

Pengaruh *Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)* Pada Kolom Pendek Terkekang Penampang Bulat

Akbar Kalam Ramzy

Program Studi S1 Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya

akbarkalam11@gmail.com

Abstrak

Perilaku beton yang tidak diberi sengkang menunjukkan perilaku yang sangat berbeda dengan beton yang diberi sengkang dimana beton yang diberi kekangan dalam bentuk sengkang menunjukkan perilaku yang lebih duktail daripada beton yang tidak dikekang dengan sengkang. Saat ini para praktisi konstruksi dihadapkan dengan makin banyaknya struktur yang membutuhkan perkuatan, dengan bermacam alasan seperti: perubahan fungsi struktur bangunan yang membutuhkan kapasitas menahan beban yang lebih tinggi. Secara umum CFRP mempunyai fungsi meningkatkan kekuatan kompresi dari kolom, menutup kondisi kolom yang mengalami retak akibat pergerakan sengkang kearah luar sehingga memberi perkuatan tambahan atau menggantikan penulangan yang berkurang akibat kerusakan pada kolom. Variasi pemasangan CFRP masih menjadi sebuah pertanyaan, maka untuk itu diadakan penelitian tentang variasi pemasangan CFRP terhadap beban aksial. Pada penelitian ini akan melakukan kajian perbandingan antara kolom pendek terkekang penampang bulat tanpa tambahan CFRP di sekeliling penampang memanjang kolom dan kolom pendek terkekang penampang bulat dengan tambahan CFRP penuh dan sebagian (pola strip) di sekeliling penampang memanjang kolom. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa terdapat peningkatan pada benda uji dalam menerima kuat tekan aksial. Benda uji dengan pemasangan CFRP 3 strip (benda uji DCJC) mengalami peningkatan sebesar 12%, benda uji dengan pemasangan CFRP 4 strip (benda uji DCJB) mengalami peningkatan sebesar 22%, benda uji dengan pemasangan CFRP 5 strip (benda uji DCJA) mengalami peningkatan sebesar 30%, Benda uji dengan pemasangan CFRP penuh disekeliling kolom (benda uji DFC) mengalami peningkatan sebesar 81%.

Kata Kunci: CFRP, Kuat tekan, Kolom terkekang

Abstract

The unconfined concrete behavior performed significantly different behavior with the confined concrete where the confined concrete indicated much more ductile behavior than the unconfined concrete. In this time construction practitioners are faced with many structures that require reinforcement, with various reasons such as: changes in the function of building structures that require a higher capacity to withstand loads. In general, CFRP has the function of increasing the compression strength of a column, closes the condition of the column that is fractured due to the movement of the cross section towards the outside so that it gives additional reinforcement or replaces the reinforcement that is reduced due to damage to the column. The variation in installing CFRP is still a question, for this reason, a study was conducted on variations in the installation of CFRP on axial loads. In this study we will conduct a comparative study of short circular confined columns with no additional CFRP around the longitudinal cross section of the column and short circular confined columns with a partial (strip pattern) and full CFRP around the longitudinal cross section of the column. The results of this study indicate that there is an increase in the specimen in receiving axial compressive strength. Test objects with CFRP 3 strips (DCJC specimens) increased by 12%, test objects with CFRP 4 strips (DCJB specimens) increased by 22%, test objects with CFRP 5 strips (DCJA specimens) increased by 30%, the test object with full CFRP installation around the column (DFC specimen) increased by 81%.

KeyWords: CFRP, Compressive strength, Confined column

PENDAHULUAN

Kolom merupakan komponen struktur vertikal yang menerima dan menyalurkan gaya tekan aksial bersamaan atau tidak dengan gaya momen. Bahan penyusun struktur kolom adalah kombinasi dari campuran beton dan tulangan baja. Kolom pendek adalah kolom yang kemampuannya dipengaruhi oleh kekuatan material dan bentuk geometri dari potongan melintang kekuatan kolom pendek tidak dipengaruhi oleh panjang kolom karena defleksi lateral (lendutan ke samping) yang terjadi sangat kecil (tidak signifikan) karena alasan

tersebut pada kolom pendek tidak ada bahaya tekuk. Berbagai studi tentang kekuatan dan daktilitas kolom beton bertulang yang telah dilakukan oleh R. Park dan T. Paulay (1975) menunjukkan bahwa penampang yang diberi tulangan melintang, dalam bentuk sengkang ikat ataupun spiral akan meningkatkan kekuatan daktilitas betonnya. Perilaku beton yang tidak diberi sengkang menunjukkan perilaku yang sangat berbeda dengan beton yang diberi sengkang di mana beton yang diberi kekangan dalam bentuk sengkang menunjukkan perilaku yang lebih duktail daripada beton yang tidak dikekang dengan sengkang (Sabariman et al.,2018). Saat ini para

