

TUGAS AKHIR

STUDI PERKUATAN KOLOM BERPENAMPANG LINGKARAN BETON BERTULANG DENGAN MENGUNAKAN GFRP-SHEET 1 LAPIS



DISUSUN OLEH :

ANDI NURYADIN

D111 08 272

**JURUSAN SIPIL FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR**

2012



**DEPARTEMEN PENDIDIKAN NASIONAL
JURUSAN SIPIL FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN**

KAMPUS TAMALANREA TELP. (0411) 587636, FAX. (0411) 587636 MAKASSAR 90245

LEMBAR PENGESAHAN

Tugas Akhir ini diajukan untuk memenuhi syarat mengikuti ujian seminar Hasil pada Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Makassar.

Judul : ***“STUDI PERKUATAN KOLOM BERPENAMPANG LINGKARAN BETON
BERTULANG DENGAN MENGGUNAKAN GFRP-SHEET 1 LAPIS”***

Disusun Oleh :

Andi Nuryadin

D 111 08 272

Telah diperiksa dan disetujui

Oleh Dosen Pembimbing

Makassar, Oktober 2012

Pembimbing I

Pembimbing II

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

Dr. Eng A. ArwinAmiruddin, ST.MT

Nip. 19620730 198603 1 003

Nip. 19730712 200003 2 002

Mengetahui,

Ketua Jurusan Teknik sipil

Prof. Dr. Ir. H. Lawalenna Samang, MS, M.Eng.

Nip. 19601231 198503 1 001

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kami panjatkan kehadirat Allah SWT, karena atas segala berkah dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul ***“STUDI PERKUATAN KOLOM BERPENAMPANG LINGKARAN BETON BERTULANG DENGAN MENGGUNAKAN GFRP-SHEET 1 LAPIS”***, sebagai salah satu syarat yang diajukan untuk menyelesaikan studi pada Fakultas Teknik Jurusan Sipil Universitas Hasanuddin. Tugas akhir ini disusun berdasarkan hasil penelitian dan pengujian yang dilakukan di Laboratorium Struktur dan Bahan Fakultas Teknik Jurusan Sipil Universitas Hasanuddin.

Kami menyadari sepenuhnya bahwa selesainya tugas akhir ini berkat bantuan dari berbagai pihak, utamanya dosen pembimbing kami :

Pembimbing I : Prof. Dr.-Ing. Herman Parung, M.Eng

Pembimbing II : Dr. Eng. A. Arwin Amiruddin, ST, MT.

Selain itu, dengan segala kerendahan hati, kami juga ingin menyampaikan terima kasih serta penghargaan yang setinggi-tingginya kepada :

1. Ayahanda dan Ibunda tercinta atas pengorbanan dan doa kepada kami.
2. Bapak Dr.-Ing Ir. Wahyu H. Piarah, MS, ME., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
3. Bapak Prof. Dr. Ir. H. Lawalenna Samang, MS.M.Eng. selaku ketua Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
4. Bapak Prof. Dr.-Ing. Herman Parung, M.Eng. selaku dosen pembimbing I, yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan dan pengarahan mulai dari awal penelitian hingga selesainya penulisan ini.
5. Bapak Dr. Eng. A. Arwin Amiruddin, ST.MT. selaku dosen pembimbing II, yang telah banyak meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan dan pengarahan kepada kami.
6. Seluruh dosen, staf dan karyawan Fakultas Teknik Jurusan Sipil Universitas Hasanuddin.

7. Bapak Sudirman Sitang, ST selaku staf Laboratorium struktur dan bahan Fakultas Teknik Jurusan Sipil Universitas Hasanuddin atas segala bimbingan dan pengarahan selama pelaksanaan penelitian di Laboratorium.
8. Penulis juga menghaturkan terima kasih kepada kakak mahasiswa Pascasarjana Teknik Sipil 2009, kakak Reso Sipil 2007, serta teman-teman Teknik Sipil se-angkatan 2008 yang telah membantu selama penelitian ini berlangsung

Kami menyadari bahwa tulisan ini tidak luput dari kekurangan-kekurangan. Oleh karena itu penulis mengharapkan kepada para pembaca, kiranya dapat memberikan sumbangan pemikiran demi kesempurnaan dan pembaharuan tugas akhir ini.

Akhir kata, semoga ALLAH SWT melimpahkan Rahmat dan Taufiq-Nya kepada kita, dan Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat bagi pihak-pihak yang berkepentingan.

Makassar, Oktober 2012

Penyusun

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	ii
KATA PENGANTAR.....	iii
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR TABEL.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR NOTASI.....	xiii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang Masalah.....	I-1
1.2 Maksud Penelitian.....	I-3
1.3 Tujuan Penelitian.....	I-3
1.4 Rumusan Masalah.....	I-3
1.5 Ruang Lingkup / Batasan Masalah.....	I-3
1.6 Manfaat Penelitian.....	I-4
1.7 Sistematika Penulisan.....	I-5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Hasil Penelitian Sebelumnya.....	II-1
2.2 Kerangka Pikir.....	II-2
2.3 <i>Self Compacting Concrete</i> (SCC).....	II-3
2.3.1 Bahan Penyusun <i>Self Compacting Concrete</i> (SCC).....	II-10
2.4 Struktur Kolom.....	II-15
2.4.1 Jenis Kolom.....	II-17

2.4.2	Tinjauan Kondisi Elastis dan In-Elastis Struktur Terhadap Beban Lentur	II-23
2.4.2	Perilaku Kolom Pendek dengan Beban Konsentris.....	II-25
2.4.3	Tulangan Spiral pada Kolom Berpenampang lingkaran.....	II-29
2.5	Perkuatan Pada Kolom Berpenampang lingkaran bertulangan Spiral dengan Menggunakan GFRP Sheet	II-30
2.5.1	Tinjau Umum <i>Glass Fiber Reinforced Polymer</i>	II-30
2.5.2	Karakteristik Material GFRP.....	II-32
2.5.3	Resin Epoksi.....	II-34
2.6	Mode Kegagalan Kolom Berpenampang lingkaran terhadap Kombinasi Pembebanan Aksial dan Lentur.....	II-36
2.7	Kapasitas Kolom Berpenampang lingkaran Beton Bertulang Dengan GFRP-S.....	II-38
2.7.1	Perilaku Beton yang Terkekang.....	II-38
2.7.2	Perilaku Kolom Berpenampang Lingkaran Yang Terkekang Komposit : Beban Konsentris (ACI 440-2R-02).....	II-40
2.7.3	Kapasitas Kolom berpenampang lingkaran beton bertulang G S sesuai ACI 440-2R-02.....	II-43

BAB III METODOLOGI PELAKSANAAN PENELITIAN

3.1	Jenis Penelitian dan Desain Penelitian.....	III-1
3.1.1	Jenis Penelitian.....	III-1
3.1.2	Desain Benda Uji.....	III-3
3.1.3	Rancangan Benda Uji untuk Penelitian Kapasitas Daya Dukung Aksial dan Lentur Kolom Berpenampang lingkaran.....	III-4

3.1.4 Lokasi dan Waktu Penelitian.....	III-5
3.1.5 Alat dan Bahan Penelitian.....	III-5
3.1.6 Prosedur Penelitian	III-6
3.2 Kerangka Prosedur Penelitian.....	III-9
3.3 Variabel Penelitian.....	III-11

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Pengujian Karakteristik Silinder Beton.....	IV-1
4.1.1 Pengujian Kuat Tekan silinder beton SCC.....	IV-1
4.1.2 Pengujian Kuat Tarik Belah Beton SCC.....	IV-2
4.1.3 Pegujian Modulus Elastisitas Beton SCC.....	IV-3
4.2 Pengujian Kuat Tarik baja Tulangan.....	IV-5
4.3 Pengujian Kolom Berpenampang lingkaran Beton Bertulang.....	IV-6
4.3.1 Hasil Pengujian Kolom Berpenampang lingkaran Beton Bertulang.....	IV-7
4.3.2 Mode Kegagalan Kolom Berpenampang lingkaran Beton Bertulang.....	IV-14

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan.....	V-1
5.2 Saran.....	V-2

LAMPIRAN-LAMPIRAN

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Kelas SCC Berdasarkan Nilai <i>Slump Flow</i>	II-5
Tabel 2.2	Kelas SCC Berdasarkan Nilai T500,S.....	II-7
Tabel 2.3	Kelas Passing Ability (L-Box).....	II-8
Tabel 2.4	Kelas <i>Segregation Resistance</i> (Saringan Segregasi).....	II-9
Tabel 2.5	Berbagai Komposisi Material Pembentuk Beton SCC.....	II-10
Tabel 2.6	Perbandingan Data Hasil Penelitian Terhadap Data SNI....	II-11
Tabel 2.7	Karakteristik Semen PCC.....	II-12
Tabel 2.8	Karateristik material GFRP.....	II-34
Tabel 2.9	Karateristik Material Resin Epoxi.....	II-35
Tabel 3.1	Variasi Benda Uji Yang Digunakan.....	III-11
Tabel 4.1	Hasil Pengujian Tekan Silinder.....	IV-1
Tabel 4.2	Hasil Pengujian Kuat Tarik Belah (F_{ct}) Beton SCC.....	IV-2
Tabel 4.3	Hasil Pengujian Modulus Elastisitas (E_c) Beton SCC.....	IV-3
Tabel 4.4	Hasil Pengujian Kuat Tarik Tulangan.....	IV-5
Tabel 4.5	Tabel Hasil Pengujian Lentur Kolom Berpenampang lingkaran.....	IV-7
Tabel 4.6	Tabel Hasil Persentase Peningkatan Pengujian Kolom	IV-11
Tabel 4.7	Tabel Hasil Lendutan Maksimum.....	IV-12
Tabel 4.8	Tabel Hasil Mode Kegagalan Kolom Berpenampang lingkaran.....	IV-16

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Kerangka Pikir.....	II-2
Gambar 2.2	Tipe kolom berdasarkan pada bentuk dan tipe tulangan.....	II-17
Gambar 2.3	Perbandingan perilaku beban-deformasi kolom yang terikat dan berpengikat spiral.....	II-18
Gambar 2.4	Tipe kolom berdasarkan posisi beban pada irisan-penampang..	II-20
Gambar 2.5	Hubungan Beban-Defleksi (<i>E.G.Nawy : 1990</i>).....	II-23
Gambar 2.6	Geometri kolom berpenampang lingkaran spiral.....	II-25
Gambar 2.7	Geometri kolom: diagram tegangan (beban konsentris).....	II-26
Gambar 2.8	Tulangan memutar atau spiral untuk kolom.....	II-29
Gambar 2.9	GFRP-S (<i>Glass Fiber Reinforced Polymer Sheet</i>).....	II-33
Gambar 2.10	Perkuatan dengan jaket berbahan komposit.....	II-33
Gambar 2.11	Jenis kolom yang digunakan oleh penelitian sebelumnya (<i>Johannes & Andreas</i>).....	II-37
Gambar 2.12	Perbedaan mode kegagalan dari gagal geser dan gagal lentur (<i>Johannes & Andreas</i>).....	II-37
Gambar 2.13	Skema dari FRP yang dibungkus pada kolom menunjukkan orientasi serat	II-38
Gambar 2.14	Hubungan khas untuk pembebanan uniaksial pada beton tak terkekang menunjukkan tegangan dibandingkan dengan regangan longitudinal, transversal, dan volumetrik regangan	II-38

Gambar 2.15	Kurva tegangan - regangan untuk beton di bawah berbagai tingkat kekangan	II-39
Gambar 2.16	Diagram free-body yang menunjukkan gaya internal dan eksternal pada jaket FRP dan kolom beton.....	II-40
Gambar 3.1	Desain Kolom Berpenampang lingkaran dan Penampang Kolom Berpenampang lingkaran untuk Pengujian kombinasi aksial dan lentur.....	III-4
Gambar 3.2	Set-up pengujian pada <i>loading Frame</i>	III-8
Gambar 3.3	Kerangka Prosedur Penelitian.....	III-10
Gambar 4.1	Pengujian tekan silinder.....	IV-1
Gambar 4.2	Kurva perbandingan kuat tekan beton.....	IV-2
Gambar 4.3	Pengujian kuat tarik belah.....	IV-3
Gambar 4.4	Pengujian modulus elastisitas.....	IV-4
Gambar 4.5	Pengujian baja tulangan.....	IV-5
Gambar 4.6	Pengujian kolom berpenampang lingkaran pada <i>Frame Load</i>	IV-6
Gambar 4.7	Setup pegujian kolom.....	IV-6
Gambar 4.8	Mekanisme terjadinya kenaikan beban aksial.....	IV-8
Gambar 4.9	Kurva hubungan kenaikan beban aksial dan Lendutan lateral (<i>Middle span</i>) pada KB-GFRP-1L.....	IV-9
Gambar 4.10	Kurva hubungan kenaikan beban lateral dan Lendutan lateral (<i>Middle span</i>) pada kedua jenis kolom.....	IV-10
Gambar 4.11	Histogram perbandingan beban lateral Pada kondisi elastis dan in-elastis.....	IV-12
Gambar 4.12	Perbandingan lendutan antara KBN dan KB-GFRP-1L.....	IV-13

