

PENGARUH VARIASI JARAK CFRP (*CARBON FIBER REINFORCED POLYMER*) PADA KOLOM PENDEK PENAMPANG PERSEGI DENGAN TULANGAN TRANSVERSAL TERHADAP KEMAMPUAN MENAHAN BEBAN AKSIAL

Ni Wayan Amrita Ayu Dewadatta

Program Studi S1 Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya
amritaniwayan@gmail.com

Abstrak

Kolom terkekang adalah suatu penampang yang diberi tulangan melintang dalam bentuk spiral maupun sengkang untuk meningkatkan kuat tekan kolom. Sengkang hanya memberi gaya kekang pada daerah sudut karena tekanan pada sisi sengkang yang tidak terkekang akan cenderung membengkokkan bagian sisi sengkang ke arah luar dan merupakan daerah lemah pada sengkang. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) sebagai perkuatan kekangan (*confinement*) atau penambahan pada kuat tekan kolom pendek terkekang di daerah lemah pada sengkang. CFRP dapat berfungsi sebagai kekangan, maka dalam penelitian ini membuat *speciment* terdiri dari kolom pendek tanpa CFRP, dan kolom pendek dengan tambahan CFRP penuh, dan sebagian (*partial*) yang berfungsi sebagai kekangan di sekeliling penampang memanjang kolom. Kemudian diuji dengan beban aksial tekan sampai *speciment* yang diuji runtuh. Hasil uji tekan kolom pendek dengan CFRP penuh dan sebagian akan dibandingkan dengan kolom pendek yang tidak memakai CFRP. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kuat tekan kolom pendek terkekang meningkat terhadap kolom pendek tanpa CFRP. Peningkatan tersebut terjadi pada penambahan CFRP 3 strip (benda uji MSMCC) sebesar 18,72%, CFRP 4 strip (benda uji MSMCB) sebesar 22,37%, CFRP 5 strip (benda uji MSMCA) sebesar 22,83%, dan CFRP penuh di sekeliling kolom (benda uji MSFC) sebesar 47,03%. Dengan demikian penambahan CFRP penuh dan strip semuanya memenuhi syarat kuat tekan sesuai ACI 441.2R-2017, dan Lam and Teng (2003).

Kata Kunci: CFRP, Kekangan, Kolom Pendek, Kuat Tekan, Tulangan Transversal

Abstract

The confined column is a cross section that is given transverse reinforcement in spiral and cross shape to increase the compressive strength of the column. Stirrups is only provides bridles in the angular area because the pressure on the side of the stirrups that are not limited will tend to the bend of the side stirrups outward and is a weak area on the stirrups Therefore, this study uses CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) as a reinforcement (confinement) or addition to the compressive strength of a short column confined in a weak area of the stirrup. CFRP can give a function as a restraint, so in this study specimens consist of short columns without CFRP, and short columns with full CFRP addition, and partial which function as bridges around the longitudinal cross section of the column. Then test with axial load pressure until the tested specimen collapses. Short column compressive test results with full CFRP and not full CFRP will be compared with short columns that do not use CFRP. The results showed that the compressive strength of the short column was confined increased compared to the short columns without CFRP. The increased in the addition of CFRP 3 strips (MSMCC specimens) was 18.72%, CFRP 4 strips (MSMCB specimens) were 22.37%, CFRP 5 strips (MSMCA specimens) were 22.83%, and CFRP was full in around the column (MSFC test object) of 47.03%. Thus the addition of full and not full CFRP strips all meet the compressive strength requirements according to ACI 441.2R-2017, and Lam and Teng (2003).

Keywords: CFRP, Confinement, Compressive Strength, Short Coloumn, Transverse Reinforcement

PENDAHULUAN

Kolom merupakan komponen struktur vertikal yang menerima dan menyalurkan gaya tekan aksial bersamaan atau tidak dengan gaya momen. Kolom pendek sering disebut kolom tidak langsing atau gemuk. Kolom pendek tidak kehilangan kehilangan stabilitas lateral karena tidak adanya tekuk. Dalam hal ini digunakannya jenis kolom pendek dikarenakan struktur kokoh dengan flesibilitas yang kecil. Bahan penyusun struktur kolom adalah kombinasi dari campuran beton

dan tulangan baja. Tulangan baja pada kolom ada dua jenis, yaitu tulangan baja yang berfungsi sebagai penahan tekan atau tulangan longitudinal, kemudian tulangan baja yang berfungsi sebagai penahan tegangan lateral pada inti penampang kolom atau tulangan sengkang. Tulangan sengkang pada kolom berfungsi sebagai pengekan, supaya inti penampang kolom tetap menyatu dan tidak pecah akibat gaya aksial yang diterima kolom. Sebagaimana diketahui bahwa akibat gaya aksial, kolom di satu sisi akan mengalami pemendekan, tetapi disisi lain

kolom akan mengalami retak ke arah samping. Oleh karena itu, fungsi sengkang adalah mengikat inti penampang kolom (*concrete core*) agar kolom beton tidak pecah. Untuk mencegah keruntuhan kolom yang secara tiba-tiba, tanpa adanya peringatan, maka dalam merencanakan struktur kolom harus diperhitungkan secara cermat dengan memberi kekuatan cadangan lebih tinggi atau penambahan kekuatan dari pada untuk komponen struktur lainnya, sehubungan dengan faktor keselamatan jiwa. Sehingga dalam suatu struktur keruntuhan kolom struktural merupakan hal yang sangat penting untuk ditinjau.