praktisi konstruksi dihadapkan dengan makin banyaknya struktur yang membutuhkan perkuatan, dengan bermacam alasan seperti : perubahan fungsi struktur bangunan yang membutuhkan kapasitas menahan beban yang lebih tinggi, adanya beban yang tidak diantisipasi pada perencanaan awal. Kesalahan dalam pelaksanaan (misal kesalahan pemasangan tulangan atau mutu beton yang tidak sesuai dengan perencanaan) banyak perkuatan yang dilakukan pada struktur yang sedang digunakan, sehingga gangguan pada saat pelaksanaan perkuatan harus minimal sekali dan dilaksanakan dalam waktu secepat mungkin, maka seringkali perkuatan yang dilakukan tidak direncanakan dengan baik dan juga tidak memperhatikan beberapa kaidah, prosedur dan kontrol pelaksanaan. Salah satu metode perkuatan struktur adalah dengan menggunakan Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP). CFRP merupakan bahan yang sangat baik dalam penggunaannya untuk kolom. Marolop T. Sianipar, (2009) menyimpulkan bahwa nilai kuat tekan beton yang terkekang oleh tulangan transversal dan terkekang CFRP semakin meningkatkan kapasitas gaya aksial maksimum kolom hingga 23,906%. Dalam penelitian yang dilakukan oleh Swamy dkk, 1979 (dalam Sudarmoko, 1990) menyimpulkan bahwa kehadiran serat (fiber) pada beton akan menaikkan kekakuan dan mengurangi lendutan (defleksi) yang terjadi. Hal tersebut juga dipertegas oleh penelitian yang menyatakan bahwa penambahan FRP akan lebih menambah daya tahan perkuatan beton bertulang (Chaallal dan Shahawy, 2000). Hasil pengujian menunjukkan bahwa penampang yang diberi tulangan transversal, dalam bentuk sengkang ataupun spiral, akan meningkatkan kekuatan dan daktilitas betonnya, meskipun tidak sebaik lilitan spiral, sengkang bisa dapat memberikan peningkatan kekuatan dan daktilitas beton. (Wahyudi dan Rahim 1999). Hasil penelitian yang dilakukan oleh (J.C Tarigan dan Sanci Borus, 2014) menunjukkan penambahan lapisan CFRP pada kolom beton penampang bulat yang menggunakan tulangan longitudinal dan tulangan transversal dapat meningkatkan kuat tekan kolom hingga 46,05 % dan meningkatkan kapasitas beban ultimate sebesar 72,26 %. Perbandingan jarak antar sengkang luar terhadap dimensi penampang inti daerah terkekang merupakan variabel yang berpengaruh terhadap tingkat kekuatan kolom, karena semakin rapat sengkang akan menambah efektivitas pengekanan. Semakin renggang jarak sengkang maka akan semakin banyak volume beton yang tidak terkekang dan kemungkinan terjadi runtuh. (Tavio, dkk, 2011). Secara umum CFRP mempunyai fungsi antara lain adalah: meningkatkan kekuatan kompresi dari kolom, menutup kondisi kolom yang mengalami retak akibat pergerakan sengkang ke arah luar sehingga memberi perkuatan tambahan atau menggantikan penulangan yang

berkurang akibat kerusakan pada kolom dengan harapan kolom tidak runtuh secara tiba – tiba. Namun demikian variasi pemasangan CFRP masih menjadi sebuah pertanyaan dalam dunia konstruksi, maka untuk itu diadakan penelitian tentang variasi pemasangan CFRP terhadap beban axial. Penelitian ini akan melakukan kajian perbandingan antara kolom pendek terkekang penampang bulat tanpa tambahan CFRP di sekeliling penampang memanjang kolom dan kolom pendek terkekang penampang bulat dengan tambahan CFRP penuh dan sebagian (pola strip) disekeliling penampang memanjang kolom. Dari permasalahan yang muncul pada latar belakang yang dibuat dapat dibuat rumusan masalah yaitu: Bagaimana pengaruh jarak Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) pada kolom pendek terkekang berpenampang bulat, terhadap beban axial maksimum. Berdasarkan rumusan masalah di atas, maka tujuan yang terjadi sebagai berikut:

1. Untuk mengetahui Nilai P_n maksimum yang dapat ditumpu kolom.
2. Mengetahui nilai kekuatan beton akibat kekangan CFRP (f'_{cc})
3. Untuk mengetahui nilai kekangan murni CFRP pada kolom pendek terkekang penampang bulat (f_i).
4. Membandingkan nilai prediksi dan eksperimen pada uji tekan kolom pendek penampang bulat.
5. Untuk mengetahui pengaruh pemasangan CFRP lapis penuh dan sebagian pada uji tekan benda uji kolom pendek terkekang penampang bulat di tinjau dari beban axial maksimum yang dapat di terima

KAJIAN PUSTAKA

Definisi Kolom

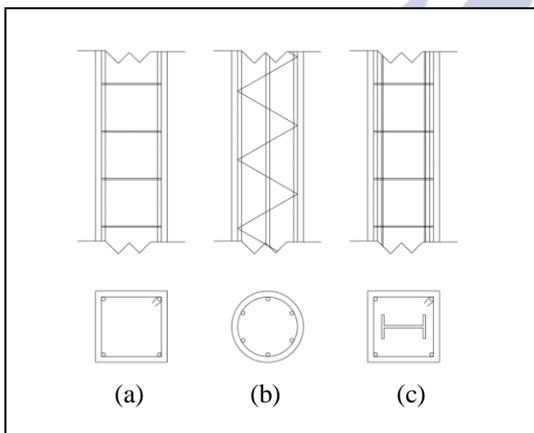
Menurut Ali Asroni (2010: 1), Kolom ialah suatu struktur yang mendukung beban aksial dengan/tanpa momen lentur. Bertugas meneruskan beban-beban yang berasal dari elevasi atas ke elevasi di bawahnya hingga sampai ke tanah melalui pondasi. Kolom mempunyai kuat lentur dan geser. Kuat lentur yang dipengaruhi oleh gaya momen. Kuat geser yang dipengaruhi oleh gaya aksial. Menurut SNI 2847-2013, Kolom adalah Komponen struktur dengan rasio tinggi terhadap dimensi lateral terkecil melampaui 3 yang digunakan terutama untuk menumpu beban tekan aksial. Untuk komponen struktur dengan perubahan dimensi lateral, dimensi

lateral terkecil adalah rata-rata dimensi atas dan bawah sisi yang lebih kecil. Kolom dapat digolongkan berdasarkan bentuk dan susunan tulangnya, yaitu (Edward G Nawy, 1990: 307):

1. Kolom Persegi (*rectangular*) dengan tulangan memanjang dan sengkang.
2. Kolom bulat (*circular*) dengan tulangan memanjang dan tulangan lateral berupa sengkang, dan spiral.
3. Kolom komposit yang terdiri dari beton dan profil baja struktural di dalamnya. Profil baja biasanya dilapisi secara utuh oleh baja tulangan.

