

EFFECT OF HIGH TEMPERATURE ON THE BEHAVIOR OF FIBER REINFORCED POLYMER CONFINED HIGH STRENGTH CONCRETE CYLINDERS

EFEK TEMPERATUR TINGGI PADA PERILAKU CYLINDER BETON MUTU TINGGI YANG DIBUNGKUS DENGAN FIBER REINFORCED POLYMER

Butje Alfonsius Louk Fanggi

Staf Pengajar pada Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Kupang, Kupang-NTT
Jln. Adi Sucipto-Penfui, Kupang-NTT, 85001, E-mail: butje_75@yahoo.co.id

ABSTRACT

This research is purpose to investigate the effect of high temperature on the behavior of Fiber Reinforced Polymer (FRP) confined concrete cylinders. Ten unreinforced concrete cylinders with 60 MPa of concrete on twenty eight days having 100 mm diameter and 200 height were casted and eight of them wrapped with Carbon FRP (CFRP) and Glass FRP (GFRP). Moreover these cylinders were divided into two groups: room temperature group used as reference group and group of prolonged high temperature. Each group was consist of five cylinders: one cylinder wrapped with no layer of FRP, one cylinder wrapped with one layers of CFRP, one cylinder wrapped with two layers of CFRP, one cylinder wrapped with one layer of GFRP, and one cylinder wrapped with two layers of GFRP. After 30 days in room with temperature 20°C for cylinders in room temperature group and oven with temperature 70°C for cylinders in prolonged high temperature group, all cylinders were tested by application of an axial concentric loading until failure. This study indicated that prolonged high temperature did not significantly influence ultimate strength of cylinder wrapped with no layer of FRP and with FRP. Exception was experienced on cylinder wrapped with 1 layer of GFRP where its ultimate strength increased. There was no significantly affect observed on ultimate deflection of cylinder wrapped with no layer of FRP and 1 layer of GFRP. Meanwhile ultimate deflection of cylinder wrapped with 1 layer of CFRP decreased but ultimate deflection of cylinder wrapped with 2 layers of GFRP increased. Capacity of cylinder to absorb energy at maximum load of cylinder wrapped with no layer of FRP and with FRP increased where exception was observed on cylinder wrapped with 2 layer of CFRP. Total energy absorption before cylinder collapse increased for cylinder wrapped with no layer of FRP and with 1 and 2 layers of GFRP, but decreased for cylinder wrapped with 1 and 2 layers of CFRP.

Keywords: high temperature, prolonged high temperature, concrete cylinder, strength, deflection, energy absorption.

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menginvestigasi efek temperatur tinggi pada perilaku Fiber Reinforced Polymer (FRP) membungkus silinder beton. Sepuluh silinder beton tak bertulang dengan kuat tekan 60 MPa pada umur 28 hari dengan ukuran diameter 100 mm dan tinggi 200 mm dicetak dan 8 diantaranya dibungkus dengan Carbon FRP (CFRP) dan Glass FRP (GFRP). Selanjutnya silinder dibagi ke dalam 2 group: group temperatur ruang sebagai group referensi dan group temperatur tinggi berkepanjangan. Setiap group terdiri dari 5 silinder yaitu: satu silinder tidak dibungkus dengan FRP, satu silinder dibungkus dengan 1 lapis CFRP, satu silinder dibungkus dengan 2 lapis CFRP, satu silinder dibungkus dengan 1 lapis GFRP, dan satu silinder dibungkus dengan 2 lapis GFRP. Setelah 30 hari ditempatkan dalam ruang dengan temperatur 20°C bagi silinder dalam group temperatur ruang dan dalam oven dengan temperatur 70°C bagi silinder dalam group temperatur tinggi berkepanjangan, seluruh silinder dites dengan menggunakan beban tekan terpusat hingga hancur. Hasil penelitian ini megindikasikan bahwa temperatur tinggi berkepanjangan tidak secara signifikan mempengaruhi kekuatan ultimit dari silinder yang tidak dibungkus maupun dibungkus dengan FRP. Pengecualian terjadi pada silinder yang dibungkus dengan 1 lapis GFRP dimana kekuatan ultimitnya meningkat. Tidak ada efek yang signifikan pada lendutan ultimit dari silinder yang tidak dibungkus dengan FRP dan yang dibungkus dengan 1 lapis GFRP. Sementara lendutan ultimit dari silinder yang dibungkus dengan 1 lapis CFRP menurun sebaliknya silinder yang dibungkus dengan 2 lapis GFRP meningkat. Kapasitas menyerap energi pada beban maksimum dari silinder yang tidak dibungkus maupun yang dibungkus dengan FRP meningkat semetara pengecualian terjadi pada silinder yang dibungkus dengan 2 lapis CFRP. Total energi yang diserap sebelum silinder hancur meningkat bagi silinder yang tidak dibungkus maupun yang dibungkus dengan 1 dan 2 lapis GFRP, sebaliknya menurun bagi silinder yang dibungkus dengan 1 dan 2 lapis CFRP.

