

**ANALISA KEKUATAN KOMPOSIT
FERROCEMENT DENGAN PENAMBAHAN SERAT
SERABUT KELAPA (*COCONUT FIBER*) UNTUK
APLIKASI LAMBUNG KAPAL
SKRIPSI**

Oleh :

DIRAJAYA P.R.

NPM : 0403080141



**SKRIPSI INI DIAJUKAN UNTUK MELENGKAPI SEBAGIAN
PERSYARATAN MENJADI SARJANA TEKNIK**

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
PROGRAM STUDI TEKNIK PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
GANJIL 2007/2008**

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul :

ANALISA KEKUATAN KOMPOSIT FERROCEMENT DENGAN PENAMBAHAN SERAT SERABUT KELAPA (*COCONUT FIBER*) UNTUK APLIKASI LAMBUNG KAPAL

Yang dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Perkapalan Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia, sejauh yang saya ketahui bukan merupakan tiruan atau duplikasi dari skripsi yang sudah dipublikasikan dan pernah dipakai untuk mendapatkan gelar kesarjanaan di lingkungan Universitas Indonesia maupun di Perguruan Tinggi atau instansi manapun, kecuali bagian yang sumber informasinya dicantumkan sebagaimana mestinya.

Depok, 7 Januari 2008



Dirajaya P.R.

NPM 0403080141

PENGESAHAN

ANALISA KEKUATAN KOMPOSIT FERROCEMENT DENGAN PENAMBAHAN SERAT SERABUT KELAPA (*COCONUT FIBER*) UNTUK APLIKASI LAMBUNG KAPAL

Dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Perkapalan Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia. Skripsi ini diajukan pada sidang ujian skripsi pada bulan Januari 2008 dan dinyatakan memenuhi syarat/sah sebagai skripsi pada Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia.

Depok, 7 Januari 2008

Dosen Pembimbing



Dr. Ir. Sunaryo

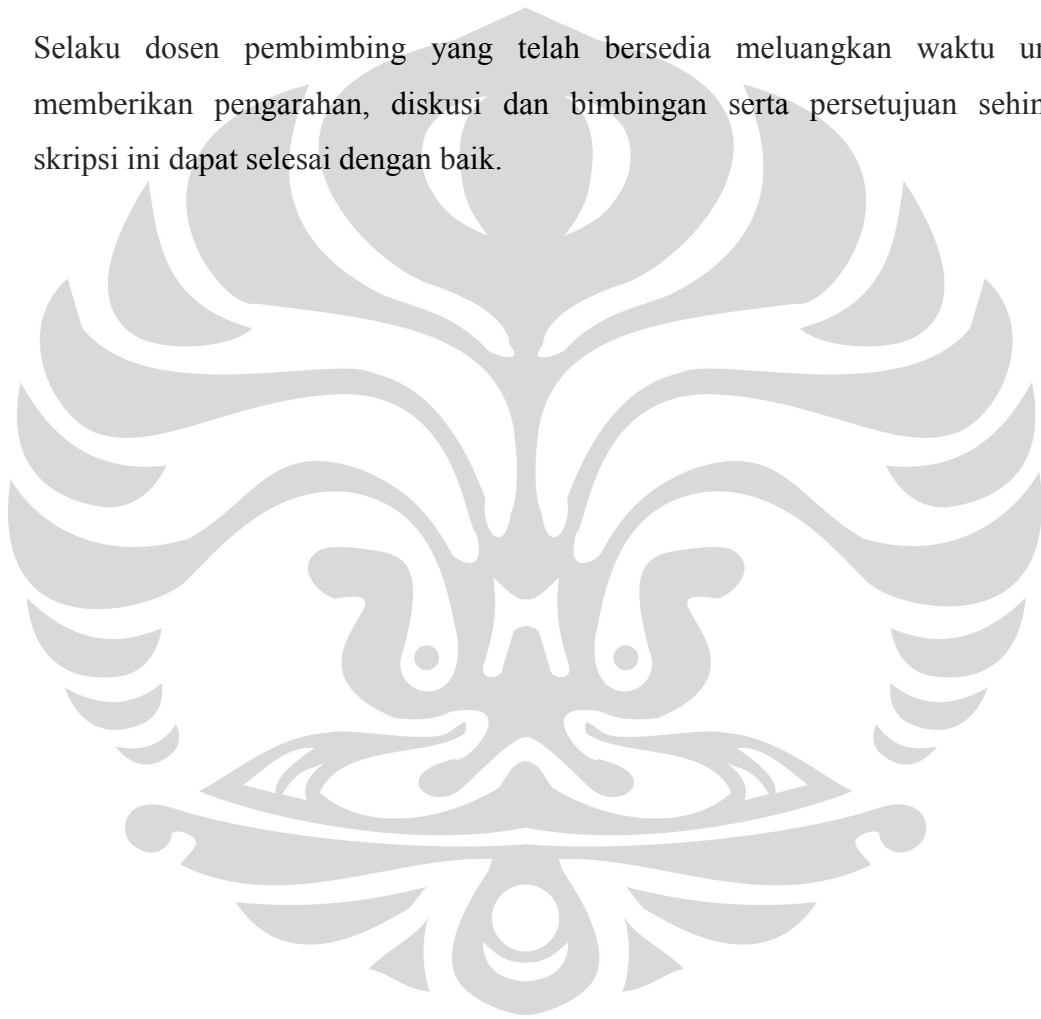
NIP 131 473 842

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada :

Dr.Ir. Sunaryo

Selaku dosen pembimbing yang telah bersedia meluangkan waktu untuk memberikan pengarahan, diskusi dan bimbingan serta persetujuan sehingga skripsi ini dapat selesai dengan baik.



Dirajaya P.R

0403080141

Departemen Teknik Mesin

Dosen Pembimbing

Dr.Ir. Sunaryo

**ANALISA KEKUATAN KOMPOSIT FERROCEMENT DENGAN
PENAMBAHAN SERAT SERABUT KELAPA (*COCONUT FIBER*)
UNTUK APLIKASI LAMBUNG KAPAL**

ABSTRAK

Penelitian kekuatan komposit ferrocement dengan penambahan serat serabut kelapa untuk aplikasi lambung kapal adalah sebuah pembahasan ilmiah yang bertujuan untuk mendapatkan komposit yang baru dan dapat diaplikasikan sebagai material pembangun kapal. Serat alam yaitu serat serabut kelapa diaplikasikan sebagai serat (fiber) pada komposit FRC (Fiber Reinforced Concrete) jenis ferrocement. Serat alam sendiri memiliki kelebihan daripada serat sintetis dari segi karakteristik mekaniknya dan ketersediaannya yang berlimpah. Hal inilah yang menjadi latar belakang perlu dilakukannya penelitian mengenai serat alam.

Penelitian kali ini dilakukan untuk melihat karakteristik mekanis dari komposit tersebut. Sampel uji yang digunakan divariasikan sesuai dengan fraksi volumenya yang telah disesuaikan oleh persyaratan penggunaan serat pada FRC. Dilakukan pengujian di laboratorium untuk melihat kekuatan tarik, besarnya defleksi, lebar retak, berat spesifik, water absorption dan kandungan air dari sampel uji. Dimana karakteristik tersebut dibandingkan dengan data mekanis ferrocement yang telah diaplikasikan pada lambung kapal. Sedangkan sampel uji dengan penambahan serat serabut kelapa berkisar 5,7.5,10 % dari volume fraksi sample.

Dari hasil pengujian test lentur dan didapat nilai kekuatan Beban lentur sebesar 403,33 ; 473,33 ; 501,67 dan 460 N pada masing-masing spesimen (0,5,7.5 dan 10%), sedangkan dalam analisa struktur tegangan tarik pada masing-masing spesimen A = 4,698 Mpa (681,377 psi), spesimen B = 5,833 Mpa (826,247 psi), Spesimen C = 5,697 Mpa (845,995 psi) dan Spesimen D = 4,31 Mpa (625,213 psi). Hasil penelitian juga menunjukkan adanya hubungan antara defleksi, lebar retak, water absorption dan kandungan air dengan kenaikan fraksi volume serat serabut kelapa.

Kata Kunci : Komposit, Fiber Reinforced Concrete (FRC), Ferrocement, Serat Serabut Kelapa, Uji Lentur, Karakteristik Mekanis

Dirajaya P.R

Counsellor

0403080141

Dr.Ir. Sunaryo

Mechanical Engineering Department

**STRENGTH ANALYSIS OF FERROCEMENT COMPOSITE WITH
ADDITION OF COCONUT FIBER AS REINFORCEMENT APPLIED
FOR SHIP HULL CONSTRUCTION**

ABSTRACT

The research of ferrocement composite with adding coconut fiber for ship hull application is an scientific subject that purpose to get a new composite and applied for boat building. Natural fiber that's coconut fiber is used to as reinforcement in fiber reinforced concrete (FRC) inside of ferrocement. Coconut natural fiber has self uniques mechanical properties and widely available than syntetic fiber which is used for reinforcement. Based on it's research is carried out.

The research is done to observe mechanical properties of ferrocement composite. The variation of sample tests are prepared according to faction volume that's qualify of fiber reinforced concrete (FRC). Tests are done at laboratory to observe tensile strength, level of deflection, wide of crack, specific weight, water absorption, water content of sample tests. Those properties compare with mechanical properties of ferrocement that's applied for hull ship construction. The variation of sample tests which is adding of coconut fiber based on 5 %, 7,5 % and 10 % of faction volume.

The result of test shows flexural strength values are 403,33 ; 473,33 ; 501,67 dan 460 N for each specimen (0%,5%,7.5% and 10% faction volume). Result of analysis structure shows the tensile strength for each specimen that specimen A =4,698 Mpa (681,377 psi); specimen B = 5,833Mpa (826,247 psi); specimen C = 5,697 Mpa (845,995 psi) and specimen D = 4,31 Mpa (625,213 psi). The result shows relation of deflection, water absorption, water content with level of faction volume coconut fiber on specimen too.

**Key Note : Composite, Fiber Reinforced Concrete (FRC), Ferrocement, Coconut
Natural Fiber , Flexural Test, Mechanical Properties**

DAFTAR ISI SKRIPSI

JUDUL	i
PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
UCAPAN TERIMAKASIH	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR SIMBOL	xii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 LATAR BELAKANG MASALAH	1
1.2 PERUMUSAN MASALAH	2
1.3 TUJUAN PENELITIAN	3
1.4 PEMBATASAN MASALAH	3
1.5 METODE PENELITIAN	4
1.6 SISTEMATIKA PENULISAN	4
BAB II LANDASAN TEORI	6
2.1 KOMPOSIT	6
2.1.1 Matriks Pengisi	7
2.1.2 Serat (fiber)	8
2.2 INTERAKSI ANTARA SERAT DAN MATRIKS	8
2.2.1 Interaksi antara serat dan matriks homogen tak retak	9
2.2.2 Interaksi antara serat dan matriks homogen retak	9
2.3 TEORI FERROCEMENT	9
2.3.1 Implementasi Ferrocement	10
2.4 PROSES PEMBUATAN FERROCEMENT	11
2.4.1 Material penyusun ferrocement	11
2.4.1.1 Semen	11

2.4.1.2	Pasir	12
2.4.1.3	Air	13
2.4.1.4	Tulangan Kawat jala dan baja	13
2.4.2	Metode pembuatan	15
2.4.2.1	Penulangan	16
2.4.2.2	Adukann mortar / matriks	16
2.4.2.3	Plesteran/pelepaan	16
2.4.2.4	Perawatan (curing)	17
2.5	SIFAT-SIFAT MEKANIS FERROCEMENT	18
2.6	MODULUS ELASTISITAS	21
2.7	PENAMBAHAN SERAT SERABUT KELAPA	23
2.8	TEORI MAKRO DAN MIKROMEKANOKA KOMPOSIT	24
2.8.1	Fraksi volume	25
2.8.2	Fraksi Massa	26
2.8.3	Densitas	26
2.8.4	Modulus Young Longitudinal	26
2.8.5	Modulus Young Tranversal	27
2.8.6	Major dan Minor Poisson's Ratio	29
2.9	MOMEN DAN TEGANGAN PEMBEBANAN LENTUR	29
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		34
3.1	SISTEMATIKA PENELITIAN	34
3.2	MATERIAL PENYUSUN BENDA UJI	35
3.2.1	Semen	35
3.2.2	Pasir	35
3.2.3	Air	35
3.2.4	Tulangan rangka (wire mesh)	35
3.2.5	Serat Serabut Kelapa (coconut fiber)	36
3.3	PABRIKASI KOMPOSIT BENDA UJI	37
3.4	PENGUJIAN KOMPOSIT BENDA UJI	39
3.5	TEORI / STANDART PEMBANDING HASIL PENGUJIAN	43
3.5.1	Ferrocement yang diaplikasikan pada lambung kapal	43

3.5.2	Glassfibre Reinforced Concrete (GRC)	45
BAB IV	ANALISA DAN PENGOLAHAN DATA	47
4.1	UMUM	47
4.2	TEGANGAN DAN MOMEN YANG TERJADI PADA STRUKTUR	47
4.3	HASIL PENGUJIAN PROPERTIES MATERIAL	49
4.3.1	Material dan Bahan Untuk Spesimen	49
4.3.2	Perhitungan dan Pengolahan Data	50
4.4	PERILAKU STRUKTUR AKIBAT BEBAN LENTUR	59
4.4.1	Tegangan Tarik	59
4.4.2	Analisa Defleksi Pada Spesimen	63
4.4.3	Lebar Retak	66
4.4.4	Berat Spesifik	67
4.4.5	Water Absorption (Penyerapan Air) Pada Struktur	68
4.4.6	Kadar Air Pada Spesimen uji	69
BAB V	KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1	KESIMPULAN	71
5.2	SARAN	72
	DAFTAR REFERENSI	74
	DAFTAR PUSTAKA	76
	LAMPIRAN	78

DAFTAR GAMBAR

- Gambar 2.1** Wire mesh type dan reinforcing rod
- Gambar 2.2** Penampang Komposit Ferrocement
- Gambar 2.3** Kurva Percobaan Tarik
- Gambar 2.4** Kurva ideal pada tarik dan tekan
- Gambar 2.5** Elemen komposit pembebanan dalam arah longitudinal
- Gambar 2.6** Elemen komposit pembebanan dalam arah transversal
- Gambar 2.7** Elemen komposit pembebanan
- Gambar 2.8** Penampang, diagram tegangan-regangan dalam keadaan seimbang
- Gambar 3.1** Diagram Alir (*flow chart*) penelitian :
- Gambar 3.2** Specimen uji sesuai dengan standart ASTM C 947- 99).
- Gambar 3.3** Spesimen Uji dengan Variasi serat 5,7.5 dan 10 % serat serabut kelapa
- Gambar 3.4** Spesimen dengan pengujian lentur tiga titik
- Gambar 3.5** Spesimen uji ketika menalami pengujian lentur tiga titik
- Gambar 3.6** Spesimen uji setelah mengalami keretakan / fatigue
- Gambar 3.7** Mesin pengujian lentur Kristal Met 100 kN
- Gambar 4.1** Luas penampang struktur ferrocement.
- Gambar 4.2** Distribusi Tegangan-regangan pada struktur
- Gambar 4.3** Grafik perbandingan tegangan tarik spesimen terhadap ferrocement
- Gambar 4.4** Grafik defleksi pada tiap spesimen uji

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1.	ASTM C33-74a Spesifikasi gradasi pasir
Tabel 2.2	Beberapa sifat dan komposisi bahan ferrocement
Tabel 2.3	Phase kerja, tegangan dan perpanjangan ferrocement pada benda tarik
Tabel 2.4.	Kandungan kimia pada serat serabut kelapa
Tabel 3.1.	Karakteristik mekanis Square Weld Mesh
Tabel 3.2.	Karakteristik mekanis serat serabut kelapa
Tabel 3.3	Kekuatan tarik rata-rata (psi)
Tabel 3.4	Kekuatan tekan rata-rata (psi)
Tabel 3.5	Modulus elastisitas ($\times 10^6$)
Tabel 3.6	Berat rata-rata (lbs/ft)
Tabel 3.7	Karakteristik Mekanis (<i>mechanical Properties</i>) GRC
Tabel 4.1	Beban Lentur Rata-rata (F) pada Spesimen A
Tabel 4.2	Beban Elastis rata-rata (F') pada Spesimen A
Tabel 4.3	Beban Lentur Rata-rata (F) pada Spesimen B
Tabel 4.4	Beban Elastis rata-rata (F') pada Spesimen B
Tabel 4.5	Beban Lentur Rata-rata (F) pada Spesimen C
Tabel 4.6	Beban Elastis rata-rata (F') pada Spesimen C
Tabel 4.7.	Beban Lentur Rata-rata (F) pada Spesimen D
Tabel 4.8	Beban Elastis rata-rata (F') pada Spesimen D
Tabel 4.9	Analisa Tegangan dan Momen Pada Spesimen Uji
Tabel 4.10	Beban Tarik (F_{cr}) pada Spesimen A
Tabel 4.11	Nilai Tegangan tarik ferrocement pada tiap spesimen
Tabel 4.12	Nilai defleksi pada tiap spesimen
Tabel 4.13	Nilai Lebar retak yang diizinkan (menurut ACI Comitee)
Tabel 4.14	Nilai Lebar retak pada tiap spesimen
Tabel 4.15	Berat Spesifik (ρ) pada tiap spesimen
Tabel 4.16	Ratio Water Absorbtion (%) pada tiap spesimen
Tabel 4.17	Ratio Kandungan air (%) pada tiap spesimen

DAFTAR SIMBOL

$\epsilon_c, \epsilon_m, \epsilon_f$	regangan pada kompositserat, matriks pengisi dan serat
ϵ_{mu}	regangan ultimate serat
σ_c, σ_{fu}	tegangan tarik komposit dan ultimate serat
V_{fc}	volume kritis serat
E_c, E_f, E_m	modulus elastisitas komposit, serat dan matriks pengisi
ϵ_l, ϵ_o	regangan ahkir dan regangan mula-mula
v_i	fraksi volume dari unsur pembentuk
V_i, V_c	volume unsur pembentuk dan volume komposit
w_i	fraksi massa dari unsur pembentuk
W_i, W_c	massa unsur pembentuk dan komposit
ρ_c, ρ_f, ρ_m	densitas komposit, fiber, matriks
$(\sigma_1^T)_{ult}, (\sigma_f)_{ult}$	ultimate longitudinal strength, tensile strength of fiber
$(\epsilon_f)_{ult}, (\epsilon_f^T)_{ult}$	ultimate Failure Strain of Fiber, Longitudinal Strain
$(\sigma_2^T)_{ult}$	ultimate Transversal Strain
$(\epsilon_2^T)_{ult}$	ultimate Longitudinals Strain
F	gaya /beban pada spesimen
L, b, h	panjang span, lebar, tinggi penampang
f_r	modulus rupture mortar (MOR)
y	jarak titik pusat vertikal = $h/2$
f_y	kekuatan luluh (<i>Yield Strength</i>) mesh
d	jarak titik tekan terhadap mesh (mm)
A_s	luas penampang mesh total pada struktur terhadap arah aksial
f'_c	kekuatan tekan maksimum mortar
Δ, P'	defleksi, gaya/beban pada zona elastis
f_s	tegangan tarik-lentur maksimum
M_a, M_{cr}, M_n	momen maksimum, momen retak dan momen nominal
I_g, I_{cr}	moment inersia bruto dan retak
σ_{cr}, F_{cr}	tegangan tarik saat retak dan gaya/beban saat retak

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG MASALAH

Material utama pembuatan kapal seperti baja merupakan material yang sulit didaur ulang dan sudah menjadi material yang langka. Oleh karena itu diupayakan untuk menggantikan material baja tersebut dengan material baru seperti komposit. Komposit adalah campuran secara fisika antara matriks pengisi dan serat (sebagai penguat) sehingga dihasilkan bahan baru dengan karakteristik mekanis yang baru. Dalam hal ini, komposit yang dimaksud adalah komposit yang sudah memenuhi standar pembangunan kapal seperti yang terdapat pada klasifikasi.

Komposit sendiri sebenarnya sudah banyak digunakan dalam industri perkapalan dan tidak hanya digunakan sebagai komponen-komponen dari mesin dan peralatan yang ada di kapal tetapi komposit sudah menjadi material utama pembuatan kapal, terutama kapal-kapal kecil seperti kapal ikan, boat, dan lain-lain.

Dewasa ini, telah diketahui pengembangan komposit ferrocement dalam industri perkapalan. Ferrocement sendiri merupakan material yang telah lama dipakai untuk pembuatan kapal-kapal kecil ataupun perahu. Akan tetapi, sifat fisis dari konstuksinya yang sangat tidak tahan terhadap korosi menjadi kendala dalam pengembangan ferrocement dalam industri perkapalan.

Dalam penelitian ini, akan diteliti ferrocement dengan penambahan serat tambahan dari sabut kelapa. Dasar pemilihan serat sabut kelapa sebagai penambahan dalam ferrocement adalah karena serat sabut kelapa merupakan material alam yang mudah didapat dan pohon kelapa juga dapat tumbuh pada tanah dengan kandungan air rendah atau tinggi. Sehingga pohon kelapa hampir dapat dijumpai di belahan bumi manapun, terutama daerah tropis dan daerah yang memiliki banyak pesisir pantai seperti Indonesia. Disamping itu, proses

pengambilan serat sabut kelapa dari tanaman kelapa tidak terlalu sulit dan tidak memakan banyak waktu dalam pengolahannya.

Dalam penelitian ini ingin dibuktikan apakah penambahan serat sabut kelapa pada komposit ferrocement dapat digunakan sebagai material utama dalam membuat kapal atau tidak. Di mana telah dikembangkan kapal berbahan dasar komposit ferrocement, akan tetapi terkendala oleh masalah struktur yang masih rapuh terhadap tegangan tarik dan mudah korosi. Maka komposit tersebut nantinya akan diuji kekuatan mekanisnya dan dilakukan perbandingan kekuatan mekanis dengan komposit ferrocement yang telah diaplikasikan pada lambung kapal. Dalam pengujian tersebut, variasi sampel yang akan digunakan adalah variasi komposisi serabut kelapa sebagai serat tambahan dalam komposit ferrocement tersebut.

1.2 PERUMUSAN MASALAH

Penelitian ini dilakukan pada komposit ferrocement dengan penambahan serat serabut kelapa (*coconut fiber*). Dimana dilakukan analisa struktur pada komposit untuk mendapatkan karakteristik mekanisnya. Karakteristik mekanis yang didapatkan yaitu kekuatan lentur dan kekuatan (tegangan) tarik pada komposit di mana mengacu pada sifat mekanis lambung kapal yang harus memiliki daya fleksibilitas dan kedap air. Dari pengujian tersebut nantinya dapat diketahui apakah material komposit tersebut layak untuk dijadikan sebagai bahan material alternatif dalam pembuatan kapal dengan membandingkan dengan karakteristik mekanis dari material ferrocement / Komposit FRC lainnya yang dipakai pada bidang perkapalan .

Penggunaan serat alam disini diteliti untuk menggantikan peran dari serat sintesis yang selama ini digunakan pada komposit ferrocement / FRC lainnya. Pemilihan serat ini dilatarbelakangi oleh sumber dayanya lebih besar, ekonomis dan ramah lingkungan jika dibandingkan dengan material komposit dengan penguat serat sintesis. Penggunaan serat sabut kelapa ini diharapkan sebagai penyempurnaan dan dapat memberikan hasil kekuatan struktur yang memadai untuk lambung kapal.

1.3 TUJUAN PENELITIAN

1. Mencari material baru sebagai bahan alternatif dalam pembuatan kapal.
2. Melakukan pengujian terhadap komposit berpenguat serat sabut kelapa untuk mendapatkan karakteristik mekanis.
3. Membandingkan karakteristik mekanis dari komposit berpenguat serat dengan karakteristik komposit ferrocement yang digunakan dalam bidang perkapalan.
4. Menganalisa pengaruh serat sabut kelapa sebagai serat alam yang nantinya akan dijadikan penguat pada komposit untuk aplikasi pembuatan kapal.

1.4 PEMBATAHAN MASALAH

Dalam penelitian ini pembatasan masalah dilakukan untuk menghindari hal-hal yang tidak perlu atau di luar lingkup penelitian. Adapun pembatasan masalah yang dilakukan meliputi :

- Matriks pengisi ferrocement yang digunakan adalah campuran semen, pasir, air.
- Tulangan kawat yang dipakai sebagai *fiber composite* adalah jenis kawat jala las (*square weld mesh*)
- Serat alam yang digunakan adalah serat sabut kelapa (*coconut fiber*).
- Serat sabut kelapa yang digunakan adalah sudah dalam bentuk jadi tanpa harus memproses dari bahan awal.
- Pembuatan komposit dilakukan dengan cara *Hand Lay-Up* dan diuji dengan acuan yang ada untuk mendapatkan karakteristik untuk badan kapal.
- Sifat-sifat mekanis yang diuji mencakup pengujian kekuatan lentur dan kekuatan tarik terhadap bahan ferrocement.
- Komposit yang dibuat merupakan jenis komposit *sandwich* dan analisa dilakukan dengan membandingkan dengan analisa teori perhitungan yang sesuai.
- Analisa kekuatan material didapat dari pengujian tes lentur (*flexural test*) dan menganalisa karakteristik mekanis dan struktur dan nantinya akan

dibandingkan dengan standar kekuatan mekanis material ferrocement yang diaplikasikan pada bidang perkapalan.

1.5 METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang dilakukan oleh penulis dengan cara mengumpulkan data, kemudian mengolah data tersebut untuk dilakukan analisa sehingga dapat ditarik kesimpulan. Metode pengumpulan data yang dilakukan penulis meliputi :

- **Studi Literatur**
Kegiatan ini dilakukan untuk memperoleh data-data primer dan sekunder. Data diperoleh dari berbagai sumber seperti : buku, catatan kuliah, artikel, dan literature lainnya.
- **Studi Lapangan / Observasi**
Kegiatan ini dilakukan untuk memperoleh data sekunder dan peninjauan langsung pada komposit yang telah diaplikasikan dan diteliti sebelumnya. Sehingga penulis memiliki wawasan dan gambaran terhadap komposit yang diteliti.
- **Pengujian Labaratorium**
Pengujian dilakukan mengacu pada standard yang ada, dalam hal ini adalah ASTM. Pengujian yang dilakukan adalah pengujian karakteristik mekanis. komposit yaitu pengujian uji lentur / bending dengan Standard ASTM C 947-99. Kegiatan ini dilakukan untuk memperoleh data primer, kemudian data dianalisa sehingga diperoleh suatu hasil yang diinginkan.

1.6 SISTEMATIKA PENULISAN

Penulisan ini menggunakan sistematika penulisan yang akan dijabarkan sebagai berikut :

BAB I PENDAHULUAN

Pada bab ini dijelaskan tentang latar belakang masalah, perumusan masalah, tujuan penulisan, pembatasan masalah, metodologi pemecahan masalah dan sistematika penulisan.

