JIUBJ

**Jurnal Ilmiah Universitas Batanghari Jambi, 22(1), Februari 2022, 572-577**
Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat universitas Batanghari Jambi
ISSN 1411-8939 (Online), ISSN 2549-4236 (Print)
DOI 10.33087/jiubj.v22i1.1949

# Studi Pengaruh Radius Kelengkungan terhadap Efektifitas Kekangan pada Kolom Persegi dengan Perkuatan FRP

**Anang Kristianto*, Yosafat Aji Pranata, Noek Sulandari**
Program Studi Teknik Sipil, Universitas Kristen Maranatha, Jl. Suria Sumantri No.65, Bandung
*Correspondence email: anang.kristianto@eng.maranatha.edu

**Abstrak.** Revisi peraturan terkait desain bangunan tahan gempa SNI 1726:2012 menjadi SNI 1726:2019 sebagai akibat perubahan besarnya magnitude gempa yang terjadi pada tahun-tahun terakhir dan juga perkembangan penelitian mengakibatkan banyaknya elemen struktural gedung yang harus diperkuat khususnya pada elemen kolom. Salah satu teknik perkuatan yang paling banyak diadopsi untuk meningkatkan kinerja kolom beton bertulang adalah menyelubungi elemen struktur dengan lembaran CFRP (*Carbon Fiber Reinforcement Polymer*) , memberikan aksi pengekangan pasif yang dapat meningkatkan kekuatan aksial dan kapasitas perpindahannya. Penggunaan CRFP pada kolom persegi pada bangunan eksisting harus memperhatikan berbagai faktor diantaranya adalah sudut kolom serta lebar strip perkuatan yang diperlukan jika tidak menggunakan full wrapping. Makalah ini akan memaparkan analisis tegangan pengekangan pada berbagai sudut kelengkungan kolom persegi dan menganalisis korelasi tegangan dan regangan pada penampang dengan data berbagai penelitian yang ada. Penelitian juga dilakukan dengan uji tekan kolom (100mm x 100mm x 200mm) dengan beberapa radius sudut kelengkungan yang berbeda yang diberi perkuatan FRP. Hasil pengujian aksial tekan pada kolom benda uji didapatkan bahwa radius kelengkungan memberikan pengaruh cukup signifikan terhadap efektifitas pengekangan pada r/b < 0.15. Hasil pengujian menunjukkan peningkatan kapasitas aksial yang kecil terjadi pada kolom dengan radius kelengkungan sudut r= 0mm dan 10mm (dibawah radius terkecil r=13mm yang diijinkan oleh ACI). Kolom persegi dengan r/b < 0.15 yang diperkuat dengan FRP tidak efektif mengekang inti kolom sebagai akibat adanya konsentrasi tegangan yang terjadi pada daerah sudut kolom.

**Kata kunci**: Carbon fiber reinforced polymer; Kolom persegi; Perkuatan; Radius kelengkungan

***Abstract.*** *Revised code of earthquake-resistant building design from SNI 1726:2012 to SNI 1726:2019 as a result of changes in the earthquake magnitude that occurred in recent years and developments in earthquake engineering research resulted in many building structural elements should be strengthened, especially on column elements. One of the most adopted strengthening techniques for enhancing the performance of existing RC columns consists of wrapping a member with CFRP (Carbon Fiber Reinforcement Polymer) sheets, inducing a passive confinement action capable of increasing the columns axial strength and displacement capacity. The use of CRFP as strengthening on square columns in existing buildings should consider various factors, including the column corner radius and the width of the strip of FRP required if not using full wrapping. This paper presents the confinement stresses analysis at the different radius of curvature of the square column corner and analyzes the correlation of stress-strain in the cross-section using data from various existing studies. An experimental study will also be done by axial loading test FRP column (100mm x 100mm x 200mm) with several different curvature radii. The results of the axial compression test to the specimens found that the effect of curvature is quite significant for confinement effectiveness at r/b < 0.15. Based on this experiment, a slight increase of the axial capacity on the column specimens with radius curvature r=0mm and r=10mm ( below r=13mm, the smallest radius allowed by the code). Rectangular concrete columns strengthened by FRP with r/b < 0.15 could not be effective to the confined concrete core due to stress concentration at the corner.*

