

PROGRAM DESAIN PERKUATAN KOLOM DENGAN MENGGUNAKAN FRP CONFINEMENT SESUAI ACI 440.2R-17

Rikson Kurniawan Tandelilin¹, Steven Sanjaya², Pamuda Pudjisuryadi³, dan Gunawan Budi Wijaya⁴

ABSTRAK : Untuk memperkuat suatu struktur bangunan dari beton bertulang ada berbagai macam cara. Memperbesar dimensi, memperpendek bentang, hingga menggunakan FRP adalah beberapa metode untuk memperkuat kapasitas elemen struktur. Seiring berkembangnya teknologi, nilai ekonomis FRP menjadi semakin tinggi. Hal inilah memacu permintaan terhadap alat bantu untuk merencanakan FRP. Akan tetapi, program untuk perhitungan perkuatan dengan FRP mayoritas dibuat oleh para produsen FRP, sehingga penggunaannya dibatasi pemakaiannya hanya untuk produk tertentu. Oleh karena itu, dibuat sebuah program desain FRP *confinement* yang umum, mudah untuk digunakan, serta memiliki hasil *output* yang cukup lengkap seperti memunculkan hasil titik ΦP_n - ΦM_n , menggambar hasil titik ΦP_n - ΦM_n pada diagram interaksi serta menghitung dan membuat diagram tegangan-regangan yaitu pada saat kondisi sebelum diperkuat maupun sesudah diperkuat dengan FRP dan juga memunculkan notifikasi – notifikasi yang sekiranya dapat membantu para pengguna program untuk mengoptimalkan perhitungan perkuatan aksial-lentur pada kolom beton bertulang dengan menggunakan FRP. Program telah terverifikasi terhadap berbagai kemungkinan kasus sehingga terbukti mempunyai perhitungan yang sesuai dengan ACI 440.2R-17. Program yang dibuat dengan basis Visual Basic 2015 cocok untuk digunakan sebagai sarana edukasi maupun untuk kepentingan profesional karena mudah digunakan nantinya oleh *user* yang akan menggunakan program ini.

KATA KUNCI: ACI 440.2R-17, kolom beton bertulang, FRP *confinement*, perkuatan aksial-lentur, diagram interaksi ΦP_n - ΦM_n , diagram tegangan-regangan, Visual Basic 2015

1. PENDAHULUAN

Umumnya struktur perlu perkuatan bilamana terjadi perubahan fungsi pada bangunan atau elemen-elemen strukturnya dirancang dengan beban yang lebih rendah dari standar yang sudah ditetapkan. Hal ini akan mengakibatkan kerusakan atau kegagalan pada struktur utama seperti balok, kolom, maupun dinding geser. Akan tetapi, yang perlu dijadikan perhatian utama saat ini adalah pada struktur kolom mengingat karena kita perlu mendesain kolom agar lebih kuat daripada balok (*strong column weak beam*). Untuk memperkuat struktur kolom dapat dilakukan dengan berbagai macam cara, yaitu dengan memperbesar dimensi komponen struktural, mengurangi bentang antar kolom, menambahkan plat baja, hingga memakai *Fiber-Reinforced Polymer* (FRP). Penambahan FRP sendiri pada struktur kolom dapat berupa *confinement* yang bisa menambah kuat tekan dan daktilitas kolom yang dikecangkannya. Mudah cara pengaplikasiannya, mempunyai dimensi yang kecil dan relatif ringan sehingga tidak menambahkan beban mati pada struktur, dan mempunyai kekuatan besar merupakan contoh nilai positif yang dimiliki oleh FRP. Oleh karena itu, penulis ingin membuat sebuah program yang dapat digunakan untuk membantu perhitungan perkuatan kolom persegi maupun lingkaran dengan FRP sesuai dengan ACI

¹ Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil, Universitas Kristen Petra Surabaya, m21414191@john.petra.ac.id.

² Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil, Universitas Kristen Petra Surabaya, m21414219@john.petra.ac.id.

³ Dosen Program Studi Teknik Sipil, Universitas Kristen Petra Surabaya, pamuda@petra.ac.id.

⁴ Dosen Program Studi Teknik Sipil, Universitas Kristen Petra Surabaya, gunawanbw@petra.ac.id.