BAB II LANDASAN TEORI

Bab ini menjelaskan tentang teori-teori yang berkaitan dengan penjelasan komposit ferrocement, interaksi antara serat dan matriks, serat alam (serat serabut kelapa), sampai sifat mekanis komposit dan teori analisa mikromekanik, makromekanik dan analisa tegangan pada struktur komposit.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan tentang ruang lingkup penelitian yang dilakukan pada struktur komposit ferrocement uji. Metode pembuatan komposit digunakan metode *hand lay-up*. Selain itu dijelaskan juga diagram alir (*flowchart*) penelitian, sumber- sumber data penelitian, data pembanding ferrocement yang diaplikasikan pada lambung kapal, dan metode standarisasi pengujian komposit.

BAB IV PENGOLAHAN DATA DAN ANALISA HASIL PENGUJIAN

Pada bab ini didiskusikan hasil pengujian uji lentur dari komposit ferrocement dengan penambahan serat serabut kelapa (*coconut fiber*). Selain itu, dengan data yang diperoleh dari hasil pengujian, dilakukan analisa pada struktur komposit untuk mendapatkan karakteristik mekanis yang diharapkan kemudian membandingkannya dengan karakteristik mekanis ferrocement pembanding.

BAB V KESIMPULAN & SARAN

Bab ini merupakan bagian akhir dari skripsi yang berisi kesimpulan & saran dari pengujian dan analisa struktur dari pengujian.

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1. KOMPOSIT

Komposit adalah kombinasi struktur material yang terdiri dari 2 atau lebih material yang terdiri dari matriks dan serat (*fiber*). Kombinasi dari material-material tersebut akan menghasilkan material baru dengan karakteristik atau sifat-sifat agar lebih baik dan menguntungkan. Unsur- unsur itu dibentuk pada tingkat makroskopik dan menyatu secara fisika. Unsur pembentuk komposit disebut penguat dan pengisi (*matriks*). Dimana serat berfungsi sebagai penguat untuk menahan beban dan matriks berfungsi sebagai bagian pengisi yang mengikat serat dan menjaga penguat dari kondisi lingkungan luar.

Keunggulan penggunaan komposit dapat dilihat dari kekuatannya, kekakuan, beratnya yang ringan, tahan tarik dan impact, konduktivitas thermal dan ketahanan terhadap korosi yang melebihi penggunaan material konvensional. Sedangkan penggunaan komposit telah banyak diaplikasikan dalam bidang teknologi dan rekayasa teknik, seperti penggunaan komposit pada bidang otomotif untuk membuat body dari kendaraan, dimana ketahanan yang kuat baik terhadap beban impact, beban gesekan dan lentur yang dimiliki material komposit.

Sedangkan pada kapal, komposit yang telah dikenal dan diaplikasikan adalah komposit *Fiber Reinforced Plastic* (FRP) yang merupakan bagian dari *Glass Reinforced Composite* (GRC). Penggunaannya telah umum digunakan dalam industri perkapalan pada berbagai peralatan elektronik, navigasi kapal, komponen mesin dan interior kapal bahkan juga dipakai sebagai pembuatan konstruksi lambung kapal (*hull construction*). Penggunaan komposit ini pada kapal telah banyak digunakan terutama pada kapal-kapal kecil dan perahu.

Selain itu, penggunaan lain komposit seperti *Fiber Reinforced Concrete* (FRC) juga telah dicoba diaplikasikan dalam pembuatan material kapal^[1]. Seperti diketahui telah dipakai Ferrocement sebagai bahan dasar material kapal. FRC merupakan komposit dimana beton/penguat semen sebagai matriks pengisi

terhadap serat (*fiber*). Sedangkan fiber sebagai bahan-bahan tambahan yang biasa digunakan untuk meningkatkan sifat-sifat mekanis dari semen/mortar sendiri biasa berbentuk kawat anyaman (*wire mesh*) ataupun serat yang berbentuk diskrit / pendek. Gabungan antara mortar (matriks pengisi) dengan mesh dan serat (*fiber*) akan membentuk suatu struktur komposit. Pada penulisan ini, penulis membahas tentang komposit *fiber reinforced concrete* (FRC) dimana beton/ mortar semen berlaku sebagai matriks pengisi. Komposit yang menggunakan semen sebagai bahan dasar untuk matriks dapat dibagi menjadi 3 kategori :

1. komposit dengan fraksi volume serat rendah

Kandungan serat yang terdapat di dalamnya memiliki fraksi volume kurang dari 1 % . matriks yang digunakan biasanya banyak mengandung agregat kasar.

2. komposit dengan fraksi volume serat sedang

Mengandung serat dengan fraksi volume yang berkisar antara 1 sampai 5 %.

3. Komposit dengan fraksi volume serat tinggi

Fraksi volume dari serat berkisar antara 5-20 %.

2.1.1 Matriks Pengisi

Matriks adalah pengisi ruang komposit yang diperkuat dengan serat, memegang peranan tak kalah penting dalam mentransfer tegangan antar matriks, melindungi dari kondisi lingkungan luar dan menjaga permukaan serat dari pengikisan ^[2]. Matriks memiliki kekurangan dalam menahan beban dalam struktur komposit tetapi beberapa jenis matriks memiliki kelebihan dalam pembebanan geser.

Jenis matriks pengisi yang dipakai dalam pembuatan komposit pada umumnya adalah epoxy dan polyesther dari golongan thermoset polymers. Golongan matriks lainnya adalah thermoplastic polymers, methalics dan ceramics. Pada penelitian kali ini pemakaian matriks pengisi terbuat dari campuran bahan semen dan pasir (beton), yang umumnya dipakai pada komposit FRC.

2.1.2 Serat (*fiber*)

Kekurangan dari semen sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya dapat diatasi dengan penambahan beberapa material seperti serat yang mempunyai kekuatan serat tinggi. Serat dapat bekerja secara efektif jika diatur dalam arah di mana serat tersebut memiliki kekuatan tarik terbesar serat akan lebih banyak memberikan manfaat pada saat regangan yang besar terjadi pada matriks semen. Karena kapasitas regangan tarik dari matriks sangat kecil maka akan menimbulkan keretakan makin meluas. Penambahan serat bertujuan untuk menjaga agar keretakan yang terjadi bisa dipertahankan sekecil mungkin serta menahan gaya tarik yang tidak sanggup ditahan oleh matriks pengisi.

Serat memberikan sumbangan yang baik dalam hal kekuatan dan kekakuan. Jumlah dan jenis kontribusinya tergantung dari jenis serat, volume matriks dan sifat-sifat matriks.

2.2 INTERAKSI ANTARA SERAT DAN MATRIKS

Interaksi serat dan matriks merupakan parameter yang mempengaruhi unjuk kerja dari bahan komposit dengan basis matriks semen. Pemahaman interaksi ini diperlukan untuk memperkirakan kontribusi serat serta perilaku dari komposit itu sendiri. Berikut adalah parameter-parameter utama yang mempengaruhi interaksi antara serat dan matriks.

- kondisi matriks : retak atau tidak
- Komposisi matriks
- Bentuk geometri serat
- Tipe serat : Besi, mineral, polimer atau serat alam
- Karakteristik permukaan serat
- Perbandingan kekakuan antara serat dan matriks
- Orientasi dari serat : teratur atau diskrit
- Fraksi volume
- Pembebanan
- Daya tahan serat terhadap komposit

2.2.1 Interaksi antara serat dengan matriks homogen tak retak

Tipe interaksi serat ini terjadi hampir di semua komposit selama tahap pembebanan awal. Sebelum terjadi pembebanan tegangan pada matriks dan serat, interaksi dianggap tidak ada. Ketika matriks diberikan beban, sebagian beban ditransfer ke serat ke sepanjang permukaannya. Karena ada perbedaan kekakuan antara serat dengan matriks, terjadi tegangan geser di sepanjang permukaan serat. Tegangan geser inilah yang membantu gaya ke serat. Jika serat lebih kaku dari matriks (serat baja dan mineral) deformasi di sekitar serat menjadi lebih kecil. Jika modulus serat lebih kecil dari modulus matriks (serat polimer) deformasi disekitar serat akan menjadi lebih besar.

2.2.2 Interaksi antara serat dengan matriks homogen retak

Pada saat komposit mengandung serat dibebani tarik pada periode tertentu matriks akan retak. Ketika matriks mengalami retak, serat akan membawa gaya pembebanan melalui retakan, mentransfer beban dari satu sisi matriks ke sisi yang lain. Serat akan berfungsi sebagai jembatan pembawa beban menyebrangi keretakan. Jika serat dapat menyalurkan beban yang cukup untuk itu, retakan-retakan lain akan terbentuk di sepanjang benda uji. Tahap pembebanan ini disebut *multiple cracking stage* yang terjadi pada periode *beban service*.

2.3. TEORI FERROCEMENT

Ferrocement merupakan tipe komposit dari FRC dimana terdiri dari matriks pengisi (mortar semen/beton) dan fiber (kawat anyaman dan tulangan rangka). Dimana ferrocement merupakan jenis komposit yang terdiri dari ferro dan cement, istilah ferro berkenaan dengan kawat mesh dan tulangan rangka baja sebagai penguat, yang digabungkan dengan campuran semen/ mortar pada formulasi tertentu untuk membentuk suatu lapisan (*shell*) tipis tetapi cukup kuat untuk dijadikan sebagai material konstruksi lambung kapal

Kawat mesh biasanya dibentuk di atas cetakan sementara yang terbuat dari kayu (*mold*). Tulangan rangka baja diikat bersama mesh sehingga membentuk suatu struktur yang kaku dan mampu mempertahankan bentuknya pada saat

dilakukan proses pelapisan/plesteran semen. Campuran mortar biasanya dipompa pada struktur lambung kapal dengan menggunakan alat pemadat (*trowel pump/gunite*). Pada proses ini terjadi peresapan mortar dan merupakan bagian terpenting untuk mendapatkan tingkat kekuatan yang baik sehingga diperlukan kecermatan sebelum dilakukan tahap akhir (*finishing*) dengan menggunakan tangan. Kemudian, diperlukan perawatan (*curing process*). Dimana pada proses ini komposit yang telah terbentuk dijaga kelembabannya selama 28 hari (Batas komposit mencapai kekuatan maksimumnya). Proses curing bisa dipercepat dengan mengkondisikan kelembaban udara lingkungan dengan menggunakan uap air.

2.3.1. Implementasi Ferrocement

Hingga sekarang ini, penggunaan ferrocement telah diaplikasikan di berbagai bidang konstruksi khususnya yang mengarah ke dalam perancangan bangunan. Bidang konstruksi yang mencakup penggunaan ferrocement, antara lain :

a. di bidang Konstruksi Maritim:

- perahu nelayan dan kano
- buoys
- docks
- floating breakwaters
- submarine structure
- floating and submerged oil reservoir
- offshore tanker terminal
- floating bridges
- floating shelters
- coisosons

b. Konstruksi Bangunan

Dengan menggunakan prinsip *shell* atau *corrugated shape* bahan ferrocement dapat digunakan pada konstruksi bangunan dengan sangat berarti seperti untuk pondasi atap, dinding atau lantai. Penggunaan ferrocement untuk

konstruksi atap sangat sesuai karena memiliki sifat kekuatan yang tinggi dan penampang yang tipis. Di Indonesia sendiri, aplikasi ferrocement untuk konstruksi ini sudah banyak diterapkan seperti untuk atap masjid, menara atau bangunan beratap lainnya. Contoh lainnya yaitu Pintu Gerbang Kebun Binatang Ragunan yang seluruh material konstruksinya merupakan komposit ferrocement.

c. Konstruksi kedap air

Sifat kedap air yang dimiliki komposit ferrocement diterapkan dalam tangki air, saluran air dan pintu air (*flap gate*), tangki pengawetan/penyimpanan makanan dan tangki penyimpanan gas

2.4 PROSES PEMBUATAN FERROCEMENT

2.4.1 Material Penyusun Ferrocement

Material-material utama yang digunakan sebagai penyusun ferrocement pada umumnya diuraikan sebagai berikut :

2.4.1.1 Semen

Dalam pengertian umum, semen adalah bahan yang mempunyai sifat adhesif dan kohesif digunakan sebagai bahan pengikat (*bounding material*) yang dapat mengikat butiran-butiran agregat menjadi bentuk yang kompak. Pada komposit ferrocement, semen berfungsi sebagai material pengikat (*matriks*) atau lebih dikenal sebagai adukan semen, selanjutnya biasa disebut mortar (yang umumnya terdiri dari semen Portland dan pasir silika biasa).

Jenis semen sendiri bermacam-macam dan diklasifikasikan sebagai semen Portland. Definisi semen Portland adalah semen hidrolis yang dihasilkan dengan cara menghaluskan klinker, terutama terdiri dari silikat-silikat kalsium yang bersifat hidrolis dan gips sebagai bahan tambahan. (*Definisi menurut Persyaratan Umum Bahan Bangunan Indonesia 1982*).

Macam-macam semen yang digunakan pada konstruksi ferrocement :

1. Semen Portland Tipe I

Tipe I semen ini lebih sering digunakan untuk konstruksi dan kapal ferroement pada iklim-iklim yang panas dimana panas yang ditimbulkan tidak sebanyak yang ditimbulkan tipe lain. Tipe ini sesuai untuk keadaan yang mengandung kadar Sulfat rendah. Semen portland tipe I ini lebih sesuai untuk penggunaan pada struktur

2. Semen Portland Tipe II

Semen ini memberikan kekuatan awal konstruksi yang rendah dan membentuk struktur gel yang lebih padat. Tipe ini cocok untuk keadaan sekeliling yang tinggi kadar sulfatnya, juga sesuai untuk digunakan pada daerah iklim panas.

3. Semen Portland Tipe III

Semen Portland keras cepat (*Rapid hardening Portland Cement*), memberikan kekuatan awal konstruksi yang tinggi. Kekuatan terbentuk pada umur 3 hari sama dengan kekuatan umur 7 hari pada semen tipe I dengan komposisi sama. Pada temperatur sekeliling rendah, penggunaan semen ini yang menggunakan panas tinggi dapat melindungi konstruksi dari kerusakan akibat temperature tersebut.

4. Semen Portland Tipe IV

Semen tahan sulfat dan penggunaannya dalam konstruksi dan konstruksi maritime yang mendapat gangguan sulfat. Tetapi secara umum semen ini lebih mahal.

2.4.1.2 Pasir

Bahan pasir menempati 70-95 % dari volume mortar, karena itu penggunaan agregat untuk ferroement haruslah dengan mutu yang baik agar didapat mutu mortar yang tinggi. Pasir berfungsi untuk mengurangi dan mengatur susut keringnya (*dry shrinkage*) material yang dapat mencegah keretakan material, selain itu mengurangi pemakaian semen berlebihan. Pasir yang digunakan umumnya adalah pasir alam yang terdiri dari silica, batuan basalt atau koral halus.

Gradasi pasir sangat penting karena akan mempengaruhi kekuatan mortar yang dihasilkan. Gradasi pasir yang baik adalah ukuran bintiknya

tidak seragam dan tersebar di beberapa ukuran serta memenuhi standar material ASTM C33-74a tentang batasan gradasi agregat halus untuk agregat beton seperti terlihat pada tabel 2.1

Tabel 2.1. ASTM C33-74a Spesifikasi gradasi pasir

Ayakan no.	Persentase Lewat
3/8 inchi (9.50 mm)	100
no.4 (4,75mm)	95 s/d 100
no.8 (2,36 mm)	80 s/d 100
no.16 (1,18 mm)	50 s/d 85
no.30 (600 mm)	25 s/d 60
no.50 (300 mm)	10 s/d 30
no.100 (150 mm)	2 s/d 10

2.4.1.3 Air

Air berguna untuk menimbulkan reaksi kimia pada semen, untuk membasahi agregat dan sebagai bahan pelumas adukan. Karakteristik dari pasta/mortar merupakan sepenuhnya hasil reaksi kimia antara air dan semen. Kadar air berlebihan akan menimbulkan gelembung-gelembung udara setelah diproses hidrasi selesai dan kekurangan air mengakibatkan tidak sempurnanya proses kimi pada semen.

Pada umumnya standar air yang digunakan harus memenuhi standart mutu air minum. Air tersebut harus bersih dari garam yang dapat merusak pasta semen / mortar serta tidak mengandung zat yang dapat menyebabkan kerusakan ferrocement bila konstuksi berhubungan dengan air laut.

2.4.1.4 Tulangan Kawat jala dan baja

Komposit ferrocement merupakan paduan antara mortar/pasta semen dengan tulangan besi atau kawat jala. Penggunaan tulangan merupakan sebagai penguat (*reinforced*) pada komposit ferrocement dimana penguatan berupa tulangan ini akan menyatu dengan pasta semen /

mortar semen membentuk komposit yang akan memiliki sifat-sifat fisis dan mekanik yang baik.

Tulangan untuk ferrocement biasanya berupa kawat jala dan besi beton biasa. Tulangan ini memiliki variasi ukuran dan sifatnya, juga ada yang dilapisi galvanisir (diberi lapisan anti karat). Sifat dan kekuatan ferrocement yang terbentuk akan dipengaruhi oleh ukuran tulangan, kekuatan, kekakuan, cara pembuatan dan pengolahannya.

a. Tulangan kawat jala (*Mesh*)

Salah satu bagian terpenting dari ferrocement adalah kawat jala. Kawat jala ini terdiri dari kawat halus dan memiliki garis tengah tidak lebih dari 1/16 in (1,5 mm). Kegunaan tulangan kawat jala ini adalah sebagai pelupuh yang membentuk rangka dan menahan mortar pada saat basah. Pada saat keadaan mengeras berfungsi untuk menerima tegangan tarik dimana mortar sendiri tidak dapat menerimanya. Sifat mekanika ferrocement sangat tergantung pada tipe, jumlah, arah dan kekuatan daripada kawat dan baja tulangan. Beberapa tipe kawat jala yaitu :

- Kawat jala segi enam (kawat ayam)

Terbuat dari kawat halus berbentuk segi enam, diameter antara 1/48-1/24 inchi (0,5-1,5 mm), jarak bukaan antara 0,4 sampai 1 inchi (10-25 mm), umumnya mengalami galvanisir. Kawat yang tidak digalvanisir dapat digunakan tetapi masalah karat yang timbul ketika ditempatkan pada tempat terbuka menyebabkan pengurangan kekuatan.

- Kawat jala las

Kawat bekekuatan lebih rendah dan kaku daripada kawat segienam. Pertemuan antara dua kawat yang bersilangan merupakan bagian yang paling rentan akibat daerah pengelasan.

- Kawat anyam persegi

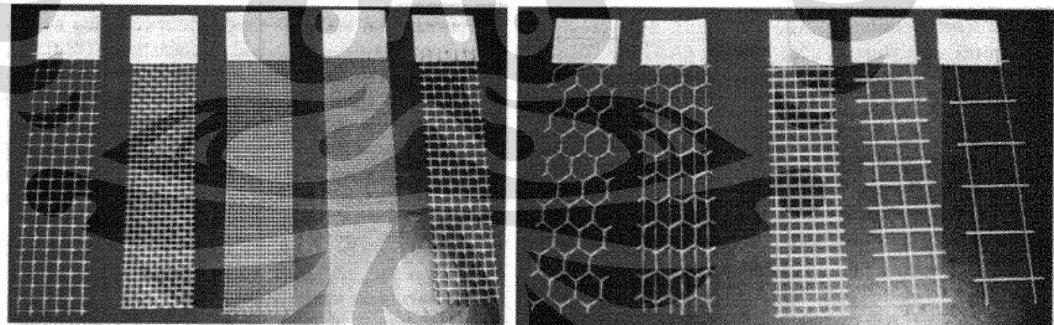
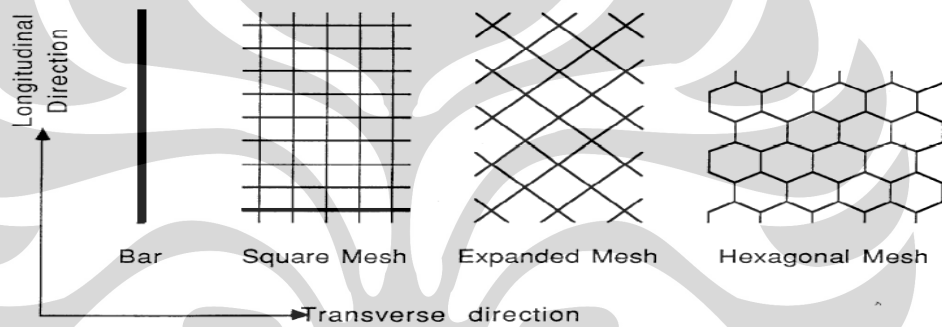
Bentuk bergelombang, tidak menggunakan las pada pertemuan kawat, memiliki kekuatan cukup baik tetapi sukar dalam mengikuti bentuk yang diinginkan

- Kawat bentuk wajik

Tidak sekuat kawat segi enam dan mudah terlepas dari mortar karena “efek gunting” dari bentuk wajik kawat.

b. **Rangka Tulangan Baja (*Reinforcing rod*)**

Rangka tulangan baja selain sebagai penulangan, juga berfungsi sebagai rangka tempat pemasangan kawat jala. Umumnya memiliki diameter rangka antara 4,20-9,66 mm. Jarak penulangan tidak melewati jarak bukaan 30 cm hanya berfungsi sebagai pembentuk konstruksi bukan tulangan struktur sedang lebih kecil dari 10 inchi dianggap tulangan struktur. Untuk stuktur bertegangan tinggi seperti kapal, jarak penulangan rangka hingga 5-7,5 cm

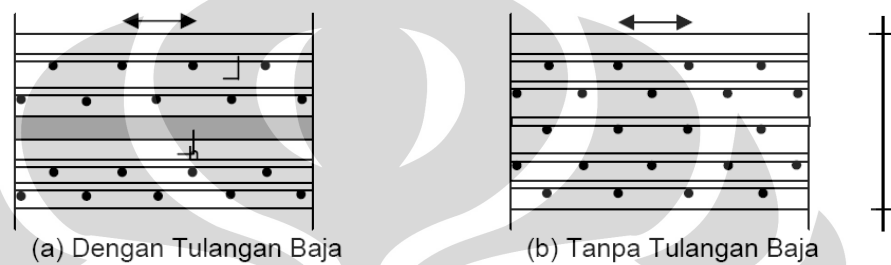


Gambar 2.1 Wire mesh type dan reinforcing rod

2.4.2 Metode Pembuatan

Ferrocement dapat dibentuk sebagai bidang yang tipis (± 1 inchi / 2,57 cm), dengan stuktur yang tipis menjadikan struktur mudah dibentuk dan diproduksi. Tulangan kawat (*mesh*) pada struktur memberikan kuat tarik yang tidak dimiliki komposit beton lainnya. Selain itu, ferrocement kuat dalam

menahan beban impak yang tinggi, awet dan kedap air karena sifat mortarnya. Umumnya, ferrocement terbentuk dari mortar, mesh dan tulangan sebagai rangka pembentuk. Susunan tersebut membentuk komposit seperti gambar berikut ini ^[3].



Gambar 2.2 Penampang Komposit Ferrocement

2.4.2.1 Penulangan

Penulangan umumnya terbagi 2 tahap yaitu perangkaian besi tulangan yang membentuk konstruksi dan pelapisan kerangka konstruksi dengan jala kawat (*mesh*). Setelah terbentuk kerangka konstruksi, kerangka dilapisi kawat jala minimal satu lapis pada bagian luar dan dalam dengan memperhatikan jarak antar jala. Terjadinya rongga akibat tidak baiknya perencanaan jala kawat mempengaruhi kekuatan dari struktur.

2.4.2.2 Adukan Mortar/matriks

Perbandingan adukan adalah perbandingan berat. Perbandingan yang diajukan untuk konstruksi ferrocement semen : pasir 1:1,5-2 dan 0,35 sampai 0,45 untuk air : semen. Proses pengadukan dilakukan minimum 3 menit dengan adukan yang telah merata.

2.4.2.3. Plesteran/pelepaan

Plesteran/pelepaan merupakan bagian terpenting dalam keseluruhan konstruksi ferrocement. Sebelum memulai plesteran matriks,

kondisi penulangan harus bersih dari kotoran karena mempengaruhi daya lekat. Plesteran matriks dapat dilakukan secara manual dengan peralatan sederhana maupun memakai peralatan bantu seperti mesin pengaduk, pemadat matriks dan alat pencetak.

2.4.2.4 Perawatan (curing)

Perawatan dilakukan dengan membasahi ferrocement dengan air atau karung goni basah. Tujuan pembasahan adalah untuk menjaga mortar dalam keadaan jenuh, sehingga proses hidrasi semen mortar memadai. Pembasahan dilakukan 3-4 jam setelah plesteran mengering. Temperatur pembasahan haruslah di atas 10°C. Lama pembasahan tidak boleh kurang dari 14 hari.

Tabel 2.2 Beberapa sifat dan komposisi bahan ferrocement

Penulangan kawat jala	Garis tengah	0.5-1.5 mm
	jarak bukaan kawat jala	6 – 25 mm
	Jumlah Lapis	sampai 5 lapis per cm tebal
	Volume fraksi	s/d 8 % dalam 2 arah penulangan atau 630 kg/m ³
	permukaan spesifik	s/d 4 cm ² /cm ³ dalam 2 arah pembebanan
Penulangan rangka	Macam	Kawat baja, besi beton
	Garis tengah	3 – 10 mm
	Jarak penulangan	5 – 10 mm
	Jarak bukaan	≤ 30 cm*

Komposisi Mortar	Semen Portland Pasir banding semen Air banding semen Pasir	Tergantung tujuan pemakaian 1 d'' s/d d'' 0.6 2.5 dengan berat 0.35 d'' W/C d'' 0.6 dengan berat semua melewati ayakan no.8 dan 5% berat melewati no.10
Sifat bahan Fero semen	Tebal Lapis penutup Kekuatan batas tarik Beban tarik yang diizinkan Modulus runtuh Kekuatan tekan	$6 \leq t \leq 50$ cm $1.5 \leq C \leq 5$ mm s/d 450 kg/ cm ² s/d 105 kg/ cm ² s/d 570 kg/ cm ² 280 s/d 705 kg/ cm ²
Kekuatan izin beban	Kuat tekan mortar Kuat tarik tulangan	$0.45 f_c'$ ($f_c' \leq 280$ kg/ cm ²) $f_s' = 0.60 f_y$ (non kedap air) $f_s = 2000$ kg/ cm ²

2.5 SIFAT-SIFAT MEKANIS FERROCEMENT

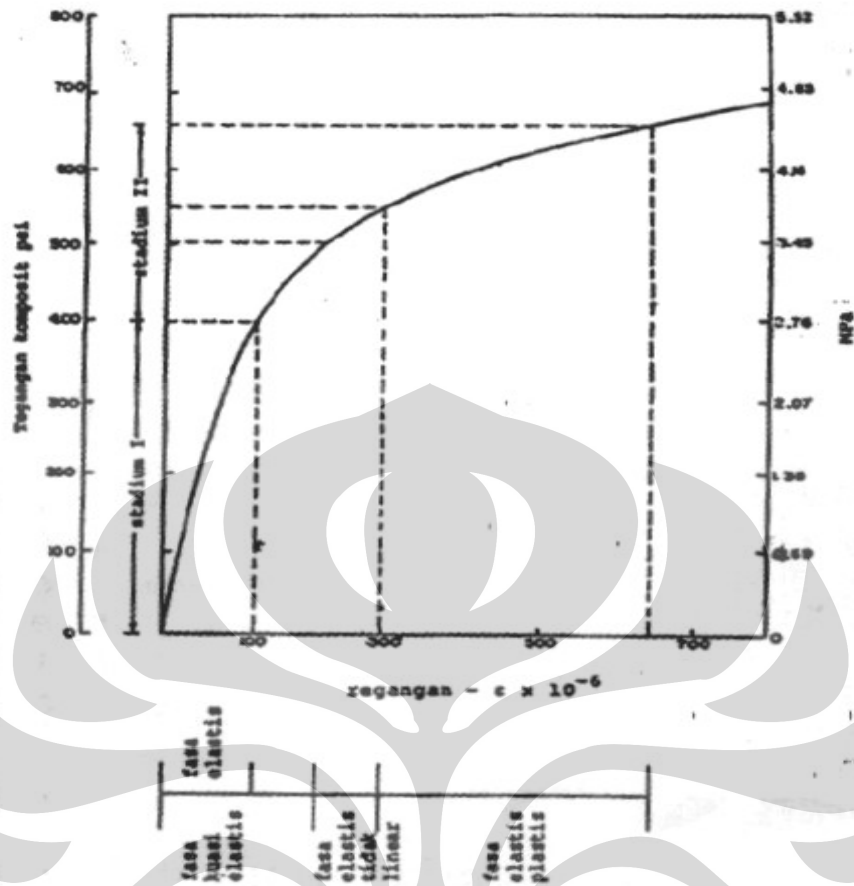
Ferrocement merupakan suatu bahan komposit yang homogen dan memiliki perbandingan luas permukaan kawat jala terhadap volume penampang matriks mortar yang tinggi. Secara ideal, ferrocement bersifat sebagai bahan yang homogen dalam daerah elastisitas. Tegangan yang terjadi pada F_s dapat diperoleh dari hukum campuran (*Law of Mixture*).

