

PENINGKATAN DAYA DUKUNG DAN DAKTILITAS BALOK BETON BERTULANG DENGAN MENGGUNAKAN PERKUATAN CFRP (CARBON FIBER REINFORCED POLYMER)

The Improvement of Ductility and Bearing Capacity of Reinforced Concrete Beam Using CFRP (CARBON FIBER REINFORCED POLYMER) Strengthening

Tavio, R. Purwono, dan A. Rosyidah

Dosen pada Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Kampus ITS Keputih Sukolilo, Surabaya 60111

E-mail: tavio@its.ac.id

ABSTRACT

This paper presents a research on the ductility of normal-strength concrete beams which were designed under gravity load only. The beams were then strengthened with CFRP. The ductility of the strengthened beams was compared with that without CFRP. The analytical study employed the formulas proposed by Mander, Fardis, Pullido, and ACI Committee 440. The beams considered in the study were taken from a Moment Resisting Frame System (MFRS) which neglected the seismic loading. The behavior of the beam section at the column face was simulated with that at the midspan which possessed the same flexural and shear reinforcements as that at the end section. The beams were then wrapped with two layers of CFRP. The result of the experiment was the significant improvement in the curvature ductility of the beams strengthened with two-layered CFRP compared with that without CFRP. The increase in ductility was about 265 percent. The shape of the moment-curvature relation $M-\mu_p$ from the experiment was similar to that obtained from the analytical study by Mander, Fardis, Pullido, and ACI Committee 440. The curvature ductility of the beams strengthened with two-layered CFRP could reach up to beyond 30. According to Park and Paulay (1975), this value satisfies the full ductility requirement for seismic design. Thus, it can be used for strengthening the seismic-resistant structures.

Keywords: CFRP, ductility, reinforced concrete beam.

PENDAHULUAN

Perbaikan struktur pada umumnya bertujuan untuk mengembalikan atau meningkatkan kekuatan elemen struktur agar mampu menahan beban sesuai dengan rencana. Umumnya, struktur perlu perkuatan bilamana terjadi perubahan fungsi bangunan atau bilamana elemen-elemen strukturnya dirancang sesuai tata cara yang lama dimana beban gempa nominalnya lebih rendah dari yang ditetapkan oleh tata cara saat ini (Purwono, Tavio, Imran, dan Raka, 2002 dan Badan Standarisasi Nasional, 2002). Kemungkinan lainnya, struktur tersebut sebelumnya hanya didesain terhadap beban gravitasi saja. Padahal, struktur tersebut harus menerima beban yang lebih besar akibat beban gempa sehingga struktur tersebut bisa tidak kuat. Hal ini akan mengakibatkan kerusakan atau bahkan kegagalan/keruntuhan.

Hal-hal kritis yang sering luput dari perhatian dalam mendesain struktur antara lain:

1. *Detailing* tulangan transversal di ujung kolom dan balok yang tidak memenuhi syarat, dimana spasinya terlalu jauh. Hal ini mengakibatkan

confinement terhadap inti beton buruk dan penyokong lateralnya tidak mencukupi untuk menghindari terjadinya tekuk pada tulangan longitudinal.

2. Kapasitas geser yang direncanakan tidak mencukupi. Hal ini disebabkan oleh jumlah sengkang terpasang yang kurang banyak (tidak memenuhi syarat).
3. Sambungan lewatan tulangan kolom ditempatkan di ujung-ujung kolom.
4. Luas tulangan tarik pada ujung-ujung balok terlalu sedikit.

Dengan adanya kasus-kasus tersebut diatas, maka studi mengenai perkuatan elemen struktur perlu dilakukan. Jenis perkuatan yang dipilih adalah *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP). Cara pemasangan CFRP adalah dengan melilitkannya mengelilingi permukaan perimeter elemen struktur yang diperkuat. Sistem kerjanya sama dengan *confinement* (pengekangan) dengan tulangan transversal konvensional.

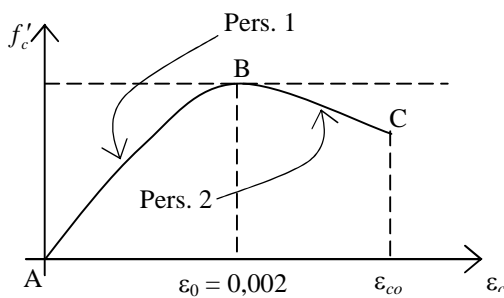
Penelitian ini difokuskan pada elemen struktur beton bertulang mutu normal. Mengingat keterbatasan alat pengujian yang tersedia di

laboratorium, maka pengujian dilakukan pada elemen struktur balok. Selain itu, perilaku penampang balok di muka Hubungan Balok-Kolom (HBK) disimulasikan dengan perilaku penampang balok di tengah bentang yang memiliki tulangan lentur dan geser yang sama dengan yang di ujung. Pada Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK), sendi-sendi plastis didesain untuk terjadi pada ujung-ujung balok bilamana terkena beban gempa kuat. Oleh karena itu, pengamanan yang ketat perlu dilakukan pada daerah tersebut agar tidak mengalami kegagalan karena rendahnya daktilitas yang tersedia. Keadaan ini hanya dapat diwujudkan bilamana ujung-ujung balok tersebut diberi *confinement* yang cukup. Adanya perkuatan balok oleh lilitan CFRP diharapkan dapat meningkatkan daktilitasnya secara berarti.

Dalam makalah ini, meskipun hasil penelitiannya belum ekstensif, namun diharapkan dapat memberikan informasi yang berguna bagi pemakaian CFRP ke depan untuk perkuatan elemen struktur yang tidak dirancang menerima beban gempa atau kurang kuat di dalam menerima beban gempa.