Menurut beberapa peneliti menunjukkan bahwa pengekanan oleh tulangan transversal dapat memperbaiki karakteristik dari tegangan-regangan dari beton ketika pada tekanan tinggi. Berbagai studi tentang kekuatan kolom beton bertulang yang dilakukan oleh (Park 1975: 23), menunjukkan bahwa penampang yang diberi tulangan melintang dalam bentuk sengkang ikat ataupun spiral akan meningkatkan kekuatannya. Tulangan spiral memberikan tekanan kekang (*confine*) di sekeliling penampang. Sedangkan sengkang biasa hanya memberikan gaya kekang (*confine*) di daerah sudut karena tekanan pada sisi sengkang ini akan cenderung membengkokkan bagian sisi sengkang ke arah luar berakibat beton yang terkekang kurang efektif. Hal ini merupakan daerah yang lemah pada sengkang persegi. Efek pengekanan dalam bentuk spiral ataupun sengkang pada beton dapat meningkatkan kekuatan tekan dan daktilitas tekan dibandingkan dengan tidak adanya pengekanan berupa bentuk spiral ataupun sengkang (Sabariman, dkk. 2018).

Berdasarkan latar belakang di atas kerusakan pada daerah lemah yang terdapat di sengkang persegi perlu diperkuat terutama di antara sudut-sudut sengkang persegi, maka untuk itu daerah lemah tersebut akan diperkuat dengan menggunakan CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*). Penelitian ini akan melakukan variasi jarak CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) terhadap pengaruh kolom pendek penampang persegi menahan beban aksial.

KAJIAN PUSTAKA

Kolom

Kolom menurut SNI 2847-2013, bagian komponen struktur dengan rasio tinggi terhadap dimensi lateral terkecil melampaui tiga yang digunakan terutama untuk menumpu beban tekan aksial. Untuk komponen struktur dengan perubahan dimensi lateral, maka dimensi lateral terkecil yaitu rata-rata antara dimensi atas dan bawah sisi yang lebih kecil.

Berdasarkan bentuk dan susunan tulangan terdiri dari kolom persegi dengan tulangan memanjang, dan bersengkang, kolom bulat dengan tulangan memanjang dan tulangan lateral berupa sengkang, dan spiral, kolom komposit yang terdiri dari campuran beton dan profil baja struktural di dalamnya (Edward G. Nawy, 1990).

Tulangan transversal

Menurut SNI 2847-2013, tulangan transversal atau sengkang adalah tulangan yang digunakan untuk menahan tegangan geser dan torsi dalam komponen struktur, umumnya berbentuk batang, kawat, atau tulangan kawat las baik kaki tunggal atau dibengkok menjadi L, U, atau bentuk persegi dan ditempatkan tegak lurus terhadap atau bersudut terhadap tulangan longitudinal. Luas penampang total tulangan sengkang persegi, A_{sh} , menurut SNI 2847-2013 Pasal 21.6.4.4, tidak boleh kurang dari yang disyaratkan sebagai berikut:

$$A_{sh} = 0,3 \frac{sbcf'_c}{f_{yt}} \left[\left(\frac{A_g}{A_{ch}} \right) - 1 \right] \quad (1)$$

$$A_{sh} = 0,09 \frac{sbcf'_c}{f_{yt}} \quad (2)$$

Batasan Kolom Pendek

Ukuran untuk menentukan kolom pendek adalah kelangsingan yang dinyatakan oleh $\frac{KL_u}{r}$, dimana r adalah radius girasi penampang kolom yang ditinjau. Menurut SNI 2847-2013 Pasal 10.10.1.2 pada komponen struktur persegi, radius girasi r boleh diambil sama dengan 0,30 kali dimensi keseluruhan dalam arah stabilitas yang ditinjau, dan $r = 0,25$ kali diameter untuk komponen struktur tekan bulat. Untuk bentuk penampang lainnya, r boleh dihitung untuk penampang beton bruto. Sedangkan k adalah faktor jepitan ujung atas dan ujung bawah kolom (menggunakan *alignment chart*). Hanya sebagai ilustrasi nilai k dapat diambil: untuk kolom *braced frame* $k \leq 1$, kolom *unbraced frame* $k \geq 1$.