Jenis Kolom

Secara garis besar ada tiga jenis kolom bertulang, seperti yang terlihat pada Gambar 1 berikut ini :



Gambar 1. Jenis Kolom berdasarkan jenis tulangan

1. Kolom menggunakan pengikat sengkang lateral. Kolom ini merupakan kolom beton yang ditulangi dengan batang tulangan pokok memanjang, yang pada jarak spasi tertentu diikat dengan pengikat sengkang ke arah lateral sedemikian rupa sehingga penulangan keseluruhan membentuk kerangka seperti tampak pada Gambar 1.a.
2. Kolom dengan menggunakan pengikat spiral. Bentuknya sama dengan yang pertama hanya saja sebagai pengikat tulangan pokok memanjang adalah tulangan spiral yang dililitkan keliling membentuk heliks menerus di sepanjang kolom seperti pada Gambar 1.b.
3. Struktur kolom komposit seperti tampak pada Gambar 1.c. Merupakan komponen struktur tekan yang diperkuat pada arah memanjang dengan gelagar baja profil atau pipa, dengan atau tanpa diberi batang tulangan pokok memanjang. Kolom pendek adalah kolom yang kemampuannya dipengaruhi oleh kekuatan material dan bentuk geometri dari potongan melintang dan tidak dipengaruhi oleh panjang kolom karena defleksi lateral (lendutan ke samping) yang terjadi sangat kecil (tidak

signifikan). Sehingga pada kolom pendek tidak ada bahaya tekuk.

Kolom pendek adalah kolom yang kemampuannya dipengaruhi oleh kekuatan material dan bentuk geometri dari potongan melintang dan tidak dipengaruhi oleh panjang kolom karena defleksi lateral (lendutan ke samping) yang terjadi sangat kecil (tidak signifikan). Sehingga pada kolom pendek tidak ada bahaya tekuk. Menurut peraturan beton bertulang Indonesia : SNI 03-2847-2013, masalah tekuk dapat diabaikan atau kolom direncanakan sebagai kolom pendek, jika :

$$\frac{klu}{r} \leq 22 \quad (1)$$

dimana :

k = faktor panjang efektif komponen struktur tekan

lu = panjang bentang komponen struktur lentur (balok/pelat) yang diukur dari pusat ke pusat titik kumpul.

r = jari-jari girasi penampang kolom

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} \approx 0,2887h \rightarrow \text{untuk penampang persegi}$$

Perilaku Kolom Pendek dengan Beban Sentris

Pembebanan sentris pada kolom menyebabkan tegangan tekan yang merata di seluruh bagian penampang. Ini berarti bahwa pada saat terjadi keruntuhan, tegangan dan regangannya akan merata di seluruh bagian penampang (Edward G.Nawy,1998). Dalam perhitungan analisis dan desain diperlukan reduksi terhadap eksentrisitas minimum sebagai safety factor untuk mengamankan kolom dari kegagalan yang diakibatkan oleh kesalahan pekerjaan dilapangan misalnya ketidak tepatan ukuran kolom. SNI 2847-2013 mensyaratkan suatu reduksi beban aksial sebesar 20% untuk kolom bersengkang dan 15% untuk kolom berspiral. Dengan menggunakan faktor-faktor ini, kapasitas beban aksial nominal pada kolom tidak boleh diambil lebih besar daripada persamaan berikut ini :

Untuk kolom bersengkang spiral

$$1. \phi P_n(\text{maks}) = \phi 0,85 \{0,85 \times f_c'(A_g - A_{st}) + F_y A_{st}\} \quad (2)$$

Untuk kolom bersengkang ikat

$$2. \phi P_n(\text{maks}) = \phi 0,80 \{0,85 \times f_c'(A_g - A_{st}) + F_y A_{st}\} \quad (3)$$

dimana:

$P_n(\text{maks})$: kekuatan maksimum aksial nominal

ϕ : faktor reduksi

jika berpengikat spiral 0,75

jika berpengikat sengkang 0,65

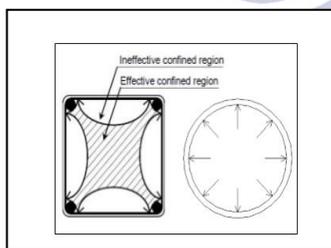
f_c' : kuat tekan beton

A_g : Luas bruto penampang kolom (mm²)

Ast : Luas batang tulangan (mm²)
 Fy : Kuat leleh tulangan yang diisyaratkan

Dampak Pengekangan

Efek dari pengekangan adalah untuk meningkatkan kekuatan dan tegangan ultimit pada kolom sehingga kolom dapat menerima gaya aksial yang lebih besar. Pada umumnya, pengekangan dapat menggunakan sengkang biasa ataupun tulangan berbentuk spiral. Pengekangan kolom dengan tulangan berbentuk spiral sangat rapat (kolom spiral) memiliki perilaku yang lebih daktil dari pada pengekangan kolom dengan sengkang biasa ataupun pengekangan kolom dengan spiral kurang rapat (Winter dan Nilson, 1993). Kolom spiral akan dapat bertahan lebih daktil sebelum mengalami keruntuhan dibandingkan dengan kolom yang diberi pengekangan dengan sengkang biasa ataupun dengan spiral kurang rapat (kurang daktil). Meskipun demikian, pengekangan dengan sengkang biasa menghasilkan kenaikan signifikan dalam daktilitas. Hal ini menunjukkan bahwa adanya perbedaan daktilitas bisa sangat mempengaruhi kekuatan kolom. Retak yang timbul pada kolom akibat lelehnya tulangan akan mengakibatkan beton mengalami sedikit tarik (Park dan Paulay, 1975), sehingga suatu saat beton tidak mampu lagi bertahan dan terjadilah keruntuhan. Hal ini menunjukkan bahwa perlu adanya evaluasi terhadap daktilitas kurvatur kolom dengan memperhitungkan kontribusi pengekangan. Distribusi tegangan kekangan yang timbul pada kolom yang diberi sengkang persegi dan sengkang spiral dapat dimodelkan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2



Gambar 2. Efektifitas pengekangan sengkang persegi dan sengkang spiral

Syarat Pengekangan

Menurut SNI 2847-2013 Pasal 10.9.3, rasio volume tulangan spiral, ρ_s , tidak boleh kurang dari nilai

$$\rho_s = 0,45 \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \frac{f'_c}{f_{yt}} \quad (4)$$

$$\rho_s = 0,12 \left(\frac{f'_c}{f_{yt}} \right) \quad (5)$$

dimana:

- ρ_s = rasio volume tulangan spiral terhadap volume total inti yang terkekang
- A_g = Luas bruto penampang beton (mm²)
- A_{ch} = Luas penampang komponen struktur yang diukur sampai tepi luar tulangan transversal
- f'_c = kuat tekan beton (MPa)
- f_{yt} = kuat leleh tulangan transversal (MPa)

