PERPUSTAKAAN FTSP UII
TGL TERIMA : 14-3-03
NO. JUDUL : 000351
NO. INV. : 5120000351008 1

TUGAS AKHIR
PENELITIAN LABORATORIUM

PERKUATAN LENTUR BALOK BETON BERTULANG PASCA BAKAR MENGGUNAKAN *TFC - CARBON FIBRE FABRICS* DENGAN PEREKAT RESIN DAN PENAMBAHAN ANGKUR

"FLEXURAL STRENGTHENING OF FIRE DAMAGED REINFORCED CONCRETE BEAMS USING TFC - CARBON FIBRE FABRICS WITH EPOXY RESIN AND ANCHORED"

PERPUSTAKAAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN
PERENCANAAN UII YOGYAKARTA

disusun oleh:

Nama : Kusdarono Pratomo
No. Mhs : 93 310 166
NIRM : 930051013114120163

Nama : Eko Ihsan Wibowo
No. Mhs : 93 310 225
NIRM : 930051013114120222

JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA

2002

TUGAS AKHIR
PENELITIAN LABORATORIUM

PERKUATAN LENTUR BALOK BETON BERTULANG PASCA BAKAR MENGGUNAKAN *TFC - CARBON FIBRE FABRICS* DENGAN PEREKAT RESIN DAN PENAMBAHAN ANGKUR

"FLEXURAL STRENGTHENING OF FIRE DAMAGED REINFORCED CONCRETE BEAMS USING TFC - CARBON FIBRE FABRICS WITH EPOXY RESIN AND ANCHORED"

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Strata 1 (S1) pada Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Jurusan Teknik Sipil, pada Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta

disusun oleh:

Nama : Kusdarono Pratomo
No. Mhs : 93 310 166
NIRM : 930051013114120163

Nama : Eko Ihsan Wibowo
No. Mhs : 93 310 225
NIRM : 930051013114120222

JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA

2002

LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR

PERKUATAN LENTUR BALOK BETON BERTULANG PASCA BAKAR MENGGUNAKAN *TFC -CARBON FIBRE FABRICS* DENGAN PEREKAT RESIN DAN PENAMBAHAN ANGKUR

"FLEXURAL STRENGTHENING OF FIRE DAMAGED REINFORCED CONCRETE BEAMS USING TFC - CARBON FIBRE FABRICS WITH EPOXY RESIN AND ANCHORED"

disusun oleh:

Nama	**:**	**Kusdarono Pratomo**
No. Mhs	**:**	**93 310 166**
NIRM	**:**	**930051013114120163**
Nama	**:**	**Eko Ihsan Wibowo**
No. Mhs	**:**	**93 310 225**
NIRM	**:**	**930051013114120222**

Telah diperiksa dan disetujui:

Ir. H. Sarwidi, MSc. Ph.D
Dosen Pembimbing I
Tanggal: 21/11/2002

Ir. Fatkhurrohman N, MT
Dosen Pembimbing II
Tanggal: 21/11/2002

...ini hasil dari suatu kegigihan dan cinta. Kupersembahkan buat orang-orang luar biasa yang telah menggugah hati dan pikiranku; Kedua orang tua dan Istriku tercinta....

Aku akan gigih sampai aku berhasil.

Aku tidak diturunkan ke dunia ini dalam kekalahan, demikian pula kegagalan tidak mengalir dalam pembuluh darahku. Selama masih ada napas dalam diriku, selama itulah kegigihan akan ada dalam diriku. Wahai kegagalan, engkau tidak akan pernah bisa mengalahkan aku karena tekadku untuk meraih kesuksesan jauh lebih kuat..

Kini satu langkah kecil sudah kulewati dengan penuh cinta.
Aku berhasil.
Aku menang.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL i

LEMBAR PENGESAHAN ii

KATA PENGANTAR v

DAFTAR ISI vii

DAFTAR GAMBAR xii

DAFTAR TABEL xiv

DAFTAR LAMPIRAN xv

DAFTAR NOTASI xix

ABSTRAK xxii

BAB I PENDAHULUAN 1

1.1 Latar Belakang 1

1.2 Rumusan Masalah 3

1.3 Tujuan Penelitian 3

1.4 Manfaat Penelitian 4

1.5 Pendekatan Masalah 4

1.6 Batasan Masalah 4

BAB II TINJAUAN PUSTAKA 6

2.1 Beton 6

2.2 Baja tulangan 6

2.3 Kuat lentur balok beton bertulang 7

2.4 Pengaruh temperatur pada beton bertulang 8

2.4.1 Pengaruh temperatur pada beton 8

2.4.2 Pengaruh temperatur pada baja tulangan 9

2.5 Struktur balok beton bertulang pasca bakar 9

2.6 Perkuatan struktur balok beton bertulang 10

BAB III LANDASAN TEORI 11

3.1 Kapasitas lentur balok tampang persegi pasca bakar 11

3.2 Kapasitas lentur balok beton bertulang pasca bakar dengan TFC 15

3.3 Tegangan geser angkur (baut) pada ujung TFC 16

3.4 Hubungan beban-lendutan (P-Δ) 18

3.5 Hubungan momen-kelengkungan (M-κ) 19

3.5.1 Kelengkungan balok (κ) 19

3.5.2 Persamaan differensial defleksi balok 21

3.5.3 Momen-kelengkungan kondisi retak (M_{cr}-κ_{cr}) 23

3.5.4 Momen-kelengkungan pada saat luluh pertama (M_y-κ_y) 24

3.5.5 Momen-kelengkungan ultimit (M_u-κ_u) 25

3.6 Hipotesis 27

BAB IV METODE PENELITIAN 28

4.1 Metode penelitian 28

4.2 Bahan dan peralatan 28

4.2.1 Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian 28

4.2.1.1 Semen 29

4.2.1.2 Agregat 29

4.2.1.3 Air 29

4.2.1.4 Baja tulangan 29

4.2.1.5 Kawat beindrat 30

4.2.1.6 Papan kayu 30

4.2.1.7 Bahan perkuatan lentur 30

4.2.1.8 Angkur (baut) dan pelat baja 31

4.2.2 Alat-alat yang digunakan dalam penelitian 31

4.2.2.1 Saringan 31

4.2.2.2 Timbangan 32

4.2.2.3 Mistar dan kaliper 32

4.2.2.4 Mesin uji tarik 32

4.2.2.5 Mesin uji geser 33

4.2.2.6 Mesin uji desak 34

4.2.2.7 Mesin pengaduk beton 35

4.2.2.8 Alat getar adukan beton (*concrete vibrator*) 35

4.2.2.9 Kerucut Abram 36

4.2.2.10 Tungku pembakaran 36

4.2.2.11 *Burner* 36

4.2.2.12 *Thermo couple* 37

4.2.2.13 Dukungan sendi dan rol 37

4.2.2.14 *Loading frame* 38

4.2.2.15 *Dial gauge* 39

4.2.2.16 *Hydraulic jack* 40

4.3 Pelaksanaan penelitian 41

4.3.1 Pengujian bahan penelitian 41

4.4 Pembuatan benda uji 42

4.5 Perawatan benda uji 43

4.6 Pembakaran benda uji 44

4.7 Perkuatan lentur struktur balok beton bertulang 45

4.8 Pengujian benda uji 46

BAB V HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN 47

5.1 Hasil penelitian 47

5.1.1 Kuat desak beton 47

5.1.2 Kuat tarik baja tulangan 48

5.1.3 Pembakaran benda uji balok beton bertulang 48

5.1.4 Uji lentur balok beton bertulang 49

5.1.4.1 Hubungan beban-lendutan 49

5.1.4.2 Hubungan momen-kelengkungan 51

5.2 Pembahasan 52

5.2.1 Perkuatan lentur balok beton bertulang pasca bakar menggunakan TFC dengan perekat resin dan penambahan angkur pada kedua ujung TFC 52

5.2.2 Kekakuan ditinjau dari hubungan beban-lendutan 54

5.2.3 Faktor kekakuan ditinjau dari hubungan momen-kelengkungan..... 54

BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN 56

6.1 Kesimpulan 56

6.2 Saran 57

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1 Diagram analisis balok beton bertulangan rangkap pada pembebanan batas 11

Gambar 3.2 Diagram kesetimbangan gaya dalam dengan perkuatan TFC 15

Gambar 3.3 Mekanisme gaya geser yang terjadi pada angkur (baut) 17

Gambar 3.4 Lendutan balok 18

Gambar 3.5 Kurva kekakuan (K) balok 18

Gambar 3.6 Kelengkungan, deformasi lenturan pada balok 19

Gambar 3.7 Lendutan (*defleksi*) pada titik-titik diskrit 21

Gambar 3.8 Kurva momen-kelengkungan (M-κ) 22

Gambar 3.9 Balok persegi dengan tulangan rangkap pada saat leleh pertama 24

Gambar 3.10 Balok persegi dengan tulangan rangkap pada kondisi ultimit 26

Gambar 3.11 Grafik hubungan momen-kelengkungan (M-κ) 27

Gambar 4.1 Penampang balok beton bertulang 30

Gambar 4.2 Mesin uji tarik baja tulangan 33

Gambar 4.3 Mesin uji geser angkur (baut) 34

Gambar 4.4 Mesin uji desak 35

Gambar 4.5 *Thermo couple* 37

Gambar 4.6 Dukungan sendi dan rol 38

Gambar 4.7 *Loading Frame* 39

Gambar 4.8 *Dial gauge* 40

Gambar 4.9 *Hydraulic Jack* 40

Gambar 4.10 Model balok uji tanpa perkuatan TFC 43

Gambar 4.11 Perkuatan balok menggunakan TFC dengan penambahan angkur (baut) 43

Gambar 5.1 Grafik perbandingan hubungan beban-lendutan rata-rata (P-Δ) 50

Gambar 5.2 Grafik perbandingan hubungan momen-kelengkungan rata-rata (M-κ) 51

DAFTAR TABEL

Tabel 5.1 Hasil uji tarik baja tulangan 48

Tabel 5.2 Data hasil pengujian lentur balok beton bertulang rata-rata 50

Tabel 5.3 Data hasil pengujian lentur balok beton bertulang rata-rata 52

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 61

Lampiran 1.1 Surat bebas Laboratorium Struktur UGM..... 62

Lampiran 2 64

Lampiran 2.1 Data hasil pengujian berat jenis agregat halus 65

Lampiran 2.2 Data hasil pengujian modulus halus butir pasir..... 66

Lampiran 2.3 Data hasil pengujian berat jenis agregat kasar 67

Lampiran 2.4 Data hasil pengujian berat volume agregat kasar 68

Lampiran 2.5 data hasil pengujian modulus halus butir kerikil 69

Lampiran 3 70

Lampiran 3.1 Hasil pengujian kuat tarik baja tulangan (Ø 6 mm) 71

Lampiran 3.2 Hasil pengujian kuat tarik baja tulangan (Ø 12 mm) 75

Lampiran 3.3 Hasil pengujian kuat tarik plat baja 79

Lampiran 3.4 Hasil pengujian kuat geser angkur (baut) 83

Lampiran 4 84

Lampiran 4.1 Perencanaan campuran beton 85

Lampiran 4.2 Hasil uji desak silinder beton 88

Lampiran 5 89

Lampiran 5.1 Analisa teoritis momen dan kelengkungan 90

Lampiran 6 95

Lampiran 6.1 Tabel hubungan beban-lendutan dan hubungan momen – kelengkungan balok beton bertulang 96

Lampiran 6.2 Tabel hubungan beban-lendutan dan momen - kelengkungan balok beton bertulang rerata 103

Lampiran 6.3 Grafik hubungan beban - lendutan dan hubungan momen – kelengkungan balok beton bertulang (balok I) 106

Lampiran 6.4 Grafik hubungan beban - lendutan dan hubungan momen – kelengkungan balok beton bertulang (balok II) 107

Lampiran 6.5 Grafik hubungan beban - lendutan dan hubungan momen – kelengkungan balok beton bertulang (balok III) 108

Lampiran 6.6 Grafik hubungan beban - lendutan dan hubungan momen – kelengkungan balok beton bertulang rata-rata 109

Lampiran 7 110

Gambar 1 Pengadukan campuran beton dengan menggunakan *concrete mixer*..... 111

Gambar 2 Pemadatan campuran beton menggunakan *vibrator* pada saat pengecoran..... 111

Gambar 3 Pengukuran *slamp* campuran beton 111

Gambar 4 Pembongkaran bekisting setelah selesai proses perawatan..... 112
Gambar 5 Proses pembakaran balok uji dengan menggunakan tungku pembakaran..... 112
Gambar 6 *Burner* yang digunakan sebagai alat untuk membakar benda uji di dalam tungku..... 112
Gambar 7 Pada balok pasca bakar, terlihat balok mengalami retak dan berwarna pink keabu-abuan..... 113
Gambar 8 Pengeboran balok beton sebagai tempat pemasangan agkur (baut)..... 113
Gambar 9 Pekerjaan *chipping* menggunakan gerinda yang tujuannya untuk menciptakan permukaan beton yang kasar..... 113
Gambar 10 Pengukuaran dan pemotongan TFC..... 114
Gambar 11 Pencampuran *epoxy resin* sebagai lapisan perekat TFC..... 114
Gambar 12 Proses pengeleman TFC pada permukaan beton yang sudah di *chipping* dengan menggunakan kuas alat bantu lainya..... 114
Gambar 13 Pelapisan pertama resin sebagai lapisan perekat TFC dengan menggunakan *roller*..... 115
Gambar 14 Ujung TFC yang dikaitkan pada angkur (baut)..... 115
Gambar 15 TFC yang sudah terpasang..... 115
Gambar 16 Proses pelaksanaan uji lentur pada balok normal, dan disini terlihat terjadinya kerusakan lentur..... 116
Gambar 17 Proses pelaksanaan uji lentur pada balok pasca bakar, disini terlihat terjadi kerusakan lentur, beton desak hancur dan tulangan baja

tekan luluh 116

Gambar 18 Terjadi *debonding failure* disepanjang lekatan antara TFC dan beton 116

Gambar 19 Ujung TFC yang dikaitkan dengan angkur tidak terlepas, sedang - kan pada bagian tengah dan bagian dekat angkuar terjadi *debon-ding failure* 117

Gambar 20 Proses pemasangan benda uji dan alat pada saat pengujian lentur dilaboratorium 117

Gambar 21 Pelaksanaan pengujian kuat desak silinder beton 117

Gambar 22 Pelaksanaan uji tarik baja tulangan 118

Lampiran 8 119

Lampiran 8.1 Spesifikasi TFC 120

DAFTAR NOTASI

a_θ = tinggi blok tegangan tekan beton pasca bakar (mm),
a = tinggi blok tegangan tekan beton normal (mm),
a_{tfc} = tinggi blok tegangan beton tekan pasca bakar dengan perkuatan TFC (mm),
A_{FRP} = luas penampang TFC (mm^2),
A_g = luas *bruto* (mm^2),
A_{net} = luas *netto* (mm^2),
A_s = luas tulangan baja tarik (mm^2),
A_s' = luas tulangan baja tekan (mm^2),
b = lebar balok (mm),
b_{FRP} = lebar TFC (mm),
c = kedalaman garis netral balok normal (mm),
c_θ = kedalaman garis netral pasca bakar (mm),
d_b = diameter baut (mm),
d' = tebal selimut beton (mm),
d = tinggi efektif penampang (mm),
D = tinggi balok beton (mm),
E_c = modulus elastisitas beton (MPa),
E_s = modulus elastisitas baja = 200.000 (MPa),
$E_{s\theta}$ = modulus elastisitas baja pasca bakar = E_s (MPa),
$E_{c\theta}$ = modulus elastisitas balok pasca bakar (MPa),
$E_c I_c$ = kekakuan struktur balok normal (N.mm^2),
$E_{c\theta} I_c$ = kekakuan struktur balok pasca bakar (N.mm^2),
f_c' = tegangan tekan beton (MPa),
f_y = tegangan leleh baja (MPa),
f_u = tegangan ultimit baja (MPa),
$f_{c\theta}'$ = tegangan tekan beton pasca bakar = 0,5. f_c' (MPa),
f_{FRP} = tegangan leleh TFC (MPa),
f_{fu} = tegangan ultimit TFC (MPa),
f_{ub} = tegangan luluh ultimit baut (MPa),
f_r = modulus keruntuhan untuk beton normal = $0{,}75\sqrt{f_c'}$ (MPa),
$f_{r\theta}$ = modulus keruntuhan untuk beton pasca bakar = $0{,}75\sqrt{f'_{c\theta}}$ (MPa),
G_a = modulus geser epoxy (MPa),
I_c = momen inersia penampang balok (mm^4),
$I_{c\theta}$ = momen inersia balok pasca bakar (mm^4),
I_g = momen inersia balok sebelum retak (mm^4),

k = faktor tinggi garis netral,
k_θ = faktor tinggi garis netral balok pasca bakar,
k_{FRP} = keliling TFC (mm),
kd = jarak garis netral (mm),
K = Kekakuan balok (kN/mm)
κ = kelengkungan balok (mm^{-1})
κ_{cr} = kelengkungan saat kondisi retak pada balok normal (mm^{-1})
$\kappa_{cr\theta}$ = kelengkungan saat kondisi retak pada balok pasca bakar (mm^{-1})
κ_y = kelengkungan balok saat luluh pertama pada balok normal (mm^{-1})
$\kappa_{y\theta}$ = kelengkungan balok saat luluh pertama pada balok pasca bakar (mm^{-1})
κ_u = kelengkungan ultimit pada balok normal (mm^{-1})
$\kappa_{u\theta}$ = kelengkungan ultimit pada balok pasca bakar (mm^{-1})
l = panjang bentang balok (mm),
l_{FRP} = panjang lekatan TFC (mm)
l_c = panjang kritis TFC (mm),
M_u = momen ultimit pada balok normal (N.mm),
$M_{u\theta}$ = momen ultimit pada balok pasca bakar (N.mm),
$M_{n\theta}$ = momen lentur nominal balok pasca bakar (N.mm),
M_n = momen lentur nominal balok normal (N.mm),
$M_{n\theta FRP}$ = momen lentur nominal balok pasca bakar dengan perkuatan TFC (N.mm),
M_{cr} = momen pada saat kondisi retak pada balok normal (N.mm),
$M_{cr\theta}$ = momen pada saat kondisi retak pada balok pasca bakar (N.mm),
n_θ = modulus rasio = $(E_s / E_{c\theta})$,
N_{D1} = gaya dalam untuk beton tekan (MPa),
N_{D2} = gaya dalam untuk baja tekan (MPa),
N_T = Gaya dalam untuk baja tarik (MPa),
P_n = kekuatan geser nominal (N),
P = beban terpusat (kN),
P_u = gaya geser yang terjadi (N) = $T = f_p A_{FRP}$,
r_1 = 0,4 untuk baut tanpa ulir pada bidang geser
$\phi.R_{nv}$ = kapasitas geser baut (MPa),
$\phi.R_{nt}$ = kapasitas tumpu baut (MPa), dan
R_u = beban terfaktor (kN) = $T = f_p A_{FRP}$.
t_a = tebal epoxy (mm),
t_p = tebal pelat (mm),
t_{FRP} = tebal TFC (mm),
T_{FRP} = tegangan tarik TFC = $f_{FRP} A_{FRP}$ (MPa),

x = jarak beban P dari tumpuan (mm),
ρ = rasio tulangan tarik,
ρ' = rasio tulangan tekan,
ϕ_f = faktor reduksi untuk gaya geser
(0,9 untuk luas *bruto* dan 0,75 untuk luas *netto*),
ϕ_y = kelengkungan pada saat leleh (mm^{-1}),
ϕ_u = kelengkungan pada saat ultimit (mm^{-1}),
ε_c = regangan beton,
ε_s = regangan baja,
ε_{cu} = regangan batas beton = 0,003,
μ = faktor duktilitas balok,
$\delta_{c\theta}$ = lendutan maksimum pada balok pasca bakar (mm),
δ_c = lendutan maksimum pada balok normal (mm),
τ_{max} = tegangan geser maksimum epoxy antara beton dengan TFC (MPa),

ABSTRAK

Penggunaan beton bertulang sebagai struktur pada bangunan sipil banyak dipilih karena dengan pertimbangan lebih mudah dalam pelaksanaannya, dapat dibentuk sesuai dengan keinginan, dan relatif lebih murah dibanding struktur baja. Kebakaran dapat menyebabkan penurunan kekakuan, dan faktor kekakuan pada struktur beton bertulang, termasuk balok, sehingga memberikan rasa kurang aman dan dapat mengancam jiwa pemakai struktur bangunan. Pemakaian TFC–Carbon Fibre Fabrics (Tissu de Fibres de Carbone) dipilih karena mempunyai kekuatan tarik yang tinggi, dapat menahan lentur dan geser serta mudah dipasang dibandingkan dengan memakai selubung baja maupun perluasan tampang beton bertulang, dapat dipasang pada permukaan beton, baja, dan kayu, sehingga dapat dijadikan alternatif bahan perkuatan lentur balok beton bertulang pasca bakar.

