

**PERILAKU KOLOM BETON YANG DIKEKANG SECARA EKSTERNAL  
DENGAN CARBON FIBER REINFORCED POLYMER**

*Behavior of Concrete Columns Externally Confined  
By Carbon Fiber Reinforced Polymer*

**AYUDDIN**



**PROGRAM PASCASARJANA  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2013**

**PERILAKU KOLOM BETON YANG DIKEKANG SECARA EKSTERNAL  
DENGAN CARBON FIBER REINFORCED POLYMER**

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Doktor

Program Studi  
Teknik Sipil

Disusun dan diajukan oleh

AYUDDIN

Kepada

**PROGRAM PASCASARJANA  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2013**

**DISERTASI**

**PERILAKU KOLOM BETON YANG DIKEKANG SECARA EKSTERNAL  
DENGAN CARBON FIBER REINFORCED POLYMER**


Disusun dan diajukan oleh  
**AYUDDIN**  
Nomor Pokok P0800309003

telah dipertahankan di depan Panitia Ujian Disertasi  
pada tanggal 10 Juni 2013  
dan dinyatakan telah memenuhi syarat


Menyetujui  
Komisi Penasihat,



Prof. Dr-Ing. Herman Parung, M.Eng  
Promotor

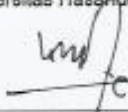


Prof. Dr. M. Wihardi Tjaronge, ST, M.Eng  
Kopromotor



Dr. Rudy Djamaluddin, ST, M.Eng  
Kopromotor

Ketua Program Studi  
Teknik Sipil,  
  
Prof. Dr. Ir. H. M. Saleh Pallu, M.Eng

Direktur Program Pascasarjana  
Universitas Hasanuddin,  
  
Prof. Dr. Ir. Mursallim, M.Sc

## ABSTRAK

AYUDDIN. *Perilaku Kolom Beton yang Dikekang secara Eksternal dengan Carbon Fiber Reinforced Polymer* (dibimbing oleh Herman Parung, M. Wihardi Tjaronge, dan Rudy Djamaluddin).

Penelitian ini bertujuan (1) mengkaji efektivitas penggunaan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) sebagai bahan pengekangan pada kolom beton, (2) mengkaji pengaruh jumlah lapisan pengekangan CFRP terhadap perilaku kekuatan kolom beton, dan (3) menghasilkan model rumusan tegangan regangan yang terjadi akibat pengekangan dengan material CFRP pada kolom beton.

Metode yang digunakan dalam eksperimen ini adalah model pengekangan CFRP secara eksternal dengan pengujian pembebanan konsentris hingga mengalami keruntuhan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa (1) terjadi peningkatan kapasitas aksial pada kolom polos terkekang CFRP 1 lapis spasi (P-1 LS) sebesar 33.33 %, 2 lapis spasi (P-2 LS) sebesar 40 %, 1 lapis penuh (P-1 LP) sebesar 66.67 %, dan 2 lapis penuh (P-2 LP) sebesar 73.33 % terhadap kolom polos tidak terkekang CFRP (PS), sedangkan pada kolom beton bertulang terkekang CFRP 1 lapis spasi (B-1 LS) sebesar 12.50 % terhadap kolom beton bertulang tidak terkekang CFRP (BT); (2) untuk validasi nilai peningkatan beton yang terkekang (K) terhadap hasil eksperimen, perumusan model Lam dan Teng memiliki prediksi yang cukup baik dengan nilai COV sebesar 10.71 % dibandingkan dengan model Li dkk maupun model Campione dan Mirage yang masing-masing memiliki nilai COV sebesar 10.07 %, dan 9.27 %; (3) bentuk kurva hubungan konstitutif tegangan regangan yang diusulkan berdasarkan hasil eksperimen memperlihatkan adanya kemiripan model Li dkk maupun model Campione dan Mirage.

**Kata kunci:** CFRP, kolom bulat, pengekangan, model konstitutif.

## ABSTRACT

AYUDDIN. *Behavior of Reinforced Concrete Columns Confined by Carbon Fiber Reinforced Polymer* (supervised by Herman Parung, M. Wihardi Tjaronge, and Rudy Djamaluddin).

The research aimed: to examine the effectiveness of CFRP use as the confinement material on the concrete column, to examine the impact of the number of CFRP confinement layers towards the strength behavior of the concrete column, and to produce strain stress formulation model occurring as the result of the confinement with the CFRP material on the concrete column.

Method used in the research was the CFRP confinement model externally with the concentric loading examination up to undergoing collapse.

The research result indicates that there is axial capacity improvement on the plain concrete column of confined CFRP of 1 space layer (P-1 LS) as much as 33.33%, 2 space layers (P-2 LS) as much as 40%, 1 full layer (P-1 LP) as much as 66.67%, and 2 full layers (P-2 LP) as much as 73.33% towards the plain column of unconfined CFRP (PS), whereas the reinforced concrete column confined CFRP of 1 space layer (B-1 LS) as much as 12.50% towards the reinforced concrete column of unconfined CFRP (BT). Furthermore, to validate the value of unconfined concrete improvement (K) towards the experiment results, the formulation of Lam and Teng's model possesses the sufficiently good prediction by COV value as much as 10.71% compared with Li's et.al model and Campione and Miragle's model in which each has the COV value of 10.07%, 9.27%. While the curve form of the strain stress constitutive relationship proposed based on the experiment result indicates the similiraty of Li's et.al model and Campione and Miragle's model.

**Key-words:** Carbon Fiber Reinforced Polymer, column circular, confinement, constitutive model.

## **BAB I**

### **PENDAHULUAN**

#### **A. Latar Belakang**

Dalam beberapa tahun belakangan ini, Indonesia banyak mengalami bencana alam utamanya kejadian gempa bumi. Hal ini menyebabkan elemen struktur bangunan mengalami kerusakan, terutama yang terjadi pada bagian kolom. Perencanaan kolom yang dilakukan selama ini sebagai upaya perkuatan adalah pengekangan dengan menggunakan baja tulangan. Metode ini memiliki kelebihan yaitu bahannya mudah didapatkan dan relatif murah serta pelaksanaan/perakitan tulangnya tidak membutuhkan penanganan khusus. Namun, kekurangannya tidak dapat mengekang seluruh kolom dan berpotensi menambah beban mati struktur sehingga kekuatan dan daktilitasnya tidak maksimal.

Pengekangan dengan model konvensional ini, oleh para ahli menganggap belum mampu memberikan daktilitas yang cukup sehingga dalam berbagai kasus masih banyak terjadi keruntuhan pada kolom konstruksi. Perencanaan kolom dewasa ini menuntut rancangan yang lebih kuat dan memiliki daktilitas struktur yang lebih tinggi. Salah satu pengekangan struktur pada kolom yang pesat perkembangannya adalah penggunaan material bermutu tinggi (CFRP) pada konstruksi kolom.

Hal ini ditunjukkan oleh makin maraknya penelitian dan penemuan yang berorientasi kepada penggunaan material bermutu tinggi serta adanya riset-riset pemanfaatan sistem struktur yang semakin baik. Oleh karena itu, kombinasi pemakaian bahan berkinerja tinggi pada komponen struktur (seperti: balok, kolom, pelat dan pondasi) merupakan hal yang wajar (Shi, C and Mo, Y 2007).

Penggunaan serat karbon mutu tinggi baik dalam arah longitudinal maupun transversal sebagai pengekangan pada kolom akan memberikan efek pengekangan yang maksimal. Serat karbon tersebut dapat berupa serat polimer (*fiber reinforced polymer*) maupun serat polimer komposit (*composite fiber reinforced polymer*) yang berbentuk lamina atau lembaran yang membungkus sebagian atau seluruh kolom beton. Hal ini dapat dilakukan baik untuk tujuan perkuatan (*strengthening*) maupun perbaikan (*retrofit*).