Nilai kekangan pada penelitian ini memakai teori Kent & Park Modified (Scott, 1982), nilai kekangan tersebut terekpresi dalam nilai kekangan Z_m . Semakin kecil nilai Z_m maka semakin baik kekangan yang diberikan pada beton (Sabariman, 2018). Nilai Z_m tersebut sebagai berikut :

$$Z_m = \frac{0,625}{\left[\frac{3 + 0,29 \cdot f'_c}{145 \cdot f'_c - 1000} \right] + \frac{3}{4} \cdot \rho_s \cdot \sqrt{\frac{b''}{s_h}} - 0,002 \cdot K} \quad (6)$$

$$K = 1,25 \left(1 + \frac{\rho_s \cdot f_{yh}}{f'_c} \right) \quad (7)$$

dimana :

- Z_m = Nilai kekangan beton (Kent & Park modified)
- K = Faktor pengali
- ρ_s = Rasio volumetrik tulangan sengkang yang diukur dari sisi luar ke sisi luar sengkang
- s_h = Spasi dari gasis tengah/pusat ke garis tengah/pusat sengkang (mm), F_{yh} kuat leleh tulangan sengkang (MPa)
- b'' = Dimensi penampang inti beton terkekang yang diukur dari sisi luar ke sisi luar sengkang (mm)

Definisi CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer)

Carbon Fiber didefinisikan sebagai serat yang mengandung setidaknya 90% berat karbon. Umumnya digunakan graphite fiber yang merupakan serat dengan karbon 95% beratnya. Komposit carbon fiber cocok untuk aplikasi struktur yang harus memenuhi persyaratan kekuatan, kekakuan, ringan, dan ketahanan terhadap fatigue. Teknik perkuatan seperti ini dapat dibuat efisien, tidak menyebabkan karat seperti pelat baja eksternal. Fungsi perkuatan dengan sistem komposit CFRP adalah untuk meningkatkan kekuatan atau memberikan peningkatan kapasitas lentur, geser, aksial, dan daktilitas, atau berbagai kombinasi diantaranya. Daya tahan CFRP yang tinggi lebih ekonomis digunakan pada lingkungan

korosif dimana baja akan mudah berkarat. Penggunaan CFRP lebih populer mengingat banyaknya keuntungan yang dapat diperoleh seperti bobot unit yang kecil, mudah diaplikasikan dan ditangani, biaya instalasi, dan pemeliharaan yang rendah. Tetapi, kerugiannya yaitu harga material yang relatif mahal. (Meier, 1997).

Penggunaan pada kolom, lembaran CFRP seperti lembaran kain/stagen yang digulung melingkar dan ditempatkan pada bagian luar kolom untuk meningkatkan kuat lentur, daktilitas, dan kekuatan lainnya. (Maiman, 2013).

Menurut *product data sheet* PT. Sika Indonesia 2017, kegunaan CFRP yaitu:

1. Meningkatkan ketahanan terhadap gempa bagi dinding bata.
2. Menggantikan tulangan yang kehilangan kekuatannya.
3. Meningkatkan kuat tekan dan kekakuan dari kolom beton.
4. Meningkatkan kapasitas beban dari elemen struktur.
5. Untuk perubahan fungsi gedung.
6. Untuk kesalahan perencanaan struktur dari konstruksi.
7. Untuk pergerakan akibat gaya gempa.
8. Meningkatkan waktu layan struktur.
9. Meningkatkan struktur beton untuk menyesuaikan dengan standar terbaru.

Model Perhitungan

Perhitungan kekangan beton merupakan penjumlahan dari kekangan eksternal beton dan kekangan internal beton. Hal ini menggunakan dua model perhitungan berdasarkan ACI.2R-2017, dan Lam and Teng (2003):

1. Berdasarkan ACI 2R.2017

Desain untuk meningkatkan kuat tekan dengan persamaan 8.

$$\phi P_n = \phi 0,85 \{0,85 x f'_{cc} (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}\} \quad (8)$$

A_g adalah luas bruto penampang beton dan A_{st} merupakan luas total tulangan longitudinal non prategang. ϕP_n adalah kuat aksial nominal penampang kolom. Kuat leleh tulangan yang disyaratkan (f_y). Nilai kekuatan kekangan beton dapat dihitung dengan persamaan (9)

$$f'_{cc} = f'_c + [\phi_f \cdot 3,3 k_a \cdot f_l] \quad (9)$$

dimana K_a adalah faktor efisiensi dan f'_c merupakan mutu beton tanpa terkekang. f_l merupakan tekanan ateral terkekang yang dapat dihitung dari persamaan 10

$$f_l = \frac{2 \cdot E_f \cdot n_f \cdot t_f \cdot \epsilon_{fe}}{D} \quad (10)$$

ϕ_f adalah faktor reduksi dari ACI 440.2R-2017 yang memiliki nilai 0,95. ϵ_{fe} merupakan regangan efektif yang bernilai 0,004. E_f merupakan modulus elastis CFRP. t_f merupakan ketebalan CFRP yang digunakan, nilai $K_a=1$ jika benda uji silinder

Persyaratan rasio volume pada CFRP dapat dihitung dengan persamaan 11.

$$\rho_f = \frac{4 \cdot n_f \cdot t_f}{D} \cdot \frac{W_f}{S_f} \quad (11)$$

W_f merupakan lebar strip CFRP. S_f merupakan jarak strip CFRP. $\frac{W_f}{S_f} = 1$ pada saat CFRP dipasang

penuh atau menerus. Jarak strip dapat dihitung dengan persamaan 12

$$S_f \leq \left(3 - 6 \left(\frac{f_u}{f_y} - 1\right)\right) \cdot d_{bl} \leq 6 \cdot d_{bl} \quad (12)$$

$$S_f \leq 150 \text{ mm} \quad (13)$$

f_u merupakan tegangan putus tulangan longitudinal, dan d_{bl} merupakan diameter tulangan longitudinal

2. Berdasarkan Lam and Teng (2003)

Desain untuk meningkatkan kuat tekan dengan persamaan 14

$$\phi P_n = \phi 0,85 \{0,85 x f'_{cc} (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}\} \quad (14)$$