Kata-kata kunci: temperatur tinggi, temperatur tinggi berkepanjangan, silinder beton, kekuatan, lendutan, energi yang diserap.

PENDAHULUAN

Penggunaan FRP sebagai material untuk membungkus beton sangat populer dewasa ini. Metode ini memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan metode konvensional seperti *steel jacket* yaitu mudah diaplikasikan di lapangan, biaya material murah, memiliki kekuatan tinggi, dan ringan (El-Hacha et al., 2010). Karena itu, FRP telah digunakan secara luas, khususnya untuk perkuatan dan perbaikan struktur yang lemah atau perkuatan struktur yang baru (Sadhegian et al., 2010).

Studi tentang FRP membungkus beton pada temperatur lingkungan ekstrim telah banyak dilakukan. Green et al. (2004) meneliti efek kondisi ekstrim pada perilaku FRP membungkus

beton dimana cuaca dingin, korosi, dan kebakaran adalah kondisi ekstrimnya. Selanjutnya cuaca dingin dibagi kedalam daerah temperatur rendah dan daerah *freeze-thaw*. Untuk tes daerah temperatur rendah, enam silinder (dua tidak dibungkus dan empat dibungkus dengan satu dan dua lapis CFRP-A) ditempatkan pada temperatur -18°C selama 200 hari, kemudian dites pada temperatur ruang. Sementara sembilan silinder (tiga tidak dibungkus dan enam dibungkus) ditempatkan pada temperatur ruang sebagai spesimen kontrol, dan enam belas silinder (dibungkus dengan satu lapis CFRP-B dan dua lapis GFRP-A) ditempatkan pada temperatur -40°C dan temperatur ruang selama 16 hari dan kemudian dites sesegera mungkin setelah dikeluarkan dari tempat pembekuan (-40°C). Setiap silinder memiliki ukuran yang sama

yaitu diameter 152 mm dan tinggi 305 mm, notasi A dan B menunjukkan pabrik yang memproduksi material CFRP dan GFRP tersebut. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa silinder pada temperatur rendah yang dibungkus dengan CFRP-A tidak mengalami penurunan kekuatannya bahkan mengalami peningkatan sebesar 14% pada temperatur -40°C . Untuk *freeze-thaw* tes, 63 silinder dengan ukuran diameter 152 mm dan tinggi 305 mm dibungkus dengan CFRP-A dan GFRP-B ditempatkan pada 250 kali siklus *freeze-thaw* dimana satu siklus terdiri atas 16 jam pada udara dengan temperatur -18°C dan 8 jam berada dalam air dengan temperatur $+15^{\circ}\text{C}$. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa silinder yang dibungkus dengan CFRP dan GFRP mengalami penurunan kekuatannya sebesar kurang dari 10% dan 15% sementara silinder yang tidak dibungkus mengalami penurunan kekuatan lebih lebih dari 50%.

El-hacha et al. (2010) meneliti perilaku dari silinder beton tanpa penulangan yang dibungkus dengan lembaran FRP pada sebuah lingkungan yang keras seperti temperatur tinggi, siklus panas dan dingin, dan temperatur panas berkepanjangan. Temperatur tinggi diwakili oleh temperatur $+45^{\circ}\text{C}$ selama 40 hari, siklus panas dan dingin diwakili oleh temperatur $+23^{\circ}\text{C}$ sampai $+45^{\circ}\text{C}$ sebanyak 33 siklus, dan temperatur tinggi yang berkepanjangan diwakili oleh temperatur $+45^{\circ}\text{C}$ selama 70 hari. 36 silinder dengan ukuran diameter 150 cm dan tinggi 300 cm dicetak dan dites dengan menggunakan beban tekan aksial hingga silinder-silinder tersebut hancur. Sembilan silinder tidak dibungkus dan digunakan sebagai kontrol dan 24 silinder dibungkus dengan 2 lapis lembaran CFRP. Setengah dari total silinder ditempatkan pada siklus panas dan dingin, kemudian ditempatkan pada siklus *freeze-thaw* pada temperatur -18°C sampai 23°C selama 33 siklus dan sisanya dibenamkan dalam air dingin pada temperatur $+23^{\circ}\text{C}$ selama 33 hari atau pada air asin pada temperatur $+23^{\circ}\text{C}$ selama 33 hari. Studi ini menunjukkan bahwa tidak ada perbedaan yang signifikan pada kekuatan dari silinder beton yang dibungkus maupun yang tidak dibungkus dengan FRP yang ditempatkan pada siklus panas dan dingin. Sedikit efek negatif nampak pada kuat tekan baik silinder yang dibungkus atau tidak dibungkus oleh FRP yang ditempatkan pada siklus *freeze-thaw* atau dibenamkan dalam air dingin atau air asin. Kekuatan silinder yang dibungkus yang ditempatkan pada temperatur panas berkepanjangan juga tidak mengalami penurunan.