Penelitian tentang komponen kolom telah banyak dilakukan dalam beberapa tahun terakhir ini, terutama dalam hal penggunaan CFRP sebagai tulangan transversal untuk pengekangan kolom, utamanya untuk pengekangan eksternal pada kolom. Beberapa penelitian penggunaan serat karbon (CFRP) sebagai pengekangan pada kolom menghasilkan rumusan bahwa pengekangan dengan CFRP dapat menghasilkan pengekangan yang efektif, menambah kekuatan dan daktilitas pada kolom (Bisby et al. 2005; and Toutanji, H 2010). Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi rekomendasi khusus/masukan kepada pelaksana

konstruksi mengenai kekuatan serta strategi konsep pemasangannya pada suatu konstruksi kolom. Di samping itu, yang sangat penting dalam penelitian ini adalah dari model rumusan tegangan regangan yang dihasilkan dapat memberikan masukan untuk penyempurnaan peraturan Standar Nasional Indonesia yang selama ini belum mengakomodasi penggunaan CFRP, khususnya FRP Carbon wrap di Indonesia.

## **B. Rumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang di atas, maka dapat dirumuskan beberapa masalah sebagai berikut :

- Bagaimana efektifitas penggunaan CFRP tipe Carbon wrap sebagai bahan pengekangan pada kolom beton bulat.
- Bagaimana pengaruh jumlah lapisan pengekangan CFRP tipe Carbon wrap terhadap perilaku kekuatan kolom beton bulat.
- Bagaimana model rumusan tegangan regangan yang terjadi akibat pengekangan dengan material CFRP tipe Carbon wrap pada kolom beton bulat.

## **C. Tujuan Penelitian**

Tujuan penelitian ini sebagai berikut :

1. Mengkaji efektifitas penggunaan CFRP tipe Carbon wrap sebagai bahan pengekangan pada kolom beton bulat.



2. Mengkaji pengaruh jumlah lapisan pengekangan CFRP tipe Carbon wrap terhadap perilaku kekuatan kolom beton bulat.
3. Menghasilkan model rumusan tegangan regangan yang terjadi akibat pengekangan dengan material CFRP tipe Carbon wrap pada kolom beton bulat.

#### **D. Ruang Lingkup / Batasan Masalah**

Untuk mencapai tujuan penelitian yang memiliki bentuk, arah dan fokus yang jelas, maka permasalahan dibatasi pada hal-hal sebagai berikut :

- a. Material dasar dari pengekangan CFRP yang digunakan adalah produksi PT. Sika Indonesia tipe Carbon wrap.
- b. Spesimen penelitian menggunakan kolom bulat berdiameter 130 x 700 mm, dengan tulangan internal standar dan selanjutnya diberi pengekangan eksternal pada kolom tersebut dengan menggunakan CFRP tipe Carbon wrap.
- c. Beton yang digunakan adalah beton mutu normal (NSC) dengan target kekuatan tekan karakteristik 20.75 MPa.

#### **E. Manfaat Penelitian**

Penelitian yang akan digunakan dapat memberikan manfaat, antara lain :

- a. Hasil penelitian dapat memberikan informasi sejauhmana efektifitas penggunaan CFRP tipe Carbon wrap sebagai bahan pengekangan pada kolom beton bulat.
- b. Mengetahui pengaruh jumlah lapisan pengekangan CFRP tipe Carbon wrap terhadap perilaku kekuatan kolom beton bulat.
- c. Hasil dari model pengekangan yang akan dihasilkan dapat dijadikan acuan dalam perencanaan CFRP untuk pengekangan kolom beton secara eksternal.
- d. Regulasi yang mengatur pemanfaatan CFRP pada Standar Nasional Indonesia sebagai bahan pengekangan belum dijumpai. Oleh karena itu, dari model yang akan dihasilkan dalam penelitian ini dapat dijadikan usulan secara ilmiah pada peraturan Standar Nasional Indonesia dalam upaya penyusunan regulasi pemanfaatan CFRP sebagai pengekangan pada elemen struktur khususnya pada kolom beton bulat.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### Pengekangan pada Struktur Beton

Perencanaan struktur beton tahan gempa yang baik dapat dihasilkan bila diketahui berbagai sifat dan karakteristik dari beton dan baja tulangan yang meliputi kekuatan (*strength*), enersi absorpsi, enersi disipasi serta daktilitasnya. Daktilitas adalah kemampuan suatu penampang, komponen atau struktur untuk berdeformasi tanpa kehilangan kekuatan yang signifikan. Dengan demikian, komponen struktur beton untuk kolom harus didetail untuk mampu mencapai daktilitas dan pada daerah potensial terjadinya sendi plastis harus dilakukan penyelesaian detail yang rinci agar tercapai daktilitas yang baik, sehingga tidak mengalami keruntuhan saat dilanda gempa. Daktilitas pada komponen struktur pada umumnya dicapai melalui tulangan kekang yang dapat berupa sengkang spiral, sengkang biasa ataupun sengkang ikat dan pengekangan secara eksternal pada suatu elemen struktur.

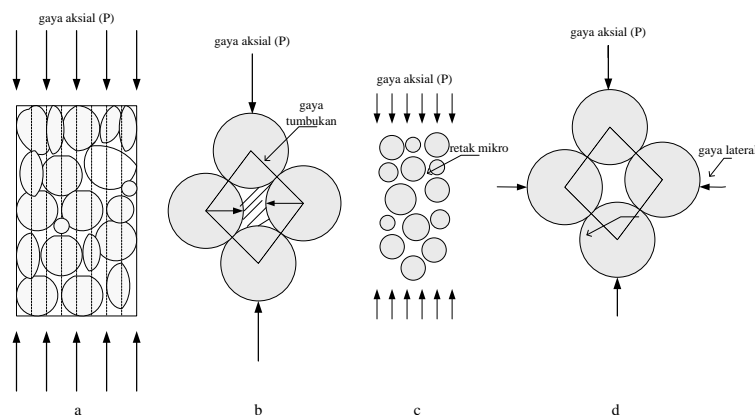
Pengekangan yang umumnya dilakukan adalah pengekangan yang menggunakan tulangan yang terbuat dari baja. Pengekangan jenis ini dikenal dengan istilah pengekangan pasif. Model pengekangan pasif memiliki perilaku yang berbeda dengan pengekangan aktif. Kekangan

yang bersifat pasif berupa kekangan oleh tulangan lateral baik berbentuk spiral maupun persegi dan kekangan yang bersifat aktif dimana kekangannya dapat diberikan oleh fluida.

Pada kekangan pasif, tekanan lateral yang diberikan tidak konstan seperti kekangan aktif, tetapi tergantung pada deformasi aksial dari inti beton dan perilaku karakteristik tulangan lateral. Selain itu, kekangan yang diberikan oleh tulangan lateral akan menghasilkan gaya lateral yang tidak merata, yang bekerja pada inti beton, tegangan leleh tulangan lateral, spasi dan konfigurasi tulangan lateral tersebut. Sedangkan pengekangan aktif yang diberikan oleh fluida akan menghasilkan gaya lateral yang merata pada seluruh permukaan beton. Terkait dengan hal tersebut, jika beton dikekang pada semua atau sebagian arahnya, maka perilaku kekuatan dan daktilitasnya akan meningkat signifikan serta keruntuhannya tidak getas. Sedangkan beton tanpa kekangan yang diberi beban uniaksial tekan memiliki perilaku keruntuhan yang getas. Dalam aplikasi pengekangan pada beton, maka kondisi batas beton terkekang sangat mempengaruhi perilaku keruntuhan beton. Tersedianya kondisi batas tersebut dapat menimbulkan pembatasan gerakan (*restraint*) terhadap kecenderungan material untuk berdeformasi secara lateral akibat pembebanan yang dialaminya.