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh perkuatan lentur menggunakan TFC dan penambahan angkur (baut) pada balok beton bertulang pasca bakar dengan cara membandingkan kekakuan (K) dari hubungan beban-lendutan (P-Δ) dan faktor kekakuan (EI) dari hubungan momen-kelengkungan (M-κ). Penelitian ini diharapkan dapat memberikan masukan tentang perkuatan lentur balok beton bertulang pasca bakar menggunakan TFC dengan perekat TFC-RESIN (XEP 3935 A/ 2919 B) dan penambahan angkur (baut) pada kedua ujung TFC, sehingga dapat digunakan sebagai salah satu alternatif sebagai bahan perkuatan lentur.

Eksperimen yang dilakukan pada penelitian ini adalah dengan membuat sembilan sampel balok yang meliputi tiga balok normal yang tidak dibakar (BN), tiga balok pasca bakar tanpa perkuatan TFC (BPB), tiga balok pasca bakar menggunakan perkuatan TFC dengan penambahan baut (angkur) (BPBT).

Hasil penelitian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa pemasangan angkur (baut) pada kedua ujung TFC menyebabkan perkuatan yang diberikan TFC pada jenis balok (BPBT) dapat meningkatkan kekakuan (K) sebesar 10,457 % dibanding balok pasca (BPB) dan dibanding dengan balok normal (BN) kekakuan (K) turun sebesar 16,101 %. Pada balok pasca bakar dengan perkuatan TFC (BPBT) faktor kekakuan (EI) dapat meningkat sebesar 1,322 % dibanding balok pasca (BPB) dan dibanding dengan balok normal (BN) faktor kekakuan (EI) turun sebesar 27,525 %.

Kata kunci : kebakaran, balok, perkuatan, angkur (baut), kekakuan, faktor kekakuan.

BAB I

PENDAHULUAN

Hal-hal yang dikemukakan dalam pendahuluan ini meliputi latar belakang masalah, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, pendekatan masalah, dan batasan masalah.

1.1 Latar belakang masalah

Penggunaan beton bertulang sebagai struktur pada bangunan sipil banyak dipilih karena dengan pertimbangan lebih mudah dalam pelaksanaannya, dapat dibentuk sesuai dengan keinginan, dan relatif lebih murah dibanding struktur baja. Hal yang perlu diketahui disini adalah kerusakan-kerusakan yang dapat terjadi pada struktur beton bertulang, baik yang disebabkan oleh faktor alam (banjir dan gempa bumi) maupun karena faktor manusia sendiri (kesalahan perencanaan, pembebanan yang berlebihan, ledakan, dan kebakaran).

Kebakaran dapat menyebabkan penurunan kuat lentur, kekakuan, dan daktilitas pada struktur beton bertulang, termasuk balok, sehingga memberikan rasa kurang aman dan dapat mengancam jiwa pemakai struktur bangunan. Kerusakan yang terjadi pada struktur beton bertulang perlu di evaluasi untuk menghetahui tingkat kerusakan yang dialami sehingga dapat diperkirakan apakah struktur tersebut dapat langsung digunakan, diperbaiki atau dibongkar.

Perbaikan pada struktur balok beton bertulang pasca bakar yang mengalami penurunan kekuatan dan masih memungkinkan untuk dapat diperbaiki kembali, dapat dilakukan dengan beberapa cara diantaranya dengan mengupas selimut beton, kemudian dilakukan pengecoran kembali pada bagian yang dikupas tersebut dan melapisi permukaan balok beton bertulang dengan pelat baja maupun bahan non-logam yang terbuat dari serat carbon CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Plastics*).

Dalam penelitian ini perkuatan pada balok beton bertulang pasca bakar dilaksanakan dengan menggunakan bahan komposit non-logam yang terbuat dari serat carbon CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Plastics*) yaitu TFC–*Carbon Fibre Fabrics* (*Tissu de Fibres de Carbone*) dengan kombinasi perekat (*epoxy*) TFC–RESIN (XEP 3935 A / 2919 B) dan pemakaian baut (angkur) pada kedua ujung TFC sebagai bahan perkuatan lentur.

Pemakaian TFC–*Carbon Fibre Fabrics* (*Tissu de Fibres de Carbone*) dipilih karena mempunyai kekuatan tarik yang tinggi, dapat menahan lentur dan geser serta mudah dipasang dibandingkan dengan memakai selubung baja maupun perluasan tampang beton bertulang, dapat dipasang pada permukaan beton, baja, dan kayu, sehingga dapat dijadikan alternatif bahan perkuatan lentur balok beton bertulang pasca bakar.

Dari beberapa penelitian yang telah dilakukan, perkuatan lentur balok pasca bakar menggunakan bahan yang terbuat dari serat carbon CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Plastics*), perkuatan tidak mendapatkan hasil yang maksimal, hal ini disebabkan oleh terlepasnya lembaran CFRP dari beton (*debonding failure*) dan mengelupasnya selimut beton (*peeling failure*), oleh karena itu pemasangan angkur

(baut) diharapkan dapat menghindari kemungkinan terlepasnya lembaran TFC dari beton (*debonding failure*) dan menghindari kemungkinan mengelupasnya selimut beton (*peeling failure*) akibat penurunan kekuatan beton pasca bakar.

1.2 Rumusan masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. apakah pemasangan angkur (baut) pada kedua ujung TFC dapat menghindari lepasnya lembaran TFC pada permukaan beton (*debonding failure*) dan pengelupasan selimut beton (*peeling failure*) pada balok beton bertulang pasca bakar, dan
2. apakah pengaruh perkuatan lentur menggunakan TFC dan penambahan angkur (baut) pada balok pasca bakar dapat diketahui dengan cara membandingkan kekakuan (K) dari hubungan beban-lendutan (P-Δ) dan faktor kekakuan (EI) dari hubungan momen-kelengkungan (M-κ).

1.3 Tujuan penelitian

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah:

1. mengetahui pengaruh penambahan angkur (baut) pada kedua ujung TFC sehingga perkuatan lentur yang diberikan TFC dengan perekat TFC-RESIN pada balok beton bertulang pasca bakar dapat optimal, dan
2. mengetahui pengaruh perkuatan lentur menggunakan TFC dan penambahan angkur (baut) pada balok beton bertulang pasca bakar dengan cara

membandingkan kekakuan (K) dari hubungan beban-lendutan (P-Δ) dan faktor kekakuan (EI) dari hubungan momen-kelengkungan (M-κ).

1.4 Manfaat penelitian

Penelitian ini dapat memberikan masukan tentang perkuatan lentur balok beton bertulang pasca bakar menggunakan TFC dengan perekat TFC-RESIN (XEP 3935 A/ 2919 B) dan penambahan angkur (baut) pada kedua ujung TFC, sehingga dapat digunakan sebagai salah satu alternatif sebagai bahan perkuatan lentur.

1.5 Pendekatan masalah

Pendekatan masalah yang dilakukan untuk pemecahan masalah pada penelitian ini yaitu melalui eksperimen di Laboratorium dengan membuat sembilan sampel balok yang meliputi tiga balok normal yang tidak dibakar (BN), tiga balok pasca bakar tanpa perkuatan TFC (BPB), tiga balok pasca bakar menggunakan perkuatan TFC dengan penambahan baut (angkur) (BPBT), selanjutnya membandingkan kekakuan (K) dari hubungan beban-lendutan (P-Δ) dan faktor kekakuan (EI) dari hubungan momen-kelengkungan (M-κ) pada setiap jenis balok.

1.6 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini meliputi hal-hal sebagai berikut:

1. Balok beton bertulang yang akan digunakan sebagai bahan uji lentur adalah balok tampang persegi dengan mutu beton yang direncanakan sebesar f'_c = 20 MPa, dan tegangan leleh baja yang dipakai f_y = 240 MPa,

2. Balok beton bertulang yang akan digunakan sebagai benda uji lentur dibakar pada suhu 600 °C selama kurang lebih 3 jam,
3. Pengujian hanya pada kuat lentur balok dengan pembebanan dua titik, yang perletakannya diasumsikan sebagai sendi-rol, dengan analisis balok terlentur dengan tulangan rangkap, dan
4. Pemasangan TFC (*Tissu de Fibres de Carbon*) dengan *epoxy* resin sebagai perkuatan lentur hanya pada bagian bawah balok dan pemasangan angkur (baut) hanya pada kedua ujung TFC.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Hal-hal yang dikemukakan dalam tinjauan pustaka meliputi beton, baja tulangan, kuat lentur balok beton betulang, pengaruh temperatur pada beton bertulang, struktur balok bertulang pasca bakar, dan perkuatan (*strengthening*) struktur balok beton bertulang.

2.1 Beton

Beton didapat dari pencampuran bahan-bahan agregat halus dan kasar yaitu pasir, batu, batu pecah, atau bahan semacam lainnya, dengan menambahkan secukupnya bahan perekat semen, dan air sebagai bahan pembantu guna keperluan reaksi kimia selama proses pengerasan dan perawatan beton berlangsung (**Dipohusodo, 1994**).

2.2 Baja tulangan

Baja tulangan merupakan material berkekuatan tinggi, dibandingkan dengan beton. baja tulangan memikul tarik maupun memikul tekan, kekuatan lelehnya kurang lebih sepuluh kali dari kekuatan tekan struktur beton yang umum, atau seratus kali dari kekuatan tariknya (**Winter dan Nilson, 1993**).

Sifat fisik baja tulangan yang penting untuk digunakan dalam perhitungan perencanaan beton bertulang adalah tegangan luluh (f_y) dan modulus elastisitas (E_s) (**Dipohusodo, 1994**).

2.3 Kuat lentur balok beton bertulang

Pendekatan kopel momen dalam dapat digunakan untuk mendapatkan nilai kuat momen (momen tahanan) suatu balok (**Dipohusodo, 1994**).

Pemecahan masalah pada tiga koordinat yang tidak diketahui nilainya dapat didekati dengan metode *central difference* (**Chapra dan Canale, 1989**).

Kekakuan (K) adalah beban (P) yang diberikan pada beberapa titik sehingga menghasilkan lendutan (Δ) pada titik tersebut (**West, 1980**).

Kelengkungan (κ) berbanding terbalik dengan radius kelengkungan (R) dari pusat kurva kegaris netral balok (**Warner dkk, 1998**).

Park dan Paulay (1975) menyatakan bahwa pada titik luluh pertama tegangan masih sebanding dengan regangan, dimana tegangan beton tekan tidak melampaui lebih kurang 0,5. f_c' yang dikemukakan oleh **Santosa dan Iswahyudi (2000)**.

Penambahan momen (M) yang bekerja akan menyebabkan kelengkungan (κ) tidak elastis yang meluas sampai terjadi keruntuhan apabila besar kelengkungan (κ) yang terjadi sama dengan besar kapasitas batasnya (**Winter dan Nilson, 1993**).

Kelengkungan (κ) dihasilkan dari rasio perubahan sudut ($\Delta\theta$) terhadap satuan panjang (Δx), sehingga rasio momen (M) terhadap kelengkungan (κ) merupakan faktor kekakuan (EI) (**West, 1980**).

Saadatmanesh (1994) menyatakan bahwa perkuatan yang diberikan FRP tergantung dari kekuatan lekatnya terhadap beton, yang dikemukakan oleh **Boyd** (1997).

Perekat-*epoxy* pada komposit FRP dengan permukaan tarik balok beton bertulang cukup efektif digunakan untuk perbaikan dan perkuatan balok (**Ehsani, 1998**).

Angkur sebagai *Shear conector* berfungsi untuk mendistribusikan gaya geser horisontal pada bidang kontak komponen struktur komposit (**Sabnis, 1979**).

2.4 Pengaruh temperatur pada beton bertulang

Pengaruh temperatur pada beton bertulang meliputi pengaruh temperatur pada beton dan pengaruh temperatur pada baja tulangan.

2.4.1 Pengaruh temperatur pada beton

Beton akan mengalami retak jika dipanasi sampai temperatur 200 °C hal ini terjadi karena adanya kerusakan secara bertahap pada agregat dan pasta semen yang terhidrasi pada temperatur tinggi (**Neville, 1975**).

Kuat desak beton pada temperatur di atas 400 °C akan terus mengalami penurunan seiring dengan naiknya temperatur (**Neville, 1975**).

Kenaikan temperatur pada beton menyebabkan nilai modulus elastisitas yang merupakan perbandingan antara tegangan dan regangan beton akan mengalami penurunan (**Fintel, 1987**).

Pemanasan beton sampai temperatur 300 °C tidak akan mengubah nilai kuat tekan beton, di atas temperatur 300 °C kuat tekan beton tergantung pada mutu beton (akan menurun) (**Kusuma dan Vis, 1994**).

Kuat tekan beton turun sebesar 50 % dari kuat tekan awal dan modulus elastisitas beton turun sekitar 80 % pada kondisi dingin setelah pemanasan mencapai temperatur 600 °C (**Long dkk, 2000**).

2.4.2 Pengaruh temperatur pada baja tulangan

Pada suhu yang sama dengan yang dijumpai pada kebakaran, kekuatan dan modulus elastisitas baja tulangan berkurang, dan apabila elemen baja telah mengalami perlemahan, maka akan berpengaruh pada elemen beton (**Fintel, 1987**).

Concrete Society (1978) menyatakan bahwa setelah pendinginan dari suhu 500-600 °C, tegangan luluh baja kembali pada tegangan leleh awal yang dikemukakan oleh **Al-Mutairi dan Al-Shaleh (1997)**.

Kuat tarik baja beton di atas 500 °C akan menurun seiring dengan kenaikan temperatur berikutnya. Setelah pendinginan, jenis baja penggilasan panas akan pulih kembali (**Kusuma dan Vis, 1994**).

2.5 Struktur balok beton bertulang pasca bakar

Kekuatan beton ditengah blok tegangan ekivalen mengalami penurunan akibat pengaruh temperatur sedangkan untuk kekuatan baja tulangan akan dipengaruhi oleh temperatur dan letaknya (**Milke, 1999**).

Untuk mencapai suhu baja yang kritis bergantung pada tebal selimut beton (**Fintel, 1987**).

Naiknya temperatur adalah faktor yang mempengaruhi defleksi secara keseluruhan dan juga merupakan faktor yang mempengaruhi kapasitas momen (**Milke, 1999**).

Balok beton bertulang yang mengalami kebakaran sampai suhu 800 °C selama 3 jam menyebabkan kekakuan, daktilitas, dan kuat lentur ultimit balok beton bertulang akan mengalami penurunan (**Purwanto, 2001**).

2.6 Perkuatan struktur balok beton bertulang

Balok dengan *carbon wrapping* dapat mendukung beban yang terjadi lebih besar dibanding balok beton dengan perkuatan pelat baja, dan tidak terjadi *peeling* atau *debonding* pada *carbon wrapping* yang mengalami tegangan tarik (**GangaRao dan Vijay, 1998**).

Balok beton bertulang dengan perkuatan *carbon wrapping* pada bagian bawah balok akan meningkatkan kekuatan ultimit dan mengurangi defleksi (**GangaRao dan Vijay, 1999**).

Perkuatan lentur balok bertulang pasca bakar dengan *carbon fiber strips* menyebabkan naiknya kapasitas momen dan mengurangi lebar retak serta memperkecil lendutan yang terjadi (**Sihombing, 1999**).

Perkuatan pada balok pasca bakar dengan panjang *carbon fiber strips* yang terbatas menyebabakan terjadinya *debonding* dan *peeling failure*, sehingga perkuatan yang diberikan belum maksimal (**Mahkota, 2000**), hal serupa juga dikemukakan oleh **Ngudiyono (2001)**.

Perkuatan lentur dan geser pada balok pasca bakar dengan *carbon wrapping* akan menyebabkan terjadinya *debonding* sehingga material perkuatan belum bisa bekerja secara optimal (**Purwanto, 2001**).

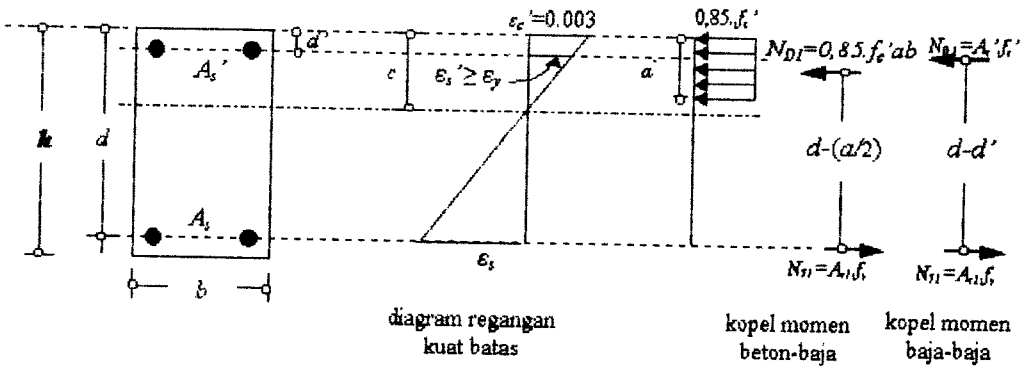
BAB III

LANDASAN TEORI

Hal-hal yang dikemukakan dalam landasan teori ini meliputi kapasitas lentur balok tampang persegi pasaca bakar, kapasitas lentur balok tampang persegi pasca bakar dengan TFC, tegangan geser angkur (baut) pada ujung TFC, hubungan beban-lendutan (P-Δ) hubungan momen-kelengkungan (M-κ), dan hipotesis.