Karbari et al. (2000) meneliti efek dari siklus *freeze-thaw* pada silinder beton yang dibungkus dengan CFRP dan GFRP. Silinder dibuat dari beton dengan kuat tekan 50 Mpa dengan ukuran diameter 152.4 mm dan tinggi 304.4 mm. Setelah 28 hari dibenamkan dalam air, silinder dikeluarkan dan dibungkus dengan CFRP dan GFRP, dan kemudian ditempatkan pada temperatur ruang selama 1 bulan sebelum dites. Selanjutnya seluruh silinder dibagi ke dalam 2 group, yaitu group pertama ditempatkan pada temperatur $+22.5^{\circ}\text{C}$ dan group kedua ditempatkan pada siklus *freeze-thaw* dengan menggunakan temperatur $+22.5^{\circ}\text{C}$ sampai -20°C selama 201 kali siklus. Seluruh spesimen dites hingga hancur dengan menggunakan beban tekan aksial. Penelitian ini mengindikasikan bahwa tidak ada perubahan yang signifikan pada kekuatan ultimit dari silinder yang dibungkus setelah ditempatkan pada siklus *freeze-thaw*.

Dari penelitian di atas dan beberapa penelitian lain yang tersedia dalam berbagai literatur, perilaku beton yang dibungkus dengan FRP pada suhu antara $+45^{\circ}\text{C}$ sampai -40°C cukup dikenal dengan baik. Secara umum aplikasi FRP akan meningkatkan kekuatan dan daktilitas dari beton yang dibungkus. Namun dari beberapa riset terdahulu seperti penelitian di atas, telah terindikasi adanya degradasi pada matrix FRP dari beton yang dibungkus dengan FRP khususnya pada temperatur tinggi atau pada siklus *freeze-thaw*. Dilain pihak pemahaman terhadap perilaku beton yang dibungkus dengan FRP pada temperatur diatas $+45^{\circ}\text{C}$ masih terbatas padahal temperatur tinggi di atas $+45^{\circ}\text{C}$ telah dialami oleh banyak negara misalnya Australia dan negara-negara timur tengah.

Karena itu, tujuan dari penelitian ini adalah untuk menentukan efek temperatur tinggi berkepanjangan terhadap kekuatan, lendutan, dan energi yang diserap oleh silinder beton yang dibungkus dengan FRP.

METODE PENELITIAN

Sepuluh silinder beton tak bertulang dicetak dengan ukuran diameter 100 mm dan tinggi 200 mm. Sehari setelah dicetak, bekesting silinder dilepas dan semua silinder direndam dalam bak air untuk proses hidrasi selama 28 hari. Setelah proses hidrasi, semua silinder dikeluarkan dan 8 diantaranya dibungkus dengan FRP. Setelah itu, silinder dibagi ke dalam group temperatur ruang dan temperatur tinggi berkepanjangan dimana masing-masing group terdiri atas 5 buah silinder yaitu 1 silinder tidak dibungkus dengan FRP, 1 silinder dibungkus dengan 1 lapis CFRP, 1 silinder dibungkus dengan 2 lapis CFRP, 1 silinder dibungkus dengan 1 lapis GFRP, dan 1 silinder dibungkus dengan 2 lapis GFRP. Selanjutnya silinder dalam group temperatur ruang ditempatkan dalam ruangan dengan temperatur 20°C selama 30 hari dan silinder dalam group temperatur tinggi berkepanjangan ditempatkan dalam oven dengan temperatur 70°C selama 30 hari. Detail silinder dapat dilihat pada tabel 1.