Ketika elemen ferrocement menerima penambahan beban tarik, maka akan terjadi sifat mekanika 3 tingkat. Ketiga tingkat ini ditentukan dengan “lebar retak” seperti yang diuraikan dan ditunjukkan tabel 2.3.

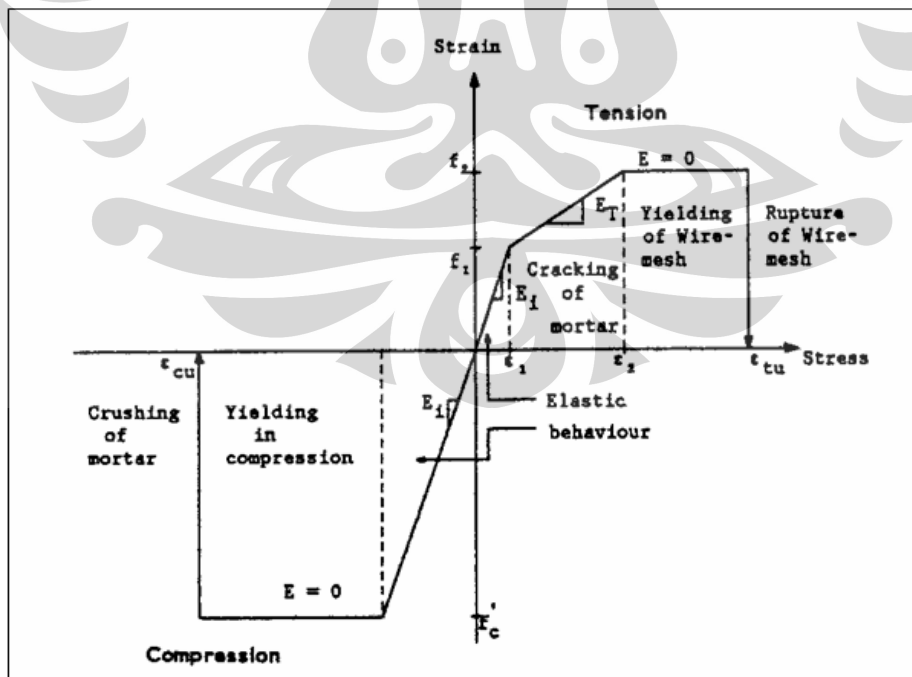
Tabel 2.3 Phase kerja,tegangan dan perpanjangan ferrocement pada benda tarik

Daerah	Daerah bahan	Sifat Bahan	Lebar retak, w micron	Tegangan T ₂₀ ,t ₅₀ ,t ₁₀₀ , psi(kg/cm ²)	Satuan perpanjangan e ₂₀ ,e ₅₀ ,e ₁₀₀ (10 ⁻⁶)
I	Elastis Linear	Kedap air	0-20	-	-
		Kedapair	20-50	470 (33)	
Ia	Quasi Linear	Non Korosif	50-100	514 (36)	-
		I	>100	612 (43)	
Ib	Elastis non linear	Non Korosif	-	-	200
		II	-	-	290
II	Elastis plastis	II	-	-	645
III	Plastis	Korosif	-	-	-

Eksperimen pada sifat ferrocement dalam tarik menunjukkan kurva tegangan-regangan seperti pada gambar 2.2.Kurva ideal ferrocement tarik juga dapat dilihat pada gambar 2.3, ringkasan kurva tegangan-regangan ferrocement pada tingkat berbeda dapat diuraikan sbb :



Gambar 2.3 Kurva percobaan tarik



Gambar 2.4 Kurva ideal pada tarik dan tekan

Daerah elastis

Kurva tegangan-regangan pada dasarnya linear pada tingkat ini. Deformasi elastis terjadi pada tingkat ini baik pada kawat jala maupun pada matriks belum terjadi pada daerah ini.

Daerah retak

Makin tinggi tegangan menyebabkan terjadinya deformasi plastis pada tulangan kawat jala ataupun pada matriks. Pada daerah ini terjadi retak dan juga pelebaran retak sehingga kurva tegangan-regangan tidak lagi linear. Dengan meningkatnya pembebanan, maka jumlah retak bertambah, sedangkan lebar retak tidak bertambah. Retak yang halus ini merupakan fungsi dari permukaan spesifik daripada penulangan.

Daerah leleh

Dengan bertambahnya lagi beban, maka pelebaran retak tampak merata dan jumlah retak telah maksimum. Karena lebar retak bertambah maka regangan mortar bertambah. Saat lebar retak komposit mencapai ± 100 microns maka beban tarik hanya ditahan oleh tulangan.

2.6 MODULUS ELASTISITAS

Modulus elastisitas komposit ditentukan dari kurva tegangan – regangan lenturnya. Secara eksperimen, kelengkungan dari kurva tegangan –regangan sampai titik retak pertama disebut dengan kekakuan komposit.

Jika modulus elastisitas dari matriks dan serat dinyatakan sebagai E_m dan E_f sedangkan fraksi volumenya dinyatakan sebagai V_m dan V_f maka pada kondisi tersebut regangan dari matriks, serat dan komposit adalah sama dengan asumsi tidak terjadi slip antara serat dan matriks.

$$\varepsilon_c = \varepsilon_m = \varepsilon_f \quad (2.1)$$

dan

$$\sigma_c = E_f \varepsilon V_f + E_m \varepsilon V_m \quad (2.2)$$

dimana V_c , V_f , V_m merupakan volume fraksi area dari serat dan matriks.

$$\text{Dan } \sigma_c = E_c / \varepsilon$$

Maka modulus elastisitas komposit dinyatakan sebagai :

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m \quad (2.3)$$

Dimana

$$V_f + V_m = 1$$

Maka modulus elastisitas dinyatakan sebagai :

$$E_c = E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad (2.4)$$

Persamaan ini umumnya berlaku untuk pemakaian serat kontiniu dan teratur (pada arah dan orientasi sudut), sedangkan untuk serat diskrit (pendek) dan terdistribusi secara acak (*discontiniu*), E_f dalam persamaan diatas diganti dengan modulus ekivalen E_f^* , yang memiliki nilai sepertiga dari E_f (4)

$$E_c = 1/3 E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad (2.5)$$

Sehingga, hubungan tegangan-regangan sampai terjadinya keretakan pertama kali dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\sigma_c = E_c \epsilon_c \quad (2.6)$$

Deformasi atau terjadinya fase plastis mengakibatkan keretakan pertama pada komposit. Makin tinggi tegangan menyebabkan matriks tidak mampu menahan tegangan sehingga terjadi keretakan. Pada fase ini terjadi retak dan juga pelebaran retak sehingga kurva tegangan-regangan tidak lagi linear. Jika serat yang ditambahkan pada matriks sedikit maka tidak akan terjadi perkuatan sehingga perlu jumlah minimal serat atau volume kritis (V_{fc}) dari serat agar terjadi penambahan kekuatan pada komposit, yang dirumuskan sebagai :

$$\sigma_{fu} V_{fc} > E_c \epsilon_{mu} \quad (2.7)$$

dimana :

σ_{fu} = tegangan tarik ultimate serat

V_{fc} = Volume kritis serat

E_c = modulus elastisitas serat

ϵ_{mu} = regangan ultimate serat

Ada 2 cara terjadinya deformasi pada komposit yaitu isostress dan isostrain. Dimana dijelaskan sebagai berikut :

1. Isostress

Diasumsikan tegangan (σ) yang bekerja disalurkan melalui lapisan-lapisan serat.

2. Isostrain

Diasumsikan tegangan (σ) yang bekerja dengan arah serat. Jika serat-serat dengan baik maka regangan pada tiap serat (ϵ_f), regangan mortar (ϵ_m) dan regangan komposit (ϵ) adalah sama besarnya dan tegangan elastisitas pada tiap serat bervariasi. Sehingga tegangan totalnya (σ_c) adalah jumlah dari beban yang dipikul setiap tahap.

2.7. PENAMBAHAN SERAT SERABUT KELAPA

Serat alam adalah serat yang terdapat di alam yang dapat digunakan dalam proses produksi sebagai bahan alternatif pengganti serat sintetis. Kelebihan penggunaan serat alam antara lain harganya yang murah karena tersedia di alam, densitasnya rendah dan merupakan sumber daya alam yang dapat diperbaharui. Kekurangannya antara lain kekuatan tarik dan modulus yang masih di bawah serat sintesis (3).

Adapun unsur kimia pembangun yang terdapat pada serat tumbuhan yaitu :

1. **Selulosa** yang merupakan senyawa paling besar kandungannya dalam serat yang berfungsi mengkokohkan struktur serat, semakin besar kandungan selulosa semakin besar kekuatannya
2. **Lignin** bersama dengan selulosa menyebabkan kekakuan dan kokohan serat tetapi berbeda dengan selulosa semakin tinggi kandungan dari lignin akan menyebabkan kekuatan serat berkurang
3. **Hemiselulosa** menyebabkan serat kurang tahan terhadap larutan kimia baik asam maupun basa.
4. **Kutikula** yaitu lapisan terluar serat yang berupa lapisan halus dan tahan air dan berfungsi melindungi bagian dalam serat..
5. **Lilin** berperan sebagai pelindung serat yang menjaga keseimbangan air dalam batang dan daun. Lilin mempermudah proses pementalan tetapi dengan banyaknya lilin akan mengurangi kekuatan serat karena akan mengurangi geseran antara serat .

6. **Lumen** merupakan ruang kosong didalam serat yang berisi sisa-sisa protoplasma yang sudah kering.

Dengan berbagai macam unsur pembentuk ini dapat dipahami bahwa kekuatan dari serat bergantung pada kandungan selulose dan ligninnya bergantung pada kandungan selulosa dan ligninnya yang memiliki pengaruh pada kekuatan saling berlawanan.

Serat serabut kelapa merupakan bagian dari kulit kelapa yang mempunyai sifat mekanis yang cukup baik dengan kekuatan tarik cukup tinggi. Dengan sifat demikian perlu dikembangkan penggunaannya karena potensinya yang menyebar di seluruh Indonesia. Pada saat sekarang ini serat alam banyak digunakan bersama matriks semen. Interaksi antara serat dan matrik merupakan sifat dasar yang mempengaruhi kinerja komposit. Pemahaman dari ini diperlukan untuk memperkirakan sifat-sifat kompositnya.

Jenis serat serabut kelapa memiliki kandungan kimia sebagai berikut :

Tabel 2.4. Kandungan kimia pada serat serabut kelapa

Kandungan	Prosentase
Celulosa	44,2
Ekstrak Larutan	6,4
Lignin	32,8
Abu	2,2
Holo-celulosa	56,3

2.8. TEORI MAKRO DAN MIKROMEKANIKA KOMPOSIT

Sebelum dijelaskan mengenai analisa mikromekanika maka perlu dijelaskan dahulu analisa makromekanika. Analisa ini merupakan analisa dengan memandang komposit secara utuh tanpa melihat adanya hubungan kombinasi antara unsur-unsur pembentuknya. Dengan beranggapan komposit sebagai material yang homogenous, hasil yang didapat dari analisa ini adalah nilai properties mekanik rata-rata dimana nilai tersebut didapat melalui uji mekanis sehingga dapat mengetahui sifat dan karekteristik properties komposit ^[8].

Beberapa nilai dari uji mekanik yang dimaksud seperti *stress*, *strain*, dan *modulus young*. Di mana *stress* didefinisikan sebagai intensitas dari pembebanan per luas daerah. *Stress* dirumuskan :

$$\sigma = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A}$$

(2.8)

Ket : σ = Stress

P = Besar Pembebanan

A = Luas area pembebanan

Strain didefinisikan sebagai deformasi yang timbul akibat gaya dari luar, dirumuskan sbb :

$$\varepsilon = (\varepsilon_1 - \varepsilon_0) / \varepsilon_0 \quad (2.9)$$

Ket : ε = Strain

ε_1 = Regangan akhir material

ε_0 = Regangan mula-mula material

Modulus Young dijabarkan sebagai perbandingan antara stress dan strain, yang dirumuskan sbb :

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.10)$$

Sedangkan penjelasan mengenai analisa mikromekanik adalah analisa untuk memperkirakan properties komposit dari unsur-unsur pembentuknya. Unsur pembentuk yang dimaksud adalah serat (*fiber*) dan matriks pengisi. Serat dan matriks dianggap sebagai unsur terpisah yang saling berintegrasi satu sama lain menjadi sifat komposit tersendiri. Hukum campuran (*Law Of Mixture*) menunjukkan hubungan sederhana unsur.

2.8.1 Fraksi Volume

Fraksi Volume adalah perbandingan volume sebuah unsur pembentuk dengan volume keseluruhan. Dirumuskan :

$$v_i = V_i / V_c \quad (2.11)$$

Ket : v_i = Fraksi volume dari unsur pembentuk

V_i = Volume unsur pembentuk, mm³

V_c = Volume komposit, mm^3

Penjumlahan fraksi dan fiber, matriks dan ruang kosong (*void*) sama dengan satu^x.

Dirumuskan : $V_i + V_m + V_v = 1$ (2.12)

2.8.2 Fraksi Massa

Fraksi Massa unsur pembentuk adalah perbandingan massa sebuah unsur pembentuk dengan massa keseluruhan

Dirumuskan :

$$w_i = W_i/W_c \quad (2.13)$$

Ket : w_i = Fraksi massa dari unsur pembentuk

W_i = Massa unsur pembentuk, gram

W_c = massa komposit, gram

2.8.3 Densitas

Densitas dari komposit dapat ditentukan dari penjumlahan dari perkalian tiap-tiap unsur pembentuk dengan fraksi volumenya.

$$\rho_c = \rho_f \cdot V_f + \rho_m \cdot V_m \quad (2.14)$$

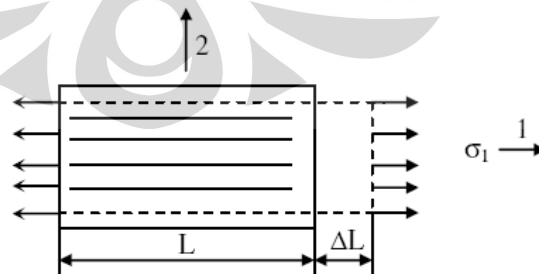
Ket : ρ_c = Densitas komposit, gr/mm^3

ρ_f = Densitas fiber gr/mm^3

ρ_m = Densitas matriks, gr/mm^3

2.8.4 Modulus Young Longitudinal

E_1 merupakan *modulus young longitudinal* yaitu searah dengan arah serat (*fiber*).



Gambar.2.5 Elemen komposit pembebanan dalam arah longitudinal

Dari gambar $\epsilon_1 = \Delta L/L$ dimana ϵ_1 terjadi pada fiber dan matriks sesuai dengan asumsi dasar. Stress pada matriks dan fiber adalah :

$$\varepsilon_1 = E_f \varepsilon_f \quad (2.15)$$

$$\sigma_m = E_m \varepsilon_1 \quad (2.16)$$

Stress rata-rata terjadi pada luas penampang A , σ_f terjadi pada luas penampang A_f dan σ_m terjadi pada luas penampang A_m , sehingga resultan gaya pada elemen komposit adalah :

$$P = \sigma_1 A = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m \quad (2.17)$$

substitusi persamaan di atas dan diketahui bahwa $\sigma_1 = E_1 \varepsilon_1$

$$\sigma_1 A = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m$$

$$E_1 \varepsilon_1 A = E_f \varepsilon_f A_f + E_m \varepsilon_m A_m : A$$

$$E_1 = E_f (A_f/A) + E_m (A_m/A)$$

dimana $(A_f/A) = V_f$ dan $(A_m/A) = V_m$ maka didapat persamaan :

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m \quad (2.18)$$

Kekuatan tarik maksimum longitudinal dari komposit dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$(\sigma_1^T)_{ult} = (\sigma_f)_{ult} v_f + (\varepsilon_f)_{ult} E_{fm}(1-v_f) \quad (2.19)$$

keterangan : $(\sigma_1^T)_{ult}$ = Ultimate Longitudinal Strength

$(\sigma_f)_{ult}$ = Ultimate Tensile Strength of Fiber

$(\varepsilon_f)_{ult}$ = Ultimate Failure Strain of Fiber

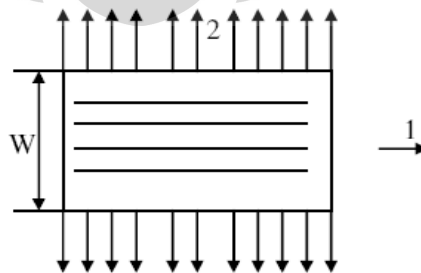
regangan maksimum longitudinal dari komposit dirumuskan sbb :

$$(\varepsilon_1^T)_{ult} = (\sigma_1^T)_{ult} / E_1 \quad (2.20)$$

Keterangan : $(\varepsilon_1^T)_{ult}$ = Ultimate Longitudinal Strain

2.8.5 Modulus Young Tranversal

E_1 merupakan *modulus young* komposit pada arah tegak lurus dengan arah serat fiber.



Gambar 2.6 Elemen komposit pembebanan dalam arah transversal

strain yang terjadi pada matriks dan fiber dituliskan sbb:

$$\varepsilon_f = \frac{\Delta W_f}{W_f} \rightarrow \Delta W_f = \varepsilon_f W_f \quad \text{dan} \quad \varepsilon_m = \frac{\Delta W_m}{W_m} \rightarrow \Delta W_m = \varepsilon_m W_m \quad (2.21)$$

deformasi panjang pada komposit merupakan pertambahan panjang pada elemen-elemen komposit tersebut sehingga dapat dituliskan:

$$\begin{aligned} \Delta W_2 &= \Delta W_f + \Delta W_m \\ \varepsilon_2 W &= \varepsilon_2 V_f W + \varepsilon_m V_m W \\ \varepsilon_2 &= \varepsilon_2 V_f + \varepsilon_m V_m \\ \varepsilon_2 &= \frac{\sigma_2}{E_f} V_f + \frac{\sigma_2}{E_m} V_m \\ \varepsilon_2 &= \left(\frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m} \right) \sigma_2 \end{aligned} \quad (2.22)$$

Stress yang terjadi pada komposit arah transversal adalah :

$$\begin{aligned} \sigma_m &= E_2 \varepsilon_2 \\ \sigma_2 &= E_2 \left(\frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m} \right) \sigma_2 \\ \frac{\sigma_2}{\sigma_2} &= E_2 \left(\frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m} \right) \end{aligned} \quad (2.23)$$

Stress transversal maksimum komposit terdapat (Stress Concentration Factor) dengan persamaan :

$$SCF = \frac{\left\{ \left[1 - \nu_f \left[1 - \left(\frac{E_m}{E_f} \right) \right] \right] \right\}}{\left\{ 1 - \left(\frac{\nu_f}{\pi} \right)^2 \left[\frac{E_m}{E_f} \right] \right\}} \quad (2.24)$$

Sehingga kekuatan tarik transversal maksimum dari lamina dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$(\sigma_2^T)_{ult} = (\sigma_m^T)_{ult} / SCF \quad (2.25)$$

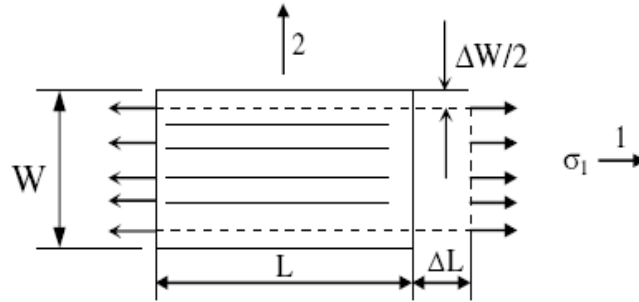
Keterangan : $(\sigma_2^T)_{ult}$ = Ultimate Transversal Strain

Sedangkan nilai dari longitudinal strain dapat kita tentukan sebagai berikut:

$$(\varepsilon_2^T)_{ult} = (\sigma_2^T)_{ult} / E_2 \quad (2.26)$$

Keterangan : $(\varepsilon_2^T)_{ult}$ = Ultimate Longitudinals Strain

2.8.6 Major dan Minor Poisson's Ratio



Gambar 2.7 Element Komposit pembebanan

Poisson's Ratio Mayor didefinisikan sebagai :

$$\nu_{12} = - \varepsilon_2 / \varepsilon_1 \quad (2.31)$$

Poisson's Ratio Minor didefinisikan sebagai :

$$\nu_{12} = - \varepsilon_1 / \varepsilon_2 \quad (2.32)$$

Untuk tegangan $\sigma_1 = \sigma$ dan semua tegangan selain itu sama dengan nol. Deformasi komposit digambarkan pada gambar di atas. Dan deformasi pada arah transversal adalah $\Delta W = - W \varepsilon_2 = W \nu_{12} \varepsilon_1$

Sedangkan $\Delta W = \Delta W_m + \Delta W_f$ dengan $\Delta W_m = W \cdot V_m \nu_m \varepsilon_1$ dan $\Delta W_f = W \cdot V_f \nu_f \varepsilon_1$ dan, substitusi ke persamaan :

$$\Delta W = \Delta W_m + \Delta W_f$$

$$W \nu_{12} \varepsilon_1 = W \cdot V_m \nu_m \varepsilon_1 + W \cdot V_f \nu_f \varepsilon_1$$

Maka, didapat persamaan :

$$\nu_{12} = V_m \nu_m + V_f \nu_f \quad (2.33)$$

2.9. MOMEN DAN TEGANGAN AKIBAT PEMBEBANAN LENTUR

Pada dasarnya, struktur komposit FRC seperti ferrocement tersusun dari material utama berupa mortar yang merupakan material dasar beton. Sehingga dasar perhitungan momen dan analisa tegangan teoritis pada struktur FRC ferrocement mengacu pada perhitungan beton bertulang^[9]. Jika pada struktur ferrocement mendapat perlakuan beban lentur secara kontiniu, maka momen yang terjadi pada struktur mengacu pada pembebanan lentur pada beton bertulang^[10], yaitu sbb:

Momen Maksimum Akibat Pembebanan (M_a):

Besarnya momen maksimum tergantung dari tipe pembebanan yang terjadi pada struktur. Umumnya, struktur mengalami pembebanan pada titik tengah struktur sehingga pembebanan yang terjadi merata pada struktur. Besarnya momen yang terjadi pada tiga titik pembebanan (*third point loading*), adalah sbb :

$$M_a = \frac{FL}{4} \quad (2.33)$$

Dimana F = Beban pada spesimen (N)

L = Panjang Span (mm)

Moment Inersia bruto (I_g)

Momen inersia bruto yang berlaku pada struktur berbentuk beam/ *shell* seperti pada struktur pelat kapal dengan tinggi (h) dan lebar penampang (b) adalah sbb :

$$I_g = \frac{bh^3}{12} \quad (2.34)$$

Dimana b = lebar penampang

h = tebal penampang

Momen Retak (M_{cr})

Momen yang terjadi pada struktur sesaat sebelum terjadinya keretakan pertama kali pada struktur adalah :

$$M_{cr} = \frac{I_g f_r}{y} \quad (2.35)$$

Dimana : I_g = Moment inersia bruto

f_r = modulus rupture mortar (MOR)

y = jarak titik pusat vertikal = h/2

Modulus of Rupture /MOR (f_r)

Keadaan runtuh pada struktur terjadi ketika gaya-gaya yang ada pada struktur tidak mampu mengimbangi gaya-gaya luar yang bekerja pada struktur. Sehingga struktur berada pada "keadaan batas runtuh". Modulus runtuh merupakan suatu ambang batas dari keruntuhan struktur yang dipengaruhi oleh besarnya gaya luar yang terjadi. Untuk pembebanan terbagi rata sepanjang struktur, di mana pusat pembebanan terletak di tengah struktur, maka berlaku pembebanan tiga titik (*third point loading*)^[5], yaitu

$$f_r = \frac{PL}{bh^2} \quad (2.35)$$

Dimana : P = Beban sebelum mengalami Keruntuhan (N)

b = Lebar Penampang (mm)

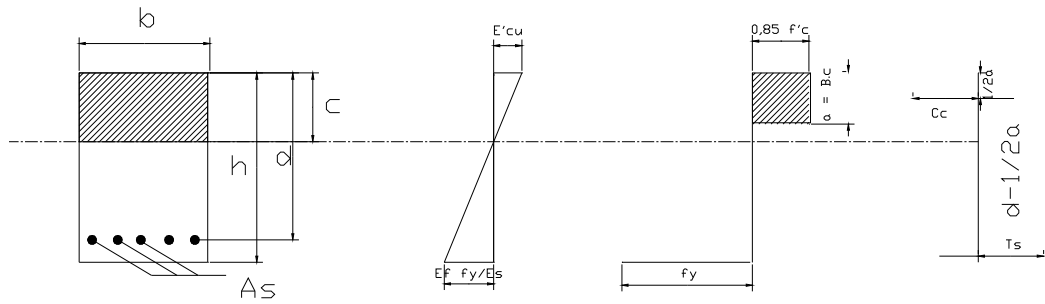
h = Tinggi Penampang (mm)

Moment Nominal (M_n):

$$M_n = A_s \cdot f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (2.36)$$

Dimana : f_y = Kekuatan luluh (*Yield Strength*) mesh (Mpa)

d = Jarak titik tekan terhadap mesh (mm)