3.1 Kapasitas lentur balok tampang persegi pasca bakar

Mengacu pada **Dipohusodo (1994)**, kapasitas momen nominal balok beton bertulang rangkap dapat dilakukan dengan terlebih dahulu mengasumsikan luas tulangan baja tekan (A_s') dan baja tarik (A_s) telah mencapai regangan luluh ($\varepsilon_s' \geq \varepsilon_y$), pada saat regangan serat tekan beton (ε_c') telah mencapai regangan maksimum sebesar 0,003, seperti tampak pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram analisis balok beton bertulangan rangkap pada pembebanan batas

Tegangan baja tarik dan baja desak telah luluh ($f_s = f_s' = f_y$), pada kondisi ini $A_s = A_{s1} + A_{s2}$ dimana $A_{s2} = A_s'$.

Gaya dalam untuk beton tekan (N_{D1}) dihitung menurut Persamaan (3.1).

$$N_{D1} = 0{,}85.f_c'.a.b \tag{3.1}$$

dengan: f_c' = kuat tekan beton, a = tinggi blok tegangan tekan beton, dan b = lebar balok

Gaya dalam untuk baja tekan (N_{D2}) dihitung menurut Persamaan (3.2).

$$N_{D2} = A_s'.f_y \tag{3.2}$$

Gaya dalam untuk baja tarik (N_T) dihitung menurut Persamaan (3.3).

$$N_T = A_s.f_y \tag{3.3}$$

Persamaan kesetimbangan untuk balok beton bertulangan rangkap adalah:

$$N_{D1} + N_{D2} = N_T \tag{3.4}$$

Dari persamaan (3.4) diatas dapat diuraikan menjadi Persamaan (3.5), yaitu:

$$0{,}85.f_c'.a.b + A_s'.f_y = A_s.f_y \tag{3.5}$$

Tinggi blok tegangan tekan beton untuk balok normal (a) dapat dihitung dengan Persamaan (3.6).

$$a = \frac{(A_s - A_s').f_y}{(0{,}85.f_c').b} \tag{3.6}$$

Letak atau posisi garis netral dari serat tekan terluar untuk balok normal (c) dapat dihitung dengan Persamaan (3.7).

$$c = \frac{a}{\beta_1} \tag{3.7}$$

dengan: $\beta_1 = 0{,}85$ untuk mutu beton ≤ 30 MPa.

Kontrol kebenaran asumsi diatas dilakukan dengan pemeriksaan regangan pada baja tulangan tekan (ε_s') dan tarik (ε_s) menggunakan Persamaan (3.8) dan (3.9).

$$\varepsilon_s' = 0{,}003.\frac{c-d'}{c} \tag{3.8}$$

$$\varepsilon_s = 0{,}003.\frac{d-c}{c} \tag{3.9}$$

Jika asumsi awal yang digunakan salah, maka kondisi tulangan baja tekan belum luluh ($\varepsilon_s' < \varepsilon_y$) sedangkan baja tarik telah luluh ($\varepsilon_s \geq \varepsilon_y$) pada saat regangan beton mencapai 0,003.

Letak garis netral pada balok normal (c) dihitung dari keseimbangan gaya-gaya horisontal ($\Sigma H = 0$) pada persamaan berikut:

$$N_{D1} + N_{D2} = N_T \tag{3.4}$$

$$0{,}85.f_c'.a.b + A_s'.f_y = A_s.f_y \tag{3.5}$$

Tinggi blok tegangan tekan beton normal (a) dan tegangan luluh baja tekan (f_s') dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$a = \beta_1.c \tag{3.10}$$

$$f_s' = \varepsilon_s'.E_s = \frac{(c-d')0{,}003}{c}.E_s \tag{3.11}$$

dengan: E_s = modulus elastisitas baja = 200.000 MPa.

Dari subtitusi Persamaan (3.5), (3.10) dan (3.11) didapatkan persamaan:

$$A_s.f_y = (0{,}85.f_c').b.\beta_1.c + 0{,}003\left(\frac{c-d'}{c}\right)E_s.A_s' \tag{3.12}$$

Jika Persamaan (3.12) dikalikan dengan (c) didapatkan Persamaan (3.13).

$$A_s.f_y.c = (0{,}85.f_c')b.\beta_1.c^2 + 0{,}003\left(\frac{c-d'}{c}\right)E_s.A_s'c - d'(0{,}003)E_s.A_s' \qquad (3.13)$$

Dari Persamaan (3.13) dimasukkan nilai modulus elastisitas baja (E_s) sehingga didapatkan Persamaan (3.14).

$$(0{,}85.f_c'b.\beta_1)c^2 + (600.A_s' - A_s.f_y)c - 600.d'.A_s' = 0 \qquad (3.14)$$

Mengacu kepada penelitian yang dilakukan oleh **Long (2000)**, kuat tekan beton pasca bakar ($f_c'_\theta = 0{,}50.f_c'$) dan modulus elastisitas beton pasca bakar ($E_{c\theta} = 0{,}20.E_c$) sehingga ($f_c'_\theta < f_c'$) dan ($E_{c\theta} < E_c$).

Tegangan luluh baja pasca bakar sebanding dengan tegangan luluh baja pada suhu normal ($f_{y\theta} = f_y$) (**Al-Mutairi dan Al-Shaleh, 1997**).

dengan: θ adalah menyatakan kondisi pasca bakar suhu 600 °C.

Letak atau posisi garis netral dari serat tekan terluar untuk balok pasca bakar suhu 600 °C (c_θ) dihitung menurut persamaan kuadrat pada Persamaan (3.14).

$$(0{,}85(0{,}5.f_c')b.\beta_1)c_\theta^{\,2} + (600.A_s' - A_s.f_y)c_\theta - 600.d'.A_s' = 0 \qquad (3.15)$$

Tinggi blok tegangan tekan beton untuk balok pasca bakar suhu 600°C (a_θ) dihitung menurut Persamaan (3.16).

$$a_\theta = \beta_1.c_\theta \qquad (3.16)$$

Rasio tinggi blok tegangan tekan beton untuk balok pasca bakar dan tinggi blok tegangan tekan beton untuk balok normal, diperoleh Persamaan (3.17).

$$\frac{a_\theta}{a} = \frac{\beta_1.c_\theta}{\beta_1.c} \qquad (3.17)$$

Akibat suhu tinggi kuat desak beton pasca bakar menurun ($f_{c\theta}' < f_c'$) sehingga tinggi blok tegangan tekan beton pasca bakar semakin besar ($a_\theta > a$).

Tegangan yang terjadi pada tulangan baja tekan pada balok normal (f_s') dan balok pasca bakar suhu 600 °C ($f_{s\theta}'$) dihitung dengan Persamaan (3.18) dan (3.19).

$$f_s' = \frac{c - d'}{c}(600) \tag{3.18}$$

$$f_{s\theta}' = \frac{c_\theta - d'}{c_\theta}(600) \tag{3.19}$$

Kapasitas momen nominal balok normal (M_n) dihitung dengan Persamaan (3.20).

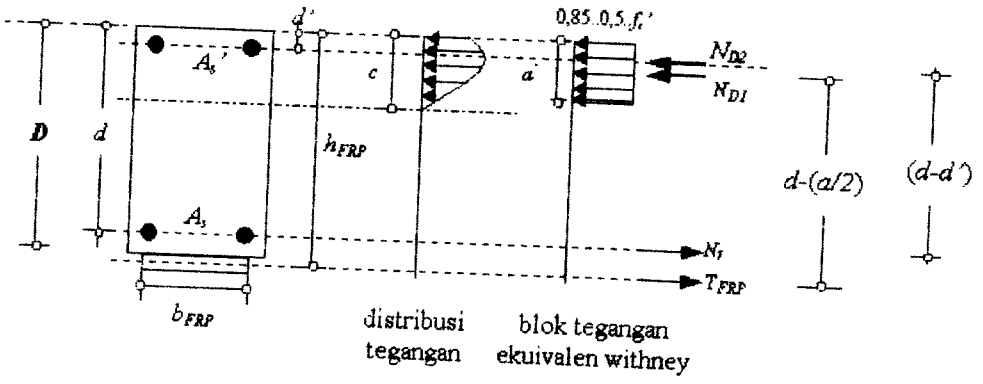
$$M_n = 0{,}85.f_c'.a.b\left(d - \frac{a}{2}\right) + A_s'.f_s'(d - d') \tag{3.20}$$

Kapasitas momen nominal balok pasca bakar ($M_{n\theta}$) dihitung dengan Persamaan (3.21).

$$M_{n\theta} = 0{,}85(0{,}5.f_c')a_\theta.b\left(d - \frac{a_\theta}{2}\right) + A_s'.f_s'(d - d') \tag{3.21}$$

3.2 Kapasitas lentur balok beton bertulang pasca bakar dengan TFC

Analisis perkuatan balok dengan TFC dapat dilakukan dengan terlebih dahulu memperhatikan Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Diagram kesetimbangan gaya dalam dengan perkuatan TFC

Mengacu pada persamaan yang diberikan oleh **GangaRao dan Vijay (1998)**, Kapasitas momen nominal balok pasca bakar dengan perkuatan TFC ($M_{n\theta P}$) dihitung menurut Persamaan (3.21), dimana tulangan baja tekan belum luluh ($\varepsilon_s' < \varepsilon_y$) sedangkan baja tarik telah luluh ($\varepsilon_s \geq \varepsilon_y$), tinggi garis netral dari serat tekan terluar balok beton bertulang pasca bakar dengan perkuatan TFC ($c_{\theta P}$) dihitung terlebih dahulu dengan Persamaan (3.22).

$$(0{,}85(0{,}50.f_c')b.\beta_1)c_{\theta P}^{\,2} + (600.A_s' - A_s.f_y)c_{\theta P} - 600.d'.A_s' = 0 \qquad (3.22)$$

Tinggi blok tegangan tekan beton pasca bakar dengan perkuatan TFC ($a_{\theta P}$) dihitung menurut Persamaan (3.23).

$$a_{\theta P} = \beta_1.c_{\theta P} \qquad (3.23)$$

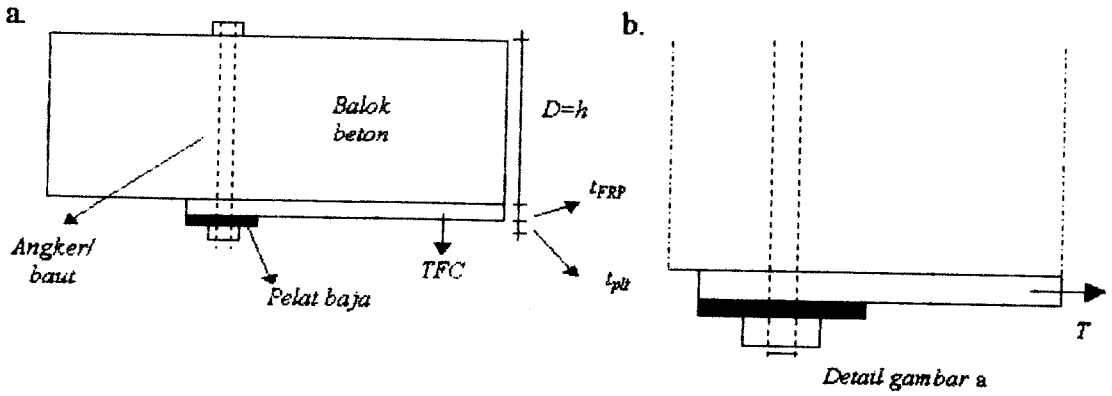
Kapasitas momen nominal balok pasca bakar yang diperkuat dengan TFC ($M_{n\theta P}$) dihitung menurut Persamaan (3.24).

$$M_{n\theta P} = 0{,}85\,(0{,}50.f_c')\,a_{\theta P}.b\left(d - \frac{a_{\theta P}}{2}\right) + A_s'.f_s'(d - d') + A_{FRP}.f_{FRP}\left(D + \frac{t_{FRP}}{2} - \frac{a_{\theta P}}{2}\right) \qquad (3.24)$$

dengan: t_{FRP} = tebal TFC, A_{FRP} = luas penampang TFC, dan f_{FRP} = tegangan leleh TFC.

3.3 Tegangan geser angkur (baut) pada ujung TFC

Mekanisme kerja baut sebagai penambah kekuatan lekat pada ujung TFC dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Mekanisme gaya geser yang terjadi pada angkur (baut)

Kapasitas geser angkur (baut) akibat gaya geser ujung TFC (T) dihitung dengan persamaan (3.25) dan (3.26), spesifikasi AISC-LRFD (**Burns, 1995**).

$$\phi R_{nv} = \phi \text{ (kuat rencana} \times A_b) = 0{,}75.r_1.f_{ub}.A_b \geq R_u \text{ (kuat geser baut)} \qquad (3.25)$$

$$\phi R_{nt} = \phi(2{,}4).d_b.t_p.f_{ub} \quad \text{dimana } \phi = 0{,}75 \text{ (kuat tumpu baut)} \qquad (3.26)$$

Kapasitas tampang pelat ($\phi_t.P_n$) dengan spesifikasi AISC-LRFD (**Burns, 1995**) dihitung dengan persamaan (3.27) dan (3.28).

$$\phi_t.P_n = \phi_t.(f_y.A_g) \geq P_u \text{ untuk luas } bruto \qquad (3.27)$$

$$\phi_t.P_n = \phi_t.(f_u.A_{net}) \geq P_u \text{ untuk luas } netto \qquad (3.28)$$

dimana: P_n = kekuatan tarik nominal, $P_u = T_1$ = kekuatan tarik yang terjadi, ϕ_t = faktor reduksi untuk gaya tarik (0,9 untuk luas *bruto* dan 0,75 untuk luas *netto*), f_y = tegangan luluh baja, dan f_u = tegangan ultimit baja.

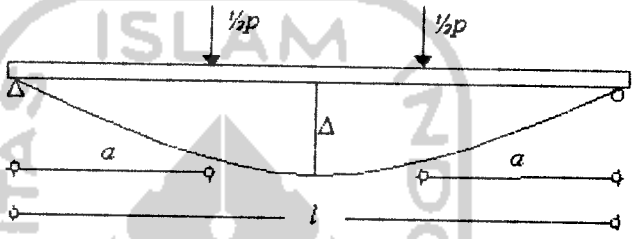
Luas *bruto* (A_g) dan luas *netto* (A_{net}) berturut-turut dapat dihitung dengan persamaan (3.29) dan (3.30).

$$A_g = \text{lebar pelat} \times \text{tebal pelat} \qquad (3.29)$$

$$A_{net} = A_g - [\text{jumlah baut} \times (\text{diameter baut} + 3{,}175\ mm) \times \text{tebal pelat}] \quad (3.30)$$

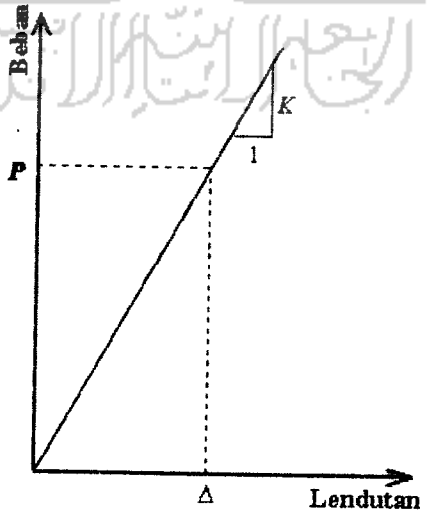
3.4 Hubungan beban-lendutan (P-Δ)

Pengaruh beban transversal (P) yang bekerja pada bentang balok menyebabkan terjadinya lendutan maksimum ditengah bentang balok (Δ) seperti pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Lendutan balok

Kekakuan balok (K) dapat dihitung dari rasio beban (P) terhadap lendutan (Δ), seperti pada Persamaan (3.31) yang diberikan oleh **West (1980)**. Hal ini sesuai dengan kurva hubungan beban-lendutan (P-Δ) yang ditampilkan seperti pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Kurva kekakuan (K) balok

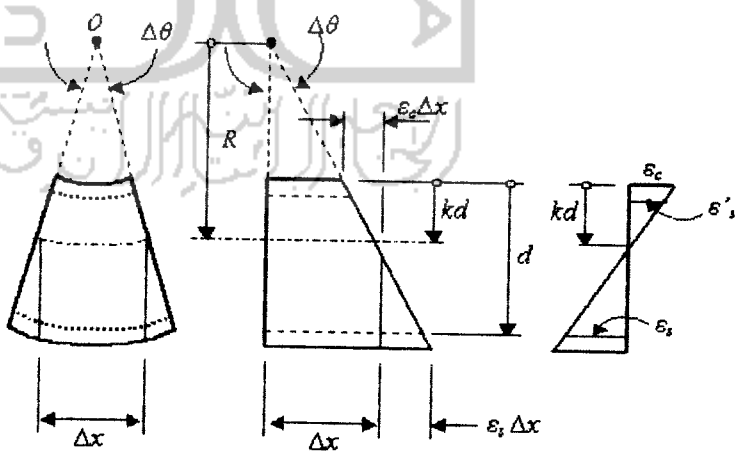
$$K = \frac{P}{\Delta} \tag{3.31}$$

3.5 Hubungan momen-kelengkungan (M-κ)

Hubungan momen-kelengkungan meliputi kelengkungan balok (κ), persamaan diferensial defleksi balok, momen-kelengkungan kondisi retak (M_{cr}-κ_{cr}), momen-kelengkungan saat leleh pertama (M_y-κ_y), dan momen-kelengkungan ultimit (M_u-κ_u).

3.5.1 Kelengkungan balok (κ)

Sebuah segmen balok yang semula lurus kemudian mengalami *deformasi* lentur (lihat Gambar 3.6) akan menyebabkan sumbu *defleksi* (kurva elastis) balok tersebut akan terlihat melentur dengan radius R dari pusat kurva O. Pada balok yang mengalami *deformasi*, sudut yang termasuk antara dua irisan yang berdampingan besarnya diwakili oleh $\Delta\theta$ (**Warner dkk, 1998**).



Gambar 3.6 Kelengkungan, deformasi lenturan pada balok

Kelengkungan berbanding terbalik dengan radius kelengkungan (R) dari garis netral, oleh karena $\Delta\theta = \Delta x$ /R, maka didapatkan kelengkungan (κ):

$$\kappa = \frac{\Delta\theta}{\Delta x} \tag{3.32}$$

Kelengkungan balok (κ) selalu berhubungan dengan regangan yang terjadi pada serat terluar bagian desak beton dan regangan pada baja tarik. Perpendekan total pada serat terluar bagian desak beton ($\varepsilon_c \Delta x$) saat terjadi perpanjangan pada regangan tarik baja dengan jarak d yaitu ($\varepsilon_s \Delta x$). Besar sudut $\Delta\theta$ dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\Delta\theta = \frac{1}{d}\left(\varepsilon_c . \Delta x + \varepsilon_s . \Delta x\right) \tag{3.33}$$

Selanjutnya didapat persamaan kelengkungan (κ) yaitu:

$$\kappa = \frac{\varepsilon_c + \varepsilon_s}{d} = \frac{\varepsilon_c}{k.d} = \frac{\varepsilon_s}{d(1-k)} \tag{3.34}$$

dengan: ε_c = regangan beton, ε_s = regangan baja, d = tinggi efektif penampang, dan kd = tinggi garis netral.

Dari Persamaan (3.34), untuk mendapatkan kelengkungan (κ) diperlukan data regangan pada balok beton dan baja tulangan dengan cara memasang *strain gauge*, namun pada penelitian ini pengujian tersebut tidak dilakukan.