***Keywords*****:** *Carbon fiber-reinforced polymer; Curvature radius; Rectangular column; Strengthening*

## PENDAHULUAN

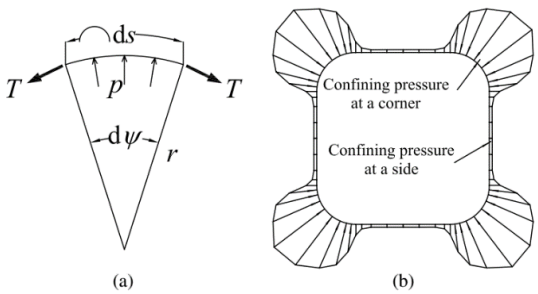
Peraturan terbaru pemerintah terkait desain struktur terhadap beban gempa (SNI 1726 -2019) mengalami perubahan khususnya pada besarnya beban gempa yang terjadi pada beberapa daerah rawan gempa dan juga perubahan terkait persyaratan detailing tulangan pengekang pada kolom persegi. Kondisi ini mengakibatkan bangunan-bangunan gedung pada beberapa daerah rawan gempa harus diperkuat karena elemen strukturnya secara khusus kolom karena tidak lagi memenuhi persyaratan kekuatan. Salah satu perkuatan elemen struktur kolom yang saat ini banyak digunakan adalah menggunakan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP). Penggunaan CFRP memberikan banyak kelebihan diantaranya adalah pemasangan yang relatif cepat dan tidak mengubah secara signifikan dimensi kolom sehingga tidak memberikan beban tambahan kepada fondasi. Hal yang perlu diperhatikan pada saat pemasangan FRP di lapangan dan seringkali diabaikan khususnya pada kolom beton persegi adalah radius kelengkungan pada sudut kolom persegi yang harus disesuaikan sehingga memenuhi persyaratan. ACI 440.2R memberikan standar radius kelengkungan sudut minimum yang harus diberikan adalah sebesar 13mm. Radius sudut kelangkungan berhubungan erat dengan efektifitas tegangan pengekangan yang dapat dikembangkan oleh FRP dalam rangka mengekang inti beton agar dapat memberikan peningkatan kapasitas aksial yang diperlukan dalam perkuatan kolom persegi.

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mengkaji kemampuan pengekangan FRP pada kolom dalam meningkatkan kapasitas aksialnya dengan mengacu pada penelitian Richart et al (1928) dimana kolom diasumsikan sebagai penampang lingkaran yang memiliki distribusi tegangan lateral pengekang yang seragam. Asumsi ini memungkinkan perhitungan tegangan pengekangan secara langsung sebagai fungsi dari ketebalan lembaran FRP, karakteristik mekanik material dan diameter penampang. Penelitian terakhir yang cukup lengkap dilakukan oleh Ozbakkaloglu et al. (2013) yang menganalisis beberapa model untuk memprediksi perilaku tegangan-regangan kolom lingkaran yang dikekang oleh FRP.

Penelitian pengaruh FRP pada kekuatan aksial untuk kolom persegi masih lebih sedikit dilakukan daripada kolom lingkaran. Tegangan pengekangan pada kolom persegi yang tidak seragam dibandingkan kolom lingkaran membuat beberapa kesulitan dalam memformulasi distribusi tegangan yang terjadi secara mekanika. Sebagian besar model tegangan yang ada pada kolom persegi saat ini merupakan modifikasi dari kolom lingkaran yang diberikan koreksi faktor bentuk (*shape factor*) sehingga perilaku tegangannya mendekati bentuk kolom persegi yang tidak seragam. Untuk mendapatkan gambaran perilaku tegangan pengekangan pada kolom persegi beberapa pendekatan analisis telah dilakukan. Lembaran FRP yang digunakan untuk mengekang kolom beton dapat dianalisis sebagai struktur shell silindris dikenai tegangan hidrostatis. Secara umum beban yang bekerja pada struktur shell adalah kombinasi aksi tarik (*strecthing*) dan lentur (*bending*). Untuk model shell yang tipis seringkali pengaruh lentur adalah kecil. Dalam kasus ini Calladine (1983) memberikan persamaan keseimbangan pada model shell (Gambar 1 a dan b) adalah sebesar :

$$T=rp \qquad (1)$$

Dimana $T$ = gaya tarik arah melingkar dari struktur *shell*, $r$ = radius penampang infinitesimal dan p= tekanan hidrostatik yang bekerja pada struktur. Solusi ini berlaku untuk penampang persegi prismatis dengan sudut melengkung yang dikekang oleh FRP. Prinsip ini berlaku apabila rasio antara radius kelengkungan sudut dan ketebalan FRP lebih besar dari 20 (r/t >20) (Calladine 1983)