Gambar 2.8 penampang, diagram tegangan-regangan dalam keadaan seimbang

dari gambar, didapat persamaan –persamaan sbb :

$$C_c = 0,85 f'_c \cdot a \cdot b \dots \dots \dots (1)$$

$$T_s = A_s \cdot f_y \dots \dots \dots (2)$$

dimana

A_s = luas penampang mesh total pada struktur terhadap arah aksial

= $\rho \cdot b \cdot d$ dengan ρ sebagai *rasio tulangan*

a = $\beta_1 \cdot c$ dengan nilai β_1 0,85 (pada gambar)

Dari syarat keseimbangan $\sum H = 0$ didapat persamaan (1) dan (2)

$$C_c = T_s$$

sehingga $0,85 f'_c \cdot a \cdot b = A_s \cdot f_y$, maka didapatkan

$$a = \frac{\rho \cdot d \cdot f_y}{0,85 \cdot f'_c} \dots \dots \dots (2.37)$$

Dimana f'_c = kekuatan tekan maksimum mortar

Melalui persamaan *modulus runtuh (fr)* dapat diperoleh nilai dari

kekuatan tekan maksimum mortar ,yaitu :

$$f_r = 0,7 \sqrt{f'_c} \quad (2.38)$$

Sehingga, nilai kekuatan tekan maksimum mortar adalah

$$f'_c = 0,49 f_r \quad (2.39)$$

Jarak sumbu netral dari sisi tekan (c)

Jarak sumbu netral dari sisi tekan (c) terlihat pada gambar dapat dicari melalui persamaan :

$$\frac{b.c^2}{2} + n.A_s.c - n.A_s.d = 0 \quad (2.40)$$

dimana $n = E_s / E_c =$ **rasio modulus**

Modulus Elastisitas (E_c)

Besarnya *Modulus elastisitas* (E_c) yang terjadi pada pembebanan tiga titik (*third point loading*) adalah :

$$E_c = \frac{P'L^3}{4 \Delta bh^3} \quad (2.41)$$

Dimana :

P' = Beban pada kondisi Zona Elastis (N)

Δ = Defleksi di zona Elastis (mm)

Tegangan tarik-lentur maksimum

Tegangan tarik-lentur maksimum (f_s) yang bekerja pada daerah dimana

kawat mesh berada adalah :

$$f_s = \frac{M_{cr}(d - c).n}{I_{cr}} \quad (2.42)$$

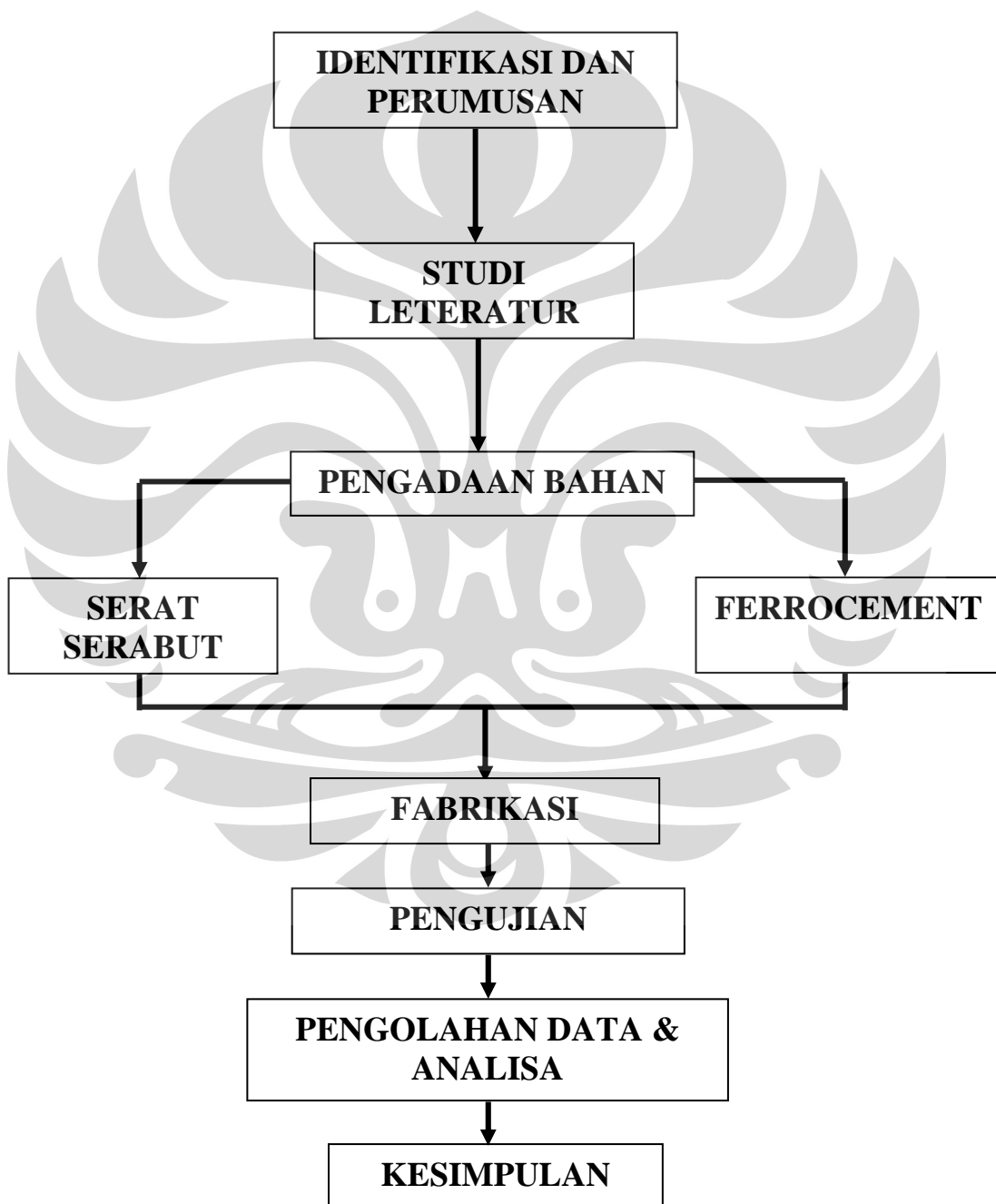
Di mana Moment Inersia Retak (I_{cr}) dapat dicari melalui persamaan :

$$I_{cr} = \frac{b.c^3}{2} + n.A_s.(d - c)^3 \quad (2.43)$$

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 SISTEMATIKA PENELITIAN



Gambar 3.1 Diagram Alir (*flow chart*) penelitian :

Penelitian dilakukan berdasarkan hasil uji coba laboratorium. Metode pengujian ini berdasarkan standart-standar yang berlaku seperti ASTM,SNI,dll dimana bertujuan prosedur pengujian yang dilakukan telah sesuai dengan ketentuan yang ada. Pembuatan diagram alir (*flowchart*) dijadikan acuan urutan kerja penelien yaitu sebagai berikut

3.2 MATERIAL PENYUSUN BENDA UJI

3.2.1 Semen

Penelitian menggunakan *Portland Cement* (PC) Tipe I dari Semen Tiga Roda yang merupakan produksi dari PT. Indocement Tunggal Prkarsa, Tbk. Diasumsikan bahwa semen yang dipakai saat ini memiliki mutu yang sesuai dengan SNI 15-20-2049-1994 untuk semen PC Jenis I. Kegunaan utama dari Semen Portland jenis I (PC) ini adalah konstruksi umum seperti perumahan, gedung bertingkat, dermaga dan industri bahan bangunan seperti genteng, paving block, beton roster,dll.

3.2.2 Pasir

Pasir yang digunakan adalah pasir yang telah bersih dan kering. Pasir harus bebas dari kristal garam dan sesuai dengan contoh akurasi dari air semen rasio.Kemudian, pasir tersebut disaring dengan ayakan no. 8 (2,36 mm) sesuai dengan gradasi pasir yang memenuhi standar material ASTM C33 -74a (lihat tabel 2.1). Bentuk partikel pasir harus bulat atau tidak beraturan dan memiliki permukaan yang licin. Pasir yang berukuran besar terlihat dan terasa bahwa pasirmya berbutir kasar dan tidak layak untuk digunakan dalam penelitian ini.

3.2.3 Air

Air yang digunakan sebagai air sebagai pelumas adukan merupakan air yang berasal dari sumber air laboratorium keramik, LIPI Fisika Serpong. Air ini memenuhi syarat Pedoman beton 1988 yang mana airnya bening, bersih, tidak berminyak, tidak terdapat kandungan organik dan dapat diminum.

3.2.4 Tulangan rangka

Tulangan rangka pada ferrocement terdiri dari anyaman kawat (*wire mesh*) dan rangka tulangan baja (*reinforcing rod*). Kawat *mesh* yang digunakan pada penelitian ini telah diberi lapisan galvanisir (anti karat), berdiameter 1mm dan merupakan jenis *square welded mesh*. Jumlah yang digunakan dalam setiap

spesimen adalah 3 buah dengan jarak titik teken ke mesh adala 12,5 mm dan jarak antara mesh adalah 3 mm.

Pada penelitian ini, rangka tulangan baja (*reinforcing rod*) yang umumnya dipakai sebagai penguat mesh disubstitusikan oleh serat kelapa. Penggunaan serat kelapa (*coconut fiber*) ini nantinya akan dilakukan perbandingan mekanis dengan ferrocement.

Tabel 3.1. Karakteristik mekanis Square Weld Mesh

Karakteristik	Nilai
Ultimate Tensile Strength	450 MPa
Modulus of Elasticity	200×10^3 MPa
Elongation at Break	15,5 %
Diameter	1 mm

3.2.5 Serat Sabut Kelapa (*coconut fiber*)

Penggunaan serat kelapa sebagai tulangan rangka akan memberikan penambahan kekuatan tarik pada ferrocement sebagaimana fungsi serat (*fiber*) dalam komposit pada umumnya. Penggunaan serat kelapa terdiri dari 3 variasi yaitu 5 %, 7,5 % dan 10 % dari total volume spesimen uji yang dilakukan. Komposisi ini sesuai dengan ketentuan penggunaan serat pada FRC yang telah dibahas pada sub-bab sebelumnya. Adapun massa dari serat kelapa merupakan massa kering dari serat serabut kelapa.

1. Ferrocement dengan serat serabut kelapa 5 %

$$0,05 \times (370 \times 50 \times 20 \text{ mm}) = 18,5 \text{ cm}^3$$

$$\text{Massa jenis serat kelapa} = 1,12 - 1,16 \text{ (diambil 1,16)}$$

$$\begin{aligned} \text{Massa serat kelapa} &= \rho \times V = 18,5 \times 1,16 \\ &= 21,1 \text{ gram} \end{aligned}$$

2. Ferrocement dengan serat serabut kelapa 7,5 %

$$0,075 \times (370 \times 50 \times 20 \text{ mm}) = 27,75 \text{ cm}^3$$

$$\text{Massa jenis serat kelapa} = 1,12 - 1,16 \text{ (diambil 1,16)}$$

$$\begin{aligned} \text{Massa serat kelapa} &= \rho \times V = 27,75 \times 1,16 \\ &= 30,6 \text{ gram} \end{aligned}$$

3. Ferrocement dengan serat serabut kelapa 10 %

$$0,10 \times (370 \times 50 \times 20 \text{ mm}) = 37 \text{ cm}^3$$

$$\text{Massa jenis serat kelapa} = 1,12 - 1,16 \text{ (diambil 1,16)}$$

$$\begin{aligned} \text{Massa serat kelapa} &= \rho \times V = 37 \times 1,16 \\ &= 42,2 \text{ gram} \end{aligned}$$

Serat yang digunakan dalam penelitian ini berupa serat diskrit (pendek), yang sebelumnya telah dicacah/dipotong sampai mendekati ukuran panjang serat 30-60 mm. Sebelumnya, serat kelapa telah dikeringkan selama 2 bulan, direndam dalam air bercampur boraks (*boric acid*) selama 1 hari. Kemudian diangin-anginkan selama 1 hari sebelum digunakan dalam pabrikan.

Karakteristik serat serabut kelapa yang digunakan dalam penelitian ini memiliki spesifikasi sebagai berikut ^[4] :

Tabel 3.2. Karakteristik mekanis serat serabut kelapa (coconut fiber)

Karakteristik	Nilai
Ultimate Tensile Strength	120-200 MPa
Elongation at Break	10-25 %
Modulus of Elasticity	19-26 Gpa
Relative Density	1120 -1150 kg/m ³
Diameter	50-100 mm
Fibre Length	0,1-0,4 mm

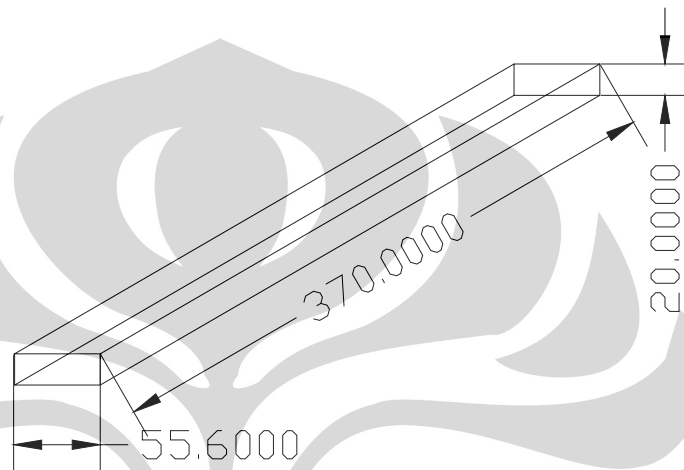
3.3 PABRIKASI KOMPOSIT BENDA UJI

Pada proses pembuatan komposit ferrocement digunakan metode hand lay-up. Metode hand lay-up merupakan metode dimana pembuatan komposit dilakukan dengan cara melaminasi basah dan dilakukan dengan cara manual pada cetakan (*mold*) yang telah dibuat sebelumnya.

Persiapan yang dilakukan dalam pembuatan komposit ferrocement adalah sbb:

- Pembuatan cetakan (*molding*) untuk spesimen uji. Dimana dimensi spesimen ferrocement pada penelitian ini yaitu 370 mm x 55 mm x 20 mm. (*sesuai dengan standart ASTM C 947- 99*). Pembuatan cetakan sebanyak 4 buah untuk setiap variasi spesimen. Terdapat 4 variasi

spesimen yaitu ferrocement (tanpa serat), ferrocemen dengan komposisi serat 5%, 7.5% dan 10%. Cetakan (*mold*) yang digunakan untuk pembuatan spesimen ini berupa multiplek yang disesuaikan besar dimensi dengan penambahan panjang ± 2 mm untuk susut keringnya (*dry shrinkage*) pada saat pembuatan komposit.



Gambar 3.2 Spesimen uji sesuai dengan standart ASTM C 947- 99).

- Setelah cetakan selesai dibuat, persiapan selanjutnya menyiapkan bahan-bahan material yang digunakan dalam pembuatan komposit. Adapun bahan yang digunakan berupa semen, pasir, air dan serat kelapa. Perbandingan antara semen dengan pasir 1 : 2, sedangkan fraksi air semen yaitu 0,35-0,45 dari berat semen. Perbandingan bahan setiap spesimen mengacu pada besar volume spesimen.
- Ketika semua bahan telah dipersiapkan dan siap melakukan pabriaksi, oleskan minyak pelumas / oli untuk memudahkan pelepasan spesimen pada cetakan setelah kering.
- Pabriaksi dilakukan dengan mencampurkan bahan air,semen,pasir hingga membentuk suatu pasta. Kemudian pasta semen pertama dimasukan ke dalam cetakan (plesteran) dengan ketebalan 12,5 mm, dilanjutkan dimasukan *mesh* pertama, lalu dengan jarak antara mesh 3 mm, pasta semen dimasukan sampai dengan cetakan terisi penuh dengan pasta semen/mortar. Untuk ferrocement dengan penambahan serat kelapa, serat

kelapa dicampurkan ke dalam pasta semen sehingga membentuk mortar yang bercampur serat.

- Batas waktu pengeringan untuk komposit ini 4-8 jam sesuai kondisi suhu lingkungan hingga terjadi ikatan antara matriks dengan serat/mesh, kemudian dilakukan proses pelembaban komposit dengan penyiraman air atau dibalut dengan kain basah yang merupakan tahapan perawatan (*curing*).
- Spesimen dapat dilepaskan dari cetakan setelah memasuki hari ke-3 pembuatan dengan proses curing yang tetap berjalan. Setelah pelepasan dari cetakan, proses curing dilakukan dengan direndam pada air sampai 28 hari (kekuatan maksimum pada komposit). Seiring dengan itu dapat dilakukan pengujian pada hari ke-28.



Gambar 3.3 (a) dan (b). Spesimen Uji dengan Variasi serat 5,7.5 dan 10 % serat serabut kelapa

3.4 PENGUJIAN KOMPOSIT BENDA UJI

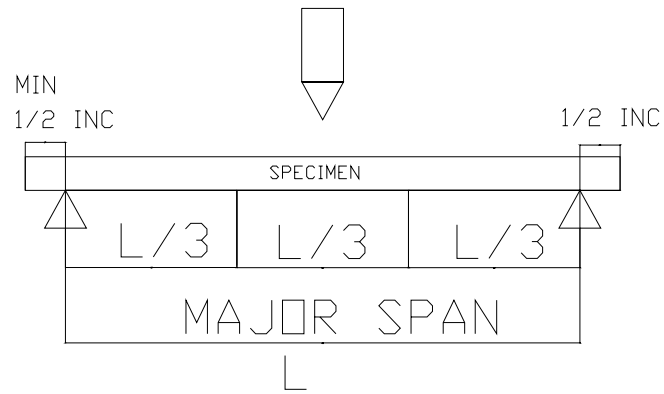
Standart pengujian

ASTM C 947- 99

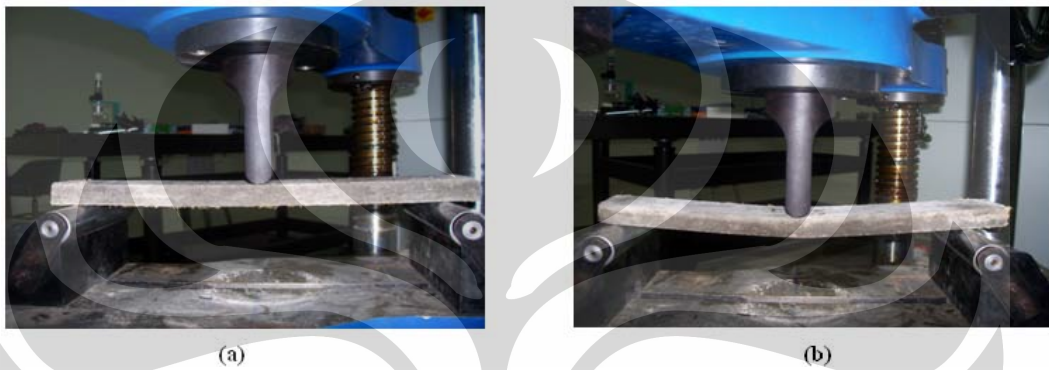
Standart test method for Flexural Properties of Thin-Section Glass-Fiber-Reinforced Concrete.

Peralatan uji

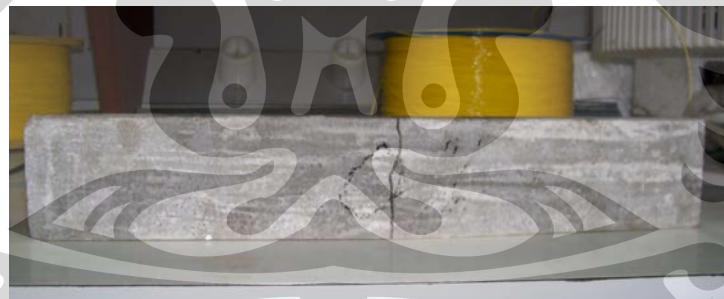
Pengujian dilakukan pada Laboratorium Uji Konstruksi, Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT), Komplek PUSPITEK, Serpong.



Gambar 3.4 Spesimen dengan pengujian lentur tiga titik



Gambar 3.5 (a) dan (b) Spesimen uji ketika menalami pengujian lentur tiga titik



Gambar 3.6 Spesimen uji setelah mengalami keretakan / fatigue

Peralatan yang digunakan dalam pengujian :

- Jangka sorong digital mitutoyo
- Mesin Uji Kristal met dengan kapasitas maksimum 100 kN

Spesimen uji

Spesimen uji 370 mm x 55 mm x 20 mm. Dimana Major Span yang dipakai 320 mm dan jarak minimum pada kedua ujung spesimen 25 mm

Kondisi Pengujian

Pengujian dilakukan pada kondisi standart laboratorium yaitu pada suhu $23 \pm 3^{\circ} \text{C}$ dengan kelembaban relative $50 \pm 10 \%$.

Prosedur Pengujian

1. Pengujian dilakukan dengan melakukan ketebalan rata-rata setiap spesimen yang akan diuji menggunakan jangka sorong di tiga titik yaitu kanan, tengah dan kiri pada bagian gage length.
2. Pengujian dilakukan dengan pembebanan tiga titik (*third point loading*), atur kecepatan *crosshead* sedemikian rupa agar spesimen mengalami *failure / retak*. Pada pengujian kali ini jarak dari titik awal pembebanan ke spesimen uji adalah 22 mm.
3. Mesin Pengujian yang dipakai adalah Kristal met dengan kapasitas maksimum 100 kN dengan jarak tumpuan (*jig*) dari setiap ujung spesimen minimal 1 inch (25 mm). Pasang jig pada mesin uji tekan dan periksa kelurusan sumbunya.
4. Tekan spesimen dengan X-Y recorder yang terus merekam besarnya beban sampai terjadi failure/keretakan
5. Pengujian uji tekan dilakukan pada hari ke-28 dimana kekuatan spesimen telah mencapai kekuatan maksimum pada hari ke-28.



Gambar 3.7 Mesin pengujian lentur Kristal Met 100 kN

TEST SPECIMEN FOR BENDING TEST

1. The test specimens shall have a ratio of the specimen major span length to the specimen depth between 16 to 1 and 30 to 1. The total specimen length shall be a minimum of 1 in. (25 mm) longer than the specimen's major span. Nominal specimen width shall be 2 in. (50 mm)
2. The sample or specimens shall be transported to the testing laboratory package so that no damage will take place.
3. Condition the samples or specimens in water at 73 ± 5 °F (23 ± 3 ° C) for a period of 34 ± 14 h to ensure complete saturation and test immediately upon removal. Remove specimens from water bath individually and test. Do not allow specimen surfaces to dry out either prior to or during the test. Specimens surfaces may be sprayed with water during testing if indications of surface drying are present.
4. Samples or specimens shall be tested in a temperature controlled environment at 73 ± 5 °F (23 ± 3 ° C).
5. Set the major span of the test apparatus to correspond with 6.2
6. Set the crosshead speed of the testing machine at 0.05 to 0.20 in./min (1.27 to 5.1 mm/ min). Set the initial load measuring range such that flexural yield strength (F_y) load occurs at not less than 30% of full scale. Apply force at a constant crosshead speed to specimen speed to specimen failure. Examine the failure location of the specimen. If failure occurs outside the minor span, discard the specimen and specimen test data
7. Determine and record the average of three specimen depth measurements to the nearest 0.005 in. (0.125 mm) at or near the fracture location. Determine the specimen width to the nearest 0.01 in.(0.25 mm) at or near the failure location. Use a measuring device as described in 4.4.
8. Use of testing machines with magnification factors (ratio of chart speed to crosshead speed) of less than 50:1 may lead to systematic errors in identifying the point at which the force-deflection curve deviates from linearity. Such errors may be corrected by the use of a factor determined by comparing results from specimens from a variety of specimens yielding

a range of proportional elastic limit values tested on machines with and without the recommended magnification factors.

3.5 TEORI / STANDAR PEMBANDING HASIL PENGUJIAN

3.5.1 Ferrocement yang diaplikasikan pada lambung kapal.

Apabila membandingkan ferrocement dengan plat baja dalam kedudukannya sebagai material konstruksi kapal, material baja lebih unggul ditinjau dari kekuatan tarik,tekan,elastisitas dan kekuatan impak terhadap penetrasi dari luar. Berikut ini merupakan tabel kedudukan ferrocement bila dibandingkan dengan bahan-bahan lain yang biasa digunakan pada konstruksi kapal. Adapun ferrocement yang digunakan pada tabel ini terdiri dari kawat mesh yang biasa digunakan sebagai kawat ayam yang diperkuat dengan penggunaan besi lunak (*mild steel*) setebal 0,25 in ($\pm 6,35$ mm)^[6]
(1 in = 25,7 mm)

Tabel 3.3 kekuatan tarik rata-rata(psi)

Plat baja	60000
Aluminium	42000
Fiberglass	35000
Douglas Fir	2150
Ferrosement	1600
Philippine Mahogany	1200

Tabel 3.4 Kekuatan tekan rata-rata(psi)

Plat baja	60000
Aluminium	32000
Fiberglass	17000
Ferrosement	10000
Philippine Mahogany	6750
Douglas Fir	2000

Tabel 3.5 Modulus elastisitas (x 10⁶)

Plat baja	28.9
Ferrosement	10
Fiberglass	1.6
Philippine Mahogany	1.5
Douglas Fir	1.45
Aluminium	1.3

Tabel 3.6 berat rata-rata (lbs/ft³)

Plat baja	490
Ferrosement	168
Aluminium	166
Fiberglass	96
Douglas Fir	34
Philippine Mahogany	33

untuk kekuatan tarik ferro di atas adala pada retak pertama

1 psi = 6,895. 10⁻³ MPa

1 lbs = 16,028 kg/m³

Kekuatan ferro dapat ditingkatkan dengan pemakaian besi tulangan yang mempunyai kekuatan tarik yang tinggi, penambahan *square welded mesh* dan penambahan zat adiktif pada mortar

Berat

Hingga sekarang ini, kapal ferrocement masih dianggap kapal yang sangat berat. Berat normal *shell* dengan ketebalan 7/8 inc adalah sekitar 13 lbs/ft² [7]. Bila bobot kapal meningkat, maka berat relatif rata-rata dari kapal akan berkurang. Dengan menganggap suatu hull mempunyai ketebalan sama, sebuah kapal dengan panjang waterline sebesar 38 ft akan mempunyai berat jelajah normal, tetapi jika panjangnya berkurang, berat relatifnya akan meningkat.

Sisi tekan dan sisi tarik.

Shell lambung kapal mempunyai sisi tekan (di bagian dalam) dan sisi tarik (di bagian luar) yang intensitas dan arahnya bervariasi tergantung pada lenturan yang terjadi (*flexure*). Karena kekuatan tekan dari mortar kira-kira sepuluh kali dari kekuatan tariknya, maka alokasi perletakan mesh dan *reinforcing rod* juga harus mempertimbangkan kondisi ini. Lambung kapal yang normal akan cenderung mengalami lenturan pada sumbu vertikal dibanding sumbu horisontal, sehingga alokasi *mesh* dan *reinforcing rod* harus pada sisi bagian luar.