Pola keruntuhan beton akibat beban uniaksial umumnya ditandai oleh adanya penambahan volume (*volume expansion*) yang tidak

terkontrol. Kehadiran mekanisme tahanan (*restraint*) yang bekerja pada beton menyebabkan proses keruntuhan yang terjadi dapat diperlambat atau dikontrol. Salah satu bentuk mekanisme tahanan tersebut adalah pemasangan tulangan lateral. Mekanisme terjadinya kekangan pada beton secara detail dapat dilihat pada gambar 4. Gaya aksial tekan  $P$  yang bekerja pada permukaan beton akan diteruskan hingga mengenai agregat beton (gambar 4.a), sehingga mengakibatkan terjadinya tumbukan atau gesekan antar agregat (gambar 4.b). Akibat tumbukan tersebut terjadi retak-retak mikro (*micro cracks*) pada beton (Gambar 4.c). Retak mikro tersebut akan merambat dengan cepat kemudian akan terjadi retak makro hingga beton runtuh. Proses keruntuhan beton dapat diperlambat bila ada gaya lateral yang berfungsi sebagai pengekangan yang dilustrasikan pada gambar 4.d.



Gambar 4. Mekanisme pengekangan beton (CEB-FIP, 1990), (a) jalur gaya yang bekerja pada agregat, (b) transmisi gaya-gaya dari partikel ke partikel, (c) retak antar muka akibat beban uniaksial, (d) efek dari aksi pengekangan.

## Material CFRP

FRP merupakan material komposit terbuat dari *fiber* dan *polymeric resin*, yang kemudian disebut *Fiber Reinforced Polymer*. Bahan ini menggabungkan polimer resin, filler dan fiber. Resin yang digunakan adalah *polyester* atau *epoxy* dan *filler* yang digunakan adalah *kaolin clay*, *calcium carbonate* dan *alumina*. Termasuk dalam FRP antara lain *Carbon*, *Aramid*, *Glass*. Ketiganya dipakai karena memiliki kekuatan tarik yang besar sehingga dapat memperkuat kapasitas tarik dari beton. *Carbon FRP* (CFRP) lebih banyak digunakan karena memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan *Aramid* dan *Glass*, antara lain :

1. *Carbon* lebih tahan terhadap bahan kimia, *Glass* dapat bereaksi dengan alkali, sedangkan *Aramid* mudah menyerap air.
2. Kuat tekan *Carbon* dan *Glass* mendekati kuat tariknya, sedangkan *Aramid* lebih kecil, yaitu masing-masing 78%, 55% dan 20%.

Teknik pengekangan beton dengan menggunakan FRP khususnya *Carbon FRP* adalah dengan membungkus kolom beton dengan CFRP yang direkatkan dengan menggunakan *epoxy resin*. Dalam hal pemasangannya sangat penting diperhatikan dikarenakan fungsinya sebagai pelapis dari luar yang akan dibebankan terhadap beban yang akan diterima. Material CFRP ini memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan baja tulangan (Mallick, 2008). Pada tabel 2 menyajikan perbandingan sifat mekanik dengan beberapa material.

Tabel 2. perbandingan properti mekanik beberapa bahan logam

Material	Kepadatan (g/cm <sup>3</sup> )	Modulus (GPa)	Kuat Tarik (MPa)	Kuat Leleh (MPa)	Rasio Modulus Terhadap Berat, 10 <sup>6</sup> m	Rasio Kuat Tarik terhadap Berat, 10 <sup>3</sup> m
Baja SAE 1010	7.87	207	365	303	2.68	4.72
Alumunium 6061-T6	2.7	68.9	310	275	2.6	11.7
Titanium Ti-6A-1-4V	4.43	110	1171	1068	2.53	26.9
Stainless steel 17-7 PH	7.87	196	1619	1515	2.54	21.0
Nikel INCO 718	8.2	207	1399	1247	2.57	17.4
CFRP mutu Tinggi	1.55	137.8	1550	-	9.06	101.9

Sumber : Mallick, (2008)

Tabel 2 mengindikasikan bahwa material CFRP merupakan material yang ringan (kepadatan 1,55 gram/cm<sup>3</sup>), tetapi dengan kekuatan yang besar (tegangan tarik 1550 MPa). Meskipun bahan Stainless memiliki tegangan terbesar yakni 1619 MPa, akan tetapi bahan tersebut masih lebih berat dibandingkan dengan CFRP. Material CFRP juga memiliki keunggulan sifat mekanik lainnya seperti modulus elastisitas, rasio modulus terhadap berat, dan rasio kuat tarik terhadap berat bila dibandingkan terhadap material lainnya.

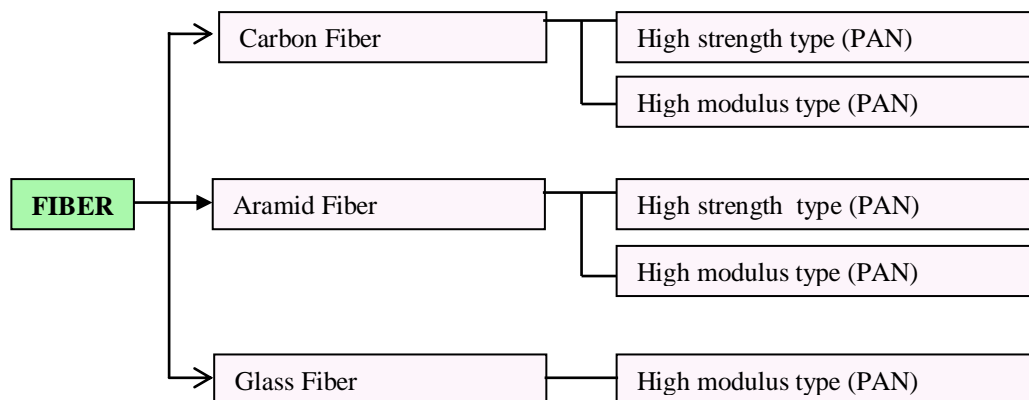
Hal ini bila dikaitkan bahwa CFRP tidak hanya mengekang kolom dari segi gaya-gaya mekanik saja tetapi juga dapat berfungsi mengekang atau melindungi elemen kolom dari bahaya kebakaran atau termal yang berlebihan. Perbandingan properti termal beberapa material dapat dilihat pada tabel 3.

Tabel 3. Perbandingan propert1 termal beberapa material

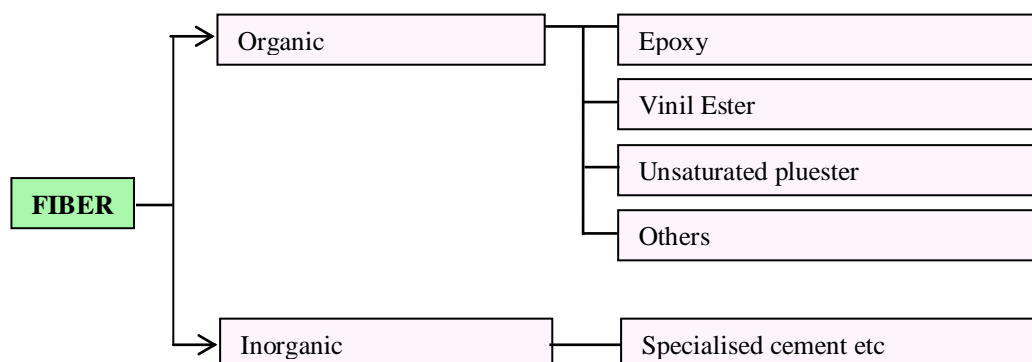
Material	Kepadatan (g/cm <sup>3</sup> )	Koefisien Ekspansi Termal (10 <sup>-6</sup> /°C)	Konduktivitas Termal (W/m °K)	Rasio Konduktivitas Termal terhadap Berat (10 <sup>-3</sup> m <sup>4</sup> /s <sup>3</sup> °K)
Baja karbon Polos	7.87	11.7	52	6.6
Alumunium Paduan	2.7	23.5	130-220	48.1-81.5
Titanium paduan Ti-6A1-4V	4.43	8.6	6.7	1.51
CFRP K1100	1.8	-1.1	300	166.7