440.2R-17. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui cara penyelesaian kasus yang dikerjakan oleh program sehingga kita dapat tahu kebutuhan FRP yang diperlukan serta kapasitas kolom dalam memikul beban. Manfaat program ini kedepannya diantaranya untuk Universitas Kristen Petra, dunia pendidikan, maupun dalam industri konstruksi.

2. LANDASAN TEORI

2.1. Umum

Kapasitas dari kolom dapat diketahui dengan membandingkan diagram interaksi $\Phi P_n - \Phi M_n$ terhadap gaya aksial-lentur dan memeriksa regangan tekan maksimum pada kolom. Dengan perkuatan menggunakan FRP *confinement*, kegagalan kolom karena 2 ketentuan tersebut dapat dicegah.

2.2. Pemilihan Material FRP berdasarkan ACI 440.2R-17 ch.9.3

Terdapat 3 jenis material FRP yang umum digunakan yaitu GFRP (FRP Kaca), AFRP (FRP Aramid), dan CFRP (FRP Karbon).

2.3. Rekomendasi Desain berdasarkan ACI 440.2R-17 ch.9

Kapasitas struktur yang belum diperkuat harus memenuhi persyaratan yang dituliskan dalam ACI 440.2R-17 *eq.9.2* dan *eq.9.2.1a* sebagai berikut:

$$(\Phi R_n)_{existing} \geq (1,1S_{DL} + 0,75S_{LL})_{new} \quad (1)$$

$$(\Phi R_n)_{existing} \geq (1,1S_{DL} + 1,0S_{LL})_{new} \quad (2)$$

$$(\Phi R_n)_{existing} \geq (1,0S_{DL} + 1,0S_{LL})_{new} \quad (3)$$

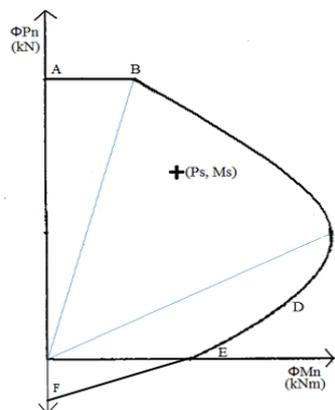
Dimana :

$(\Phi R_n)_{existing}$ = kapasitas nominal struktur yang belum diperkuat

S_{DL} = beban mati yang akan diberikan pada struktur

S_{LL} = beban hidup yang akan diberikan pada struktur

Perkuatan FRP diijinkan jika kombinasi aksial tekan-lentur dari beban yang terfaktor dengan Persamaan (1) sampai Persamaan (3) yaitu titik (P_s, M_s) jatuh di dalam diagram $\Phi P_n - \Phi M_n$ dari struktur *existing* (yang belum diperkuat). Ilustrasi tersebut dapat dilihat pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Titik (P_s, M_s) pada Diagram Interaksi $\Phi P_n - \Phi M_n$

2.4. Efek Penggunaan FRP *Confinement* berdasarkan ACI 440.2R-17 ch.12.1

Pada struktur kolom, ada beberapa hal yang terjadi akibat penggunaan FRP *confinement* pada kolom yang ingin diperkuat yaitu :

1. Terjadi peningkatan kuat tekan (f'_c) menjadi (f'_{cc}) terhadap tegangan beton dan regangan maksimum beton (ϵ_{cu}) menjadi (ϵ_{ccu}) ketika diberikan FRP. Peningkatan tersebut dapat dihitung dengan menggunakan ACI 440.2R-17 *eq.12.1g* dan *eq.12.1j*.

- Adanya aksi *confinement* yang diberikan oleh FRP kepada beton sehingga muncul yang disebut *confining pressure* (f_i). *Confining pressure* (f_i) ini dapat dihitung dengan menggunakan persamaan dari ACI 440.2R-17 eq.12.1h.
- Terjadi perubahan nilai dari kapasitas tekan murni ultimit (ΦP_n) yang dinyatakan melalui ACI 440.2R-17 eq.12.1a dan eq.12.1b atau bisa juga dilihat melalui persamaan (4).

$$\xi \Phi P_n = \xi \Phi [0,85 f'_{cc} (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}] \quad (4)$$

Dimana :

- $\xi \Phi P_n$ = gaya tekan ultimit yang mampu dipikul oleh kolom beton yang diperkuat FRP (N)
- ξ = faktor tipe sengkang yang dipasang pada kolom = {(0,85 untuk *spiral*), (0,80 untuk *ties*)}
- f'_{cc} = kuat tekan beton yang dikekang oleh FRP (MPa)
- f_y = tegangan leleh baja (MPa)
- A_g = luas penampang kolom (mm^2)
- A_{st} = luas total tulangan yang berada pada penampang kolom (mm^2)
- Φ = {(0,75 untuk *spiral*), (0,65 untuk *ties*)}

