi atau persegi panjang, efektivitas konfinemen *CFRP* menjadi lebih kompleks. Aktualnya hanya sebagian area beton yang benar-benar terkekang secara efektif, terutama di daerah sekitar sudut. Oleh karena itu, diperkenalkan faktor efektivitas konfinemen (k_e) untuk merepresentasikan pengaruh bentuk penampang dan radius sudut terhadap distribusi tekanan lateral. Tekanan konfinemen efektif dinyatakan dengan faktor efektivitas konfinemen k_e (Teng et al., 2002), (Lam & Teng, 2003) :

$$f_{l,eff} = k_e f_l \quad (2)$$

dengan:

$f_{l,eff}$ = tekanan konfinemen lateral efektif *CFRP* (MPa)

Kuat tekan beton terkekang dihitung sebagai:

$$f'_{cc} = f'_c + 3.3f_{l,eff} \quad (3)$$

dengan:

f'_{cc} = kuat tekan beton terkekang akibat konfinemen *CFRP* (MPa)

f'_c = kuat tekan beton terkekang akibat konfinemen *CFRP* (MPa)

Studi terkini menunjukkan bahwa efisiensi konfinemen *CFRP* pada kolom persegi sangat dipengaruhi oleh geometri penampang dan radius sudut, di mana peningkatan radius sudut terbukti meningkatkan regangan ultimit jaket *CFRP* serta distribusi tekanan konfinemen yang lebih merata (Balázs et al., 2019), (de Diego et al., 2022b), (de Diego et al., 2019b)

Pengaruh Radius Sudut pada Kolom Persegi

Beberapa penelitian eksperimental menunjukkan bahwa pembulatan sudut kolom secara signifikan meningkatkan regangan efektif *CFRP* sebelum terjadi rupture (Lam & Teng, 2003), (Xiao & Wu, 2000). Radius sudut yang lebih besar mengurangi konsentrasi tegangan pada serat FRP, sehingga meningkatkan kontribusi *CFRP* terhadap tekanan konfinemen beton. ACI 440 secara eksplisit merekomendasikan radius sudut minimum sekitar 20–25 mm untuk aplikasi *CFRP* pada kolom persegi (ACI Committee 440, 2017).

Namun demikian, peningkatan radius sudut juga menyebabkan pengurangan luas penampang beton. Pengurangan ini perlu dipertimbangkan dalam evaluasi kapasitas aksial, khususnya untuk kolom dengan tingkat pemanfaatan tinggi (Fédération Internationale du Béton (fib), 2001). Beberapa studi numerik dan eksperimental menunjukkan bahwa pada radius sudut yang besar, manfaat tambahan konfinemen *CFRP* dapat mengalami *diminishing return* karena kehilangan luas beton mulai mendominasi (Rochette & Labossière, 2000), (ACI Committee 318, 2019).

Pengaruh radius sudut pada kolom persegi terhadap efektivitas konfinemen dapat diperkirakan dengan (Teng et al., 2002), (Lam & Teng, 2003):

$$k_e = 1 - \frac{2(b - 2r)^2}{3b^2} \quad (4)$$

dengan:

b = dimensi sisi kolom persegi (mm)

r = radius *chamfer* sudut kolom (mm)

Pembulatan sudut menyebabkan luas penampang beton efektif berkurang. Luas

penampang beton efektif $A_{g,eff}$ dapat dinyatakan sebagai:

$$A_{g,eff} = b^2 - (4 - \pi)r^2 \quad (5)$$

Penelitian eksperimental terbaru juga menunjukkan bahwa pembulatan sudut dan modifikasi bentuk penampang merupakan pendekatan efektif untuk meningkatkan efisiensi konfinemen *CFRP* pada kolom persegi dan persegi panjang, meskipun pengaruh pengurangan luas penampang jarang dikaji secara kuantitatif (Lin & Teng, 2020), (Al-Tameemi & Akin, 2022).