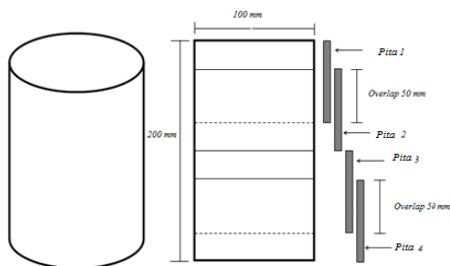
Tabel 1. Detail silinder

Temperatur	Simbol	Keterangan
Temperatur ruang	U0R	Silinder tidak dibungkus dengan FRP pada temperatur ruang
	C1R	Silinder dibungkus dengan 1 lapis CFRP pada temperatur ruang
	C2R	Silinder dibungkus dengan 2 lapis CFRP pada temperatur ruang
	G1R	Silinder dibungkus dengan 1 lapis GFRP pada temperatur ruang
	G2R	Silinder dibungkus dengan 2 lapis GFRP pada temperatur ruang
	Temperatur tinggi berkepanjangan	U0P
C1P		Silinder dibungkus dengan 1 lapis CFRP pada temperatur tinggi berkepanjangan
C2P		Silinder dibungkus dengan 2 lapis CFRP pada temperatur ruang
G1P		Silinder dibungkus dengan 1 lapis GFRP pada temperatur tinggi berkepanjangan
G2P		Silinder dibungkus dengan 2 lapis GFRP pada temperatur tinggi berkepanjangan

Pembungkusan dengan FRP dilakukan menggunakan campuran antara epoxy resin dan hardener dengan perbandingan 1:5. Sebelum dibungkus, silinder dikeringkan dengan cara diangin-anginkan dan dibersihkan dari debu. FRP yang digunakan adalah Carbon FRP (CFRP) dan Glass FRP (GFRP) yang berbentuk pita dengan lebar 10 cm. Bagi silinder yang dibungkus dengan 2 lapis FRP, lapisan ke 2 dilakukan setelah 30 menit lapisan pertama dilekatkan. Rentang waktu ini akan memberikan lekatan yang cukup pada lapisan pertama sehingga tidak bergeser saat lapisan kedua diaplikasikan. Detail dari pembungkusan dapat dilihat pada gambar 1 dibawah.

Tes dilakukan pada temperatur ruang dengan menggunakan mesin kuat tekan berkekuatan 500 ton. Beban diaplikasikan secara sentris terpusat dengan rate 0.2 mm/detik pada permukaan atas silinder. Data yang diperoleh adalah beban dan lendutan axial. Sebelum pengetesan, bagian atas atau bawah silinder yang tidak rata dicapping dengan menggunakan campuran antara plaster dan air dengan perbandingan 3.5:1. Perbandingan ini mem-

buat kekuatan capping setara dengan 80 MPa. Pengcappingan dilakukan agar beban dapat diaplikasikan secara sentris.

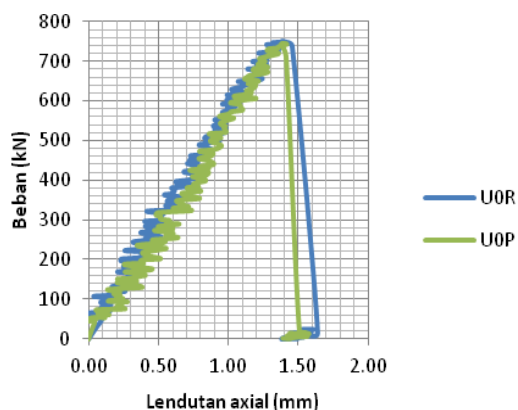


Gambar 1. Detail pengeangan/ pembungkusan

HASIL DAN PEMBAHASAN

SILINDER YANG TIDAK DIBUNGKUS DENGAN FRP (SILINDER U0R DAN U0P)

Perilaku beban dan lendutan axial silinder U0R dan U0P tampak pada gambar 2. Berdasarkan gambar 2, silinder U0P memiliki perilaku yang sama dengan silinder U0R dimana ketika beban maksimum dicapai, beban drop secara drastis tetapi lendutan ultimit meningkat. Tampak beban dan lendutan ultimit yang dicapai oleh silinder U0P lebih rendah dari silinder U0R.



Gambar 2. Kurva beban-lendutan axial silinder U0R dan U0P

Seperti nampak pada tabel 2, beban ultimit yang dicapai oleh silinder U0P lebih rendah 1% dari silinder U0R, lendutan pada beban maksimum lebih tinggi 2% dari silinder U0R, dan beban ultimit yang dicapai oleh silinder U0P lebih rendah 3% dari silinder U0R. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa efek temperatur tinggi berkepanjangan tidak signifikan mempengaruhi baik kekuatan ultimit, lendutan pada beban maksimum, dan lendutan ultimit dari silinder yang tidak dibungkus oleh FRP.