Dengan demikian ada suatu transisi dari kolom pendek ke kolom panjang yang terdefinisi dengan menggunakan perbandingan panjang efektif kl_u dengan jari-jari girasi r . Tinggi l_u adalah panjang tak tertumpu (*unsupported length*) kolom, dan k adalah faktor yang bergantung pada kondisi ujung kolom dan kondisi adakah penahan deformasi lateral atau tidak. Ketentuan kolom pendek dan kolom langsing didasari atas nilai rasio kelangsingan kolom. (Edward G Nawy, 1990).

$$\frac{KL_u}{r} < 22 \quad (3)$$

kolom diklasifikasikan sebagai kolom pendek,

$$\frac{KL_u}{r} < 34 - 12 \frac{M_1}{M_2} \leq 40 \quad (4)$$

kolom diklasifikasikan sebagai kolom langsing.

Kuat Aksial Kolom

Dalam perhitungan analisis dan desain diperlukan adanya reduksi terhadap eksentrisitas minimum, peraturan SNI 2847:2013 Pasal 10.3.6 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:

1. Kolom bersengkang

$$\phi P_{n(max)} = 0,80 \phi \{0,85 f'_c (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}\} \quad (5)$$

2. Kolom berspiral

$$\phi P_{n(max)} = 0,85 \phi \{0,85 f'_c (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}\} \quad (6)$$

Menurut SNI 2847:2013 Pasal 10.3.5. dapat dikatakan sebagai struktur tekan jika:

$$P > 0,10 \cdot f'_c \cdot A_g \quad (7)$$

Kekangan pada beton dapat berupa tulangan transversal persegi atau spiral. Dengan pengekanan tersebut, dapat meningkatkan kuat tekan dan daktilitas beton. Pengekanan pada beton berfungsi mengurangi inti beton untuk mengembang kesamping saat menerima tekanan lateral dan menunda kerusakan pada beton. Tulangan transversal spiral memberikan kekangan yang lebih baik pada inti beton saat menerima tekanan, sedangkan tulangan transversal persegi dapat memberikan kekangan yang efektif pada keempat sisi tulangan transversal untuk inti beton mengembang. Meskipun tidak sebaik tulangan transversal spiral dalam memberikan keefektifan pengekanan pada inti beton, tulangan transversal persegi masih dapat memperbaiki kuat tekan dan daktilitas beton secara signifikan. (Sabariman et al., 2014; Sabariman et al., 2018)

Kurva tegangan-regangan beton

Variabel yang mempengaruhi kurva tegangan – regangan yaitu (Kent & Park, 1975):

1. Perbandingan antara volume tulangan sengkang terhadap volume penampang inti kolom beton
2. Kuat leleh tulangan Sengkang, karena variabel ini menentukan batas atas dari tekanan pengkang.
3. Perbandingan antara diameter sengkang terhadap panjang sengkang, karena diameter yang lebih besar menghasilkan pengekanan yang lebih efektif
4. Perbandingan jarak antar tulangan sengkang terhadap dimensi penampang inti, karena semakin rapat sengkang akan menambah keefektifan pengekanan

5. Jumlah dan ukuran tulangan longitudinal, karena tulangan ini juga mengekang betonnya
6. Kuat tekan beton (mutu beton), karena beton dengan kuat tekan rendah (*low strength concrete*) sedikit lebih daktail daripada beton mutu tinggi (*high strength concrete*)

Perhitungan nilai kekangan beton pada penelitian ini menggunakan rumus dari penelitian Kent dan Park yang telah dimodifikasi oleh Scott, 1982. Semakin kecil nilai Z_m maka semakin baik kekangan yang diberikan oleh beton. Nilai Z_m atau nilai kekangan beton tersebut sebagai berikut (Sabariman, 2018):

$$Z_m = \frac{0,625}{\left[\frac{3+0,29f'_c}{145f'_c-1000} \right] + \frac{3}{4} \rho_s \sqrt{\frac{b''}{s_h}} - 0,002K} \quad (8)$$

$$K = 1,25 \left[1 + \frac{\rho_s \cdot f_{yh}}{f'_c} \right] \quad (9)$$

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* SikaWrap 231 C dari PT. Sika Indonesia 2017, karakteristik dan keuntungan CFRP SikaWrap yaitu:

1. Diproduksi dengan serat dengan anyaman menyilang yang rapat dan ketat menjadi lembaran yang stabil.
2. Multifungsi untuk beberapa tipe perkuatan.
3. Bentuk permukaan yang fleksibel.
4. Memiliki kekuatan tarik yang tinggi.

5. Tersedia dalam beberapa ukuran lebar untuk pemanfaatan yang optimal.
6. Berat jenis yang ringat sehingga tidak menjadi beban untuk struktur.
7. Lebih ekonomis dalam benefitnya dibandingkan dengan teknik konvensional.

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 10.

$$\phi P_{n(Max)} = 0,8\phi\{0,85f'_{cc}(A_g - A_{st}) + f_y A_{st}\} \quad (10)$$

A_g adalah luas bruto penampang beton dan A_{st} merupakan luas total tulangan longitudinal non prategang. $\phi P_{n(Max)}$ adalah kuat aksial nominal penampang kolom. Kuat leleh tulangan yang disyaratkan (f_y). Nilai kekuatan kekangan beton dapat dihitung dengan persamaan 11.

$$f'_{cc} = f'_c + [\phi_f 3,3 K_a f_l] \quad (11)$$

dimana K_a adalah faktor efisiensi dan f'_c merupakan mutu beton tanpa terkekang. f_l merupakan tekanan lateral terkekang yang dapat dihitung dari persamaan 12.

$$f_l = \frac{2 E_f n t_f \epsilon_{fe}}{D} \quad (12)$$

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.