3.5.2. Glassfibre Reinforced Concrete (GRC)

Komposit *Glassfibre Reinforced Concrete* (GRC) merupakan salah satu komposit dengan material penyusun yang juga terdiri dari mortar/campuran pasta semen-pasir yang diperkuat dengan serat kaca (*fibre glass*). Di mana beton dengan penguat *fibre glass* ini memiliki sifat durabilitas yang baik, tahan api/cuaca, korosi dan mudah diperbaiki serta memiliki permukaan beton yang tipis (*shell*) yang serupa dengan komposit ferrocement. Fiber yang digunakan adalah jenis alkali *Resistant Glass Fibre* (tahan pada kondisi alkinitas yang tinggi) dan campuran mortar/beton yang telah diyakini oleh *British Standart Institution*.

Tujuan dengan membandingkan karakteristik mekanis (*mechanical properties*) GRC dengan ferrocement uji adalah untuk mengetahui seberapa besar tingkat kelayakan komposit yang diuji dengan komposit lain / GRC yang juga merupakan tipe dari komposit *Fiber Reinforced Concrete* (FRC). Di mana komposit pembanding merupakan komposit yang telah teruji dan telah dikomersialkan pada lambung kapal sehingga dapat diprediksi kelayakan komposit ferrocement uji.

Adapun komposit GRC pembanding diproduksi oleh PT. KRAZU NUSANTARA yang telah diuji sea trial dan tidak mengalami gangguan apapun, sehingga layak digunakan sebagai komposit alternatif pada lambung kapal. Berikut adalah tabel *mechanical properties* komposit GRC PT. KRAZU NUSANTARA :

Tabel 3.7 Karakteristik Mekanis (*mechanical Properties*) GRC

Property	Unit	Hand Of Machine Spray	Premix
Density	Ton/m ²	1,9-2,1	1.8-2.0
Comperissive strength	N/mm ²	50-80	40-60
Tensile Stength (UTS)	N/mm ²	8-11	4-7
Bending Strength (MOR)	N/mm ²	21-31	10-14
Impact Strength	N/mm ²	10-25	8-14
Bending Elastic Limit (LOP)	N/mm ²	7-11	5-8
Young Modulus	kN/mm ²	10-20	13-18
Poisson's Ratio		0.20-0.25	0.2-0.25
Strain to Failure	%	0.60-1.2	0.1-0.2
Interlaminar shear strength	N/mm ²	3-5	N/A
In plane shear strength	N/mm ²	4-7	4-7

Karena dalam proses pembuatan atau produksi GRC yang digunakan untuk pembuatan kapal adalah GRC yang dibuat dengan menggunakan metode *Hand of Machine Spray*, maka hasil uji komposit yang diteliti hanya dibandingkan dengan GRC yang dibuat *Hand of Machine Spray*. GRC yang dibuat dengan metode *Premix* tidak digunakan sebagai pembanding.

BAB IV

PENGOLAHAN DATA DAN ANALISA HASIL PENGUJIAN

4.1. UMUM

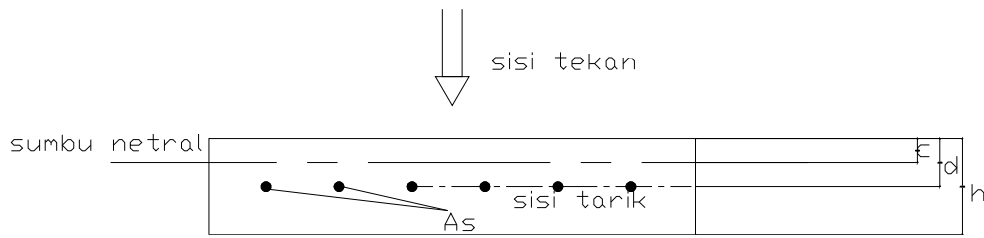
Pada bab ini dipaparkan hasil pengujian yang telah dilakukan dan analisa terhadap data yang telah diperoleh dari pengujian . Hasil pengujian yang disampaikan adalah hasil pengujian properties material, dimana pengujian yang dilakukan adalah pengujian lentur (*flexural test*), Sedangkan analisa data mengacu pada analisa kelelahan struktur terhadap beban lentur pada kekuatan komposit berpenguat beton ^[10]

4.2. ANALISA TEGANGAN DAN MOMEN YANG TERJADI PADA STRUKTUR

Spesimen pada pengujian ini berbentuk *shell*, dimana bentuk *shell* merupakan aplikasi struktur ferrocement pada lambung kapal. Sedangkan komposit ferrocement merupakan struktur yang terbagi 2 bagian ; mortar dan kawat (*mesh*), maka dapat diasumsikan bahwa serat serabut kelapa (*coconut fiber*) yang dicampurkan kedalam mortar sebagai agregat tambahan komposit sebagai agregat.

Struktur pada penampang komposit ferrocement merupakan struktur komposit *sandwich* berdasarkan material-material penyusunnya, sehingga analisa tegangan-regangan tidak linear sebagaimana diperlihatkan pada struktur homogen. Hal ini menyulitkan analisa tegangan, sehingga analisa yang dilakukan terhadap karakteristik struktur diasumsikan dengan tegangan-regangan linear (*Hipotesis Bernoulli*), yaitu penampang struktur sebelum mengalami lentur akan tetap datar dan tegak lurus terhadap sumbu netral setelah mengalami lenturan.

Bentuk penampang dari struktur komposit ferrocement uji adalah sbb :



Gambar 4.1. Penampang struktur ferrocement uji.

Dimana :

c = Jarak sumbu netral dari sisi tekan

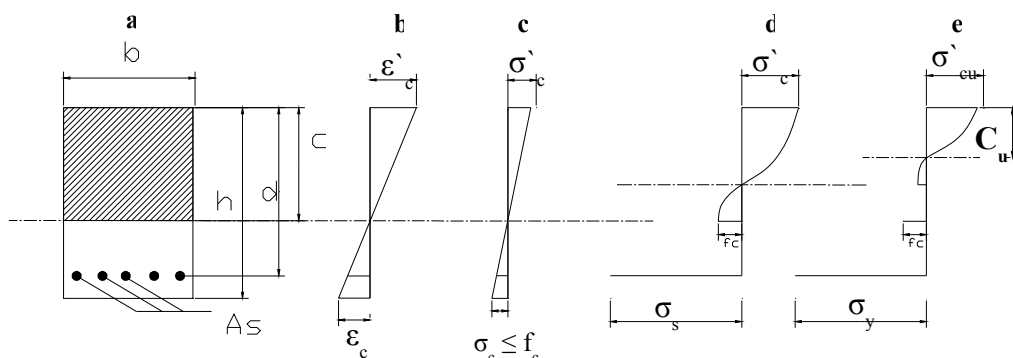
d = Jarak sisi tekan sampai ke mesh

h =Tebal penampang

A_s = luas penampang mesh total pada struktur terhadap arah aksial

Pada saat pembebanan lentur dialami oleh struktur, sisi tekan pada spesimen mendapatkan tegangan dari pembebanan. Secara dinamis tegangan pada mortar (sisi tekan) akan diteruskan kepada mesh (sisi tarik) ketika mortar tidak mampu lagi menerima tegangan, sehingga seakan-akan terjadi transfer tegangan pada struktur. Hal ini berlangsung hingga mesh berada pada ambang batas kekuatan (*ultimate tensile strength*). Kemudian, struktur dianggap telah mengalami keruntuhan ketika tegangan telah melewati batas UTS dari mesh.

Berikut adalah gambar dari distribusi tegangan-regangan pada spesimen uji :



Gambar 4.2. Distribusi Tegangan-regangan pada struktur

Selama tegangan tarik pada penampang tidak melebihi kekuatan tekan beton (f_c), penampang struktur dianggap belum retak (a). Pada kondisi ini, momen lentur yang berlaku pada struktur mampu mengembalikan struktur pada kondisi sebelumnya (zona elastis). Bila beban pada struktur diperbesar sampai tegangan melebihi kuat tekan beton ($\sigma_c \geq f_c$), mengakibatkan beban tarik selanjutnya dilawan tulangan, sehingga diagram distribusi tegangan tidak lagi linear dan mendapatkan bentuk lengkung yang mendekati diagram tegangan-regangan sebenarnya (d). (lihat gambar 2.4). Pada saat struktur mengalami keruntuhan/hancur (e) tegangan pada daerah tekan telah mencapai titik minimum (C_u), dan tegangan pada daerah tarik yang dipikul tulangan dianggap sama dengan tegangan leleh (σ_y). Pada gambar (b dan c), distribusi tegangan-regangan masih linear, dan regangan tekan dan tarik berbanding lurus dengan jarak terhadap *sumbu netral (c)*

4.3. HASIL PENGUJIAN PROPERTIES MATERIAL

UJI TARIK LENTUR (FLEXURAL TEST)

4.3.1 Material dan Bahan Untuk Spesimen

Material yang digunakan pada komposit ferrocement ini berupa beton/mortar dan penambahan serat serabut kelapa (*coconut fiber*) dengan komposisi bahan telah dibahas pada bab sebelumnya, dimana spesimen untuk uji lentur ini memiliki 4 variasi (ferrocement murni, penambahan 5%, 7.5% dan 10% serat serabut kelapa dari fraksi volume spesimen uji).

Bahan tambahan serat kelapa yang merupakan serat alam digunakan sebagai serat (*fiber*) pada komposit ini. Panjang serat yang dikenakan pada spesimen $\pm 30-60$ mm sesuai dengan ketentuan pada tabel FRC.

Pengolahan Serat serabut kelapa dengan cara mengeringkan selama 2 bulan untuk pengurangan kadar air, kemudian pemisahan serat dari kulit/batok kelapa. Sebelum dicampur pada spesimen, serat direndam pada air berlarutan boraks (*boric acid*) selama 1 hari untuk menghilangkan

kadar lemak pada serat. Kemudian dikeringkan sampai layak untuk dicampur pada spesimen.

Parameter yang ingin diraih dari penambahan serat ini, apakah serat alam ini dapat menambah kekuatan bahan terhadap tegangan tarik dan bending pada ferrocement yang biasanya ditanggung oleh mesh dan reinforcing rod berupa serat baja. Analogi yang dipakai yaitu variasi serat mana yang paling mendekati dengan standart karakteristik ferrocement yang telah dipakai pada bidang perkapalan (tabel 3.5-3.7).

Persiapan dan Prosedur pengujian spesimen uji

Spesimen dengan dimensi 370 mm x 55 x 20 mm, dengan Major Span ($L = 320$) terhadap 2 titik tumpu. Sedangkan pengujian dengan tiga titik pembebanan sesuai standart pengujian ASTM.

4.3.2 Perhitungan dan Pengolahan Data

1. Spesimen dengan Ferrocement murni (Spesimen A)

Dari pengujian lentur (*flexural test*), diperoleh beban rata-rata (F) sampai terjadinya keretakan pertama kali dan dinyatakan spesimen telah retak / terdeformasi plastis. Dimana sampel pengujian dilakukan dengan 3 kali pengulangan. Hasil pengujian tersebut didapat nilai beban (F) rata-rata sbb :

Tabel 4.1. Beban Lentur Rata-rata (F) pada Spesimen A

Spesimen	Panjang (L)	Lebar (B)	Tinggi (H)	Beban (F)
1	320	58.65	21.55	985
2	320	56.01	21.78	1010
3	320	59.93	21.85	1105
Rata ² (Δ)	320.00	58.20	21.73	1033.33

- Di mana Beban Rata-rata (F) dikurangi Beban Awal (F_0) sebesar 630 N yang terjadi karena beban kompresi dan vibrasi pada mesin uji, sehingga didapatkan Beban Rata-rata (F) = 403,33 N

Dari data-data di atas, momen, tegangan dan data-data yang diperlukan untuk analisa tegangan pada struktur adalah sbb :

MOR (modulus of rupture)/ Flexural yield strenght (f_r)

$$f_r = \frac{P L}{b h^2}$$

$$\begin{aligned} f_r &= 403.33 \times 320 / 58.20 \times 21,73^2 \\ &= 4,70 \text{ Mpa} \end{aligned}$$

MOE (modulus of elasticity)

Tabel 4.2. Beban Elastis rata-rata (F') pada Spesimen A

Spesimen	Beban Elastis	Defleksi awal(Δ)	Defleksi ahkir (Δ')	$\Delta' - \Delta$
1	820	5.59	5.987	0.397
2	820	5.69	6.347	0.657
3	790	5.19	5.588	0.398
Rata ² (Δ)	810			0.484

Beban awal (F_0) = 630 N

$$E_c = \frac{P L^3}{4 \Delta b h^3}$$

$$\begin{aligned} E_c &= 160 \times 320^3 / 4 \times 0.484 \times 58.20 \times 21.73 \\ &11.44 \text{ Gpa} \end{aligned}$$

Kuat Tekan Silinder (f_c)

$$f_c = 0,49 f_r^2$$

$$\begin{aligned} f_c &= 0,49 \times 4,70^2 \\ &= 45,046 \text{ Mpa} \end{aligned}$$

Square Weld Mesh ($\phi = 1\text{mm}$)

Kekuatan Luluh (yield strength, f_y) : 450 Mpa

Modulus Of Elasticity(MOE) : 200 Gpa

Luas Penampang aksial (A_s) : 9,42 mm²

Dengan data dimensional yang direncanakan pada spesimen adalah :

Jarak titik tekan ke mesh (d) : 12,5 mm

Dengan persamaan (2.40), maka dapat dicari jarak sumbu netral (c) dari sisi pembebanan, yaitu :

Dimana nilai n = rasio modulus elastis antara mesh dengan mortar = 17,486

$$25 c^2 + (17,486 \times 9,42) c + (17,486 \times 9,42 \times 12,5) = 0$$

Maka besarnya sisi tekan (c) = **6.045 cm**

Besarnya momen yang terjadi pada spesimen

- Moment Inersia bruto (I_g) dengan persamaan (2.34)

$$= (58.20 \times 21.73^3) / 12$$

$$= 49738.90 \text{ mm}^4$$

- Moment Inersia Retak (I_{cr}) dengan persamaan (2.43)

$$= 27,5 \times 6.045^3 + (17.648 \times 9,42 \times (12.5 - 6.045)^2)$$

$$= 13291.09 \text{ mm}^4$$

- Momen Maksimum (M_a) dengan *third point loading* dengan persamaan (2.33):

$$= (403.33 \times 320) / 4$$

$$= 32266.67 \text{ N-mm}^4$$

- Momen Retak (M_{cr}) dengan persamaan (2.35)

$$= (49738.90 \times 4,70) / (21.73/2)$$

$$= 21511.11 \text{ N-mm}^4$$

- Moment Nominal (M^n): dengan persamaan (2.33)

$$\text{Dengan nilai } \rho = (9,42) / (58.20 \times 21.73) = 0.012949195$$

$$a = (12,94 \times 10^{-3}) \times 450 \times 12.5 / (0,85 \times 45,046)$$

$$= 1.902317044$$

$$M^n = 9,42 \times 450 \times (10 - (1.902317044/2))$$

$$= 48955.54 \text{ N-mm}$$

Tegangan tarik-lentur maksimum (f_r) dari persamaan (2.42) :

$$= (21511.11 / 13291.09) \times (12.5 - 6.045) \times 17,486$$

$$= 415.76 \text{ Mpa}$$

2. Spesimen dengan penambahan 5% serat (Spesimen B)

Dari pengujian lentur (*flexural test*), diperoleh beban rata-rata (F) sampai terjadinya keretakan pertama kali dan dinyatakan spesimen telah retak / terdeformasi plastis. Dimana sampel pengujian dilakukan dengan 3 kali pengulangan. Hasil pengujian tersebut didapat nilai beban (F) rata-rata sbb :

Tabel 4.3. Beban Lentur Rata-rata (F) pada Spesimen B

Spesimen	Panjang (L)	Lebar (B)	Tinggi (H)	Beban (F)
1	320	58.08	21.25	1070
2	320	60.75	21.5	1100
3	320	56.26	21.28	1140
Rata ² (Δ)	320.00	58.36	21.34	1103.33

- Di mana Beban Awal (F_0) sebesar 630 N yang terjadi karena beban kompresi dan vibrasi pada mesin uji, sehingga didapatkan Beban Rata-rata (F) = 473,33 N

Dengan metode yang sama pada perhitungan ferrocement murni di atas dapat dicari momen, tegangan dan data-data yang diperlukan untuk analisa tegangan pada struktur adalah sbb :

MOR (modulus of rupture)/ Flexural yield strenght (f_r) : 5,70 Mpa

MOE (modulus of elasticity)

Tabel 4.4. Beban Elastis rata-rata (F') pada Spesimen B

Spesimen	Beban Elastis	Defleksi awal (Δ)	Defleksi akhir (Δ')	$\Delta' - \Delta$
1	870	5.99	6.587	0.597
2	870	7.19	7.687	0.497
3	880	6.09	6.587	0.497

Rata ² (Δ)	873.33	0.530
Beban awal (F_0) = 630 N		
E_c		: 12.88 Gpa
Kuat Tekan Silinder (f_c)		: 66.24 Mpa

Square Weld Mesh ($\phi = 1\text{mm}$)

Kekuatan Luluh (yield strength, f_y) : 450 Mpa

Modulus Of Elasticity (MOE) : 200 Gpa

Luas Penampang aksial (A_s) : 9,42 mm²

Dengan data dimensional yang direncanakan pada spesimen adalah :

Jarak titik tekan ke mesh (d) : 12,5 mm

Dengan persamaan (2.40), maka dapat dicari jarak sumbu netral (c) dari sisi pembebanan, yaitu :

Dimana nilai n = rasio modulus elastis antara mesh dengan mortar = 15.52

Maka besarnya sisi tekan (c) = **5.796 mm**

Besarnya momen yang terjadi pada spesimen

- Moment Inersia bruto (I_g) dengan persamaan (2.34)
= 47287.42 mm⁴
- Moment Inersia Retak (I_{cr}) dengan persamaan (2.43)
= 12253.32 mm⁴
- Momen Maksimum (M_a) dengan *third point loading* dengan persamaan (2.33):
= 37866.67N-mm⁴
- Momen Retak (M_{cr}) dengan persamaan (2.35)
= 25244.44N-mm⁴
- Moment Nominal (M^n): dengan persamaan (2.33)

Dengan nilai $\rho = 0.012912217$

$$a = 1.290017231$$

$$M^n = 50253.31 \text{ N-mm}$$

• Tegangan tarik-lentur maksimum (f^r) dari persamaan (2.42) :

$$f^r = 426.78 \text{ Mpa}$$

3. Spesimen dengan penambahan 7,5% serat (Spesimen C)

Dari pengujian lentur (*flexural test*), diperoleh beban rata-rata (F) sampai terjadinya keretakan pertama kali dan dinyatakan spesimen telah retak / terdeformasi plastis. Dimana sampel pengujian dilakukan dengan 3 kali pengulangan. Hasil pengujian tersebut didapat nilai beban (F) rata-rata sbb :

Tabel 4.5. Beban Lentur Rata-rata (F) pada Spesimen C

Spesimen	Panjang (L)	Lebar (B)	Tinggi (H)	Beban (F)
1	320	58.58	21.4	1090
2	320	58.01	21.68	1035
3	320	60.86	21.63	1270
Rata ² (Δ)	320.00	59.15	21.57	1131.67

- Di mana Beban Awal (F_0) sebesar 630 N yang terjadi karena beban kompresi dan vibrasi pada mesin uji, sehingga didapatkan Beban Rata-rata (F) = 501,67 N

Dengan metode yang sama *pada perhitungan ferrocement murni di atas* dapat dicari momen, tegangan dan data-data yang diperlukan untuk analisa tegangan pada struktur adalah sbb :

MOR (modulus of rupture)/ Flexural yield strenght (f_r) : 5.83 Mpa

MOE (modulus of elasticity)

Tabel 4.6. Beban Elastis rata-rata (F') pada Spesimen C

Spesimen	Beban Elastis	Defleksi awal (Δ)	Defleksi akhir (Δ')	$\Delta' - \Delta$
1	870	5.49	5.887	0.397
2	870	4.69	5.287	0.597
3	950	4.09	4.487	0.397
Rata ² (Δ)	896.67			0.464

Beban awal (F_0) = 630 N

E_c : 14.93 Gpa

Kuat Tekan Silinder (f_c) : 69.44Mpa

Square Weld Mesh ($\phi = 1$ mm)

Kekuatan Luluh (yield strength, f_y) : 450 Mpa

Modulus Of Elasticity (MOE) : 200 Gpa

Luas Penampang aksial (A_s) : 9,42 mm²

Dengan data dimensional yang direncanakan pada spesimen adalah :

Jarak titik tekan ke mesh (d) : 12,5 mm

Dengan persamaan (2.40), maka dapat dicari jarak sumbu netral (c) dari sisi pembebanan, yaitu :

Dimana nilai n = rasio modulus elastis antara mesh dengan mortar = 13.39

Maka besarnya sisi tekan (c) = **5.475 mm**

Besarnya momen yang terjadi pada spesimen

- Moment Inersia bruto (I_g) dengan persamaan (2.34)

$$= 49467.95 \text{ mm}^4$$

- Moment Inersia Retak (I_{cr}) dengan persamaan (2.43)

$$= 11080.51 \text{ mm}^4$$

- Momen Maksimum (M_a) dengan *third point loading* dengan persamaan (2.33):

$$= 40133.33 \text{ N-mm}^4$$

- Momen Retak (M_{cr}) dengan persamaan (2.35)

$$= 26755.56\text{N}\cdot\text{mm}^4$$

- Moment Nominal (M^n): dengan persamaan (2.33)

Dengan nilai $\rho = 0.01274049$

$$a = 1.214130735$$

$$M^n = 50414.15\text{N}\cdot\text{mm}$$

- Tegangan tarik-lentur maksimum (f^r) dari persamaan (2.42) :

$$f^r = 428.15 \text{ Mpa}$$

4. Spesimen dengan penambahan 10 % serat (Spesimen D)

Dari pengujian lentur (*flexural test*), diperoleh beban rata-rata (F) sampai terjadinya keretakan pertama kali dan dinyatakan spesimen telah retak / terdeformasi plastis. Dimana sampel pengujian dilakukan dengan 3 kali pengulangan. Hasil pengujian tersebut didapat nilai beban (F) rata-rata sbb :

Tabel 4.7. Beban Lentur Rata-rata (F) pada Spesimen D

Spesimen	Panjang (L)	Lebar (B)	Tinggi (H)	Beban (F)
1	320	59.28	23.41	1060
2	320	56.5	26.85	1170
3	320	55.53	23.1	1040
Rata ² (Δ)	320.00	57.10	24.45	1090.00

- Di mana Beban Awal (F_0) sebesar 630 N yang terjadi karena beban kompresi dan vibrasi pada mesin uji, sehingga didapatkan Beban Rata-rata (F) = 460 N

Dengan metode yang sama *pada perhitungan ferrocement murni di atas* dapat dicari momen, tegangan dan data-data yang diperlukan untuk analisa tegangan pada struktur adalah sbb :

MOR (modulus of rupture)/ Flexural yield strenght (f_r) : 4.31 Mpa

MOE (modulus of elasticity)

Tabel 4.8. Beban Elastis rata-rata (F') pada Spesimen D

Spesimen	Beban Elastis	Defleksi awal (Δ)	Defleksi akhir (Δ')	$\Delta' - \Delta$
1	770	3.69	4.088	0.398
2	790	3.39	3.888	0.498
3	810	0.191	0.588	0.397
Rata ² (Δ)	790			0.431

Beban awal (F_0) = 630 N

E_c : 10.47 Gpa

Kuat Tekan Silinder (f'_c) : 37.93 Mpa

Square Weld Mesh ($\phi = 1$ mm)

Kekuatan Luluh (yield strength, f_y) : 450 Mpa

Modulus Of Elasticity (MOE) : 200 Gpa

Luas Penampang aksial (A_s) : 9,42 mm²

Dengan data dimensional yang direncanakan pada spesimen adalah :

Jarak titik tekan ke mesh (d) : 12,5 mm

Dengan persamaan (2.40), maka dapat dicari jarak sumbu netral (c) dari sisi pembebanan, yaitu :

Dimana nilai n = rasio modulus elastis antara mesh dengan mortar = 19.10

Maka besarnya sisi tekan (c) = **6.267 mm**

Besarnya momen yang terjadi pada spesimen

- Moment Inersia bruto (I_g) dengan persamaan (2.34)
= 69581.60 mm⁴

- Moment Inersia Retak (I_{cr}) dengan persamaan (2.43)

$$= 14017.88 \text{ mm}^4$$

- Momen Maksimum (M_a) dengan *third point loading* dengan persamaan (2.33):

$$= 36800.00 \text{ N-mm}^4$$

- Momen Retak (M_{cr}) dengan persamaan (2.35)

$$= 24533.33 \text{ N-mm}^4$$

- Moment Nominal (M^n): dengan persamaan (2.33)

Dengan nilai $\rho = 0.01274049$

$$a = 1.214130735$$

$$M^n = 48106.91 \text{ N-mm}$$

- Tegangan tarik-lentur maksimum (f^r) dari persamaan (2.42) :

$$f^r = 408.55 \text{ Mpa}$$

Tabel 4.9. Analisa Tegangan dan Momen Pada Spesimen Uji

	SPESIMEN A	SPESIMEN B	SPESIMEN C	SPESIMEN D	SATUAN
BEBAN LENTUR (F)	403.33	473.33	501.67	460.00	N
Panjang Span (L)	320	320	320	320	mm
Lebar (b)	58.20	58.36	59.15	57.10	mm
Tinggi (h)	21.73	21.34	21.57	24.45	mm
Jarak tekan ke mesh (d)	12.5	12.5	12.5	12.5	mm
Modulus rupture (f_r)	4.70	5.70	5.83	4.31	MPa
Kuat tekan silinder (f'_c)	45.05	66.24	69.44	37.93	MPa
Modulus elastisitas (E_c)	11.44	12.88	14.93	10.47	Gpa
Rasio Modulus (n)	17.49	15.52	13.39	19.10	
Sumbu netral (c)	6.045	5.796	5.475	6.267	mm
Momen Inersia Bruto (I_g)	49738.90	47287.42	49467.95	69581.60	mm ⁴
Momen Inersia Retak (I_{cr})	13291.09	12253.32	11080.51	14017.88	mm ⁴
Momen Maksimum (M_a)	32266.67	37866.67	40133.33	36800.00	N-mm
Momen Retak (M_{cr})	21511.11	25244.44	26755.56	24533.33	N-mm
Momen Nominal (M_n)	48955.54	50253.31	50414.15	48106.91	N-mm
Teg. tarik Maksimum (f_s)	415.76	426.78	428.15	408.55	MPa

4.4. PERILAKU STRUKTUR AKIBAT BEBAN LENTUR

4.4.1 Tegangan Tarik

Pembebanan yang terjadi mengakibatkan komposit mengalami tegangan tarik, di mana tegangan tarik sesungguhnya ditransfer kepada mesh sebagai serat penguat. Besarnya beban dan tegangan tarik yang menyebabkan komposit mengalami keretakan pertama kali dapat diperoleh melalui :

$$F_{cr} = \frac{4M_{cr}}{L} \quad (4.8)$$

Dimana L adalah major span pada spesimen uji = 320 mm, dan harga M_{cr} telah diperoleh pada masing-masing spesimen yaitu, sehingga diketahui besarnya F_{cr} adalah :