Gambar 4.13 Mekanisme retak geser diagonal yang dominan ditemukan	
pada pengujian jenis KBN	IV-14
Gambar 4.14 KBN yang telah mengalami <i>failure</i> yang disertai dengan	
<i>spalling</i> -nya selimut beton	IV-15
Gambar 4.15 Pola retak lentur pada permukaan GFRP	IV-16
Gambar 4.16 Sobeknya lapisan GFRP pada pengujian.....	IV-17
Gambar 4.17 Berhamburannya material beton sesaat setelah Lapisan	
GFRP mengalami <i>Rupture</i>	IV-17

DAFTAR NOTASI

Kuat Tekan Beton

P = beban maksimum (N)

A = luas penampang selinder (mm^2)

f'_c = kuat tekan beton yang disyaratkan (MPa)

Kuat Tarik Beton

f_t = kuat tarik belah (MPa)

D = diameter selinder (mm)

L = panjang selinder (mm)

Kolom Berpenampang lingkaran Beton Bertulang

E_c = Modulus elastisitas beton (MPa)

E_s = Modulus elastisitas baja (MPa)

f_{y1} = Tegangan leleh tulangan longitudinal (MPa)

f_{yt} = Tegangan leleh tulangan transversal (MPa)

P_u = Beban ultimate kolom berpenampang lingkaran bertulangan spiral (Ton)

P_n = Kuat nominal kolom berpenampang lingkaran bertulangan spiral (Ton)

k = faktor tekuk = 1.0 jika perletakan sendi-sendi

l_u = Panjang kolom (mm)

I = Momen inersia (mm^4)

r = radius girasi (mm)

H = Diameter kolom berpenampang lingkaran (mm)

R = Jari-jari kolom berpenampang lingkaran (mm)

A_g	=	Luas bruto kolom berpenampang lingkaran (mm^2)
A_{st}	=	Luas penampang tulangan longitudinal total (mm^2)
ρ_s	=	Rasio penulangan spiral
s	=	spasi atau jarak sengkang spiral (mm)
A_{sp}	=	luasan penampang tulangan spiral (mm^2)
d_s	=	diameter nominal kawat spiral (mm)
D_c	=	Diameter dari inti beton luar-ke-luar-spiral (mm)

Kolom Berpenampang lingkaran Beton Bertulang dengan GFRP-S

f_{cc}	=	Kuat tekan beton akibat kekangan GFRP-S
k_a	=	Faktor efisiensi untuk perkuatan GFRP-S (tergantung pada bentuk geometri penampang)
	=	1,0
n_f	=	Jumlah lapisan GFRP
t_f	=	Tebal lapisan GFRP
E_{frp}	=	Modulus elastisitas tarik pada GFRP (MPa)
C_E	=	Faktor Reduksi Lingkungan = 0.95
ε_{fu}^*	=	Regangan Tarik Ultimate GFRP-S
ε_{fu}	=	Desain regangan Ultimate pada GFRP-S
ε_{fe}	=	Tingkat regangan efektif GFRP-S
f_i	=	Tegangan pengekan pada GFRP-S (Mpa)
P_u	=	Beban ultimate Akibat Kekangan GFRP-S (Ton)
Ψ_f	=	Faktor reduksi kekuatan geser untuk GFRP-S yang dililit full
	=	0,95

k_{ϵ} = Faktor efisiensi untuk regangan GFRP-S yang menjelaskan perbedaan antara regangan ultimate yang diamati pada pengekangan dan regangan ultimate yang diperoleh dari test tarik

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Kolom merupakan anggota tekan vertikal dari suatu rangka struktural yang ditujukan untuk mendukung balok penahan beban. Sesuai fungsinya, kolom menyalurkan beban dari lantai atas ke tingkat yang lebih bawah dan selanjutnya ke tanah melalui pondasi. Karena kolom merupakan elemen tekan, kegagalan sebuah kolom dalam suatu lokasi yang kritis dapat mengakibatkan keruntuhan progresif dari lantai yang berhubungan dan keruntuhan total *ultimate* struktur secara keseluruhan.

Dalam menjalankan fungsinya, selain menerima gaya aksial yang bekerja, kolom juga menerima gaya lateral yang dapat muncul akibat pembebanan gempa yang terjadi. Akibat jenis beban ini, kolom mengalami gaya lentur yang selanjutnya berkaitan erat dengan tingkat daktilitas kolom.

Jenis kolom berpenampang lingkaran dengan tulangan lateral spiral sudah terbukti meningkatkan daktilitas dan *Toughness* (Ketangguhan) disaat bekerjanya beban maksimum pada deformasi yang diakibatkan baik oleh beban aksial maupun lateral atau bahkan kombinasi keduanya. Namun masih diperlukan penelitian lebih lanjut jenis perkuatan tambahan pada kolom berpenampang lingkaran beton bertulang yang dapat meningkatkan kekuatan kolom dalam menerima kombinasi beban aksial dan beban lentur yang diasumsikan sebagai beban gempa dalam aplikasinya di lapangan.

Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) adalah salah satu alternatif material yang dapat digunakan sebagai material perkuatan dan perbaikan struktur.

Umumnya perkuatan struktur dengan menggunakan GFRP dilakukan pada balok, kolom, pelat dan dinding. Penggunaan GFRP pada balok untuk perkuatan lentur dan geser, penggunaan GFRP pada dinding dan pelat untuk perkuatan lentur, dan penggunaan GFRP pada kolom untuk meningkatkan kapasitas beban axial dan geser pada kolom.

Karena keruntuhan kolom merupakan hal penting bila ditinjau dari segi ekonomis dan manusiawi, maka dalam merencanakan kolom perlu lebih waspada, yaitu dengan memberikan kekuatan tambahan guna meningkatkan kekuatan struktur. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, salah satu metode alternatif yang dapat dilakukan untuk perkuatan kolom yaitu dengan metode jacketing menggunakan material komposit *Glass Fiber Reinforced Polymer Sheet* (GFRP-S). Penggunaan GFRP-S jacketing pada perkuatan kolom lebih efektif dan efisien bila dibandingkan dengan pembongkaran dan pembangunan kembali bangunan yang baru, yang tentu saja membutuhkan biaya yang besar dan waktu yang lama.

Berkaitan dengan hal tersebut, maka kami akan melakukan penelitian tentang pengaruh penggunaan GFRP-S sebagai perkuatan kolom berpenampang lingkaran beton bertulang terhadap kombinasi beban aksial dan lentur. Berdasar latar belakang masalah ini, Penulis mengambil judul :

**“STUDI PERKUATAN KOLOM BERPENAMPANG LINGKARAN
BETON BERTULANG DENGAN MENGGUNAKAN GFRP-SHEET 1
LAPIS”**

1.2 Maksud Penelitian

Adapun maksud dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh perkuatan GFRP-S 1 Lapis terhadap peningkatan kapasitas lentur kolom berpenampang lingkaran beton bertulang.

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini sebagai berikut :

1. Untuk menganalisis kapasitas lentur kolom berpenampang lingkaran beton bertulang dengan perkuatan GFRP-S 1 lapis pada kondisi elastis
2. Untuk menganalisis kapasitas lentur kolom berpenampang lingkaran beton bertulang dengan perkuatan GFRP-S 1 lapis pada kondisi in-elastis

1.4 Rumusan Masalah

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

“Bagaimana pengaruh perkuatan GFRP-S 1 lapis terhadap peningkatan kekuatan lentur kolom berpenampang lingkaran beton bertulang?”

1.5 Ruang Lingkup / Batasan Masalah

Untuk mencapai maksud dan tujuan penulisan dan menguraikan rumusan masalah di atas, maka diperlukan batasan-batasan masalah dalam penelitian ini sebagai berikut :

1. Kolom yang digunakan pada penelitian ini adalah kolom berpenampang lingkaran beton bertulang dengan tulangan sengkang spiral dengan diameter kolom 13 cm dan tinggi 70 cm. Kolom yang diteliti masuk dalam kategori kolom pendek.

2. Pada penelitian ini digunakan 2 buah kolom berpenampang lingkaran beton bertulang normal, dan 2 kolom berpenampang lingkaran beton bertulang yang diperkuat dengan GFRP-S 1 lapis.
3. Jenis pembebanan yang digunakan berupa beban aksial konsentris dan beban lateral pada *middle span*, dengan mekanisme kolom diberi beban aksial terlebih dahulu sesuai P_u rencana kemudian diberikan beban lateral sampai kolom mengalami kegagalan lentur.
4. Jenis material beton yang digunakan adalah beton SCC dengan $f'_c : 25 \text{ Mpa}$

1.6 Manfaat Penelitian

1. Sebagai referensi dalam mengetahui sejauh mana pengaruh perkuatan GFRP-S terhadap peningkatan kapasitas lentur kolom berpenampang lingkaran beton bertulang.
2. Memunculkan metode alternatif perkuatan dan perbaikan struktur kolom berpenampang lingkaran beton bertulang dalam menahan beban lateral, dalam hal ini beban gempa pada daerah yang rawan akan gempa bumi.
3. Sebagai referensi untuk penelitian lanjutan mengenai perkuatan lentur kolom berpenampang lingkaran beton bertulang atau jenis penampang kolom lain yang diperkuat dengan menggunakan GFRP-S.

1.7 Sistematika Penulisan

Gambaran umum mengenai keseluruhan isi tulisan ini, dapat kami uraikan secara singkat setiap bab yang akan dibahas sebagai berikut :

BAB I : PENDAHULUAN

Bab ini merupakan penjelasan mengenai latar belakang masalah, maksud dan tujuan penulisan, rumusan masalah, batasan masalah, manfaat penelitian dan sistematika penulisan.

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini merupakan penjelasan mengenai tentang teori dasar dari material GFRP-S, komposisi beton SCC, perilaku kolom berpenampang lingkaran, serta analisis kekuatan aksial kolom lingkaran dengan GFRP 1 lapis

BAB III : METODOLOGI PELAKSANAAN PENELITIAN

Dalam bab ini disajikan mengenai tinjauan umum penelitian yang menjelaskan mengenai bagan alir, pengumpulan data, lokasi dan waktu penelitian, alat dan bahan, prosedur penelitian, pengujian eksperimental dan variabel benda uji penelitian.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini merupakan inti dari keseluruhan materi pembahasan di mana menjelaskan tentang pengujian bahan, pengujian kolom berpenampang lingkaran dengan perkuatan GFRP-1 lapis

BAB V PENUTUP

Beirisi kesimpulan dan saran-saran yang penulis kemukakan sesuai dengan pembahasan dalam sepanjang penelitian ini.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Hasil Penelitian Sebelumnya

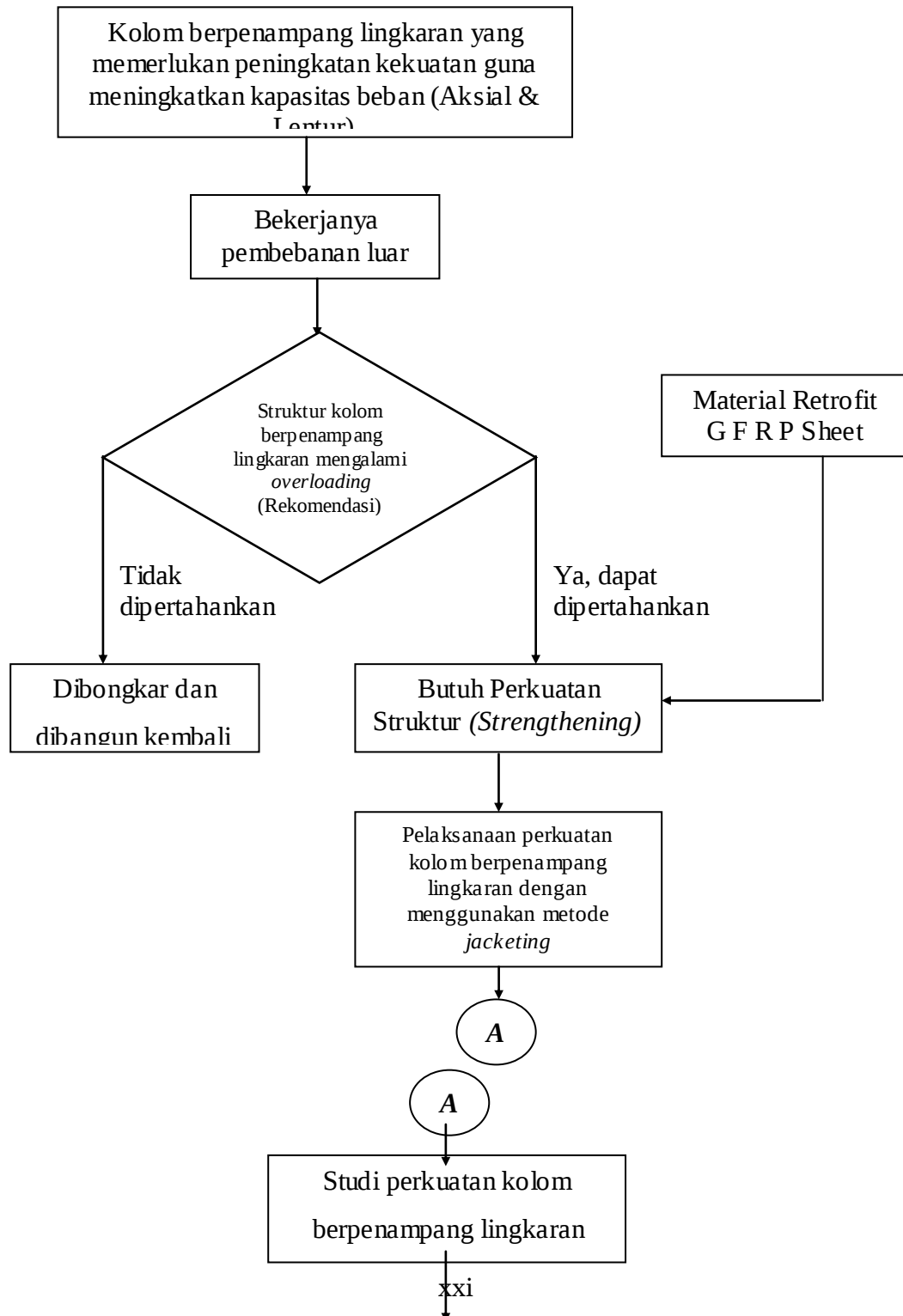
Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan oleh *I Ketut Sudarsana dan A.A Gede Sutapa (2007)* pada perkuatan kolom berpenampang lingkaran beton bertulang dengan lapis *Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)* didapat beberapa kesimpulan sebagai berikut :