K_a dapat dihitung dari persamaan 13.

$$K_a = \frac{A_e}{A_c} \left(\frac{b}{h}\right)^2 \quad (13)$$

A_e merupakan wilayah potongan melintang dari beton terkekang efektif. A_c merupakan luas penampang kolom beton. b dan h adalah lebar dan panjang kolom beton. r_c adalah radius dari tepi dari potongan melintang yang terkekang oleh CFRP.

Rasio permukaan beton dapat dihitung dari persamaan 14.

$$\frac{A_e}{A_c} = \frac{1 - \left[\frac{(b/h)(h-2r_c)^2 + (b/h)(b-2r_c)^2}{3 A_g}\right] \rho_g}{1 - \rho_g} \quad (14)$$

Persyaratan rasio volume pada CFRP (ρ_f) dapat dihitung dengan persamaan 15.

$$\rho_f = 2 n t_f \left(\frac{b+h}{bh}\right) \frac{W_f}{S_f} \quad (15)$$

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 16.

$$S_f \geq \left[3 - 6 \left(\frac{f_u}{f_y} - 1\right)\right] d_{bl} \leq 6 d_{bl} \quad (16)$$

$$S_f \geq 150 \quad (17)$$

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 18.

$$\phi P_{n(Max)} = 0,8\phi\{0,85f'_{cc}(A_g - A_{st}) + f_y A_{st}\} \quad (18)$$

A_g adalah luas bruto penampang beton dan A_{st} merupakan luas total tulangan longitudinal non prategang. $\phi P_{n(Max)}$ adalah kuat aksial nominal penampang kolom. Kuat leleh tulangan yang disyaratkan (f_y). Nilai kekuatan kekangan beton dapat dihitung dengan persamaan 19.

$$f'_{cc} = f'_c \left(1 + 3,3 \frac{f_{l,a}}{f'_c}\right) \quad (19)$$

$f_{l,a}$ merupakan nilai kekangan pada CFRP dapat dihitung dengan persamaan 20.

$$f_{l,a} = \frac{E_f \rho_f \epsilon_{fe}}{2} \quad (20)$$

ϵ_{fe} merupakan regangan efektif yang bernilai 0,004. E_f merupakan modulus elastis CFRP. Rasio volume pada CFRP adalah (ρ_f). Rasio volumetrik dapat dihitung dari persamaan 21.

$$\rho_f = 4 \frac{n_f N_f W_f t_f}{D l_u} \quad (21)$$

METODE

Tempat penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian metode eksperimen dengan membuat benda uji berupa kolom pendek terkekang dengan penambahan CFRP, dan tanpa CFRP yang berpenampang persegi, serta benda uji mutu beton silinder. Pembuatan benda uji mulai dari persiapan bekisting, pengecoran 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 2. Rincian benda uji

Benda Uji	Dimensi		f'_c target (MPa)
	ϕ (mm)	H (mm)	
FC ₁	150	300	22,5
FC ₂	150	300	22,5
FC ₃	150	300	22,5
FC ₄	150	300	22,5

(sumber: hasil perhitungan)

Tabel 1. Mix design

Material	Volume 0,0752 m ³ (kg/m ³)
Semen	12,11
Air	22,94
Pasir	88,59
Agregat (5-10 mm)	18,65
Agregat (10-20 mm)	39,78
Retarder	0,08
Superplasticizer	0,14

(sumber: mix design PT. Varia Usaha Beton)

Tabel 3. Rincian benda uji

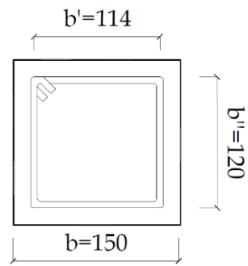
Benda Uji	b=h (mm)	t (mm)	Sengkang Persegi		CFRP
			ϕ (mm)	S _h (mm)	
MSTC ₁	150	300	6	36	-
MSTC ₂	150	300	6	36	-
MSMCA ₁	150	300	6	36	67,5
MSMCA ₂	150	300	6	36	67,5
MSMCB ₁	150	300	6	36	90
MSMCB ₂	150	300	6	36	90
MSMCC ₁	150	300	6	36	135
MSMCC ₂	150	300	6	36	135
MSFC ₁	150	300	6	36	300
MSFC ₂	150	300	6	36	300

(sumber: hasil perhitungan)

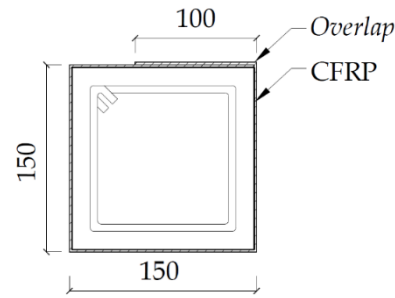
Tabel 4. Perhitungan syarat tulangan transversal