A_g adalah luas bruto penampang beton dan A_{st} merupakan luas total tulangan longitudinal non prategang. ϕP_n adalah kuat aksial nominal penampang kolom. Kuat leleh tulangan yang disyaratkan (f_y). Nilai kekuatan kekangan beton dapat dihitung dengan persamaan 15

$$f'_{cc} = f'_c \left(1 + 3,3 \cdot \frac{f_{l,a}}{f'_c}\right) \quad (15)$$

$f_{l,a}$ merupakan nilai kekangan pada CFRP dapat dihitung dengan persamaan 16

$$f_{l,a} = \frac{\rho_f \cdot E_f \cdot \epsilon_{fe}}{2} \quad (16)$$

ϵ_{fe} merupakan regangan efektif yang bernilai 0,004. E_f merupakan modulus elastis CFRP. Rasio volumetrik dapat dihitung dari persamaan 17

$$\rho_f = 4 \frac{n_f \cdot W_f \cdot n_f \cdot t_f}{D \cdot l_u} \quad (17)$$

METODE

Tempat penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian metode eksperimen dengan membuat benda uji berupa kolom pendek berpenampang persegi dan benda uji mutu beton silinder. Pembuatan benda uji mulai dari persiapan bekisting, pengetesan mutu baja dilakukan di Laboratorium Universitas Brawijaya, memasang tulangan transversal, pengecoran benda uji, dan perawatan benda uji dilakukan di concrete batching plant PT. Varia Usaha Beton yang berlokasi di Karang Pilang-Surabaya, pemasangan CFRP dan pengujian terhadap kuat tekan kolom pendek dilakukan di Laboratorium Beton Universitas Negeri Surabaya.

Parameter penelitian

Parameter penelitian berisi rincian mix design beton, rincian benda uji silinder beton, rincian benda uji, perhitungan syarat tulangan transversal, gambar detail benda uji, dan gambar detail penulangan.

Tabel 1. Rincian Benda Uji

benda uji	bw (mm)	h (mm)	Senggang Spiral		Jarak CFRP (mm)	Jumlah
			diameter (mm)	S_h (mm)		
TC	150	300	6	36	-	3
DCJC	150	300	6	36	135	3
DCJB	150	300	6	36	90	3
DCJA	150	300	6	36	67.5	3
DFC	150	300	6	36	lapis penuh	3

Tabel 2. Perhitungan Syarat Tulangan Transversal

benda uji	bw (mm)	h (mm)	Senggang Spiral		Tebal CFRP	JARAK CFRP (mm)	f'_c (Mpa)	F_{yh} (Mpa)	ρ_s sengkang Syarat 1	ρ_s sengkang Syarat 2	ρ_s sengkang Terpasang	Z_m
			diameter (mm)	S_h (mm)								
DCJA1	150	300	6	36	0.129	67.5	22.5	529.5	0.00509915	0.006336222	0.024154	18.00456
DCJA2	150	300	6	36	0.129	67.5	22.5	529.5	0.00509915	0.006336222	0.024154	18.00456
DCJA3	150	300	6	36	0.129	67.5	22.5	529.5	0.00509915	0.006336222	0.024154	18.00456
DCJB1	150	300	6	36	0.129	90	22.5	529.5	0.00509915	0.006336222	0.024154	18.00456
DCJB2	150	300	6	36	0.129	90	22.5	529.5	0.00509915	0.006336222	0.024154	18.00456
DCJB3	150	300	6	36	0.129	90	22.5	529.5	0.00509915	0.006336222	0.024154	18.00456
DCJC1	150	300	6	36	0.129	135	22.5	529.5	0.00509915	0.006336222	0.024154	18.00456
DCJC2	150	300	6	36	0.129	135	22.5	529.5	0.00509915	0.006336222	0.024154	18.00456
DCJC3	150	300	6	36	0.129	135	22.5	529.5	0.00509915	0.006336222	0.024154	18.00456
DFC1	150	300	6	36	0.129	lapis penuh	22.5	529.5	0.00509915	0.006336222	0.024154	18.00456
DFC2	150	300	6	36	0.129	lapis penuh	22.5	529.5	0.00509915	0.006336222	0.024154	18.00456
DFC3	150	300	6	36	0.129	lapis penuh	22.5	529.5	0.00509915	0.006336222	0.024154	18.00456
TC1	150	300	6	36	-	-	22.5	529.5	0.00509915	0.006336222	0.024154	18.00456
TC2	150	300	6	36	-	-	22.5	529.5	0.00509915	0.006336222	0.024154	18.00456
TC3	150	300	6	36	-	-	22.5	529.5	0.00509915	0.006336222	0.024154	18.00456

Tabel 3. Mix desain mutu f'_c 22,5 MPa

Material	Volume kg/m^3
Semen	305
Air	170
Pasir	790
Agregat (5-10mm)	321
Agregat (10-20mm)	825
Retarder	0.92
Superplasticizer	1.22

Prediksi (Desain) Nilai Kuat Tekan Nominal Pada Kolom pendek

Perhitungan prediksi bertujuan untuk mengetahui P_n (gaya aksial nominal) prediksi sebelum melakukan pengelasan dengan menggunakan rumus Lam and Teng (2003), dan ACI 440.2R-2017 sebagai berikut:

1. Menurut ACI 440.2R-2017

Tabel 4. Hasil Prediksi Menurut 440.2R-2017

benda uji	ρ_f	$f_{l,a}$ (MPa)	f'_{cc} (MPa)	P_n (ton)	P_n (N)
TC	TIDAK MENGGUNAKAN CFRP				
DCJC	0.00076	tidak dapat di hitung menggunakan persamaan yang ada di ACI-440-2R-17			
DCJB	0.00115				
DCJA	0.00153				
FC	0.00344	1.58	27.45	35.03	350293.7

(sumber:hasil penelitian)

2. Menurut Lam and Teng (2003)

Tabel 5. hasil Prediksi Menurut Lam dan Teng (2003)

benda uji	ρ_f	$f_{l,a}$ (MPa)	f'_{cc} (MPa)	P_n (ton)	P_n (N)
TC	TIDAK MENGGUNAKAN CFRP				
DCJC	0.001032	0.4747	24.0666	30.71177	307117.7
DCJB	0.001376	0.633	24.5889	31.37828	313782.8
DCJA	0.001720	0.7912	25.111	32.04454	320445.4

