

Implementasi Konstruksi Berkelanjutan Pada Penanganan Bangunan Pasca Kebakaran Dengan *Fiber Reinforced Polymer (FRP)* Dan *Jacketing* (Studi Kasus Pada Pasar 'X' Semarang)

Stefanus Erik Susanto¹, Ivan Hidayat¹, Hermawan^{2,3}, David Widiyanto² dan Albertus Kriswandhono⁴

¹Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil Universitas Katolik Soegijapranata

Email: stefanuserik.se@gmail.com; ivanhidayat97@gmail.com

²Staf Pengajar Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil Universitas Katolik Soegijapranata,

³Anggota Kelompok Peneliti Manajemen Konstruksi Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik

Universitas Katolik Soegijapranata, Jl. Pawiyatan Luhur IV/1 Bendan Dhuwur Semarang 50234

Email: hermawan.mrk@gmail.com

⁴Founder & Peneliti ERTIM Conservation Institute

Jl Letjen Soeprapto No. 44, Kawasan Kota Lama Semarang

Email: ertim.indo@gmail.com

Abstrak

Prinsip utama dalam keberlanjutan adalah tercapainya perbaikan kualitas hidup manusia melalui perbaikan sosial, ekonomi dan lingkungan. Prinsip tersebut dapat diimplementasikan pada berbagai macam bangunan. Salah satunya adalah Pasar 'X' di Semarang yang mempunyai nilai cagar budaya. Implementasi tersebut dapat diperlihatkan pada penggunaan material dalam penanganan bangunan cagar budaya pasca kebakaran. Bangunan pasca kebakaran yang dialami oleh Pasar 'X' merupakan pusat perekonomian bagi masyarakat di Semarang. Pada sisi yang lain, ada nilai kecaharbudayaan yang harus dideliver di dalam perbaikan bangunan pasca kebakaran sehingga dapat terjaga keberlanjutannya namun tetap memenuhi kaidah strukturnya. Oleh karena itu, diperlukan pemodelan untuk mencapai tujuan penelitian ini melalui perbandingan perbaikan struktur pasca kebakaran. Komponen struktur yang diteliti adalah kolom. Standar yang digunakan dalam memodelkan kedua macam perbaikan tersebut adalah ACI 440.2R-08 untuk FRP dan IS 15988 (2013) untuk concrete jacketing. Data yang diperlukan untuk memodelkan kedua macam perbaikan tersebut adalah hasil uji kuat tekan beton yang diperoleh dengan core drill dan uji kuat tarik baja tulangan dari kondisi eksisting. Selanjutnya, dimodelkan dengan menggunakan bantuan software ETABS. Hasil penelitian menunjukkan bahwa diperlukan FRP sebanyak 6 lapis tipe FRC 530 untuk kolom podium dan 3 lapis tipe FRC 530 untuk kolom tinggi terhadap kapasitas beban aksial nominal dan kapasitas momen nominal. Perbaikan dengan concrete jacketing diperlukan beton setebal 10 cm dengan tulangan utama 8 D16 mm serta dengan tulangan sengkang $\varnothing 8-75$ mm.

Kata Kunci: konstruksi berkelanjutan, pasca kebakaran, FRP, concrete jacketing

1. PENDAHULUAN

Menurut *The International Telecommunication Union (ITU)*, 2012,

salah satu aspek di dalam bangunan berkelanjutan adalah pengelolaan bangunan itu sendiri sehingga dapat menjaga keberlanjutan bangunan itu

sendiri. Pengelolaan bangunan dapat dilakukan selama masa operasional bangunan ataupun penanganan terhadap bangunan yang mengalami kerusakan pada tahap konstruksi. Salah satu upaya untuk menjaga keberlanjutan terhadap bangunan adalah perbaikan bangunan dengan mempertahankan prinsip originalitas. Konsep tersebut dapat diartikan meminimalkan intervensi terhadap dampak yang muncul akibat perbaikan yang dilakukan pada bangunan itu.

Kasus kebakaran yang terjadi pada pasar “X” telah mendisfungsikan bangunan. Struktur pasar “X” terbuat dari beton bertulang sehingga bila terkena panas di atas 250°C, beton akan mengalami retak, terkelupas (*spalling*), dan kehilangan kekuatan. Kehilangan kekuatan terjadi karena perubahan komposisi kimia secara bertahap pada pasta semennya (Tjokrodinuljo, 2000).