Benda Uji	f'_c target (MPa)	f_{yh} (MPa)	A _{sh-1} (syarat)	A _{sh-2} (syarat)	A _{sh} terpasang	Z _m
MSTC ₁	22,5	529,5	33,8265	18,04079	56,52	17,06176
MSTC ₂	22,5	529,5	33,8265	18,04079	56,52	17,06176
MSMCA ₁	22,5	529,5	33,8265	18,04079	56,52	17,06176
MSMCA ₂	22,5	529,5	33,8265	18,04079	56,52	17,06176
MSMCB ₁	22,5	529,5	33,8265	18,04079	56,52	17,06176
MSMCB ₂	22,5	529,5	33,8265	18,04079	56,52	17,06176
MSMCC ₁	22,5	529,5	33,8265	18,04079	56,52	17,06176
MSMCC ₂	22,5	529,5	33,8265	18,04079	56,52	17,06176
MSFC ₁	22,5	529,5	33,8265	18,04079	56,52	17,06176
MSFC ₂	22,5	529,5	33,8265	18,04079	56,52	17,06176

(sumber: hasil perhitungan)



Gambar 1. Detail penulangan benda uji



Gambar 2. Detail pemasangan CFRP

Prediksi (Disain) 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 6. Hasil prediksi menurut ACI 440.2R-2017

Nama Benda	S_f	ρ_f Mm	$f_{l,a}$ MPa	f_{cc} MPa	$P_{n(max)}$ N
MSMCC	135	0,00076	-	-	-
MSMCB	90	0,00115	-	-	-
MSMCA	67,5	0,00153	-	-	-
MSFC	-	0,00344	1,119	24,711	402154,8
MSTC	TIDAK MEMAKAI CFRP				

(sumber: hasil hitungan)

2. Menurut Lam and Teng (2003)

Tabel 7. Hasil prediksi menurut Lam and Teng (2003)

Nama Benda	S_f	ρ_f Mm	$f_{l,a}$ MPa	f_{cc} MPa	$P_{n(max)}$ N
MSMCC	67,5	0,00103	0,4747	25,775	419448,0
MSMCB	90	0,00138	0,6330	26,297	427936,9
MSMCA	135	0,00172	0,7912	26,819	436425,8
MSFC	-	0,00344	1,5824	29,430	478870,2

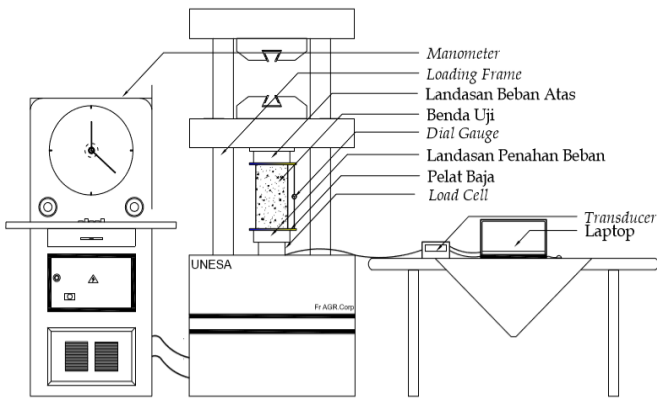
(sumber: hasil hitungan)

Pengujian

Pengujian kuat tekan pada kolom pendek pada penelitian ini akan dilakukan dengan beban konsentris dan bersifat pembebanan statis. Langkah-langkah pengujian benda uji di laboratorium sebagai berikut:

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 persegi dengan menggunakan mesin tarik baja.
4. Membuat benda uji silinder beton ϕ 150 mm \times 300 mm.
5. Membuat benda uji kolom pendek penampang persegi ukuran 150 mm \times 150 mm \times 300 mm dengan tiga variasi jarak tulangan transversal.
6. Melakukan pembongkaran bekisting kolom pendek penampang persegi setelah proses pengecoran yang telah berumur 24 jam.
7. Melakukan perawatan benda uji kolom pendek penampang persegi dengan cara merendam benda uji selama 28 hari.
8. Setelah 28 hari, benda uji diangkat dan dibiarkan sampai mencapai kering udara.
9. Menempelkan CFRP Sika *Wrap* pada benda uji setelah satu hari pengangkatan benda uji dari perawatan.
10. Melakukan uji kuat tekan benda uji silinder beton hanya sampai P_{maks} memakai *universal testing machine (UTM)* kapasitas 1000 kN yang digabung dengan alat *universal recorder (UR)*.
11. Melakukan uji kuat tekan benda uji kolom pendek penampang persegi sampai mencapai runtuh memakai *universal testing machine (UTM)* kapasitas 1000 kN yang digabung dengan alat *universal recorder (UR)*.