Tabel 2. Hasil Tes Silinder U0R dan U0P

Silinder	Beban ultimit (KN)	Lendutan pada beban maksimum (mm)	Lendutan ultimit (mm)
U0R	749.955	1.392	1.459
U0P	742.144	1.419	1.419

Tabel 3 menunjukkan perbandingan energi yang diserap oleh silinder U0P terhadap silinder U0R (luas daerah dibawah kurva beban-lendutan) dimana energi yang diserap pada beban maksimum dan total energi yang diserap silinder U0P lebih rendah 19.25% dan 19.12 dari silinder U0R. Karena itu dapat dikatakan

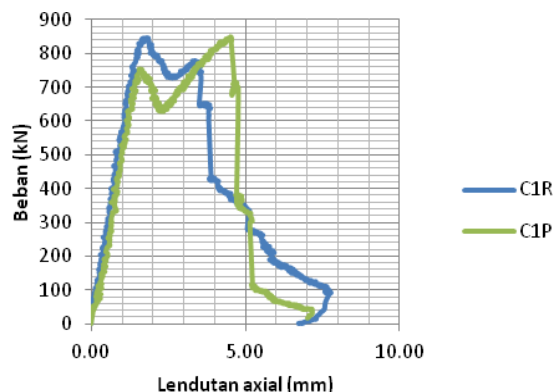
bahwa temperatur tinggi berkepanjangan menurunkan kapasitas menyerap energi baik pada beban maksimum maupun pada total energi dari silinder yang tidak dibungkus dengan FRP.

Tabel 3. Perbandingan energi yang diserap silinder U0R dan U0P

Silinder	Energi yang diserap pada beban maksimum (J)	Total energi yang diserap (J)	Peningkatan pada beban maksimum (%)	Peningkatan total energi yang diserap (%)
U0R	4.21	4.28	0.00	0.00
U0P	3.40	3.46	-19.25	-19.12

SILINDER YANG DIBUNGKUS DENGAN 1 LAPIS CFRP (SILINDER C1R DAN C1P)

Mengacu pada kurva beban-lendutan axial pada gambar 3, tampaknya silinder C1P memiliki perilaku yang sama dengan silinder C1R dimana beban meningkat secara drastis hingga mencapai puncak pertama, kemudian sedikit menurun secara perlahan dan meningkat lagi hingga mencapai puncak kedua dan terakhir drop, sedangkan lendutan ultimit meningkat. Dari gambar ini nampak bahwa efek dari pembungkusan oleh FRP baru bekerja setelah beton hancur yaitu dimulai pada titik dimana beban kembali meningkat setelah puncak pertama dicapai. Tampak beban ultimit yang dicapai silinder U0P lebih besar dari silinder U0R namun lendutan ultimitnya lebih rendah.



Gambar 3. Kurva beban-lendutan axial silinder C1R dan C1P

Tabel 4 menunjukkan hasil tes dari silinder C1R dan C1P dimana beban ultimit yang dicapai silinder C1P hampir sama dengan silinder C1R, lendutan pada beban maksimum lebih tinggi 151% dari silinder C1R, dan sebaliknya lendutan ultimit lebih rendah 46% dari silinder C1R. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa temperatur tinggi berkepanjangan tidak mempengaruhi beban ultimit namun meningkatkan lendutan pada beban maksimum menurunkan lendutan ultimit dari silinder yang dibungkus dengan 1 lapis CFRP.

Tabel 4. Hasil Tes Silinder C1R dan C1P

Silinder	Beban ultimit (KN)	Lendutan pada beban maksimum (mm)	Lendutan ultimit (mm)
C1R	846.220	1.792	7.502
C1P	848.877	4.512	5.138

Tabel 5 menunjukkan perbandingan energi yang diserap silinder C1P terhadap silinder C1R dimana energi yang diserap oleh silinder C1P pada beban maksimum lebih besar 299.36% dari silinder C1R tetapi total energi yang diserap oleh silinder C1P lebih rendah 0.54% dari silinder C1R. Dengan kata lain, temperatur tinggi berkepanjangan meningkatkan kemampuan me-

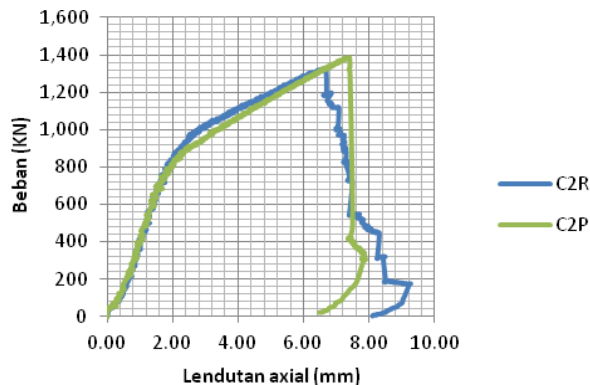
nyerap energy pada beban maksimum namun sebaliknya menurunkan total energy yang dapat diserap sebelum oleh silinder yang dibungkus dengan 1 lapis CFRP.