Sumber : Mallick, (2008)

Klasifikasi fiber berdasarkan jenis, perekat dan bentuk dapat dilihat pada gambar 5 di bawah :

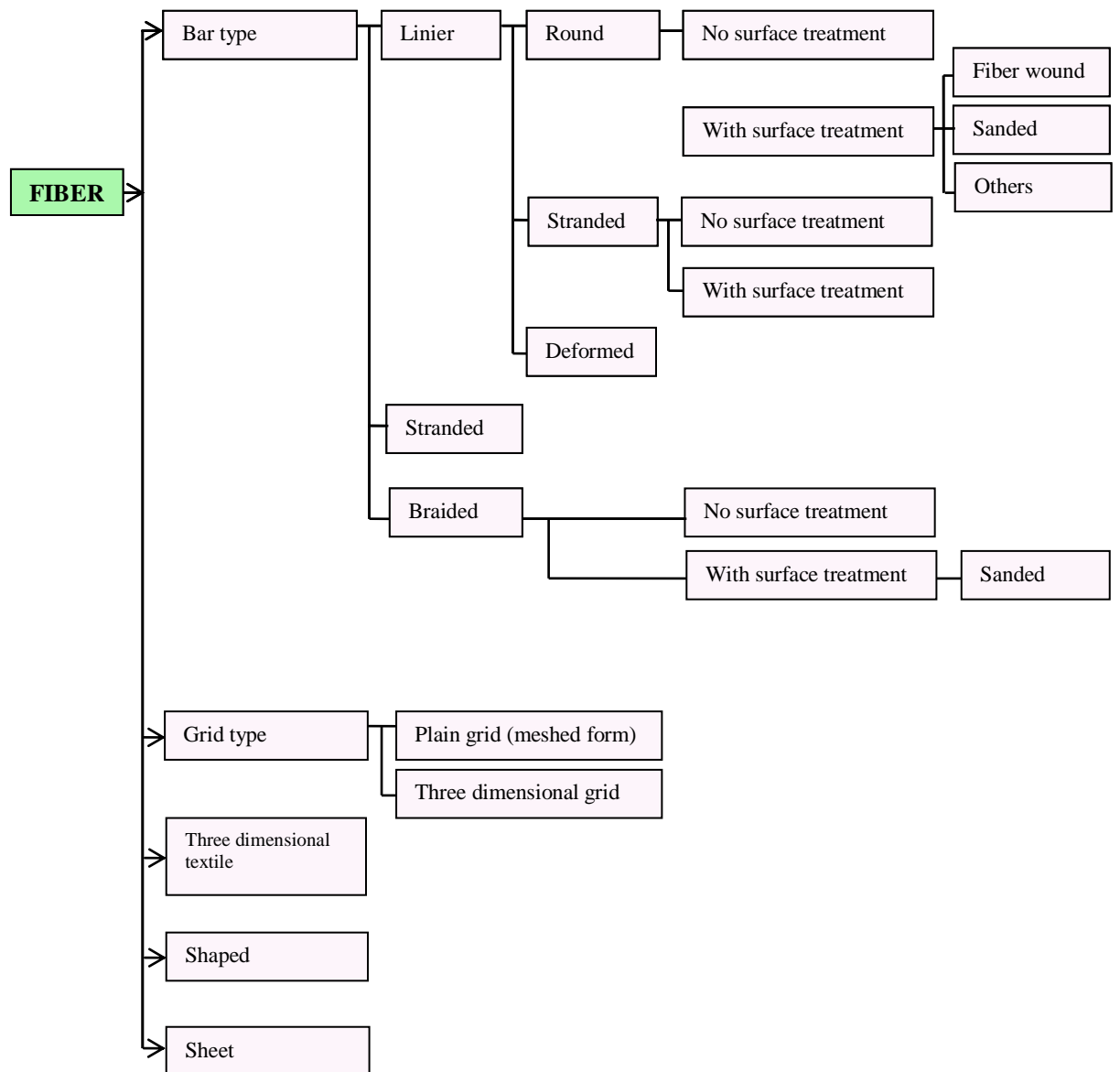


Klasifikasi berdasarkan jenis fiber



Klasifikasi berdasarkan jenis perekat





Klasifikasi berdasarkan bentuk

Gambar 5. Klasifikasi fiber berdasarkan jenis, perekat dan bentuk

Berdasarkan pemasangannya fiber dibedakan atas satu dan dua arah. Fiber yang mempunyai kekuatan sangat tinggi seperti aramid dan glass dipasang pada arah lateral dan transversal. Sedangkan *carbon fiber*

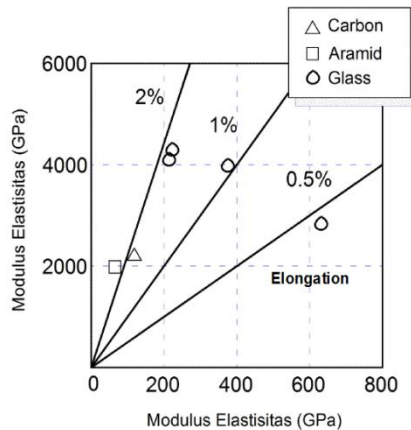
merupakan material *anisotropic*, mempunyai sifat yang berbeda pada arah transversal dan lateral. Sebagai contoh walaupun modulus elastisitas pada arah longitudinal mencapai  $230 \text{ kN/mm}^2$ , tetapi pada arah transversal hanya mencapai  $40 \text{ kN/mm}^2$ . Sebuah fakta yang harus dipertimbangkan dalam menggunakan fiber sebagai material perkuatan. Karakteristik fiber dapat dilihat pada Tabel 4.

Kuat tarik dari fiber ditentukan berdasarkan uji tarik lembaran fiber. Dalam perhitungan kuat tarik dan modulus elastisitas, digunakan penampang melintang fiber tanpa memperhitungkan *resin* sebagai perekat. Gambar 6 dan 7 memperlihatkan hubungan antara kuat tarik dan modulus elastisitas fiber dan perbandingan antara kuat tarik fiber dengan lembaran fiber (*sheets*).

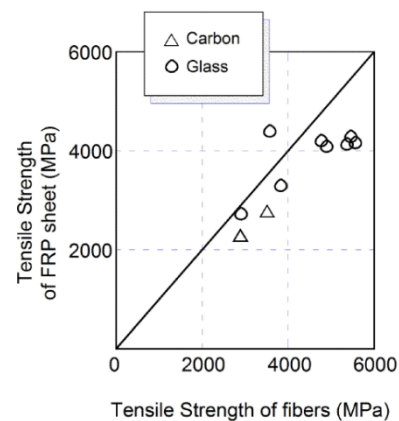
Tabel 4. Karakteristik fiber

Fiber		Kuat Tarik (MPa)	Modulus Elastisitas (GPa)	Elongasi (%)	Berat Jenis ( $\text{g/cm}^3$ )
<b>Carbon fiber</b>	high strength type	3430-4900	230-240	1.5-2.1	1.8
	high modulus type	2940-4600	392-640	0.45-1.2	1.8-2.1
<b>Aramid fiber</b>	high strength type	3500	74	4.6	1.39
	high modulus type	2900	111	2.4	1.45
<b>Glass fiber</b>	E glass	3500	74	4.7	2.6

Sumber : Fukuyama, H., *et al*, (1997)