Diagram Interaksi Aksial–Momen Kolom Beton Bertulang

Diagram interaksi aksial–momen ($P-M$) merupakan alat utama dalam evaluasi kapasitas kolom beton bertulang. Kapasitas aksial nominal kolom beton bertulang dengan beton terkekang *CFRP* kemudian dihitung sebagai (ACI Committee 318, 2019):

$$P_n = 0.85f'_{cc}(A_{g,eff} - A_s) + f_y A_s \quad (6)$$

dengan:

P_n = kapasitas aksial nominal kolom (kN)

A_s = luas total tulangan longitudinal (mm²)

f_y = kuat leleh baja tulangan (MPa)

Metode kompatibilitas regangan dengan blok tekan beton setara sebagaimana diadopsi dalam ACI 318 telah banyak digunakan dan divalidasi untuk kolom tanpa perkuatan maupun kolom yang diperkuat *CFRP* (ACI Committee 318, 2019), (Mirmiran & Shahawy, 1997). Untuk kondisi lentur–aksial, diagram interaksi $P-M$ disusun berdasarkan kompatibilitas regangan dengan tinggi blok tekan beton:

$$a = \beta_1 c \quad (7)$$

dengan:

a = tinggi blok tekan beton setara

β_1 = faktor tinggi blok tekan beton setara

c = jarak sumbu netral (mm)

Beberapa peneliti telah mengadaptasi metode ini untuk kolom dengan beton terkekang *CFRP*

dengan memodifikasi kuat tekan beton menjadi kuat tekan beton terkekang (f'_{cc}) (Teng et al., 2002), (Samaan et al., 1998). Namun, sebagian besar studi tersebut masih mengasumsikan dimensi penampang awal tanpa mempertimbangkan pengurangan luas akibat *chamfer*. Penelitian ini mengisi celah tersebut dengan menyusun diagram interaksi $P-M$ berdasarkan penampang efektif yang telah mengalami pembulatan sudut.

METODE

Model Analisis

Analisis kapasitas kolom dilakukan dengan tahapan berikut:

1. Menentukan kuat tekan beton terkekang (f'_{cc}) akibat konfinemen *CFRP* sebagai fungsi radius sudut r .
2. Menghitung luas penampang beton efektif ($A_{g,eff}$) akibat pembulatan sudut.
3. Menyusun diagram interaksi aksial–momen ($P_n - M_n$) menggunakan metode kompatibilitas regangan dan blok tekan beton setara.
4. Menentukan kapasitas aksial nominal (P_{n0}) pada kondisi tekan konsentris dan kapasitas momen nominal maksimum ($M_{n,max}$) dari diagram interaksi.

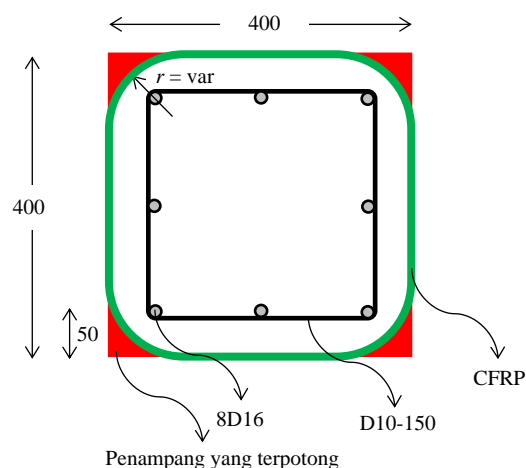
Spesifikasi Kolom dan Material

Kolom yang dianalisis **Gambar 1** memiliki spesifikasi sebagai berikut:

- Dimensi kolom: 400×400 mm
- Mutu beton: $f'_c = 25$ MPa
- Tulangan memanjang: 8D16
- Sengkang: D10-150
- Mutu baja tulangan: $f_y = 400$ MPa
- Selimut beton bersih: 50 mm