2.5. Desain Kolom Beton Bertulang dengan kombinasi Aksial Tekan dan Lentur Menggunakan FRP berdasarkan ACI 440.2R-17 ch.12.2

Perhitungan yang perlu diperhatikan dalam mendesain kolom dengan FRP adalah :

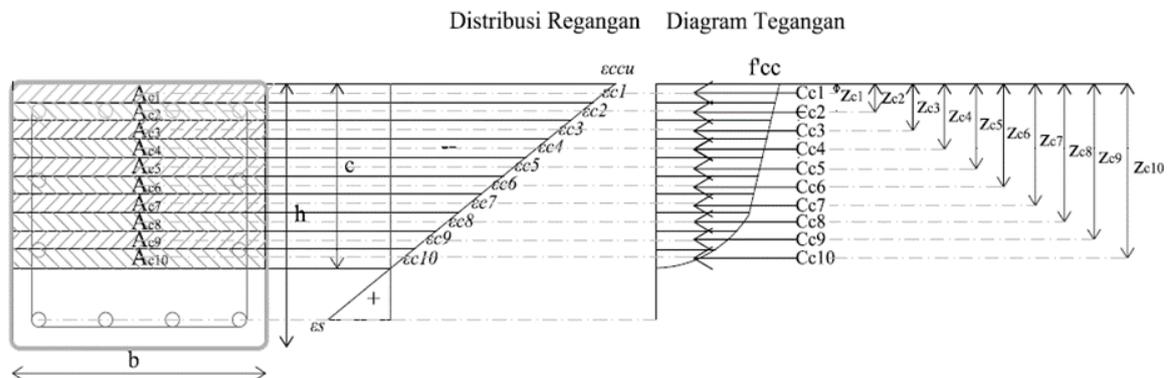
- Perhitungan regangan penampang, yaitu ketika kolom yang menerima kombinasi beban aksial-lentur akan mengalami regangan tekan dan tarik.
- Perhitungan gaya dan momen yang disumbangkan oleh baja, dapat dilakukan konversi dari regangan yang terjadi pada tulangan menjadi tegangan sesuai dengan menggunakan persamaan ACI 318M-14 ch.20.2.2.1
- Perhitungan gaya dan momen yang disumbangkan oleh beton yang dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (5) dan (6).

$$C_c = \sum_{j=1}^n C_{cj} \quad (5)$$

$$C_c = \sum_{j=1}^n [f_{ccj} (\epsilon_{cj}) \times A_{cj}] \quad (6)$$

Dimana :

- C_c = Total gaya yang disumbangkan oleh semua pias beton yang tertekan (N)
- C_{cj} = Total gaya yang disumbangkan oleh beton yang tertekan pada pias ke- j (N)
- $f_{ccj} (\epsilon_{cj})$ = nilai kuat tekan beton yang dikekang oleh FRP pada pias ke- j yang bergantung pada nilai ϵ_{sj} pada diagram tegangan-regangan (MPa)
- ϵ_{cj} = regangan tekan yang dialami beton pada pias ke- j (mm/mm)
- A_{cj} = Luas penampang beton yang mengalami tekan pada pias ke- j (mm^2)



Gambar 2. Pembagian Pias untuk Beton yang Tertekan pada Penampang yang Dikekang FRP

- Perhitungan faktor reduksi yang diambil dari persyaratan ACI 318M-14 dan juga diatur didalam ACI 440.2R-17 eq.10.2.7.