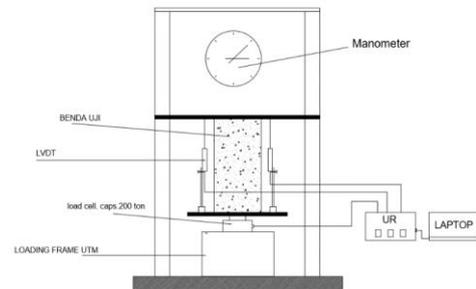
(sumber:hasil penelitian)

Pengujian

1. Melakukan penelitian tentang bahan terutama agregat halus dan kasar untuk beton mutu normal sesuai syarat ACI dan ASTM.
2. Membuat rencana *mix design* beton mutu normal.
3. Melakukan uji mutu baja yang akan digunakan sebagai tulangan transversal sebagai pengekang kolom pendek penampang bulat dengan .
4. Membuat benda uji kolom pendek penampang bulat dengan ϕ 150 mm dan tinggi 300 mm
5. Melakukan pembongkaran bekisting kolom pendek penampang bulat setelah proses pengecoran yang telah berumur 24 jam.
6. Melakukan perawatan benda uji kolom pendek penampang bulat dengan cara merendam benda uji selama 28 hari.
7. Setelah 28 hari, benda uji diangkat dan dibiarkan sampai mencapai kering udara.
8. Menempelkan CFRP Sika *Wrap* pada benda uji. dengan masa perawatan satu hari (menunggu perekat CFRP mengering) benda uji dari perawatan.
9. Melakukan uji kuat tekan benda uji kolom pendek penampang Bulat sampai mencapai runtuh memakai

universal testing machine (UTM) kapasitas 1000 kN yang digabung dengan alat *Load cell, LVDT (Linear Variable Variable Differential Transformer)* dan *universal recorder (UR)*.

Set Up Pengujian



Gambar 3. Set up pengujian

Teknik Analisis Data

Analisis data dilakukan dengan cara sebagai berikut.

1. Melakukan uji kuat tekan benda uji silinder beton untuk mendapatkan nilai f'_c .
2. Melakukan uji kuat Tarik besi untuk mendapatkan nilai F_y baja.
3. Melakukan perhitungan prediksi kekuatan yang dapat ditumpu kolom pendek terkekang penampang bulat dengan tambahan CFRP.menggunakan persamaan yang berasal dari ACI-440-2R-17 dan persamaan Lam dan Teng .
4. Melakukan uji kuat tekan benda uji kolom pendek penampang bulat dengan memberikan beban konsentris sampai mencapai runtuh.
5. Melakukan pengamatan besarnya nilai P_{max} dari pengujian tes kuat tekan benda uji kolom pendek penampang bulat.
6. Membandingkan besar nilai P_{max} pada benda uji kolom pendek penampang bulat dengan 5 variasi jarak CFRP.
7. Menganalisa nilai kekangan CFRP dari hasil eksperimen
8. membandingkan nilai prediksi dan nilai eksperimen
9. Melakukan pembahasan mengenai pengaruh variasi jarak CFRP terhadap kuat beban konsentris.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Uji tarik tulangan.

Pengujian tegangan leleh baja bertujuan untuk mengetahui mutu baja yang telah di gunakan.dari hasil tes uji tarik yang di lakukan di Lab Bahan Universitas Brawijaya di kota Malang didapat Tegangan Leleh Baja(

f_y) sebesar 529.5 MPa. Menurut SNI 2847:2013 tentang persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung, pasal 10.9.2 f_y yang digunakan tidak boleh melebihi 700 MPa. Hasil uji tarik baja didapat regangan dalam 200 mm sebesar 88 mm (44,5 %) dan kuat tarik sebesar 529,5 MPa. Dari hasil tes di atas baja tulangan beton yang digunakan dalam pembuatan sengkang lebih kecil dari 700 MPa. Sehingga baja tulangan telah memenuhi standar nasional Indonesia.

Uji Tekan benda uji

Hasil pengujian mutu beton didasarkan uji tekan pada silinder tanpa CFRP yang telah berumur 28 hari didapat $f'_c = 22,09$ MPa, nilai ini sedikit di bawah f'_c target sebesar $f'_c = 22,5$ MPa, tetapi nilai ini tidak melampaui batas perbedaan antara f'_c real terhadap f'_c target sebesar $\pm 3,5$ MPa yang dijelaskan pada SNI 2847-2013

Tabel 6. Hasil Uji Mutu beton (f'_c)

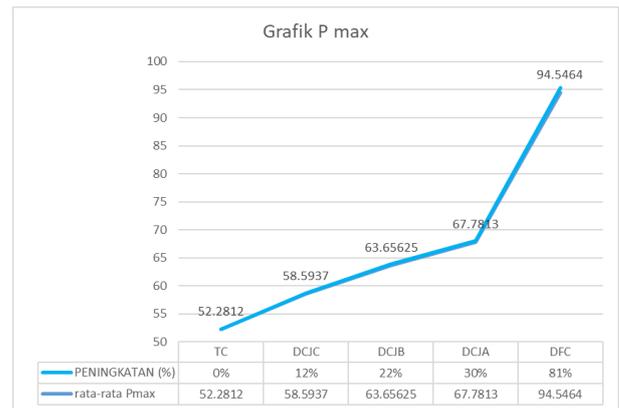
nama	P		Tegangan
	Kg	N	MPa
KMD ₂	43660	436600	24.7190
KMD ₃	34375	343750	19.4621
RERATA	39017,5	390175	22.0905

(sumber: hasil pengujian)

Hasil eksperimen kuat tekan aksial konsentris menghasilkan nilai P_0 yang dilakukan di laboratorium. Kemudian nilai P_0 yang didapat akan dibandingkan nilai P_0 dengan benda uji kontrol, dimana benda uji kontrol tersebut adalah benda uji tanpa tulangan transversal dan tanpa CFRP. Ketiga benda uji dengan tiga variasi jarak CFRP dengan tulangan transversal akan dihitung nilai peningkatan yang terjadi pada saat pengujian tes tekan. Besar peningkatan kekuatan nilai P_0 akibat pengaplikasian variasi jarak CFRP dan penggunaan tulangan transversal tersebut akan ditabelkan pada Tabel 7 dan grafik pada Gambar 4 di bawah ini.