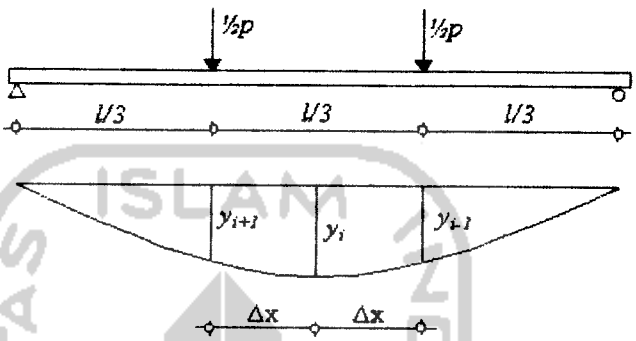
Mengacu pada Gambar 3.6, hubungan momen-kelengkungan untuk batang yang mengalami lentur murni akan diperoleh persamaan dasar kelengkungan (κ):

$$\kappa = \frac{1}{R} = \frac{M}{EI} \tag{3.35}$$

Persamaan ini menjelaskan hubungan momen lentur (M) pada irisan balok, yang mempunyai momen inersia (I) terhadap sumbu netral pada kurva kelengkungan $1/R$.

3.5.2 Persamaan differensial defleksi balok

Dari hasil pengujian kuat lentur balok diperoleh lendutan (*defleksi*) pada titik-titik diskrit yaitu y_i, y_{i+1}, dan y_{i-1}, dengan jarak yang sama besar yaitu sebesar Δx seperti yang terlihat pada Gambar (3.7).



Gambar 3.7 Lendutan (*defleksi*) pada titik-titik diskrit

Pendekatan metode *centered difference* yang pengembangannya menggunakan deret Taylor (**Chapra dan Canale, 1989**) adalah:

$$f(y_{i+1}) = f(y_i) + f'(y_i)\Delta x + \frac{f''(y_i)}{2}.\Delta x^2 + ... \tag{3.36}$$

Turunan kedua dari Persamaan (3.29) adalah:

$$f(y_{i+2}) = f(y_i) + f'(y_i)2\Delta x + \frac{f''(y_i)}{2}.(2\Delta x)^2 + ... \tag{3.37}$$

Jika Persamaan (3.36) dikalikan 2 selanjutnya untuk mengurangkan Persamaan (3.37), maka akan diperoleh:

$$f(y_{i+2}) - 2f(y_{i+1}) = -f(y_i) + f''(y_i)\Delta x^2 \tag{3.38}$$

$$f''(y_i) = \frac{f(y_{i+2}) - 2f(y_{i+1}) + f(y_1)}{\Delta x^2} \tag{3.39}$$

Untuk tengah bentang didapat:

$$f''(y_i) = \frac{f(y_{i+1}) - 2f(y_1) + f(y_{i-1})}{\Delta x^2} \tag{3.40}$$

Dimana **Popov (1983)** menyatakan:

$$f''(y_i) = \frac{d^2y}{dx^2} = \kappa \tag{3.41}$$

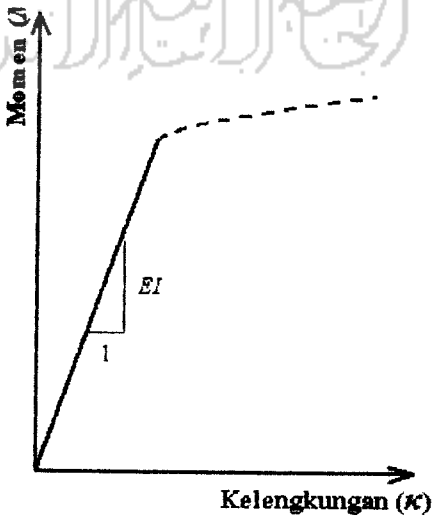
Berdasarkan Persamaan (3.41), dengan menggunakan tiga titik bantu yang letaknya berurutan diperoleh nilai kelengkungan balok (κ):

$$\kappa = \frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{\Delta x^2} \tag{3.42}$$

Mengacu pada struktur dengan pembebanan seperti Gambar 3.7, momen yang terjadi akibat gaya luar (M) didapatkan Persamaan (3.44).

$$M = \frac{1}{6}.PJ \tag{3.43}$$

Berdasarkan nilai yang didapat dari persamaan (3.42) dan (3.43) dapat dibuat kurva hubungan momen-kelengkungan (M-κ) seperti pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8 Kurva momen-kelengkungan (M-κ)

Pada Gambar 3.8 terlihat jelas bahwa faktor kekakuan (EI) adalah rasio dari momen yang terjadi akibat gaya luar (M) terhadap kelengkungan balok (κ) dan faktor kekakuan (EI) ini dapat dihitung dengan Persamaan (3.44) (**West, 1980**).

$$EI = \frac{M}{\kappa} \tag{3.44}$$

3.5.3 Momen-kelengkungan kondisi retak (M_{cr}-κ_{cr})

Menurut **Wang dan Salmon (1992)** momen retak untuk balok normal (M_{cr}) dimana terjadinya retak yang pertama kali dihitung menurut Persamaan (3.45).

$$M_{cr} = \frac{f_r I_g}{y_t} \tag{3.45}$$

Mengacu pada Persamaan (3.45) momen retak untuk balok pasca bakar ($M_{cr\theta}$) dihitung menurut Persamaan (3.46).

$$M_{cr\theta} = \frac{f_{r\theta} I_g}{y_t} \tag{3.46}$$

dengan: I_g = momen inersia balok sebelum retak, f_r = modulus keruntuhan untuk beton normal yang diberikan oleh ACI adalah sebesar = $0{,}75\sqrt{f'_c}$, y_t = jarak garis netral dari serat terluar beton tarik, dan $f_{r\theta}$ = modulus keruntuhan untuk beton pasca bakar adalah sebesar = $0{,}75\sqrt{f'_{c\theta}}$.

Untuk mendapatkan kelengkungan saat kondisi retak untuk balok normal (κ_{cr}), digunakan pendekatan menurut Persamaan (3.47) yang diberikan oleh **Warner dkk (1998)**.

$$\kappa_{cr} = \frac{M_{cr}}{E_c I_g} \tag{3.47}$$

dengan: E_c adalah modulus elastisitas beton = $4700\sqrt{f'_c}$.

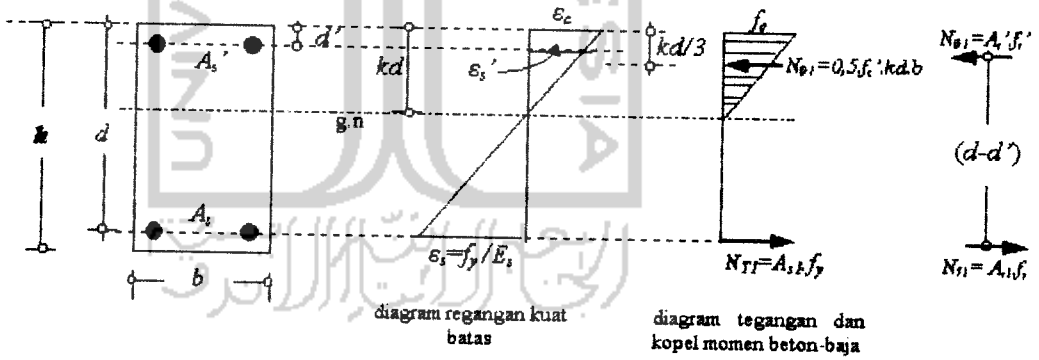
Mengacu pada Persamaan (3.47) kelengkungan saat kondisi retak untuk balok pasca bakar ($\kappa_{cr\theta}$), digunakan pendekatan menurut Persamaan (3.48).

$$\kappa_{cr\theta} = \frac{M_{cr\theta}}{E_{c\theta} I_g} \tag{3.48}$$

dengan: $E_{c\theta}$ adalah modulus elastisitas beton pasca bakar = $0{,}2(4700\sqrt{f_c'})$.

3.5.4 Momen-kelengkungan pada saat luluh pertama (M_y-κ_y)

Mengacu pada Gambar (3.9) dimana baja tulangan tarik telah luluh dan baja tulangan tekan belum luluh ($\varepsilon_s' < f_y / E_s$). Momen pada saat luluh pertama untuk balok normal (M_y) dihitung menurut Persamaan (3.49) **(Winter dan Nilson, 1993)**.



Gambar 3.9 Balok persegi dengan tulangan rangkap pada saat leleh pertama

$$M_y = A_s.f_y.\left(d - \frac{kd}{3}\right) \tag{3.49}$$

Mengacu pada Persamaan (3.49) momen pada saat luluh pertama untuk balok pasca bakar ($M_{y\theta}$) dihitung menurut Persamaan (3.50).

$$M_{y\theta} = A_s . f_y . \left(d - \frac{k_\theta d}{3} \right) \tag{3.50}$$

Menurut **Park dan Paulay (1975)** kelengkungan pada saat luluh pertama untuk balok normal (κ_y) dihitung menurut Persamaan (3.51) oleh **Santosa dan Iswahyudi (2000)**.

$$\kappa_y = \frac{\varepsilon_s}{d(1-k)} = \frac{f_y / E_s}{d(1-k)} \tag{3.51}$$

Faktor tinggi garis netral (k) dihitung menurut Persamaan (3.52) (**Park dan Paulay, 1975**).

$$k = \left[(\rho + \rho')^2 . n^2 + 2\left(\rho + \frac{\rho' d'}{d} \right) n \right]^{\frac{1}{2}} - (\rho + \rho') n \tag{3.52}$$

dengan: $\rho = A_s / bd$ dan $\rho' = A_s' / bd$, dan rasio modulus elastisitas $n = E_s / E_c$

Kelengkungan pada saat luluh pertama untuk balok pasca bakar ($\kappa_{y\theta}$) dihitung menurut Persamaan (3.53).

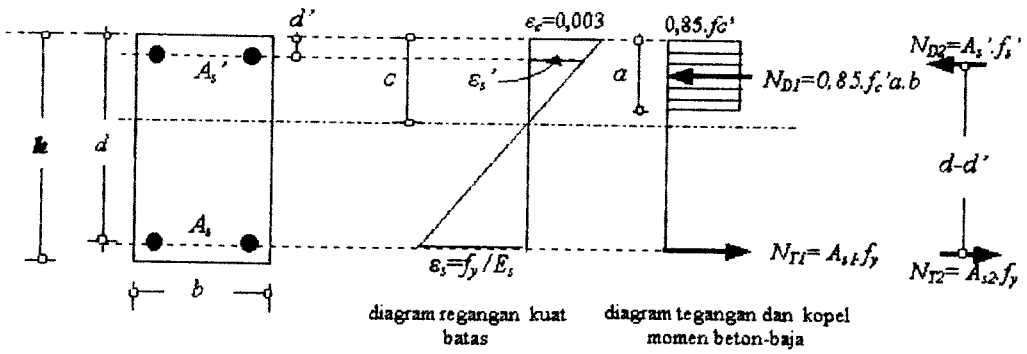
$$\kappa_{y\theta} = \frac{\varepsilon_s}{d(1-k_\theta)} = \frac{f_y / E_s}{d(1-k_\theta)} \tag{3.53}$$

Faktor tinggi garis netral untuk balok pasca bakar (k_θ) dihitung menurut Persamaan (3.54).

$$k_\theta = \left[(\rho + \rho')^2 . n_\theta^{\,2} + 2\left(\rho + \frac{\rho' d'}{d} \right) n_\theta \right]^{\frac{1}{2}} - (\rho + \rho') n_\theta \tag{3.54}$$

3.5.5 Momen-kelengkungan ultimit (M_u-κ_u)

Mengacu pada Gambar (3.10) dimana baja tulangan tarik telah luluh dan baja tulangan tekan belum luluh ($\varepsilon_s' < f_y / E_s$), momen pada kondisi ultimit untuk balok normal (M_u) dihitung menurut Persamaan (3.20).



Gambar 3.10 Balok persegi dengan tulangan rangkap pada kondisi ultimit

$$M_n = 0{,}85.f_c'.a.b\left(d-\frac{a}{2}\right)+A_s'.f_s'(d-d') \tag{3.20}$$

Momen pada kondisi ultimit untuk balok pasca bakar ($M_{u\theta}$) dihitung menurut Persamaan (3.21).

$$M_{n\theta} = 0{,}85.(0{,}50.f_c').a_\theta.b\left(d-\frac{a_\theta}{2}\right)+A_s'.f_{s\theta}'(d-d') \tag{3.21}$$

Kelengkungan pada kondisi ultimit untuk balok normal (κ_u) dihitung menurut Persamaan (3.55) (**Park dan Paulay, 1975**).

$$\kappa_u = \frac{\varepsilon_{cu}}{c} = \frac{\varepsilon_{cu}.\beta_1}{a} \tag{3.55}$$

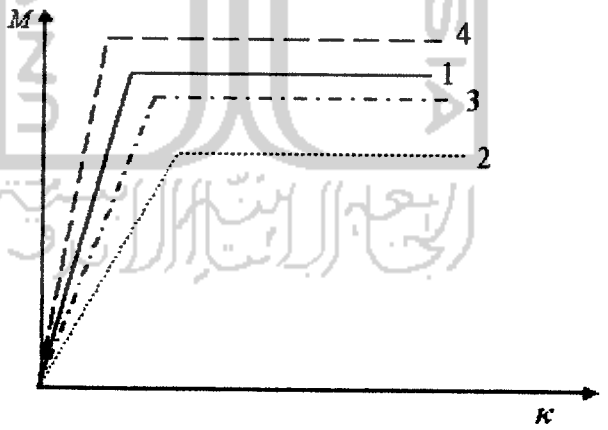
Kelengkungan pada kondisi ultimit untuk balok pasca bakar ($\kappa_{u\theta}$) dihitung menurut Persamaan (3.56).

$$\kappa_{u\theta} = \frac{\varepsilon_{cu}}{c_\theta} = \frac{\varepsilon_{cu}.\beta_1}{a_\theta} \tag{3.56}$$

3.6 Hipotesis

Mengacu pada landasan teori diatas, dapat dibuat suatu hipotesa grafik hubungan momen-kelengkungan (M-κ) sehingga dapat dilihat faktor kekakuan (EI) seperti yang terlihat pada Gambar (3.11), maka:

1. balok normal (BN) tidak dibakar (Kurva 1),
2. balok pasca bakar tanpa perkuatan TFC (BPB) (Kurva 2) mengalami penurunan faktor kekakuan (EI), dan
3. balok pasca bakar dengan perkuatan TFC (BPBT) (Kurva 3) mengalami peningkatan faktor kekakuan (EI) mendekati balok normal.
4. balok pasca bakar dengan perkuatan TFC (BPBT) (Kurva 4) mengalami peningkatan faktor kekakuan (EI) melebihi balok normal.



Gambar 3.11 Grafik hubungan momen-kelengkungan (M-κ)

BAB IV

METODOLOGI PENELITIAN

Hal-hal yang dikemukakan dalam metodologi penelitian ini meliputi metode penelitian, bahan dan peralatan, pelaksanaan penelitian, pembuatan benda uji, perawatan benda uji, pembakaran benda uji, perkuatan lentur struktur balok beton bertulang, dan pengujian benda uji.

4.1 Metode penelitian

Metode penelitian mengemukakan prosedur (urutan) tata cara pelaksanaan penelian dengan tujuan mencari jawaban atas masalah penelitian yang diajukan dalam penulisan tugas akhir.

4.2 Bahan dan peralatan

Bahan dan peralatan meliputi bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian dan peralatan yang digunakan dalam penelitian.

4.2.1 Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian

Bahan–bahan yang digunakan dalam pembuatan sampel penelitian tugas akhir ini meliputi semen, agregat, air, baja tulangan, kawat beindrat, papan kayu, bahan perkuatan lentur, dan angkur (baut) dan pelat baja.

4.2.1.1 Semen

Semen yang dipakai Type 1 (kemasan 50 kg), yang digunakan sebagai bahan perekat adukan beton.

4.2.1.2 Agregat

Agregat yang digunakan terdiri dari agregat kasar dan agregat halus.

a. Agregat kasar

Agregat kasar yang dipakai berupa batu pecah (*split*), berasal dari Clereng Kulon Progo, Yogyakarta. Dengan ukuran butir maksimum 20 mm.

b. Agregat halus

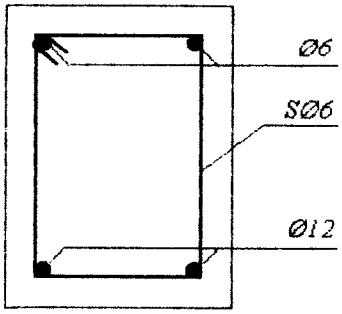
Agregat halus yang digunakan berupa pasir yang diambil dari kali Progo, Sleman Yokyakarta. Dengan diameter lolos saringan 4,8 mm.

4.2.1.3 Air

Air yang digunakan berasal dari Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik, FTSP Universitas Gajah Mada.

4.2.1.4 Baja tulangan

Pada penelitian ini tulangan yang akan digunakan pada benda uji balok beton bertulang adalah baja tulangan polos BJTP-6 sebagai tulangan desak dan tulangan sengkang serta BJTP-12 sebagai tulangan tarik (Gambar 4.1). Pengujian tarik baja dilakukan untuk mengetahui kuat luluh baja tulangan yang akan digunakan.



Gambar 4.1 Penampang balok beton bertulang

4.2.1.5 Kawat beindrat

Kawat beindrat digunakan untuk mengikat tulangan baja tarik dan tekan pada tulangan sengkang.

4.2.1.6 Papan kayu

Papan kayu ini digunakan sebagai bahan cetakan (sampel) benda uji, agar didapat ukuran yang tepat dan permukaan yang rata sehingga sesuai dengan ukuran yang direncanakan dengan ketebalan papan kayu lebih kurang 12 mm.

4.2.1.7 Bahan perkuatan lentur

Bahan perkuatan lentur yang dipakai pada penelitian ini adalah bahan komposit non-logam yang terbuat dari serat carbon CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Plastics*) yaitu TFC–*Carbon Fibre Fabrics* (*Tissu de Fibres de Carbone*) dengan kombinasi perekat (*epoxy*) TFC–RESIN (XEP 3935 A / 2919 B). TFC dipilih sebagai bahan perkuatan balok beton bertulang yang mengalami penurunan kekuatan lentur akibat pembakaran. Lebar dan ketebalan TFC yang digunakan pada penelitian ini berturut-

turut 10 mm dan 0,43 mm, memiliki tegangan luluh 840 MPa, dan modulus elastisitas bahan 105.000 MPa (Lampiran 8.1).

4.2.1.8 Angkur (baut) dan pelat baja

Angkur (baut) digunakan sebagai pengait kedua ujung dari lembaran TFC sedangkan pelat baja berfungsi sebagai penjepit lembaran TFC sehingga lembaran TFC dapat terkait lebih kuat pada angkur (baut). Kombinasi kedua bahan ini dapat mencegah terjadinya *debonding failure* pada kedua ujung TFC. Angkur (baut) yang digunakan pada penelitian ini berdiameter 10 mm, dan dimensi pelat baja yang digunakan adalah 5 mm x 100 mm x 75 mm.