Material perkuatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah *CFRP CONSOL WRAP 305 SE*, berupa kain serat karbon searah (*unidirectional carbon fiber fabric*) yang dirancang untuk perkuatan struktur beton bertulang. Berdasarkan lembar data teknis pabrikan, *CFRP* ini memiliki berat areal sebesar 300 ± 5 g/m², dengan ketebalan nominal satu lapis sebesar 0,167 mm. Material *CFRP* memiliki kuat tarik ultimit sebesar 4900 MPa, modulus

elastisitas sebesar 260 GPa, serta regangan ultimit sebesar 2,1%. Serat disusun secara unidirectional, sehingga seluruh kapasitas tarik efektif bekerja searah serat utama. Dalam aplikasi perkuatan kolom, *CFRP* diaplikasikan sebagai *full jacket* dengan orientasi serat *hoop* (melintang) untuk menghasilkan tekanan konfinemen lateral pada beton. Radius minimum sudut kolom yang disyaratkan untuk aplikasi *CFRP* ini minimum $r = 20$ mm, sesuai dengan ketentuan pabrikan.



Gambar 1. Penampang kolom yang dianalisis

Variasi Radius Sudut

Radius sudut divariasikan mulai dari $r = 20$ mm (batas minimum berdasarkan data sheet *CFRP*), hingga r_{max} yang tidak mengenai tulangan dan sengkang, yang ditentukan berdasarkan jarak tulangan terluar dari sudut kolom. Dengan selimut beton 50 mm dan sengkang D10, radius maksimum yang aman diperoleh sebesar $r \approx 70$ mm. Variasi radius dilakukan dengan interval 5 mm.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk memperjelas keseimbangan pengaruh antara konfinemen *CFRP* dan pengurangan luas penampang akibat *chamfer*, hasil analisis disajikan dengan memisahkan kontribusi masing-masing mekanisme. Kontribusi konfinemen *CFRP* direpresentasikan oleh peningkatan kuat tekan beton terkekang (f'_{cc}) dan kapasitas aksial–momen apabila luas penampang diasumsikan tetap, sedangkan pengaruh *chamfer* direpresentasikan oleh penurunan kapasitas

akibat berkurangnya luas penampang beton efektif ($A_{g,eff}$).

Pendekatan ini memungkinkan evaluasi kuantitatif sejauh mana peningkatan kapasitas akibat konfinemen *CFRP* dikompensasi oleh kehilangan kapasitas akibat pengurangan geometri penampang.

Tabel 1. Pengaruh Variasi Radius *Chamfer* terhadap Kapasitas Aksial Kolom

r (mm)	f'_{cc} (MPa)	$A_{g,eff}$ (mm ²)	ΔP_n Konfinemen (kN)	ΔP_n reduksi A_g (kN)	$P_{n,net}$ (kN)
20	32.61	159657	185	-10	5025
25	33.1	159463	250	-25	5085
30	33.58	159227	313	-48	5142
35	34.04	158948	374	-73	5196
40	34.49	158627	432	-99	5246
50	35.34	157854	540	-198	5337
60	36.14	156910	635	-255	5415
70	36.89	155794	720	-277	5478

Keterangan:

- ΔP_n konfinemen = kenaikan kapasitas aksial akibat peningkatan f'_{cc} oleh konfinemen *CFRP* (kN).
- ΔP_n reduksi A_g = penurunan kapasitas aksial akibat pengurangan luas penampang beton efektif (kN).
- ΔP_n ,net = kapasitas aksial nominal akhir dengan mempertimbangkan kedua efek secara simultan.

Tabel 2. Pengaruh Variasi Radius *Chamfer* terhadap Kapasitas Lentur Kolom

r (mm)	f'_{cc} (MPa)	$A_{g,eff}$ (mm ²)	ΔM_n Konfinemen (kN)	ΔM_n reduksi A_g (kN)	$M_{n,max}$ (kN)
20	32.61	159657	0.9	-0.9	276.5
25	33.1	159463	3.9	-1.5	278.9
30	33.58	159227	6.7	-2.1	281.1
35	34.04	158948	9.5	-2.9	283.1
40	34.49	158627	12.2	-3.9	284.8
50	35.34	157854	17.2	-6	287.7
60	36.14	156910	22	-8.9	289.6
70	36.89	155794	26.4	-12.2	290.7

Keterangan:

- ΔM_n konfinemen = kenaikan kapasitas momen maksimum akibat konfinemen (kN·m) dibanding acuan.
- ΔM_n reduksi A_g = penurunan kapasitas momen maksimum akibat reduksi luas penampang (kN·m) pada radius r terkait.
- $M_{n,max}$ = kapasitas momen nominal maksimum (hasil bersih).