Menurut Ahmad dkk., (2009), adalah beton yang telah dipanasi pada 200°C selama 3 jam, kuat tekan rata – ratanya 85,83% dari beton normal. Jika dibakar sampai temperatur 400°C, kuat tekan rata – ratanya 58,40% dari beton normal. Selanjutnya pada suhu 600°C, kuat tekan rata – ratanya 35,08%. Hal ini menunjukkan bahwa dengan adanya kenaikan temperatur, kuat tekan beton akan menurun. Menurut *Concrete Society Technical Report 68*, efek kebakaran memberikan reaksi buruk terhadap elemen beton struktural. Pemanasan beton menyebabkan serangkaian perubahan mineralogi secara progresif dan perubahan kekuatan.

Menurut Obaidat (2010), penambahan lapisan FRP pada beton mampu meningkatkan kuat geser sebesar 23% dan peningkatan kuat lentur sebesar 7% sampai 33%. Beton yang dilapisi dengan FRP juga memiliki kekakuan

yang lebih tinggi daripada beton biasa. Metode pemasangan FRP memiliki kelebihan dan kelemahan. Menurut Burgoyne (2009), FRP merupakan serat yang kuat, tidak berkarat, dan tahan terhadap klorida. Penggunaan FRP mampu meningkatkan kapasitas lentur, selain itu FRP sebagai perkuatan eksternal mampu menguatkan struktur dari beban yang ekstrim seperti gempa bumi dan benturan. Pemasangan FRP memiliki kelemahan yaitu biaya pemasangannya yang FRP relatif mahal. Hal ini disebabkan harga bahan baku yang tinggi. Selain itu, pemasangan FRP harus dilaksanakan dengan teliti karena, sedikit robekan pada seratnya akan menjalar serat lainnya.

Dalam bidang teknik sipil, metode dalam perbaikan struktur bangunan selain pemasangan lapisan FRP cukup banyak, salah satunya adalah *concrete jacketing*. Ada banyak hal yang dipertimbangkan dalam pemilihan metode perbaikan seperti tingkat kerusakan, biaya, dan lahan yang ada.

Metode *concrete jacketing* dipilih karena menurut Julio dkk., (2003) perbaikan menggunakan *concrete jacketing* mampu meningkatkan kekuatan, kekakuan dan durabilitas kolom. Metode ini juga tidak memerlukan tenaga spesialis dalam pelaksanaannya. Alcoer dan Jirsa (1991), menyimpulkan bahwa penggunaan *concrete jacketing* untuk perbaikan meningkatkan kekuatan beton sebesar 65% dan peningkatan kekakuan sebesar 50%. Metode *concrete jacketing* memiliki kelebihan dan kelemahan. Menurut Okakpu (2013), metode *concrete jacketing* sangat efisien dalam meningkatkan kapasitas geser kolom dan balok. Peningkatan kuat lentur juga diperoleh akibat dari penambahan tulangan pada lapisan beton luar. Kelemahan metode ini adalah

menambah penampang elemen serta menambah berat dari struktur.

Berdasarkan penelitian-penelitian sebelumnya dan masalah kebakaran yang sering terjadi diperlukan sebuah penanganan yang tepat. Dalam menangani masalah tersebut secara ilmiah dan tepat, digunakan berbagai metode penaksiran, serta analisis secara komputasi. Oleh karena itu, pentingnya penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui perbedaan perbaikan struktur beton bertulang dengan menggunakan FRP dan *concrete jacketing*. Perbedaan tersebut dapat ditinjau dari kekuatan struktur dan selanjutnya besar biaya material yang digunakan untuk perbaikan.

2. TUJUAN

Tujuan penelitian ini adalah memperlihatkan implementasi prinsip keberlanjutan melalui perbaikan struktur bangunan pasca kebakaran pada struktur kolom beton bertulang Pasar 'X' Semarang bagian utara melalui metode pemasangan FRP dan *concrete jacketing*.

3. KAJIAN PUSTAKA

3.1. Beton Bertulang Pasca Kebakaran

Kenaikan suhu menyebabkan air bebas di beton berubah dari keadaan cair menjadi keadaan gas. Kondisi tersebut menyebabkan terjadinya perubahan pada tingkat tertentu pada saat panas ditransmisikan dari permukaan ke bagian dalam komponen beton. Kenaikan suhu menyebabkan penurunan kekuatan dan modulus elastisitas untuk struktur beton dan baja. Namun pada tingkat kekuatan dan modulus menurun bersamaan bergantung pada laju kenaikan suhu api dan sifat isolasi dari beton (Bilow dan Mahmoud, 2008).

