



PERKUATAN STRUKTUR KOLOM BETON BERTULANG DENGAN MENGGUNAKAN LAPISAN FIBER

*N. Retno Setiati
Iswandi Imran*

RINGKASAN

Beton komposit dengan menggunakan fiber atau dikenal dengan istilah *Fiber Reinforced Polymer Composite (FRPC)* telah ditemukan sebagai suatu metode efektif untuk memperbaiki kolom beton dibawah kekuatan struktur. Penelitian ini membahas masalah studi eksperimental dan teori analitis kolom beton terkekang secara eksternal dengan lapisan serat Aramid atau dikenal dengan istilah *Aramid Fiber Sheet (AFS)*. Benda uji beton terkekang dan tidak terkekang diberi gaya tekan uniaksial. Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan diperoleh suatu kesimpulan bahwa untuk beton normal terkekang yang dibebani tekan uniaksial secara signifikan dapat meningkatkan kekuatan, daktilitas, dan kapasitas energi absopsi (energi yang diserap)

SUMMARY

Composite fiber concrete is known as Fiber Reinforced Polymer Composites (FRPC) is found to be effective for repair jackets around deteriorating and understrength concrete columns. This research presents the results of experimental and analytical studies of the high performance of confined concrete columns using Aramid Fiber Sheet (AFS). The specimens of confined and unconfined concrete columns are tested under uniaxial compressive load. The results show that external confinement of plain concrete by Aramid fiber can significantly enhance the strength, ductility, and energy absorption capacity of concrete.

I. LATAR BELAKANG

Kerusakan struktur bangunan sering kita jumpai sebelum mencapai umur bangunannya. Kerusakan struktur tersebut dapat terjadi akibat beberapa faktor diantaranya kualitas material bangunan yang kurang baik, perencanaan yang tidak sesuai dengan standar desain, korosi dan lingkungan salinitas, beban berlebih (*overload*), atau akibat bencana alam seperti gempa dan angin topan yang dapat menyebabkan kerusakan berat pada infrastruktur. Untuk mengatasi masalah tersebut, telah ditemukan suatu alternatif metoda perbaikan dengan menggunakan lapisan fiber sehingga struktur bangunan tersebut berperilaku sebagai struktur komposit antara beton dengan lapisan fiber.

Fiber atau dikenal dengan *Fiber Reinforced Polymer Composites (FRPC)* yang diaplikasikan pada struktur kolom beton berfungsi sebagai kekangan pasif (*confinement*). Penggunaan FRPC sebagai perkuatan dari struktur beton telah populer digunakan di negara-negara rawan gempa seperti Eropa, Jepang, dan Amerika Utara. Dari

berbagai penelitian yang telah dilakukan, kekangan dengan menggunakan FRPC pada struktur kolom beton betulang dapat meningkatkan kuat tekan, daktilitas, dan durabilitas.

Suatu cara yang lebih efektif untuk mengekang beton adalah dengan menggunakan *fiber-wrapping*. Pengekangan beton dengan *fiber-wrapping* memberikan beberapa keuntungan diantaranya: daerah inti beton yang terkekang akan lebih besar sehingga kapasitas daya dukung komposit akan meningkat serta pengaruh merugikan dari *arching action* yang timbul pada pengekangan beton dengan spiral atau sengkang dapat dihindari. Penggunaan *fiber-wrapping* sebagai pengekan memberikan kemudahan pelaksanaan konstruksi di lapangan. Dengan semakin banyaknya jenis *fiber* yang terbuat dari berbagai jenis material maka *fiber-wrapping* sekaligus dapat berfungsi untuk memberikan perlindungan terhadap beton pada kondisi lingkungan yang agresif yaitu dengan cara memilih material *fiber-wrapping* yang sesuai dengan keadaan tertentu.

II. HIPOTESA

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, metoda perbaikan struktur beton dengan menggunakan lapisan fiber dapat memberikan kekuatan yang melebihi kapasitas awal desain. Hipotesa ini akan dibuktikan dengan suatu analisis dan data hasil pengujian.

III. TINJAUAN PUSTAKA

3.1. Karakteristik Beton Terkekang

Perilaku mekanik beton sangat tergantung pada kondisi batas yang dikenakan pada beton. Adanya kondisi batas tersebut menimbulkan batasan gerakan (*restraint*) terhadap kecenderungan material untuk berdeformasi akibat pembebanan yang dialaminya. Pola keruntuhan beton akibat beban tekan biasanya ditandai oleh adanya penambahan volume yang tidak terkontrol. Dengan adanya mekanisme kekangan yang bekerja pada beton, proses keruntuhan yang terjadi dapat diperlambat.