Gambar 6. Kuat tarik vs modulus elastisitas fiber



Gambar 7. Kuat tarik fiber vs kuat tarik sheets

Umumnya untuk perkuatan kolom terutama untuk perkuatan kuat tekan dan kuat geser, lembaran fiber dipasang pada arah transversal dari kolom. Material fiber sebagai bahan perkuatan harus menjamin durabilitas efek dari perkuatan itu sendiri, artinya kolom yang diperkuat tersebut harus dapat memikul beban rencana dengan aman. Sifat utama yang harus diperhatikan untuk memenuhi persyaratan *durability* adalah kompatibilitas dan daya lekat dengan beton. Material fiber harus cocok dan sesuai dengan beton baik dari segi mekanikal (kuat tekan, daya lekat, perubahan bentuk), fisikal (tahan terhadap air, kedap udara, tahan terhadap pembekuan, daya serap/*absorbability*, tahan gerusan/*grindability*), rheological (*shrinkage*, *creep*) dan kimiawi (reaktivitas, konduktivitas, elektrokimia). Sehingga material ini tidak boleh material “asing” pada kolom. Efek pemberian fiber sebagai kekangan dalam jangka waktu yang lama harus diperhatikan juga karena pada penggunaannya, kolom yang diperkuat tersebut diharapkan mampu berdiri

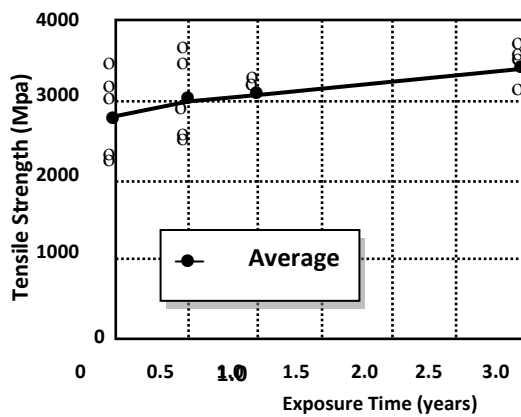
hingga masa layannya. Berikut diberikan gambaran tentang durabilitas material fiber dan kolom yang diperkuat fiber terutama dalam hal resistensi terhadap cuaca. Yagi, dkk (1997) mengadakan percobaan untuk mengetahui resistensi material fiber terhadap cuaca yaitu dengan diperiksa dengan memeriksa kuat tarik lembaran fiber setelah tiga tahun dalam keadaan *natural exposure* dan setelah *accelerated exposure*. Tabel 5 berikut menunjukkan kondisi percobaan dan uji kuat tarik yang dilakukan :

Tabel 5. Percobaan Yagi, dkk (1997)

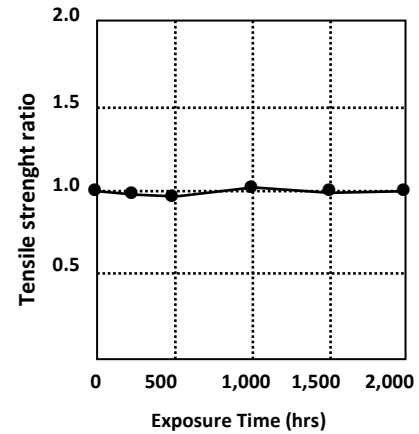
	<b>Natural exposure</b>	<b>Accelerated exposure</b>
<b>Exposure conditions</b>	Exposure time: 3 years	Following JIS A 1415 "Recommended practice for accelerated artificial exposure of plastics building materials"
	No. of test pieces: 6	
	Location: Rooftop in Yokohama, Japan	Sunshine Eather-o-meter
		Test conditions:
		Black panel temperature $63 \pm 3$ °C
		Spray cycle 18mins / 120mins
		Exposure time:
		2,000 hrs : 6 test pieces 10,000 hrs : 5 test pieces
<b>Tensile testing methods</b>	JIS K 7073 "Testing method for tensile properties of carbon fiber reinforced plastics"	
	JIS R 7601 "Testing method for carbon fibers"	

Sumber : Yagi, K., *et al*, (1997)

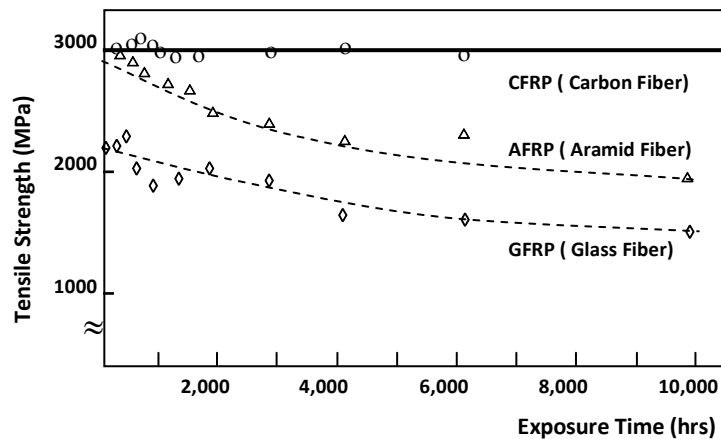
Hasil percobaannya dapat dilihat pada gambar 8, 9, dan 10 di bawah ini:



Gambar 8. Kuat tarik setelah *natural exposure*



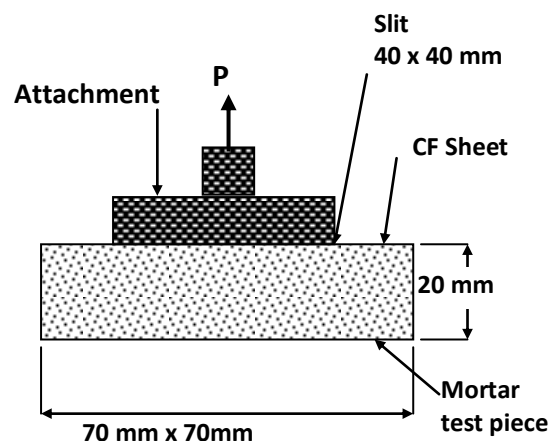
Gambar 9. Kuat tarik setelah *accelerated exposure*



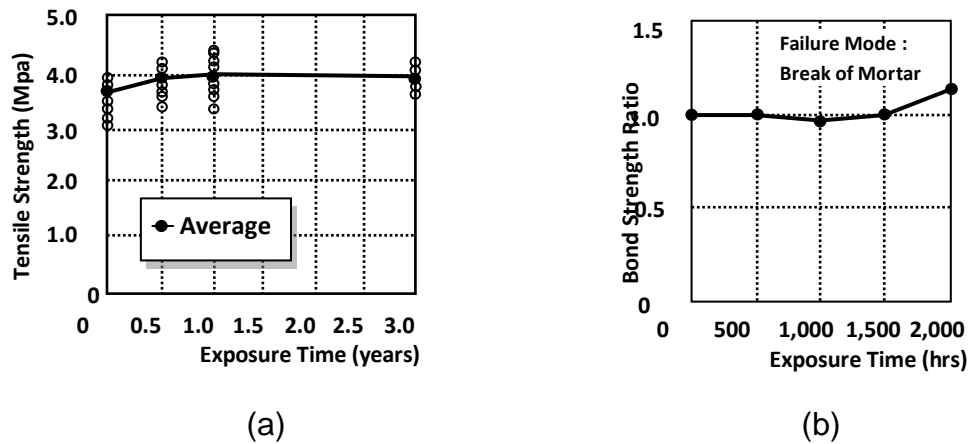
Gambar 10. Kuat tarik pada variasi fiber komposit setelah *accelerated exposure*

Dari gambar 10 dapat disimpulkan bahwa tidak ada kehilangan kuat tarik yang berarti baik pada kondisi natural maupun *accelerated exposure* sehingga material fiber dapat dikatakan mempunyai resistensi yang tinggi terhadap cuaca. Proses perkuatan menggunakan fiber berarti

menambahkan material baru pada kolom beton, oleh karena itu material fiber ini juga akan memikul tegangan dan menjadi sangat penting untuk menjamin penyaluran tegangan pada bidang batas antar beton dengan fiber terpelihara dengan baik selama masa layan dari suatu struktur. Yagi, dkk (1997) melakukan percobaan untuk memeriksa lekatan antara beton dengan fiber dalam jangka waktu yang lama. Percobaan dilakukan berdasarkan percobaan kuat tarik *Building Research Institute* dengan melekatkan lembaran fiber yang dikelilingi oleh rongga kecil pada permukaan benda uji pada keadaan *natural* dan *accelerated exposure* kemudia dilakukan uji tarik untuk menentukan kuat lekatan seperti terlihat dalam gambar 11.