Rochman (2006), beton yang dipanasi pada suhu antara 400 – 600°C akan mengalami penurunan kuat tekan dan kuat lentur hingga mencapai 50% dari kuat tekan sebelumnya. Penurunan ini disebabkan karena terjadinya proses dekomposisi unsur C-S-H yang terurai menjadi kapur bebas CaO serta SiO₂ yang tidak memiliki kekuatan sama sekali.

3.2. Metode Perbaikan Beton Bertulang Pasca Kebakaran

Menurut Zhang (2012), ada empat metode untuk memperbaiki dan memperkuat beton bertulang yaitu *section enlargement and concrete jacketing*, *external reinforcement*, *strengthening beams using of steel plates*, dan *unbounded external strengthening*. Metode *section enlargement and concrete jacketing* dilakukan dengan cara menambahkan lapisan beton tambahan di sekeliling beton eksisting. Metode *external reinforcement* dilakukan dengan penambahan baja tulangan eksternal pada beton. Metode *strengthening beams using of steel plates* dilakukan dengan cara menambahkan pelat baja pada bagian eksternal beton. Metode *unbounded external strengthening* dilakukan dengan cara menambahkan material baja seperti *wire rope*, *steel clamping* dan *post – tension units*. Metode *section enlargement and concrete jacketing* dapat meningkatkan kapasitas beban lebih efektif daripada metode lainnya.

Menurut Waghmare (2011), ada tiga metode *jacketing* yang dapat dilakukan pada kolom yaitu *concrete jacketing*, *steel jacketing*, dan *FRP jacketing*. Tujuan utama *jacketing* pada kolom adalah untuk menambah kuat tekan kolom, kuat geser kolom dan untuk

memenuhi desain *strong column – weak beam*.

3.3. Pemasangan FRP

FRP terdiri dari serat kekuatan tinggi yang dilekatkan pada matriks resin polimer. Serat yang biasanya digunakan dalam FRP adalah kaca, karbon dan *aramid*. Fungsi utama matriks dalam komposit adalah untuk mentransfer tekanan antara serat, untuk memberikan perlindungan terhadap pengaruh lingkungan dan untuk melindungi permukaan serat dari abrasi mekanis. Sifat mekanik komposit bergantung pada sifat serat, properti matriks, sifat ikatan serat-matriks, jumlah serat dan orientasi serat. Komposit dengan semua serat dalam satu arah disebut sebagai searah. Jika serat dianyam, atau berorientasi ke banyak arah, kompositnya disebut *bidirectional* atau *multidirectional*. Metode perbaikan dan penguatan struktur beton bertulang dengan menggunakan FRP merupakan teknik penguatan eksternal yang memiliki batas kekuatan tarik (*ultimate tensile strength*) yang cukup tinggi, sehingga metode ini dapat menjadi alternatif untuk penguatan struktur yang mengalami kerusakan akibat kebakaran, gempa, dan lain-lain (Obaidat, 2010).

Penguatan beton dengan 2 lapis FRP, 4 lapis FRP, 6 lapis FRP dan 12 lapis FRP mampu meningkatkan beban ultimit yang mampu diterima beton sebanding dengan jumlah lapisannya. Penguatan beton dengan *preloading* FRP memiliki beban ultimit lebih besar dibandingkan dengan beton yang diperkuat dengan FRP tanpa *preloading* (Rahimi dan Hutchinson, 2001). Perhitungan desain pemasangan FRP diterbitkan dalam ACI 440.2R-08 (2008) *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structure*. Desain dalam penguatan struktur dengan

FRP dapat diaplikasikan pada balok dan kolom beton. Untuk kolom beton bertulang, penguatan dengan FRP meliputi penguatan terhadap geser, beban aksial, dan momen. Langkah-langkah perhitungan sebagai berikut:

a. Menghitung desain properti material

$$f_{fu} C_E \cdot f_{fu}^* \quad (1)$$

$$\varepsilon_{fu} C_E \cdot \varepsilon_{fu}^* \quad (2)$$

Dengan f_{fu} = kuat tarik ultimit FRP, (psi atau MPa), f_{fu}^* = kuat tarik ultimit FRP yang tertera pada produk, (psi atau MPa), ε_{fu} = desain tegangan putus pada penguatan FRP (in/in' atau mm/mm'), ε_{fu}^* = desain tegangan putus ultimit pada penguatan FRP (in/in' atau mm/mm'), dan C_E = faktor reduksi lingkungan.