Kurva $f_c-\epsilon_c$ Beton

Diagram kurva hubungan tegangan-regangan beton normal dapat dilihat dalam Gambar 1. Kurva tersebut terdiri dari dua persamaan, yaitu persamaan pada saat tegangan beton naik hingga puncak tegangan (Pers. 1) dan persamaan setelah puncak tegangan, pada saat tegangan beton mengalami penurunan (Pers. 2) (Park and Paulay, 1975).



Gambar 1. Kurva tegangan-regangan beton tak terkekang

Pada daerah AB ($\epsilon_c \leq \epsilon_0$)

$$f_c = f_c' \left[\frac{2\epsilon_c}{\epsilon_0} - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^2 \right] \quad (1)$$

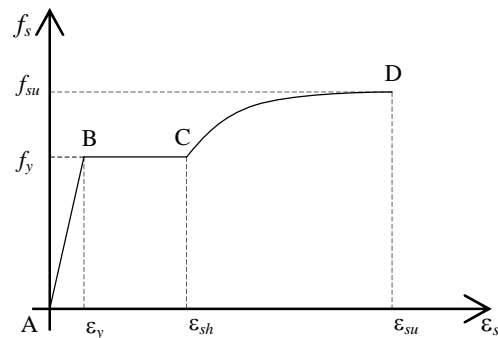
Pada daerah BC ($\epsilon_0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{co}$)

$$f_c = f_c' [1 - Z(\epsilon_c - \epsilon_0)] \quad (2)$$

dimana pada beton tanpa pengekang $Z = 100$, dimana Z adalah faktor kemiringan bagian kurva turun.

Kurva $f_s-\epsilon_s$ Tulangan

Model kurva hubungan tegangan-regangan baja menggunakan kurva seperti ditunjukkan dalam Gambar 2. Kurva ini mendekati bentuk kurva aktual tegangan-regangan baja hasil pengujian eksperimen (Park and Paulay, 1975).



Gambar 2. Diagram $f_s-\epsilon_s$ baja

Daerah AB: $\epsilon_s < \epsilon_y, f_s = \epsilon_s \cdot E_s$ (3)

Daerah BC: $\epsilon_y \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{sh}, f_s = f_y$ (4)

Daerah CD: $\epsilon_{sh} \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{su}$

$$f_s = f_y \left[\frac{m(\epsilon_s - \epsilon_{sh}) + 2}{60(\epsilon_s - \epsilon_{sh}) + 2} + \frac{(\epsilon_s - \epsilon_{sh})(60 - m)}{2(30r + 1)^2} \right] \quad (5)$$

Kurva $f_{cc}-\epsilon_{cc}$ yang Dipilih

Dalam paper ini, analisis yang dilakukan menggunakan model kurva hubungan tegangan-regangan beton terkekang CFRP yang diusulkan oleh beberapa peneliti terdahulu, yaitu: Pullido, dkk. (2004); Fardis dan Khalili (1981); Mander, Priestley dan Park (1988), serta ACI Committee 440 (2002). Model Fardis, Mander dan ACI Committee 440 dianalisis dengan mengacu pada prosedur yang diusulkan oleh Mander, Priestley dan Park (1988) untuk memperoleh kurva $f_{cc}-\epsilon_{cc}$ beton terkekang CFRP. Untuk model Pullido, prosedur analisis kurva hubungan tegangan-regangan beton terkekang CFRP sudah tersedia.

Menurut Pullido, dkk. (2004), pada saat regangan sebesar 0,002 maka tegangan yang terjadi adalah:

$$f_{co} = 9,4\sqrt{f_c'} \text{ MPa} \quad (6)$$

Tegangan ultimit beton terkekang CFRP:

$$f_{cu} = f'_c + 9,8f_r^{0,7} \text{ MPa} \quad (7)$$

$$f_r = K_e \left[\left(\frac{E_j \varepsilon_j t_j}{d} \right) + \left(\frac{E_j \varepsilon_j t_j}{b} \right) \right] \quad (8)$$

dimana K_e = faktor bentuk persegi = 0,75; E_j = modulus elastisitas CFRP; ε_j = regangan CFRP; t_j = tebal CFRP; d, b = dimensi penampang beton terkekang; f_r = modulus runtuh.

Regangan ultimit dinyatakan dalam rumus:

$$\varepsilon_{cu} = \frac{\varepsilon_{CF}}{0,09 - 0,23 \ln \left(\frac{f_r}{f'_c} \right)} \quad (9)$$

dimana: ε_{CF} = regangan ultimit CFRP, sebesar 50 persen dari regangan tarik ultimit CFRP.

Menurut Fardis dan Khalili (1981), tegangan beton yang terkekang CFRP:

$$f'_{cc} = f'_{co} \left[1 + k_1 \frac{f_\ell}{f'_{co}} \right] \quad (10)$$

dimana: $f'_{co} = f'_c$ = kuat tekan beton yang tidak terkekang, sedangkan

$$f_\ell = \frac{2f_L \times t_L}{D} \text{ dan } k_1 = 3,7 \left(\frac{f_\ell}{f'_{co}} \right)^{-0,14}$$

Regangan beton terkekang CFRP:

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} + 0,001 \left[\frac{E_{com} \cdot t}{d \cdot f'_{co}} \right] \quad (11)$$

dimana: ε_{co} = regangan beton tidak terkekang dan E_{com} = modulus elastisitas CFRP.