**Gambar 1.** Perilaku pengekangan pada sudut penampang persegi: (a) mekanisme gaya tarik; (b) distribusi teganan pengekanang (Pham & Hadi, 2014)

Pham & Hadi (2014) dalam penelitiannya mengasumsikan bahwa pada saat beban diberikan pada FRP yang mengekang kolom beton persegi, konsentrasi tekanan pengekangan terjadi hanya pada sudut penampang. Gaya tarik yang terjadi pada saat runtuh dapat diformulasikan sebagai :

$$f_{fe}=E_f\epsilon_{fe} \qquad (2)$$

Dimana $f_{fe}$ = tegangan tarik aktual FRP; $E_f$ = Modulus elastisitas CFRP, dan $\varepsilon_{fe}$= regangan aktual runtuh FRP. Substitusi persamaan (2) ke persamaan (1) didapatkan tegangan pengekangan FRP pada kolom persegi dibagian sudut identik dengan tegangan pada penampang lingkaran

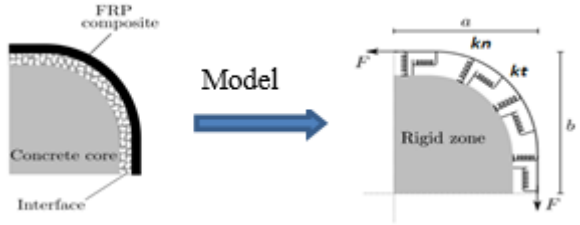
$$f_l = \frac{ntE_f\varepsilon_{fe}}{r} \qquad (3)$$

Dimana $f_l$ = tegangan pengekang kolom akibat FRP, $t$= tebal FRP; $n$ = jumlah lapisan FRP dan $r$= radius kelengkungan sudut penampang kolom. Tegangan pengekang pada bagian tengah sisi penampang adalah lebih kecil dan dapat diabaikan. Oleh karena tegangan pengekang pada kolom persegi tidak merata maka rasio pengaruh sudut ($k_c$) diperkenalkan oleh Pham dan Hadi (2014) untuk menentukan tegangan pengekang efektif.

$$f_{le}=f_lk_c \qquad (4)$$

$$k_c = \frac{\pi r}{b+h-r(4-\pi)} \qquad (5)$$

Pendekatan terbaru secara mekanis dilakukan oleh Minafo *et al.,* (2019) yang memberikan gambaran distribusi tegangan pada pembungkus FRP bagian luar dan tegangan pengekangan yang terjadi. Penelitian ini memberikan gambaran yang lebih jelas secara mekanika mengenai mekanisme kegagalan FRP, konsentrasi tegangan, pengelupasan FRP serta interaksi antara FRP dan perimeter beton yang dikekangnya. Kolom beton dimodelkan sebagai daerah kaku (*rigid zone*) dan *interface* antara *FRP* dan beton adalah daerah dengan ketebalan nol (Gambar 2). Lapisan FRP yang membungkus kolom dimodelkan sebagai *beam element* yang kontinyu, yang memiliki modulus elastisitas dari frp atau $E_f$ , ketebalan $t_f$ dan lebar $b_f$ .




**Gambar 2.** Model FRP yang mengekang kolom persegi dengan sudut yang memilki kelengkungan dimodelkan sebagai spring cirkumferensial dan radial (Minafo *et al.*, 2019)

Model *beam element* akan terhubung dengan permukaan kolom menggunakan pegas (*spring*) dalam arah tangensial dan radial, model pegas ini merepresentasikan kekakuan permukaan kolom beton yang direkatkan FRP berturut-turut kekakuan $k_t$ dan $k_n$

Untuk parameter kekakuan arah radial ($k_n$) dan circumferential ($k_t$) digunakan usulan persamaan yang dikembangkan oleh Minafo *et al.*, (2019) dimana

$$k_n = \frac{2E_c}{b_c.(1-2v_c)}.b_f \qquad (6)$$

$$k_t = 0.427\beta_p.\beta_L\sqrt{f_c'}\,b_f.\sqrt{\frac{E_f t_f}{f_c'^{\frac{1}{2}}}} \qquad (7)$$

dimana

$E_c$ = Modulus elastisisitas beton
$b_c$ = lebar sisi kolom
$b_f$ = lebar efektif balok ekuivalen
$E_f$ = modulus elastisitas frp
$t_f$ = tebal frp
$f_c$' = mutu beton
$\beta_p$ = koefisien yang tergantung dari lebar lekatan, diasumsikan =√(1/2)
$\beta_L$ = koefisien yang tergantung dari panjang pengangkuran, diambil =1