b. Menghitung tegangan efektif pada penguatan geser FRP

$$\varepsilon_{fe} = 0,004 \leq 0,75 \varepsilon_{fu} \quad (3)$$

Dengan ε_{fe} = tingkat tegangan efektif pada penguatan FRP mencapai kegagalan, (in/in' atau mm/mm').

c. Menentukan area penguatan FRP yang dibutuhkan

$$V_f = \frac{\Delta V_u}{\Phi(\Psi_f)} \quad (4)$$

$$A_{fv} = \frac{V_f \cdot S_f}{\varepsilon_{fe} \cdot E_f (\sin \alpha + \cos \alpha) d_f} \quad (5)$$

Dengan V_{fv} = kuat geser nominal yang disediakan FRP (lb atau N), A_{fv} = area penguatan FRP yang dibutuhkan (in² atau mm²), V_f = kuat geser nominal berdasarkan tulangan sengkang, (lb atau N), A_{fv} = luas penguatan geser FRP dengan jarak s , (in² atau mm²), ΔV_u = tegangan geser yang dibutuhkan, (kips atau kN), Φ = faktor reduksi, Ψ_f = faktor reduksi kekuatan FRP, E_f = modulus elastisitas FRP, (psi atau MPa), d_f = tebal efektif FRP untuk penguatan

lentur, (in atau mm), S_f = jarak antar lapisan perkuatan FRP, (in atau mm)

d. Menentukan jumlah pelapisan, lebar strip dan jarak

$$n = \frac{A_f}{2t_f \cdot W_f} \quad (6)$$

Dengan n = jumlah lapis FRP, t_f = ketebalan nominal 1 lapis FRP, (in atau mm), dan W_f = lebar lapisan perkuatan FRP, (in atau mm)

Perhitungan perkuatan kolom terhadap beban aksial dan momen pada intinya adalah menghitung kuat tekan dan kuat kekang lateral dari kolom kemudian digambarkan dalam diagram interaksi dengan memperhitungkan gaya-gaya yang terjadi pada beberapa kondisi aksial dan momen. Langkah-langkah perhitungan sebagai berikut:

- Menentukan kurva yang disederhanakan untuk kolom tidak diperkuat ($n = 0$ lapis). Kurva ini juga bisa didapatkan dari hasil permodelan secara komputasi ETABS.
- Menentukan kurva yang disederhanakan untuk kolom yang diperkuat

$$\Phi P_{n(A)} = \Phi 0,8(0,85f'_c(A_g - A_{st}) + f_y A_{st}) \quad (7)$$

$$\Phi P_{n(B,C)} = \Phi [(A(y_t)^3 + (B(y_t)^2 + C(y_t) + D + \sum A_{si} f_{si})] \quad (8)$$

$$\Phi M_{n(B,C)} = \Phi [(E(y_t)^4 + (F(y_t)^3 + (G(y_t)^2 + H(y_t) + I + \sum A_{si} f_{si} d_i)] \quad (9)$$

Dengan A_g = luas gross (kotor) beton, (in² atau mm²), A_{st} = luas total tulangan longitudinal, (in² atau mm²), M_n = kuat lentur nominal, (in-lb atau N-mm), A_{si} = luas lapisan ke-i tulangan longitudinal, (in² atau mm²), f_{si} = tegangan pada tulangan *nonprestressed*, (psi atau MPa), d_i = jarak dari pusat lapisan ke-i tulangan longitudinal ke

pusat penampang, (in atau mm), dan Φ = faktor reduksi kekuatan

c. Cek kurva diagram interaksi dengan kebutuhan P_u dan M_u

3.4. Concrete Jacketing

Perbaikan struktur bangunan menggunakan metode penyelubungan lapisan beton bertulang (*concrete jacketing*) merupakan salah satu teknik perbaikan pada tingkat lokal atau elemen struktur untuk meningkatkan kinerja elemen tersebut dari segi kekuatan (kapasitas momen lentur dan geser), kekakuan, dan daktilitas. Menurut Jirsa dan Alcocer (1991), jacketing pada kolom menghasilkan perilaku kolom kuat balok lemah dengan peningkatan pada *peak strength* empat kali dari kekuatan elemen eksisting. Teknik pelaksanaan metode ini adalah dengan menambahkan lapisan beton, tulangan longitudinal, dan geser pada sekeliling elemen. Kapasitas momen lentur bertambah akibat adanya tambahan tulangan longitudinal. Kapasitas geser bertambah dari akibat penambahan sengkang dengan jarak yang lebih rapat.