Kekangan pada beton dapat dibedakan menjadi dua macam, yaitu kekangan pasif, berupa tulangan lateral baik yang berbentuk spiral maupun persegi atau kekangan tabung baja dan *fiber-wrapping*. Sedangkan kekangan aktif dapat berupa tekanan fluida. Pada kekangan pasif, tekanan lateral yang diberikan tidak konstan seperti pada kekangan aktif, tetapi tergantung pada deformasi aksial dari inti beton dan karakteristik tegangan-regangan tulangan lateral. Selain itu kekangan yang diberikan oleh tulangan lateral akan menghasilkan gaya lateral yang tidak merata, yang bekerja pada inti beton, yang besarnya ditentukan oleh rasio tulangan lateral terhadap inti beton, tegangan leleh tulangan lateral, spasi dan konfigurasi tulangan lateral tersebut. Sedangkan pada kekangan aktif, kekangan yang diberikan oleh fluida akan menghasilkan gaya lateral yang merata pada seluruh permukaan beton.

Penggunaan kekangan pada inti beton dimaksudkan untuk meningkatkan kekuatan dan daktilitas kolom. Besarnya peningkatan tegangan tekan akibat efek kekangan yang ditimbulkan oleh tegangan lateral diperoleh dari penurunan kriteria leleh Mohr-Coulomb sebagai berikut :

$$|\tau| = c - \sigma \tan \phi \dots\dots\dots(3.1)$$

di mana:

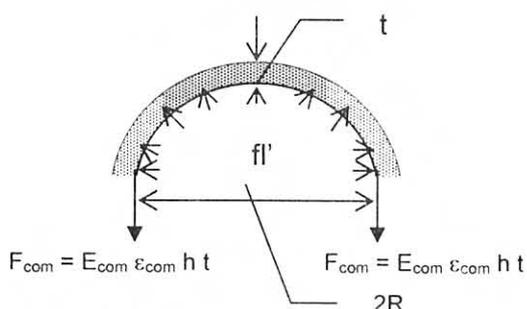
- τ : tegangan geser
- σ : tegangan normal
- c : nilai kohesi
- ϕ : sudut geser dalam

3.2. Mekanisme Kekangan

Pemberian pengekang lateral pada beton dimaksudkan untuk meningkatkan kekuatan dan daktilitas dari suatu elemen struktur. Kapasitas daya dukung kolom yang dihasilkan dari pengekangan dengan tulangan lateral tergantung pada kekuatan yang dimiliki oleh beton inti yang terkekang, selimut beton, dan daya dukung tulangan longitudinal. Besarnya tekanan pengekang yang ditimbulkan oleh suatu susunan pengekang lateral ditentukan oleh konfigurasi, dimensi, tegangan leleh, jarak tulangan lateral, jumlah dan susunan tulangan longitudinal, serta *dilatability* beton inti pada saat menerima beban tekan.

Pada kolom yang terbuat dari beton dengan kuat tekan normal, tulangan lateral pada umumnya mengalami leleh pada saat beban aksial maksimum tercapai. Hal ini disebabkan beton dengan kuat tekan normal memiliki kemampuan mengembang dalam arah lateral yang besar pada saat mencapai beban maksimum.

Pengekangan dengan menggunakan tulangan lateral atau dengan memakai tabung pada beton merupakan pengekangan pasif, dimana tekanan pengekang akan timbul setelah beton inti mengalami pengembangan dalam arah lateral (efek *Poisson's ratio*) terutama pada saat setelah beban maksimum tercapai. Mekanisme kekangan tergantung pada kemampuan beton untuk mengembang dalam arah lateral dan kekakuan radial dari material pengekang untuk dapat menahan pengembangan beton tersebut. Dalam hal ini ada dua kondisi yang harus diperhatikan, yaitu kompatibilitas geometri (regangan) antara beton inti dengan dinding tabung, dan keseimbangan gaya-gaya di dalam diagram *free body* sebagaimana dapat kita lihat pada gambar di bawah ini:



Gambar 3.1. Keseimbangan Gaya yang Bekerja Pada Penampang Kolom Bulat Terkekang

Berdasarkan pada suatu analisis statik, keseimbangan gaya, dan keseimbangan deformasi, persamaan tegangan lateral ditentukan dengan rumus :

$$f_f = E_l \varepsilon_l \dots \dots \dots (3.2)$$

dimana:

- E_l = modulus elastisitas lateral
- ε_l = regangan lateral dari benda uji terkekang

E_l adalah suatu parameter yang menyatakan kekakuan dari kekangan dan dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$E_l = \frac{E_f t}{R} \dots \dots \dots (3.3)$$

dimana:

- E_f = modulus elastisitas fiber
- t = ketebalan fiber
- R = jari-jari kolom beton

3.3. Aksi Kekangan

Menurut Richart dkk, tegangan dan regangan longitudinal pada kondisi runtuh dari beton terkekang akibat tekanan hidrostatik memenuhi persamaan sebagai berikut:

$$f_{cc}' = f_c' + k_1 f_l \dots \dots \dots (3.4)$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left\{ 1 + \frac{k_2 f_l}{f_c'} \right\} \dots \dots \dots (3.5)$$

dimana:

- f_{cc}' = teg. maks. beton terkekang
- ε_{cc} = reg. runtuh akibat tekanan lateral f_l
- f_c' = teg. runtuh beton tidak terkekang
- ε_{co} = reg. runtuh beton tidak terkekang
- $k_1 = 4.1$
- $k_2 = 5k_1$

Berdasarkan kekuatan beton dan jarak tulangan spiral, Iyengar menggunakan nilai k_1 diantara 2.8 dan 4.8, Balmer menggunakan nilai $k_1 = 4.5$ dan 7.0 dengan nilai rata-rata 5.6. Persamaan (3.4) dan (3.5) berlaku untuk kondisi anisotropis dalam material komposit.

Batasan ini menyebabkan perbedaan antara hasil-hasil eksperimental dan prediksi yang semakin besar terutama hubungannya dengan respon regangan. Mander memformulasikan kekuatan tekan dengan rumus :

$$f_{cc}' = f_c' \left\{ -1.25 + 2.25 \sqrt{1 + \frac{7.94 f_l}{f_c'} - \frac{2 f_l}{f_c'}} \right\} \dots \dots \dots (3.6)$$

dan regangan longitudinal beton terkekang :

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left\{ 1 + \frac{5 f_{cc}'}{f_c'} - 5 \right\} \dots \dots \dots (3.7)$$

dimana :

$$\varepsilon_{co} \approx 0,002.$$

Menurut Chai, untuk beton terkekang dengan bahan-bahan komposit, tegangan kekangan efektif diperoleh dengan rumus:

$$f_l = \frac{2 f_{com} t}{d} \dots \dots \dots (3.8)$$

dimana:

- f_{com} = kekuatan tarik komposit
- f_c' = kuat tekan beton tidak terkekang.

Menurut Fardis dan Khalili, kekuatan beton terkekang dengan tabung glass memenuhi persamaan:

$$f_{cc}' = f_c' \left\{ 1 + 4,1 \left(\frac{f_{com} t}{d f_c'} \right) \right\} \dots \dots \dots (3.9)$$

$$\varepsilon_{cc} = 0,002 + 0,001 \frac{E_{com} t}{d f_c'} \dots \dots \dots (3.10)$$

dimana:

$$E_{com} = \text{mod. elastisitas komposit}$$

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Nanni dan Bradford, mereka menggunakan kedua rumus Mander, Fardis dan Khalili untuk memprediksi perilaku benda uji kolom terkekang komposit aramid, lapisan filament glass, dan bentuk kulit glass-aramid. Kedua model tersebut menghasilkan prediksi kekuatan yang akurat, tetapi taksiran rendah untuk regangan beton yang dikekang dengan komposit FRP.

IV. METODOLOGI

Metodologi yang dilakukan dalam penulisan ini terdiri dari tahapan-tahapan sebagai berikut:

1. Studi pustaka, meliputi pengumpulan data-data hasil eksperimen yang telah dilakukan mengenai struktur beton komposit, mempelajari teori-teori yang berhubungan dengan material pengekuat ataupun material penyusun beton;

2. Menentukan hipotesa awal sebagaimana dijelaskan dalam Bagian 1;
3. Pengujian laboratorium, berupa pembuatan model benda uji silinder beton, baik beton polos atau beton dengan kekangan lapisan fiber, pengujian kuat tarik material pengekang, pengujian lekatan (*bonding*) antara lapisan serat dengan beton, dan pengujian kuat tekan beton;
4. Analisis data hasil eksperimental yang telah dilakukan di laboratorium;
5. Perbandingan hasil eksperimental dengan teori-teori sebelumnya;
6. Kesimpulan dan Saran

V. PEMBAHASAN HASIL EKSPERIMENTAL LABORATORIUM

5.1 Pembuatan Beton Normal

Pembuatan benda uji beton mengikuti standar ACI 211.4R-93. Tahapan-tahapan yang harus dilakukan sebelum pembuatan benda uji ini adalah mempersiapkan seluruh alat yang diperlukan, menimbang dengan teliti material pembentuk beton, mempersiapkan cetakan silinder, dan pengecoran.