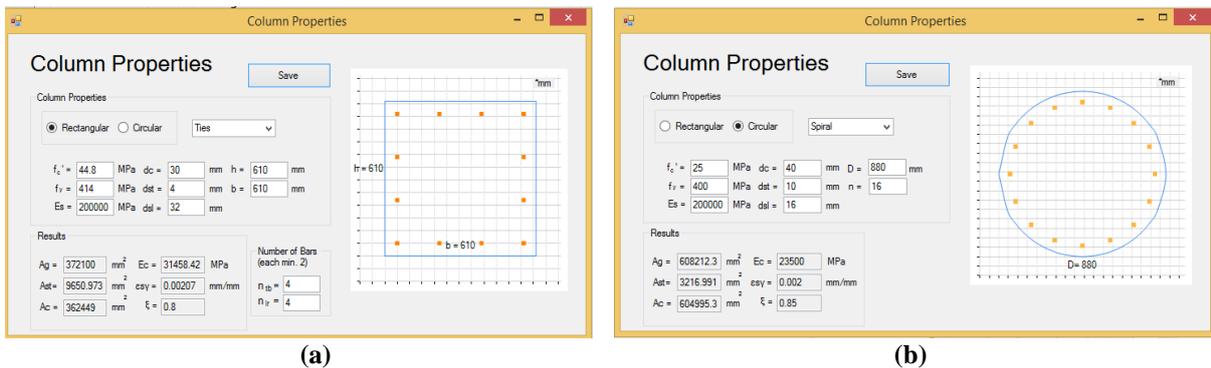
3. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian diawali dengan mempelajari referensi – referensi mengenai FRP dan membuat program dengan Visual Basic 2015. Referensi FRP utamanya diambil dari ACI 440.2R-17. Verifikasi pada program dilakukan dengan beberapa metode yakni membandingkan contoh perhitungan yang ada dalam ACI 440.2R-17 *ch.*16.9 dan pembuatan studi kasus beserta contoh perhitungannya dan dibandingkan dengan program lainnya.

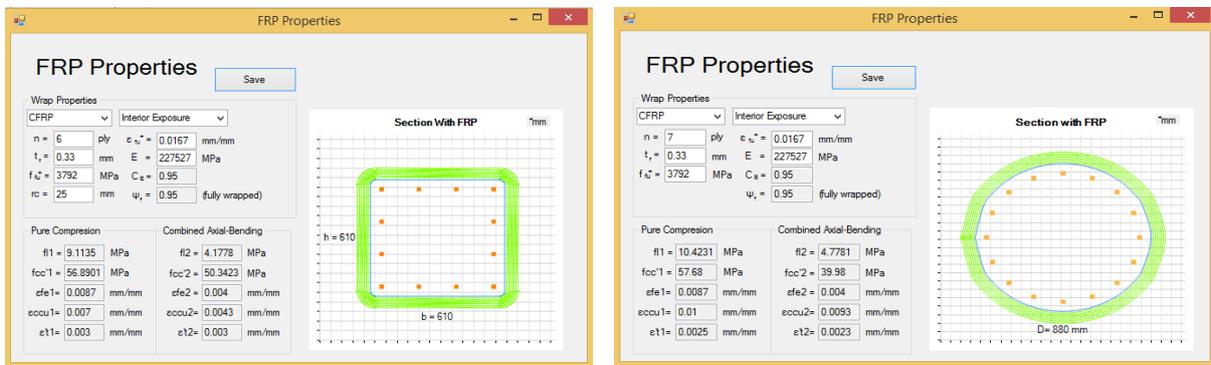
4. VERIFIKASI PROGRAM

Verifikasi yang dilakukan adalah dengan membandingkan hasil yang dikeluarkan oleh program yang telah dibuat dengan referensi dari ACI 440.2R-17 dan juga dibandingkan dengan program lainnya yaitu program *Sika Carbodur* dan *spreadsheet* dari Microsoft Excel. Selain itu, penulis juga menyertakan tampilan *form* pada program yang telah dibuat di Microsoft Visual Basic 2015. Ada 3 *form* yang terdapat pada program yaitu *form* “*Column Properties*”, *form* “*FRP Properties*”, dan *form* utama pada program.