Set Up Pengujian



Gambar 3. Skematik set up pengujian benda uji.
LVDT = linier variable displacement transformer
(sumber: dokumen pribadi)

Teknik analisis data

Analisis data dilakukan dengan cara sebagai berikut:

1. Pengecekan hasil tes kuat tarik mutu baja, yang akan menghasilkan, f_y .
2. Pengecekan hasil tes *slump* pada *mix design* beton.
3. Melakukan uji kuat tekan beton kolom pendek penampang silinder benda uji kontrol, yang menghasilkan mutu beton f'_c .
4. Melakukan kuat tekan beton kolom pendek penampang persegi dengan memberikan beban aksial bersifat *static monotonic* sampai mencapai runtuh.
5. Melakukan pengamatan besarnya nilai P_0 dari pengujian tes kuat tekan benda uji kolom pendek penampang persegi.
6. Membandingkan besar nilai P_0 pada benda uji kolom pendek penampang persegi dengan tiga variasi jarak CFRP dengan tulangan transversal penuh.
7. Melakukan pembahasan mengenai pengaruh variasi jarak tulangan transversal terhadap kuat beban konsentris yang diperkuat CFRP.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Uji tarik tulangan

Pengujian tarik tulangan terdiri dari dua sampel (bagian ujung dan tengah tulangan) berdiameter 6 mm dengan panjang 20 cm. Pengujian ini dilakukan di Laboratorium Beton Universitas Brawijaya, dan didapatkan $f_y = 529,5$ MPa, nilai ini kemudian dimasukkan dalam perhitungan nilai Z_m .

Uji tekan benda uji

Hasil pengujian mutu beton didasarkan uji tekan pada silinder tanpa CFRP yang telah berumur 28 hari didapat $f'_c = 24,208$ MPa, nilai ini sedikit di atas 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 8. Kuat tekan silinder beton tanpa CFRP

Benda Uji	f'_c (MPa)
FC-1	26,263
FC-2	26,077
FC-3	23,305
FC-4	21,190
Rata-Rata	24,208

(Sumber: hasil tes, $FC_n =$ uji tekan silinder ke n)

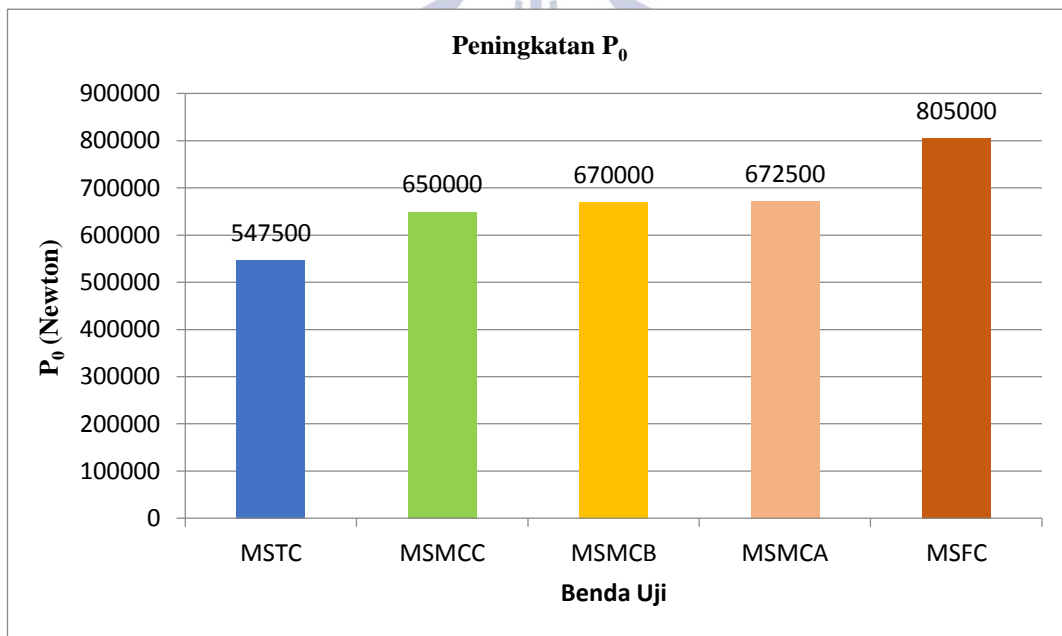
Peningkatan kekuatan P_0

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 besar 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 9 dan grafik pada Gambar 4 di bawah ini.

Tabel 9. Hasil benda uji tekan

No.	Benda Uji	Jarak tulangan transversal (mm)	Tulangan transversal (buah)	Jarak CFRP (mm)	P ₀ -eksperimen (N)	Peningkatan (%)
1	MSTC	36	8	-	547500	-
2	MSMCC	36	8	135	650000	18,72
3	MSMCB	36	8	90	670000	22,37
4	MSMCA	36	8	67,5	672500	22,83
5	MSFC	36	8	Penuh	805000	47,03

(Sumber: hasil tes)



Gambar 4. Peningkatan kuat tekan aksial konsentris P₀ beton terkekang tanpa CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) dan memakai CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*)
(sumber: dokumen pribadi)