Perumusan tegangan-regangan beton terkekang CFRP menurut Mander, Priestley dan Park (1988) adalah sebagai berikut:

$$f'_{cc} = f'_{co} \left[2,254 \sqrt{1 + 7,94 \frac{f_\ell}{f'_{co}}} - 2 \frac{f_\ell}{f'_{co}} - 1,254 \right] \quad (12)$$

$$\varepsilon_{cc} = \frac{1,71(5f'_{cc} - 4f'_{co})}{E_c} \quad (13)$$

Perumusan hubungan tegangan-regangan beton terkekang CFRP ACI Committee 440 mengacu pada perumusan Mander, Priestley dan Park dengan sedikit modifikasi. Perumusannya sebagai berikut:

$$f'_{cc} = f'_{co} \left[2,25 \sqrt{1 + 7,9 \frac{f_\ell}{f'_{co}}} - 2 \frac{f_\ell}{f'_{co}} - 1,25 \right] \quad (14)$$

$$\varepsilon'_{cc} = \varepsilon_{co} \left[1 + 5 \left(\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right) \right] \quad (15)$$

METODA PENELITIAN

Properti Balok Uji

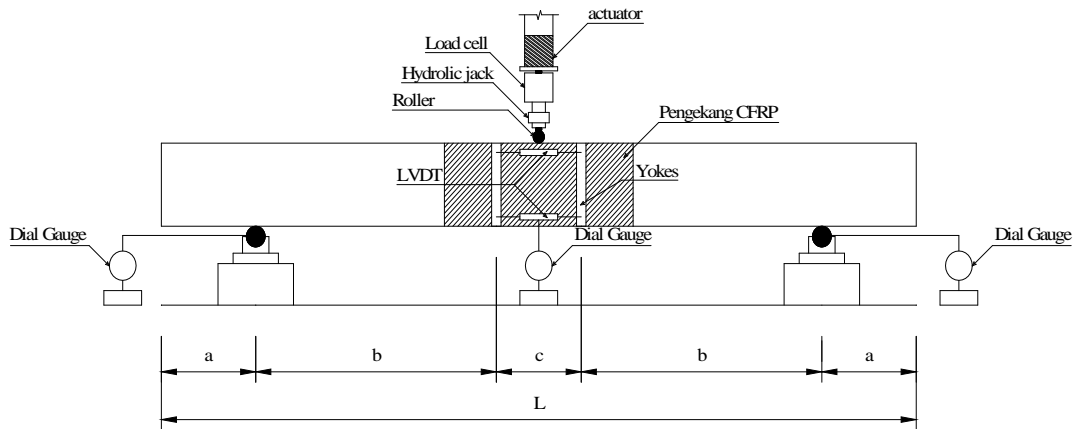
Balok uji merupakan simulasi dari balok eksisting struktur bangunan yang didesain hanya berdasarkan beban gravitasi. Struktur bangunan tersebut diasumsikan sebagai sebuah gedung tiga tingkat. Balok uji dirancang berpenampang persegi dengan dimensi penampang 150×300 mm dan panjang 3 m. Beton yang digunakan adalah beton kekuatan normal dengan $f'_c = 31,5$ MPa. Tulangan tarik baja ulir berdiameter 16 mm dengan $f_y = 336$ MPa. Tulangan tekan menggunakan diameter 10 mm dengan $f_y = 390$ MPa sedangkan tulangan sengkang berdiameter 8 mm dengan $f_{ys} = 400$ MPa. Jumlah tulangan lentur maupun geser yang terpasang diperoleh dari hasil perhitungan analisis struktur akibat beban gravitasi saja. Dalam penelitian ini dibuat dua balok uji B1 dan B2 yang identik untuk memastikan hasil pengujian mewakili kondisi yang sesungguhnya.

Pengujian Eksperimen

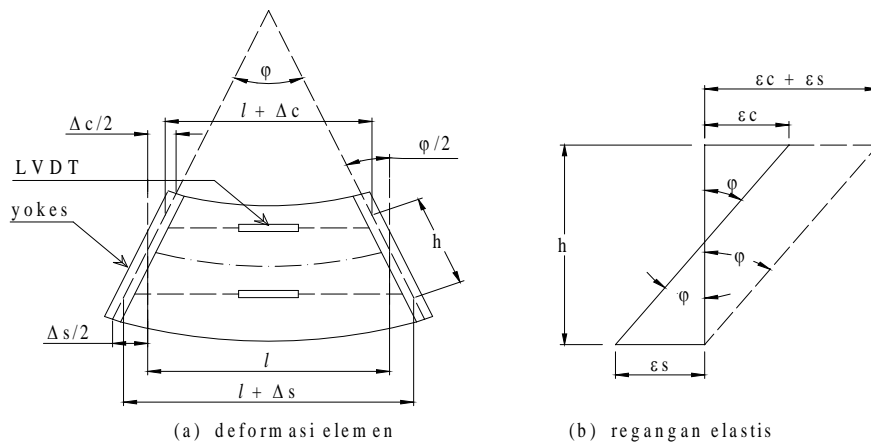
Pembebanan terdiri dari dua tahap, yaitu pembebanan berdasarkan gaya hingga balok mengalami pelelehan tulangan tarik pertama, kemudian dilanjutkan dengan pembebanan berdasarkan perpindahan sampai tulangan tarik putus (ultimit).

Agar balok tersebut mampu berdeformasi secara inelastis akibat beban gempa, maka dilakukan perkuatan dengan memakai *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP). CFRP tersebut dibalutkan mengelilingi perimeter balok di tengah bentang. Jumlah balutan CFRP tersebut adalah dua lapis. Hal tersebut mempertimbangkan agar peningkatan daktilitas kurvatur yang terjadi lebih mencolok.

Adapun set up alat pengujian disajikan dalam Gambar 3, sedangkan nilai kurvatur diperoleh dari pengukuran deformasi horisontal daerah tarik dan tekan, dengan memasang *yoke* dan LVDT seperti dalam Gambar 4. Data yang dicatat untuk tiap kenaikan beban atau perpindahan adalah besarnya beban dan perpindahan horisontal LVDT, untuk mencari nilai momen dan kurvatur.