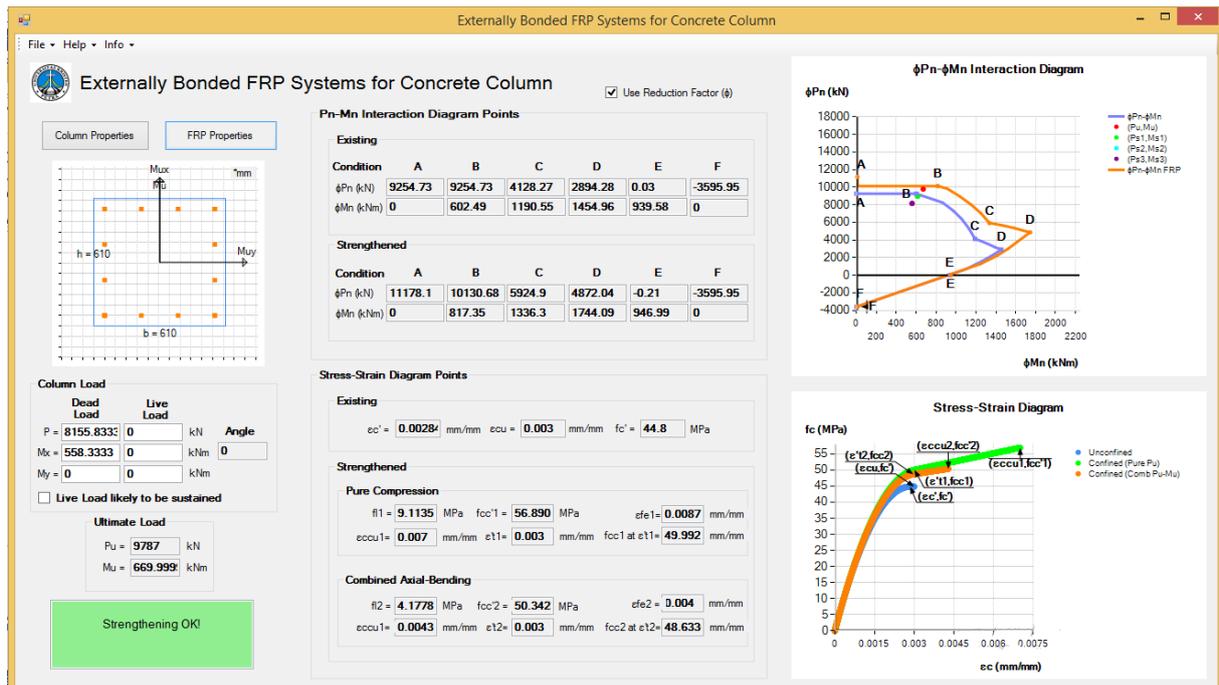
Pada *form* “*Column Properties*” (**Gambar 3**), *user* harus memasukkan data geometris kolom bertulang, mutu tulangan baja serta mutu beton dan material beton lainnya. Sedangkan pada *form* “*FRP Properties*” (**Gambar 4**), *user* diminta untuk memasukkan data mengenai FRP yang ingin digunakan sesuai dengan kebutuhan *user*. Pada *form* utama (**Gambar 5**), *user* memasukkan *input* beban yakni beban aksial, momen arah x dan momen arah y yang dibagi menjadi 2 macam beban yaitu beban hidup dan beban mati yang nantinya berpengaruh pada hasil diagram interaksi $\Phi P_n - \Phi M_n$.



Gambar 3. Tampilan Form Input Properti Kolom Beton Bertulang
 (a) Penampang Persegi (b) Penampang Lingkaran



Gambar 4. Tampilan Form Input untuk Properti FRP
 (a) Penampang Persegi (b) Penampang Lingkaran



Gambar 5. Tampilan Form Utama Setelah Melakukan Perhitungan

Pada Gambar 5, ditampilkan *output* berupa informasi diagram interaksi ΦP_n - ΦM_n dan diagram tegangan-regangan saat kondisi sebelum dan sesudah diperkuat. Fitur *output* program juga dapat mengeluarkan laporan dengan *format* file "Microsoft Word" (.docx) yang mencakup detail data *input* dan hasil *output* yang dikeluarkan oleh program.

Pertama, untuk verifikasi dilakukan terhadap kasus ACI 440.2R-17 *ch* 16.9 (Kasus 1) dengan mencoba memasukkan data-data yang ada kedalam program FRP, program *Sika Carbodur* dan *spreadsheet* Microsoft Excel. Hasil dari perhitungan yang dilakukan dari masing-masing program dan hasil dari ACI 440.2R-17 *ch* 16.9 telah dirangkum di dalam Tabel 1 - Tabel 4. Dan perbandingan hasil yang didapat dirangkum menjadi satu grafik agar bisa dilihat perbedaan dari masing-masing program baik sebelum dan sesudah diperkuat dengan ACI 440.2R-17. Grafik tersebut dapat dilihat pada Gambar 6.