Tabel 6. Hasil Pengujian Tekan

Nama	rata-rata Pmax (Ton)	Rata-rata Tegangan (MPa)	Peningkatan
TC	52.2812	29.2302	0 %
DCJC	58.5937	32.3546	12 %
DCJB	63.65625	35.0460	22 %
DCJA	67.7813	38.1266	30 %
DFC	94.5464	51.7061	81 %



Gambar 4. Grafik Hasil Pengujian benda uji

Pengaruh variasi jarak CFRP

pengaruh variasi jarak CFRP pada kolom pendek penampang persegi dengan tulangan transversal terhadap kemampuan menahan beban aksial sebagai berikut:

1. Berdasarkan hasil eksperimen beban aksial
 - a. Benda uji TC rata-rata P_{max} yang dapat ditumpu sebesar 52.28 ton.
 - b. Benda uji DCJC rata-rata P_{max} yang dapat ditumpu sebesar 58.59 ton, jika dibandingkan dengan benda uji TC maka benda uji DCJC mengalami peningkatan sebesar 12%.
 - c. Benda uji DCJB rata-rata P_{max} yang dapat ditumpu sebesar 63.65 ton, jika dibandingkan dengan benda uji TC maka benda uji DCJB mengalami peningkatan sebesar 22%.
 - d. Benda uji DCJA rata-rata P_{max} yang dapat ditumpu sebesar 67.78 ton, jika dibandingkan dengan benda uji TC maka benda uji DCJA mengalami peningkatan sebesar 30%.
 - e. Benda uji DFC rata-rata P_{max} yang dapat ditumpu sebesar 94.54 ton, jika dibandingkan dengan benda uji TC maka benda uji DFC mengalami peningkatan sebesar 81%.

Peningkatan nilai prediksi-eksperimen

Pada pembahasan ini akan dilakukan perbandingan nilai prediksi dan eksperimen menurut ACI 440-2R-2017 dan persamaan Lam dan Teng (2003)

1. Peningkatan Nilai Prediksi – Eksperimen P_n
 - a. Menurut ACI-440-2R-2017

Tabel 7. peningkatan nilai prediksi-eksperimen P_n Menurut ACI-440-2R-2017

nama	Nilai P_n (Ton)		Peningkatan antara prediksi dan eksperimen	
	ACI-440-2R-2017		(ton)	(%)
	Prediksi	Eksperimen		
TC	28.71	52.2812	23.5712	82.10%
DCJC	tidak bisa di hitung	58.5937	-	-
DCJB		63.6562	-	-
DCJA		67.7813	-	-
DFC	35.03	94.5464	59.5164	169.90%

b. Menurut Lam dan Teng (2003)

Tabel 8. peningkatan nilai prediksi-eksperimen P_n
Menurut ACI-440-2R-2017

nama	Nilai P_n (Ton)		Peningkatan antara prediksi dan eksperimen	
	Lam dan Teng (2003)		(ton)	(%)
	Prediksi	Eksperimen		
TC	tidak dapat di hitung		-	-
DCJC	30.71177	58.5937	27.88193	90.79%
DCJB	31.37828	63.6562	32.27792	102.87%
DCJA	32.04454	67.7813	35.73676	111.52%
FC	35.37648	94.5464	59.16992	167.26%

b. Menurut Lam dan Teng (2003)

Tabel 12. peningkatan nilai prediksi-eksperimen f'_l
Menurut Lam dan Teng (2003)

nama	Nilai f'_l (MPa)		Peningkatan antara prediksi dan eksperimen	
	Lam dan Teng (2003)		(MPa)	(%)
	Prediksi	Eksperimen		
TC	-	-	-	-
DCJC	0.4747	3.12	2.6453	557.26%
DCJB	0.633	3.93	3.297	520.85%
DCJA	0.7912	4.87	4.0788	515.52%
DFC	1.5824	8.996	7.4136	468.50%

2. Peningkatan Nilai Prediksi – Eksperimen f'_{cc}

a. Menurut ACI-440-2R-2017

Tabel 9. peningkatan nilai prediksi-eksperimen f'_{cc}
Menurut ACI-440-2R-2017

nama	Nilai f'_{cc} (MPa)		Peningkatan antara prediksi dan eksperimen	
	ACI-440-2R-2017		(MPa)	(%)
	Prediksi	Eksperimen		
TC	-	-	-	-
DCJC	tidak bisa di hitung	32.3903	-	-
DCJB		35.0443	-	-
DCJA		38.1719	-	-
DFC		51.7774	24.3274	88.62%

b. Menurut Lam dan Teng (2003)

Tabel 10. peningkatan nilai prediksi-eksperimen f'_{cc}
Menurut Lam dan Teng (2003)

nama	Nilai f'_{cc} (MPa)		Peningkatan antara prediksi dan eksperimen	
	Lam dan Teng (2003)		(MPa)	(%)
	Prediksi	Eksperimen		
TC	0	0	-	-
DCJC	24.0666	32.3903	8.3237	34.59%
DCJB	24.5889	35.0443	10.4554	42.52%
DCJA	25.111	38.1719	13.0609	52.01%
DFC	27.722	51.7774	24.0554	86.77%

3. Peningkatan Nilai Prediksi – Eksperimen f'_l

a. Menurut ACI-440-2R-2017

Tabel 11. peningkatan nilai prediksi-eksperimen f'_l
Menurut ACI-440-2R-2017

nama	Nilai f'_l (MPa)		Peningkatan antara prediksi dan eksperimen	
	ACI-440-2R-2017		(MPa)	(%)
	Prediksi	Eksperimen		
TC	-		-	-
DCJC	-		-	-
DCJB	-		-	-
DCJA	-		-	-
DFC	1.58	9.4697	7.8897	499.35%

4. Peningkatan Nilai Prediksi – Eksperimen ρ_f

a. Menurut ACI-440-2R-2017

Tabel 13. peningkatan nilai prediksi-eksperimen ρ_f
Menurut ACI-440-2R-2017

nama	Nilai ρ_f		Peningkatan antara prediksi dan eksperimen	
	ACI-440-2R-2017		(MPa)	(%)
	Prediksi	Eksperimen		
TC	-	-	-	-
DCJC	0.00076	-	-	-
DCJB	0.00115	-	-	-
DCJA	0.00153	-	-	-
DFC	0.00344	-	-	-

b. Menurut Lam dan Teng (2003)