4.2.2 Alat yang digunakan dalam penelitian

Alat yang digunakan dalam penelitian ini merupakan sarana untuk membantu kelancaran pelaksanaan penelitian. Alat-alat yang digunakan meliputi saringan, timbangan, mistar dan kaliper, mesin uji kuat tarik, mesin uji kuat geser, mesin uji kuat desak, mesin pengaduk beton, *vibrator,* kerucut Abrams, tungku pembakaran, *burner, thermokopel*, dukungan sendi dan rol, *loading frame*, *dial gauge*, dan *hydraulic jack.*

4.2.2.1 Saringan

Untuk mendapatkan gradasi pasir dan batu pecah yang dibutuhkan alat yang digunakan adalah saringan. Ukuran saringan yang dipakai untuk pengujian pasir adalah 4,8; 2,4; 1,2; 0,6; 0,3; 0,15; 0,075 mm dan ukuran saringan untuk pengujian batu pecah adalah 19,1; 12,7; 9,52; 4,8; 2,4; 1,2; 0,6; 0,3; 0,15; 0,075 mm.

4.2.2.2 Timbangan

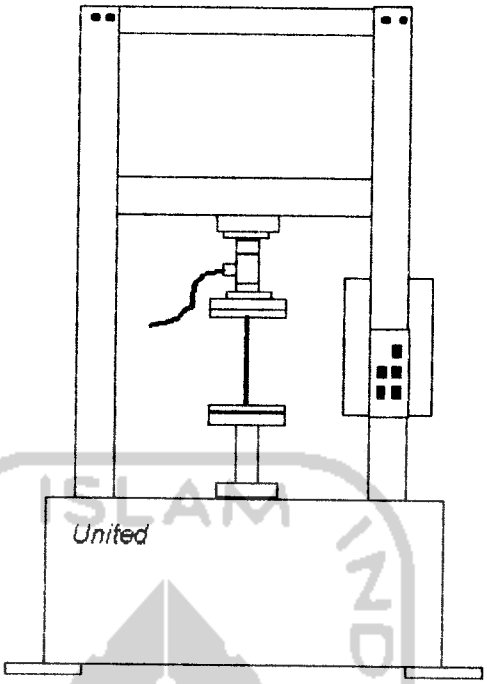
Timbangan yang dipakai dalam penelitian ini mempunyai kapasitas 500 kg dengan merek *Fa Gani,* yang digunakan untuk menimbang bahan penyusun campuran adukan beton (semen, pasir, kerikil, dan air). Timbangan halus berkapasitas 20 kg dengan merek *O' house* digunakan untuk menimbang pasir dan batu pecah pada saat melakukan uji berat jenis, berat volume agregat halus dan agregat batu pecah, dan modulus halus butir.

4.2.2.3 Mistar dan kaliper

Mistar logam digunakan untuk mengukur dimensi *bekisting* dan Kaliper digunakan untuk mengukur diameter tulangan baja.

4.2.2.4 Mesin uji tarik

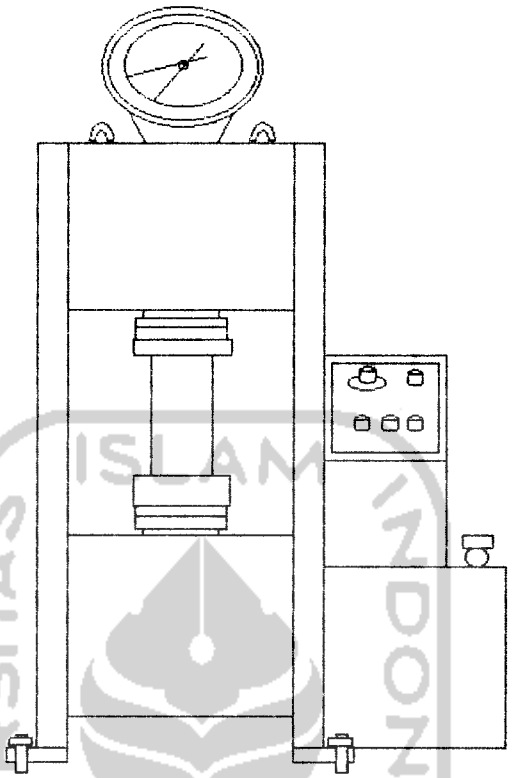
Mesin uji tarik digunakan untuk menguji kuat tarik dan kuat leleh baja tulangan dan plat baja. Pada penelitian ini alat yang dipakai UTM (Universal Testing Machine) merek *United* dengan kapasitas 13 ton, yang bentuknya adalah seperti pada Gambar 4.2, dan alat ini adalah milik Laboratorium PAU UGM.



Gambar 4.2 Mesin uji tarik baja tulangan

4.2.2.5 Mesin uji geser

Mesin uji geser digunakan untuk menguji kuat geser angkur (baut). Pada penelitian ini alat yang dipakai UTM (Universal Testing Machine) merek *Riehle* dengan kapasitas 25 ton, yang bentuknya adalah seperti pada Gambar 4.3, dan alat ini adalah milik Laboratorium BKT UGM.



Gambar 4.4 Mesin uji desak

4.2.2.7 Mesin pengaduk beton

Mesin pengaduk beton digunakan untuk memperoleh adukan bahan penyusun beton (semen, pasir, batu pecah, dan air) yang homogen dan baik, dengan kapasitas mesin 0,25 m^3 dengan merek *Golden Star Concrete Mixer*, milik Laboratorium Struktur UGM.

4.2.2.8 *Concrete Vibrator*

Concrete vibrator berfungsi untuk membantu pada saat pemadatan beton. Alat ini menimbulkan getaran pada beton segar pada saat ditancapkan sehingga beton akan

menjadi padat, merata dan tidak berongga saat pengecoran sehingga bahaya keropos dapat dicegah. *Concrete vibrator* yang digunakan pada penelitian ini bermerek *Maruto Machine Testing*, milik Laboratorium Struktur UGM.

4.2.2.9 Kerucut abrams

Kerucut abrams digunakan untuk mengukur tingkat kelecakan beton, tinggi kerucut 300 mm, diameter bawah 200 mm, dan diameter atas 100 mm, yang dilengkapi dengan alat penumbuk yaitu besi dengan panjang 600 mm dengan diameter 16 mm, milik Laboratorium Struktur UGM.

4.2.2.10 Tungku pembakaran

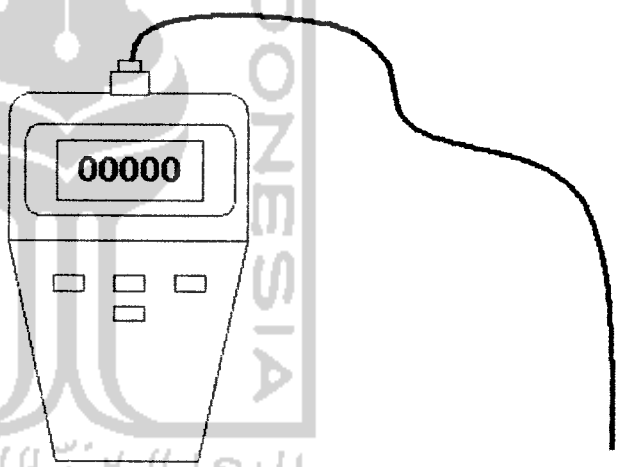
Tungku pembakaran digunakan untuk memanaskan benda uji hingga mencapai suhu 600 °C, sedangkan kapasitas suhu maksimum tungku dapat mencapai suhu 1300 °C. Tungku pembakaran yang dipakai pada penelitian ini adalah salah satu alat yang sudah disediakan oleh Laboratorium Struktur UGM.

4.2.2.11 *Burner*

Burner digunakan sebagai alat bakar benda uji, yang semburan apinya diarahkan kedalam tungku pembakaran, sehingga didapatkan suhu yang merata seperti yang diinginkan yaitu 600 °C. Panas yang dapat dihasilkan oleh satu *burner* dalam tungku pembakaran dapat mencapai suhu 250 hingga 300 °C. Dalam penelitian ini *burner* yang digunakan sebanyak dua buah, dengan merek *Ray Öl & Gasbremer* (Gambar L 7.6) yang sudah disediakan oleh Laboratorium Struktur UGM.

4.2.2.12 *Thermo couple*

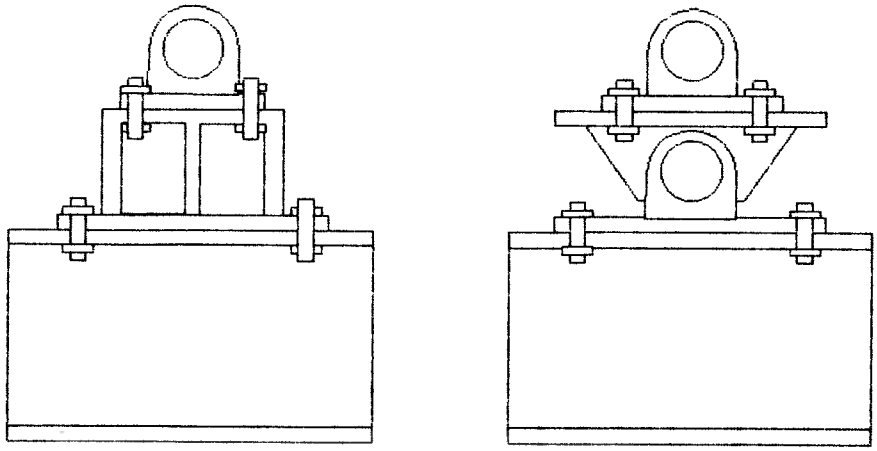
Thermo couple adalah alat yang dipakai untuk mengukur temperatur didalam tungku saat pembakaran, temperatur maksimum yang dapat diukur oleh alat ini dapat mencapai 1200 °C, merek *thermo couple* yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Hye HanYoung*, berfungsi untuk menyetel batas maksimum suhu yang diinginkan yaitu 600 °C dan *Digi-Sense* adalah alat yang digunakan untuk membaca perubahan suhu yang terjadi seperti yang tampak pada Gambar 4.5, dan alat ini adalah milik Laboratorium Struktur UGM.



Gambar 4.5 *Thermo couple*

4.2.2.13 Dukungan sendi dan rol

Agar mendekati perilaku balok sederhana (*simple beam*) pada pengujian lentur balok beton bertulang, salah satu ujung dari balok uji dipasang dukungan sendi seperti yang tampak Gambar 4.6.a dan pada ujung yang lain dipasang dukungan rol seperti yang tampak Gambar 4.6.b.

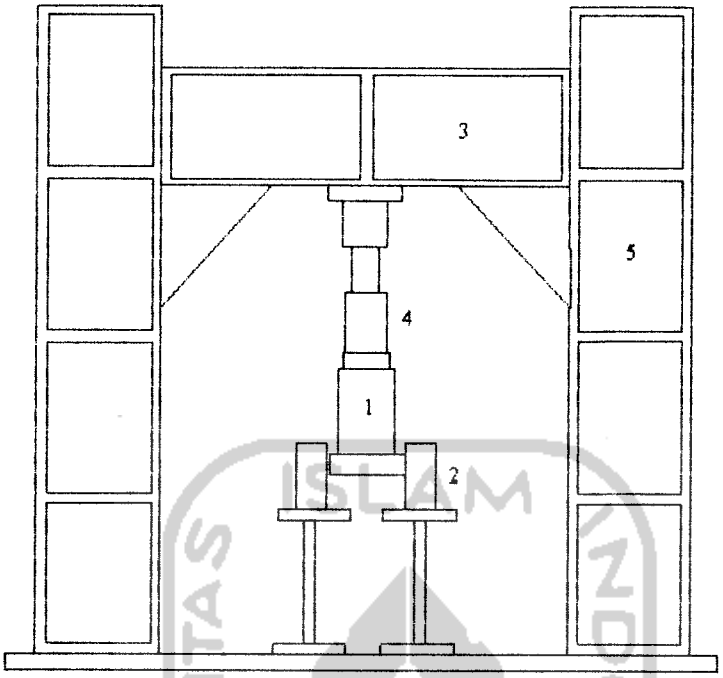


(a). Dukungan sendi (b). Dukungan rol

Gambar 4.6 Dukungan sendi dan rol

4.2.2.14 ***Loading frame***

Loading frame digunakan sebagai alat bantu untuk menahan beban pada saat pengujian lentur balok beton bertulang. Bentuk dasar *loading frame* berupa portal segi empat yang berdiri diatas lantai beton dengan pelat dasar kolom setebal 14 mm, agar *loading frame* tetap stabil pelat dasar dibaut kelantai beton dan kedua kolomnya dihubungkan dengan balok baja profil WF 450x200x9x14 mm. Posisi balok portal dapat diatur untuk menyesuaikan dengan bentuk dan ukuran benda uji dengan cara melepas sambungan baut. Bentuk dari *loading frame* dapat dilihat pada Gambar 4.7, dan alat ini adalah milik Laboratorium Strktur UII.

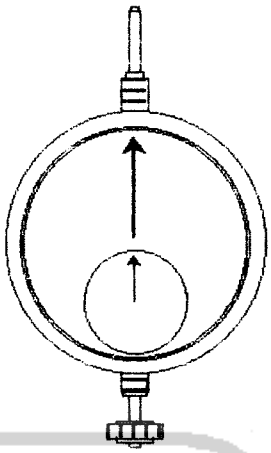


Keterangan:
1. balok uji,
2. dukungan,
3. balok portal,
4. hidraulic jack,
5. kolom.

Gambar 4.7 *Loading Frame*

4.2.2.15 *Dial gauge*

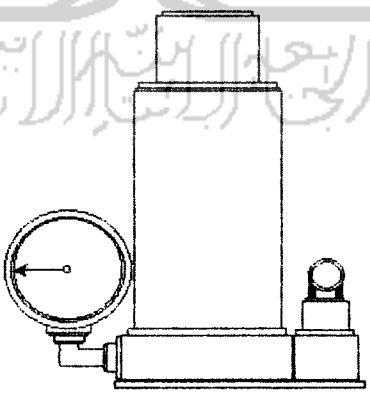
Dial gauge digunakan untuk mengukur besar lendutan balok beton bertulang, untuk pengukuran skala penuh digunakan *dial gauge* dengan kapasitas lendutan maksimum 50 mm dan ketelitian 0,01 mm, sedangkan pada pengukuran untuk balok kecil dipakai *dial gauge* dengan kapasitas lendutan maksimum 20 mm dengan ketelitian 0,01 mm, yang bentuknya dapat dilihat pada Gambar 4.8. Pada penelitian ini *dial gauge* yang digunakan sebanyak tiga buah, dan alat ini adalah milik Laboratorium Strktur UII.



Gambar 4.8 *Dial gauge*

4.2.2.16 *Hydraulic jack*

Hydraulic jack dipakai untuk memberikan beban pada pengujian lentur balok beton bertulang. Pada penelitian ini *hydraulic jack* yang digunakan mempunyai kapasitas 30 ton dengan ketelitian pembacaan sebesar 0,5 ton, seperti yang terlihat pada Gambar 4.9, dan alat ini adalah milik Laboratorium Strktur UII.



Gambar 4.9 *Hydraulic Jack*

4.3 Pelaksanaan penelitian

Pelaksanaan penelitian meliputi dua kegiatan pengujian utama yaitu pengujian bahan penelitian dan pengujian sampel balok beton bertulang.

4.3.1 Pengujian bahan penelitian

Pekerjaan persiapan penelitian meliputi pengujian pasir, batu pecah, baja tulangan, pelat baja, angkur (baut), dan perencanaan campuran adukan beton. Sedangkan untuk bahan perkuatan tidak dilakukan pengujian tapi diambil dari brosur yang diberikan produsen.

a. Uji pasir,

Uji pasir bertujuan untuk memperoleh berat jenis pasir keadaan kering permukaan jenuh (SSD) dan modulus halus butir pasir. Dari hasil pengujian didapat berat jenis SSD 2,558 t/m^3 dan modulus halus butir pasir 2,693, pengujian dilakukan di Laboratorium PAU UGM.

b. Uji batu pecah,

Uji batu pecah bertujuan untuk memperoleh berat jenis batu pecah keadaan kering permukaan jenuh (SSD) sebesar 2,576 t/m^3 dan berat volume kerikil sebesar 1,533 t/m^3, pengujian ini dilakukan di Laboratorium PAU UGM.

c. Uji tarik baja tulangan,

Pengujian kuat tarik baja tulangan dilakukan guna mengetahui kuat luluh baja tulangan yang akan digunakan pada balok uji, dari hasil pengujian diperoleh kuat luluh (f_y) baja tulangan tekan BJTP-6 sebesar 402 MPa dan untuk baja tulangan tarik digunakan BJTP-12 dengan kuat luluh sebesar 373,333 MPa, sehingga memenuhi kuat

luluh rencana sebesar 240 MPa. Pengujian kuat tarik baja ini dilakukan di Laboratorium PAU UGM.

d. Uji tarik pelat baja,

Pengujian kuat tarik pelat baja dilakukan guna mengetahui kuat tarik pelat baja yang akan digunakan pada balok uji, dari hasil pengujian didapatkan tegangan luluh sebesar 345 MPa. Pengujian kuat tarik pelat baja ini dilakukan di Laboratorium PAU UGM.

e. Uji geser baut (angkur),

Pengujian geser baut dilakukan dengan tujuan mengetahui kapasitas geser baut yang akan digunakan sebagai angkur pada balok uji, dari hasil pengujian diperoleh kuat geser baut sebesar 342,435 MPa, pengujian dilakukan di Laboratorium BKT UGM.

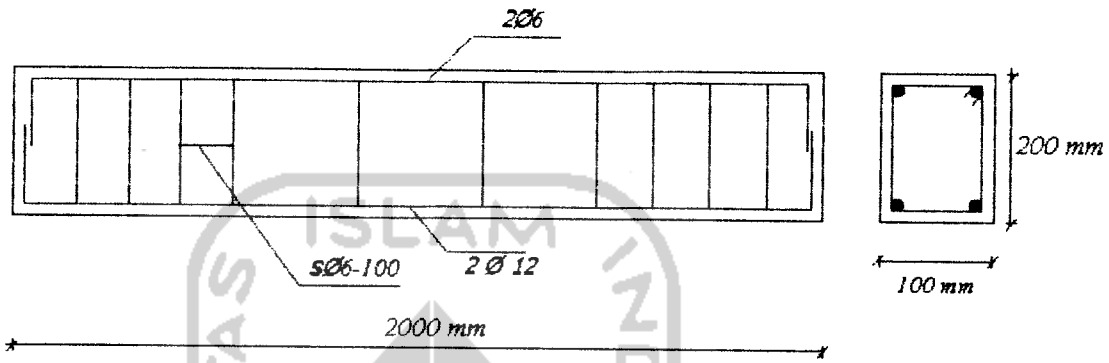
f. Perencanaan campuran adukan beton.

Perencanaan campuran adukan beton menggunakan cara yang direkomendasikan oleh ACI (*American Concrete Institute*), untuk setiap satu adukan beton diambil 6 sampel silinder beton (150x300) mm, dengan kuat desak rencana 20 MPa digunakan bahan penyusun beton yang terdiri dari semen 163,489 kg, pasir 308,761 kg, batu pecah 474,527 kg, dan air 89,486 lt, pelaksanaan pengadukan beton dilakukan di Laboratorium Struktur UGM.