Tabel 1. Hasil Verifikasi untuk Diagram Interaksi ΦP_n - ΦM_n (Sebelum Diperkuat)

Titik	Program FRP Kolom		Spreadsheet Excel		Sika Carbodur		ACI 440.2R-17	
	ΦP_n (kN)	ΦM_n (kNm)						
A	9254,73	0	9254,73	0	9242,36	0	9281	0
B	9254,73	602,49	9254,73	602,49	9242,36	528,71	8266	874
C	4128,27	1190,55	4128,27	1190,55	4081,04	1120,54	4127	1198
D	2894,28	1454,96	2894,28	1454,96	2467	1367,16	-	-
E	0	939,58	0	939,57	0	939,58	-	-
F	-3595,95	0	-3595,95	0	-3595,95	0	-	-

Tabel 2. Hasil Verifikasi untuk Diagram Tegangan-Regangan (Sebelum Diperkuat)

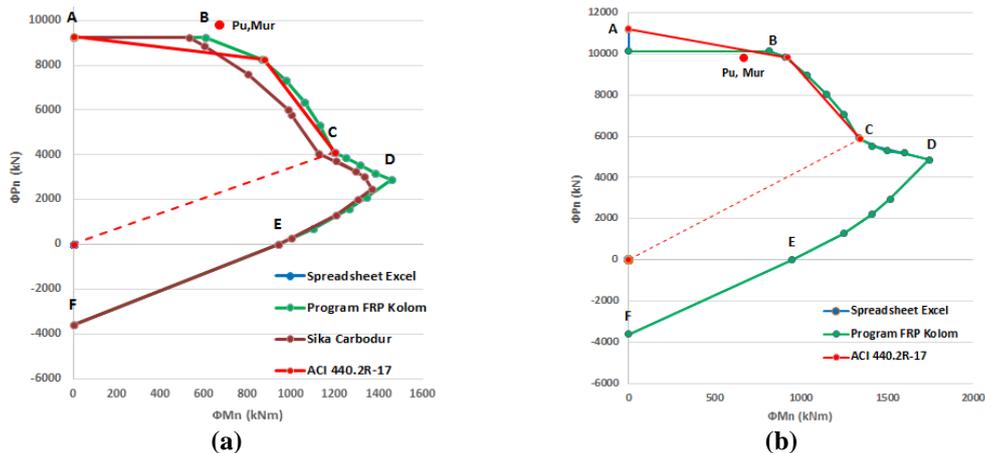
Kondisi	Program FRP Kolom	Spreadsheet Excel	Sika Carbodur
ϵ'_c (%)	0,28	0,28	0,20
ϵ_{cu} (%)	0,30	0,30	0,30
f'_c (MPa)	44,8	44,8	44,8

Tabel 3. Hasil Verifikasi untuk Diagram Interaksi ΦP_n - ΦM_n (Sesudah Diperkuat)

Titik	Program FRP Kolom		Spreadsheet Excel		ACI 440.2R-17	
	ΦP_n (kN)	ΦM_n (kNm)	ΦP_n (kN)	ΦM_n (kNm)	ΦP_n (kN)	ΦM_n (kNm)
A	11178,10	0	11178,10	0	11224	0
B	10130,68	817,350	10130,68	817,350	9829	924
C	5924,90	1336,30	5924,90	1336,30	5870	1345
D	4872,04	1744,09	4/872,04	1744,09	-	-
E	0	946,90	0	947,04	-	-
F	-3595,95	0	-3595,95	0	-	-

Tabel 4. Hasil Verifikasi untuk Diagram Tegangan-Regangan (Sesudah Diperkuat)

Kondisi	Program FRP Kolom	Spreadsheet Excel
f_t (MPa)	4,18	4,18
f_{cc} (MPa)	50,34	50,34
ε_{fe} (%)	0,40	0,40
ε_{ccu} (%)	0,43	0,43
ε'_t (%)	0,30	0,30



**Gambar 6. Perbandingan Diagram Interaksi ΦP_n - ΦM_n
(a) Sebelum Diperkuat (b) Sesudah Diperkuat**

Pembahasan :

1. Verifikasi diagram interaksi ΦP_n - ΦM_n (sesudah diperkuat) dengan *Sika Carbodur* tidak dilakukan karena properti FRP yang dapat digunakan oleh *Sika Carbodur* adalah produk dari *Sika* sendiri sedangkan program FRP kolom dan *spreadsheet* Excel telah menyesuaikan dengan *custom* dari properti FRP yang digunakan ACI 440.2R-17 *ch.16.9*.
2. Diagram interaksi ΦP_n - ΦM_n (sebelum dan sesudah diperkuat) dari program FRP kolom, *spreadsheet* Excel, dan ACI 440.2R-17 *ch.16.9*. memiliki perbedaan maksimum 0,94 %.
3. Perbedaan diagram interaksi ΦP_n - ΦM_n (sebelum diperkuat) dari program FRP kolom dan *Sika Carbodur* adalah model diagram tegangan-regangan dan metode perhitungan beton yang tertekan.