Tabel 1 dan **Tabel 2** secara berurutan menyajikan perbandingan kapasitas aksial dan lentur kolom beton bertulang dengan variasi radius *chamfer*, yang memisahkan: (1) peningkatan kapasitas akibat konfinemen FRP, dan (2) penurunan kapasitas akibat berkurangnya luas penampang beton. Terlihat secara jelas bahwa variasi radius *chamfer* pada kolom beton bertulang persegi yang diperkuat *CFRP* menghasilkan dua mekanisme yang bekerja

secara simultan namun berlawanan arah, yaitu peningkatan kapasitas akibat konfinemen *CFRP* dan penurunan kapasitas akibat berkurangnya luas penampang beton efektif.

Pengaruh terhadap Kapasitas Aksial (ΔP_n)

Dari **Tabel 1**, peningkatan radius *chamfer* dari 20 mm hingga 70 mm menunjukkan kenaikan kapasitas aksial akibat konfinemen *CFRP* yang signifikan, dengan ΔP_n konfinemen meningkat dari sekitar +185 kN pada $r = 20$ mm menjadi sekitar +720 kN pada $r = 70$ mm. Hal ini mengindikasikan bahwa pembesaran radius sudut secara efektif meningkatkan efisiensi jaket *CFRP* dalam menghasilkan tekanan konfinemen lateral, yang selanjutnya meningkatkan kuat tekan beton terkekang f'_{cc} .

Sebaliknya, pengurangan luas penampang beton efektif akibat *chamfer* menghasilkan penurunan kapasitas aksial yang relatif kecil, dengan ΔP_n reduksi A_g meningkat dari -10 kN hingga -277 kN pada rentang radius yang sama. Meskipun nilai reduksi ini meningkat seiring bertambahnya radius *chamfer*, besarnya masih jauh lebih kecil dibandingkan peningkatan kapasitas akibat konfinemen *FRP*.

Hasil bersihnya tercermin pada nilai P_n net yang terus meningkat dengan bertambahnya radius *chamfer*. Temuan ini menunjukkan bahwa, dalam rentang radius yang dianalisis, pengaruh konfinemen *CFRP* lebih dominan dibandingkan pengaruh negatif akibat reduksi luas penampang. Namun demikian, laju peningkatan P_n ,net cenderung menurun pada radius yang lebih besar, yang mengindikasikan adanya kecenderungan *diminishing return* dari pembesaran *chamfer*.

Pengaruh terhadap Kapasitas Momen (ΔM_n)

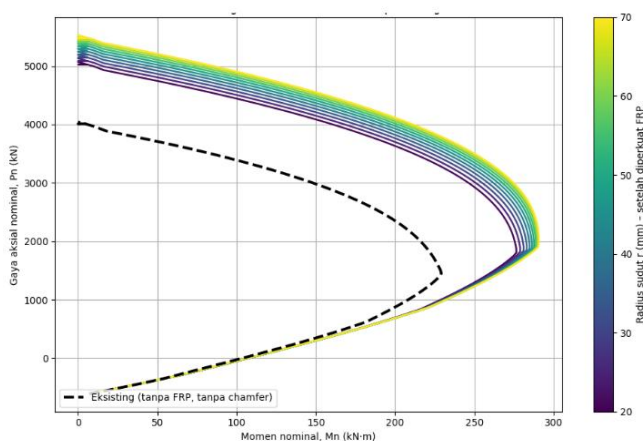
Tren yang serupa juga diamati pada kapasitas momen nominal maksimum. Dari **Tabel 2**, peningkatan radius *chamfer* menghasilkan kenaikan ΔM_n konfinemen dari kurang dari +1 kN·m pada $r = 20$ mm hingga sekitar +26 kN·m pada $r = 70$ mm. Kenaikan ini terutama disebabkan oleh meningkatnya kontribusi beton terkekang pada zona tekan penampang, yang memperbesar resultan gaya tekan beton.