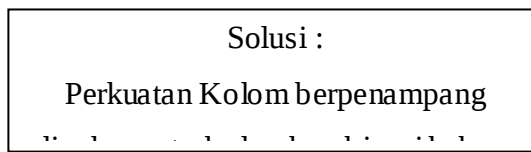
1. Kegagalan perkuatan dengan satu lapis *Glass Fiber Reinforced Polymer* pada kolom berpenampang lingkaran beton bertulang dengan metode *jacketing/wrapping* terjadi dalam dua kondisi, yaitu gagal geser pada sambungan dan putus di luar sambungan.
2. GFRP dengan sambungan 100% dan 150% mengalami gagal geser pada sambungan sedangkan GFRP dengan sambungan 200% sampai dengan 300% gagal tarik (putus) di luar sambungan.
3. Memperpanjang *overlapping* hasil perhitungan tidak begitu mempengaruhi peningkatan kekuatan kolom berpenampang lingkaran beton bertulang yang diberi perkuatan dengan satu lapis GFRP.
4. Beban aksial maksimum yang mampu dipikul oleh kolom dengan satu lapis GFRP baik yang mengalami gagal geser pada sambungan maupun putus di luar sambungan hampir sama yaitu ± 330 kN.
5. Perkuatan dengan metode *jacketing* menggunakan satu lapis *Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)* dengan panjang sambungan (*overlapping*) yang bervariasi mampu meningkatkan daya dukung aksial kolom berpenampang lingkaran beton bertulang sebesar 11,86 % sampai dengan 15,25 % dan dapat

meningkatkan daktilitas aksial kolom berpenampang lingkaran beton bertulang sebesar 12,41% hingga 47,14%.

2.2 Kerangka Pikir

Adapun beberapa poin yang melatarbelakangi sehingga munculnya ide untuk penelitian ini adalah sebagai berikut :





Gambar 2.1 Kerangka Pikir

2.3 Self Compacting Concrete (SCC)

SCC adalah suatu beton yang ketika masih berbentuk beton segar mampu mengalir melewati tulangan dan memenuhi seluruh ruang yang ada di dalam cetakan secara padat tanpa memerlukan proses pemadatan manual atau getaran mekanik. Untuk memperoleh beton yang mampu mengalir tanpa terjadi segregasi material maka digunakan *high range water reducer* atau *super plasticizer*.

Superplasticizer meningkatkan konsistensi pasta semen dan membuat pasta semen menyelimuti dan mengikat agregat dengan kuat sehingga beton mampu mengalir tanpa mengalami segregasi material. Selain itu, untuk dapat mengalir dengan baik maka volume agregat kasar sama dengan volume agregat halus di dalam desain campuran SCC. Diperlukan juga filler seperti abu terbang dan *silica fume*. Beton SCC yang baik harus tetap homogen, kohesif, tidak segregasi, tidak terjadi *blocking*, dan tidak *bleeding*. Untuk itu perlu diadakan pengujian untuk menjamin workabilitas beton SCC.

Beton jenis ini semakin banyak dipakai karena selain dapat memiliki kekuatan yang sangat tinggi, tetapi tetap lecah dalam pelaksanaan. Kinerja kelecakan ini tercapai berkat bahan tambah *superplasticizer* yang dimasukan ke dalam beton seperti jenis *polymer*. Aditif ini seolah-olah akan menyelimuti partikel-partikel semen sehingga dalam interval waktu tertentu antar partikel semen tidak terjadi reaksi "tarik-menarik" seperti yang terjadi dalam campuran

tanpa aditif.

Tambahan *superplasticizer*, aditif mineral dan aditif lain ini selain membuat beton tetap lecah/encer, tetapi juga akan menghasilkan beton dengan kuat tekan tinggi. Kekuatan tekan yang tinggi dari beton SCC ini berkaitan dengan nilai F.A.S (faktor air semen) yang digunakan . Pada beton SCC menggunakan nilai F.A.S yang kecil tetapi memiliki *workability* yang bagus.

Kelebihan dari SCC diantaranya:

1. Sangat encer, bahkan dengan bahan aditif tertentu bisa menahan slump tinggi dalam jangka waktu lama (*slump keeping admixture*).
2. Tidak memerlukan pemadatan manual.
3. Lebih homogen dan stabil.
4. Kuat tekan beton bisa dibuat untuk mutu tinggi atau sangat tinggi.
5. Lebih kedap, porositas lebih kecil.
6. Susut lebih rendah.
7. Dalam jangka panjang struktur lebih awet (*durable*).
8. Tampilan permukaan beton lebih baik dan halus karena agregatnya biasanya berukuran kecil sehingga nilai estetis bangunan menjadi lebih tinggi.
9. Karena tidak menggunakan penggetaran manual, lebih rendah polusi suara saat pelaksanaan pengecoran.

Berdasarkan spesifikasi SCC dari *The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems* (EFNARC), workabilitas atau kelecakan campuran beton segar dapat dikatakan sebagai beton SCC apabila memenuhi kriteria sebagai berikut yaitu:

A. Slump-flow

Slump-flow adalah Diameter rata-rata menyebarnya beton segar dengan menggunakan kerucut slump konvensional. Nilai *Slump-flow* menggambarkan flowabilitas campuran segar dalam kondisi tak terkekang. Ini adalah tes sensitif yang biasanya akan ditentukan untuk semua beton SCC, sebagai pemeriksaan utama yang konsistensi terhadap beton segar yang memenuhi spesifikasi.

Pengamatan visual selama pengujian dan / atau pengukuran waktu T500 dapat memberikan informasi tambahan tentang ketahanan terhadap segregasi dan keseragaman setiap pengecoran.

Tabel 2.1 : Kelas SCC Berdasarkan Nilai *Slump Flow*

Kelas	<i>Slump Flow (mm)</i>
SF1	550 – 650
SF2	660 – 750
SF3	760 – 850

Sumber : *The European Guidelines for SCC, 2005*

Berikut ini adalah tipikal kelas *slump-flow* untuk berbagai aplikasi:

1. SF1 (550-650 mm) sesuai untuk:
 - Struktur beton bertulang sedikit atau beton tak bertulang yang dicor dari atas (misalnya pelat perumahan)
 - Pengecoran dengan sistem injeksi pompa (misalnya lapisan terowongan)
 - Bagian yang cukup kecil untuk mencegah aliran horizontal yang panjang (misalnya tiang dan beberapa pondasi dalam).
2. SF2 (660-750 mm) adalah cocok untuk berbagai aplikasi normal (misalnya dinding, kolom)

3. SF3 (760-850 mm) biasanya diproduksi dengan ukuran maksimal agregat yang kecil (kurang dari 16 mm) dan digunakan untuk aplikasi vertikal pada struktur yang sangat padat, struktur dengan bentuk yang kompleks, atau untuk mengisi bagian bawah bekisting. SF3 akan sering memberikan permukaan akhir lebih baik dari SF 2 untuk aplikasi vertikal yang normal tetapi ketahanan terhadap segregasi lebih sulit dikendalikan.

Nilai-nilai target yang lebih tinggi dari 850 mm dapat ditentukan dalam beberapa kasus khusus tapi harus dilakukan dengan hati-hati mengenai pencegahan terhadap segregasi dan ukuran maksimum agregat biasanya harus lebih rendah dari 12 mm.

B. Viskositas

Viskositas dapat dinilai pada saat T500 selama uji slump-flow atau dinilai berdasarkan waktu alir corong-V. Nilai waktu yang diperoleh tidak mengukur viskositas SCC tetapi berkaitan dengan kecepatan aliran. Beton dengan viskositas rendah akan memiliki aliran awal yang sangat cepat dan kemudian berhenti. Beton dengan viskositas tinggi dapat terus merambat melewati perpanjangan waktu.

Berikut ini adalah tipikal kelas viskositas menurut *The European Guidelines for Self Compacting Concrete* :

Tabel 2.2: Kelas SCC Berdasarkan Nilai T500,S

Kelas	T500,S
VS1	≤ 2
VS2	>2

Sumber : *The European Guidelines for SCC, 2005*

1. VS1/VF1 memiliki kemampuan mengisi yang baik bahkan dengan tulangan padat dan umumnya memiliki permukaan akhir terbaik. Namun, campuran beton ini lebih mungkin menderita *bleeding* dan segregasi.
2. VS2/VF2 tidak memiliki batas kelas atas tapi dengan meningkatnya waktu aliran, lebih memungkinkan untuk menunjukkan efek *thixotropic*, yang mungkin dapat membantu dalam membatasi tekanan bekisting atau meningkatkan ketahanan terhadap segregasi. Efek negatif mungkin dialami mengenai permukaan akhir yang berlubang.

C. *Passing ability*

Passing ability adalah kemampuan beton SCC untuk mengalir melalui celah-celah antar besi tulangan atau bagian celah yang sempit dari cetakan tanpa terjadi adanya segregasi atau *blocking*.

Contoh spesifikasi kemampuan melewati celah diberikan di bawah ini:

1. Struktur PA 1 dengan jarak 80 mm sampai 100 mm, (misalnya perumahan, struktur vertikal)
2. Struktur PA 2 dengan jarak 60 mm sampai 80 mm, (misalnya struktur teknik sipil).

Tabel 2.3: Kelas Passing Ability (L-Box)

Kelas	Passing Ability
PA1	$\geq 0,80$ dengan 2 tulangan
PA2	$\geq 0,80$ dengan 3 tulangan

Sumber : *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete*

D. Segregation resistance

Segregation resistance, adalah kemampuan beton SCC untuk menjaga tetap dalam keadaan komposisi yang homogen selama waktu transportasi sampai pada saat pengecoran.

Dengan tidak adanya pengalaman yang relevan, pedoman umum berikut pada kelas ketahanan terhadap segregasi diberikan:

1. Ketahanan terhadap segregasi menjadi parameter penting dengan kelas *slump-flow* lebih tinggi dan / atau kelas viskositas lebih rendah, atau jika kondisi penuangan beton SCC meningkatkan segregasi. Jika tidak ada yang sesuai, biasanya tidak memerlukan penentuan kelas ketahanan terhadap segregasi.
2. SR1 umumnya berlaku untuk lembaran tipis dan untuk aplikasi vertikal dengan jarak aliran SCC kurang dari 5 meter dan jarak tulangan lebih besar dari 80 mm.
3. SR2 lebih disukai dalam aplikasi vertikal jika jarak aliran SCC lebih dari 5 meter dengan jarak tulangan lebih besar dari 80 mm untuk menangani segregasi selama beton SCC mengalir.
4. SR2 juga dapat digunakan untuk aplikasi vertikal yang tinggi dengan jarak tulangan kurang dari 80 mm jika jarak aliran SCC kurang dari 5 meter tetapi jika alirannya lebih dari 5 meter nilai target SR yang kurang dari 10% dianjurkan.
5. Nilai target SR2 dapat ditentukan jika kekuatan dan kualitas bagian atas permukaan sangat kritis.