Menurut Julio dkk., (2003) perbaikan menggunakan *concrete jacketing* mampu meningkatkan kekuatan, kekakuan dan durabilitas kolom. Metode ini juga tidak memerlukan tenaga spesialis dalam pelaksanaannya. Menurut Alcocer dan Jirsa (1991), penggunaan *concrete jacketing* untuk perbaikan meningkatkan kekuatan beton sebesar 65% dan peningkatan kekakuan sebesar 50%.

Perhitungan *concrete jacketing* dilakukan berdasarkan rekomendasi standar India IS 15988 (2013): *Seismic Evaluation and Strengthening of Existing Reinforced Concrete Building*. Pedoman tersebut diterbitkan oleh *Bureau of Indian Standards*. Jacket beton bertulang meningkatkan kekuatan lentur

kolom dan daktilitas. Penulangan melintang atau lateral yang dipasang ke dalam jaket meningkatkan kekuatan geser dan keuletan kolom.

Perhitungan desain jaket beton kolom dan tulangan longitudinal pada intinya adalah merencanakan ketebalan dimensi jaket dan besaran tulangan yang dipasang berdasarkan pada beban aksial P dan momen M yang ditanggung kolom. Langkah-langkah dalam desain perkuatan kolom dengan *concrete jacketing* sebagai berikut:

- Menghitung beban aksial P dan momen M yang akan ditanggung oleh kolom.
- Menghitung ukuran kolom dan tulangan untuk P dan M yang ditentukan sebelumnya.
- Ukuran kolom dan jumlah tulangan kondisi eksisting dikurangkan untuk mendapat besaran beton dan tulangan jaket yang akan dipasangkan.
- Menentukan ukuran penampang kolom dan tulangan jaket yang akan dipasangkan.
- Meningkatkan besaran beton dan tulangan yang seharusnya disediakan, untuk keamanan.

$$A_c = (3/2)A'_c \text{ dan } A_s = (4/3)A'_s \quad (10)$$

Dengan A_c = luasan beton aktual yang disediakan dalam jaket pembungkus (mm^2), A_s = luasan baja aktual yang disediakan dalam jaket pembungkus (mm^2), A'_c = luasan beton yang diperoleh untuk jaket pembungkus setelah dikurangi beton dan tulangan kondisi eksisting (mm^2), dan A'_s = luasan baja yang diperoleh untuk jaket pembungkus setelah dikurangi beton dan tulangan kondisi eksisting (mm^2).

Pengikat lateral atau sengkang dibutuhkan untuk menghindari kegagalan geser lentur pada kolom dan memberikan sifat mengikat pada tulangan longitudinal yang memadai. Desain pengikat lateral atau sengkang, dijabarkan sebagai berikut:

$$s = \frac{f_y \times d_h^2}{\sqrt{f_c'k} \times t_j} \quad (11)$$

Dengan, s = jarak antar sengkang (mm), f_y = tegangan leleh baja (N/mm^2), $f_c'k$ = kuat tekan beton karakteristik (N/mm^2), t_j = ketebalan jaket (mm), dan d_h = diameter tulangan longitudinal (mm).

4. METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini dapat diperlihatkan pada Gambar 1.



Gambar 1 Metode penelitian

Obyek dari penelitian ini adalah Pasar 'X' di Semarang. Pasar tersebut merupakan bangunan cagar budaya yang masih aktif digunakan sebagai kegiatan perekonomian.