Proses pengecoran dilakukan dengan menggunakan mesin pengaduk (molen). Ukuran benda uji berdiameter 100 mm dan tinggi 200 mm. Mutu beton yang direncanakan adalah beton normal dengan kuat tekan (f_c') 20 MPa dan 35 MPa. Jumlah benda uji terdiri dari :

1. Tiga buah silinder beton tanpa kekangan masing-masing dengan kuat tekan 20 MPa (NK-20-1, NK-20-2, NK-20-3) dan 35 MPa (NK-35-1, NK-35-2, NK-35-3);
2. Dua buah silinder beton dengan satu lapisan fiber yang diorientasikan sejajar dengan arah serat masing-masing dengan kuat tekan 20 MPa (P1-20-1, P1-20-2) dan 35 MPa (P1-35-1, P1-35-2);
3. Dua buah silinder beton dengan satu lapisan fiber yang diorientasikan 30° dengan arah serat masing-masing dengan kuat tekan 20 MPa (S1-20-1, S1-20-2) dan 35 MPa (S1-35-1, S1-35-2);
4. Dua buah silinder beton dengan dua lapisan fiber yang diorientasikan sejajar dengan arah serat masing-masing dengan kuat tekan 20 MPa (P2-20-1, P2-20-2) dan 35 MPa (P2-35-1, P2-35-2);
5. Dua buah silinder beton dengan dua lapisan fiber yang diorientasikan 30° dengan arah serat masing-masing dengan kuat tekan 20 MPa (S2-20-1, S2-20-2) dan 35 MPa (S2-35-1, S2-35-2);

Total jumlah benda uji adalah 22 buah.

5.2 Pengujian Kuat Tarik Material Pengekang

Material Kekangan

Kekangan yang digunakan adalah berupa serat aramid yang memiliki kekuatan dan modulus elastis tinggi. Serat Aramid ini digunakan untuk meningkatkan *performance* terhadap pengaruh gempa, perbaikan struktur kolom, dan meningkatkan kekuatan geser serta deformasi balok.

Sifat-sifat fisik dari serat Aramid ini adalah:

- Kekuatan tarik : AK-40 adalah 40 t/m
- Kuantitas fiber : 280 g/m²
- Ketebalan : 0,193 mm
- Nilai desain:
 - Kekuatan tarik = 2100 N/mm²
 - Mod. elastis = 120000 N/mm²
 - Regangan maksimum = 1,8 %

Pengujian kuat tarik ini terdiri dari:

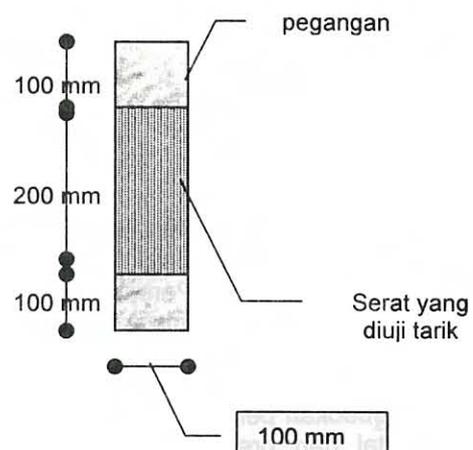
- Pengujian kuat tarik serat dengan menggunakan lem epoksi;
- Pengujian kuat tarik serat tanpa menggunakan lem epoksi.

Hasil Pengujian Kuat Tarik Dari Material Pengekang

Untuk mengetahui pengaruh lem epoksi pada serat, dilakukan dua pengujian kuat tarik yaitu pengujian kuat tarik serat tanpa menggunakan lem epoksi dan pengujian kuat tarik serat dengan menggunakan lem epoksi. Identifikasi benda uji ini adalah sebagai berikut :

1. Empat buah lapisan fiber tanpa menggunakan epoksi (NE-1, NE-2, NE-3, NE-4);
2. Empat buah lapisan fiber dengan menggunakan epoksi (ES-1, ES-2, ES-3, ES-4);

Sketsa uji tarik material pengekang ini dapat dilihat pada Gambar 5.1 sebagai berikut :



Gambar 5.1. Sketsa Uji Tarik Hasil pengujian kuat tarik disajikan dalam tabel 5.2a dan tabel 5.2b.