Pada penelitian ini akan dilakukan studi parametrik dengan literatur yang terkait serta pengujian eksperimental untuk memperlihatkan pengaruh radius kelengkungan pada kolom persegi yang diberi perkuatan FRP. Parameter yang mempengaruhi efektifitas pengekangan yang akan dianalisis adalah radius kelengkungan pada keempat sudut kolom persegi. Analisis dilakukan berdasarkan data -data penelitian yang telah dilakukan pada penelitian sebelumnya serta kajian eksperimental dari pengujian kolom persegi yang diperkuat dengan CFRP dengan beberapa radius kelengkungan pada sudut kolomnya.

## METODE

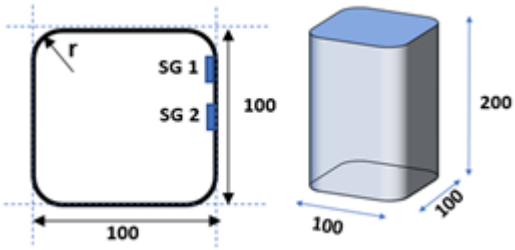
Penelitian didahului dengan melakukan studi literatur penelitian terkait distribusi tegangan pengekangan pada kolom yang diberikan perkuatan FRP dan secara khusus studi parametrik pengaruh radius kelengkungan pada kolom persegi. Kajian eksperimental juga dilakukan dalam penelitian ini untuk mendapatkan gambaran secara riil. Oleh karena pada kajian eksperimental digunakan FRP dengan 1 lapisan maka data-data hasil penelitian yang menggunakan spesimen dengan 1 lapisan FRP saja yang diambil sebagai studi parametrik. Berikut referensi yang digunakan data pengujiannya: (Shehata *et al.*, 2002; Lam & Teng, 2003b; Harajli *et al.*, 2006; Al-Salloum, 2007; Rousakis *et al.*, 2007; Wang & Wu, 2008; Tao et al., 2008; Pham & Hadi, 2014).

### Benda Uji dan Setup Pengujian

Untuk keperluan eksperimen dibuat 10 buah kolom beton bujursangkar dengan dimensi 100mm x 100mm x 200mm (Tabel 2). Material FRP yang digunakan memiliki tebal $t_f$ = 0.167 mm, kuat tarik ultimate sebesar $f_{fu}$ = 3850 MPa dan regangan sebesar $\varepsilon_{fu}$ = 0,0167 mm/mm. Mutu beton $f_{co}$ = 22.04 MPa

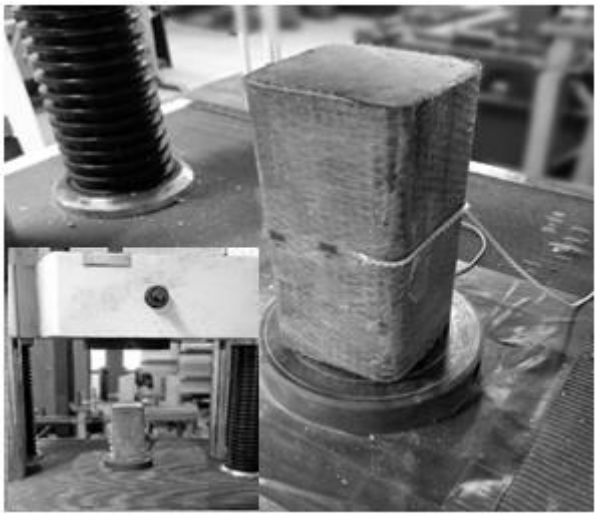
**Tabel 1.** Benda Uji

| *Spesimen* | *r (mm)* | *A (mm²)* | *$f_{co}$ (Mpa)* |
|---|---|---|---|
| **FR-0** | 0 | 10000.0 | |
| **FR-10** | 10 | 9914.0 | |
| **FR-15** | 15 | 9806.5 | 22.04 |
| **FR-30** | 30 | 9226.0 | |
| **FR-40** | 40 | 8624.0 | |