Tabel 13. peningkatan nilai prediksi-eksperimen ρ_f
Menurut Lam dan Teng (2003)

nama	Nilai ρ_f		Peningkatan antara prediksi dan eksperimen	
	Lam dan Teng (2003)		(MPa)	(%)
	Prediksi	Eksperimen		
TC	-	-	-	-
DCJC	0.001032	0.006783	0.005751	557.27%
DCJB	0.001376	0.008544	0.007168	520.93%
DCJA	0.001720	0.010587	0.008867	515.52%
DFC	0.003440	0.019557	0.016117	468.52%

Adanya nilai selisih Antara nilai prediksi dan eksperimen di sebabkan oleh adanya faktor reduksi pada persamaan ACI maupun Lam dan Teng. fungsi faktor reduksi ini adalah sebagai faktor keamanan saat perencanaan ,faktor keamanan ini memberikan reduksi nilai kekuatan yang signifikan terhadap beban rencana sehingga nilai prediksi lebih kecil dari pada nilai eksperimen.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan pada penelitian ini, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil Kuat tekan (P_n) dan tegangan (σ) maksimum yang dapat di terima kolom pendek adalah 94,5464 ton dan 51.7061 MPa pada kondisi kolom pendek dilapisi penuh dengan CFRP (benda uji DFC)
2. Nilai kekangan CFRP (f_i) maksimum yang dapat di terima kolom pendek terkekang penampang bulat dengan tambahan CFRP adalah 9.4697 MPa pada kondisi kolom pendek dilapisi penuh dengan CFRP (benda uji DFC)
3. Nilai kekuatan Beton akibat kekangan CFRP (f'_{cc}) maksimum yang dapat di terima kolom pendek terkekang penampang bulat dengan tambahan CFRP adalah 51.775 MPa pada kondisi kolom pendek dilapisi penuh dengan CFRP (benda uji FC)

Dari pembahasan yang ada diatas didapat hasil yaitu rasio volumetrik CFRP (ρ_f) berbanding lurus dengan Nilai kekangan CFRP (f_i), semakin tinggi rasio volumetrik CFRP (ρ_f) maka nilai kekangan CFRP (f_i) akan semakin tinggi, nilai kekangan CFRP (f_i) berbanding lurus dengan nilai kekuatan Beton akibat kekangan CFRP (f'_{cc}), semakin tinggi nilai kekangan CFRP (f_i) maka semakin tinggi kekuatan beton akibat kekangan CFRP (f'_{cc}), nilai kekuatan Beton akibat kekangan CFRP (f'_{cc}) berbanding lurus dengan nilai P_n maka semakin tinggi nilai (f'_{cc}). semakin tinggi nilai P_n . Kuat tekan kolom pendek terkekang penuh di pengaruhi oleh kekangan eksternal yang berasal dari CFRP semakin luas area permukaan yang dilapisi oleh CFRP maka semakin tinggi kekuatan dan tegangan kolom pendek. Adanya selisih antara nilai prediksi dan eksperimen di sebabkan oleh adanya faktor keamanan pada persamaan ACI-440-2R-17 maupun persamaan Lam dan Teng. Selisih antara prediksi dan eksperimen wajar mengingat saat pelaksanaan untuk mencegah kegagalan yang terjadi saat perencanaan di butuhkan faktor keamanan.

DAFTAR PUSTAKA

- ACI 440-2R-17 *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*
- Asroni, Ali. 2010. Kolom Fondasi & balok T Beton Bertulang. Yogyakarta. Graha ilmu.
- Lam, L., and teng, J., 2003. "Design-Oriented Stress-Strain Model of FRP -Confined Concrete"

Construction & Building Materials, V.17, no-6-7, pp 471-489

- Nawy, Edward G. 1985. Beton Bertulang Suatu Pendekatan Dasar. Bandung: Refika Aditama.
- Park, R. and Paulay, T. 1975. *Reinforced Concrete Structure*. New York: John Wiley & Sons Inc.
- Sabariman, Bambang. 2018. "Kuat Tekan Aksial Kolom Pendek Terkekang Penampang Persegi Diperkuat Serat Baja". Jurnal INERSIA, vol. XIV no. 1.
- Sabariman, Bambang; Soehardjono, Agoes; Wisnumurti; Wibowo, Ari; Tavio. 2018. "Stress-Strain Behavior of Steel Fiber-Reinforced Concrete Cylinders Spirally Confined with Steel Bars". Hindawi Advances in Civil Engineering Volume 2018, Article ID 6940532, 8 pages
- Scott, B.D., Park, R. and Priestley, M.J.N. 1982. "Stress-Strain Behaviour of Concrete Confined by Overlapping Hoops at Low and High Strain Rates. Journal American Concrete Institute, 79, pp. 13-27.
- Sianipar, Marolop Tua. 2009. Analisa Kolom Beton Bertulang Yang Diperkuat Carbon Fiber Reinforced Polymer FRP). Skripsi. Diterbitkan. Fakultas Teknik. Jurusan Teknik Sipil. Universitas Sumatera Utara: Sumatera utara.
- Standar Nasional Indonesia (SNI) 03-2847-2013
- Tavio; Wibandi, I.; dan Roro. 2011. *Studi Daktilitas Kuroatur Pada Kolom Persegi Panjang Beton Intrastruktur Bertulang Terkekang Dengan Menggunakan Basic 6.0*. Surabaya: ITS.
- Tarigan, J.C., dan Sanci Borus, 2014. Analisis perbandingan Kolom Beton Bertulang Berbentuk Bulat Dan Persegi Menggunakan Carbon Fiber Wrap Terhadap Variasi Pembebanan Aksial. Medan : Universitas Sumatera Utara
- Wahyudi, L. Rahim, Syahril A. 1999. Struktur Beton Bertulang Standar Baru SNI T-15-1991-03. Jakarta : PT. Gramedia Pustaka Utama.
- Winter, G. dan Nilon, A. H. 1993. Perencanaan Struktur Beton Bertulang. Jakarta: P. T. Prandnya Paramita.