Di sisi lain, reduksi luas penampang akibat *chamfer* menyebabkan penurunan ΔM_n yang relatif kecil, yaitu dari sekitar $-1 \text{ kN}\cdot\text{m}$ hingga $-12 \text{ kN}\cdot\text{m}$. Dibandingkan dengan kapasitas momen total, penurunan ini masih tergolong minor, sehingga M_n max tetap menunjukkan tren peningkatan dengan bertambahnya radius *chamfer*.

Namun demikian, berbeda dengan kapasitas aksial, peningkatan kapasitas momen menunjukkan sensitivitas yang lebih rendah terhadap variasi radius *chamfer*. Hal ini dapat dijelaskan oleh fakta bahwa kapasitas momen sangat dipengaruhi oleh posisi tulangan tarik dan lengan momen internal, yang tidak berubah secara signifikan akibat pembulatan sudut pada penampang.

Pengaruh terhadap Interaksi Aksial-Lentur ($P_n - M_n$)

Untuk memperoleh gambaran menyeluruh mengenai pengaruh variasi radius *chamfer* terhadap kinerja struktural kolom beton bertulang yang diperkuat *CFRP*, analisis tidak hanya dibatasi pada kapasitas aksial dan momen maksimum secara terpisah, tetapi juga dievaluasi melalui diagram interaksi aksial–momen ($P_n - M_n$). Diagram ini merepresentasikan kapasitas kombinasi gaya aksial dan momen lentur yang dapat dipikul kolom pada berbagai kondisi pembebanan, sehingga sangat relevan untuk menilai perilaku kolom dalam kondisi nyata.



Gambar 2. diagram interaksi aksial–momen ($P_n - M_n$)

Gambar 2 menunjukkan bahwa peningkatan radius *chamfer* menyebabkan pergeseran kurva diagram interaksi ke arah luar, baik pada daerah

dominasi tekan (*high axial load–low moment*) maupun daerah dominasi lentur (*low axial load–high moment*). Pergeseran ini mengindikasikan peningkatan kapasitas kombinasi $P-M$ secara keseluruhan seiring bertambahnya radius *chamfer*.

Fenomena ini konsisten dengan hasil kuantitatif pada tabel ΔP_n dan ΔM_n , di mana peningkatan radius *chamfer* meningkatkan efektivitas konfinemen *FRP*, yang tercermin dari kenaikan kuat tekan beton terkekang f'_{cc} . Meskipun pembesaran *chamfer* mengurangi luas penampang beton efektif, grafik menunjukkan bahwa efek konfinemen *CFRP* tetap lebih dominan, sehingga kapasitas bersih kolom meningkat.

Pada bagian kiri atas diagram (momen kecil dan gaya aksial besar), terlihat bahwa nilai P_n maksimum meningkat secara bertahap dengan bertambahnya radius *chamfer*. Jarak antar kurva pada daerah ini relatif jelas, menegaskan bahwa kapasitas aksial sangat sensitif terhadap efektivitas konfinemen *CFRP*.

Hal ini sejalan dengan pembahasan ΔP_n , di mana peningkatan kapasitas aksial akibat konfinemen *CFRP* mencapai ratusan kilonewton, sedangkan penurunan akibat reduksi penampang relatif kecil. Dengan demikian, pada kondisi tekan dominan, konfinemen *CFRP* menjadi mekanisme pengendali utama, sementara pengaruh reduksi penampang bersifat sekunder.

Pada bagian kanan diagram (momen besar dan gaya aksial rendah), peningkatan kapasitas momen maksimum akibat variasi radius *chamfer* terlihat lebih terbatas dibandingkan peningkatan kapasitas aksial. Kurva-kurva untuk berbagai nilai r cenderung saling berdekatan, terutama pada daerah mendekati kondisi lentur murni.