Tabel 5. Perbandingan energi yang diserap silinder C1R dan C1P

Silinder	Energi yang diserap pada beban maksimum (J)	Total energi yang diserap (J)	Peningkatan pada beban maksimum (%)	Peningkatan total energi yang diserap (%)
C1R	4.35	18.88	0.00	0.00
C1P	17.36	18.87	299.36	-0.54

SILINDER YANG DIBUNGKUS DENGAN 2 LAPIS CFRP (SILINDER C2R DAN C2P)

Kurva beban-lendutan axial silinder C2R dan C2P tampak pada gambar 4 di bawah. Berdasarkan gambar tersebut, silinder C2P memiliki perilaku yang sama dengan silinder C2R dimana ketika beban maksimum dicapai, beban drop tetapi lendutan ultimit meningkat bagi silinder C2R. Tampak beban ultimit yang dicapai oleh silinder C2P lebih tinggi dari silinder C2R.



Gambar 4. Kurva beban-lendutan axial silinder C2R dan C2P

Seperti tampak pada tabel 6, beban ultimit yang dicapai oleh silinder C2P lebih tinggi 3.20% dari silinder C2R, lendutan pada beban maksimum lebih tinggi 11.70%, dan beban ultimit silinder C2P lebih rendah 17.80% dari silinder C2R. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa suhu berkepanjangan tidak secara signifikan mempengaruhi beban ultimit, namun sebaliknya secara signifikan meningkatkan lendutan pada beban maksimum dan lendutan ultimit dari silinder yang dibungkus dengan 2 lapis CFRP.

Tabel 6. Hasil Tes Silinder C2R dan C2P

Silinder	Beban ultimit (KN)	Lendutan pada beban maksimum (mm)	Lendutan ultimit (mm)
C2R	1342.990	6.635	9.037
C2P	1385.935	7.414	7.429

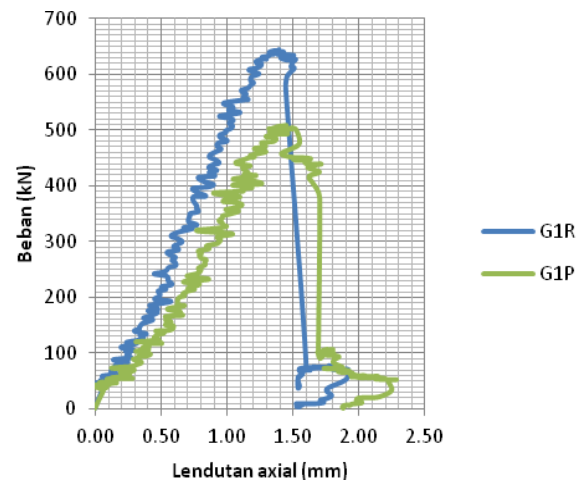
Tabel 7 menunjukkan perbandingan energi yang diserap silinder C2P terhadap silinder C2R dimana energi yang diserap oleh silinder C2P pada beban maksimum sebesar 18.91% lebih rendah dari silinder C2R dan total energi yang diserap lebih rendah 32.69% dari silinder C2R atau dapat dikatakan bahwa temperatur tinggi berkepanjangan menurunkan kapasitas menyerap energi pada beban maksimum dan total energi dari silinder yang dibungkus dengan 2 lapis CFRP.

Tabel 7. Perbandingan energi yang diserap silinder C2R dan C2P

Silinder	Energi yang diserap pada beban maksimum (J)	Total energi yang diserap (J)	Peningkatan pada beban maksimum (%)	Peningkatan total energi yang diserap (%)
C2R	42.68	51.57	0.00	0.00
C2P	34.61	34.71	-18.91	-32.69

SILINDER YANG DIBUNGKUS DENGAN 1 LAPIS GFRP (SILINDER G1R DAN G1P)

Kurva beban -lendutan axial silinder G1R dan G1P tampak pada gambar 5 dibawah. Berdasarkan gambar ini, silinder G1P memiliki perilaku yang sama dengan silinder G1R dimana ketika beban maksimum dicapai, beban drop secara drastis tetapi lendutan ultimit meningkat. Nampak beban ultimit yang dicapai oleh silinder G1P lebih rendah dari silinder G2R.