Selain itu juga, penulis telah membuat beberapa studi kasus untuk dicoba dengan program FRP kolom. Untuk beberapa kondisi lainnya, penulis membuat berbagai macam kondisi kolom, baik kolom dengan tulangan 4 sisi sama maupun berbeda dan kolom yang berbentuk persegi maupun lingkaran. Studi kasus tersebut telah penulis rangkum di dalam **Tabel 5 – Tabel 14** dan hasil masing-masing kasus tersebut adalah hasil yang berasal dari program FRP kolom yang telah dibuat.

Tabel 5. Rangkuman Properti Material Beton Bertulang pada Studi Kasus Penampang Persegi

Kasus	f'_c (MPa)	Tipe Sengkang	b (mm)	h (mm)	f_y (MPa)	ntb, nlr	E_s (MPa)	dc (mm)	dst (mm)	dsl (mm)
1	44,8	Ties	610	610	414	4, 4	200000	30	4	32
2	25	Ties	350	650	400	3, 6	200000	40	10	16
3	30	Ties	650	350	420	6, 2	200000	20	10	36
4	46	Spiral	500	500	400	6, 6	200000	40	10	19

Tabel 6. Rangkuman Beban dan Properti Material FRP pada Studi Kasus Penampang Persegi

Kasus	P_u (kN)	M_u (kNm)	Material FRP	Kondisi FRP	n (ply)	t_f (mm)	E_f (MPa)	f_{fu}^* (MPa)	r_c (mm)	ϵ_{fu}^* (%)
1	978 7	670	CFRP	Interior	6	0,330	227527	3792	25	1,67
2	309 8	178,92	CFRP	Exterior	5	0,331	235000	2961	45	1,26
3	573 8	140,65	CFRP	Aggressive	7	0,331	235000	2961	30	1,26
4	789 8	140,65	CFRP	Interior	5	0,331	235000	2961	13	1,26

Tabel 7. Hasil Diagram Interaksi ΦP_n - ΦM_n pada Studi Kasus Penampang Persegi (Sebelum Diperkuat)

Kasus	Titik	A	B	C	D	E	F
1	ΦP_n (kN)	9242,36	9242,36	4082,40	2894,28	0	-3595,95
	ΦM_n (kNm)	0	602,49	1190,55	1454,96	939,58	0
2	ΦP_n (kN)	3068,26	3068,26	1333,26	254,64	0	-1013,35
	ΦM_n (kNm)	0	153,81	247,75	240,72	208,46	0
3	ΦP_n (kN)	5522,34	5522,34	1671,03	1066,59	0	-4617,09
	ΦM_n (kNm)	0	213,51	598,79	726,72	603,74	0
4	ΦP_n (kN)	7536,21	7536,21	3156,39	1868,94	0	-2041,41
	ΦM_n (kNm)	0	262,28	687,2	698,86	421,09	0

Tabel 8. Hasil Diagram Interaksi ΦP_n - ΦM_n pada Studi Kasus Penampang Persegi (Sesudah Diperkuat)

Kasus	Titik	A	B	C	D	E	F
1	ΦP_n (kN)	11178,1	10130,68	5924,9	4872,04	0	-3595,95
	ΦM_n (kNm)	0	817,35	1336,30	1744,09	946,90	0
2	ΦP_n (kN)	3362,15	3261,67	3045,74	2424,74	0	-1013,35
	ΦM_n (kNm)	0	197,16	249,38	417,89	221,39	0
3	ΦP_n (kN)	9679,74	8342,17	3552,40	3516,22	0	-4617,09
	ΦM_n (kNm)	0	277,47	748,82	991,32	618,14	0
4	ΦP_n (kN)	8695,06	8238,88	4438,01	3150,79	0	-2041,41
	ΦM_n (kNm)	0	349,43	782,56	860,82	426,55	0

Tabel 9. Diagram Tegangan-Regangan untuk Penampang Persegi (Sebelum dan Sesudah Diperkuat)