Perilaku ini konsisten dengan hasil ΔM_n , di mana kenaikan kapasitas momen akibat konfinemen *CFRP* relatif lebih kecil dibandingkan kenaikan kapasitas aksial. Hal ini menunjukkan bahwa kapasitas momen kolom lebih dipengaruhi oleh konfigurasi tulangan longitudinal dan lengan momen internal, yang tidak berubah secara signifikan akibat pembulatan sudut penampang.

Diagram interaksi $P_n - M_n$ ini secara visual mempertegas konsep keseimbangan pengaruh

yang menjadi fokus utama penelitian. Peningkatan radius *chamfer* secara simultan, yaitu: 1) meningkatkan kapasitas melalui konfinemen *CFRP* (pergeseran kurva ke luar), dan 2) mengurangi kapasitas melalui pengurangan luas penampang beton efektif.

Namun, dalam rentang radius yang dianalisis, kurva interaksi menunjukkan bahwa mekanisme pertama lebih dominan, sehingga kapasitas kombinasi $P-M$ secara bersih tetap meningkat. Meskipun demikian, jarak antar kurva semakin mengecil pada radius yang lebih besar, yang mengindikasikan adanya kecenderungan *diminishing return*, sebagaimana juga teridentifikasi pada analisis tabel P_n dan M_n .

Implikasi terhadap Desain Retrofit Kolom

Secara praktis, grafik ini menunjukkan bahwa pemilihan radius *chamfer* yang moderat sudah cukup untuk memperoleh peningkatan kapasitas yang signifikan pada diagram interaksi $P-M$. Pembesaran *chamfer* lebih lanjut memang masih meningkatkan kapasitas, tetapi dengan efisiensi yang semakin menurun. Oleh karena itu, radius *chamfer* menengah (misalnya 25–40 mm) dapat dianggap sebagai pilihan yang rasional dan efisien untuk aplikasi retrofit kolom beton bertulang persegi dengan *CFRP*.

KESIMPULAN

Perkuatan kolom beton bertulang persegi 400×400 mm dengan *CFRP* dua lapis orientasi *hoop full jacket* terbukti meningkatkan kapasitas kombinasi gaya aksial dan momen dibandingkan kondisi eksisting. Variasi radius *chamfer* $r = 20-70$ mm menunjukkan keseimbangan pengaruh antara peningkatan kapasitas akibat konfinemen *CFRP* dan penurunan kapasitas akibat berkurangnya luas penampang beton efektif, dengan pengaruh konfinemen tetap lebih dominan. Peningkatan kapasitas paling signifikan terjadi pada daerah dominasi tekan, sementara pada radius *chamfer* yang lebih besar terlihat kecenderungan *diminishing return*. Secara praktis, radius *chamfer* menengah (sekitar 25–40 mm) sudah memberikan peningkatan kapasitas yang efektif dan efisien tanpa kehilangan luas penampang yang signifikan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada PT. Hesa Laras Cemerlang, <https://hesa.co.id>, dan PT. Kimia Konstruksi Indonesia <https://consolindonesia.com/> yang telah mendukung penuh penelitian ini.

REFERENSI

- ACI Committee 318. (2019). ACI 318-19 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. In *318-19 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*. American Concrete Institute. <https://doi.org/10.14359/51716937>
- ACI Committee 440. (2017). *ACI PRC-440.2-17: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*. American Concrete Institute.
- Agus Setiya Budi, Dwi Hermawan, I., & Wibowo. (2024). PENGARUH KADAR AKTIVATOR 0,53 DAN RASIO SS/SH (0,5-1,5) PADA BETON GEOPOLIMER DENGAN BAHAN DASAR FLY ASH TERHADAP KUAT TEKAN. *Jurnal Teknik Sipil : Rancang Bangun*, 10(2), 070–075. <https://doi.org/10.33506/rb.v10i2.3593>
- Al-Tameemi, H., & Akın, E. (2022). Improving the efficiency of FRP-Confined square concrete column by rounding the sharp edges and circularizing the flat sides. *Structures*, 45, 1762–1773. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.10.014>
- Balázs, G., Barros, J., Bilotta, A., Bournas, D., Ceroni, F., Czaderski, C., D'Antino, T., Kolyvas, C., Kotynia, R., Niedermeier, R., Nigro, E., Oller, E., Pantazopoulou, S., Pecce, M., Prota, A., Sena-Cruz, J., Tastani, S., Thermou, G., & Zilch, K. (2019). *fib Bulletin 90. Externally applied FRP reinforcement for concrete structures* (S. Matthys & T. Triantafillou, Eds.). fib. The International Federation for Structural Concrete. <https://doi.org/10.35789/fib.BULL.0090>
- de Diego, A., Arteaga, Á., & Fernández, J. (2019a). Strengthening of square concrete columns with composite materials.