Gambar 3. Set up pengujian



Gambar 4. Kurvatur balok

Untuk mencari besarnya momen di tengah bentang berdasarkan kesetimbangan gaya, $M = PL/4$ (Gambar 3), sedangkan untuk mencari besarnya kurvatur menggunakan data perpindahan horisontal LVDT atas, Δ_c , dan bawah, Δ_s , (Gambar 4). Nilai perpindahan dibagi dengan jarak antar yokes, l , untuk mendapatkan nilai regangan, ϵ_c dan ϵ_s . Kemudian dari distribusi regangan di atas dan dibawah tersebut, perputaran kurvatur dapat dicari, $\phi = (\epsilon_c + \epsilon_s)/h$. Untuk memperoleh daktilitas kurvatur, μ_ϕ , maka nilai kurvatur yang terjadi dibagi dengan nilai kurvatur leleh, ϕ_y .

ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN

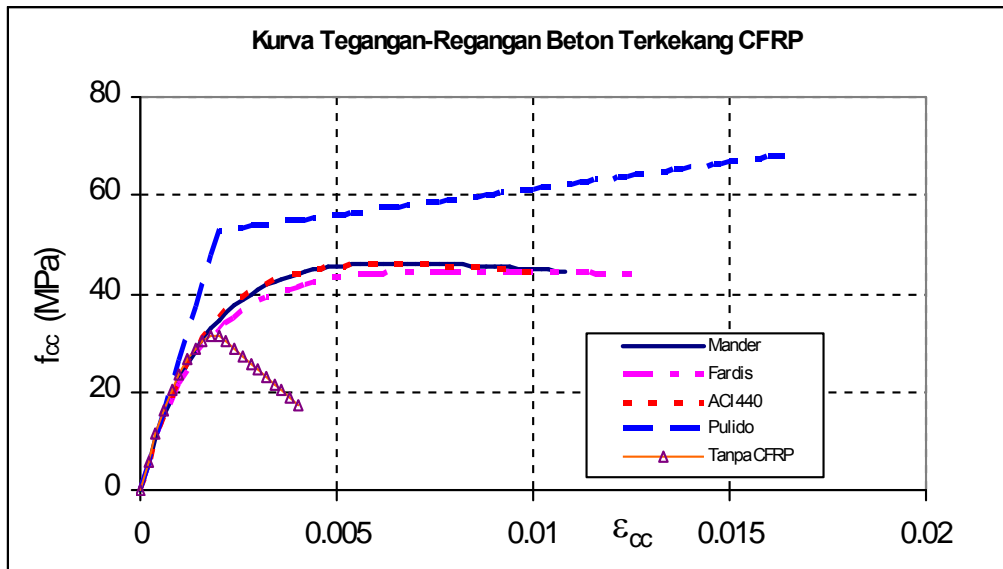
Analisis Kurva Tegangan-regangan Beton Terkekang CFRP

Dari hasil perhitungan tegangan-regangan maksimum beton terkekang CFRP berdasarkan perumusan Pullido, Fardis, Mander dan ACI Committee 440 diperoleh nilai yang bervariasi. Nilai ini disajikan dalam Tabel 1.

Adapun kurva hubungan tegangan-regangan beton terkekang CFRP berdasarkan perumusan Pullido, Fardis, Mander dan ACI Committee 440 serta beton tanpa CFRP dapat dilihat pada Gambar 5.

Tabel 1. Nilai tegangan-regangan maksimum berdasarkan perumusan Pullido, Fardis, Mander, ACI Committee 440 dan yang tanpa CFRP

Uraian	Tanpa CFRP	Pullido	Fardis	Mander	ACI Committee 440
f'_{cc} (MPa)	31,5	52,757	44,665	46,125	46,003
ε'_{cc}	0,002	0,002	0,00833	0,00664	0,00634
ε_{cu}	0,004	0,01685	0,01256	0,01073	0,01044



Gambar 5. Kurva tegangan-regangan beton terkekang CFRP

Dalam Gambar 5 tampak bahwa kurva tegangan-regangan usulan Mander sama dengan yang diusulkan oleh ACI Committee 440. Hal ini karena perumusan ACI Committee 440 pada dasarnya mengadopsi perumusan yang diusulkan oleh Mander dengan sedikit penyesuaian. Untuk Pullido, kurva yang dihasilkan mempunyai nilai f_{cc} dan ε_{cu} yang lebih tinggi dibandingkan usulan yang lainnya.

Hasil Pengujian Balok Uji Terkekang CFRP

Secara umum hasil pengujian balok beton bertulang mutu normal terkekang CFRP sesuai dengan prediksi. Hal ditunjukkan dengan peningkatan daktilitas yang cukup signifikan dan juga adanya penambahan kekuatan yang cukup berarti bila dibandingkan dengan balok tanpa CFRP. Balok uji terkekang CFRP meningkat daktilitasnya, tapi tipe keruntuhannya getas, sedangkan peretakan

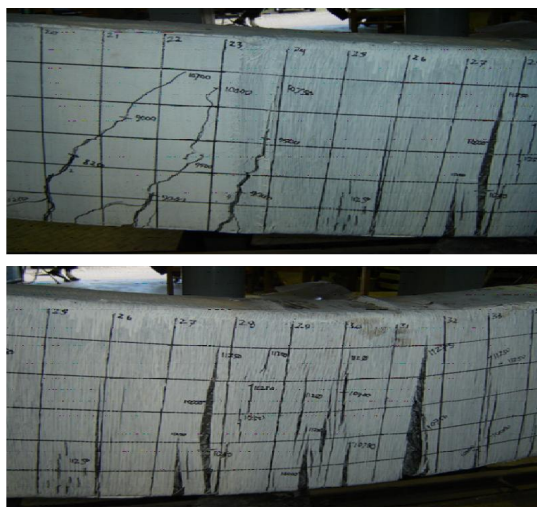
yang terjadi pada balok uji diawali dengan peretakan lentur.