Tabel 5.2a.
HASIL PENGUJIAN KUAT TARIK SERAT
ARAMID TANPA EPOKSI

No	Benda Uji	Kapasitas Tarik		Stroke saat teg. maks. (mm)
		kN	Mpa	
1.	NE-1	28,61	1482,42	5,50
2.	NE-2	47,21	2446,01	7,81
3.	NE-3	48,01	2487,51	8,10
4.	NE-4	39,05	2129,92	7,83

Tabel 5.2b.
HASIL PENGUJIAN KUAT TARIK SERAT
ARAMID DENGAN MENGGUNAKAN EPOKSI

No	Benda Uji	Kapasitas Tarik		Reg. Aks. (%)	Stroke saat teg. maks. (mm)	Modulus Elastis (Mpa)
		kN	Mpa			
1.	ES-1	41,66	2158,39	-	8,15	-
2.	ES-2	40,57	2102,07	1,57	5,93	135914
3.	ES-3	39,20	2030,93	1,48	6,83	139967
4.	ES-4	49,55	2567,57	1,80	7,26	141734

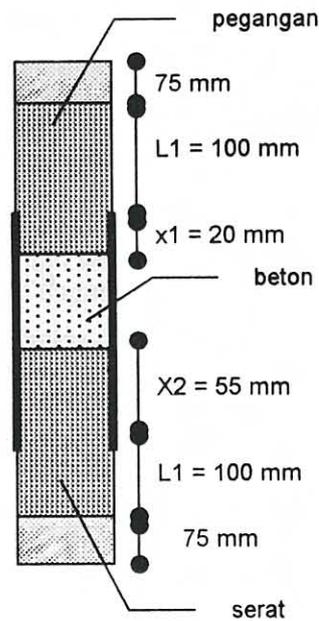
Catatan: Ukuran lebar *sample* = 100 mm

Dari data hasil eksperimental tersebut dapat ditarik beberapa kesimpulan, diantaranya:

1. Lem epoksi yang digunakan sebagai perekat antara serat dan beton tidak mempengaruhi nilai kapasitas tarik secara signifikan, artinya kontribusi kekuatan yang disumbangkan epoksi tidak mempengaruhi kuat tarik serat.
2. Pengaruh epoksi terhadap serat hanya menyebabkan lembaran benang-benang serat pada saat terjadi keruntuhan terputus secara bersamaan, hal ini menyebabkan kurva tegangan regangan tarik bersifat linier.

5.3. Pengujian Lekatan (*Bonding*)

Pengujian lekatan (*bonding*) beton dan serat bertujuan untuk mengetahui panjang penyaluran efektif dari serat sehingga keruntuhan yang terjadi diharapkan berasal dari terputusnya serat akibat pembebanan dan bukan berasal dari keruntuhan geser atau slip antara beton dan serat. Sketsa pengujian lekatan ini disajikan dalam Gambar 5.2.



Gambar 5.2. Sketsa Uji Lekatan

Hasil pengujian lekatan (*bonding*) adalah sebagai berikut :

- Serat terlepas dari beton pada daerah $x_1 = 20$ mm dengan beban yang dicapai sebesar 2,117 kN, sehingga tegangan geser yang didapat sebesar

$$f_{geser} = \frac{2,117 \times 10^3}{20 \times 50} = 2,117 \text{ MPa}$$

- Berdasarkan tegangan geser yang ada, panjang penyaluran yang diperlukan serat dengan lebar 100 mm ditentukan dengan rumus:

$$P_{lepas} \geq P_{putus}$$

$$F_{geser} \times 100 \times L \geq f_y \times 100 \times 0,193$$

$$L \geq \frac{f_y \times 100 \times 0,193}{f_{geser} \times 100} = \frac{2100 \times 0,193}{2,117}$$

$$L \geq 191,450 \text{ mm} \approx 20 \text{ cm}$$

- Panjang penyaluran untuk serat yang lebarnya 10 cm adalah 20 cm. Hal ini sesuai dengan peraturan yang mensyaratkan bahwa panjang penyaluran serat Aramid dengan lebar 10 cm adalah 25 cm.