Tabel 2.4: Kelas *Segregation Resistance* (Saringan Segregasi)

Kelas	<i>segregation resistance</i> (%)
-------	-----------------------------------

SR1	≤ 20
SR2	≤ 15

Sumber : *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete*

2.3.1 Bahan Penyusun Self Compacting Concrete

Proporsi jumlah material pembentuk beton SCC menurut *The European Guidelines for Self Compacting Concrete* dapat dilihat pada Tabel 2.5

Tabel 2.5 Berbagai Komposisi Material Pembentuk Beton SCC

Material	Batas dalam berat (kg/m ³)
Powder	380 - 600
Air	150 - 210
Agregat kasar	750 - 1000
Agregat halus	48 – 55% dari berat agregat

Sumber : *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete*

Okamura,H. and Ouchi,M (2002).Satu solusi untuk mendapatkan suatu struktur beton tahan lama yang tidak terikat pada kemampuan pekerjaan konstruksi adalah kemampuan sendiri beton untuk memadat , yang dapat mengalir ke dalam tiap-tiap sudut suatu cetakan, karena berat sendiri dan tanpa kebutuhan akan alat penggetar ,dengan komposisi campuran agregat kasar 50% dari volume beton, agregat halus 40% dari volume mortar , factor air semen antara 0,25 - 0,40.

Menurut M. A. Ahmadi, O. Alidoust, I. Sadrinejad, and M. Nayeri Ahmadi (2007) Dengan menggunakan campuran : 460 kg semen , 770 kg kerikil, 1000 kg pasir , W/C 0,35 , Superplasticiezer Visco 1% .didapatkan kuat tekan 57

Mpa. Penggunaan SCC mampu meningkatkan kuat lentur 12 – 20%, Kuat tekan 31-41%. Sementara modulus elastisitasnya berkurang 9 – 17 %. dari beton normal.

2.3.1.1 Semen Portland Komposit/Portland Composite Cement (PCC)

(SNI 15-7064-2004) Semen Portland Komposit adalah Bahan pengikat hidrolis hasil penggilingan bersama-sama terak semen portland dan gips dengan satu atau lebih bahan anorganik, atau hasil pencampuran antara bubuk semen portland dengan bubuk bahan anorganik lain. Bahan anorganik tersebut antara lain: Terak tanur tinggi (Blast Furnace Slag), Pozolan, Senyawa silikat, Batu kapur. Dengan kadar total bahan anorganik 6-35% dari massa semen portland Komposit. Diantara bahan tambahan yang digunakan merupakan hasil samping industri tertentu, sehingga semen portland komposit ini bisa dikategorikan sebagai semen ramah lingkungan.

Keunggulan dari PCC (Portland Composite Cement): lebih mudah dikerja, suhu beton lebih rendah sehingga tidak mudah retak, permukaan acian dan beton lebih halus , lebih kedap air, mempunyai kekuatan yang lebih tinggi dibanding OPC (Ordinary Portland Cement). Dari hasil penelitian uji kuat tekan beton yang menggunakan OPC dan PCC dengan nilai F.A.S 0,5 kekuatan beton dengan menggunakan PCC memberikan nilai yang relatif lebih besar dibanding dengan menggunakan OPC.

Tabel 2.6 Perbandingan Data Hasil Penelitian Terhadap Data SNI

Jenis Semen	Kuat Tekan (Kg/cm^2) , usia		
	3	7	28
Semen OPC	190	270	370

Semen PCC	236	280	452
-----------	-----	-----	-----

Sumber : Warta Semen dan Beton (*dikutip dari SNI 03-2834-2000)

Tabel 2.7 Karakteristik Semen PCC

No	Deskripsi	SNI 15-7064-2004	Hasil Pengujian
I	PROPERTIS KIMIA		
	<i>Magnesium Oxida (MgO %)</i>	-	0.77
	<i>Sulfur Trioxida (SO₃)</i>		
	<i>C₃A < 8 (%)</i>	Maks4	1.9
	<i>C₃A > 8 (%)</i>	Maks 4	-
II	PROPERTIS FISIK		
	Kehalusan butir Blaine meter (m ² /kg)	min 280	382
	Kekekalan bentuk dengan <i>Autoclave % (maks)</i>	maks 0.8	0.18
	Kuat tekan		
	a. 3 hari(kg /cm ²)	min 125	-
	b. 7 hari (kg /cm ²)	min 200	-
	c.28 hari (kg /cm ²)	min 250	-
	Waktu ikat(Vicat test) :		
	a. ikatan awal, menit	min 45	103
	b.ikatan akhir, menit	maks 375	303
	Ikatan semu (menit)		-
	> Penetrasi akhir (%)	min 50	64.29
	Kandungan udara dalam mortar (%volume)	maks 12	11.5
	Berat jenis		3,13

Sumber : PT.Semen Tonasa

2.3.1.2 Agregat

Agregat adalah butiran mineral alami yang berfungsi sebagai bahan pengisi campuran beton. Walau sebagai pengisi, agregat sangat berpengaruh terhadap sifat-sifat betonnya, sehingga pemilihan agregat merupakan suatu bagian penting dalam pembuatan beton. Agregat beton memiliki porsi yang besar dalam volume beton yaitu sebesar 60 - 80% dari volume beton. Untuk mendapatkan beton yang baik, diperlukan agregat yang mempunyai kualitas agregat yang baik pula, agregat yang baik dalam pembuatan beton harus memenuhi persyaratan, yaitu :

- Harus bersifat kekal, berbutir tajam dan kuat.
- Tidak mengandung lumpur lebih dari 5 % untuk agregat halus dan 1 % untuk agregat kasar.
- Tidak mengandung bahan-bahan organik dan zat-zat yang reaktif alkali,
- Harus terdiri dari butir-butir yang keras dan tidak berpori.

Agregat halus dapat berupa pasir alam, pasir olahan atau gabungan dari kedua pasir tersebut. Ukurannya bervariasi antara No. 4 dan No. 100 saringan standar Amerika. Agregat halus yang baik harus bebas bahan organik, lempung, partikel yang lebih kecil dari saringan No. 100 atau bahan-bahan lain yang dapat merusak campuran beton. (Edward G. Nawy). Agregat halus mempunyai ukuran butir terbesar 5,0 mm. (SK SNI 03-2847-2002).

Agregat disebut agregat kasar apabila ukurannya sudah melebihi $\frac{1}{4}$ in (6 mm). Sifat agregat kasar mempengaruhi kekuatan akhir beton keras dan daya tahannya terhadap disintegrasi beton, cuaca, dan efek-efek perusak lainnya. Agregat kasar mineral ini harus bersih dari bahan-bahan organik, dan harus mempunyai ikatan yang baik dengan gel semen. (Edward G. Nawy)

2.3.1.3 BahanTambah (*additive*)

2.3.1.3.1 *Superplasticizer*

Penggunaan *superplasticizer* untuk menaikkan *workability* campuran beton dan mempengaruhi *slump*, *bleeding*, *air content* dan kekuatan beton. Jenis *Superplasticizer* berdasarkan bahan dasarnya antara lain : *Nephthaline*, *Melamine*, *Polycarboxylate*.

Secara umum penggunaan *superplasticizer* dari jenis *Neptaline* akan menghasilkan penurunan kandungan udara dan menaikkan *bleeding* dan kekuatan, hal tersebut dapat tercapai jika air dalam campuran beton dikurangi. Sedangkan jenis *melamine* sangat sedikit pengaruhnya terhadap kandungan udara, kekuatan beton, dan menghasilkan pengurangan *bleeding*.

Superplasticizer yang diproduksi terdapat berbagai macam antara lain: *viscocrete* yang menggunakan bahan dasar *polycarboxylates*. *Superplasticizer* ini merupakan teknologi baru dari beton aditif menghasilkan beton yang sangat cair, beton tanpa pemadatan (*self compacted*), mutu sangat tinggi dengan pengurangan air hingga 30%.

Dalam pelaksanaan penelitian ini digunakan *superplasticizer* jenis *viscocrete 3115 ID*, dengan dosis pemakaian 400 – 1600 ml per 100 kg semen / *cementitious material* (0,8% - 2 % dari berat semen / *cementitious material*).

2.3.1.3.2 *Retarder*

Bahan tambah *retarder* merupakan bahan tambah yang berfungsi untuk memperlambat pengerasan beton dan menghambat kenaikan temperatur. Bahan aditif yang digunakan ini merupakan modifikasi dari bahan fosfat. Bahan aditif ini

juga memperpanjang waktu plastisitas dari beton dan memungkinkan pengadukan atau daya lekat yang lebih baik pada penuangan beton yang dilakukan berulang-ulang (McCormac, 2000).

Dalam pelaksanaan penelitian ini digunakan *retarder* jenis *Plastiment-VZ*, dengan dosis pemakaian 0,15% - 0,4% dari berat semen/*cementitious material*.

2.4 Struktur Kolom

Kolom adalah komponen struktur bangunan yang menahan beban aksial tekan dan momen lentur dengan bagian tinggi yang tidak ditopang paling tidak tiga kali dimensi lateral terkecil (SNI 03-2847-2002). Sedangkan komponen struktur yang menahan beban aksial dengan rasio beban tinggi dengan dimensi lateral terkecil kurang dari tiga dinamakan pedestal.

Karena kolom merupakan komponen tekan, maka keruntuhan pada kolom merupakan lokasi kritis yang dapat menyebabkan *collapse* lantai yang bersangkutan, dan juga *Ultimate Total Collapse* seluruh strukturnya. Keruntuhan kolom struktural merupakan hal yang sangat berarti ditinjau segi ekonomis maupun segi manusiawi. Oleh karena itu, dalam merencanakan kolom perlu lebih waspada, yaitu dengan memberikan kekuatan cadangan yang lebih tinggi, daripada yang dilakukan pada balok dan elemen struktural horizontal lainnya, terlebih lagi karena keruntuhan tekan tidak memberikan peringatan awal yang cukup jelas.

Apabila beban pada kolom bertambah, maka retak akan banyak terjadi di seluruh tinggi kolom pada lokasi-lokasi tulangan sengkang. Dalam keadaan batas keruntuhan (*limit state of failure*), selimut beton di luar sengkang (pada kolom bersengkang atau di luar spiral (pada kolom berspiral) akan lepas sehingga

tulangan memanjangnya akan mulai kelihatan. Apabila bebannya terus bertambah, maka terjadi keruntuhan dan tekuk lokal (*local buckling*) tulangan memanjang pada panjang tak tertumpu sengkang atau spiral. Dapat dikatakan bahwa dalam keadaan batas keruntuhan, selimut beton lepas dahulu sebelum lekatan baja-beton hilang.

Kuat tekan beton mengidentifikasikan mutu dari sebuah struktur. Semakin tinggi tingkat kekuatan struktur yang dikehendaki, semakin tinggi pula mutu beton yang dihasilkan. Kekuatan kolom-kolom dievaluasi dengan berdasarkan pada prinsip-prinsip berikut:

1. Distribusi regangan linier terjadi sepanjang ketebalan kolom.
2. Tidak ada keterslipan antara beton dan baja (yaitu, regangan dalam baja dan beton yang berhubungan adalah sama).
3. Regangan beton diperbolehkan maksimum pada saat kegagalan untuk tujuan perhitungan-perhitungan kekuatan = 0,003inci/inci.
4. Tahanan tarik beton dapat diabaikan dan tidak diperhitungkan didalam perhitungan.

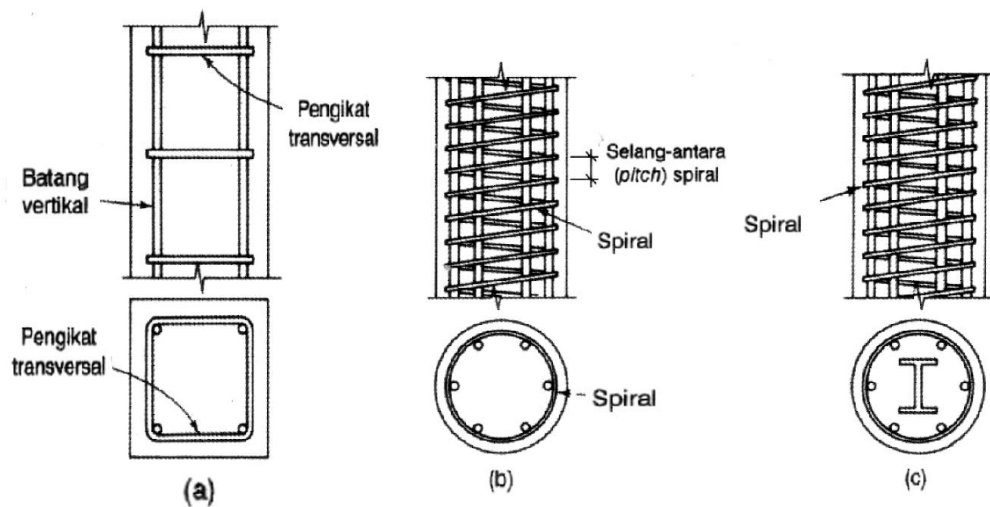
2.4.1 Jenis Kolom

2.4.1.1 Jenis Kolom Berdasarkan Bentuk dan Susunan Tulangan

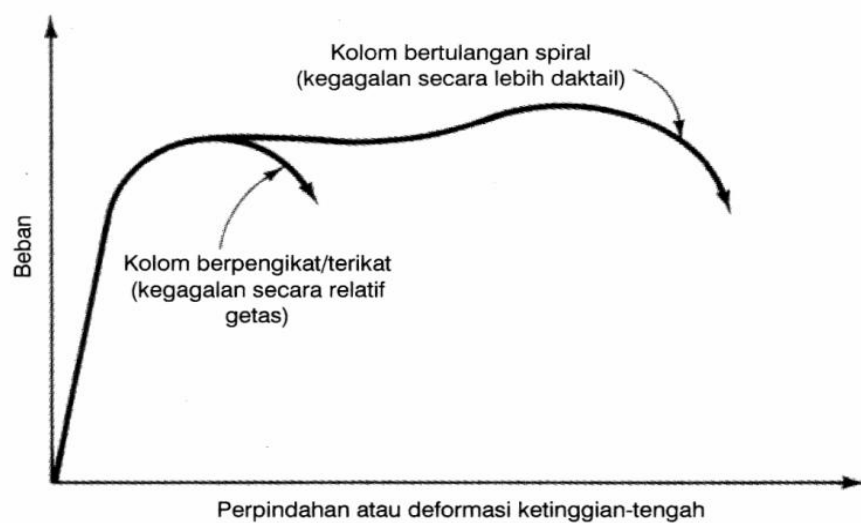
Kolom dapat diklasifikasikan berdasarkan bentuk dan susunan tulangannya. Bentuk dan susunan tulangan pada kolom dapat dibagi menjadi tiga kategori menurut Nawy (2005), seperti yang diperlihatkan pada *Gambar 2.2*

- a. Kolom segiempat atau bujursangkar yang ditulangi dengan tulangan longitudinal dan sengkang *Gambar 2.2.a*

- b. Kolom berpenampang lingkaran yang ditulangi dengan tulangan longitudinal dan tulangan lateral berupa spiral atau pengikat-pengikat lateral. *Gambar 2.2.b*
- c. Kolom komposit yang terdiri atas beton dan profil baja struktural di dalamnya. Profil baja ini biasanya diletakkan di dalam selubung tulangan biasa seperti yang diperlihatkan pada *Gambar 2.2c*.