Pola Retak Benda Uji B1

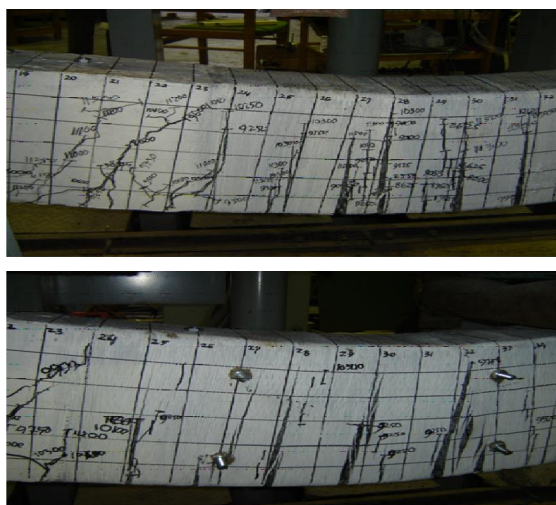
Retak terjadi pertama kali pada balok uji B1 pada saat beban P mencapai sekitar 8.250 kg yang diawali dengan terjadinya retak lentur berada di luar kekangan CFRP pada daerah tarik beton. Seiring dengan bertambahnya beban, retak terus memanjang naik ke arah sumbu netral menuju ke daerah tekan beton. Setelah beban P melampaui 8.625 kg, retak di area beton terkekang CFRP baru terjadi pertama kali. Pada saat beban P mencapai 10.000 kg, retak pada CFRP merambat ke daerah tekan beton dengan pola retak vertikal. Ketika beban P melampaui 10.000 kg, retak yang terjadi semakin membesar. Pada saat tulangan tarik putus, lebar keretakan mencapai 350 mm pada daerah terkekang di daerah tarik beton. Di daerah tumpuan tidak terjadi retak sama sekali. Adapun gambar pola retak balok uji B1 dapat dilihat dalam Gambar 6.

Pola Retak Benda Uji B2

Pada balok uji B2, retak pertama kali muncul ketika beban P mencapai 5.875 kg. Pola retak yang terjadi adalah retak lentur dan berada di luar beton terkekang pada daerah tarik beton. Penambahan beban menimbulkan retak semakin menjalar ke atas mendekati garis netral menuju daerah tekan beton. Pada saat beban P melampaui 8.625 kg, retak baru terjadi di daerah beton terkekang CFRP. Setelah beban P mencapai 9.000 kg, retak pada CFRP semakin naik ke daerah tekan beton dengan pola retak vertikal. Saat beban P melampaui 10.300 kg, retak semakin parah hingga tulangan tarik putus. Lebar retak yang terjadi mencapai 300 mm di tengah bentang pada daerah tarik beton. Di sekitar tumpuan tidak terjadi retak sama sekali. Gambar pola retak balok uji B2 diberikan dalam Gambar 7.