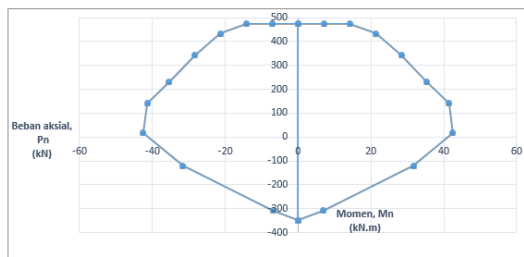
5. PEMBAHASAN

Data kolom diperlihatkan pada Tabel 2

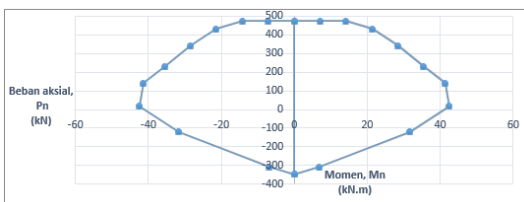
Tabel 2 Data kolom

Uraian	Diameter kolom	Diameter tulangan geser	Jarak antar tulangan geser	Diameter tulangan utama	Jumlah	f_c'	f_y
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		(MPa)	(MPa)
Kolom podium	430	8	150	16	8	4,35	240
Kolom tinggi	430	8	150	16	8	1,25	240

Data kolom tersebut kemudian dimodelkan berdasarkan denah Pasar “X” dengan bantuan *software* ETABS. Berdasarkan pemodelan ETABS didapat diagram interaksi kolom yang diperlihatkan pada Gambar 2 dan Gambar 3.



Gambar 2 Diagram interaksi kolom podium



Gambar 3 Diagram interaksi kolom tinggi

Selain diagram interaksi, pemodelan ETABS juga menghasilkan nilai kapasitas beban aksial (P_n), kapasitas momen lentur (M_n) dan kapasitas geser (ΔV) yang dibutuhkan. Nilai kapasitas beban aksial, kapasitas momen lentur, dan kapasitas geser yang dibutuhkan dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3 Nilai kapasitas beban aksial, kapasitas momen lentur dan kapasitas geser yang dibutuhkan

Uraian	Kapasitas beban aksial	Kapasitas Momen lentur	Kapasitas geser
	kN	kN	kN
Kolom podium	1.618,58	65,405	27,02
Kolom tinggi	860,22	53,37	0,22

5.1 Pemasangan FRP

Jenis FRP yang digunakan adalah FRP berjenis *carbon* FRC 530 dari Fosroc International Ltd. Data FRP FRC 530 diperlihatkan pada Tabel 4.

Tabel 4 Data FRP FRC 530

Tipe FRP	Ketebalan per lapisan	Modulus elastisitas	Kuat tarik	Kuat tarik ultimit	Tegangan putus ultimit
	(mm)	(kgf/cm ²)	(kgf/cm ²)	(kgf/cm ²)	(%)
FRC 530	0,293	2.350.000	1.050	35.500	2,1

Data yang diperlihatkan di atas digunakan untuk melakukan perhitungan perkuatan geser, perkuatan terhadap beban aksial serta momen lentur. Hasil perhitungan perkuatan geser pada kolom dengan FRP FRC 530 diperlihatkan pada Tabel 5.

Tabel 5 Hasil perhitungan perkuatan geser pada kolom dengan FRP FRC 530

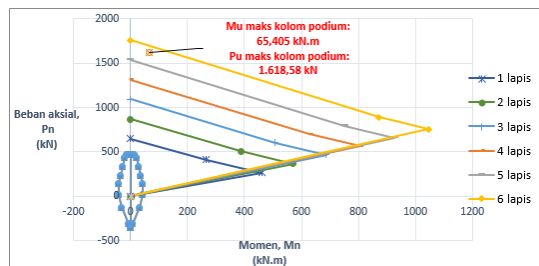
Uraian	ΔV	f_{fu}	ϵ_{fu}	V_f	A_{fv}	n
	(kip)	(psi)	(in/in')	(kip)	(in ²)	lapis
Kolom podium	6,07	504.928,69	0,21	7,52	7,20E-07	1
Kolom tinggi	0,05	504.928,69	0,21	0,06	6,05E-09	1

Hasil perhitungan perkuatan terhadap beban aksial dan momen lentur pada kolom dengan FRP FRC 530 diperlihatkan pada Tabel 6.

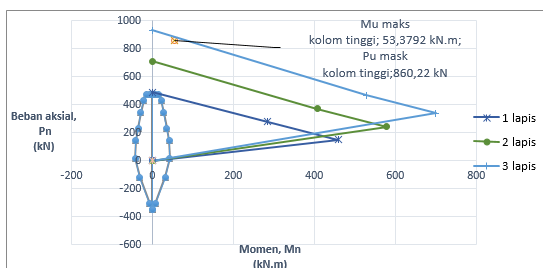
Tabel 6 Hasil perhitungan kekuatan terhadap beban aksial dan momen lentur pada kolom dengan FRP FRC 530