Pengaruh variasi jarak CFRP

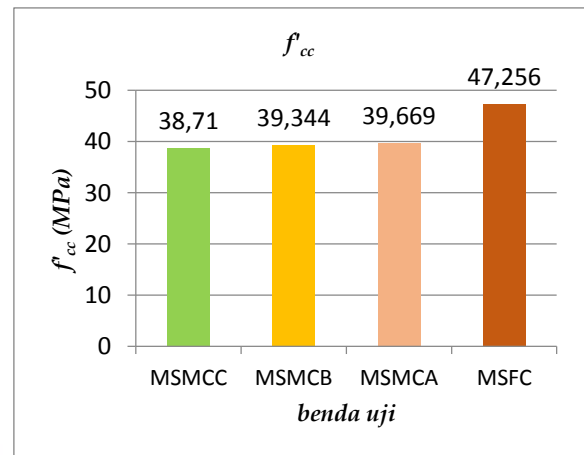
pengaruh variasi jarak CFRP pada kolom pendek penampang persegi dengan tulangan transversal terhadap kemampuan menahan beban aksial sebagai berikut:

1. Berdasarkan hasil eksperimen beban aksial
 - a. MSTC hasil analisa rata-rata beban aksial 54,75 Ton atau 547500 Newton
 - b. MSMCC rata-rata kuat tekan 65,00 Ton atau 650000 Newton, bila dikomparasi dengan MSTC dihitung hasilnya meningkat 18,72%.
 - c. MSMCB rata-rata kuat tekan 67,00 Ton atau 670000 Newton, bila dikomparasi dengan MSTC dihitung hasilnya meningkat 22,37%.
 - d. MSMCA rata-rata kuat tekan 67,25 Ton atau 672500 Newton, bila dikomparasi dengan MSTC dihitung hasilnya meningkat 22,83%.
 - e. MSFC rata-rata kuat tekan 80,50 Ton atau 805000 Newton, bila dikomparasi dengan MSTC dihitung hasilnya meningkat 47,03%.
 - f. Dari hasil analisa MSMCC, MSMCB, MSMCA, dan MSFC semua mengalami peningkatan, bila dihitung rata-rata gabungan dari MSMCC, MSMCB, MSMCA, dan MSFC sebesar 22,19% mengalami peningkatan.

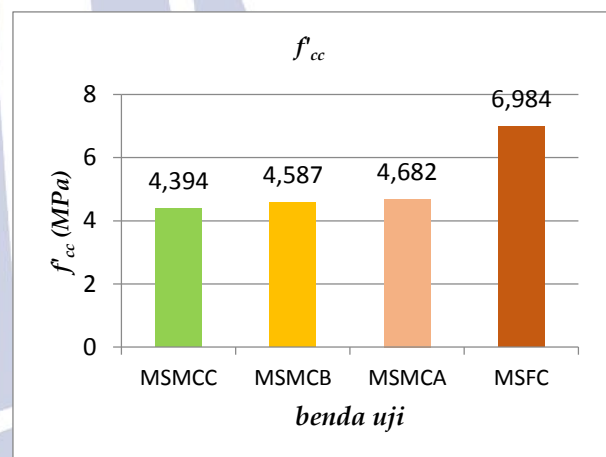
Pengaruh nilai kekangan beton akibat CFRP (f'_{cc}), dan nilai kekangan murni CFRP ($f'_{l,a}$)

Penggunaan variasi jarak CFRP sebagai kekangan eksternal dan penggunaan tulangan transversal sebagai kekangan internal dapat meningkatkan kemampuan P_0 . Hal ini dapat terlihat dari perhitungan nilai kekangan beton akibat CFRP atau f'_{cc} . Perhitungan f'_{cc} pada penelitian ini memakai teori dari Lam dan Teng (2003), dan ACI 440.2R-2017 sebagai berikut:

1. Menurut Lam dan Teng (2003)
 - a. Kolom pendek terkekang dengan tambahan 3 Strip CFRP (MSMCC) memberikan nilai kekangan beton akibat CFRP tersebut menjadi 38,710 MPa, dan nilai kekangan CFRP 4,394 MPa.
 - b. Kolom pendek terkekang dengan tambahan 4 strip CFRP (MSMCB) memberikan nilai kekangan beton akibat CFRP 39,344 MPa, dan nilai kekangan CFRP 4,587 MPa.
 - c. Kolom pendek terkekang dengan tambahan 5 strip CFRP (MSMCA) memberikan nilai kekangan beton akibat CFRP 39,669 MPa, dan nilai kekangan 4,682 MPa.
 - d. Kolom pendek terkekang dengan tambahan penuh CFRP (MSFC) memberikan nilai kekangan beton akibat CFRP 47,256 MPa, dan nilai kekangan CFRP 6,984 MPa.
2. Menurut ACI 440.2R-2017
ACI 440.2R-2017 dapat dibuktikan dengan teori Lam and Teng, bahwa hanya dengan pemberian penuh CFRP pada permukaan beton, akan memberikan hasil beban aksial, nilai kekangan beton akibat CFRP, nilai kekangan CFRP, dan volumetrik rasio,) yang sangat signifikan.