Gambar 2.2 Tipe kolom berdasarkan pada bentuk dan tipe tulangan:
(a) kolom terikat; (b) kolom spiral; (c) kolom komposit.



Gambar 2.3 Perbandingan perilaku beban-deformasi kolom yang terikat dan bertulangan spiral.

Tulangan pengikat lateral berfungsi untuk menahan tulangan longitudinal agar tetap kokoh di tempatnya, dan memberikan tumpuan lateral sehingga masing-masing tulangan longitudinal hanya dapat tertekuk pada tempat di antara dua pengikat. Dengan demikian tulangan pengikat lateral (sengkang) tidak dimaksudkan untuk memberikan sumbangan terhadap kuat lentur penampang, tetapi memperkokoh kedudukan tulangan longitudinal kolom.

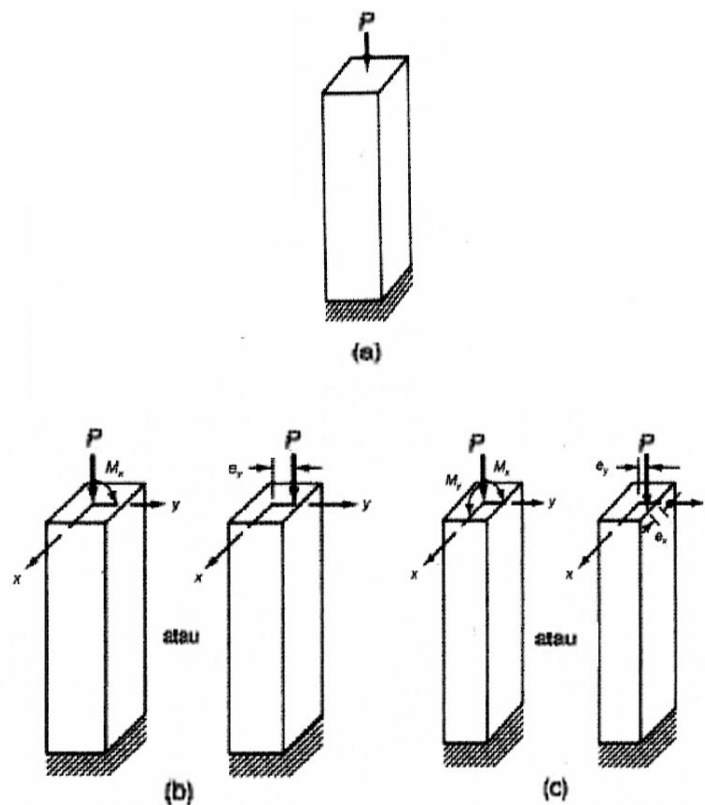
Kolom bersengkang merupakan jenis yang paling banyak digunakan karena biaya-biaya konstruksinya yang lebih rendah. Sekalipun demikian, kolom segiempat maupun berpenampang lingkaran dengan tulangan berbentuk spiral kadang-kadang digunakan juga, terutama apabila diperlukan daktilitas kolom yang cukup tinggi seperti pada daerah-daerah gempa. Kemampuan kolom berspiral untuk menahan beban maksimum pada deformasi besar mencegah terjadinya *collapse* pada struktur secara keseluruhan sebelum terjadinya redistribusi total momen dan tegangan selesai. *Gambar 2.3* memperlihatkan peningkatan daktilitas sebagai efek dari digunakannya tulangan spiral.

Tulangan spiral memberikan kemampuan kepada kolom untuk menyerap deformasi yang cukup besar sebelum runtuh, sehingga mampu mencegah terjadinya kehancuran seluruh struktur. Dengan sendirinya ukuran dimensi dan jarak spasi tulangan spiral berpengaruh terhadap nilai beban *failure* yang dicapai.

2.4.1.2 Jenis Kolom Berdasarkan Posisi Beban Terhadap Penampang Melintang

Selain pengelompokan sebelumnya, Nawy (2005) juga mengelompokkan kolom berdasarkan posisi beban terhadap penampang melintang :

1. Kolom yang mengalami beban sentris, berarti kolom mengalami beban aksial yang besar dan memiliki eksentrisitas sebesar nol, sehingga tidak mengalami momen. Untuk kondisi ini, keruntuhan akan terjadi oleh hancurnya beton dan semua tulangan dalam kolom mencapai tegangan leleh dalam tekan
2. Kolom dengan beban eksentris berarti mengalami momen lentur juga gaya aksial. Momen ini dapat dikonversikan menjadi suatu beban ' P ' dengan eksentrisitas ' e ' seperti yang diperlihatkan pada *Gambar 2.4(b)* dan *(c)*. Momen lentur dapat bersumbu tunggal (uniaksial) seperti dalam hal kolom eksterior bangunan bertingkat banyak, dan bersumbu rangkap (biaksial) apabila lenturnya terjadi terhadap sumbu x dan y seperti *Gambar 2.4(b)* dan *(c)*.



Gambar 2.4 : Tipe kolom berdasarkan posisi beban pada irisan-penampang:

- (a) kolom terbebani secara eksentris; (b) beban aksial tambah momen uniaksial;
(c) beban aksial tambah momen biaksial.

Keruntuhan kolom, dapat terjadi apabila tulangan bajanya leleh karena tarik, atau terjadinya kehancuran pada beton yang tertekan. Selain itu dapat pula kolom mengalami keruntuhan apabila terjadi kehilangan stabilitas lateral, yaitu terjadi tekuk. Apabila kolom runtuh karena kegagalan materialnya (yaitu lelehnya baja, atau hancurnya beton) kolom diklasifikasikan sebagai kolom pendek (*short column*). Apabila panjang kolom bertambah, kemungkinan kolom runtuh karena tekuk semakin besar.

2.4.1.3 Jenis Kolom Berdasarkan Panjang Kolom

Peraturan SK-SNI telah mensyaratkan peninjauan pengaruh kelangsingan kolom sebagai bahan pertimbangan penting di dalam perencanaan kolom. Kiranya hal demikian dapat dimengerti mengingat semakin langsing atau semakin panjang suatu kolom, kekuatan penampangnya akan berkurang bersamaan dengan kegagalan tekuk (*Buckling*) lateral daripada kuat lentur penampangnya.

Berdasarkan ukuran panjang dan pendeknya, kolom dibedakan atas kolom pendek dan kolom panjang (langsing) . Jika sebuah kolom gagal yang disebabkan oleh kegagalan material awal (lelehnya baja tulangan atau hancurnya beton), maka kolom tersebut diklasifikasikan sebagai kolom pendek. Seiring dengan bertambahnya panjang kolom, maka kemungkinan kegagalan yang diakibatkan oleh tekuk juga meningkat. Sehingga jika sebuah kolom gagal akibat

tekuk, maka kolom tersebut diklasifikasikan sebagai kolom panjang atau kolom langsing.

Berdasar keadaan alami, struktur kolom beton bertulang umumnya bersifat lebih massif (massal) dibanding kolom pada gelagar baja, dengan demikian secara struktural, kolom beton bertulang lebih kaku dan permasalahan kelangsingan akan berkurang untuk kolom beton bertulang. Terlebih hasil pengamatan menunjukkan bahwa lebih dari 90% kolom beton bertulang untuk portal dengan pengaku dan 40% untuk portal tanpa pengaku pada umumnya digolongkan sebagai kolom pendek. Namun kemajuan teknologi dalam pencapaian beton mutu tinggi memungkinkan desain penampang kolom lebih efisien dan optimal, sehingga opsi penggunaan kolom langsing persentasenya akan semakin meningkat.

Untuk struktur beton bertulang, desain kolom dirancang sedemikian rupa sehingga pengaruh tekuk tidak dominan, sehingga keruntuhan yang terjadi akibat beban luar bukan karena tekuk (*Buckling*). Jadi diusahakan kolom tergolong kolom pendek (*Stocky*). Adapun syarat untuk mencapai ini, nilai kelangsingan sebagai berikut :

$$\frac{k.l_u}{r} \leq 22 \dots\dots\dots(\text{SNI -03-2847-2002 Pasal 12.13.2})$$

Dengan : k = Faktor panjang efektif kolom

 Lu = Panjang bersih kolom

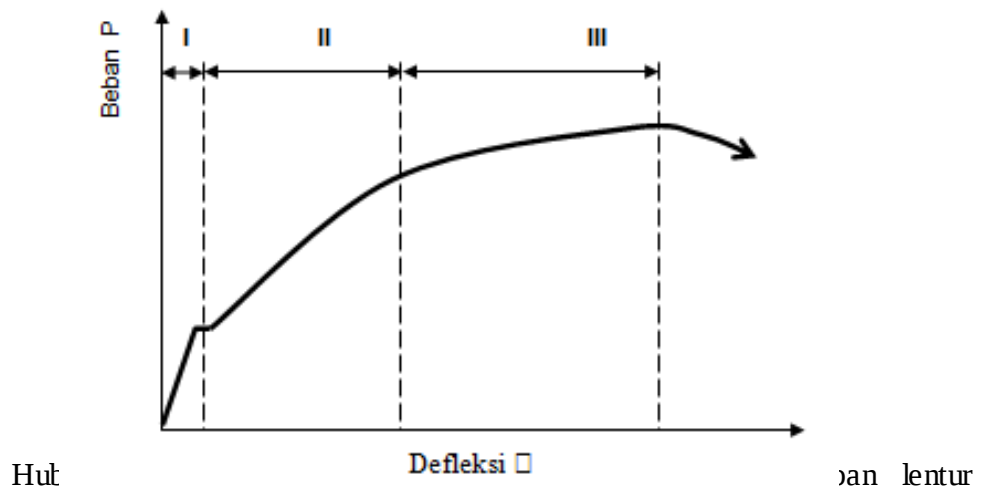
 r = Jari-jari girasi

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} \dots\dots\dots(\text{SNI -03-2847-2002 Pasal 12.13.2})$$

Panjang efektif ($k \cdot l_u$) merupakan panjang tak tertumpu kolom untuk memperhitungkan efek tahanan ujung yang bukan sendi. Adapun nilai ' k ' sebagai berikut :

- Kedua ujung sendi, tidak bergerak lateral $k = 1.0$
- Kedua ujung jepit $k = 0.5$
- Satu ujung jepit, ujung lain bebas $k = 2.0$
- Kedua ujung jepit, ada gerak lateral $k = 1.0$

2.4.2 Tinjauan Kondisi Elastis dan In-Elastis Struktur Terhadap Beban Lentur



pada dasarnya dapat diidealisasikan menjadi bentuk *trilinier* sebelum terjadi *rupture* seperti pada diagram di atas (Edward G. Nawy, 1990). Secara garis besar, daerah pada area I merupakan daerah **elastis**, adapun pada area II dan III struktur sudah memasuki tahapan **in-elastis**

- **Daerah I** : *Taraf praretak (Elastis Penuh)*, dimana sepanjang bentang

strukturalnya bebas retak. Segmen praretak dari kurva beban - defleksi berupa garis lurus yang memperlihatkan perilaku *elastis penuh*. Tegangan tarik maksimum pada penampang lebih kecil dari kekuatan tariknya akibat lentur atau lebih kecil dari modulus rupture (f_r) beton. Pada tahapan elastic ini, kurva penambahan lendutan terhadap beban P masih tergolong kecil

- **Daerah II** : *Taraf beban pascaretak (in-elastis)*, dimana sepanjang bentang struktural mengalami retak-retak terkontrol yang masih dapat diterima, baik distribusinya maupun lebarnya. Pada kondisi ini, kemampuan struktur untuk berdeformasi pascapembebanan tidak memungkinkan lagi akibat retak yang mulai bermunculan.