**Gambar 3.** Gambar benda uji dan penempatan strain gauge

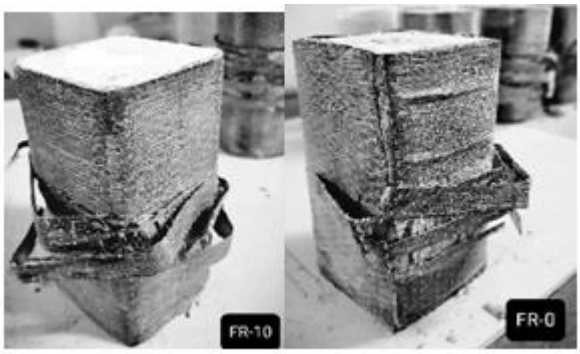
*Strain gauge* dipasang pada perimeter kolom seperti pada Gambar 3 dan Gambar 4 yang posisinya berada di tengah tinggi kolom. Untuk mencatat besarnya deformasi aksial yang terjadi digunakan alat yang ada pada UTM yang berfungsi menghitung penurunan yang terjadi. Pengujian kolom dilakukan dengan menggunakan mesin uji tekan UTM (*Universal Testing Machine*) berkapasitas 1000 kN seperti pada Gambar 4. Pembebanan secara konsentris monotonik dilakukan dengan kontrol perpindahan (*displacement control*) melalui pergerakan stroke sebesar 0,012 mm/detik. Pemeriksaan konsentrisitas beban dilakukan dengan memeriksa perpindahan yang tercatat pada *data logger* mesin pada saat pembebanan awal dilakukan. Pembebanan dilakukan hingga setengah kapasitas dari kolom dan terlihat perubahan yang signifikan pada grafik tegangan dan regangan yang terlihat pada monitor. Seluruh data-data pengujian yang didapat dari pemasangan *strain gauge*, deformasi benda uji dan gaya tekan alat dapat langsung dimonitor melalui komputer dan dicatat oleh *data logger* .



**Gambar 4.** Alat pengujian UTM

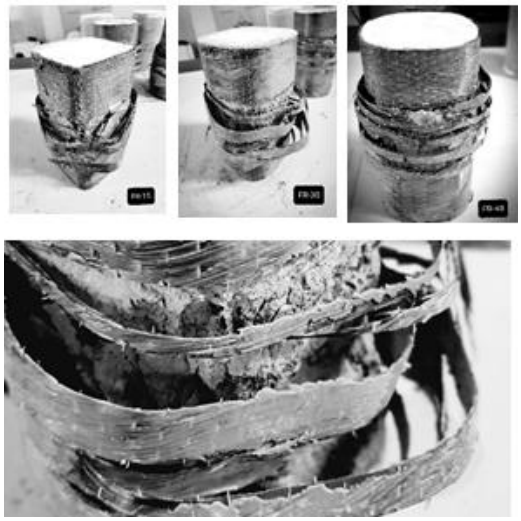
## HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengujian secara visual dapat dilihat pada Gambar 5 berikut. Pada benda uji tanpa radius kelengkungan di sudut kolom (sudut runcing) mengalami putusnya FRP pada daerah di dekat sudut.



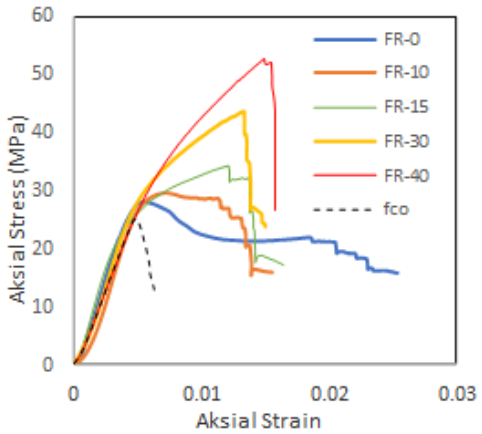

**Gambar 5.** Kegagalan pada (a) benda uji tanpa radius kelengkungan (FR-0); (b) benda uji dengan radius kelengkuangan 10mm (FR-10)

Hal ini terjadi akibat tegangan pengekangan yang tidak merata pada kolom persegi, konsentrasi tegangan cenderung terjadi pada daerah sekitar sudut kolom. Benda uji dengan radius kelengkungan 10mm (FR-10) juga terlihat mengalami kegagalan hancurnya FRP pada daerah sekitar sudut, hal ini dapat diamati dengan putusnya CFRP cenderung membentuk garis lurus. Sementara itu benda uji dengan radius kelengkungan sudut lebih dari 15 mm mengalami kegagalan dengan putusnya FRP dalam bentuk serat-serat yang tidak lurus dan tidak beraturan (Gambar 6).