Tabel 4.10. Beban Tarik (F_{cr}) pada Spesimen A

SPESIMEN	BEBAN (F_{cr})	SATUAN
Spesimen A (Ferro)	268.89	N
Spesimen B (Ferro 5%)	315.56	N
Spesimen C (Ferro 7,5 %)	334.44	N
Spesimen D (Ferro 10 %)	306.67	N

Sehingga Tegangan tarik pada taraf pembebanan hingga mengalami keretakan yaitu :

$$\sigma_{cr} = \frac{1,5 F_{cr}}{bh^2} \quad (4.9)$$

Spesimen A = 4.698 Mpa

= 681,377 Psi

Spesimen B = 5.833Mpa

= 826,247 Psi

Spesimen C = 5.697 Mpa

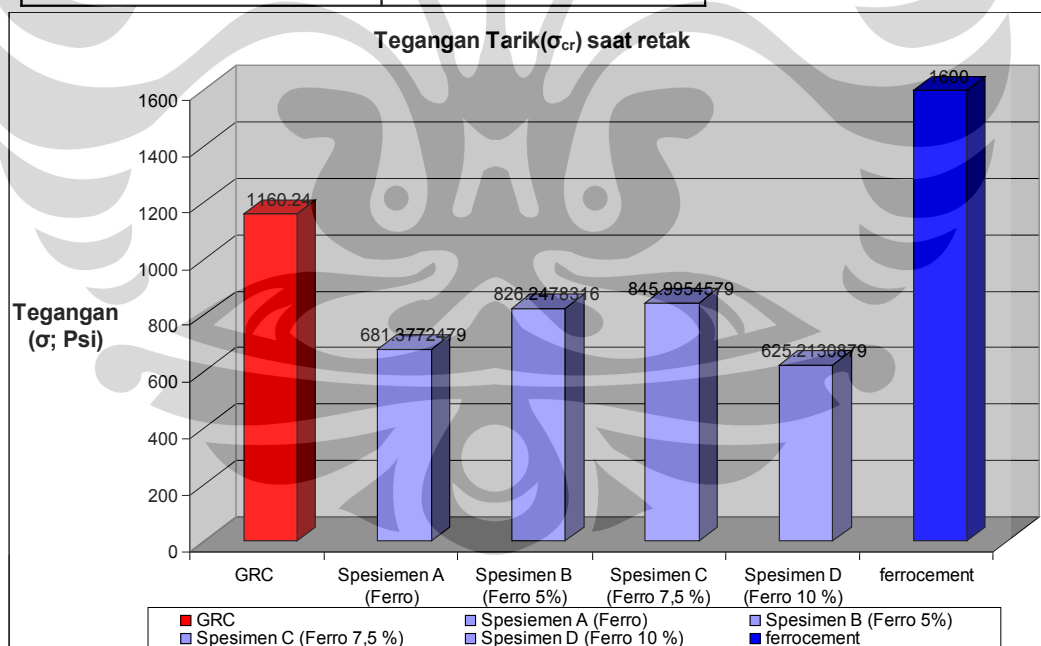
= 845,995 Psi

Spesimen D = 4,310 Mpa

= 625,213 Psi

Tabel 4.11 Nilai Tegangan tarik ferrocement pada tiap spesimen

SPESIMEN	Nilai Kuat tarik (Psi)	%	%
GRC	1160.24		
Spesimen A (Ferro)	681.3772479	58.727267	42.586078
Spesimen B (Ferro 5%)	826.2478316	71.213528	51.640489
Spesimen C (Ferro 7,5 %)	845.9954579	72.915557	52.874716
Spesimen D (Ferro 10 %)	625.2130879	53.886531	39.075818
Ferrocement	1600		



Gambar 4.3 Grafik perbandingan tegangan tarik spesimen terhadap

ferrocement pembanding dan GRC

Pada struktur ferrocement sendiri, tegangan yang timbul akibat beban lentur ditanggung oleh mortar diteruskan ke mesh ketika terjadi transfer tegangan. Transfer tegangan ini berlaku juga pada penambahan serat pada struktur ferrocement. Dimana seakan-akan terjadinya “pelimpahan tegangan” pada saat terjadinya transfer tegangan akibat perlakuan beban dari mortar terhadap serat serabut kelapa dan dilanjutkan kepada mesh. Pelimpahan tegangan ini berlaku sampai serat tersebut mencapai batas maksimum dalam membawa beban yang kemudian dilakukan transfer beban kepada mesh. Hal ini dapat terlihat dari peningkatan tegangan tarik saat retak pertama kali (σ^{cr}) yang terjadi pada ferrocement berpenguat serat (lih.tabel.4.11).

Analisa tegangan tarik (σ^{cr}) hanya dilakukan pada ferrocement uji berpenguat serat dengan pembanding ferrocement dan GRC (*Glass fibre Reinforced Concrete*) yang telah diaplikasikan pada lambung kapal. Dimana tujuan penggunaan serat ini diharapkan dapat menggantikan/alternatif pada

serat kaca (*fiberglass*) dan reinforcing rod pada komposit pembeding tersebut.

Data dan grafik hasil pengujian menunjukkan peningkatan tegangan terjadi pada penambahan serat 5% & 7,5% dan cenderung mengalami penurunan tegangan yang signifikan pada penambahan serat 10%. Hal ini disebabkan karena fraksi volume serat maksimum yang dipersyaratkan untuk komposit ferrocement sebenarnya tidak melebihi 8% dari volume komposit (lih. tabel 2.2), sehingga struktur yang melebihi fraksi maksimum tidak menambah kekuatan tarik pada struktur melainkan memperlemah keberadaan struktur. Sedangkan kenaikan tegangan tarik antara spesimen dengan penambahan serat 5 & 7,5% tidaklah terlalu besar (lih. tabel.4.11). Hal ini menunjukkan komposisi penambahan serat 5-7,5% telah mendekati range ideal penggunaan serat serabut kelapa (*coconut fiber*) pada komposit ferrocement.

Akan tetapi nilai kuat tarik ferrocement pada hasil pengujian masih terlihat dibawah ambang batas struktur ferrocement yang dipakai pada

aplikasi lambung kapal (1600 psi ; lih tabel 3.3), bahkan masih dibawah material komposit Mahogany (1200). Kekuatan tarik yang paling mendekati dari ambang batas ferrocement pada kapal terjadi pada ferrocement 7,5 dan 5% serat (sekitar 51,64% dan 52,87 %).

Sedangkan pada perbandingan dengan komposit GRC, digunakan range terkecil pada nilai *tensile strength* yaitu 8 Mpa ; 1160,24 psi (lih.tabel 3.7). Dimana terlihat pada tabel dan grafik,bahwa besarnya tegangan pada ferrocement berpenguat serat 5 & 7,5% mendekati 71,21% dan 72,91% dari kekuatan tarik pada komposit GRC. Hal ini menunjukkan, kekuatan tarik ferrocement berpenguat serat serabut kelapa masih di bawah komposit GRC yang telah diaplikasikan pada lambung kapal.

Namun dapat dikatakan bahwa komposit ferrocement dengan berpenguat serat alam, khususnya serat kelapa (*coconut fiber*) memberikan pengaruh kenaikan tegangan seperti komposit dengan penambahan serat sintesis, bahkan mendekati penggunaan pada serat sintesis(sampai 71,21% dan 72,91% terhadap komposit GRC). Akan tetapi, komposit dengan

penambahan serat alam *coconut fiber* masih jauh dari standar kelayakan yang ada (GRC dan ferrocement pembanding) dan masih perlu pengembangan khusus atau penelitian lebih lanjut untuk optimalisasi penggunaan serat ini.

4.4.2 Analisa Defleksi Pada Spesimen

Analisa terjadinya defleksi pada struktur didasarkan pada sifat elastisitas spesimen yaitu sifat struktur yang dapat kembali kepada bentuk semula walaupun telah mendapat perlakuan beban. Dimana dipengaruhi oleh besarnya nilai momen inersia elastis (I^e) (pada kondisi sebelum retak) dan I^{cr} pada kondisi telah retak. Dengan persamaan-persamaan di bawah, dapat ditentukan besarnya defleksi yang terjadi :

- Moment inersia elastis (I^e)

$$I_e = I_{cr} + \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 (I_g - I_{cr}) \quad (4.1)$$

- Defleksi (pada kondisi elastis)

$$\Delta = \frac{F_{cr} \left(\frac{L}{2} \right) (L^2)}{12 E_c I_e} \quad (4.2)$$

- Defleksi (pasca retak)

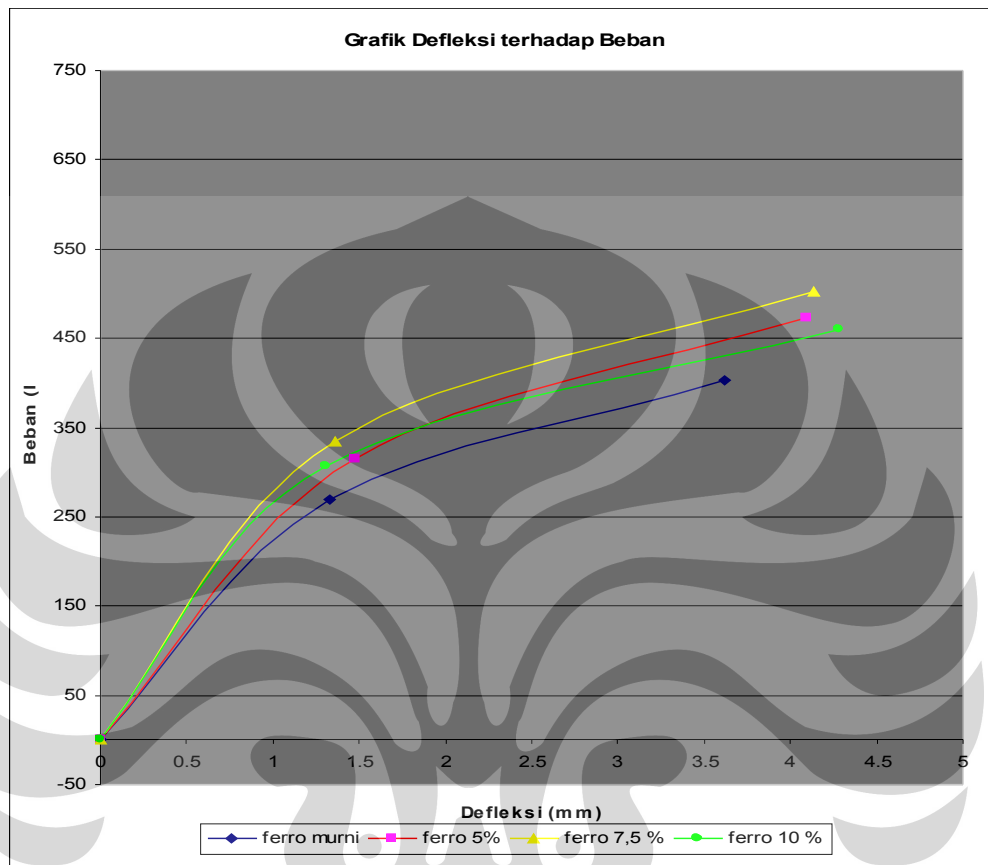
$$\Delta = \frac{F \left(\frac{L}{2} \right) (L^2)}{12 E_c I_{cr}} \quad (4.3)$$

Sehingga Besarnya defleksi pada masing-masing spesimen :

Tabel 4.12 Nilai defleksi pada tiap spesimen

SPESIMEN	Kondisi elastis (Δ)	Kondisi Plastis (Δ')
Spesiemen A (Ferro)	1.33240273	3.62252099
Spesimen B (Ferro 5%)	1.47732467	4.09327421
Spesimen C (Ferro 7,5 %)	1.36195829	4.13999581
Spesimen D (Ferro 10 %)	1.31183219	4.27877355

Besarnya defleksi mulai dari kondisi pra-retak (elastis) sampai terjadinya luluh pada kawat mesh sebagai kondisi pasca retak (plastis) akibat



pembebanan lentur dapat dilihat dari grafik sbb:

Gambar 4.4 Grafik defleksi pada tiap spesimen uji

Pada analisa defleksi, dibandingkan besarnya defleksi yang terjadi pada ferrocement berpenguat serat dengan ferrocement control /tanpa serat. Hal ini dilakukan untuk melihat pengaruh serat terhadap sifat mekanis struktur,

yaitu kecendrungan struktur mengalami penambahan kekuatan (keuletan) terhadap penambahan serat.

Dari grafik defleksi ,terlihat bahwa tambahan serat serabut kelapa pada struktur ferrocement menambah kekuatan lentur pada struktur. Hal ini beban yang mampu dipikul sampai terjadinya kelelahan pada mesh oleh ferrocement dengan penambahan serat masih lebih besar daripada ferrocement tanpa tambahan serat. Pada saat ferrocement murni telah mengalami batas lelah pada mesh,ferrocement serat 5,7.5 dan 10 % masih terus mengalami defleksi di zona plastis seperti terlihat pada grafik. Pembebanan maksimum terjadi pada kondisi ferrocement serat 7,5 diikuti 5 % dan mengalami penurunan pada penambahan serat 10%.

Pada grafik juga terlihat kemampuan struktur mengalami defleksi lentur mulai dari defleksi pra-retak (elastis) sampai kepada defleksi plastis ketika mesh sampai batas luluh. Pada periode defleksi elastis,kekakuan lentur struktur($E I$) masih dapat menahan beban yang diterima oleh struktur, sehingga struktur masih dapat kembali ke bentuk semula karena adanya

momen inersia. Pada grafik, zona defleksi elastis terbesar pada ferro serat 5% diikuti 7,5 %,ferro kontrol 0% dan 10 %.

Pada periode setelah defleksi elastis, kekuatan tarik pada mortar dapat dikatakan telah menurun. Hal ini menunjukkan bahwa kekakuan lentur struktur telah berkurang ($E I$), sehingga kurva beban defleksi akan semakin landai bila dibandingkan pada saat periode defleksi elastis.

Semakin besar retaknya semakin berkurangnya kekakuan sampai pada keadaan dapat diabaikan/tidak ada lagi, sehingga beban hanya ditanggung oleh kawat mesh. Struktur pada benda dikatakan fatigue (lelah secara struktural) ketika mesh mengalami keluluhan terhadap beban yang dipikulnya.

Keadaan ini ditunjukkan pada grafik,bahwa spesimen ferro 10 % memiliki keuletan lebih baik diikuti ferro serat 7,5 & dan 5 %. Pada pengujian ini juga menunjukkan bahwa penambahan serat kelapa pada ferrocement mengakibatkan struktur lebih cenderung memiliki sifat lebih ulet (ductile) daripada struktur ferrocemen umumnya.

4.4.3 Lebar Retak

Analisa lebar retak yang terjadi pada spesimen dibatasi pada saat terjadinya retak pertama kali yaitu pada saat memasuki awal zona plastis. Dimana analisa ini merupakan pendekatan matematis untuk menyederhanakan dari lebar retak yang terjadi. Dimana persamaan lebar retak sbb:

$$w = (1,9304 \cdot 10^{-4}) \beta \sigma_{cr} \sqrt{d_c \cdot A} \quad (4.4)$$

Dimana $\beta = (h-c)/(d-c)$

$d_c = h - d$

$A = (2 \cdot b \cdot d_c) / (\text{jumlah kawat yang searah penampang} = 4)$

Dan lebar retak yang diijinkan untuk struktur bangunan dan pondasi (sesuai ACI Commitee) adalah

Tabel 4.13 Nilai Lebar retak yang diizinkan (menurut ACI Commitee)

KONDISI LINGKUNGAN	LEBAR RETAK TOLERANSI (mm)
Udara kering atau membran terlindungi	0,41
Udara lembab, tanah	0,41
Senyawa kimia	0,30
Air laut, basah maupun kering	0,18
Struktur Penahan Air	0,15

Tabel 4.14 Nilai Lebar retak pada tiap spesimen

SPEKIMEN	Lebar Retak (w ; mm)
----------	----------------------

Spesiemen A (Ferro)	0.23
Spesimen B (Ferro 5%)	0.26
Spesimen C (Ferro 7,5 %)	0.27
Spesimen D (Ferro 10 %)	0.27

Lebar retak pada spesimen uji lebih besar daripada lebar retak yang diijinkan oleh ACI Commitee, khususnya untuk struktur yang dipakai pada kondisi lingkungan air laut. Pada kondisi ini, ferrocement uji tidak memenuhi persyaratan untuk struktur yang berada dalam kondisi basah dan kedap air. Akan tetapi Lebar retak (w) yang terjadi dipengaruhi oleh besarnya harga tegangan retak (σ_{cr}), dan jarak titik tekan ke mesh (d).

Jarak mesh (d) sangat mempengaruhi besarnya nilai lebar retak yang ada, karena berbanding terbalik dengan nilai lebar retak, semakin besar jarak titik tekan ke mesh (d), lebar retak yang terjadi semakin kecil. Sehingga pembesaran jarak tekan ke mesh (d) akan mempengaruhi nilai lebar retak (w) yang semakin kecil.

Dari data pengujian juga terlihat bahwa penambahan serat serabut kelapa memperbesar lebar retak yang terjadi pada struktur. Hal ini karena semakin besarnya beban yang mampu dipikul struktur, sehingga ketika mengalami

keretakan (pada kondisi zona plastis) lebar retak yang terjadi juga semakin besar. Hal ini dipengaruhi oleh besarnya tegangan retak (σ^{cr}) yang terjadi.

4.4.4 Berat Spesifik

Penimbangan massa dari spesimen dilakukan sebelum dilakukan pengujian lentur, di mana perhitungan massa ini untuk menentukan massa jenis dari struktur. Di mana massa dari spesimen adalah sbb :

Tabel 4.15 Berat Spesifik (ρ) pada tiap spesimen

SPESIMEN	Massa (gr)	V(mm ³)	$\rho \times 10^{-3}(\text{gr/mm}^3)$	ρ (lbs/ft ³)
ferro murni	933.333	467.835	2.00	124.69
ferro 5%	873.333	460.897	1.89	118.43
ferro 7,5 %	900.00	472.070	1.91	119.16
ferro 10 %	933.33	516.655	1.81	112.91

Perbandingan berat spesifik yang diperoleh pada spesimen uji dengan data material yang digunakan pada kapal (tabel 3.6) menunjukkan bahwa berat spesifik dari spesimen di atas lebih rendah daripada berat spesifik plat baja (490 lbs/ft³) digunakan pada kapal, material ferrocement (168lbs/ft³) serta aluminium (166 lbs/ft³). Sedangkan perbandingan yang dipersyaratkan

(12)

oleh ACI Comitee , untuk jenis beton ringan seperti ferrocement, berat spesifik yang dipersyaratkan dalam range 1,686 -2,20 kg/cm (memenuhi Syarat).

3

4.4.5 Water Absorption (Penyerapan Air) Pada Struktur

Analisa terhadap water absorption dilakukan untuk mengetahui kemampuan spesimen menyerap air sampai kondisi jenuh (batas penyerapan air pada spesimen). Hal ini dilakukan karena spesimen yang diuji merupakan aplikasi dari lambung kapal yang digunakan dalam kondisi basah/air laut.

Penimbangan massa dari spesimen dilakukan dengan mengambil potongan kecil dari massa seluruh sampel. Di mana ratio water absorption dari spesimen adalah sbb :

$$WaterAbsorption = \frac{MassaAhkir(M') - MassaAwal(M_o)}{MassaAwal(M_o)} \times 100\% \quad (4.5)$$

Tabel 4.16 Ratio Water absorption (%) pada tiap spesimen

Spesimen	Massa awal (M)	Massa ahkir (M')	Ratio (%)
A	73.067	73.376	0.4229

B	71.522	71.955	0.6054
C	64.51	65.78	1.9687
D	65.591	67.05	2.2244

Dari data tabel di atas terlihat bahwa terjadi peningkatan water absorption pada struktur ferrocement dengan penambahan serat serabut kelapa. Peningkatan fraksi volume serat turut mempengaruhi besarnya ratio penyerapan air pada struktur. Hal ini terjadi karena sifat fisis yang dimiliki serat serabut kelapa mampu menyerap air pada komponennya. Penyerapan terbesar terjadi pada spesimen C (serat 7,5 %) diikuti spesimen D (serat 10%) sebesar 1,96 % dan 2,22 %. Akan tetapi kecilnya ratio water absorption pada struktur tidak terlalu signifikan terhadap berat keseluruhan sehingga cukup layak bila digunakan pada aplikasi lambung kapal.

4.4.6 Kadar Air Pada Spesimen uji.

Analisa terhadap kadar air spesimen dilakukan untuk mengetahui besarnya kandungan air pada spesimen uji. Sebelumnya, spesimen uji telah mengalami proses curing (perawatan dalam air) selama 28 hari dan dilakukan pengeringan selama 1 hari sebelum dilakukan pengujian.

Pengeringan spesiemen dilakukan pada titik didih air (suhu 100) pada oven sampai keadaan jenuh (kondisi tidak ada kandungan air pada spesiemen)

Penimbangan massa dari spesiemen dilakukan dengan mengambil potongan kecil dari massa seluruh sampel. Di mana besarnya ratio kandungan air dari spesiemen adalah sbb :

$$KadarAir = \frac{MassaAwal(M_o) - MassaAhkir(M')}{MassaAwal(M_o)} \times 100\%$$

(4.6)

Tabel 4.17 Ratio Kandungan air (%) pada tiap spesiemen

Spesiemen	Massa awal (M)	Massa ahkir (M')	Ratio (%)
A	68.49	65.4	4.5116
B	65.493	61.07	6.7534
C	60.026	55.86	6.9403
D	65.677	60.62	7.6998

Dari tabel di atas, kandungan air terbesar dimiliki spesiemen D sebesar 7,69 %. Besarnya kandungan air diperkirakan juga dipengaruhi oleh penambahan fraksi volume pada struktur ferrocement. Selain itu, pengikatan mortar dan fraksi air semen (FAS) pada komponen-komponennya

(semen, pasir dan air) turut mempengaruhi kandungan air pada struktur ferrocement.



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 KESIMPULAN

Kesimpulan yang didapatkan dari hasil pengujian dan analisa terhadap struktur adalah sebagai berikut :

- 1) Penambahan serat serabut kelapa (*coconut fiber*) pada struktur terbukti dapat meningkatkan kekuatan lentur (beban ;F) dan kekuatan tarik rata-rata (tegangan tarik) dari struktur ferrocement..Di mana peningkatan maksimum terjadi pada struktur ferro serat 7,5% diikuti ferro serat 5% (sekitar 826,247 Mpa ; 845,99 Mpa).Kondisi ini menyatakan bahwa fraksi volume serat 5-7,5% mendekati range ideal untuk penambahan serat serabut kelapa pada ferrocement terlihat dari ratio dari kedua spesimen uji tidak terlalu signifikan. Sedangkan pada ferro serat 10%, mengalami penurunan kekuatan lentur dan tarik (tegangan tarik) rata-rata bahkan lebih kecil dari ferrocement pengontrol (tanpa serat). Ini dikarenakan penambahan serat 10% pada spesimen telah melewati syarat batas maksimum ratio serat pada ferrocement yaitu sebesar 8% (lih.tabel 2.2)
- 2) Hasil pengujian lentur dan analisa struktural terhadap data pengujian juga menunjukkan bahwa kekuatan tarik rata-rata (tegangan tarik) yang diperoleh pada komposit dengan penambahan serat serabut kelapa tidak memenuhi standar dengan material ferrocement dan komposit FRC lain (komposit GRC) pembanding yang umumnya dipakai pada lambung kapal. Dimana ferro 5% dan 7,5% hanya mendekati (51,64% dan 52,87 %) dari ferrocement pembanding (1600 psi), bahkan masih lebih kecil dibandingkan dengan material Philippine Mahogany (1200 psi).

Sedangkan pada perbandingan dengan komposit GRC, besarnya tegangan tarik rata-rata pada ferrocement berpenguat serat 5 & 7,5% mendekati 71,21% dan 72,91% dari kekuatan tarik pada komposit GRC (1160.24 psi). Hal ini menunjukkan, kekuatan tarik ferrocement berpenguat serat serabut kelapa masih di bawah komposit GRC yang telah diaplikasikan pada lambung kapal.

Sehingga masih perlu pengembangan dan penelitian lebih lanjut untuk optimalisasi pemakaian serat serabut kelapa pada struktur ferrocement. Sedangkan untuk berat spesifik pada struktur masih berada pada range yang dipersyaratkan ferrocement pembeding (lih.tabel 3.3-3.6).

- 3) Pada analisa defleksi struktur, ditunjukkan pada grafik bahwa spesimen dengan penambahan serat dapat meningkatkan keuletan (ductility) ferrocement. Ketika ferro pengontrol (tanpa serat) telah mengalami keruntuhan struktur, ferrocement berserat masih berada dalam zona plastisnya. Keuletan terbesar berada pada ferro serat 10% diikuti ferro serat 7,5 % dan 5 %.
- 4) Besarnya water absorption (penyerapan air) dan kandungan air pada spesimen uji juga tidak terlalu signifikan sehingga struktur dapat diaplikasikan pada lingkungan basah/laut.

5.2 SARAN

- 1) Penambahan serat serabut kelapa pada komposit ferrocement untuk dijadikan material serat penguat pada konstruksi lambung kapal perlu pengkajian dan penelitian lebih lanjut, karena masih banyak parameter-parameter yang belum diperoleh dari penelitian yang telah dilakukan. Khususnya dalam mendapatkan ukuran ketebalan dan dimensi kapal yang layak digunakan pada komposit ini.
- 2) Penambahan unsur-unsur lain yang dapat menyempurnakan sifat mekanis struktur ferrocement dapat dilakukan dan dijadikan referensi untuk penelitian selanjutnya. Seperti memberi tambahan unsur kimia/flexcon untuk menambah daya lentur komposit

ferrocement. Selain itu metode pembuatan dan orientasi serat (discontinius atau continiues fiber) perlu dikembangkan lebih lanjut untuk mengoptimalkan pemakaian serat serabut kelapa.



DAFTAR REFERENSI

- [1] Bingham, Bruce, *Ferrocement ; design, techniques and application*, (Cambridge ; Cornell Maritime Press. Inc, 1974)
- [2] Moncrieff, R.W, *Man Made Fibers* (London : Butterworth & Co . , 1975)
- [3] Tomar, Anshu. “*Retrofitting of Shear Deficient RC Beams Using Ferrocement Laminates*” (Deemed University : Thesis, Departement Of Civil Engineering, Thapar Institute Of Engineering and Technology, June 2006).
- [4] Cement & Concrete Institute; *Fiber Reinforced Concrete* (Midrand, website <http://www.cnci.org.za>)
- [5] American Society for Testing and Material , *Annual Book of ASTM Standarts Volume 15.03, C 947- 99 Standart test method for Flexural Properties of Thin-Section Glass-Fiber-Reinforced Concrete*(Easton : MD , 2003)
ASTM
- [6] Mawan, Darmawan. “*Analisa Kekuatan Struktur Ferrocement dengan Penambahan Cacahan Bambu Diskrit*” Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 1998.
- [7] Cairncross, C., *Ferrocement Boat Construction*, (International Marine Publishing Company)
- [8] K. Kaw, Autar , *Mechanics of Composite Material* (New York: CRC Press ., 1997)
- [9] Djausal M.T., Anshori, *Pengantar Ferrocement* (Lampung : Cetakan I, 2004)

- [10] Papakonstantinou, Christos G; Balaguru, Perumalsamy N and Petrou, Michael F, *Analysis of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Composites Subjected to Fatigue Loading*, (Singapore ; Mc Graw-Hill Inc.,1992).