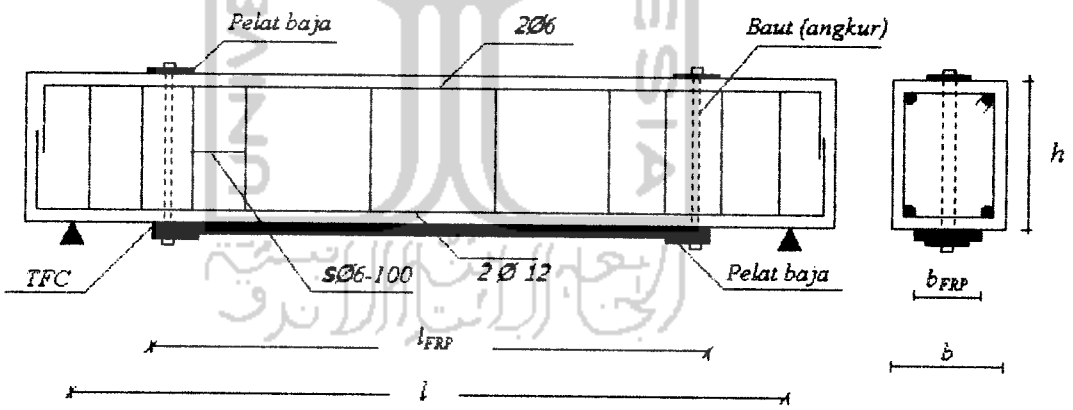
4.4 Pembuatan benda uji

Pembuatan benda uji dilakukan dengan membuat 9 buah sampel balok yang terdiri dari 6 balok tanpa perkuatan TFC (Gambar 4.10) dan 3 balok dengan perkuatan

TFC (Gambar 4.11), dan untuk keseluruhan balok dimensinya meliputi: lebar (b) 100 mm, tinggi (h) 200 mm, dan panjang (l) 2000 mm, pembuatan benda uji dilakukan di Laboratorium Struktur UGM.



Gambar 4.10 Model balok uji tanpa perkuatan TFC



Gambar 4.11 Perkuatan balok menggunakan TFC dengan penambahan baut (angkur)

4.5 Perawatan benda uji

Perawatan benda uji balok beton bertulang dilakukan agar permukaan beton segar selalu dalam keadaan lembab sampai beton dianggap cukup keras. Kelembaban

permukaan beton segar harus tetap dijaga agar proses hidrasi semen berlangsung baik. Apabila perawatan ini tidak dilakukan dikhawatirkan akan terjadi retak-retak pada beton dan kekuatan beton yang diinginkan tidak tercapai.

Perawatan benda uji balok beton bertulang dilakukan dengan menyelimuti balok memakai karung basah yang disiram setiap 2 hari sekali dalam waktu 30 hari.

4.6 Pembakaran benda uji

Pembakaran benda uji balok beton bertulang dengan menggunakan tungku dilakukan dengan tujuan untuk mendapatkan balok beton bertulang pasca bakar yang mendekati kondisi balok beton bertulang pasca bakar secara nyata. Untuk mendeteksi suhu pada saat proses pembakaran berlangsung digunakan 2 buah *thermo couple* yaitu 1 buah *thermo couple* untuk membaca kenaikan suhu pada saat proses pembakaran berlangsung dan 1 buah *thermo couple* pengatur suhu tungku yang sudah diset otomatis dengan *burner* sehingga dapat diperoleh suhu seperti yang diinginkan.

Pada penelitian ini balok uji yang dibakar terdiri dari 6 buah balok uji, dengan menggunakan tungku pembakaran yang dapat mencapai suhu maksimum 1300 °C. Balok uji dibakar pada suhu 600 °C selama kurang lebih 3 jam. Pembakaran balok uji baru dilakukan setelah beton berumur 90 hari dikarenakan, pada umur 90 hari beton dianggap sudah benar-benar stabil, sehingga kejadian pecahnya beton akibat panasnya suhu pada proses pembakaran dapat dihindari. Pada penelitian ini pembakaran benda uji menggunakan tungku yang terdapat di Laboratorium Struktur UGM.

4.7 Perkuatan lentur struktur balok beton bertulang

Perkuatan lentur balok beton bertulang dengan memasangkan TFC-*Carbon Fibre Fabrics* pada bagian permukaan lentur atau bagian bawah balok sepanjang 175 cm.

Sebelum tahap pemasangan TFC, terlebih dahulu dilakukan pekerjaan pengeboran balok beton dengan diameter lobang 12 mm (Gambar L 7.8), dan kemudian dilakukan pembersihan dan pengkasaran permukaan beton yang meliputi:

a. pekerjaan *chipping* dengan menggunakan gerinda yang tujuannya menciptakan permukaan kasar sedalam kurang lebih 2 mm (Gambar L 7.9), dan
b. pekerjaan pembersihan permukaan beton dengan sikat kawat yang dilaksanakan setelah pekerjaan *chipping*.

Tahap selanjutnya adalah pemasangan TFC yang meliputi pekerjaan:

a. pengukuran dan pemotongan TFC dilakukan sesuai dengan kebutuhan(Gambar L 7.10),
b. pengadukan *epoxy resin* sebagai lapisan perekat dari TFC, dimana dari dua komponen yang tersedia TFC–RESIN (XEP 3935 A / 2919 B) dicampur menjadi satu dan diaduk sampai merata (Gambar L 7.11),
c. pelapisan pertama *epoxy resin* pada permukaan beton sebagai perekat TFC dengan menggunakan kuas (Gambar L 7.12). Pemakaian *epoxy resin* ini lebih kurang 200 gram (terdiri dari campuran dua *epoxy resin* dengan perbandingan 1 : 1) yang akan dipakai untuk merekatkan TFC pada sisi permukaan bawah beton sebagai bagian yang menahan lentur,
d. pemasangan TFC segera setelah pelapisan *epoxy resin* pertama masih dalam keadaan basah. Pemasangan dilakukan dengan cara menekan degan

menggunakan *roller* sedemikian rupa sehingga sebagian *epoxy resin* meresap kedalam pori-pori TFC (Gambar L 7.13),

e. kedua ujung TFC dililit dan dijepit menggunakan pelat baja dan dikaitkan pada angkur (baut) (Gambar L 7.14),

f. selanjutnya dilakukan pelapisan *epoxy resin* sebagai lapisan penutup segera setelah pemasangan TFC, dan

g. setelah selesai pemasangan TFC selanjutnya adalah pengeringan *epoxy resin* yang dilakukan dengan pengeringan pada suhu ruang, selama 14 hari (Gambar L 7.15). Tempat pelaksanaan pemasangan TFC ini adalah di Laboratorium Struktur UGM.

4.8 Pengujian benda uji

Pengujian benda uji dilakukan setelah balok uji berumur lebih dari 90 hari, atau setelah proses pembakaran balok beton dan proses pemasangan TFC selesai.

Tahap pengujian sampel yang dilakukan dalam penelitian ini adalah:

1. menguji kuat tekan beton dengan cara uji tekan silinder (Gambar L 7.21),
2. menguji balok beton bertulang menggunakan beban statis dengan 2 titik pembebanan, yang dilakukan secara bertahap dimulai dari nol dengan interval kenaikan 250 kg (Gambar L 7.16, 17, 20). Besar lendutan yang terjadi pada saat balok beton bertulang diberi beban dapat diketahui dengan menggunakan *dial gauge.*

BAB V

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Hal-hal yang dikemukakan dalam hasil penelitian dan pembahasan ini meliputi hasil penelitian dan pembahasan.

5.1 Hasil penelitian

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan diperoleh data-data yang meliputi kuat desak beton, kuat tarik baja tulangan, uji lentur balok beton bertulang. Dari data hasil uji lentur ketiga jenis balok uji, dapat dibuat grafik hubungan beban-lendutan (P-Δ) dan hubungan momen-kelengkungan (M-κ) pada balok normal (BN), balok pasca bakar (BPB), dan balok pasca bakar dengan perkuatan TFC (BPBT). Perubahan-perubahan yang terjadi pada setiap grafik dapat dilihat dan dibandingkan, sehingga dari hubungan beban-lendutan (P-Δ) diketahui perubahan kekakuan dan dari hubungan momen-kelengkungan (M-κ) diketahui faktor kekakuan pada ketiga jenis balok uji.

5.1.1 Kuat desak beton

Tujuan dilakukan pengujian kuat desak silinder beton adalah untuk mengetahui kuat desak beton pada balok uji. Kuat desak beton rencana tergantung pada sifat-sifat agregat penyusun campuran, kualitas campuran, dan kualitas perawatan beton. Kuat desak beton yang dipakai berdasarkan hasil uji kuat desak silinder beton sebanyak 18 buah silinder beton dengan diameter 150 mm dan tinggi 300 mm. Kuat desak silinder

beton yang direncanakan 28 hari adalah sebesar 20 MPa dan pada penelitian ini pengujian dilakukan setelah beton berumur 90 hari. Dari hasil uji desak silinder beton diperoleh kuat desak (f'_c) sebesar 25,781 MPa, sehingga memenuhi kuat desak beton yang direncanakan (Gambar L 7.21). Hasil uji kuat desak silinder beton secara lengkap dapat dilihat pada Tabel L 4.2.

5.1.2 Kuat tarik baja tulangan

Tujuan pengujian kuat tarik baja tulangan dilakukan untuk mengetahui mutu baja tulangan yang dipakai pada benda uji balok beton bertulang (Gambar L 7.22). Hasil pengujian kuat tarik baja secara lengkap dapat dilihat pada Lampiran 3, secara garis besar hasil uji kuat tarik dan kuat leleh baja tulangan dapat dilihat pada Tabel 5.1.

Tabel 5.1 Hasil uji tarik baja tulangan

Diameter (mm)	**Tegangan leleh (f_y) (MPa)**	**Tegangan ultimit (f_u) (MPa)**
6	402	563,633
12	373,333	477,038

5.1.3 Pembakaran benda uji balok beton bertulang

Benda uji balok beton bertulang dibakar pada suhu 600 °C selama 3 jam dalam tungku pembakaran, dan untuk mencapai suhu 600 °C dibutuhkan waktu kurang lebih 30 menit. Pembakaran benda uji dilakukan dengan tujuan untuk memperoleh benda uji balok beton bertulang yang mengalami kerusakan atau penurunan kuat lentur pasca bakar (Gambar L 7.5, 6). Setelah proses pembakaran selesai, selanjutnya dilakukan pengamatan visual untuk mengetahui perubahan fisik balok beton bertulang pasca bakar. Perubahan fisik yang terjadi pada balok beton bertulang yang dibakar pada suhu 600 °C

selama 3 jam yaitu perubahan warna beton menjadi abu-abu dan sedikit barwarna pink, dan terjadi retak-retak rambut pada permukaan beton (Gambar L 7.7).

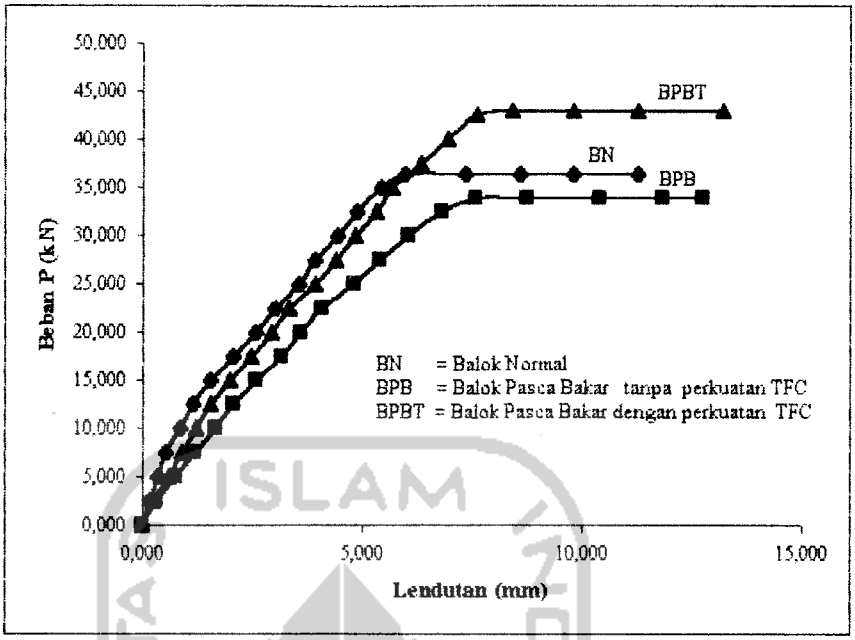
5.1.4 Uji lentur balok beton bertulang

Dari hasil pengujian lentur balok beton bertulang diperoleh data hubungan beban-lendutan (P-Δ) dan hubungan momen-kelengkungan (M-κ) dari balok normal (BN), balok pasca bakar (BPB), dan balok pasca bakar dengan perkuatan TFC (BPBT).

5.1.4.1 Hubungan beban-lendutan (P-Δ)

Pembebanan pada pengujian kuat lentur balok beton bertulang menggunakan dua titik pembebanan (P) akan menyebabkan lendutan (Δ) yang dicatat sesuai dengan interval kenaikan beban sebesar 250 Kg (2,5 kN) (Gambar L 7.16, 17, 20). Data hasil pengujian lentur secara lengkap dapat dilihat pada Tabel Lampiran 6.1, 6,2.

Hasil pengujian lentur pada balok normal (BN), balok pasca bakar (BPB), dan balok pasca bakar dengan perkuatan TFC (BPBT) (Tabel Lampiran 6.1, 6.2), digunakan untuk membuat grafik perbandingan hubungan beban-lendutan (P-Δ), seperti yang terlihat pada Gambar 5.1.



Gambar 5.1 Grafik perbandingan hubungan beban-lendutan rata-rata (P-Δ)

Grafik hubungan beban-lendutan (P-Δ) pada Gambar 5.1 terlihat bahwa pengaruh pembakaran akan menyebabkan lendutan (*defleksi*) yang semakin besar pada balok pasca bakar (BPB) dibanding balok normal (BN) dan balok pasca bakar dengan perkuatan TFC (BPBT). Dari hubungan beban-lendutan (P-Δ) akan diperoleh kekakuan lentur balok (K) yang dapat dilihat pada Tabel 5.2.

Tabel 5.2 Data hasil pengujian lentur balok beton bertulang rata-rata

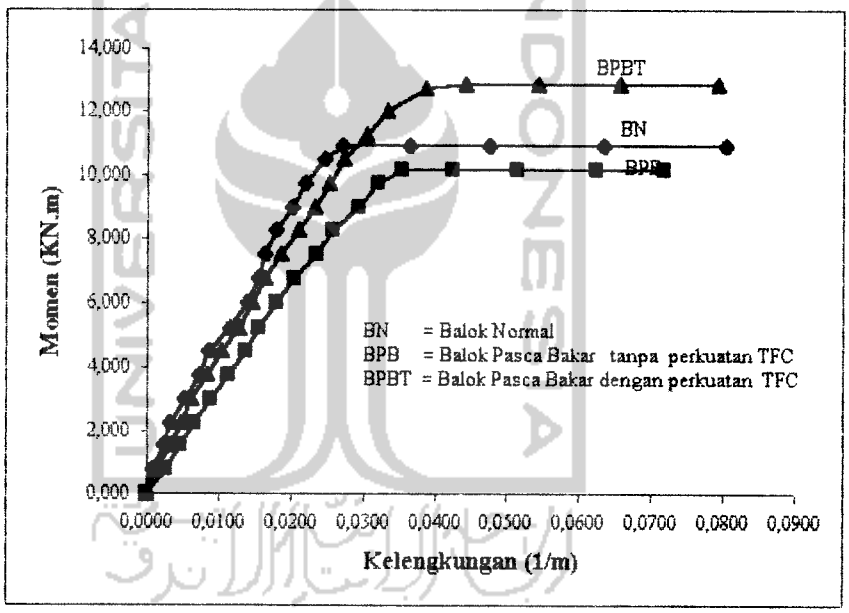
Benda Uji	**Beban P_y (kN)**	**Lendutan (Δ_y) (mm)**	**Kekakuan (K_y) (kN.mm^{-1})**	**Kekakuan (K_y) (%)**
BN	36,367	5,993	6,068	100,000
BPB	33,750	7,573	4,456	73,442
BPBT	42,917	8,430	5,091	83,899

Dari Tabel 5.2 dimana kekakuan (K) ditinjau pada kondisi luluh terlihat bahwa benda uji balok pasca bakar (BPB) kekakuan (K) turun sebesar 26,558 %, dan untuk

balok pasca bakar dengan perkuatan TFC (BPBT) kekakuan (K) turun sebesar 16,101 % dibanding balok normal (BN).

5.1.4.2 Hubungan momen-kelengkungan (M-κ)

Hasil pengujian lentur pada balok normal (BN), balok pasca bakar (BPB), dan balok pasca bakar dengan perkuatan TFC (BPBT) (Tabel Lampiran 6.1, 6.2), digunakan untuk membuat grafik hubungan momen-kelengkungan (M-κ), seperti yang terlihat pada Gambar 5.2.



Gambar 5.2 Grafik perbandingan hubungan momen-kelengkungan rata-rata (M-κ)

Grafik hubungan momen-kelengkungan (M-κ) pada Gambar 5.2 terlihat bahwa pengaruh pembakaran dapat menyebabkan kelengkungan balok (κ) semakin besar pada balok pasca bakar (BPB) dibanding balok normal (BN) dan balok pasca bakar dengan perkuatan TFC (BPBT). Dari hubungan momen-kelengkungan (M-κ) akan diperoleh faktor kekakuan balok (EI) yang dapat dilihat pada Tabel 5.3.

Tabel 5.3 Data hasil pengujian lentur balok beton bertulang rerata

Benda Uji	P_y (kN)	M_y (kN.m)	κ_y (1/m)	EI_y (kN.mm^2)	EI_y (%)
BN	36,367	10,910	0,027	4,0105.E^8	100
BPB	33,750	10,125	0,036	2,8536.E^8	71,153
BPBT	42,917	12,875	0,044	2,9066.E^8	72,475

Dari Tabel 5.3 dimana faktor kekakuan (EI) ditinjau pada kondisi luluh terlihat bahwa benda uji balok pasca bakar (BPB) faktor kekakuan (EI) turun sebesar 28,847 %, dan untuk benda uji balok pasca bakar dengan perkuatan TFC (BPBT) faktor kekakuan (EI) turun sebesar 27,525 % dibanding balok beton bertulang normal (BN).

5.2 Pembahasan

Pembahasan pada hasil penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh pemasangan angkur pada kedua ujung TFC dan mengetahui kapasitas lentur balok beton bertulang dengan membandingkan kekakuan (K) ditinjau dari hubungan beban-lendutan (P-Δ) dan faktor kekakuan (EI) ditinjau dari hubungan momen-kelengkungan (M-κ) pada balok normal (BN), balok pasca bakar (BPB), dan balok pasca bakar dengan perkuatan TFC (BPBT).

5.2.1 Perkuatan lentur balok beton bertulang pasca bakar menggunakan TFC dengan perekat resin dan penambahan angkur pada kedua ujung TFC

Pemasangan angkur (baut) pada kedua ujung TFC dapat menghindari lepasnya kedua ujung TFC dari permukaan beton walaupun disepanjang lembaran TFC yang sudah dilekatkan dengan *resin* sudah terlepas (*debonding failure*) (Gambar L 7.19),

namun perkuatan lentur balok pasca bakar dengan menggunakan TFC belum dapat optimal, karena sebelum terjadi keruntuhan pada TFC terlebih dahulu terjadi lepasnya lembaran TFC pada permukaan beton (*debonding failure*) kecuali pada kedua ujung TFC (Gambar L 7.18, 19). Hal ini disebabkan karena kurang kuatnya lekatan antara TFC dengan permukaan beton yang disebabkan karena perekat *epoxy resin* yang digunakan belum benar-benar kering dan kurangnya tegangan TFC yang sudah melekat pada permukaan beton, menyebabkan timbulnya beberapa lipatan kecil yang mempengaruhi perkuatan lentur yang diberikan TFC.