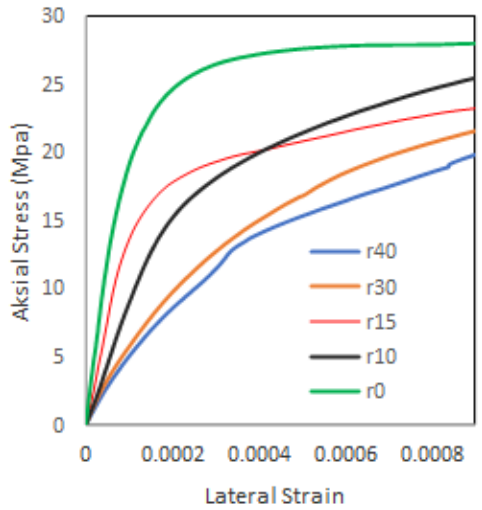


**Gambar 6.** Kegagalan pada benda uji dengan radius kelengkungan sudut lebih dari 15mm

Tegangan pengekangan yang semakin merata sejalan dengan meningkatnya radius kelengkungan sudut kolom membuat kegagalan yang terjadi tidak terkonsentrasi pada suatu lokasi. Grafik hubungan tegangan dan regangan aksial hasil pengujian dapat dilihat pada Gambar 7.




**Gambar 7.** Hubungan tegangan dan regangan aksial benda uji




**Gambar 8.** Hubungan tegangan dan regangan lateral benda uji

Hubungan tegangan dan regangan aksial yang dicatat dari hasil pengujian aksial tekan memperlihatkan pengaruh radius kelengkungan sudut kekangan FRP memberikan hasil yang cukup signifikan terhadap peningkatan kapasitas aksialnya. Perkuatan FRP dengan radius sudut yang semakin besar meningkatkan kapasitas aksialnya, namun perilaku kegagalan cenderung lebih getas dengan semakin tingginya kapasitas aksial yang dapat dicapai. Benda uji perkuatan FR-0 memiliki kapasitas aksial yang paling rendah namun terlihat kurva yang dihasilkan lebih daktail daripada benda uji lainnya, perkuatan FRP memberikan ketahanan terhadap deformasi aksial pada kapasitas tingginya sekalipun radius kelengkungan sudutnya kecil. Gambar 8 memperlihatkan hasil pencatatan *strain gauge* yang berada ditengah sisi kolom, pada eksperimen kali ini terjadi masalah dalam pencatatan *data logger* untuk *strain gauge* yang diletakkan pada daerah sudut, sehingga data regangan tidak didapatkan. Grafik pada gambar 8 memperlihatkan regangan aktual CFRP pada saat beban aksial bekerja. Pada regangan lateral yang sama tercatat tegangan aksial yang terjadi untuk kolom persegi tanpa radius kelengkungan (FR-0) telah mendekati nilai kapasitasnya, sementara pada benda uji dengan radius kelengkungan paling besar (FR-40) masih jauh dari kapasitas puncak tegangan aksialnya. Hal ini membuktikan bahwa radius kelengkungan yang semakin besar lebih efektif dalam mengekang inti beton karena meratanya tegangan pengekangan yang bekerja pada perimeter kolom.

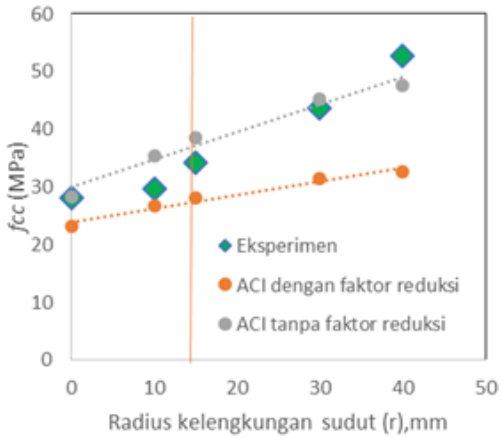
**Uraian hasil penelitian sesuai tujuan**

Pada Tabel 2 diperlihatkan kapasitas aksial beton terkekangnya ($f_{cc}$), regangan yang terjadi pada saat kapasitas aksial dicapai ($\varepsilon_{cc}$ ), rasio efek sudut ($k_c$), tegangan kekangan efektif ($f_{le}$), serta perbandingan antara kapasitas aksial beton terkekang dan beton tanpa kekangan FRP.