Gambar 5. Hasil nilai kekangan beton akibat CFRP (sumber: dokumen pribadi)



Gambar 6. Hasil nilai kekangan beton akibat CFRP (sumber: dokumen pribadi)

Berdasarkan data di atas, dapat dinyatakan terjadi peningkatan untuk kekangan beton akibat CFRP, dan nilai kekangan CFRP. Semakin luas permukaan beton terkekang yang terikat oleh CFRP, maka semakin besar nilai kekangan beton akibat CFRP, dan nilai kekangan CFRP

SIMPULAN

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

1. Nilai kuat tekan beton setelah diberikan CFRP untuk umur 28 hari. 3 strip CFRP memberikan nilai kuat tekan beton 65,00 Ton, 4 strip CFRP memberikan nilai kuat tekan beton 67,00 Ton, 5 strip CFRP memberikan nilai kuat tekan beton 67,25 Ton, dan CFRP penuh pada bidang permukaan kolom beton terkekang nilai kuat tekan beton 80,50 Ton. Apabila dibandingkan dengan nilai kuat tekan beton tanpa menggunakan CFRP 54,75 Ton, maka kenaikan nilai kuat tekan beton untuk 3 strip 18,72%, 4 strip 22,37%, 5 strip 22,83%, dan CFRP penuh 47,03%. Dapat disimpulkan bahwa dengan pemberian CFRP 3 strip, 4 strip, dan 5 strip tidak memberikan kenaikan kuat tekan beton yang stabil dan signifikan. Namun, akan memberikan kuat tekan beton yang sangat signifikan dengan penggunaan CFRP penuh pada kolom pendek terkekang penampang persegi.
2. Nilai kekangan CFRP (f'_{la}) dengan 3 strip CFRP 4,39 MPa, 4 strip CFRP 4,58 MPa, 5 strip CFRP 4,68 MPa, menunjukkan peningkatan yang tidak signifikan. Akan tetapi, penggunaan CFRP penuh pada kolom pendek terkekang penampang persegi menghasilkan nilai kekangan CFRP sangat signifikan yaitu 6,98 MPa.
3. Nilai kekangan beton akibat CFRP (f'_{cc}) dengan 3 strip CFRP 38,71 MPa, 4 strip CFRP 39,44 MPa, 5 strip CFRP 39,66 MPa, menunjukkan pertambahan yang tidak signifikan. Namun perubahan sangat signifikan pada penggunaan CFRP penuh pada kolom pendek terkekang penampang persegi menghasilkan nilai kekangan beton akibat CFRP sebesar 47,26 MPa.

DAFTAR PUSTAKA

- ACI Committee 440, *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structure*. Detroit: American Concrete Institute, 2017.
- Benaid, Riad. 2013. "Strength Model For Square Concrete Coloumn Confined By External CFRP Sheets". *Structural Engineering and Mechanics*, vol. 46, no. I, hal. 111-135.
- Canonica, Lucio. 2013. "Memahami Beton Bertulang". Bandung: Angkasa.
- Challal, O.; and Shahawy, M. 2000. "Performance of Fiber-Reinforced Polymer-Wrapped Reinforced Concrete Coloumn undder Combined Axial-Flexural Loading". *ACI Structural Journal*, vol. 97, no. 4, hal. 659-668.
- Hartono. 2005. *Perbaikan dan Perkuatan Struktur Beton*. Jurnal. Jakarta.
- Lam, L., Teng, J.G., 2003. "Design-Oriented Stress-Strain Model for FRP-Confined Concrete in Rectangular Coloumns". *Jurnal of Reinforced Plastic and Composites*, vol. 22, no. 5, pp 1149-1186.
- 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; Purwono, Rachmat dan Priyosulistyo. 2014. "Efek Pengekangan Kolom Berlubang Beton Mutu Normal Terhadap Daktilitas Kurvatur". *Dimensi Teknik Sipil Jurnal Keilmuan dan Penerapan Teknik Sipil*, vol. 6 no. 1, hal. 7-14
- 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". *Jurnal Hindawi*, vol. 2018.
- 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 Intitute*, 79, pp. 13-27.
- Sianipar, Marolop Tua. 2009. *Analisa Kolom Beton Bertulang Yang Diperkuat dengan Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)*. Skripsi. Diterbitkan. Fakultas Teknik. Jurusan Teknik Sipil. Universitas Sumatera Utara: Sumatera Utara.
- Standar Nasional Indonesia (SNI) 03-2847-2013
- Sudarmoko. 1990. "Beton Serat Suatu Bentuk Baru". PAU Ilmu Teknik. Yogyakarta: Universitas Gajah Mada.
- Tavio; Wimbadi, I.; dan Roro. 2011. "Studi Daktilitas Kurvatur Pada Kolom Persegi Panjang Beton Intrastruktur Bertulang Terkekang Dengan Menggunakan Basic 6.0. Surabaya: ITS.
- Wahyudi. L.; dan Rahim. S. A. 1999. "Struktur Beton Bertulang". Jakarta: PT. Gramedia Pustaka Umum.