Gambar 11. Metode untuk menguji kuat lekatan fiber



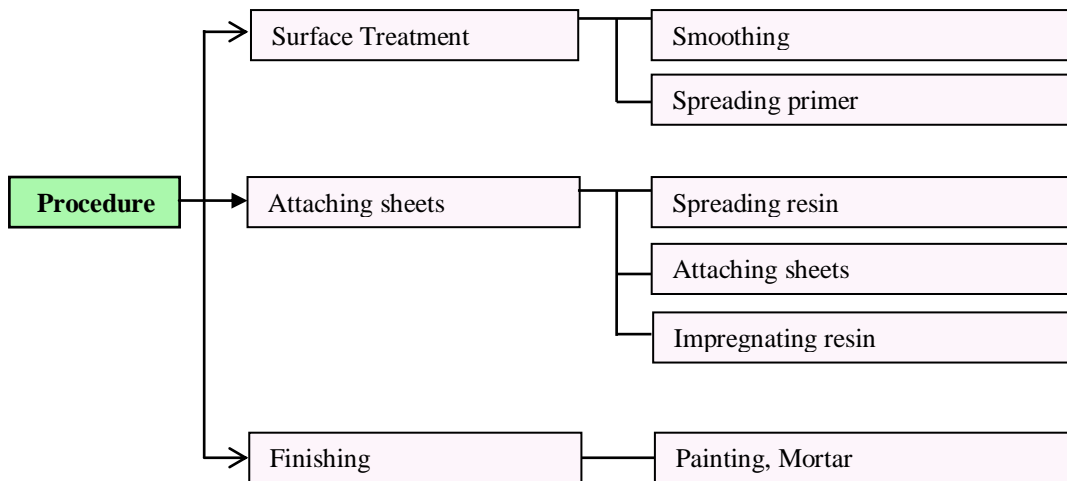
Gambar 12. Kuat lekatan (a) setelah *natural* (b) *accelerated exposure*

Dari gambar 12 dapat disimpulkan tidak ada kehilangan kuat lekatan yang berarti baik saat *natural* dan *accelerated exposure* sehingga bias dikatakan *weatherproof*.

### C. CFRP Sheet Jacketing/External Jacketing

Merupakan metoda perkuatan kolom yang sangat menjanjikan dengan berbagai kemudahannya untuk menggantikan metoda perkuatan yang telah ada. Perkuatan kolom dengan metoda ini akan meningkatkan kekuatan geser dan kuat tekan sebagai akibat kekangan dari material fiber. Metode perkuatan ini sering diaplikasikan dalam hal dalam hal perkuatan seismic pada jembatan dan juga dalam renovasi bangunan. Teknik perkuatan ini tidak hanya mencegah terjadinya *spalling* pada kolom dan melindungi terhadap kerusakan, lebih lanjut juga meningkatkan kuat tekan dan kuat geser. Pelaksanaan metode ini pada dasarnya adalah

dengan memasang lembaran fiber pada permukaan beton. Tipikal prosedur perkuatan kolom menggunakan *fiber reinforced polymer* dapat dilihat pada gambar 13 di bawah :

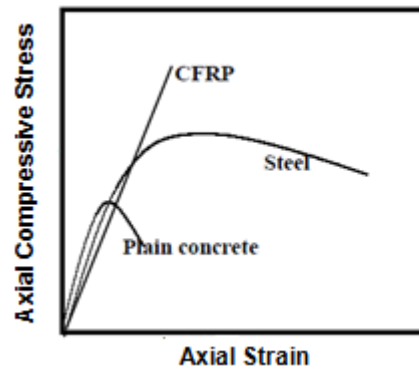


Gambar 13. Tipikal Prosedure perkuatan kolom menggunakan fiber reinforced polymer

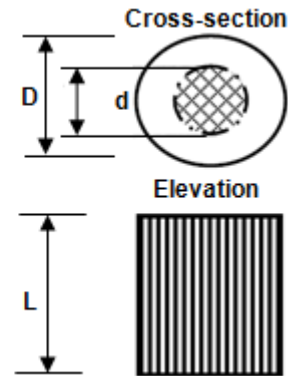
### Tegangan dan Regangan Beton dengan CFRP

Terdapat perilaku yang berbeda antara berbagai material. Perbandingan antara diagram tegangan dan regangan berbagai material dapat dilihat pada gambar 15 dan diagram pengekanan material pada beton gambar 16. Dari diagram ini dapat disimpulkan bahwa fiber, pada kasus ini menggunakan CFRP mempunyai daerah elastik hingga runtuh sedangkan baja mempunyai daerah elastik dan plastik. Perbedaan sifat ini menunjukkan korelasi yang sangat kompleks antara dua material yang digunakan sebagai pengekang.





Gambar 15. Diagram tegangan-regangan berbagai material

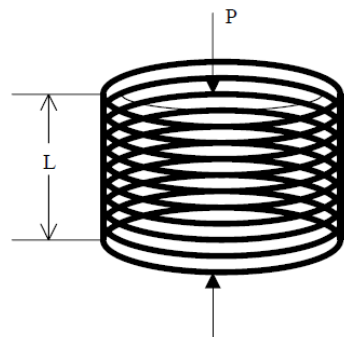


Gambar 16. Diagram pengekanan material pada beton

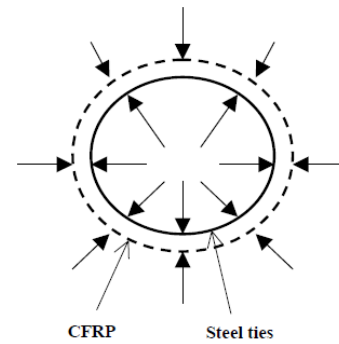
Pengekangan kolom beton dengan material baja dan CFRP sangat tergantung pada ekspansi lateral oleh karena beban tekan. pelebaran kolom meningkat dengan meningkatnya regangan aksial dengan peningkatan jumlah beban tekan. Ketika beton mulai retak, maka posisi beton tetap stabil oleh karena beban aksial yang dibawa oleh kolom dengan kedua ikatan baja tulangan dan material CFRP. Baja tulangan dan CFRP akan mengalami *tensile hoop stresses*, ditunjukkan pada gambar 17 dan 18 dan *Free Body* diagram bagian yang terkekang diperlihatkan pada gambar 19.

Dua manfaat pengekanan yang sangat relevan pada perilaku seismik kolom beton. Pertama, dapat meningkatkan kemampuan kuat tekan dan kedua, dapat mengurangi kemiringan pada *descending branch* pada kurva tegangan regangan akibat kegagalan regangan besar yang

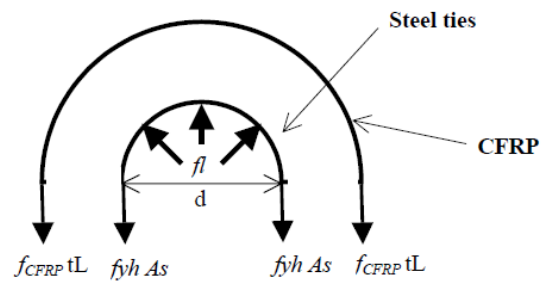
terjadi. Hasilnya dapat meningkatkan daktilitas sebagaimana yang menunjukkan pada gambar 20 (Onpeng dkk, 2006).