- Investigation on the FRP jacket ultimate strain. *Composites Part B: Engineering*, 162, 454–460. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.01.017>
- de Diego, A., Arteaga, Á., & Fernández, J. (2019b). Strengthening of square concrete columns with composite materials. Investigation on the FRP jacket ultimate strain. *Composites Part B: Engineering*, 162, 454–460. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.01.017>
- de Diego, A., Martínez, S., Castro, V. J., Echevarría, L., Barroso, F. J., & Gutiérrez, J. P. (2022a). Experimental investigation on the compressive behaviour of FRP-confined rectangular concrete columns. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 22(3), 131. <https://doi.org/10.1007/s43452-022-00450-4>
- de Diego, A., Martínez, S., Castro, V. J., Echevarría, L., Barroso, F. J., & Gutiérrez, J. P. (2022b). Experimental investigation on the compressive behaviour of FRP-confined rectangular concrete columns. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 22(3), 131. <https://doi.org/10.1007/s43452-022-00450-4>
- Fédération Internationale du Béton (fib). (2001). Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures. In *fib Bulletin 14*.
- Fajar, M. N., Parung, H., & Amiruddin, A. A. (2023). Perilaku Lekatan Tulangan Bambu Takikan Terhadap Beton Normal dan Beton SCC. *Konstruksia*, 14(2), 1. <https://doi.org/10.24853/jk.14.2.1-8>
- Khoeri, H. (2021). Pemilihan Metode Perbaikan dan Perkuatan Struktur Akibat Gempa (Studi Kasus pada Bank Sulteng Palu). *Konstruksia*, 12(1), 93. <https://doi.org/10.24853/jk.12.1.93-104>
- Lam, L., & Teng, J. G. (2003). Design-oriented stress–strain model for FRP-confined concrete. *Construction and Building Materials*, 17(6–7), 471–489. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(03\)00045-X](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(03)00045-X)
- Lin, G., & Teng, J. G. (2020). Advanced stress-strain model for FRP-confined concrete in square columns. *Composites Part B: Engineering*, 197, 108149. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108149>
- Mirmiran, A., & Shahawy, M. (1997). Behavior of Concrete Columns Confined by Fiber Composites. *Journal of Structural Engineering*, 123(5), 583–590. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1997\)123:5\(583\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1997)123:5(583))
- Rochette, P., & Labossière, P. (2000). Axial Testing of Rectangular Column Models Confined with Composites. *Journal of Composites for Construction*, 4(3), 129–136. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2000\)4:3\(129\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2000)4:3(129))
- Samaan, M., Mirmiran, A., & Shahawy, M. (1998). Model of Concrete Confined by Fiber Composites. *Journal of Structural Engineering*, 124(9), 1025–1031. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1998\)124:9\(1025\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1998)124:9(1025))
- Teng, J. G., Chen, J.-F., Smith, S., & Lam, L. (2002). FRP-strengthened RC structures. *FRP : Strengthened RC Structures*, by J. G. Teng, J. F. Chen, S. T. Smith, L. Lam, Pp. 266. ISBN 0-471-48706-6. Wiley-VCH , January 2002.
- Xiao, Y., & Wu, H. (2000). Compressive Behavior of Concrete Confined by Carbon Fiber Composite Jackets. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 12(2), 139–146. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2000\)12:2\(139\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2000)12:2(139))