Gambar 5. Kurva beban-lendutan axial silinder G1R dan G1P

Seperti tampak pada tabel 8, beban ultimit yang dicapai oleh silinder G1P lebih rendah 20.90% dari silinder G1R, lendutan pada beban maksimum lebih tinggi 11.70%, dan lendutan ultimit silinder G1P hampir setara dengan silinder G1R. Dengan kata lain dapat dikatakan bahwa efek temperatur tinggi berkepanjangan secara signifikan menurunkan beban ultimit tetapi sebaliknya meningkatkan lendutan pada beban maksimum, namun tidak berdampak bagi lendutan ultimit dari silinder yang dibungkus dengan 1 lapis GFRP. Penurunan beban ultimit dari silinder yang dilapisi dengan GFRP disebabkan oleh karakteristik dari material ini, dimana GFRP memiliki kekuatan lebih besar pada temperatur ruang (GangRao et al., 2007).

Tabel 8. Hasil Tes Silinder G1R dan G2R

Silinder	Beban ultimit (KN)	Lendutan pada beban maksimum (mm)	Lendutan ultimit (mm)
G1R	643.807	1.395	1.447
G1P	509.557	1.449	1.449

Tabel 9 menunjukkan perbandingan energi yang diserap silinder G1P terhadap silinder G1R dimana energi yang diserap oleh silinder G1P pada beban maksimum sebesar 22.19% lebih tinggi dari silinder G1R. Total energi yang diserap oleh silinder G1P sebesar 40.52% lebih tinggi dari silinder G1R atau dapat dikatakan bahwa suhu berkepanjangan meningkatkan kapasitas menyerap energi pada beban maksimum dan total energi yang diserap oleh silinder yang dibungkus dengan 1 lapis GFRP.

Tabel 9. Perbandingan energi yang diserap silinder G1R dan G1P

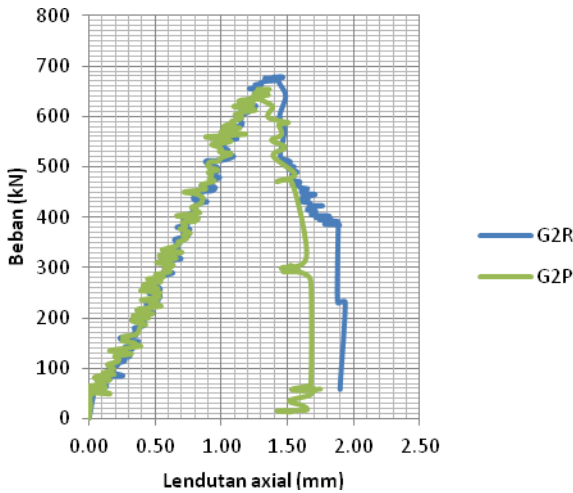
Silinder	Energi yang diserap pada beban maksimum (J)	Total energi yang diserap (J)	Peningkatan pada beban maksimum (%)	Peningkatan total energi yang diserap (%)
G1R	2.11	2.45	0.00	0.00
G1P	2.57	3.45	22.19	40.52

Tabel 11. Energi yang diserap silinder G2R dan G2P

Silinder	Energi yang diserap pada beban maksimum (J)	Total energi yang diserap (J)	Peningkatan pada beban maksimum (%)	Peningkatan total energi yang diserap (%)
G2R	2.56	3.65	0.00	0.00
G2P	3.51	4.50	37.27	23.46

SILINDER YANG DIBUNGKUS DENGAN 2 LAPIS GFRP (SILINDER G2R DAN G2P)

Kurva beban-lendutan axial silinder G2R dan G2P tampak pada gambar 6. Berdasarkan gambar tersebut, silinder G2P memiliki perilaku yang sama dengan silinder G2R. Ketika beban maksimum dicapai, beban yang bekerja drop secara drastis tetapi lendutan ultimit meningkat. Nampak beban ultimit dan lendutan ultimit silinder G2P lebih rendah dari silinder G2R.