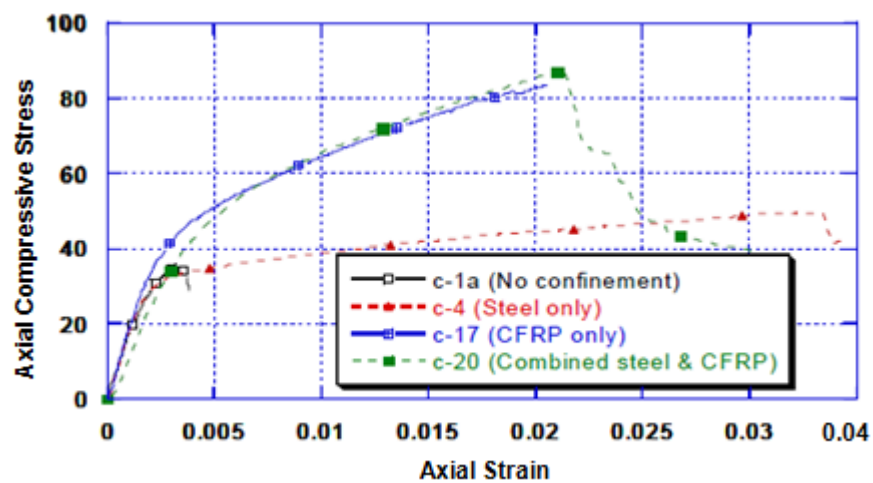
Gambar 17. Isometrik pada Kolom Silinder dengan Beban Tekan



Gambar 18. Efek Pengekangan Baja tulangan dan CFRP



Gambar 19. Free body bagian yang terkekang

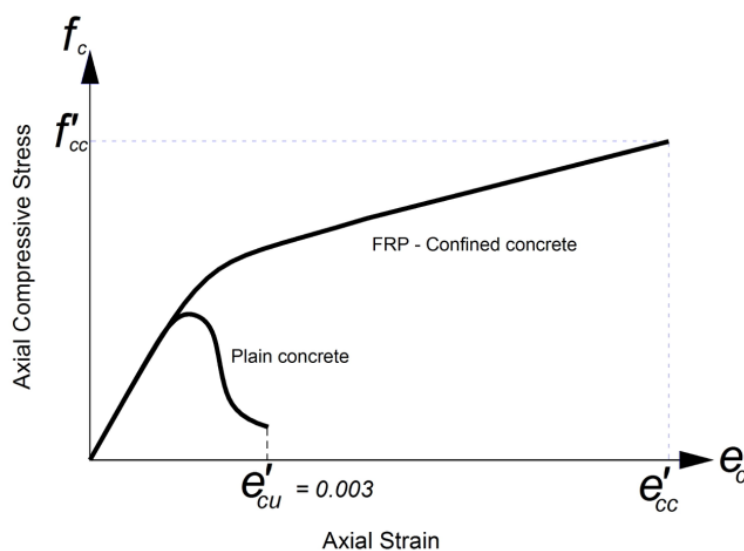


Gambar 20. Diagram Tegangan Regangan

Hosotani dan Kawashima data (1999)

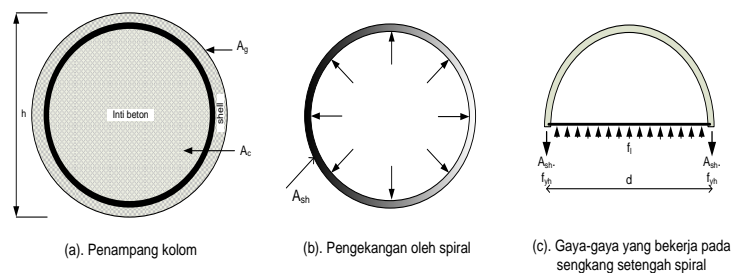
Berdasarkan gambar 20 dari diagram Hosotani dan Kawashima

(1999) menunjukkan bahwa beton tanpa pengekanan akan lebih cepat *collapse* dibandingkan dengan diberikannya pengekanan, baik pengekanan dengan baja, CFRP maupun dengan kombinasi baja dan CFRP. Pengekanan kolom beton dengan material baja menunjukkan lebih daktail daripada material CFRP, akan tetapi gabungan dua material untuk pengekanan baja dan CFRP memberikan hasil yang sangat memuaskan yaitu tingkat daktilitas yang sangat tinggi. Selanjutnya diagram tegangan dan regangan beton yang menggunakan CFRP dapat dilihat pada gambar 21. Regangan ultimit pada beton tidak terkekang tipikal diambil sebesar 0.003. Asumsi yang digunakan adalah bahwa setelah lewat dari nilai regangan 0.003 beton akan mengalami retak dan pengekanan yang diberikan oleh FRP akan bekerja maksimal.



Gambar 21. Diagram tegangan regangan beton terkekang fiber (CFRP)

Mekanisme pengekanan diberikan oleh FRP mirip dengan pengekanan yang ditimbulkan oleh tulangan konvensional, hanya saja berdasarkan sejumlah penelitian terlihat bahwa FRP menghasilkan efektivitas pengekanan yang lebih baik. Bila suatu penampang beton bertulang mendekati kekuatan penuhnya sebelum baja leleh, penampang tersebut juga mengalami peningkatan deformasi arah aksial maupun lateral, selanjutnya penampang akan hancur. Selanjutnya, untuk memperlambat kehancuran penampang beton umumnya digunakan teknik pengekanan pada intinya. Salah satu bentuk pengekanan yang dianggap baik adalah dengan tulangan konvensional, FRP atau CFRP karena memberikan kemampuan untuk menyerap deformasi yang cukup besar sebelum runtuhnya penampang kolom (Priestley,1981), daktilitas yang memadai serta meningkatkan kapasitas inti dengan jumlah yang sama dengan kapasitas selimutnya, sehingga akan menjaga kapasitas leleh kolom pada saat selimut beton terkelupas. Mekanisme terjadinya proses pengekanan dapat dilihat pada gambar 22, yakni gambar diagram benda bebas (*free body*) mekanisme kerja gaya-gaya pengekanan pada sengkang.