DAFTAR PUSTAKA

American Society for Testing and Material , *Annual Book of ASTM Standarts Volume 15.03, C 947- 99 Standart test method for Flexural Properties of Thin-Section Glass-Fiber-Reinforced Concrete (Third Point Loading)* (Easton : MD ,2003)
ASTM

American Society for Testing and Material , *Annual Book of ASTM Standarts Volume 15.03, C 120 - 90 Flexural Testing of Slate (Modulud of Rupture, Modulus of Elasticity)* (Easton : MD ,2003)
ASTM

K. Kaw, Autar , *Mechanics of Composite Material* (New York: CRC Press ., 1997)

Djausal M.T., Anshori, *Pengantar Ferrocement* (Lampung : Cetakan I, 2004)

Djausal M.T., Anshori, *Struktur & Aplikasi Ferrocement* (Lampung : Cetakan I, 2004)

Bingham, Bruce, *Ferrocement ; design, techniques and application*, (Cambridge ; Cornell Maritime Press. Inc, 1974)

Cairncross, C., *Ferrocement Boat Construction*, (International Marine Publishing Company)

Huq, H and Pama, R.p., *Ferrocement in Tension and Flexure, analysis and Design* (Journal of Ferrocement, Vol.8 No.3, July 1978)

Pama, R.p., Raisinghani, M. and Lee, S.L., *Mechanical Properties Of Ferrocement*, (FAO seminar on The Design And constuction Of Ferrocement Vessel, October 1972)

Papakonstantinou, Christos G; Balaguru, Perumalsamy N and Petrou, Michael F, *Analysis of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Composites Subjected to Fatigue Loading*, (Singapore ; Mc Graw-Hill Inc., 1992)

Mwaikambo, L. Y, *Review Of The History, Properties and Application Of Plant Fibres* (Tanzania : Department of Engineering Materials, College of Engineering and Technology, lymwaikambo@udsm.ac.tz)

Tomar, Anshu. " *Retrofitting of Shear Deficient RC Beams Using Ferrocement Laminates* " (Deemed University : Thesis, Departement Of Civil Engineering, Thapar Institute Of Engineering and Technology, June 2006).

Nugroho, Dendi Wahyu. " *Komposit dengan Serat Pisang Sebagai Material Alternatif Dalam Pembangunan Kapal* " , Skripsi, Program Sarjana Fakultas

Teknik UI, Depok, 2000.

Mawan, Darmawan. *“Analisa Kekuatan Struktur Ferrocement dengan Penambahan Cacahan Bambu Diskrit”* Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 1998.

Randi, ” *Komposit beton Berpenguat Serat Pisang Abaca Sebagai Bahan Alternatif Material Pembuat Perahu*” , (Depok : Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 2006).

Prasetyo, Hendra, *“Analisa Kekuatan Komposit GRC (Glassfibre Reinforced Concrete) Dengan Zat Aditif Flexcon Untuk Mendapatkan Dimensi Utama Kapal”* , (Depok : Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 2007).