Pada pembebanan 40 kN balok pasca bakar dengan perkuatan TFC (BPBT) panjang retaknya rata-rata mencapai 10 cm sedangkan pada balok pasca bakar (BPB) pada pembebanan 32,5 kN panjang retaknya rata-rata mencapai 15 cm dan pada balok normal (BN) dengan pembebanan 35 kN panjang retaknya rata-rata mencapai 10 cm. Dari hasil pengamatan tersebut maka perkuatan balok pasca bakar menggunakan TFC dengan perekat *resin* dan penambahan angkur dikedua ujung TFC dapat memperkecil panjang retak yang terjadi.

Dari hasil pengamatan terlihat terjadi retak pada balok pasca bakar yang dapat mengurangi kekuatan lentur balok pada saat pengujian (Gambar L 7.7). Dan jenis kerusakan yang terjadi pada balok normal (BN), balok pasca bakar (BPB), dan balok pasca bakar dengan perkuatan TFC (BPBT) adalah jenis kerusakan lentur (Gambar L 7.16, 17, 18).

5.2.2 Kekakuan ditinjau dari hubungan beban-lendutan

Kekakuan (K) yang diperoleh dari hubungan beban-lendutan (P-Δ) pada balok normal (BN), balok pasca bakar (BPB), dan balok pasca bakar dengan perkuatan TFC (BPBT) memiliki perilaku yang berbeda sesuai dengan pola grafik dari hubunghan beban-lendutan (P-Δ) yang dibuat berdasarkan data dari hasil pengujian Laboratorium.

Pada penelitian ini balok normal (BN) diasumsikan memiliki kekakuan (K) sebesar 100 % yang ditinjau pada kondisi luluh, sedangkan untuk balok pasca bakar (BPB) dan balok pasca bakar dengan perkuatan TFC (BPBT) kekakuan (K) diperoleh dengan membandingkannya dengan kekakuan (K) balok normal (BN). Dari hasil perbandingan ini diperoleh nilai prosentase penurunan kekakuan (K) pada janis balok (BPB) dan (BPBT).

Balok pasca bakar (BPB) mengalami penurunan kekakuan (K) sebesar 26,558 % dan balok pasca bakar dengan perkuatan TFC (BPBT) mengalami penurunan kekakuan (K) sebesar 16,101 % terhadap balok normal (BN).

Dari hasil pengujian, proses pembakaran menyebabkan lendutan (*defleksi*) yang semakin besar untuk pembebanan yang sama pada balok pasca bakar (BPB), hal ini menyebabkan kekakuan (K) balok pasca bakar (BPB) mengalami penurunan, tetapi setelah diperkuat dengan menggunakan TFC dan penambahan angkur di kedua ujung TFC, jenis balok (BPBT) mengalami kenaikan kekakuan (K).

5.2.3 Faktor kekakuan ditinjau dari hubungan momen-kelengkungan

Faktor kekakuan (EI) yang ditinjau dari hubungan momen-kelengkungan (M-κ) pada balok normal (BN), balok pasca bakar (BPB), dan balok pasca bakar dengan

perkuatan TFC (BPBT) memiliki perilaku yang berbeda sesuai dengan pola grafik momen-kelengkungan (M-κ) yang dibuat berdasarkan data dari hasil pengujian Laboratorium.

Pada penelitian ini balok normal (BN) diasumsikan memiliki faktor kekakuan (EI) sebesar 100 % yang ditinjau pada kondisi luluh, sedangkan untuk balok pasca bakar (BPB) dan balok pasca bakar dengan perkuatan TFC (BPBT) diperoleh dengan membandingkannya dengan faktor kekakuan (EI) balok normal (BN). Dari hasil perbandingan ini diperoleh nilai prosentase penurunan kuat lentur (M) dan faktor kekakuan (EI) pada janis balok (BPB) dan (BPBT).

Balok pasca bakar (BPB) mengalami penurunan faktor kekakuan (EI) sebesar 28,847 % dan balok pasca bakar dengan perkuatan TFC (BPBT) mengalami penurunan faktor kekakuan (EI) sebesar 27,525 % terhadap balok normal (BN).

Penurunan kuat tekan beton pasca bakar ($f_{c\theta}' < f_c'$) menyebabkan tinggi blok tegangan tekan beton akan semakin besar ($a_\theta > a$) sehingga lengan dan kopel gaya dalam untuk beton tekan menjadi kecil, hal ini menyebabkan momen tahanan balok (M_n) mengalami penurunan sehingga kelengkungan (κ) balok pasca bakar (BPB) akan semakin besar dan hal ini menyebabkan faktor kekakuan (EI) pada balok pasca bakar (BPB) mengalami penurunan.

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

Hal-hal yang dikemukakan dalam kesimpulan dan saran ini meliputi kesimpulan dan saran.

6.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diperoleh dari hasil penelitian dan pembahasan tentang perkuatan lentur balok beton bertulang pasca bakar menggunakan TFC dengan perekat resin dan penambahan angkur adalah:

1. terlepasnya lembaran TFC dari permukaan beton (*debonding failure*) di kedua ujung TFC dapat dihindari dengan pemasangan angkur (baut) di kedua ujung TFC, namun perkuatan lentur balok pasca bakar dengan menggunakan TFC belum dapat optimal, karena sebelum terjadi keruntuhan pada TFC terlebih dahulu terjadi lepasnya lembaran TFC pada permukaan beton (*debonding failure*) kecuali pada kedua ujung TFC, dan
2. pemasangan angkur (baut) pada kedua ujung TFC menyebabkan perkuatan lentur yang diberikan TFC pada jenis balok (BPBT) dapat meningkatkan kekakuan (K) sebesar 10,457 % dibanding balok pasca (BPB) dan dibanding balok normal (BN) kekakuan (K) turun sebesar 16,101 %. Pada balok pasca bakar dengan perkuatan TFC (BPBT) faktor kekakuan (EI) dapat

meningkat sebesar 1,322 % dibanding balok pasca (BPB) dan dibanding balok normal (BN) faktor kekakuan (*EI*) turun sebesar 27,525 %.

3. perkuatan balok pasca bakar menggunakan TFC dengan perekat *resin* dan penambahan angkur dikedua ujung TFC dapat memperkecil panjang retak yang terjadi.

6.2 Saran

Agar penelitian tentang perkuatan lentur balok beton bertulang pasca bakar menggunakan TFC dengan perekat resin dan penambahan angkur dapat lebih diperluas lagi, maka saran yang dapat dikemukakan adalah:

1. perlu diadakan penelitian lebih lanjut untuk struktur yang lain, misalnya kolom, plat lantai, dan *joint*, sehingga akan didapatkan berbagai macam teknologi untuk perkuatan struktur,
2. mengingat kemudahan dalam pemasangannya, maka perlu diadakan penelitian untuk perkuatan struktur kayu pada bagian balok dan kolom,
3. mengingat pada penelitian ini perkuatan hanya pada bagian lenturnya saja, sehingga perlu diadakan penelitian dengan kombinasi perkuatan lentur dan perkuatan geser dengan menggunakan *TFC-Carbon fibre fabrics*,
4. pada penelitian ini *defleksi* balok diukur dengan menggunakan *dial gauge* sehingga kekuatan ultimit balok pada saat pengujian lentur tidak terbaca. Pada penelitian selanjutnya disarankan menggunakan alat bantu *strain gauge* guna memperoleh data hasil pengujian sampai batas runtuh sehingga dapat diukur daktilitasnya.

5. karena pengujian lentur balok pada penelitian ini menggunakan perletakan sendi-rol, maka untuk penelitian selanjutnya dapat dilakukan dengan perletakan yang lain,
6. untuk mendapatkan perkuatan lentur yang optimal dengan menggunakan *TFC*, disarankan agar perekat *resin* yang digunakan sebagai bahan perekat TFC dengan permukaan beton harus benar-benar kering pada saat pelaksanaan pengujian, dan
7. pemakaian angkur dalam praktiknya sulit dilaksanakan karena terlebih dahulu harus dilakukan pengeboran pada beton, oleh sebab itu perlu dicoba dengan cara yang lain.

DAFTAR PUSTAKA

Al-Mutairi, M. N., and M. S. Al-Shaleh., 1997, "Assessment of Fire Damaged Kuwaiti Structures." *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 9, No. 1, February.

Balaguru, N. P., and S. P. Shah., 1992, "Feiber Reinforced Cement Composite," McGraw-Hill International Editions, New York.

Burns, T., 1995, "Structural Steel Design–LRFD," Delmar Publishers, An International Thomson Publishing Company, Singapore.

Boyd, B. C., 1997, "A Load-Deflection Study of Fiber Reinforced Plastics as Reinforcement in Concrete Bridge Decks," *Thesis for Master of Science, Department of Civil Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University*, May, Blacksburg, Virginia.

Chapra, and Canale., 1989, "Numerical Methods for Engineers," Mc. Graw-Hill Book Co. Singapore.

Dipohusodo, I., 1994, "Struktur Beton Bertulang," PT. Gramedia Pustaka Utama, Jakarta.

Ehsani, R. M., H. Saadatmanesh., and A. M. Malek., 1998, "Prediction of Failure Load of R/C Beams Strengthened with FRP Plate Due to Stress Concentration at the Plate End," *ACI Structural Journal*, Vol. 95, No. 2, Marc-April.

Fergusson, P., 1981, "Dasar-dasar Beton Bertulang versi SI," Erlangga, Jakarta.

Freyssinet, 2000, "Structural Strengthening with TFC," PT. Freyssinet Total Technologi, France.

Fintel, M.,1987, "Buku Pegangan Tentang Teknik Beton." PT. Pradya Paramitha, Jakarta.

GangaRao, V.S., and P.V. Vijay., 1998, " Bending Behavior of Concrete Beams Wrapped with Carbon Fabric," *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 124, No. 1, January.

GangaRao, V.S., and P.V. Vijay., 1999, "Draft Design Guidelines for Concrete Beams Externally Strengthened with FRP," *NIST Workshop on Standard Development for the Use of FiberReinforced Polymers for the Rehabilitation of Concrete and Masonry Structures*," Tucson Arizona.

Kusuma, G., dan W.C. Vis., 1994, "Dasar-dasar Perencanaan Beton Bertulang Berdasarkan SKSNI-T-15-1991-03," Erlangga, Jakarta.

Long, T, P., and J. C. Nicholas., 2000, "Fire Performance of High Strength Concrete," *Building and Fire Research Laboratory National Institute of Standards and Technology Guithersburg,* MD. 20899., USA.

Malek, M. A., and H. Saadatmanesh., 1998, "Design Guidelines for Flexural Strengthening of RC Beams with FRP Plates, " *ASCE Journal of Composites for Construction* Vol.2, No.4, November.

Milke, A. J., 1999, "Analytical Methods to Evaluate Fire Resistance of Structural Members, " *ASCE Journal of Structural Engineering,* Vol.125, No.10, October.

Mahkota, P. A., 2000, "Efektifitas Perbaikan Balok Beton Bertulang Pasca Kebakaran Menggunakan Carbon Fiber Strips dengan Panjang Terbatas," Tugas Akhir, JTS. FT UGM.

Neville, A.M., 1975, "Properties of Concrete," The English Language Book Society and Pitman Publishing, London.

Ngudiyono., 2001, "Perilaku Lentur dan Geser Balok Bertulang Pasca Bakar dengan Carbon Fiber Strips," Tesis, JTS. FT UGM, Yogyakarta.

Purwanto, E., 2001, "Perkuatan Lentur dan Geser Balok Beton Bertulang Pasca Bakar dengan CFS dan Carbon Wrapping," Seminar Hasil Penelitian, Program Studi Teknik Sipil, Jurusan Ilmu-Ilmu Teknik, Program Pasca Sarjana UGM, Yogyakarta.

Sabnis, M. G., 1979, "Handbook of Compsite Construction Engineering," Van Nostrand Reinhold Company, New york.

Santoso, E. B., dan Iswahyudi., 2000, "Kuat Lentur Balok Beton Bertulang Pasca Bakar dengan Perbaikan Addition H.E," Tugas Akhir, JTS. UII, Yogyakarta.

Sihombing, J., 1999, "Perkuatan Struktur dengan Carbon Fiber Strips," Tugas Akhir, JTS. FT UGM, Yogyakarta.

West, H. H., 1980, "Analysis of Structures," John Wiley & Sons, Inc, Canada.

Wang, C., and C. G. Salmon., 1992, " Reinforced Concrete Design," Harper Collins Publishers, Inc, New York.

Winter, G., dan A. H. Nilson., 1993, "Perencanaan Struktur Beton Bertulang," PT Pradnya Paramita, Jakarta.

LAMPIRAN 1

LABORATORIUM TEKNIK STRUKTUR

Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik
Universitas Gadjah Mada
Jl. Grafika No. 2 Kampus UGM, Yogyakarta – 55281 Ph. (0274) - 546541, 902293,
Fax. : 0274-545676

Nomor : 019/LTS/IV/2002

SURAT KETERANGAN
UNTUK YUDISIUM

Nama	:	Kusdarono Pratomo
Nomor Mahasiswa	:	93310166
Jurusan	:	Teknik Sipil
Fakultas	:	Teknik Sipil dan Perencanaan
Universitas	:	Universitas Islam Indonesia Yogyakarta
Jenjang Studi	:	S1
Dosen Pembimbing	:	I. Ir. H.Sarwidi,MSCE.,Ph.D. II. Ir. Fatkhurrohman N.,MT.

Telah selesai melakukan Penelitian di laboratorium Teknik Struktur JTS FT-UGM dalam rangka Tugas Akhir dengan judul :

" **Perkuatan Lentur Balok Beton Bertulang Pasca Bakar dengan Perkuatan TFC dan Pengangkuran** "

Tidak mempunyai tanggungan berupa : Pinjam alat-alat dan sejenisnya pada Laboratorium Teknik Struktur JTS FT-UGM.

Yogyakarta,

Kepala,

Ir. H.Morisco, Ph.D.
NIP 130516868

LABORATORIUM TEKNIK STRUKTUR

Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik
Universitas Gadjah Mada
Jl. Grafika No. 2 Kampus UGM, Yogyakarta – 55281 Ph. (0274) - 546541, 902293,
Fax. : 0274-545676

Nomor : 020/LTS/IV/2002

SURAT KETERANGAN
UNTUK YUDISIUM

Nama	:	Eko Ihsan Wibowo
Nomor Mahasiswa	:	93310225
Jurusan	:	Teknik Sipil
Fakultas	:	Teknik Sipil dan Perencanaan
Universitas	:	Universitas Islam Indonesia Yogyakarta
Jenjang Studi	:	S1
Dosen Pembimbing	:	I. Ir. H.Sarwidi,MSCE.,Ph.D. II. Ir. Fatkhurrohman N.,MT.

Telah selesai melakukan Penelitian di laboratorium Teknik Struktur JTS FT-UGM dalam rangka Tugas Akhir dengan judul :

" Perkuatan Lentur Balok Beton Bertulang Pasca Bakar dengan Perkuatan TFC dan Pengangkuran "

Tidak mempunyai tanggungan berupa : Pinjam alat-alat dan sejenisnya pada Laboratorium Teknik Struktur JTS FT-UGM.

Yogyakarta,

Kepala,

Ir. H.Morisco, Ph.D.
NIP 130516868

LAMPIRAN 2

Lampiran 2.1

DATA HASIL PENGUJIAN

BERAT JENIS AGREGAT HALUS

KETERANGAN	BENDA UJI I	BENDA UJI II
Berat benda uji SSD (W)	500 gr	500 gr
Berat piknometer diisi air (B1)	652 gr	652 gr
Berat Piknometer + Benda uji (W) + air (25 cc) (B2)	958,8 gr	954,2 gr
Berat Jenis (BJ) BJ=W/(B1+W-B2)	2,588	2,528
Berat Jenis (BJ) rata-rata	2,558 t/m^3	

Yogyakarta, Februari 2002

Mengetahui,

Laboratorium PAU UGM

Lampiran 2.2

DATA HASIL PENGUJIAN

MODULUS HALUS BUTIR PASIR

Saringan D lubang (mm)	Berat tertinggal (gram)	Berat tertinggal (%)	Berat Teringgal Kumulatif (%)
No. 4 (4,8)	4	0,834	0,834
No. 8 (2,4)	28,5	5,940	6,774
No. 20 (1,2)	101,6	21,175	27,949
No. 40 (0,6)	137,4	28,637	56,586
No. 60 (0,3)	104,9	21,863	78,450
No. 80 (0,15)	97	20,217	98,666
Pan	6,4	1,334	
Jumlah	479,8	100,000	269,260

$$MHB = \frac{269,260}{100}$$

$$= 2,693$$

Yogyakarta, Februari 2002

Mengetahui,

Laboratorium PAU UGM

Lampiran 2.3

DATA HASIL PENGUJIAN

BERAT JENIS AGREGAT KASAR

KETERANGAN	BENDA UJI I	BENDA UJI II
Berat benda uji SSD (W)	5000	5000
Berat benda uji kering permukaan jenuh (bj)	5051,4	5096,2
Berat benda uji dalam air (ba)	3088	3120
Berat Jenis (BJ) BJ=bj/(bj-ba)	2,573	2,579
Berat Jenis (BJ) rata-rata	2,576	

Yogyakarta, Februari 2002

Mengetahui,

Laboratorium PAU UGM

Lampiran 2.4

DATA HASIL PENGUJIAN

BERAT VOLUME AGREGAT KASAR

KETERANGAN	BENDA UJI I	BENDA UJI II
Berat benda uji SSD (W) (gram)	8120,5	8120,5
Berat silinder (W1)(gram)	5435	5432,5
Berat silinder + kerikil (W2) (gram)	13555,5	13553
Volume silinder (V) m3	0,00529875	0,00529875
Berat Volume (BV) BV= (W2-W1)/V	1,532531257	1,532531257
Berat Volume (BV) rata-rata	1,533 t/m^3	

Yogyakarta, Februari 2002

Mengetahui,

Laboratorium PAU UGM

Lampiran 2.5

DATA HASIL PENGUJIAN

MODULUS HALUS BUTIR KERIKIL

Saringan D lubang (mm)	Berat tertinggal (gram)	Berat tertinggal (%)	Berat Teringgal Kumulatif (%)
19,1	2320	46,848	46,848
9,52	2625,5	53,017	99,865
No. 4 (4,8)	2,4	0,048	99,913
No. 8 (2,4)	0,3	0,006	99,919
No. 20 (1,2)	0,1	0,002	99,921
No. 40 (0,6)	0,8	0,016	99,938
No. 80 (0,3)	0,7	0,014	99,952
No. 100 (0,15)	0,5	0,010	99,962
No. 200 (0,075)	1,9	0,038	100,000
Pan	1	0,020	
Jumlah	4952,2	100,000	846,318

$$MHB = \frac{846,318}{100}$$

$$= 8,46318$$

Yogyakarta, Februari 2002

Mengetahui,

Laboratorium PAU UGM

LAMPIRAN 3

Lampiran 3.1

HASIL PENGUJIAN KUAT TARIK BAJA TULANGAN
(Ø 6 mm)