Gambar 6. Kurva beban-lendutan axial silinder G2R dan G2P

Seperti tampak pada tabel 10, beban ultimit yang dicapai oleh silinder G2P lebih rendah 3.83%, lendutan pada beban maksimum silinder G2P lebih rendah 6.67%, dan lendutan ultimit lebih rendah 12.32% dari silinder G2R. Dengan kata lain dapat dikatakan bahwa temperatur tinggi berkepanjangan tidak secara signifikan mempengaruhi beban ultimit dan lendutan pada beban maksimum, namun sebaliknya meningkatkan lendutan ultimit dari silinder yang dibungkus dengan 2 lapis GFRP. Penurunan beban ultimit pada temperatur tinggi berkepanjangan disebabkan oleh karakteristik dari material GFRP, dimana GFRP memiliki kekuatan lebih besar pada temperatur ruang (GangRao et al., 2007).

Tabel 10. Hasil Tes Silinder G2R dan G2P

Silinder	Beban ultimit (KN)	Lendutan pada beban maksimum (mm)	Lendutan ultimit (mm)
G2R	679.857	1.465	1.940
G2P	653.818	1.367	1.701

Tabel 11 menunjukkan perbandingan energi yang diserap silinder G2P terhadap silinder G2R dimana energi yang diserap silinder G2P pada beban maksimum lebih tinggi 37.27% dari silinder G2R dan total energi yang diserap silinder G2P lebih tinggi 23.46% dari silinder G2R, atau dapat dikatakan bahwa temperatur tinggi berkepanjangan meningkatkan kapasitas energi yang diserap pada beban maksimum dan total energi yang diserap oleh silinder yang dibungkus dengan 2 lapis GFRP.

KESIMPULAN

Berdasarkan pembahasan di atas, beberapa kesimpulan dapat dibuat:

1. Efek temperatur tinggi berkepanjangan tidak signifikan mempengaruhi kekuatan ultimit, lendutan pada beban maksimum, dan lendutan ultimit dari silinder yang tidak dibungkus oleh FRP tetapi sebaliknya menurunkan kapasitas menyerap energi pada beban maksimum maupun pada total energi sebelum silinder hancur.
2. Efek temperatur tinggi berkepanjangan tidak mempengaruhi kekuatan ultimit tetapi meningkatkan lendutan pada beban maksimum dan sebaliknya menurunkan lendutan ultimit dari silinder yang dibungkus dengan 1 lapis CFRP. Sementara kapasitas menyerap energi pada beban maksimum meningkat tetapi total energy yang dapat diserap oleh silinder sebelum hancur menurun.
3. Temperatur tinggi berkepanjangan tidak signifikan mempengaruhi kekuatan ultimit, namun secara signifikan meningkatkan lendutan pada beban maksimum dan lendutan ultimit dari silinder yang dibungkus dengan 2 lapis CFRP. Sementara kapasitas menyerap energi pada beban maksimum dan total energi yang diserap oleh silinder sebelum hancur menurun.
4. Efek temperatur tinggi berkepanjangan secara signifikan meningkatkan kekuatan ultimit dan lendutan pada beban maksimum, namun tidak berdampak bagi lendutan ultimit dari silinder yang dibungkus dengan 1 lapis GFRP. Selain itu, kapasitas menyerap energi pada beban maksimum dan total energi yang diserap oleh silinder meningkat.
5. Temperatur tinggi berkepanjangan tidak secara signifikan mempengaruhi kekuatan ultimit dan lendutan pada beban maksimum, namun sebaliknya meningkatkan lendutan ultimit dari silinder yang dibungkus dengan 2 lapis GFRP. Sementara kapasitas menyerap energi meningkat baik pada beban maksimum maupun pada total energy sebelum silinder hancur.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan secara tulus kepada Profesor Muhammad N. S. Hadi dari University of Wollongong atas semua bimbingan dan arahnya dalam penyelesaian penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

El-Hacha, R., Green, M. F., and Wight, G. R. (2010). *Effect of severe environmental exposure on CFRP wrapped concrete columns*, Journal of composites for construction, Vol. 14, No.1, February 1, 2010, pp. 83-88.

GangRao, H.V.S., Taly, N., and Vijay, P.V. (2007). *Reinforced concrete design with FRP composites*, CRC Press, USA.

Green, M. F., Bisby, L. A., and Kodur, V. K. R. (2006). *FRP confined concrete columns: behavior under extreme condition*, Cement and concrete composites, Vol. 28, pp. 928-937.

Karbhari, V. M., Rivera, J., and Dutta, P. K. (2000). *Effect of short term freeze-thaw cycling on composites confined concrete*, Journal of composites for construction, Vol. 4, pp. 191-197.

Sadeghian, P., Rahai, A. R., and Ehsani, M. R. (2010). *Experimental study of rectangular columns strengthened with CFRP composites under eccentric loading*, Composite for construction, January 2010, pp. 1-20.