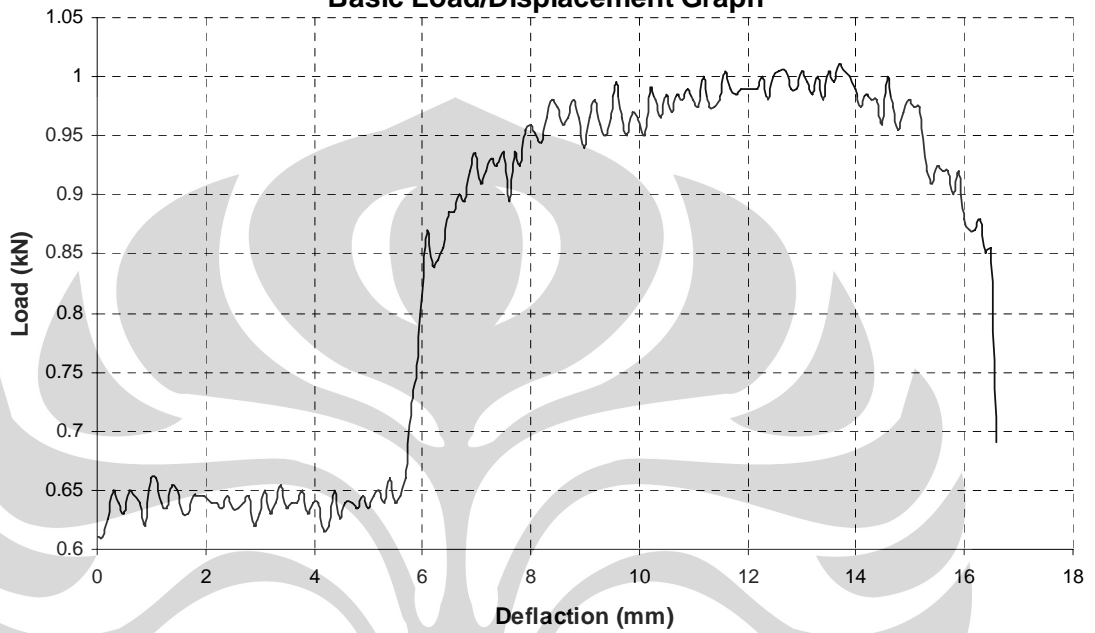
GRAFIK SEBAGAI DATA UJI LENTUR PADA SPESIMEN A

Batch No : fesB1 Sr No : 1 Date : 18/12/2007

Tested for : UIB1

Test Type : Bend/Transverse - Strip

Basic Load/Displacement Graph

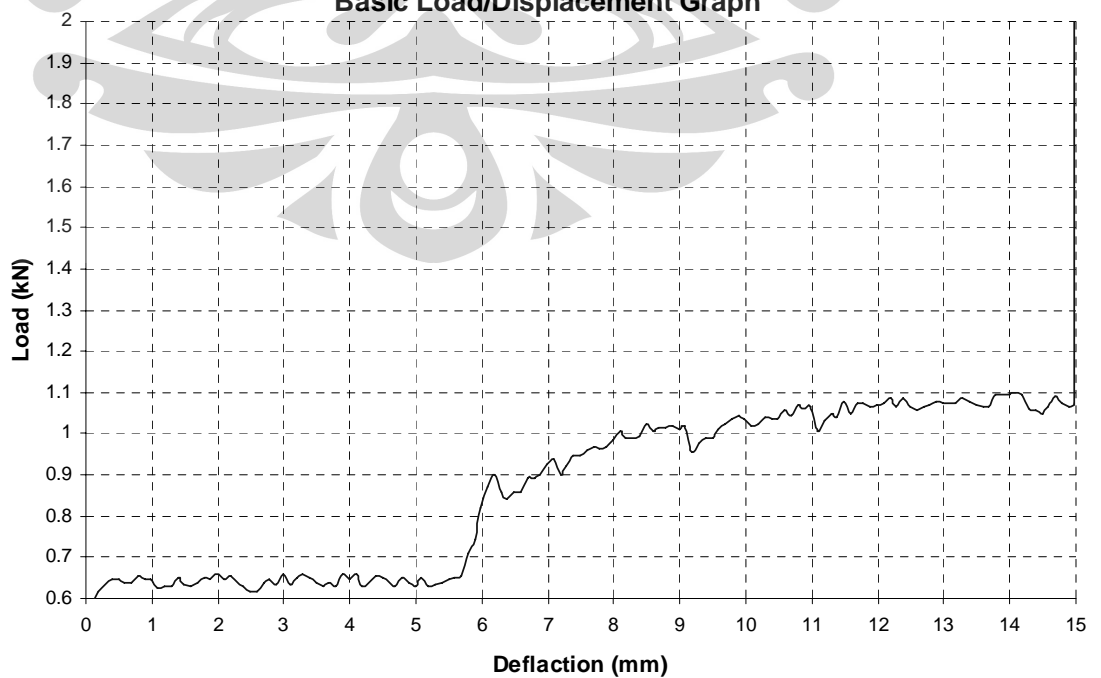


Batch No : fesC1 Sr No : 1 Date : 18/12/2007

Tested for : UIC1

Test Type : Bend/Transverse - Strip

Basic Load/Displacement Graph



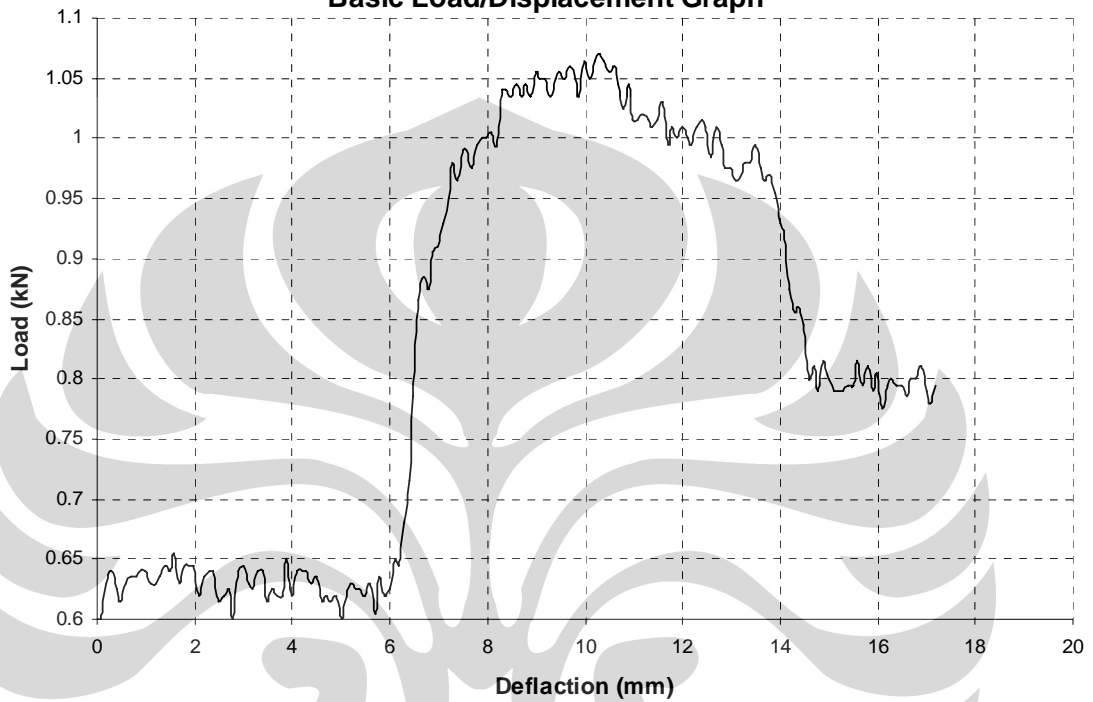
GRAFIK SEBAGAI DATA UJI LENTUR PADA SPESIMEN B

Batch No : fesA2 Sr No : 1 Date : 18/12/2007

Tested for : UI2

Test Type : Bend/Transverse - Strip

Basic Load/Displacement Graph

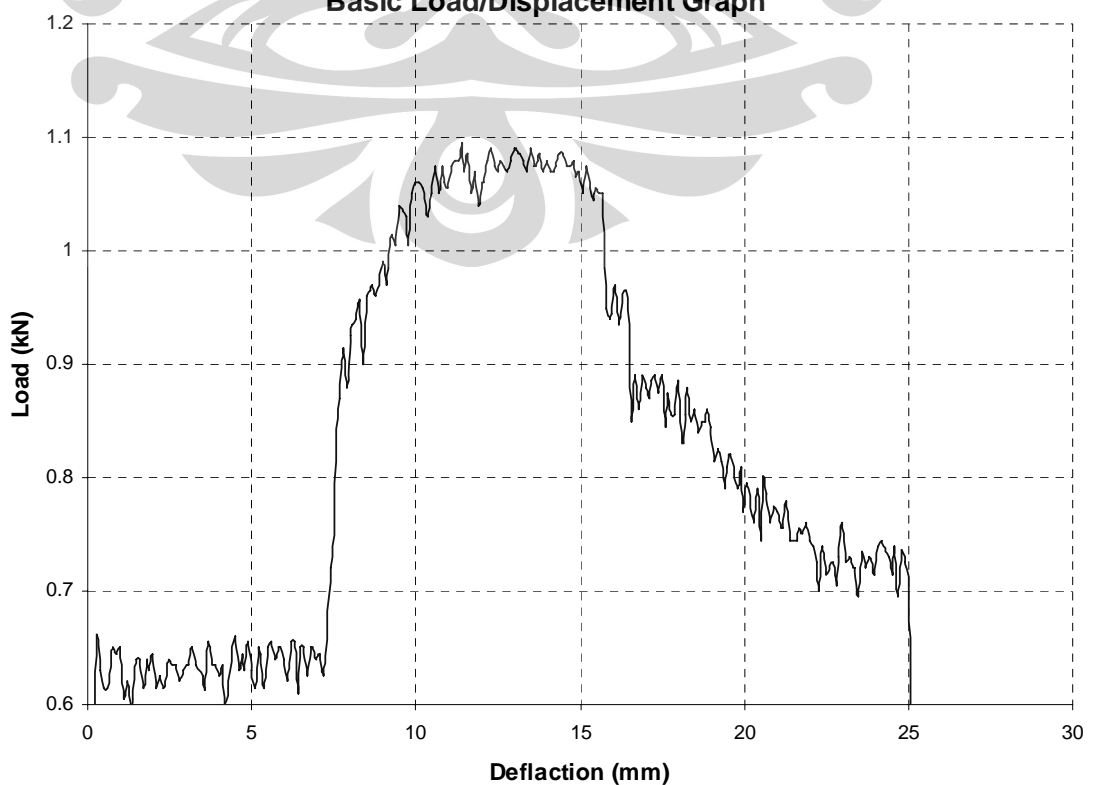


Batch No : fesB2 Sr No : 1 Date : 18/12/2007

Tested for : UIB2

Test Type : Bend/Transverse - Strip

Basic Load/Displacement Graph

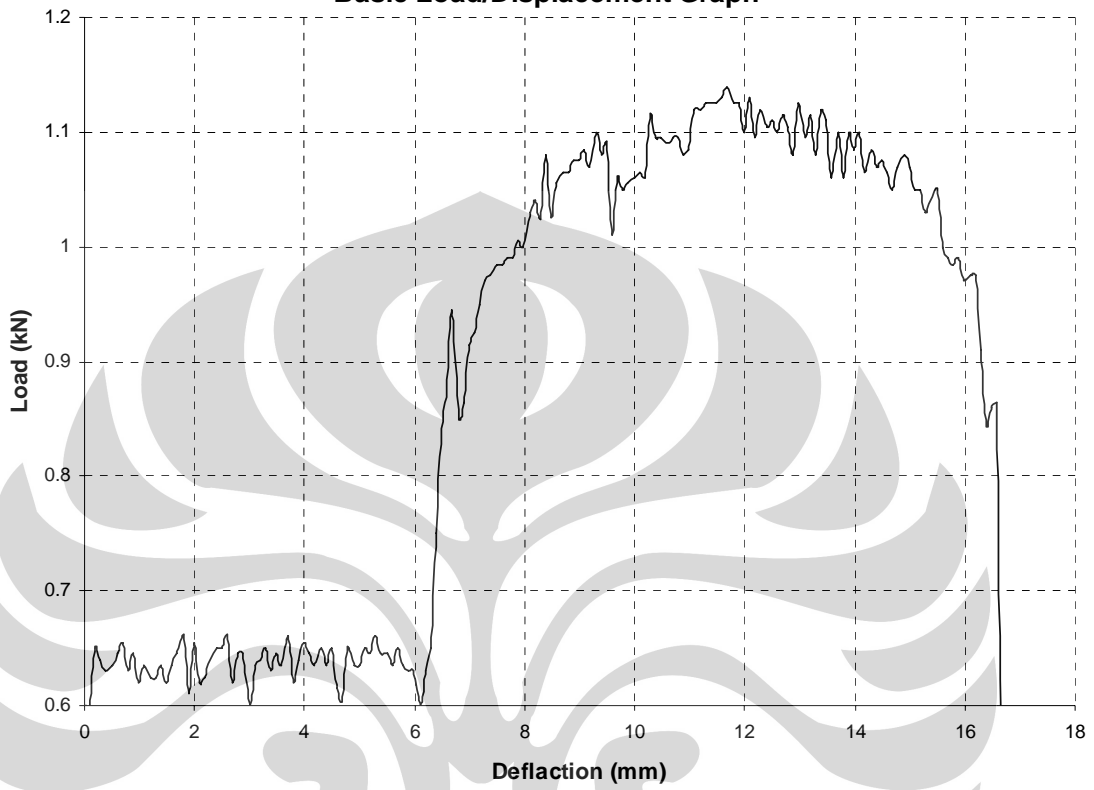


Batch No : fesC2 Sr No : 1 Date : 18/12/2007

Tested for : UIC2

Test Type : Bend/Transverse - Strip

Basic Load/Displacement Graph



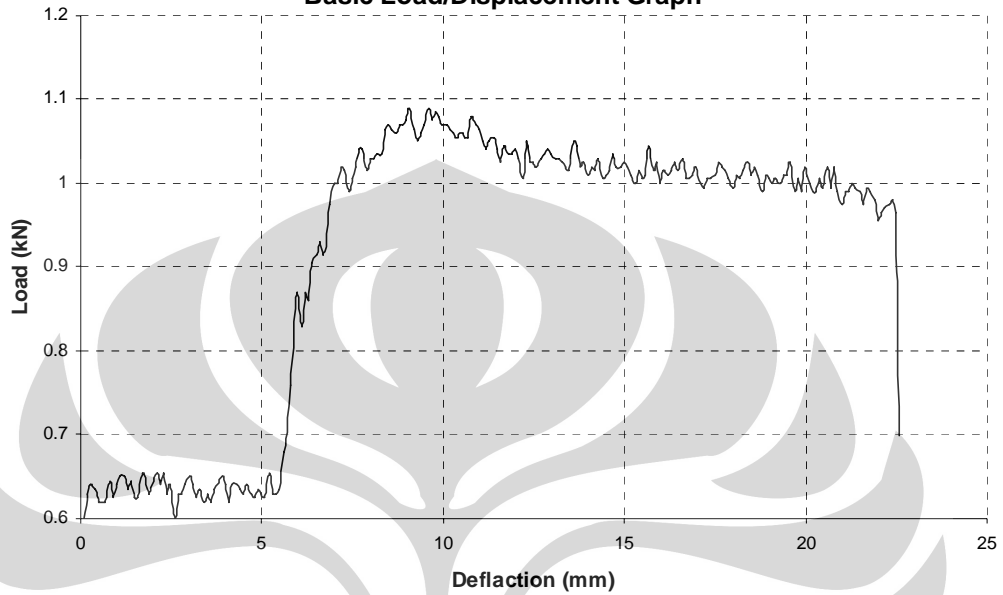
GRAFIK SEBAGAI DATA UJI LENTUR PADA SPESIMEN C

Batch No : fesA3 Sr No : 1 Date : 18/12/2007

Tested for : UI3

Test Type : Bend/Transverse - Strip

Basic Load/Displacement Graph

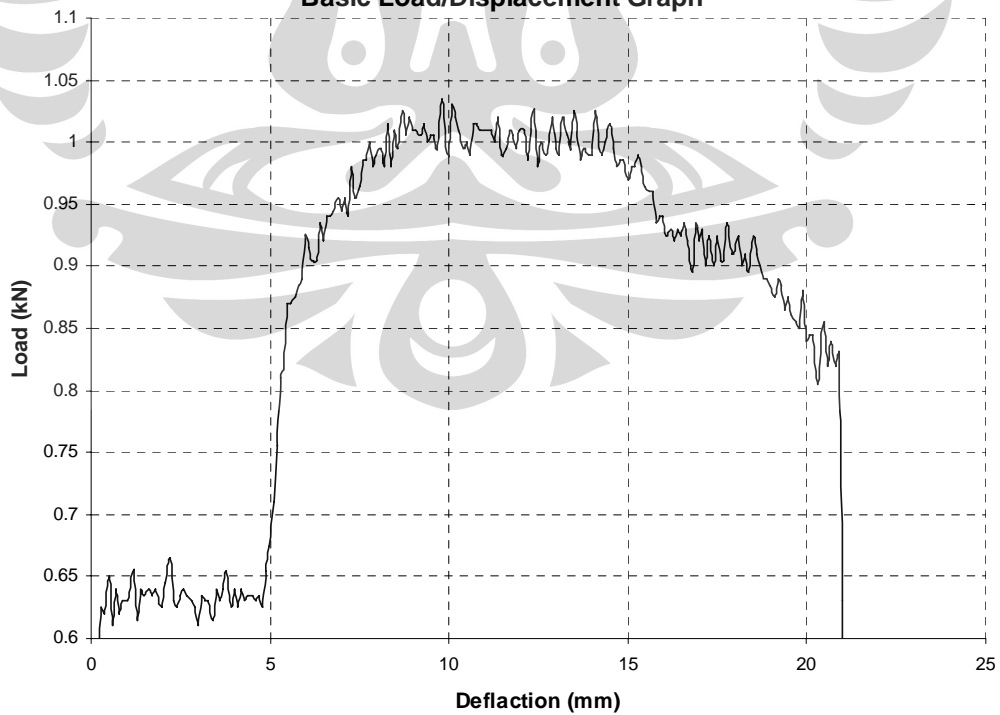


Batch No : fesB3 Sr No : 1 Date : 18/12/2007

Tested for : UIB3

Test Type : Bend/Transverse - Strip

Basic Load/Displacement Graph

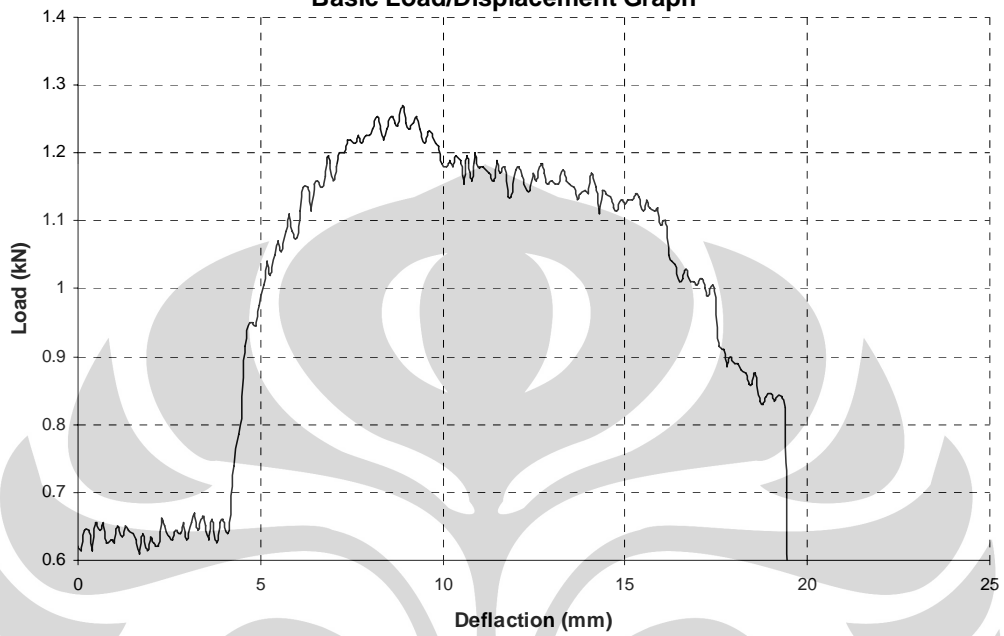


Batch No : fesC3 Sr No : 1 Date : 18/12/2007

Tested for : UIC3

Test Type : Bend/Transverse - Strip

Basic Load/Displacement Graph



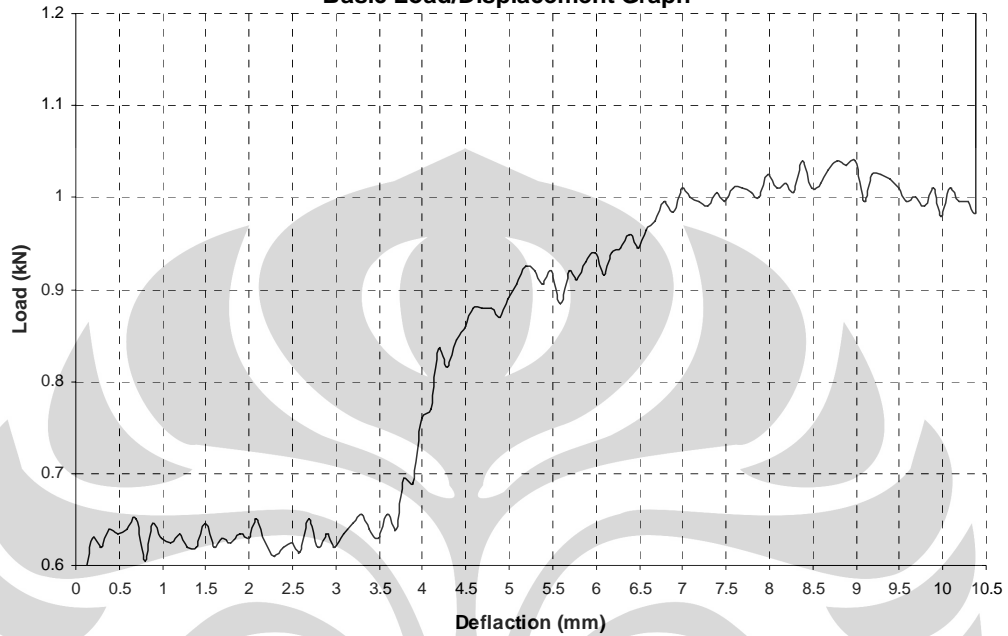
GRAFIK SEBAGAI DATA UJI LENTUR PADA SPESIMEN D

Batch No : fesA4 Sr No : 1 Date : 18/12/2007

Tested for : UI4

Test Type : Bend/Transverse - Strip

Basic Load/Displacement Graph

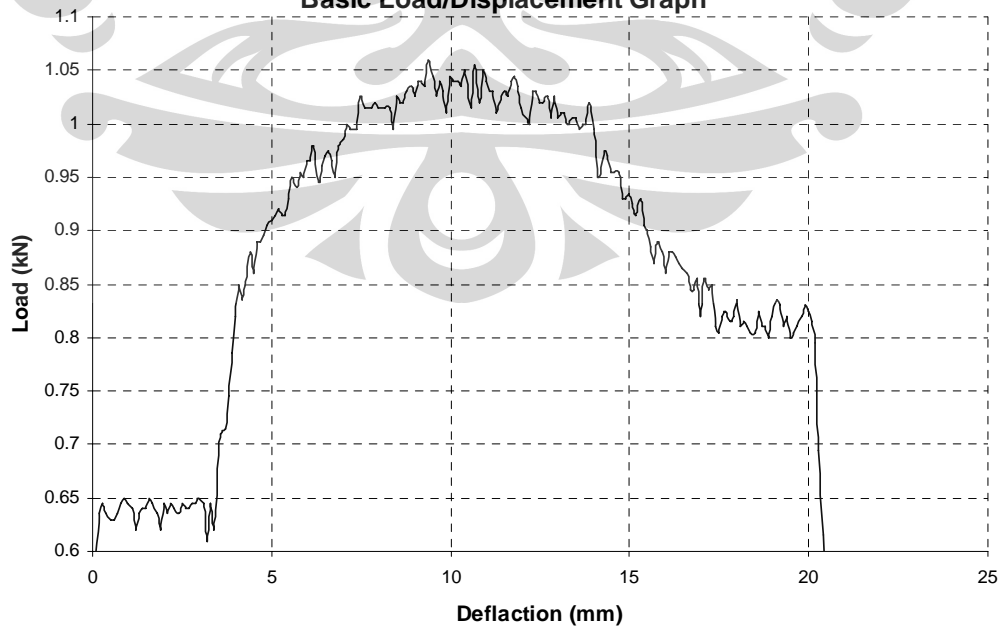


Batch No : fesB4 Sr No : 1 Date : 18/12/2007

Tested for : UIB4

Test Type : Bend/Transverse - Strip

Basic Load/Displacement Graph



Batch No : fesC4 Sr No : 1 Date : 18/12/2007

Tested for : UI4

Test Type : Bend/Transverse - Strip
Basic Load/Displacement Graph

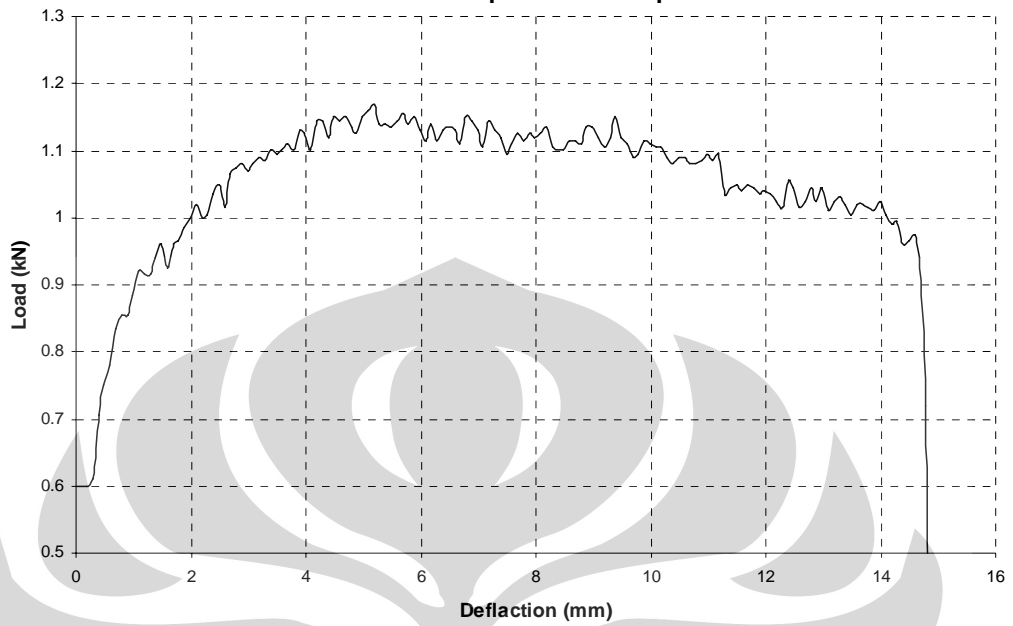


Table 3.2-Common types and sizes of steel meshes used in ferrocement

Type	Shape	Fabrication	Designation, gage*	Wire spacing		Wire diameter or sheet thickness	
				in.	mm	in.	mm
Wire mesh	Square	Woven or welded	¼ x ¾ No. 16	0.75	19.0	0.0630	1.60
			2 x 2 No. 19	0.50	13.0	0.0410	1.00
			3 x 3 No. 22	0.33	8.5	0.0286	0.72
			4 x 4 No. 23	0.25	6.4	0.0250	0.64
	Welded	1 x 1 No. 14	1.00	25.0	0.0800	2.00	
Rectangular	Welded	2 x 1 No. 14	2 x 1	50 x 25	0.0800	2.00	
Hexagonal	Twisted	1 No. 18	1.00	25.0	0.0475	1.20	
		1 No. 20	1.00	25.0	0.0348	0.88	
		½ No. 22	½	13.0	0.0286	0.72	
Expanded metal mesh	Diamond	Slit and drawn	3.4 lb/yd ²			0.0230	0.58
			Gage No. 18			0.0400	1.00
			Gage No. 20			0.0300	0.76

* American wire gage

Table 4.1-Minimum values of yield strength and effective modulus for steel meshes and bars recommended for design

		Woven square mesh	Welded square mesh	Hexagonal mesh	Expanded metal mesh	Longitudinal bars
Yield strength	f_y , ksi (MPa)	65 (450)	65 (450)	45 (310)	45 (310)	60 (414)
Effective modulus	$(E_y)_{long}$, 10^3 ksi (10^3 MPa)	20 (138)	29 (200)	15 (104)	20 (138)	29 (200)
	$(E_y)_{trans}$, 10^3 ksi (10^3 MPa)	24 (165)	29 (200)	10 (69)	10 (69)	— —

Table 4.2-Recommended design values of the global efficiency factor η of reinforcement for a member in uniaxial tension or bending

		Woven square mesh	Welded square mesh	Hexagonal mesh	Expanded metal mesh	Longitudinal bars
Global efficiency factor	Longitudinal η_l	0.50	0.50	0.45	0.65	1
	Transverse η_t	0.50	0.50	0.30	0.20	0
	At 45 deg. $\eta_\theta = 45$	0.35	0.35	0.30	0.30	0.70

Table 1.1 Different Types of Wire Meshes and their Characteristics

Type of Mesh	Wt of one layer per unit area(kg/m ²)	Mesh thickness (mm)	Steel content (kg/m ²)	Steel surface per unit Vol(mm ² /mm ³)
Hexagonal wire mesh 12mm * 22 gauge	0.58	1.4	410	0.275
Square welded mesh 12 mm *12 mm *19 gauge	1.08	2	540	0.248
Expanded metal expamet T.C.G.269	1.22	2.5	490	0.245
Wastan mesh	3.55	5.5	650	0.236

and Steel Mesh Wires

Sr. No.	Diameter of bars/ mesh wire	Yield-strength (N/mm ²)	Ultimate strength	Percentage Elongation
1.	10mm	445.55	509.2	15.5
2.	8mm	559.5	634.13	20.3
3.	6mm	442.42	612.7	32.9
4	2.4mm	400	511.36	2.52

Fibre reinforced concrete

1. Introduction

Concrete made with portland cement has certain characteristics: it is relatively strong in compression but weak in tension and tends to be brittle. The weakness in tension can be overcome by the use of conventional rod reinforcement and to some extent by the inclusion of a sufficient volume of certain fibres. The use of fibres also alters the behaviour of the fibre-matrix composite after it has cracked, thereby improving its toughness.

This leaflet aims to provide information on the properties of the more commonly available fibres and their uses to produce concrete with certain characteristics.

2. The concept of toughness

Toughness is defined as the area under a load-deflection (or stress-strain) curve. As can be seen from Figure 1, adding fibres to concrete greatly increases the toughness of the material. That is, fibre-reinforced concrete is able to sustain load at deflections or strains much greater than those at which cracking first appears in the matrix.

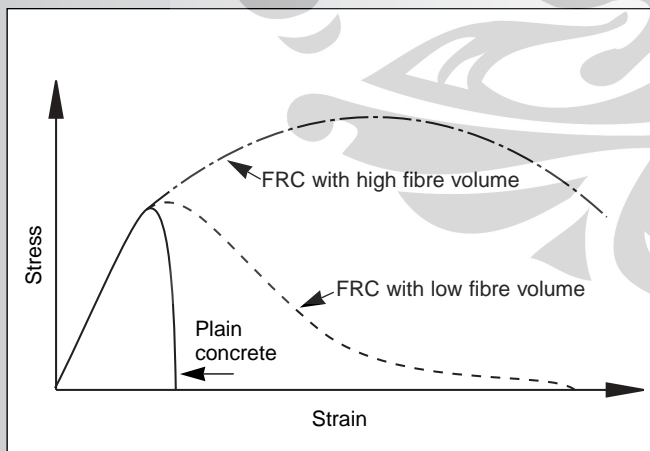


Figure 1: Typical stress-strain curves for fibre-reinforced concrete.

3. The use of fibres

For the effective use of fibres in hardened concrete:

- Fibres should be significantly stiffer than the matrix, ie a higher modulus of elasticity.
- Fibre content by *volume* must be adequate.
- There must be a good fibre-matrix bond.

- Fibre length must be sufficient.
- Fibres must have a high aspect ratio, ie they must be long relative to their diameter.

It should be noted that published information tends to deal with high volume concentrations of fibre. However, for economic reasons, the current trend in practice is to minimise fibre volume, in which case improvements in properties can be marginal.

For the quantities of fibres typically used (less than 1% by volume for steel and about 0,1% by volume for polypropylene) the fibres will not have significant effect on the strength or modulus of elasticity of the composite. *It is thus important to evaluate published test data and manufacturer's claims carefully.*

It must also be noted that high volume concentrations of certain fibres may make the plastic concrete unworkable.

4. Types of fibre

In this section each of the most commonly used fibre types is discussed, giving information on the manufacture of the fibre, its properties, fibre content in applications and the effects of the fibre type on concretes and mortars.

4.1. Glass

Glass fibres, in the form first used, were found to be alkali reactive and products in which they were used deteriorated rapidly. Alkali-resistant glass containing 16% zirconia was successfully formulated in the 1960s and by 1971 was in commercial production in the UK. Other sources of alkali-resistant glass were developed during the 1970s and 1980s in other parts of the world, with higher zirconia contents. Alkali-resistant glass fibre is used in the manufacture of glass-reinforced cement (GRC) products, which have a wide range of applications.

Glass fibre is available in continuous or chopped lengths. Fibre lengths of up to 35 mm are used in spray applications and 25-mm lengths in premix applications.

Glass fibre has high tensile strength (2 – 4 GPa) and elastic modulus (70 – 80 GPa) but has brittle stress-strain characteristics (2,5 – 4,8% elongation at break) and low creep at room temperature. Claims have been made that up to

5% glass fibre by volume has been used successfully in sand-cement mortar without balling.

Glass-fibre products exposed to outdoor environment have shown a loss of strength and ductility. The reasons for this are not clear and it is speculated that alkali attack or fibre embrittlement are possible causes. Because of the lack of data on long-term durability, GRC has been confined to non-structural uses where it has wide applications. It is suitable for use in direct spray techniques and premix processes and has been used as a replacement for asbestos fibre in flat sheet, pipes and a variety of precast products. GRC products are used extensively in agriculture; for architectural cladding and components; and for small containers.

4.2. Steel

Steel fibres have been used in concrete since the early 1900s. The early fibres were round and smooth and the wire was cut or chopped to the required lengths. The use of straight, smooth fibres has largely disappeared and modern fibres have either rough surfaces, hooked ends or are crimped or undulated through their length. Modern commercially available steel fibres are manufactured from drawn steel wire, from slit sheet steel or by the melt-extraction process which produces fibres that have a crescent-shaped cross section. Typically steel fibres have equivalent diameters (based on cross sectional area) of from 0,15 mm to 2 mm and lengths from 7 to 75 mm. Aspect ratios generally range from 20 to 100. (*Aspect ratio* is defined as the ratio between fibre length and its equivalent diameter, which is the diameter of a circle with an area equal to the cross-sectional area of the fibre.)

Carbon steels are most commonly used to produce fibres but fibres made from corrosion-resistant alloys are available. Stainless steel fibres have been used for high-temperature applications.

Some fibres are collated into bundles using water-soluble glue to facilitate handling and mixing.

Steel fibres have high tensile strength (0,5 – 2 GPa) and modulus of elasticity (200 GPa), a ductile/plastic stress-strain characteristic and low creep.

Steel fibres have been used in conventional concrete mixes, shotcrete and slurry-infiltrated fibre concrete. Typically, content of steel fibre ranges from 0,25% to 2,0% by volume. Fibre contents in excess of 2% by volume generally result in poor workability and fibre distribution, but can be used successfully where the paste content of the mix is increased and the size of coarse aggregate is not larger than about 10 mm.

Steel-fibre-reinforced concrete containing up to 1,5% fibre by volume has been pumped successfully using pipelines of 125 to 150 mm diameter. Steel fibre contents up to 2% by volume have been used in shotcrete applications using both the wet and dry processes. Steel fibre contents of up to 25% by volume have been obtained in slurry-infiltrated fibre concrete.

Concretes containing steel fibre have been shown to have substantially improved resistance to impact and greater ductility of failure in compression, flexure and torsion.

Similarly, it is reported that the elastic modulus in compression and modulus of rigidity in torsion are no different before cracking when compared with plain concrete tested under similar conditions. It has been reported that steel-fibre-reinforced concrete, because of the improved ductility, could find applications where impact resistance is important. Fatigue resistance of the concrete is reported to be increased by up to 70%.

It is thought that the inclusion of steel fibre as supplementary reinforcement in concrete could assist in the reduction of spalling due to thermal shock and thermal gradients.

The lack of corrosion resistance of normal steel fibres could be a disadvantage in exposed concrete situations where spalling and surface staining are likely to occur.

4.3. Synthetic fibres

Synthetic fibres are man-made fibres resulting from research and development in the petrochemical and textile industries. There are two different physical fibre forms: monofilament fibres, and fibres produced from fibrillated tape. Currently there are two different synthetic fibre volumes used in application, namely low-volume percentage (0,1 to 0,3% by volume) and high-volume percentage (0,4 to 0,8% by volume). Most synthetic fibre applications are at the 0,1% by volume level. At this level, the strength of the concrete is considered unaffected and crack control characteristics are sought.

Fibre types that have been tried in cement concrete matrices include: acrylic, aramid, carbon, nylon, polyester, polyethylene and polypropylene. Table 1 summarises the range of physical properties of some synthetic fibres.

4.3.1. Acrylic

Acrylic fibres have been used to replace asbestos fibre in many fibre-reinforced concrete products. In this process fibres are initially dispersed in a dilute water and cement mixture. A composite thickness is built up in layers using a pressure forming process and vacuum dewatering. Acrylic fibres have also been added to conventional concrete at low volumes to reduce the effects of plastic-shrinkage cracking.

4.3.2. Aramid

Aramid fibres are two and a half times as strong as glass fibres and five times as strong as steel fibres, per unit mass. Due to the relatively high cost of these fibres, aramid-fibre-reinforced concrete has been primarily used as an asbestos cement replacement in certain high-strength applications.

4.3.3. Carbon

Carbon fibre is substantially more expensive than other fibre types. For this reason its commercial use has been limited.

Carbon fibres are manufactured by carbonizing suitable organic materials in fibrous forms at high temperatures and then aligning the resultant graphite crystallites by hot-stretching. The fibres are manufactured as either Type I (high modulus) or Type II (high strength) and are dependent upon material source and extent of hot stretching for their physical properties. Carbon fibres are available in a variety of forms and have a fibrillar structure similar to that of asbestos.

Table 1: Selected synthetic fibre types and properties *

Fibre type	Equivalent diameter μm	Relative density	Tensile strength MPa	Elastic modulus GPa	Ultimate elongation %	Ignition temperature $^{\circ}\text{C}$	Melt, oxidation, or decomposition temperature $^{\circ}\text{C}$	Water absorption per ASTM D 570, % by mass
Acrylic	13 - 104	1,16 - 1,18	270 - 1 000	14 - 19	7,5 - 50,0	-	220 - 235	1,0 - 2,5
Aramid I	12	1,44	2 900	60	4,4	high	480	4,3
Aramid II [†]	10	1,44	2 350	115	2,5	high	480	1,2
Carbon, PAN HM ^Δ	8	1,6 - 1,7	2 500 - 3 000	380	0,5 - 0,7	high	400	nil
Carbon, PAN HT [§]	9	1,6 - 1,7	3 450 - 4 000	230	1,0 - 1,5	high	400	nil
Carbon, pitch GP ^{**}	10 - 13	1,6 - 1,7	480 - 790	27 - 35	2,0 - 2,4	high	400	3 - 7
Carbon, pitch HP ^{††}	9 - 18	1,8 - 2,15	1 500 - 3 100	150 - 480	0,5 - 1,1	high	500	nil
Nylon ^{ΔΔ}	23	1,14	970	5	20	-	200 - 220	2,8 - 5,0
Polyester	20	1,34 - 1,39	230 - 1 100	17	12 - 150	600	260	0,4
Polyethylene ^{ΔΔ}	25 - 1 000	0,92 - 0,96	75 - 590	5	3 - 80	-	130	nil
Polypropylene ^{ΔΔ}	-	0,90 - 0,91	140 - 700	3,5 - 4,8	15	600	165	nil

Notes

- * Not all fibre types are currently used for commercial production of FRC
- † High modulus
- Δ Polyacrylonitrile based, high modulus
- § Polyacrylonitrile based, high tensile strength
- ** Isotropic pitch based, general purpose
- †† Mesophase pitch based, high performance
- ΔΔ Data listed is only for fibres commercially available for FRC

Carbon fibre made from petroleum and coal pitch is less expensive than the conventional carbon fibre made from fibrous materials. The Type I and II carbon fibres produced by carbonizing suitable organic materials other than petroleum-based types are 20 to 40 times stronger and have a modulus of elasticity up to 100 times greater than the pitch-based carbon fibre.

Carbon fibre is available as continuous strands or as individual chopped fibres. Continuous strands are normally pre-placed and aligned to provide the optimum fibre orientation during fabrication. Chopped fibres are generally incorporated during the mixing process and are therefore orientated randomly throughout the mix. A satisfactory mix of chopped carbon fibre, cement and water is difficult to achieve because of the large surface area of the fibre. Research has shown that uniform dispersion of discontinuous low-modulus carbon fibre has been achieved using an omnimixer and admixture. Carbon fibre has high tensile strength and modulus of elasticity and a brittle stress-strain characteristic. Additional research is needed to determine the feasibility of carbon-fibre concrete on an economic basis. The fire-resistant properties of carbon-fibre composites need to be evaluated, but ignoring economics, structural applications appear promising.

4.3.4. Nylon

Nylon is a generic name that identifies a family of polymers. Nylon fibre's properties are imparted by the base polymer type, addition of different levels of additive, manufacturing conditions and fibre dimensions. Currently only two types of nylon fibre

are marketed for concrete. Nylon is heat stable, hydrophilic, relatively inert and resistant to a wide variety of materials.

Nylon is particularly effective in imparting impact resistance and flexural toughness and sustaining and increasing the load carrying capacity of concrete following first crack.

4.3.5. Polyester

Polyester fibres are available in monofilament form and belong to the thermoplastic polyester group. They are temperature sensitive and above normal service temperatures their properties may be altered. Polyester fibres are somewhat hydrophobic. Polyester fibres have been used at low contents (0,1% by volume) to control plastic-shrinkage cracking in concrete.

4.3.6. Polyethylene

Polyethylene has been produced for concrete in monofilament form with wart-like surface deformations. Polyethylene in pulp form may be an alternate to asbestos fibres. Concrete reinforced with polyethylene fibres at contents between 2 and 4% by volume exhibits a linear flexural load deflection behaviour up to first crack, followed by an apparent transfer of load to the fibres permitting an increase in load until the fibres break.

4.3.7. Polypropylene

Polypropylene fibre was first used to reinforce concrete in the 1960s. Polypropylene is a synthetic hydrocarbon polymer, the fibre of which is made using extrusion processes by hot-drawing the material through a die. Polypropylene fibres are produced as

continuous mono-filaments, with circular cross section that can be chopped to required lengths, or fibrillated films or tapes of rectangular cross section.

Polypropylene fibres are hydrophobic and therefore have the disadvantages of poor bond characteristics with cement matrix, a low melting point, high combustibility and a relatively low modulus of elasticity. Long polypropylene fibres can prove difficult to mix due to their flexibility and tendency to wrap around the leading edges of mixer blades.

Polypropylene fibres are tough but have low tensile strength and modulus of elasticity; they have a plastic stress-strain characteristic.

Monofilament polypropylene fibres have inherent weak bond with the cement matrix because of their relatively small specific surface area. Fibrillated polypropylene fibres are slit and expanded into an open network thus offering a larger specific surface area with improved bond characteristics. Polypropylene fibre contents of up to 12% by volume are claimed to have been used successfully with hand-packing fabrication techniques, but volumes of 0,1% of 50-mm fibre in concrete have been reported to have caused a slump loss of 75 mm.

Polypropylene fibres have been reported to reduce unrestrained plastic and drying shrinkage of concrete at fibre contents of 0,1 to 0,3% by volume.

4.4. Natural fibres

Natural reinforcing materials can be obtained at low cost and low levels of energy using local manpower and technology. Utilization of natural fibres as a form of concrete reinforcement is of particular interest to less developed regions where conventional construction materials are not readily available or are too expensive. Sisal-fibre reinforced concrete has been used for making roof tiles, corrugated sheets, pipes, silos and tanks.

Elephant-grass-reinforced mortar has been used for low-cost housing projects. Wood-cellulose-fibre-reinforced cement has commercial applications in the manufacture of flat and corrugated sheet and non-pressure pipes. Typical properties of natural fibres are shown in Table 2.

Natural fibres can be either unprocessed or processed

4.4.1. Unprocessed natural fibres

Products made with unprocessed natural fibres such as coconut coir, sisal, sugarcane bagasse, bamboo, jute, wood and vegetable fibres have been tested in a number of countries. Problems have been reported with the long-term durability of some of the products.

The properties of concrete made using unprocessed natural fibres depend on a number of factors including the type and length of fibre as well as the volume fraction. To show some improvement in mechanical properties, the minimum fibre content is of the order of 3% by volume.

4.4.2. Processed natural fibres

Wood cellulose is the most frequently used natural fibre. It is most commonly obtained using the Kraft process. This process involves cooking wood chips in a solution of sodium hydroxide, sodium carbonate and sodium sulphide. Different grades of wood-cellulose fibre containing more or less of the three main constituents, cellulose, hemicellulose and ligna can be obtained by bleaching.

Wood-cellulose fibre has relatively good mechanical properties compared with many man-made fibres such as polypropylene, polyethylene, polyester and acrylic.

Delignified cellulose fibre can be produced with tensile strengths up to approximately 2,0 GPa from selected grades of wood, and using suitable pulping processes. Fibre tensile strengths of 500 MPa can be routinely obtained using a chemical pulping process and the more common, less expensive, grades of wood.

Table 2: Typical properties of natural fibres

Fibre type	Coconut	Sisal	Sugar cane bagasse	Bamboo	Jute	Flax	Elephant grass	Water reed	Plantain	Mu-samba	Wood fibre (Kraft pulp)
Fibre length, mm	50 - 100	N/A	N/A	N/A	175 - 300	500	N/A	N/A	N/A	N/A	2,5 - 5,0
Fibre diameter, mm	0,1 - 0,4	N/A	0,2 - 0,4	0,05 - 0,4	0,1 - 0,2	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0,025 - 0,075
Relative density	1,12 - 1,15	N/A	1,2 - 1,3	1,5	1,02 - 1,04	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	1,5
Modulus of elasticity, GPa	19 - 26	13 - 26	15 - 19	33 - 40	26 - 32	100	5	5	1,5	1,0	N/A
Ultimate tensile strength, MPa	120 - 200	275 - 570	180 - 290	350 - 500	250 - 350	1 000	180	70	90	80	700
Elongation at break, %	10 - 25	3 - 5	N/A	N/A	1,5 - 1,9	1,8 - 2,2	3,6	1,2	5,9	9,7	N/A
Water absorption, %	130 - 180	60 - 70	70 - 75	40 - 45	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	50 - 75

Notes

N/A Properties not readily available or not applicable.

Using conventional mixing techniques, the amount of fibre that can be incorporated into the cement matrix at low water contents is limited by the capacity of the fibres to be mixed uniformly into the matrix. Fabrication techniques that involve mixing fibre with the matrix at initially high water contents and then using dewatering procedures are therefore effective and common.

Wood-cellulose fibre that has not been delignified can adversely affect the curing of the cement matrix. This is because leaching of sugar and other organic impurities into the cement matrix can retard or completely inhibit cement set. Results obtained from autoclaved wood-cellulose cement composites indicate that such products can be sensitive to moisture content.

Published information on the performance of wood-cellulose fibre composites is conflicting. However, Bentur and Mindess state "Although the strength and other properties of the cellulose-pulp fibre are inferior to those of many other fibres, such as asbestos, they are highly cost effective. This, combined with their compatibility with processes for producing asbestos cement, makes the cellulose-pulp fibres an attractive alternative to asbestos.

As a result of intensive research and development, cellulose-pulp fibres are now used in some places as partial or full replacement for asbestos in cement composites."

5. Further reading

1. ACI 544.1R-96, **State-of-the-art report on fiber reinforced concrete**, Farmington Hills, Michigan: American Concrete Institute, 1996.
2. Concrete Society, **Fibre-reinforced cement composites**, London: The Society, 1973. (Technical report 51.067).
3. Majumdar, A.J. **Fibre cement and concrete - a review**, Garston: Building Research Establishment, 1975. (BRE current paper 26/75).
4. Mindess, S. **Why fibre reinforced concrete? High performance concrete: selected papers from the Network of Centres of Excellence on High performance Concrete**, Sherbrooke, Quebec, 1993.
5. Portland Cement Association, **Fibre reinforced concrete**, Skokie: PCA, 1991. (SP 039.0IT).
6. Beaudoin, J.J. **Handbook of fiber-reinforced concrete: principles, properties, developments and applications**, Park Ridge, New Jersey: Noyes, 1990.
7. American Concrete Institute, **An International symposium: fiber reinforced concrete**, Detroit: ACI, 1974. (ACI Special Publication SP-44).
8. American Concrete Institute, **ACI Convention seminar for design with fiber reinforced concrete**, Detroit: ACI, 1985. (ACIU SCM-10).
9. Bentur, A. and Mindess, S. **Fibre reinforced cementitious composites**, London: Elsevier, 1990.
10. **Fibre reinforced cement and concrete, fourth RILEM international symposium**, Sheffield, England, July 1992.
11. Maidl, B. R. **Steel fibre reinforced concrete**, Berlin: Ernst & Sohn, 1995.

The C&CI library also has a large number of publications on fibre reinforcement in its collection.



Cement & Concrete Institute

PO Box 168, Halfway House, 1685
Portland Park, Old Pretoria Road, Halfway House, Midrand
Tel (011) 315-0300 • Fax (011) 315-0584
e-mail cnci@cnci.org.za • website <http://www.cnci.org.za>

Published by the Cement & Concrete Institute, Midrand, 2001.
© Cement & Concrete Institute

Analisa kekuatan..., Dirajaya PR, FT UI, 2008