Pada kasus balok lentur pada tumpuan sederhana, retak akan terjadi semakin lebar pada daerah lapangan, sedangkan pada tumpuan hanya terjadi retak minor yang tidak lebar. Apabila sudah terjadi retak lentur maka kontribusi kekuatan tarik beton sudah dapat dikatakan tidak ada lagi. Ini berarti pula kekakuan lentur penampangnya telah berkurang sehingga kurva beban –defleksi di daerah ini akan semakin landai dibanding pada taraf praretak.

- **Daerah III** : *Taraf retak pasca-serviceability (In-elastis)*, dimana tegangan pada tulangan tarik sudah mencapai tegangan lelehnya. Diagram beban defleksi daerah III jauh lebih datar dibanding daerah sebelumnya. Ini diakibatkan oleh hilangnya kekuatan penampang karena retak yang cukup banyak dan lebar sepanjang bentang. Jika beban terus ditambah, maka regangan ϵ_s pada tulangan sisi yang tertarik akan terus bertambah melebihi

regangan lelehnya ϵ_y tanpa adanya tegangan tambahan.

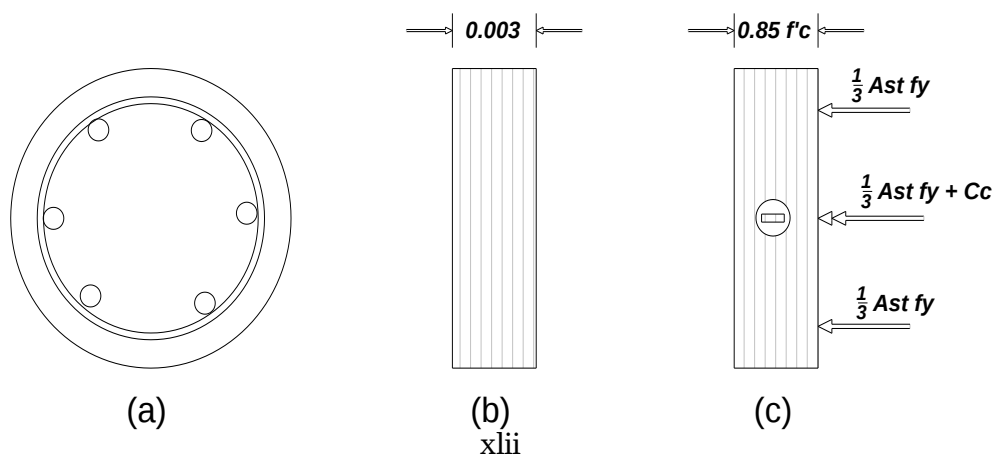
Pada kasus balok lentur, tulangan tariknya telah leleh dikatakan telah runtuh secara struktural. Balok ini akan terus mengalami defleksi tanpa adanya penambahan beban dan retaknya semakin terbuka sehingga garis netral terus mendekati tepi yang tertekan. Pada akhirnya terjadi keruntuhan tekan skunder yang mengakibatkan kehancuran total pada beton daerah momen maksimum dan segera diikuti dengan terjadinya *rupture*.

2.4.3 Perilaku Kolom Pendek Dengan Beban Konsentris

Karena beton mengalami rangkak dan susut, sehingga tegangan pada baja dan beton akibat beban yang bekerja tidak dapat dihitung dengan menggunakan analisis elastik. Oleh karena itu digunakanlah metoda desain ultimit (kekuatan).

Pada penampang kolom dengan kondisi beban sentris, berarti beban tersebut tepat bekerja pada sumbu (A_s) longitudinal kolom, sehingga beton maupun baja tulangan (semuanya) menahan beban tekan.

Kekuatan penampang kolom berpenampang lingkaran dengan beban sentris ditentukan dengan menganggap bahwa semua baja tulangan (A_{st}) sudah mencapai leleh, jadi tegangan baja tulangan $f_s = f_s = f_y$. Selain itu, regangan tekan beton sudah mencapai batas maksimal, yaitu $\epsilon'_c = \epsilon'_{cu} = 0,003$.



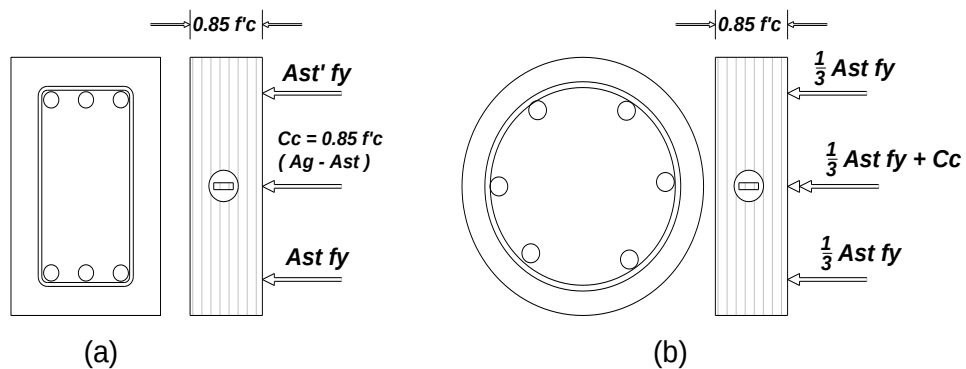
Gambar 2.6 : Geometri kolom berpenampang lingkaran spiral :
 diagram tegangan regangan (beban konsentris) :
 (a) irisan penampang ; (b) regangan beton; (c) tegangan (gaya)

Pada kondisi beban sentries (P_0) ini dapat dianalisis sebagai berikut :

1. $A_g = \frac{1}{4} \pi D^2$ = luas bruto penampang kolom, mm^2 .
2. A_{st} = luas total baja tulangan, mm^2 .
3. $A_n = A_g - A_{st}$ = luas bersih (*netto*) beton, mm^2 .
4. $C_c = 0,85 f'_c A_n$. = Gaya tekan beton

Penggunaan $0.85f'_c$, bukan f'_c disini disebabkan kekuatan maksimum yang dapat dipertahankan pada struktur aktual mendekati harga $0.85f'_c$. Adapun penjabaran gaya-gaya yang bekerja pada kolom berpenampang lingkaran berbeda pada kolom terikat persegi atau ber-segi empat lainnya. Perbedaan yang mencolok adalah adanya peran $1/3$ luasan tulangan pada nilai C_1 , C_2 dan C_3 .

Pada kolom berpenampang lingkaran dengan tulangan lateral spiral memiliki kriteria minimum dalam jumlah tulangan lateralnya, baik ACI dan SK-SNI telah menetapkan jumlah tulangan lateral minimum yang digunakan sebanyak 6 buah dengan geometri seperti pada *Gambar 2.6* sebelumnya, meskipun jumlah As tulangan lateral kebutuhan jauh lebih kecil secara matematis.



Gambar 2.7 : Geometri kolom: diagram tegangan (beban konsentris) :

(a) Kolom berpengikat biasa ; (b) Kolom berpenampang lingkaran dengan spiral

Pada kolom berpenampang lingkaran beton bertulang, resultan gaya yang bekerja:

$$1. C_{1,3} = 1/3 A_{st} f_y = \text{Gaya tekan tulangan}$$

$$2. C_2 = 1/3 A_{st} f_y + C_c = \text{Gaya tekan tulangan dan Beton}$$

Dengan mempertimbangkan kesetimbangan gaya vertikal harus nol, maka diperoleh:

$$P_0 = \left(\frac{A_{st}}{3} f_y + (0.85 f'_c (A_g - A_{st})) \right) + \left(\frac{A_{st}}{3} f_y \right) + \left(\frac{A_{st}}{3} f_y \right)$$

$$P_0 = \left(\frac{A_{st}}{3} f_y + (0.85 f'_c (A_g - A_{st})) \right) + \left(\frac{2}{3} A_{st} \cdot f_y \right)$$

$$P_0 = 0.85 f'_c (A_g - A_{st}) + (A_{st} \cdot f_y)$$

Dengan demikian, kapasitas beban sentris maksimum adalah P_0 yang dapat dinyatakan sebagai:

$$P_0 = 0.85 f'_c (A_g - A_{st}) + (A_{st} \cdot f_y) \dots\dots\dots (1)$$

Perlu ditekankan di sini bahwa beban yang sentris menyebabkan tegangan tekan yang merata di seluruh bagian penampang. Ini berarti bahwa pada saat terjadi keruntuhan, tegangan dan regangannya akan merata di seluruh bagian penampang.

Pada kenyataannya, beban yang betul-betul sentris itu jarang sekali dijumpai, dan dianggap tidak ada. Oleh karena itu Pasal 12.3.5 SNI 03- 2847- 2002 memberi batasan kuat tekan nominal maksimal sebesar 80% dan beban sentris untuk kolom dengan tulangan sengkang, atau 85% dan beban sentris untuk kolom dengan tulangan spiral. Dengan demikian diperoleh rumus berikut:

1. Untuk kolom bersengkang biasa

$$P_n(\text{maks}) = 0,8 [0,85 f'_c (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}] \dots\dots\dots (2)$$

2. Untuk kolom spiral.

$$P_n(\text{maks}) = 0,85 [0,85 f'_c (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}] \dots\dots\dots (3)$$

Selain itu, SNI 03-2847-2002 pasal 11.3.1 mengharuskan, sehubungan dengan perilaku beban normal, lentur, dll, kekuatan elemen beton yang digunakan pada perencanaan (kuat rencana) adalah hasil kali kekuatan nominal dengan suatu faktor reduksi ϕ .

$\phi = 0,7$; untuk kolom dengan tulangan spiral

$\phi = 0,65$; untuk kolom dengan tulangan sengkang pengikat

Maka kuat tekan rencana maksimum yang boleh diberikan pada kolom pendek dengan beban konsentris adalah :

- Untuk kolom dengan tulangan spiral :

$$\phi P_n(\text{maks}) = 0,7 \times 0,85 [0,85 f'_c (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}] \dots\dots\dots (4)$$

- Untuk kolom dengan tulangan sengkang pengikat :

$$\phi P_n(\text{maks}) = 0,65 \times 0,8 [0,85 f'_c (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}] \dots\dots\dots (5)$$

Luasan tulangan komponen struktur tekan dibatasi oleh SNI 03-2847-2002 sebagai berikut :

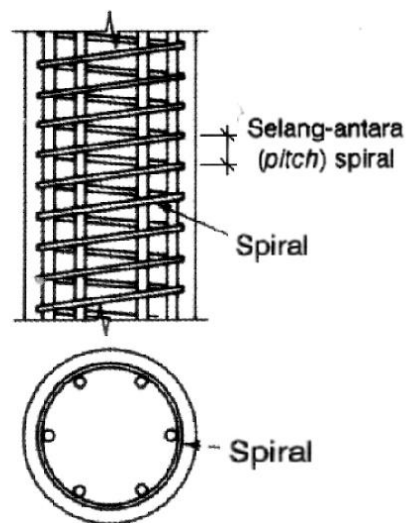
- 1) Luas tulangan longitudinal komponen struktur tekan non-komposit tidak boleh kurang dari 0,01 ataupun lebih dari 0,08 kali luas bruto penampang A_g .
- 2) Jumlah minimum batang tulangan longitudinal pada komponen struktur tekan adalah 4 untuk batang tulangan di dalam sengkang pengikat segi empat atau lingkaran, 3 untuk batang tulangan di dalam sengkang pengikat segi tiga, dan 6 untuk batang tulangan yang dikelilingi oleh spiral.

2.4.4 Tulangan Spiral Pada Kolom Berpenampang lingkaran

Tulangan spiral berspasi dekat meningkatkan kapasitas beban ultimat kolom. Spasi atau selang-antara (*pitch*) spiral dipilih sedemikian rupa sehingga kapasitas beban yang disebabkan oleh aksi spiral pengekan menggantikan kehilangan akibat pengelupasan penutup beton.

Dengan mempersamakan penambahan kekuatan akibat pengekan dan kehilangan kapasitas dalam pengelupasan dan mengikutkan sebuah faktor keamanan sebesar 1,2, rasio tulangan spiral minimum berikut ρ_s diperoleh:

$$\rho_{s \text{ min}} = 0,45 \left(\frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{f_c}{f_y} \dots\dots\dots (6)$$



Gambar 2.8 Tulangan memutar atau spiral untuk kolom

Untuk menentukan selang-antara (*pitch*) s spiral, hitung ρ_s menggunakan Pers (7), pilih sebuah diameter batang d_s untuk spiral, dan hitung a_{sp} kemudian dapatkan selang-antara (*pitch*) s menggunakan persamaan (8).