**Tabel 2.** Contoh format tabel 1 kolom

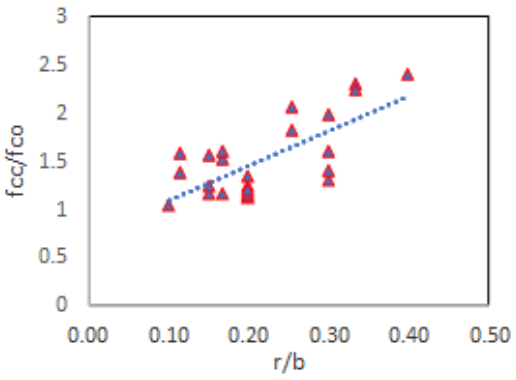
| Spesimen | r (mm) | r/b | $f_{co}$ (MPa) | $f_{cc}$ (MPa) | $\varepsilon_{cc}$ | $f_l$ (Mpa) | $k_c$ | $f_{le}$ (Mpa) | $f_{cc}/f_{co}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| FR-0 | 0 | - | 22.04 | 28.1 | 0.005562 | - | | | 1.17 |
| FR-10 | 10 | 0.1 | 22.04 | 29.6 | 0.007182 | 2737.0 | 0.16 | 449.02 | 1.23 |
| FR-15 | 15 | 0.15 | 22.04 | 34.3 | 0.012104 | 3128.0 | 0.25 | 787.43 | 1.43 |
| FR-30 | 30 | 0.3 | 22.04 | 43.7 | 0.013292 | 1694.3 | 0.54 | 916.22 | 1.82 |
| FR-40 | 40 | 0.4 | 22.04 | 52.8 | 0.014938 | 1368.5 | 0.76 | 1037.94 | 2.20 |

Secara umum pemberian radius kelengkungan pada sudut kolom persegi yang diberi perkuatan memberikan peningkatan yang cukup signifikan. Rasio efek sudut yang semakin membesar mendekati nilai 1 seperti pada kolom lingkaran memberikan pengaruh pada nilai tegangan pengekangan ($f_{le}$) yang semakin besar sekaligus memperlihatkan efektifitas pengekangan dari kolom yang mendekati bentuk lingkaran. Semakin besar radius kelengkungan kolom memberikan efektivitas yang semakin besar, selain terlihat dari nlai $k_c$ juga dapat dilihat regangan putusnya($\varepsilon_{cc}$), bisa mencapai nilai yang semakin besar seiring besarnya radius kelengkungan sudutnya.




**Gambar 9.** Perbandingan kapasitas dengan standar ACI

Untuk keperluan desain, ACI 440.2R-17 memberikan faktor reduksi seperti $C_E$ (reduksi faktor lingkungan), $\psi_f$ (reduksi kapasitas aksial) dan $\kappa_\varepsilon$ (reduksi regangan efektif). Gambar 9 memperlihatkan posisi hasil pengujian dibandingkan dengan batasan kapasitas nominal aksial desain (warna kuning) dengan batasan kondisi tanpa faktor reduksi (warna abu). Berdasarkan hasil eksperimen terlihat bahwa untuk radius kelengkungan sudut 15mm dan lebih kecil masih dalam batas reduksi yang diberikan namun kondisi ini tentu tidak diinginkan mengingat rendahnya faktor keamanan yang tersedia. Pemberian radius kelengkungan diatas 15mm memberikan pengaruh yang baik terhadap peningkatan faktor keamanan yang dapat diberikan oleh elemen kolom yang diperkuat. Penggunaan CFRP sebagai perkuatan memberikan dampak kegagalan yang getas pada elemen yang diperkuat, sehingga diperlukan faktor keamanan yang cukup tinggi untuk mengantisipasi kemungkinan kegagalan yang dapat terjadi.