5.4. Pengujian Kuat Tekan Beton

Nilai kuat tekan beton karakteristik yang digunakan dalam pengujian ini sebesar 20 MPa dan 35 MPa. Benda uji silinder ini memiliki ukuran diameter ($D = 100$ mm) dan tinggi ($H = 200$ mm). Pengukuran regangan dilakukan hanya dalam arah aksial saja, sehingga nilai *Poissons' ratio* ditetapkan sebesar 0,25. Nilai modulus elastisitas diambil dari bentuk persamaan:

$$E_c = 4700\sqrt{f'_c} \dots\dots\dots(5.1)$$

Hasil pengujian kuat tekan beton disajikan dalam tabel 5.3a. dan tabel 5.3b.

Tabel 5.3a.
HASIL PENGUJIAN KUAT TEKAN BETON
20 Mpa

No	Benda Uji	P maks (kN)	f _{cc} ' (MPa)	ε _{cc} ' (%)	f _{cc} '/f _c	ε _{cc} '/ε _c '
1.	NK-20-1	159,50	20,31	-	-	-
2.	NK-20-2	163,16	20,77	-	-	-
3.	NK-20-3	175,94	22,40	-	-	-
4.	P1-20-1	382,61	48,72	4,60	2,30	18,38
5.	P1-20-2	390,02	49,66	-	2,35	-
6.	P2-20-1	448,07	57,05	4,40	2,70	17,59
7.	P2-20-2	446,10	56,80	-	2,68	-
8.	S1-20-1	354,54	45,14	2,55	2,13	10,20
9.	S1-20-2	318,62	40,57	-	1,92	-
10.	S2-20-1	427,10	54,38	3,04	2,57	12,15
11.	S2-20-2	460,63	58,65		2,77	

Tabel 5.3b.
HASIL PENGUJIAN KUAT TEKAN BETON
35 Mpa

No.	Benda Uji	P maks (kN)	f _{cc} ' (MPa)	ε _{cc} ' (%)	f _{cc} '/f _c	ε _{cc} '/ε _c '
1.	NK-35-1	242,50	30,88	-	-	-
2.	NK-35-2	276,65	35,22	-	-	-
3.	NK-35-3	290,30	36,96	-	-	-
4.	P1-35-1	500,65	63,74	1,74	1,86	6,94
5.	P1-35-2	452,51	57,62	-	1,68	-
6.	P2-35-1	629,47	80,15	2,42	2,33	9,68
7.	P2-35-2	619,21	78,84	-	2,30	-
8.	S1-35-1	381,32	48,55	1,42	1,41	5,66
9.	S1-35-2	399,86	50,91	-	1,48	-
10.	S2-35-1	549,25	69,93	3,06	2,04	12,23
11.	S2-35-2	551,58	70,23		2,04	

Dari hasil pengujian tersebut dapat ditarik beberapa kesimpulan:

1. Peningkatan kuat tekan beton dipengaruhi oleh tebal lapisan dan arah orientasi lilitan serat. Semakin tebal lapisan serat peningkatan kuat tekan beton akan semakin besar pula. Hal ini disebabkan setelah beton mengalami kehancuran, maka daya pikul diambil alih oleh kekangan. Lapisan serat yang dipasang searah dengan arah kekuatan serat (arah orientasi = 0°) memberikan peningkatan kuat tekan yang lebih besar dibandingkan dengan lapisan yang dipasang dengan arah orientasi ≥ 0°.
2. Peningkatan kuat tekan beton dipengaruhi pula oleh mutu beton. Berdasarkan hasil eksperimen, beton normal dengan kekuatan 20 MPa dan tebal lapisan serat t = 0,193 mm yang dipasang sejajar mengalami peningkatan kuat tekan rata-rata 2,33 kali lipat, sedangkan beton mutu 35 Mpa dengan kondisi kekangan yang sama mengalami peningkatan kuat tekan rata-rata sebesar 1,77 kali lipat. Ternyata untuk kasus ini semakin tinggi mutu beton, peningkatan kuat tekan akan semakin kecil.
3. Peningkatan nilai daktilitas juga dipengaruhi oleh tebal lapisan dan arah orientasi lilitan serat. Semakin tebal lapisan serat peningkatan daktilitas akan semakin besar pula. Nilai daktilitas ini dipengaruhi oleh sifat-sifat material pengekan (diantaranya nilai modulus elastisitas pengekan).
4. Lapisan serat yang dipasang searah dengan arah kekuatan serat (arah orientasi = 0°) memberikan peningkatan daktilitas yang lebih besar dibandingkan dengan lapisan yang dipasang dengan arah orientasi ≥ 0°.