Gambar 6. Pola retak saat runtuh di tengah bentang balok uji B1

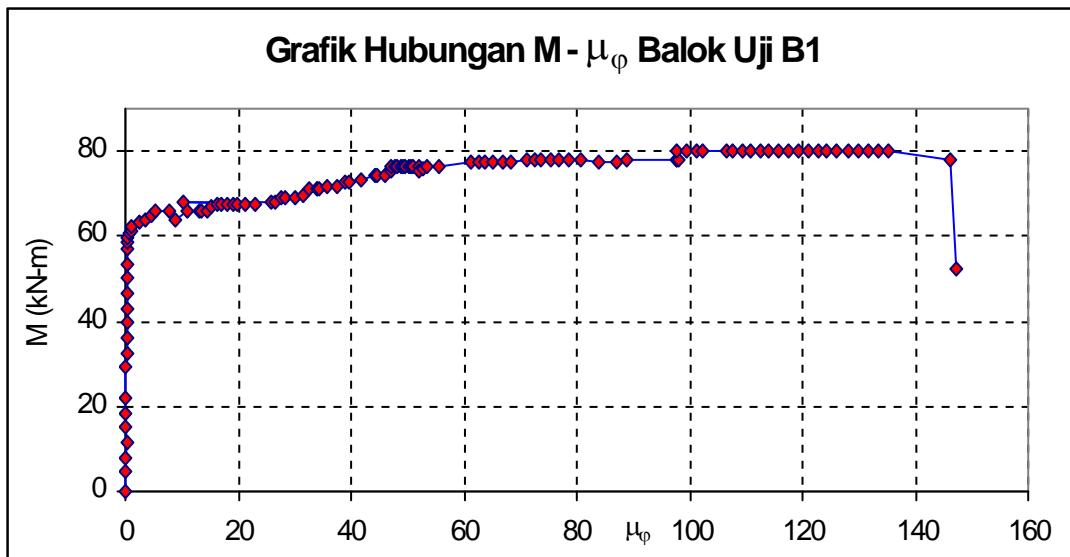


Gambar 7. Pola retak saat runtuh di tengah bentang balok uji B2

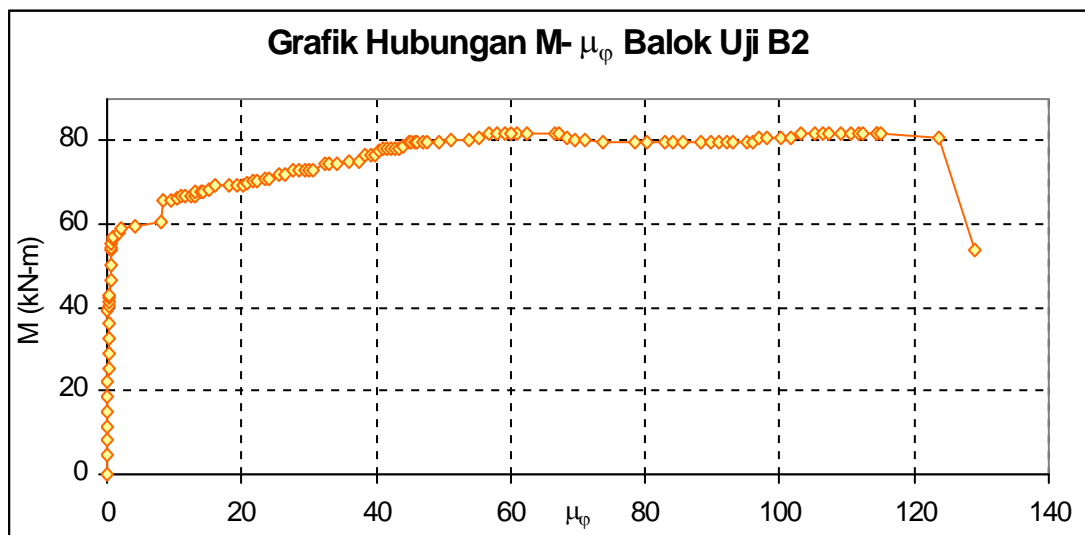
Analisis $M-\mu_{\phi}$

Hasil analisis data eksperimen meliputi momen dan daktilitas kurvatur balok uji B1 dan B2. Hasil analisis untuk balok B1 disajikan dalam bentuk grafik dalam Gambar 8. Dari grafik tersebut terlihat bahwa setelah mengalami pelelehan balok uji B1 masih mengalami peningkatan kekuatan. Namun setelah beban maksimal terlampaui, balok mengalami penurunan kekuatan yang secara tiba-tiba. Melihat perilaku keruntuhannya, balok uji ini mempunyai karakteristik keruntuhan yang getas.

Untuk balok uji B2, hasil analisis data eksperimen disajikan dalam Gambar 9. Seperti halnya balok uji B1, balok uji B2 juga mengalami peningkatan kekuatan setelah mengalami pelelehan tulangannya. Setelah melampaui beban puncak, balok uji B2 juga mengalami penurunan kekuatan yang drastis. Oleh karena itu, sama seperti balok uji B1 tipe keruntuhannya dikategorikan sebagai tipe keruntuhan getas.



Gambar 8. Grafik $M-\mu_\phi$ pada balok uji B1

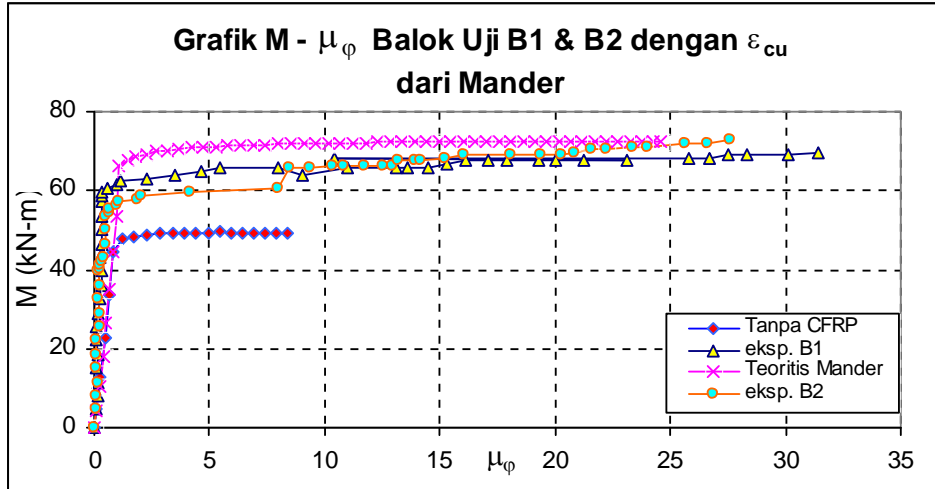


Gambar 9. Grafik $M-\mu_\phi$ pada balok uji B2

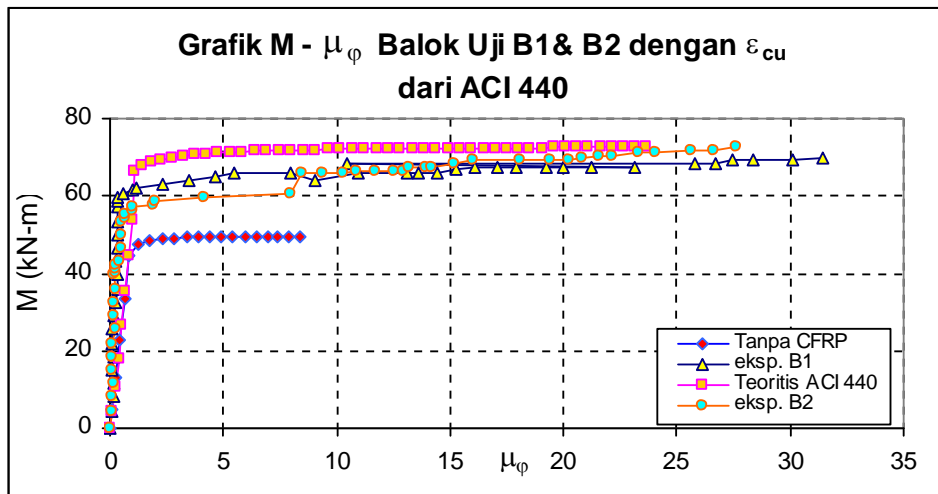
Perbandingan $M-\mu_\phi$ Hasil Eksperimen Dengan Analisis Teoritis

Kurva hubungan momen-kurvatur hasil eksperimen balok uji B1 dan B2 tersebut dibandingkan dengan masing-masing hasil analisis teoritis dari perumusan Pullido, Fardis, Mander dan ACI Committee 440. Hasil perbandingannya disajikan dalam Gambar 10 sampai 13.