Rasio tulangan spiral ρ_s , dapat ditulis sebagai

$$\rho_s = \frac{4.A_{sp}}{D_c.s}$$

$$\dots\dots\dots (7)$$

Oleh karena itu,

$$\text{Selang-antara } s = \frac{A_{sp} \cdot \Pi (D_c - ds)}{\rho_s \cdot Ac} \dots\dots\dots (8)$$

2.5 Perkuatan Pada Kolom Berpenampang lingkaran bertulangan Spiral dengan Menggunakan GFRP Sheet (*Glass Fiber Reinforced Polymer*)

2.5.1 **Tinjauan Umum *Glass Fibre Reinforced Polymer* (GFRP)**

FRP (Fiber Reinforced Polymer) Sheet Jacketing merupakan metoda perkuatan kolom yang dapat meningkatkan kuat tekan sebagai akibat dari kekangan material fiber. Metode perkuatan ini sering diaplikasikan dalam hal perkuatan seismik pada jembatan dan juga dalam renovasi bangunan. Teknik perkuatan ini tidak hanya mencegah kolom yang telah diperbaiki dari *spalling* (terlepasnya selimut beton dari inti beton) dan melindungi terhadap kerusakan lebih lanjut pada struktur tetapi juga meningkatkan kapasitas *ultimate* kuat tekan kolom. Adapun tambahan perkuatan GFRP-S *jacketing* terhadap kapasitas lentur kolom berpenampang lingkaran beton bertulang akan kami amati pada penelitian ini.

Walaupun memiliki banyak keuntungan tetapi metode perkuatan menggunakan FRP juga memiliki beberapa kerugian antara lain resiko terhadap bahaya kebakaran yang cukup tinggi, sehingga FRP perlu dilindungi oleh lapisan plesteran beton dan harga FRP yang relatif tinggi.

Pengembangan material komposit FRP merupakan tonggak penting dalam sejarah perbaikan dan perkuatan struktur. Terdapat beberapa jenis material pembentuk FRP seperti Carbon, Glass dan Aramid. Ketiganya dipakai karena memiliki kekuatan tarik yang besar sehingga dapat memperkuat kapasitas tarik

dari beton. Produk FRP yang terbuat dari kaca lebih dikenal dengan *Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)*. GFRP terbuat dari kaca cair yang dipanaskan sekitar 2300°F dan dipintal dengan bantuan Bushing Platinumrhodium pada kecepatan 200 mph.

Material GFRP yang sangat laku dipasaran adalah dalam bentuk lembaran, dimana keuntungan yang diperoleh dari GFRP tipe lembaran adalah kemudahan dalam aplikasi yaitu lembaran GFRP ini dapat ditempelkan dengan mudah pada bagian permukaan anggota struktur yang rusak menyerupai pemasangan *wallpaper* dengan bantuan perekat (resin), biaya yang relatif murah dibandingkan FRP dengan bahan yang lain, kekuatan tarik yang tinggi, ketahanan yang tinggi terhadap bahan kimia dan memiliki sifat isolasi yang baik. Adapun kekurangannya yaitu : modulus elastisitas yang rendah, memiliki sifat kekerasan yang tinggi dan ketahanan kelelahan yang relatif rendah.

Sebagai penguatan eksternal, GFRP tipe lembaran digunakan untuk memperbaiki :

1. Perbaiki balok dan slab beton yang rusak, dengan asumsi bahwa debonding antara GFRP dan beton tidak menyebabkan kegagalan struktur
2. Mengatasi penambahan lebar retakan akibat beban layanan
3. Meningkatkan kekuatan lentur akibat peningkatan beban seperti beban gempa dan beban lalu lintas, dalam hal ini pemasangan GFRP pada struktur balok dibagian serat tariknya.
4. Merencanakan beton baru yang memiliki daktilitas tinggi
5. Perbaiki struktur akibat kesalahan desain atau konstruksi
6. Meningkatkan kemampuan geser beton
7. Meningkatkan kemampuan pengeangan kolom beton

8. Perbaiki struktur lama dan bersejarah.

Umumnya, penggunaan GFRP-S *Jacketing* pada kolom berpenampang lingkaran beton bertulang adalah untuk menambah pengekangan dalam menahan ekspansi lateral permukaan kolom akibat bekerjanya beban aksial, sehingga perlu adanya pengujian lentur kolom berpenampang lingkaran yang telah ter-instalasi pemasangan GFRP-S nya berorientasi pada perkuatan pengekangan akibat aksial, bukan kuat lenturnya.

2.5.2 Karakteristik Material GFRP.

Umumnya untuk perkuatan kolom terutama untuk perkuatan elemen tekan, lembaran fiber dipasang pada arah transversal dari kolom, dimana serat kaca yang berwarna kuning berorientasi pada arah 90° dan tegak lurus serat kaca. Material fiber sebagai bahan perkuatan harus menjamin bahwa kolom yang diperkuat tersebut harus dapat memikul beban rencana dengan aman.



Gambar 2.9 GFRP-S (*Glass Fiber Reinforced Polymer Sheet*)

GFRP-S yang digunakan pada penelitian ini adalah Tyfo ® SEH-51a Komposit yang merupakan material ER-ICBO 5282 yang terdaftar dan terdiri dari Tyfo ® S Epoxy dan bahan perkuatan Tyfo ® SEH-51a. Tyfo ® SEH-51a adalah Sistem anyaman khusus yang terbuat dari bahan kaca dan diproduksi

pabrik Tyfo ® Fibrewrap. Serat material kaca berorientasi dalam arah 0° dengan penambahan serat kaca yang berwarna kuning dan berorientasi dalam arah 90° dan tegak lurus serat kaca. Untuk pemasangan GFRP-S digunakan metode Wet Lay-up. Adapun FRP jenis *Glass* tergolong dalam *High Strength*



Gambar 2.10 Perkuatan dengan jaket berbahan komposit:
(a) metode *hand lay-up* pada serat kaca dengan *epoxy*, (b) mesin *winding* untuk serat karbon dan *epoxy* (Sumber: XXsys Technologies, Inc, 1997).

Tabel 2.8 Karakteristik material GFRP

PROPERTI MATERIAL FIBER				
Dalam Keadaan Lepas		Dalam Keadaan Komposit		
Properti	Nilai Test	Properti	Nilai	
			Test	Desain
Tegangan Tarik	3,24GPa	Tegangan Ultimate dalam arah utama fiber	575 MPa	460 MPa
Modulus Tarik	72,4 GPa	Regangan	2,2 %	2,2 %
Regangan Maksimum	4,5 %	Modulus Tarik	26,1 GPa	20,9 GPa
Kerapatan	2,55 g/cm ³	Tegangan Tarik Ultimate 90° dari arah utama fiber	25,8 MPa	20,7 MPa
Tebal Fiber	0,36 mm	Tebal Lapisan Komposit	1,3 mm	1,3 mm

Sumber : *Fyfo.Co LLC*

2.5.3. *Resin Epoxi*

Resin epoxi adalah larutan yang digunakan untuk merekatkan serat fiber pada beton atau objek yang ingin diperkuat. Campuran *resin epoxi* terdiri dari bahan padat dan cair yang saling larut. Campuran dengan *resin epoxi* yang lain dapat digunakan untuk mencapai kinerja tertentu dengan sifat yang diinginkan. Resin epoxi yang paling banyak digunakan adalah *Bisphenol A Eter Diglisidil*.

Resin epoxi dikeringkan dengan menambahkan *anhidrida* atau pengeras amina. Setiap pengeras menghasilkan profil larutan yang berbeda dan sifat yang diinginkan untuk produk jadinya. Kecepatan pengeringan dapat dikendalikan melalui seleksi yang tepat dari pengeras atau katalis untuk memenuhi persyaratan proses

Beberapa keuntungan *Resin Epoxi* sebagai berikut :

1. Berbagai sifat mekanis memungkinkan pilihan yang lebih banyak
2. Tidak ada penguapan selama proses pengeringan
3. Rendahnya penyusutan selama proses pengeringan
4. Ketahanan yang baik terhadap bahan kimia
5. Memiliki sifat adhesi yang baik terhadap berbagai macam pengisi, serat dan substrat lainnya

Kelemahan resin epoxi adalah biaya yang relatif mahal dan proses pengeringan yang relatif lama. Bahan perekat yang digunakan dalam penelitian ini juga merupakan produk dari Fyfe Co dengan nama Tyfo S Epoxy yang terdiri dari 2 komponen yaitu komponen A (resin) dan komponen B (hardener). Untuk proses pencampuran antara komponen A dan komponen B digunakan perbandingan 2: 1.

Tabel 2.9 Karakteristik Material Resin Epoksi

PROPERTI MATERIAL EPOXI		
Waktu pengeringan 72 Jam (Suhu 60°C)		
PROPERTI	ASTM METHOD	TYPICAL TEST VALUE
Kekuatan Tarik	ASTM D-638	72,4 MPa
Modulus Tarik	ASTM D-638	3,18 GPa
Persen Regangan	ASTM D-638	5,0 %
Kekuatan Lentur	ASTM D-790	123,4 MPa
Modulus Lentur	ASTM D-790	3,12 GPa

Sumber : *Fyfo.Co LLC*

2.6 Mode Kegagalan Kolom Berpenampang lingkaran Terhadap Kombinasi Pembebanan Aksial Dan Lentur

Beberapa mode kegagalan yang sering terjadi pada komponen struktur yang diperkuat oleh material GFRP adalah sebagai berikut:

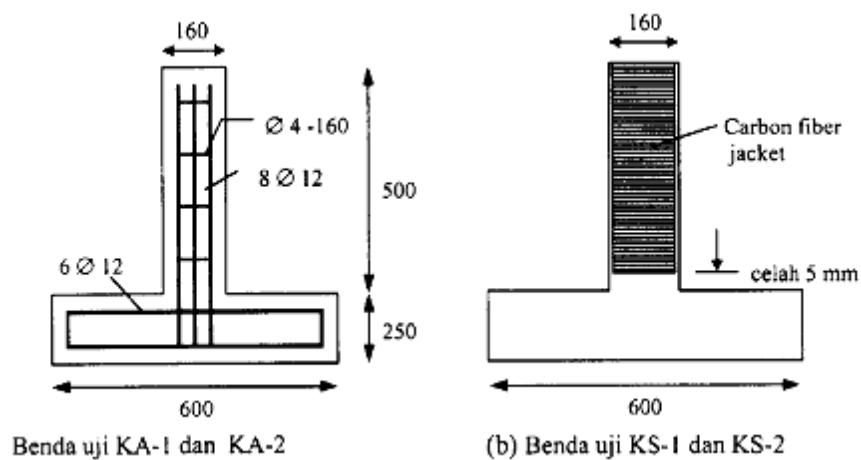
- FRP mengalami kegagalan geser pada sambungan, setelah tulangan tarik meleleh
- FRP mengalami kegagalan tarik (putus) di luar sambungan, setelah tulangan tarik meleleh

Pengujian kombinasi beban lentur dan aksial pada kolom berpenampang lingkaran beton bertulang dengan tipikal kolom pendek seperti ini tentunya berdampak pada jenis kegagalan yang terjadi. Adapun yang menjadi titik berat dalam penelitian ini adalah apakah ada peranan GFRP dalam jenis mekanisme runtuhnya kolom berpenampang lingkaran dengan kombinasi gaya aksial dan lentur

Berdasar pada hasil penelitian yang dilakukan oleh *Johannes Januar Sudjati dan Andreas Triwiyono (UGM 2003)* pada “Perkuatan Kolom Beton

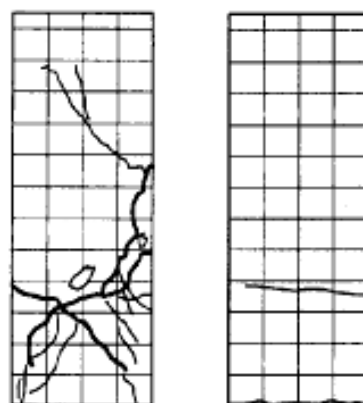
Bertulang Dengan Material CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*)”
,didapatkan suatu kesimpulan bahwa CFRP yang digunakan pada kolom persegi
dapat merubah mode kegagalan kolom dari kegagalan geser ke kegagalan lentur.

Adapun metode yang digunakan oleh keduanya hampir sama dengan
metode yang digunakan pada penelitian ini dimana kolom diberi pembebanan
aksial awal terlebih dahulu, kemudian diberikan pembebanan lateral hingga
mengalami failure. Pun dengan jenis kolom yang digunakan berdasar
kelangsingannya yakni kolom pendek.



Gambar 2.11 Jenis kolom yang digunakan oleh
penelitian sebelumnya (*Johannes & Andreas*)

Pada *Gambar 2.12* berikutnya, diperlihatkan perbandingan pola retak pada
satu sisi permukaan kolom. Tampak perbedaan mode kegagalan yang terjadi pada
kolom normal (*kiri*) dan kolom yang telah diberi perkuatan CFRP (*kanan*) dimana
pada kolom tanpa perkuatan mengalami kegagalan geser sedangkan pada kolom
yang diberi perkuatan CFRP mengalami kegagalan lentur.