5.5. Perbandingan Hasil Evaluasi Pengujian Laboratorium dengan Teori Analisis

Berdasarkan persamaan yang telah dijelaskan sebelumnya, pada bagian ini akan ditunjukkan perbandingan kuat tekan f_{cc}' dan regangan aksial ε_{cc}' hasil pengujian laboratorium dengan teori analisis. Hasil perbandingan analisis tersebut ditunjukkan dalam Tabel 5.4a. dan 5.4b. sebagai berikut :

Tabel 5.4a.
PERBANDINGAN KUAT TEKAN HASIL
PENGUJIAN LABORATORIUM DENGAN
BEBERAPA TEORI ANALISIS

No.	Benda Uji	Hasil lab. (MPa)	Richard dkk		Mander dkk	
			fcc' (MPa)	Error (%)	fcc' (MPa)	Error (%)
1	P1-20-1	48.716	54.396	11.659	53.14	9.08
2	P1-20-2	49.659	54.396	9.539	53.14	7.01
3	P2-20-1	57.051	87.63	53.599	67.98	19.15
4	P2-20-2	56.799	87.63	54.281	67.98	19.68
5	P1-35-1	63.744	67.59	6.034	71.97	12.90
6	P1-35-2	57.615	67.59	17.313	71.97	24.91
7	P2-35-1	80.147	100.842	25.821	94.207	17.54
8	P2-35-2	78.84	100.824	27.884	94.207	19.49
9	S1-20-1	45.142	49.943	10.635	50.349	11.53
10	S1-20-2	40.568	49.943	23.109	50.349	24.11
11	S2-20-1	54.38	78.725	44.768	64.799	19.16
12	S2-20-2	58.649	78.725	34.231	64.799	10.48
13	S1-35-1	48.552	63.137	30.040	68.278	40.62
14	S1-35-2	50.912	63.137	24.012	68.278	34.11
15	S2-35-1	69.932	91.919	31.441	88.381	26.38
16	S2-35-2	70.229	91.919	30.885	88.381	25.84

Tabel 5.4b.
PERBANDINGAN REGANGAN AKSIAL HASIL
PENGUJIAN LABORATORIUM DENGAN
BEBERAPA TEORI ANALISIS

No.	Benda Uji	Hasil lab. (%)	Richard dkk		Mander dkk	
			ecc' (%)	Error (%)	ecc' (%)	Error (%)
1	P1-20-1	4.596	2.656	42.211	2.253	50.979
2	P1-20-2					
3	P2-20-1	4.398	5.012	13.961	2.844	35.334
4	P2-20-2					
5	P1-35-1	2.55	1.751	31.333	1.583	37.922
6	P1-35-2					
7	P2-35-1	3.037	3.202	5.433	2.299	24.300
8	P2-35-2					
9	S1-20-1	1.735	2.34	34.870	2	15.274
10	S1-20-2					
11	S2-20-1	2.419	4.38	81.067	2.655	9.756
12	S2-20-2					
13	S1-35-1	1.416	1.56	10.169	0.92	35.028
14	S1-35-2					
15	S2-35-1	3.057	2.813	7.982	1.853	39.385
16	S2-35-2					

Untuk nilai kuat tekan dan regangan aksial, baik dari hasil uji laboratorium ataupun teori analisis yang dikembangkan oleh Richard dan Mander menghasilkan kuat tekan dan regangan aksial yang berbeda-beda, hal ini dipengaruhi oleh dua besaran yaitu tegangan lateral yang diberikan oleh kekangan dan nilai kuat tekan kolom tidak terkekang. Persamaan yang memiliki hasil yang lebih mendekati hasil laboratorium adalah persamaan Mander dkk. Dari hasil perbandingan tersebut dapat ditarik suatu kesimpulan :

1. Semakin besar tegangan lateral yang diberikan, maka akan terjadi peningkatan kuat tekan dan regangan aksial;
2. Semakin tinggi mutu beton, peningkatan kuat tekan dan regangan aksial akan semakin kecil;
3. Kekangan fiber dalam arah sejajar serat akan menghasilkan nilai kuat tekan dan regangan aksial yang lebih besar.