**Gambar 10.** Hubungan antara peningkatan kekuatan dengan rasio radius sudut pada beberapa hasil eksperimen

Gambar 10 memperlihatkan korelasi antara rasio radius kelengkungan sudut dengan lebar kolom serta peningkatan kekuatan yang terjadi pada beberapa hasil

penelitian eksperimental. Data eksperimen diambil dari penelitian (Shehata *et al.*, 2002; Lam & Teng, 2003b; Harajli *et al.*, 2006; Al-Salloum, 2007; Rousakis *et al.*, 2007; Wang & Wu, 2008; Tao *et al.*, 2008; Pham & Hadi, 2014). Hasil eksperimen diambil khusus untuk benda uji bujur sangkar dengan material beton dengan mutu standar (bukan mutu tinggi) dengan 1 lapisan FRP. (Tabel 3)

Hasil eksperimen pada Gambar 9 memperlihatkan konsistensi efek dari radius kelengkungan sudut terhadap peningkatan kapasitas aksial yang dapat diberikan pada perkuatan FRP pada kolom persegi. Berdasarkan penelitian ini untuk kasus beton mutu sedang dengan 1 lapisan FRP dapat dilakukan pendekatan persamaan korelasi sbb:

$$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 3.6\left[\frac{r}{b}\right] + 0.7 \qquad (8)$$

Pendekataan ini hanya berlaku untuk kolom persegi dengan beton mutu 25 – 40 Mpa dengan 1 lapisan FRP sebagai perkuatan.

## SIMPULAN

Berdasarkan kajian literatur dan eksperimental yang telah dilakukan dalam penelitian ini didapatkan korelasi efektifitas pengekangan dengan radius kelengkungan sudut pada kolom persegi yang diberi perkuatan CFRP. Semakin besar rasio r/b semakin meningkatkan efektifitas kekangan yang terjadi.

Efektifitas kekakangan yang semakin tinggi ditunjukkan dari nilai tegangan pengekangan yang meningkat sejalan dengan kenaikan besarnya radius kelengkungan yang dibuat.

Penggunaan radius kelengkuangan yang kurang dari 15mm memberikan sedikit faktor keamanan karena hasil dari pengujian memperlihatkan kenaikan kapasitas aksialnya tidak dapat melampaui nilai yang seharusnya dapat dicapai.

## DAFTAR PUSTAKA

ACI Committee 440 (2017) ACI 440.2R-17: Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures, American Concrete Institute.

Al-Salloum, Y. A. (2007). Influence of edge sharpness on the strength of square concrete columns confined with FRP composite laminates. Compos. Part B Eng., 38(5), 640–650.

Calladine, C. R. (1983). Theory of shell structures, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Harajli, M. H., Hantouche, E., and Soudki, K. (2006). Stress-strain model for fiber-reinforced polymer jacketed concrete columns. ACI Struct. J.,103(5), 672–682.

Lam, L., and Teng, J. G. (2003b). Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete in rectangular columns. J. Reinf. Plast. Compos., 22(13), 1149–1186.

Minafo G et al.(2019: "A Mechanical Approach for Evaluating the Distribution of Confinement Pressure in FRP-Wrapped Rectangular Columns", Journal Engineering Mechanics ASCE, 145 (12), pp.04019092-1-9

Ozbakkaloglu, T., J. C. Lim, and T. Vincent. (2013). FRP-confined concrete in circular sections: Review and assessment of stress-strain models. Eng. Struct. 49 (Apr): 1068–1088.

Pham, T.M. dan Hadi N.S. (2014). Stress Prediction Model for FRP Confined Rectanguler Concrete Columns with Rounded Corner. Journal of Composites for Construction ASCE. 18(1): 04013019

Rousakis, T. C., Karabinis, A. I., and Kiousis, P. D. (2007). FRP-confined concrete members: Axial compression experiments and plasticitymodelling. Eng. Struct., 29(7), 1343–1353.

Shehata, I. A. E. M., Carneiro, L. A. V., and Shehata, L. C. D. (2002). Strength of short concrete columns confined with CFRP sheets. Mater. Struct., 35(1), 50–58.

SNI 1726-2019 (2019). Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung Dan Nongedung. Badan Standarisasi Nasional (BSN).

Tao, Z., Yu, Q., and Zhong, Y. Z. (2008). Compressive behaviour of CFRP-confined rectangular concrete columns. Mag. Concrete Res., 60(10), 735–745.

Wang, L. M., and Wu, Y. F. (2008). Effect of corner radius on the performance of CFRP-confined square concrete columns: Test. Eng. Struct., 30(2), 4