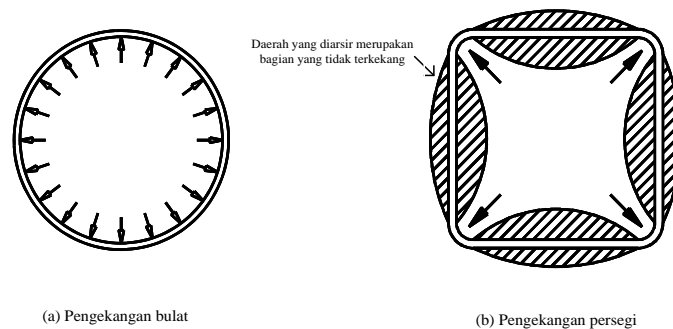


Gambar 22. Mekanisme Pengekanan

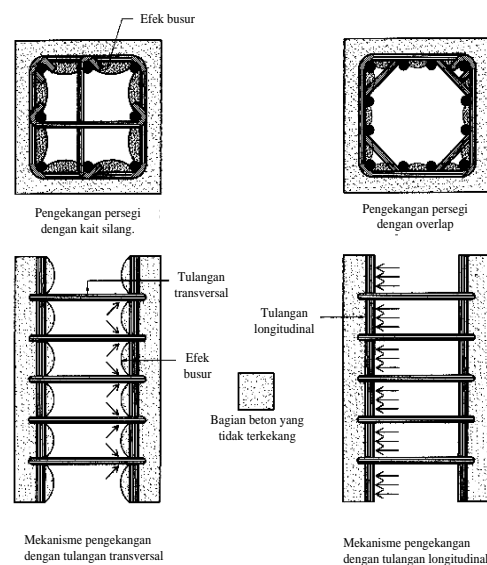
## Pengaruh Pengekangan

### Pengekangan dengan baja tulangan

Gambar 23 menyajikan perbandingan pengekangan baja tulangan persegi dan bulat. Pengekangan bulat efektif mengekang seluruh daerah inti beton sedangkan pengekangan persegi tidak efektif karena memiliki bagian yang tidak dapat ditumpu (*unsupported length*). Untuk *unsupported length* yang lebih panjang dibutuhkan diameter tulangan transversal lebih besar sehingga kemampuan kekang meningkat, hal ini disebabkan meningkatnya kekakuan dari tulangan transversal tersebut. Untuk penampang bulat dengan tulangan spiral, keadaannya jauh lebih ringan karena tegangan radialnya merata ke seluruh lingkaran penampang, serta ada efek pelengkung dari batang tulangan transversal tersebut. Jika kedua bentuk tulangan pengekangan memiliki spasi yang sama, maka untuk meningkatkan efektivitas pengekangan persegi dibutuhkan rasio volumetrik tulangan yang lebih besar. Rasio volumetrik tulangan yang lebih besar dicapai antara lain dengan cara memperpendek spasi tulangan atau memperbesar diameter tulangan pengekangan persegi. Pengekangan dengan sengkang dan spiral dapat dilihat pada gambar 24. Gambar tersebut menunjukkan efek pengekangan pada inti beton yang diberikan oleh tulangan transversal dan longitudinal. Selain itu, juga menunjukkan mekanisme untuk mengurangi daerah yang tidak dikekang yakni dengan menambahkan tulangan kait silang (*cross ties*).



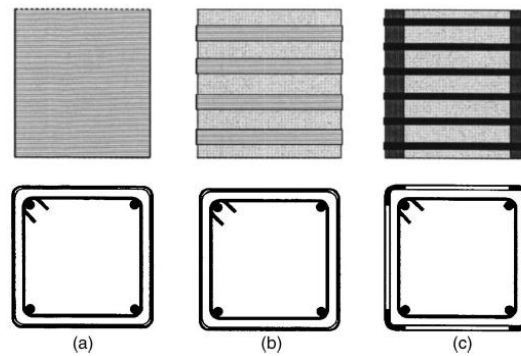
Gambar 23. Perbandingan efek pengekangan persegi dengan pengekangan bulat.



Gambar 24. Perbandingan efek pengekangan yang diberikan oleh tulangan transversal dan longitudinal.

### Pengekangan dengan FRP

Seiring dengan perkembangan penelitian pengekangan dengan memanfaatkan FRP, maka parameter  $f'_1$  (tegangan pengekangan) untuk kasus FRP berbeda dengan pengekangan menggunakan tulangan konvensional. Ilustrasi perbandingan penggunaan material tersebut ditunjukkan pada gambar 26.



Gambar 25. (a) dan (b) pengekanan dengan jaket FRP, (c) pengekanan konvensional

Mirmiran dkk. (1998) mengusulkan parameter *Modified Confinement Ratio* (MCR) untuk pengekanan bulat yang menggunakan CFRP yakni

$$MCR = \left( \frac{2R}{D} \right) \frac{f_r}{f'_{co}} \quad (1)$$

Dimana R adalah sudut radius pada tegangan melingkar CFRP,  $f'_{co}$  adalah kuat tekan beton tidak terkekang, sedangkan  $f_r$  adalah tekanan pengekanan, dengan rumus sebagai berikut :

(2)

Peningkatan kekuatan ultimit kolom akibat pengekanan CFRP tersebut adalah

$$\frac{f'_{cu}}{f'_{cc}} = 0,169 \ln MCR + 1,32 \quad \text{bila } MCR < 0,15 \quad (3)$$

dan regangan ultimit sebesar

(4)

Miyauchi dkk. (1999) mengusulkan formulasi peningkatan kekuatan akibat pengekangan FRP adalah

$$\frac{f_{cu}}{f'_{co}} = 1 + 2.98 \frac{f_l}{f'_{co}} \quad (5)$$

sedangkan regangan pada saat tegangan puncak penampang beton tersebut adalah

$$\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon'_{co}} = 1 + a_1 \left( \frac{f_l}{f'_{co}} \right)^{b_1} \quad (6)$$

Di mana, koefisien  $a_1$  dan  $b_1$  dikalibrasi berdasarkan semua hasil-hasil eksperimen, adalah:

$$a_1 = 15.87 - 0.093 f'_{co} \quad (7)$$

$$b_1 = 0.246 - 0.0064 f'_{co} \quad (8)$$

Selanjutnya persamaan konstitutif daerah naik (*ascending branch*), region I) adalah

$$f_c = f'_{co} \left[ 2 \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon'_{co}} - \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon'_{co}} \right)^2 \right] \quad (9)$$

sedangkan pada persamaan konstitutif region II) adalah

$$f_c = f'_{cu} - \lambda (\varepsilon_{cu} - \varepsilon_c) \quad (10)$$

dimana  $\lambda$  adalah turunan rumus dari Miyauchi dkk (1999) yang memperhitungkan faktor reduksi untuk pengaruh ukuran dalam suatu spesimen.



Lam dan Teng (2003) mengusulkan rumusan peningkatan kekuatan akibat pengekanan dengan FRP adalah sebesar :

$$f'_{cmax} = f'_{co} + 3.3 \frac{f_{l,w}}{f'_{co}} \quad (11)$$

Dengan regangan sebesar

$$\frac{\varepsilon'_{cmax}}{\varepsilon'_{co}} = 1.75 + 12 \left( \frac{f_{l,w}}{f'_{co}} \right) \left( \frac{\varepsilon_{F,w}}{\varepsilon'_{co}} \right)^{0.45} \quad (12)$$

Selanjutnya persamaan konstitutifnya untuk daerah naik (ascending branch), region I) adalah

$$f_c = E_c \varepsilon_c - \frac{(E_c - E_2)^2}{4f'_{oc}} \varepsilon_c^2 \quad (13)$$

sedangkan pada persamaan konstitutif region II) adalah

$$f_c = f'_{oc} + E_2 \varepsilon_c \quad (14)$$

dengan

$$E_2 = \frac{f'_{cmax} - f'_{oc}}{\varepsilon'_{cmax}} \quad (15)$$

Li dkk. (2003) mengusulkan tegangan aksial puncak yang dinyatakan sebagai berikut :

$$f'_{cmax} = f'_{co} + f_1 \tan^2(45^\circ + \varphi/2) \quad (16)$$

Dengan regangan yang diusulkan

$$\varepsilon'_{cmax} = \varepsilon'_{co} \left[ 1 + 2.24 \tan^2 \left( 45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) \frac{f_l}{f'_{co}} \right] \quad (17)$$

Selanjutnya persamaan konstitutifnya untuk daerah naik (*ascending branch*) adalah

$$f_c = f'_{cmax} \left[ 2 \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon'_{cmax}} - \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon'_{cmax}} \right)^2 \right] \quad (18)$$

Sedangkan pada daerah turun atau daerah ke-2 (*descending branch*, region II) adalah

$$f_c = f'_{cmax} - E_{des} (\varepsilon_c - \varepsilon'_{cmax}) \quad (19)$$

dan regangan ultimit dikalkulasikan sebagai

$$\varepsilon'_{cu} = \varepsilon'_{cu} + \frac{f'_{cmax}}{2E_{des}} \quad (20)$$