5.6. Kesimpulan dan Saran

Dari hasil penelitian ini dapat diambil kesimpulan dan saran sebagai berikut :

- 1) Perekat antara serat sebagai pengekang dengan beton tidak mempengaruhi kuat tekan beton secara signifikan. Kontribusi lem epoksi menyebabkan serat mengalami keruntuhan secara bersamaan.
- 2) Peningkatan kuat tekan dan daktilitas dari beton terkekang dipengaruhi oleh beberapa faktor, diantaranya mutu beton, tebal lapisan pengekang, dan arah orientasi lilitan serat terhadap beton.
- 3) Semakin baik proses pengerjaan pembuatan beton dan teknik pemasangan kekangan akan menyebabkan keruntuhan beton dan material pengekang terjadi secara bersama-sama.
- 4) Pemberian kekangan pada beton dipengaruhi oleh *setting time* dari lem epoksi.
- 5) Semakin tinggi mutu beton yang dikekang akan memberikan peningkatan kuat tekan dan daktilitas yang semakin kecil, karena beton mutu tinggi memiliki sifat lebih getas dibandingkan dengan beton normal.
- 6) Untuk memberikan hasil pengujian yang lebih mendekati dengan teori analisis, perlu diperhatikan tahapan-tahapan pengerjaan mulai dari penyediaan material sampai tahap pengujian;
- 7) Sebelum dilakukan pengujian tekan hendaknya mesin uji dikalibrasi terlebih dahulu;
- 8) Untuk penelitian, sebaiknya digunakan lem epoksi dengan *setting time* yang cukup lama agar proses pemasangan serat aramid tidak dilakukan tergesa-gesa, karena hal ini dapat mempengaruhi kerapuhan proses pelilitan serat terhadap beton.

DAFTAR PUSTAKA

- 1) ASTM Designation: C 33 – 92a, (1993), *Standard Specifications for Concrete Aggregates*, Annual Book of ASTM Standard, Vol. 04.02, Concrete and Aggregates, 10 – 16;
- 2) ASTM Designation: C 39 – 86, (1993), *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*, Annual Book of ASTM Standard, Vol. 04.02, Concrete and Aggregates, 20 – 24;
- 3) ASTM Designation: C 143 – 90a, (1993), *Standard Test Methods for Slump of Hydraulic Cement Concrete*, Annual Book of ASTM Standard, Vol. 04.02, Concrete and Aggregates, 88 – 90;
- 4) ASTM Designation: C 192 – 90a, (1993), *Standard Practice of Making and Curing Concrete Test Specimens in The Laboratory*, Annual Book of ASTM Standard, Vol. 04.02, Concrete and Aggregates, 117 – 123;
- 5) ASTM Designation: C 617 – 87, (1993), *Standard Practice of Capping Cylindrical Concrete Specimens*, Annual Book of ASTM Standard, Vol. 04.02, Concrete and Aggregates, 306 – 309;
- 6) Gergely, Ioan., Pantelides, Cris P., Nuismer, Ralph J., and Reaveley, Lawrence D., (1998), *Bridge Pier Retrofit Using Fiber-Reinforced Plastic Composites*, Journal Composites of Construction, Vol. 2, No. 4, November 1998, 165 – 174;
- 7) Grace, N. F., Soliman, A. K., Sayed, G. Abdel., and Saleh, K. R., (1998), *Behavior and Ductility of Simple and Continuous FRP Reinforced Beams*, Journal Composites of Construction, Vol. 2, No. 4, November 1998, 176 – 198;
- 8) Imran, Iswandi., and Pantazopoulou, S. J. (1996), *Plasticity Model for Concrete Under Triaxial Compression*, ASCE Journal of Material in Civil Engineering;
- 9) Kharbari, Vistasp M., Gao, Yanqiang, (1997), *Composite Jacketed Concrete Under Uniaxial Compression Verification of Simple Design Equations*, ASCE Journal of Material in Civil Engineering, Vol. 9, No. 4, Nopember 1997, 185 – 193;
- 10) Michel Samaan, Amir Mirmiran, and Mohsen Shahawy, *Model of concrete confined by fiber composites*, Journal of Structureal Engineering/September 1998.
- 11) Park, R. and Paulay, T., *Reinforce Concrete Structure*, John Wiley and Sons, 1975.
- 12) Sutarsana, Adi, (2001), Skripsi Studi Eksperimental Efek Kekangan Renderoc FR 10 AK – 40 Pada Kolom Pendek Dengan Pembebanan Aksial

Penulis :

- **N. Retno Setiati, ST, MT.**, Staf Balai Jembatan dan Bangunan Pelengkap Jalan, Pusat Litbang Prasarana Transportasi, Badan Litbang Kimpraswil, Departemen Kimpraswil;
- **Dr. Ir. Iswandi Imran, MASc.**, Dosen Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Bandung.