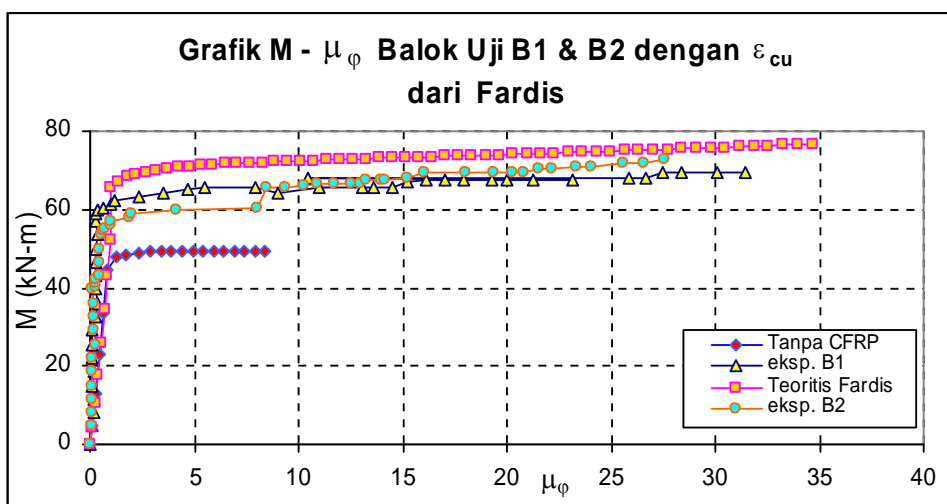
Gambar 10 sampai 13 memperlihatkan bahwa daktilitas kurvatur hasil analisis teoritis semua usulan yang dipakai dengan nilai ϵ_{cu} yang sama sedikit lebih besar bilamana dibandingkan dengan daktilitas kurvatur hasil eksperimen balok uji B1 dan B2. Daktilitas kurvatur eksperimen kedua balok uji B1 dan B2 menunjukkan nilai yang hampir sama. Hal tersebut menunjukkan bahwa pengujian yang dilakukan sudah mewakili.



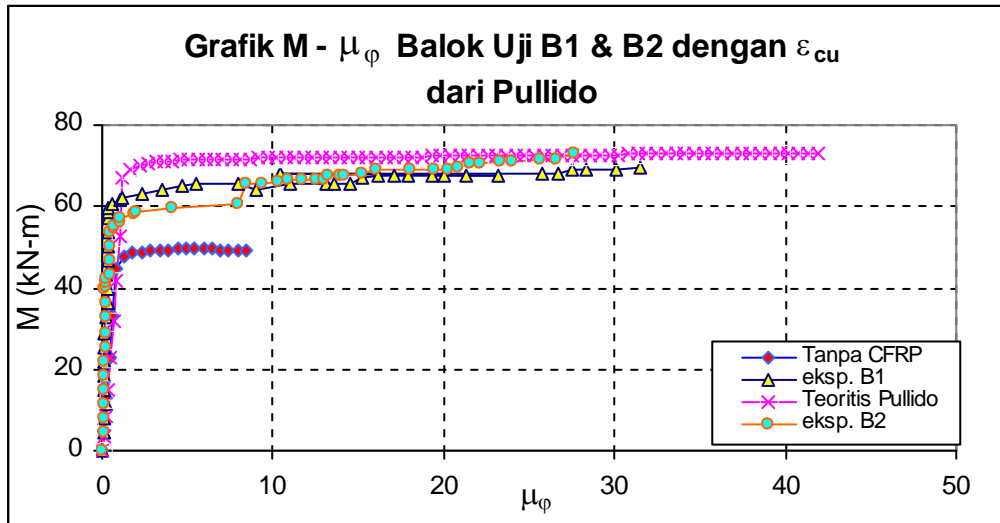
Gambar 10. Grafik $M-\mu_\phi$ balok uji B1 dan B2 serta hasil analisis sesuai usulan Mander



Gambar 11. Grafik $M-\mu_\phi$ balok uji B1 dan B2 serta hasil analisis sesuai usulan ACI Committee 440



Gambar 12. Grafik $M-\mu_\phi$ balok uji B1 dan B2 serta hasil analisis sesuai usulan Fardis



Gambar 13. Grafik $M-\mu_\phi$ balok uji B1 dan B2 serta hasil analisis sesuai usulan Pullido

Tabel 3. Momen dan daktilitas kurvatur hasil analisis teoritis

Uraian		Tanpa CFRP	ϵ_{cu} berdasarkan:			
			Mander	ACI 440	Fardis	Pulido
Momen (kN-m)	B1	49,471	67,553	66,853	67,553	67,553
	prosentase		36,55%	35,14%	36,55%	36,55%
	B2	49,471	69,303	68,253	69,303	69,303
	prosentase		40,09%	37,97%	40,09%	40,09%
μ_ϕ	B1	8,4	16,127	15,27	17,89	20
	prosentase		91,99%	81,79%	112,98%	138,10%
	B2	8,4	16,02	15,2	19	20,26
	prosentase		90,07%	80,95%	126,19%	141,19%

Tabel 4. Perbandingan Momen dan daktilitas kurvatur balok uji B1 dan B2 terhadap hasil analisis teoritis tanpa CFRP

Uraian	Tanpa CFRP	Eksperimen	
		B1	B2
Momen (kN-m)	49,471	71,053	72,803
Peningkatan (%)		43,62%	47,16%
μ_ϕ	8,4	33,877	27,593
Peningkatan (%)		303,29%	228,49%

Hasil pengujian balok uji yang diberi penguat CFRP sebanyak dua lapis ternyata memberikan peningkatan momen dan daktilitas kurvatur yang cukup signifikan. Selanjutnya menggunakan ϵ_{cu} dari Mander, ACI Committee 440, Fardis, dan Pullido prosentase peningkatan momen dan daktilitas kurvatur dibandingkan dengan daktilitas kurvatur

balok uji tanpa CFRP hasil analisa teoritis disajikan dalam Tabel 3.