	n	$\Phi P_{n(A)}$ / $\Phi M_{n(A)}$		$\Phi P_{n(B)}$ / $\Phi M_{n(B)}$		$\Phi P_{n(C)}$ / $\Phi M_{n(C)}$	
		kN	kN-m	kN	kN-m	kN	kN-m
Kolom podium	1	647,25	0	411,00	266,09	267,49	461,03
	2	869,44	0	508,13	387,09	369,09	570,70
	3	1091,62	0	604,34	508,34	467,07	687,29
	4	1313,80	0	700,29	629,66	563,96	806,08
	5	1535,99	0	796,12	751,01	660,38	925,84
	6	1758,17	0	891,89	872,39	756,55	1046,12
Kolom tinggi	1	487,31	0	276,41	285,01	147,74	458,30
	2	709,50	0	372,14	406,40	243,97	578,35
	3	931,68	0	467,82	527,80	339,82	699,28

Selanjutnya, perhitungan kekuatan terhadap beban aksial dan momen lentur dilakukan, kemudian digambarkan diagram interaksi yang disederhanakan berdasarkan hasil perhitungan. Diagram interaksi ini kemudian dibandingkan dengan diagram interaksi kolom sebelum diperkuat dengan FRP.



Gambar 3 Diagram interaksi perbandingan antara kolom podium sebelum diperkuat dan setelah diperkuat dengan FRP



Gambar 4 Diagram interaksi perbandingan antara kolom tinggi sebelum diperkuat dan setelah diperkuat dengan FRP

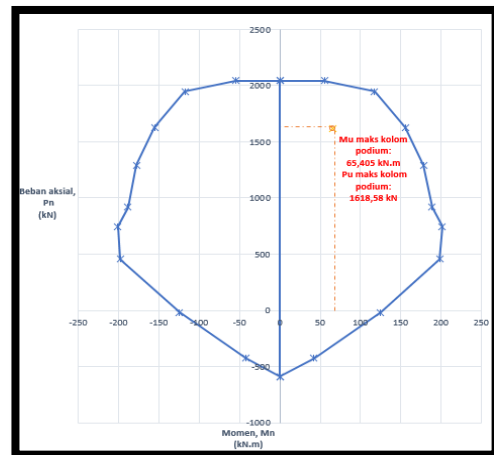
5.2. Concrete Jacketing

Pada Tabel 7 diperlihatkan hasil perhitungan kekuatan *concrete jacketing*.

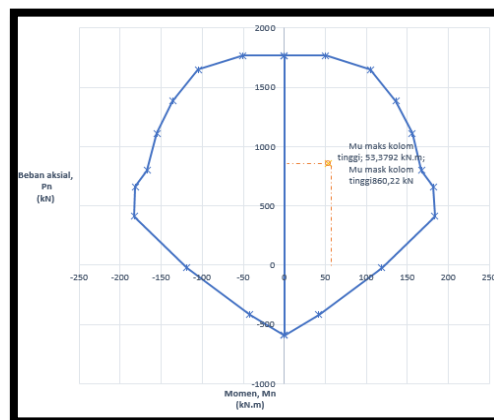
Tabel 7 Hasil perhitungan kekuatan dengan *concrete jacketing*

Kolom	A'c	A's	Ac	As	Tebal jaket dipakai	Tulangan utama tambahan	Tulangan sengkang
	(mm ²)	(mm ²)	(mm ²)	(mm ²)	(mm)	(mm)	(mm)
Kolom podium	11.304	678,24	16.956	904,32	100	8 D16	Ø8-75
Kolom tinggi	11.304	678,24	16.956	904,32	100	8 D16	Ø8-75

Pada Gambar 5 dan 6 diperlihatkan gambar diagram interaksi kolom podium dan kolom tinggi setelah diperkuat dengan *concrete jacketing*



Gambar 5 Diagram interaksi kolom podium setelah diperkuat dengan *concrete jacketing*



Gambar 6 Diagram interaksi kolom tinggi setelah diperkuat dengan *concrete jacketing*

6. KESIMPULAN

Berdasarkan penjabaran di atas, maka dapat disimpulkan:

- a. Perbaikan pada kolom podium dibutuhkan 6 lapis FRC 530 untuk memenuhi kebutuhan kapasitas beban Pu dan Mu.
- b. Perbaikan pada kolom tinggi diperlukan 3 lapis FRC 530 untuk memenuhi kebutuhan kapasitas beban Pu dan Mu.
- c. Perbaikan menggunakan metode *concrete jacketing* untuk kolom podium dan kolom tinggi dengan tebal jaket 100 mm, tulangan utama 8 D16 dan sengkang Ø8 – 75 mampu memenuhi kebutuhan kapasitas beban Pu dan Mu.
- d. Perbaikan pada kolom struktur pasca kebakaran dimungkinkan menggunakan kombinasi kedua metode tersebut.
- e. Kedua metode perbaikan tersebut dilaksanakan dengan tujuan untuk meminimalkan intervensi terhadap penanganan kerusakan bangunan yang termasuk sebagai cagar budaya. Minimal intervensi merupakan salah satu bentuk implementasi konstruksi berkelanjutan agar *value* nilai kecaharbudayaan pada bangunan tersebut tetap terjaga.

7. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada ERTIM Conservation Institute atas kontribusi-nya yang sangat besar dalam dukungan data dan diskusi dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

ACI 440.2R-08. 2008: *Guide for The Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*.

Ahmad, I. A., Nur A. S. T., dan Abdul H. A. 2009: Analisis Pengaruh Temperatur Terhadap Kuat Tekan Beton. *Jurnal Teoretis dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil* 16 (2), 63-70.

Alcoer, S. M., dan Jirsa O. J. 1991: *Reinforced Concrete Frame Connection Rehabilitated by Jacketing*. National Science Foundation. PMF Report 91-1.

Bilow, D. N dan Mahmoud E. K. 2008: Fire and Concrete Structure. *ASCE Structures 2008, Crossing Borders*.

Burgoyne, C. 2009: Fibre Reinforced Polymers - Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats. *Proceedings of the Ninth International Symposium of the Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures. (FRPRCS)*, Sydney. Australia.

Concrete Society. Assessment, Design and Repair of Fire-Damaged Concrete Structures. The Concrete Society, Camberley, 2008, technical report 68. Dalam Ingham, J. (2009): Forensic Engineering of Fire-Damaged Structures. *Proceeding of ICE Civil Engineering*, 162, 12-17.

Fosroc. Nitowrap FRC, (Online), (<http://www.fosroc.com/assets/productDatashets/TDS-Nitowrap-FRC-Saudi-Arabia.pdf>, diakses 8 Maret 2018).

IS 15988. 2013: *Seismic Evaluation and Strengthening of Existing Reinforced Concrete Buildings - Guidelines*. Indian Standard.

ITU. 2012: *Sustainable Buildings*.

Julio, E. S., Branco, F., dan Silva, V.D. 2003: Structural Rehabilitation of Columns with Reinforced Concrete Jacketing. *Program Structure Engineering Material*. 5, 29-37.

Obaidat, Y. T. 2010: *Structural Retrofitting of Reinforced Concrete*

- Beams Using Carbon Fibre Reinforced Polymer.* Ph.D. Dissertation of Lund University. ISRN LUTVDG/TVSM--10/3070--SE (1-76) ISSN 0281-6679.
- Okakpu, A. I. 2013: *Evaluation and Comparison of Strengthening Methods to Deliver a Safe, Efficient and Economical Solution.* Master Thesis. Eastern Mediterranean University. Gazimağusa. North Cyprus.
- Rahimi, H., dan Hutchinson, A. 2001: Concrete Beams Strengthened with Externally Bonded FRP Plates. *Journal of Composites for Construction.* 5 (1), 44-56.
- Rochman, A. 2006: Gedung Pasca Bakar Estimasi Kekuatan Sisa dan Teknologi Perbaikannya. *Jurnal Dinamika Teknik Sipil.* 6 (2), 94-100.
- Tjokrodimulyo, K. 2000: Pengujian Mekanik Laboratorium Beton Pasca Bakar, Yogyakarta:Nafri. Dalam Jurnal Ahmad, I.A., Nur A.S.T., dan Abdul H.A. 2009: *Analisis pengaruh temperatur terhadap kuat tekan beton.* Jurnal. Makasar: Jurnal Teoretis dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil. 16 (2), 63-70.
- Waghmare, S. P. B. 2011: Materials and Jacketing Technique for Retrofitting of Structures. *International Journal of Advanced Engineering Research and Studies.* 1 (1), 15-19.
- Zhang, Y. 2012: *Repair and Strengthening of Reinforced Concrete Beams.* Master Thesis. The Ohio State University. Ohio.