Kasus	Sebelum Diperkuat			Sesudah Diperkuat				
	ϵ'_c (%)	ϵ_{cu} (%)	f'_c (MPa)	f_l (MPa)	f_{cc}' (MPa)	ϵ_{fe} (%)	ϵ_{ccu} (%)	ϵ'_t (%)
1	0,28	0,30	44,8	4,18	50,34	0,40	0,43	0,30
2	0,21	0,30	25	4,22	27,16	0,40	0,72	0,22
3	0,23	0,30	30	5,90	59,85	0,40	0,52	0,30
4	0,29	0,30	46	4,40	51,34	0,40	0,42	0,30

Tabel 10. Rangkuman Properti Material Beton Bertulang pada Studi Kasus Penampang Lingkaran

Kasus	f'_c (MPa)	Type Sengkang	D (mm)	f_y (MPa)	n	E_s (MPa)	dc (mm)	dst (mm)	dsl (mm)
5	44,8	Spiral	800	414	25	200000	30	10	25
6	25	Ties	600	400	9	200000	40	10	16

Tabel 11. Rangkuman Beban dan Properti Material FRP pada Studi Kasus Penampang Lingkaran

Kasus	P_u (kN)	M_u (kNm)	Material FRP	Kondisi FRP	n (ply)	t_f (mm)	E_f (MPa)	f_{fu}^* (MPa)	ϵ_{fu}^*
5	5165	2067,3	CFRP	Interior	7	0,331	235000	2961	0,0126
6	3205	327,15	CFRP	Exterior	6	0,331	235000	2961	0,0126

Tabel 12. Hasil Diagram Interaksi ΦP_n - ΦM_n pada Kasus Penampang Lingkaran (Sebelum Diperkuat)

Kasus	Titik	A	B	C	D	E	F
5	ΦP_n (kN)	15143,3 9	15143,39	6284,06	2702,52	0	-4572,49
	ΦM_n (kNm)	0	797,45	1899,33	1916,65	1387,94	0
6	ΦP_n (kN)	3480,71	3480,71	1770,91	1086,92	0	-651,44
	ΦM_n (kNm)	0	198,1	325,74	343,21	157,45	0

Tabel 13. Hasil Diagram Interaksi ΦP_n - ΦM_n pada Kasus Penampang Lingkaran (Sesudah Diperkuat)

Kasus	Titik	A	B	C	D	E	F
5	ΦP_n (kN)	22608,9 5	19679,31	14415,96	11327,13	0	-4572,49
	ΦM_n (kNm)	0	1291,77	2311,04	3059,05	1467,24	0
6	ΦP_n (kN)	7048,02	5903,13	4746,94	4902,27	0	-651,44
	ΦM_n (kNm)	0	294,33	448,15	701,24	168,38	0

Tabel 14. Diagram Tegangan-Regangan untuk Penampang Lingkaran (Sebelum dan Sesudah Diperkuat)

Kasus	Sebelum Diperkuat			Sesudah Diperkuat				
	ϵ'_c (%)	ϵ_{cu} (%)	f'_c (MPa)	f_l (MPa)	f_{cc}' (MPa)	ϵ_{fe} (%)	ϵ_{ccu} (%)	ϵ'_t (%)
5	0,28	0,30	44,8	5,45	61,87	0,40	0,70	0,31
6	0,21	0,30	25	6,22	44,51	0,40	1,00	0,23

5. KESIMPULAN

Program FRP kolom ini telah terverifikasi dengan ACI 440.2R-17 *ch.16.9.*, *spreadsheet* Excel, dan *Sika Carbodur*. Fitur dari program ini yaitu bisa menghitung kebutuhan FRP untuk penampang persegi panjang dan lingkaran, membuat diagram interaksi ΦP_n - ΦM_n akibat beban aksial dan lentur 2 arah, dan dapat menggunakan material FRP umum sesuai kebutuhan pengguna program.

6. DAFTAR REFERENSI

- ACI Committee 318. (2014). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-14) and Commentary (ACI 318RM-14)*. Farmington Hills, MI, U.S.A.
- ACI Committee 440. (2017). *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures (ACI 440.2R-17)*. Farmington Hills, MI, U.S.A.
- Sika Colombia S.A.S (2015). *User Guide Sika Carbodur Calculation Software Based On ACI 440.2R-08*. Vereda Canavita Km. 20.5, Autopista Norte.