Tabel 3 menunjukkan bahwa balok yang diberi penguat CFRP dua lapis mengalami peningkatan kekuatan momen berkisar antara 35,14 hingga 40,09 persen, sedangkan peningkatan daktilitas kurvatur yang berkisar antara 80,95 sampai 141,19 persen.

Hal ini menunjukkan bahwa balok tanpa CFRP yang hanya mempunyai kurvatur daktilitas 8,4 dapat ditingkatkan untuk memenuhi persyaratan daktilitas sebagai komponen struktur SRPMK dengan daktilitas 16 ke atas. Hasil analisis ditunjukkan dalam Tabel 3, sedangkan hasil eksperimen dapat dilihat dari Gambar 10 sampai 13.

Hasil pengujian eksperimen pada dua balok uji yang diberi pengekang CFRP sebanyak dua lapis juga membuktikan peningkatan momen dan daktilitas kurvatur yang cukup signifikan. Prosentase peningkatan momen dan daktilitas kurvatur dibandingkan dengan daktilitas kurvatur balok uji tanpa CFRP hasil analisa teoritis disajikan dalam Tabel 4. Tabel 4 menunjukkan bahwa balok yang diberi pengekang CFRP dua lapis mempunyai daktilitas kurvatur 33,877 dan 27,593, atau rata-rata sekitar 30. Balok-balok tersebut mengalami peningkatan kekuatan momen sebesar 43,62 dan 47,16 persen atau rata-rata sekitar 45 persen, sedangkan peningkatan daktilitas kurvatur yang terjadi adalah 228,49 dan 303,29 persen, atau rata-rata sekitar 265 persen.

KESIMPULAN

Dari pengujian balok uji terkekang CFRP dua lapis, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Berdasarkan bentuk kurva hubungan momen dan daktilitas kurvatur hasil eksperimen pada balok terkekang CFRP dua lapis, daktilitas kurvatur balok uji μ_{ϕ} setelah mencapai 16 terlihat tetap mendatar. Hubungan momen-kurvatur dari Park dan Paulay (1975) yang cenderung menurun setelah mencapai M_{maks} tidak berlaku disini. Bentuk $M-\mu_{\phi}$ dari percobaan ini lebih mirip dengan kurva referensi dari Mander, ACI Committee 440, Fardis dan Pullido, namun kuat momennya sedikit lebih rendah.
2. Terjadi peningkatan daktilitas kurvatur dan momen pada eksperimen balok terkekang CFRP dua lapis dibandingkan dengan balok tanpa pengekang CFRP dari analisa teoritis. Persentase peningkatan daktilitas kurvatur yang terjadi mencapai rata-rata 265 persen, sedangkan peningkatan momen sebesar rata-rata 45 persen.
3. Menurut Park dan Paulay (1975), nilai daktilitas kurvatur yang harus dipenuhi untuk wilayah gempa kuat adalah 16, sehingga nilai daktilitas kurvatur balok terkekang CFRP dua lapis yang mencapai angka sekitar 30 memenuhi syarat daktilitas penuh dan dapat dimanfaatkan untuk melakukan perkuatan struktur di wilayah gempa kuat.

4. Hasil eksperimen sampai ultimit pada kedua balok uji B1 dan B2 menunjukkan bahwa grafik $M-\mu_{\phi}$ yang cenderung mendatar dan M_n mendadak turun drastis dengan karakteristik tulangan putus tapi beton tidak hancur.
5. Dari hasil analisis teoritis menggunakan baik perumusan Mander, Fardis, ACI Committee 440 maupun Pullido menunjukkan perbedaan yang tidak berarti. Jika dibandingkan dengan hasil eksperimen, semua perumusan tersebut cukup mendekati sehingga bisa digunakan untuk prediksi hubungan momen-kurvatur maupun daktilitas kurvatur balok terkekang CFRP.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada PT. Sika Indonesia yang telah memberikan bantuan berupa produk CFRP tipe SikaWrap Hex 230C serta aplikasinya.

DAFTAR PUSTAKA

- ACI Committee 440. 2002, Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures (ACI 440.2R-02), *American Concrete Institute*, Farmington Hills, Mich., 45 hal.
- Badan Standarisasi Nasional. 2002, *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Bangunan Gedung (SNI 03-1726-2002)*, Puskim, Bandung, Indonesia, 85 hal.
- Fardis, M. N; dan Khalili, H., 1981, Concrete Incased in Fiberglass Reinforced Plastic, *ACI Journal*, Proceedings, V. 78, No. 6, Nop.-Des., hal. 440-446.
- Mander, J. B; Priestley, N.; dan Park, R., 1988, Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, V. 114, No. 8, hal. 1804-1823.
- Park, R.; dan Paulay, T., 1975, *Reinforced Concrete Structures*, John Wiley & Sons, 761 hal.
- Pullido, C.; dkk., 2004, Seismic Performance of Two-Column Bents-Part I: Retrofit with Carbon Fiber-Reinforced Polymer Fabrics, *ACI Structural Journal*, V. 101, No. 4, Juli-Agust., hal. 558-568.
- Purwono, R.; Tavio, Imran, I.; dan Raka I G. P., 2002, *Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung (SNI 03-2847-2002) Dilengkapi Penjelasan (S-2002)*, ITS Press, Surabaya, Indonesia, Mar., 408 hal.