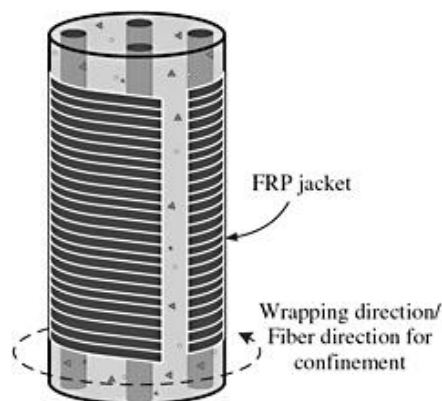


Gambar 2.12 Perbedaan mode kegagalan dari gagal geser (kiri)
Dan gagal lentur (kanan) (*Johannes & Andreas*)

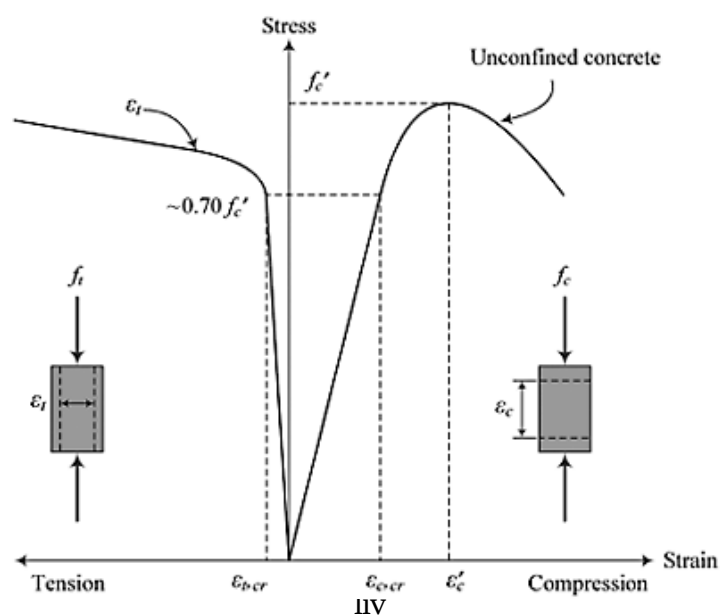
2.7 Kapasitas Kolom Lingkaran Beton Bertulang dengan GFRP-S

2.7.1 Perilaku Beton yang Terkekang.

Beton terkekang dapat mempertahankan kuat tekan dan regangan jauh lebih tinggi dari beton tak terkekang. Kekangan mencegah perluasan yang terjadi pada benda uji akibat pembebanan uniaksial, sehingga memberikan kontribusi untuk kapasitas beban yang lebih tinggi.



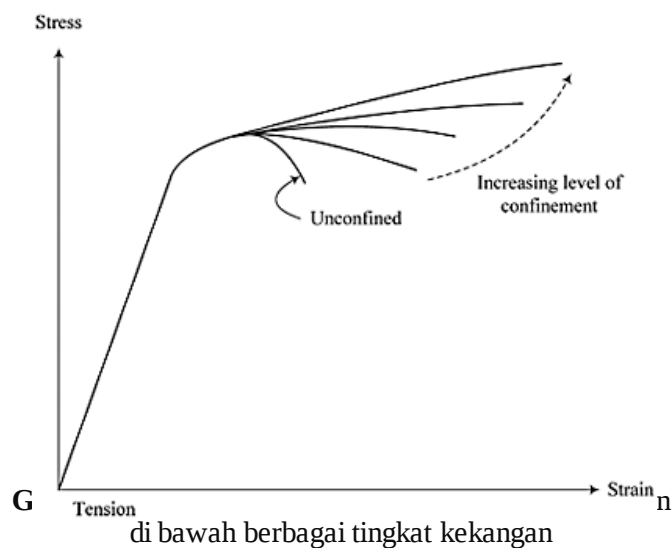
Gambar 2.13 Skema dari FRP yang dibungkus pada kolom menunjukkan orientasi serat



Gambar 2.14 Hubungan khas untuk pembebanan uniaksial pada beton tak terkekang menunjukkan tegangan dibandingkan dengan regangan longitudinal, transversal, dan volumetrik regangan

Dalam kasus beton yang dikekang oleh bahan komposit berkekuatan tinggi. Pada *Gambar 2.13*, kekangan bersifat pasif. Pada tingkat beban rendah, ekspansi beton sebanding dengan *Poisson rasio*, dan besarnya adalah kecil. Oleh karena itu, tegangan yang diinduksikan pada komposit adalah kecil sampai retak-retak longitudinal yang berkembang di beton. Tergantung pada jenis beton, retakan longitudinal yang dapat terjadi pada tingkat beban mulai dari $0,5 f_c$ untuk beton berkekuatan rendah sampai dengan $0,9 f_c$ untuk beton berkekuatan sangat tinggi. Perilaku khas ditunjukkan pada *Gambar 2.14*.

Sisi kanan *Gambar 2.14*. merupakan tegangan - regangan uniaksial dan sisi kiri menyajikan regangan lateral atau ekspansi. Setelah retak longitudinal yang berkembang, spesimen berkembang dengan cepat. Fenomena ini menginduksi tegangan dalam tulangan pengekangan. Jumlah tekanan kekangan akan tergantung pada kekakuan dan ketebalan tulangan pengekangan. Peningkatan tekanan kekangan akan menghasilkan peningkatan kekuatan tekan dan regangan, seperti yang ditunjukkan pada *Gambar 2.15*.

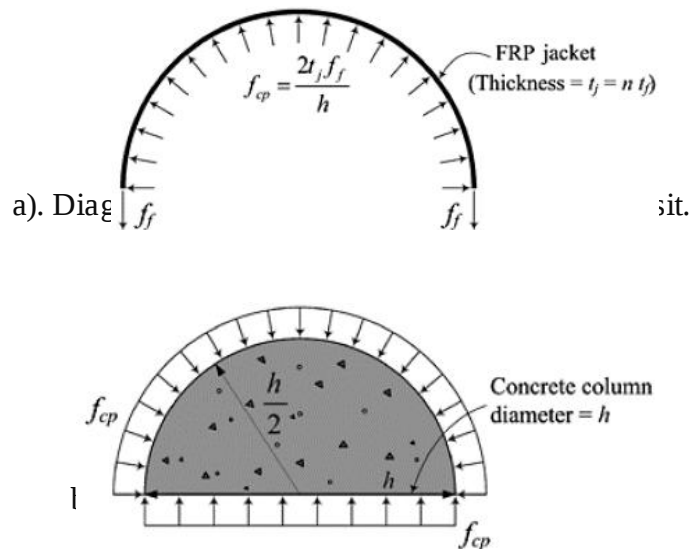


2.7.2 Perilaku Kolom Berpenampang Lingkaran yang Terkekang dengan Komposit : Beban Konsentris, Sesuai ACI 440-2R-02.

Seperti dibahas sebelumnya, retak beton menyebabkan tegangan pada *hoop* komposit. Langkah pertama adalah membangun persamaan untuk menghitung tekanan kekangan. Diagram free-body dari penampang lingkaran dibatasi oleh ketebalan komposit t_j seperti ditunjukkan pada *Gambar 2.16*

Menggunakan prinsip-prinsip kekuatan bahan, tekanan kekangan untuk menginduksi kolom, f_{cp} dapat dinyatakan sebagai fungsi dari ketebalan komposit dan kekakuan.

$$f_{cp} = \frac{2t_j f_f}{D} \dots\dots\dots (9)$$



Gambar 2.16 Diagram free-body yang menunjukkan gaya internal dan eksternal pada jaket FRP dan kolom beton (*Sumber: Master Builders, Inc dan Sistem Pelestarian Struktural, 1998*).

di mana D adalah diameter kolom dan f_f adalah gaya yang dihasilkan oleh komposit. jika E_f adalah modulus dari serat (komposit), t_j adalah ketebalan serat, ϵ_f adalah regangan melingkar, dan n_f adalah jumlah lapisan, maka:

$$f_f = n_f t_f E_f \epsilon_f \dots\dots\dots (10)$$

Oleh karena itu:

$$f_{cp} = \frac{2n_f t_f E_f \varepsilon_f}{D} \dots\dots\dots (11)$$

Jika rasio tulangan pengekangan, ρ_f , yang dinyatakan sebagai fungsi dari luas dan diameter:

$$\rho_f = \frac{4n_f t_f}{D} \dots\dots\dots (12)$$

dan

$$f_{cp} = \frac{\rho_f E_f \varepsilon_f}{2} \dots\dots\dots (13)$$

Ketika ekspansi beton menyebabkan regangan yang cukup pada struktur komposit, keruntuhan pada struktur komposit yang menyebabkan keruntuhan pada beton. Untuk elemen beton yang mengalami geser dan dikombinasikan dengan tekanan, regangan runtuh efektif pada struktur komposit yang mengalami kegagalan, ε_{fe} , harus dibatasi untuk nilai maksimum sebesar 0,004 dan 0,75 ε_{fu} :

$$\text{atau } \varepsilon_{fe} = 0.004 \leq 0.75 \varepsilon_{fu} \dots\dots\dots (14)$$

Oleh karena itu, tekanan pengekangan pada saat mengalami kegagalan:

$$f_{cp} = \frac{E_f \varepsilon_{fe} \rho_f}{2} \dots\dots\dots (15)$$

Berdasarkan hasil eksperimen (*ACI Komite 440, 2002*), kuat tekan pada tekanan pengekangan, dapat dinyatakan sebagaiberikut :

$$f'_{cc} = f'_c \left[2.25 \sqrt{1 + 7.9 \frac{f_{cp}}{f'_c}} - 2 \frac{f_{cp}}{f'_c} - 1.25 \right] \dots\dots\dots (16)$$

Regangan yang sesuai dengan tegangan puncak:

$$\varepsilon'_{cc} = \varepsilon'_c \left[\frac{6f'_{cc}}{f'_c} - 5 \right] \dots\dots\dots (17)$$

dimana f'_c dan ε'_c adalah tegangan tekan puncak dan regangan yang sesuai untuk beton yang tidak terkekang. Jika ε'_c tidak diberikan, maka nilainya dapat diperkirakan dengan menggunakan persamaan:

$$\varepsilon'_c = 1.71 \frac{f'_c}{E_c} \dots\dots\dots (18)$$

Kuat tekan yang disempurnakan, dapat digunakan untuk perhitungan kapasitas gaya aksial kolom. Faktor reduksi ψ_f direkomendasikan untuk kontribusi beton. Nilai yang direkomendasikan untuk ψ_f adalah 0,95. Untuk anggota nonprategang, kapasitas nominal kolom dapat dihitung menggunakan persamaan yang direkomendasikan dalam kode ACI (ACI Komite 440, 2002).

Untuk kolom dengan tulangan spiral:

$$P_n = 0.85 [0.85 f'_{cc} \psi_f (A_g - A_{st}) + A_{st} f_y] \dots\dots\dots (19)$$

Untuk kolom dengan sengkang ikat :

$$P_n = 0.80 [0.85 f'_{cc} \psi_f (A_g - A_{st}) + A_{st} f_y] \dots\dots\dots (20)$$

A_g adalah luas penampang beton dan A_{st} adalah luas tulangan longitudinal.

2.7.3 Kapasitas Kolom Berpenampang lingkaran Beton Bertulangan dengan GFRP-S, sesuai ACI 440-2R-08

Untuk perkuatan kolom dengan FRP, perhitungan desain mengacu pada ACI committee 440. Perhitungan tersebut disajikan dalam rumus-rumus berikut :

- 1) Lam and Teng (2003a), sesuai ACI 440-2R-08

$$f'_{cc} = f'_c + \psi_f 3,3k_a \left(\frac{2nt_{frp}^E f_{rp}^k \varepsilon_{fu}}{D} \right) \dots\dots\dots (21)$$

Kekuatan tekan aksial dari suatu elemen beton yang tidak langsing, berbobot normal dan dikekang dengan jaket FRP, dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan sebagai berikut :

$$P_u = 0,85 \phi \phi 0,85 f'_{cc}(A_g - A_{st}) + f_y A_{st} l \dots\dots\dots (22)$$

Regangan tekan maksimum pada beton yang dikekang FRP ϵ_{ccu} dapat ditemukan dengan menggunakan persamaan (14). Regangan ini harus dibatasi pada nilai yang diberikan dalam persamaan (15) untuk mencegah retak yang berlebihan dan hilangnya integritas beton.

$$\epsilon_{ccu} = \epsilon'_c \left(1.50 + 12k_b \frac{f_l}{f'_c} \left(\frac{\epsilon_{fe}}{\epsilon'_c} \right)^{0.45} \right) \dots\dots\dots (23)$$

$$\epsilon_{ccu} \leq 0.01 \dots\dots\dots (24)$$

FRP jaket yang paling efektif mengekang elemen dengan penampang lingkaran. Sistem FRP menyediakan tekanan pengekangan melingkar yang seragam untuk ekspansi radial dari elemen tekan ketika serat sejajar melintang terhadap sumbu memanjang elemen. Untuk penampang melintang lingkaran, faktor-faktor bentuk κ_a dan k_b dalam pers. (12) dan (16), masing-masing, dapat diambil sebagai 1,0.