I. BENDA UJI:

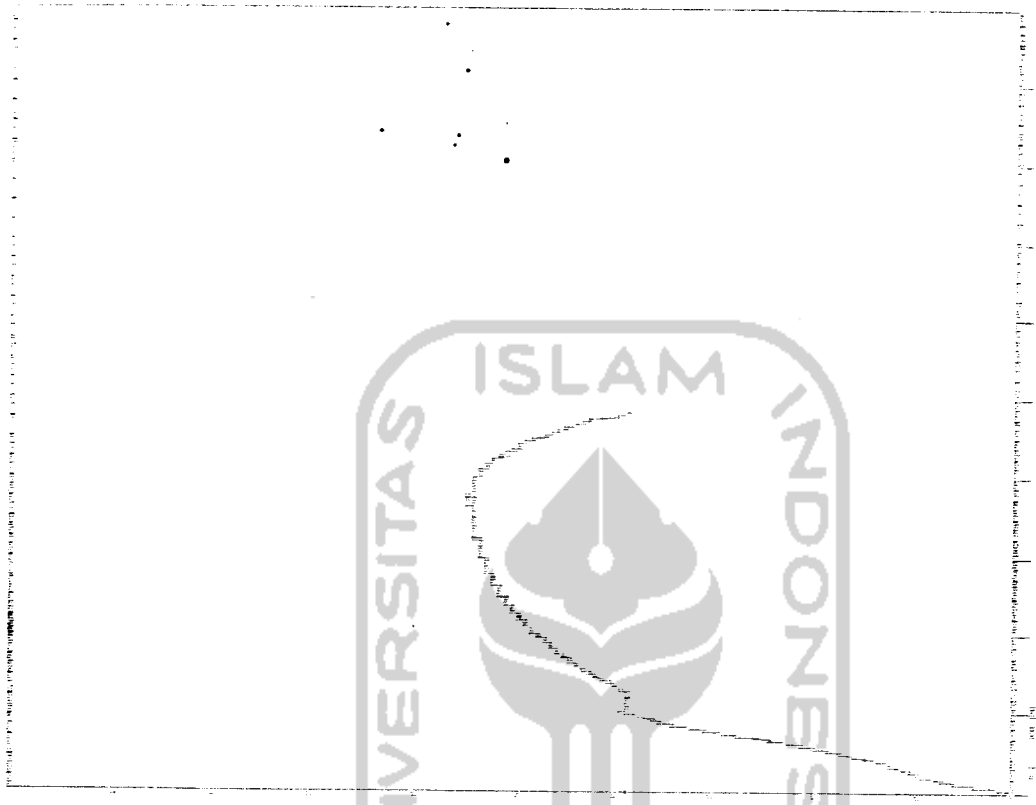
1. Panjang keseluruhan tulangan baja = 20 cm
2. Diameter bidang uji = 0,6 cm

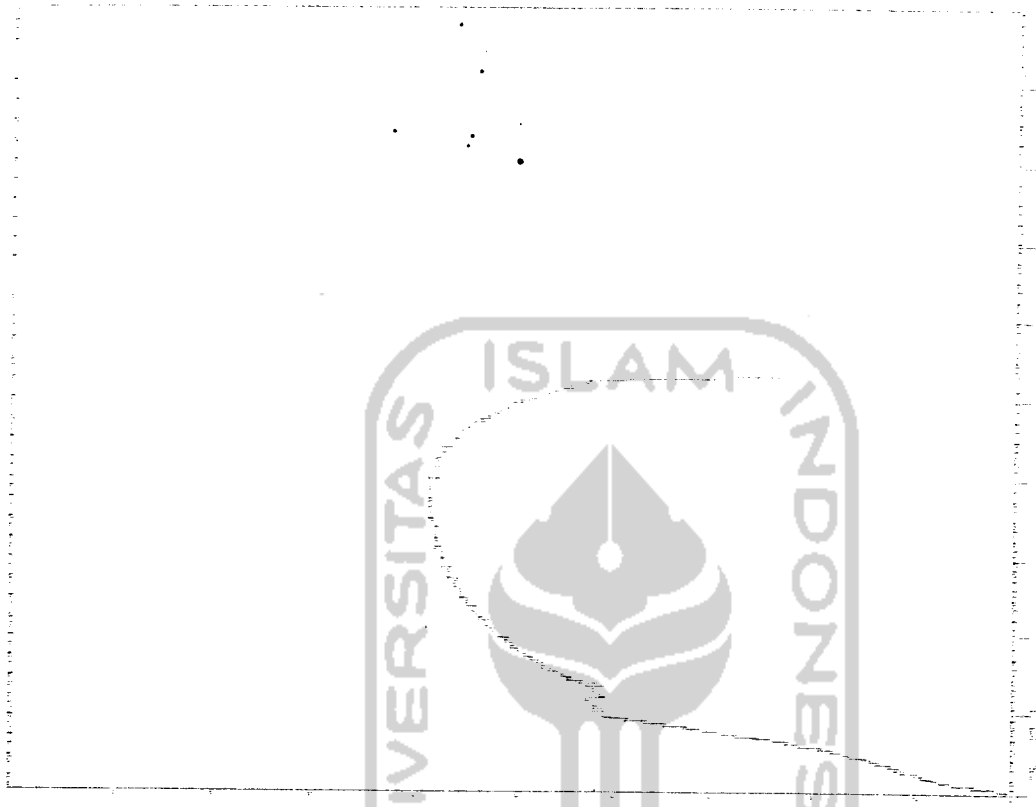
II. ALAT-ALAT:

1. Kaliper
2. Komputer pembaca
3. Mesin uji tarik

III. HASIL PERCOBAAN:

1. Tegangan luluh rata-rata = 402 MPa, dan
2. Kuat tarik rata-rata = 563,633 MPa.





Lampiran 3.2

HASIL PENGUJIAN KUAT TARIK BAJA TULANGAN
(Ø 12 mm)

I. BENDA UJI:

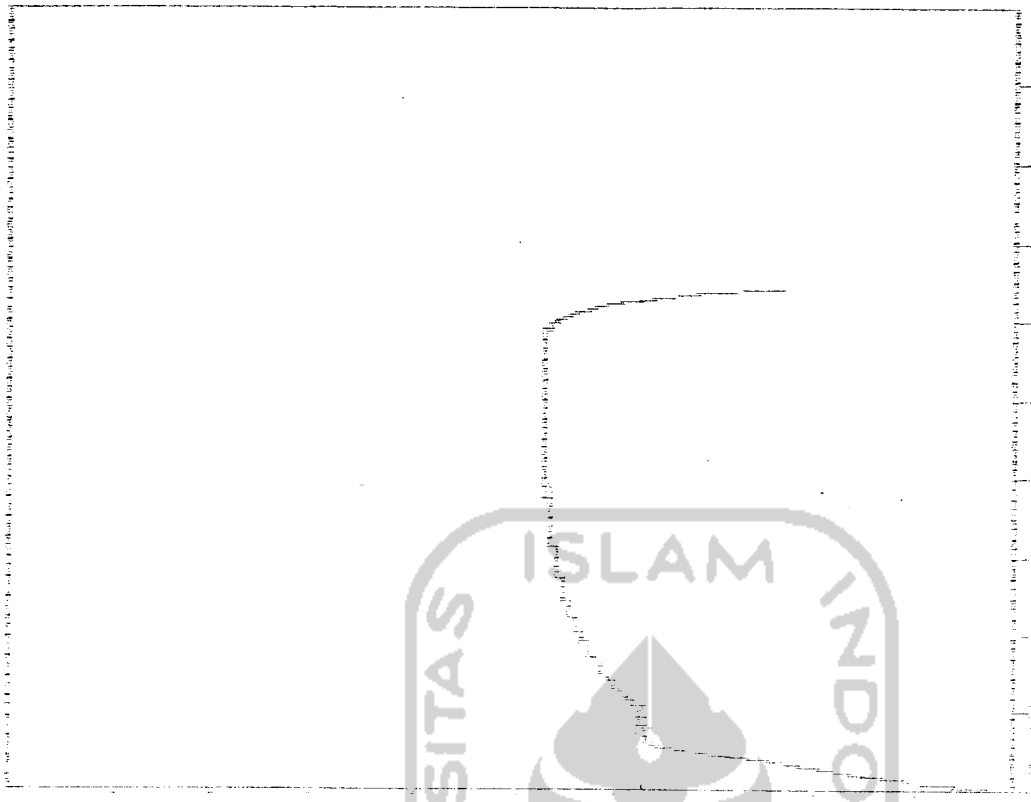
1. Panjang keseluruhan tulangan baja = 20 cm
2. Panjang di bidang uji (bagian kecil) = 5 cm
3. Diameter bidang uji = 0,6 cm

II. ALAT-ALAT:

1. Kaliper
2. Komputer pembaca
3. Mesin uji tarik

III. HASIL PERCOBAAN:

1. Tegangan luluh rata-rata = 373,333 MPa, dan
2. Kuat tarik rata-rata = 477,038 MPa.



Lampiran 3.3

HASIL PENGUJIAN KUAT TARIK PLAT BAJA

I. BENDA UJI:

4. Panjang keseluruhan plat baja = 20 cm
5. Panjang di bidang uji (bagian kecil) = 5 cm
6. Lebar bidang uji = 1 cm
7. Tebal bidang uji = 0,5 cm

II. ALAT-ALAT:

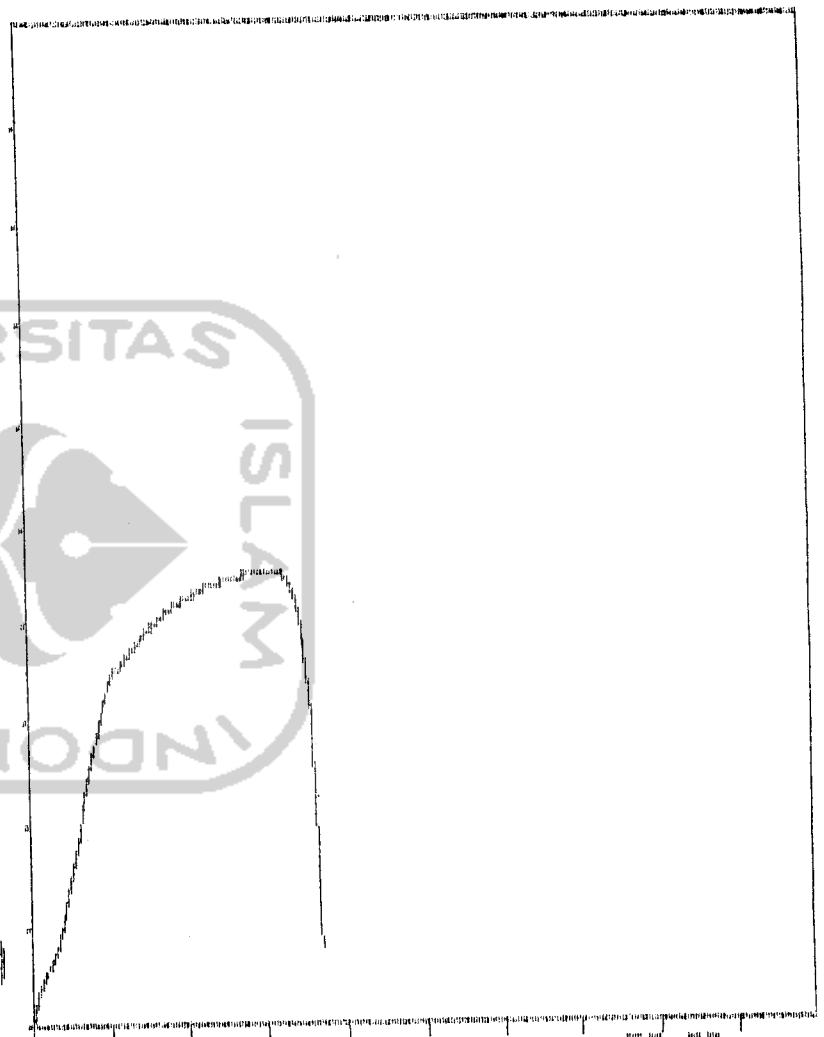
4. Kaliper
5. Komputer pembaca
6. Mesin uji tarik

III. HASIL PERCOBAAN:

1. Tegangan luluh rata-rata = 345 MPa,
2. Kuat tarik rata-rata = 457,110 MPa.

F1 DIRECTION TENSION
F2 AUTOMATIC STOP
F3 LINEAR UNITS MM
F4 FORCE UNITS N
F5 AREA COMP ON 66.000
F6 CYCLING OFF
F7 TEST SPEED 5.000 MM/MIN
F8 RETURN SPEED 100.000 MM/MIN
F9 PRELOAD 10.000 N
F10 SETUP SCALES CAP = 13340 N
P PRELOAD ***
T TEST *
S STOP *
C CONTINUE *** STOP
R RETURN *
J JOG ***
Z ZERO POSITION COUNT
X X-Y PLOT FROM MEMORY
Alt-Q TO QUIT PROGRAM

1000
N
PER
SQ MM
0.00



0.00
50.00 %
OF 80.00 MM

		@ BREAK	PRESENT
POSITION	14.6742		
	@ PEAK		
EXTENSION	15.541	18.293	18.343
LOAD	453.304	93.191	20.366

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

UNIVERSITAS GADJAH MADA
FAKULTAS TEKNIKK JURUSAN TEKNIK SIPIL
LABORATORIUM BAHAN BANGUNAN 081. 2295. 4787
Bulaksumur Yogyakarta Telp. (0274) 902708 / HP ~~.082.274.3066~~ / 081.2273.8430

PEMERIKSAAN KUAT GESER BAUT

Nomor : 04/LBG/III/2002 Diterima tanggal 05 Maret 2002
Pengirim : KUDARONO PRATOMO DAN EKO IMAN –W Mahasiswa Teknik Sipil UII Yogyakarta
Keperluan : PENELITIAN TUGAS AKHIR

No	Jenis /Tipe /Kode	Diameter Pengenal (mm)	Luas Penampang Bag. Luas (mm)	Diameter Dalam (ulir) (mm)	Luas Penampang bagian dalam (mm)	Beban (Lbs)	Tunggal/Ganda	Kuat Gesert(Mpa)	Kuat geser rata-rata (MPa)
1	Baut Angkur	10 mm	78,50	± 8,9 mm	62,1798	4870	tunggal	355,578	
2	Baut Angkur	10 mm	78,50	± 8,9 mm	62,1798	4350	tunggal	317,611	342,435
3	Baut Angkur	10 mm	78,50	± 8,9 mm	62,1798	4850	tunggal	354,118	

Keterangan :
1. Contoh baut angkur yang dikirim diamter pengenal 10 mm panjang 200 mm
2. Kuat geser dihitung berdasarkan luas penampang bagian dalam

Dikerjakan oleh :

Sukardi
NIP 130531214

Yogyakarta .....
Kepala

Ir. Kardiyono. ME
NIP130530686

LAMPIRAN 4

Lampiran 4.1

PERENCANAAN CAMPURAN BETON

A. Data-data perencanaan campuran beton:

1. Kuat tekan beton yang disyaratkan $f'_c = 20$ MPa
2. Volume pekerjaan kecil dan mutu pekerjaan baik, perkiraan standar deviasi (s_d)

   = 4,2 MPa
3. Beton didalam ruangan dengan keadaan sekeliling non-korosif
4. Jenis struktur balok
5. Ukuran maksimum kerikil 20 mm
6. Berat jenis kerikil = 2,576 t/m^3
7. Berat jenis pasir = 2,558 t/m^3
8. Modulus Halus Butir kerikil = 8,463
9. Berat volume kerikil = 1,533 t/m^3
10. Modulus Halus Butir pasir = 2,693
11. Berat jenis semen portland = 3,15 t/m^3

B. Perencanaan Campuran Beton:

Dalam menghitung perencanaan campuran beton ini mengacu pada cara perhitungan dan tabel yang diberikan oleh **Tjokrodimuljo (1992)**.

1. Menghitung kuat tekan rata-rata beton:

   $f'_{cr} = f'_c + 1{,}64.s_d$

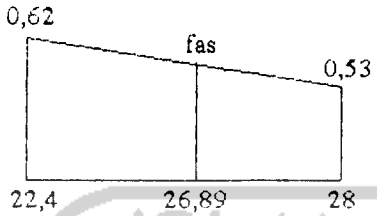
   $s_d = 4{,}2$ MPa

   $m = 1{,}64.s_d = 1{,}64.4{,}2 = 6{,}8$

$f'_{cr} = f'_c + m = 20 + 6{,}889 = 26{,}889$ MPa

2. Menetapkan faktor air semen:

   Dari tabel 7.5 dan 7.6 diambil nilai yang terkecil



   fas = 0,548 dari Tabel 7.5

   fas maksimum = 0,6 (beton didalam ruangan korosif dan non korosif) dari Tabel 7.6

   maka *f.a.s* yang digunakan = 0,548

3. Menentukan besarnya nilai slam:

   Untuk struktur balok = (7,5 – 15 cm) dari Tabel 7.7

4. Jumlah air yang diperlukan tiap m^3 beton dari Tabel 7.9

   Berdasarkan ukuran agregat maksimum = 25 mm, didapatkan kebutuhan air sebesar 196,5 liter = 0,1965 m^3, dengan udara terperangkap = 2 %

5. Jumlah semen yang diperlukan tiap 1 m^3 beton

   f.a.s = 0,548

   Air = 0,1965 m^3

   Berat semen (Ws) $= \frac{A}{f.a.s} = \frac{0.1965}{0{,}548} = 0{,}359$ ton

6. Menghitung volume kerikil, dari Tabel 7.10

   Ukuran maks kerikil = 25 mm

   MHB pasir = 2,693

maka diperoleh kebutuhan volume kerikil = 0,68 m^3

Berat volume kerikil = 1,533 t/m^3

Berat kerikil (Wk) = 1,533.0,68 = 1,042 ton

7. Volume absolut air, semen, kerikil, dan udara:

$$Va + Vs + Vk + Vu = 0{,}1965 + \frac{0{,}359}{3{,}15} + \frac{1{,}042}{2{,}576} + 0{,}02$$

$$= 0{,}735\ m^3$$

Volume absolut pasir:

$Vp = 1 - 0{,}735 = 0{,}265\ m^3$

Berat pasir (Wp) = 0,265.2,558 = 0,678 ton

8. Kebutuhan material tiap 1 m^3:

Semen = 0,359 ton = 359 kg

Pasir = 0,678 ton = 678 kg

Kerikil = 1,042 ton = 1042 kg

Air = 196,5 liter

9. Volume pekerjaan:

Balok (9 buah) = 0,10.0,2.2,0.9 = 0,36 m^3

Silinder (18 buah) = $\frac{1}{4}.\pi.0{,}15^2.0{,}3.18 = 0{,}0954\ m^3$

Total volume pekerjaan = 0,4554 m^3

10. Kebutuhan material:

Semen = 359.0,4554 = 163,489 kg

Pasir = 678.0,4554 = 308,761 kg

Kerikil = 1042.0,4554 = 474,527 kg

Air = 196,5.0,4554 = 89,486 liter

Lampiran 4.2

Tabel L 4.2 Hasil uji desak silinder beton

Benda Uji	Diameter Silinder (mm)	Luas Penampang Silinder (mm^2)	Beban P (N)	Kuat Desak (MPa)
N I	150,420	17761,548	455.000	25,617
N I	150,500	17780,446	435.000	24,465
N I	150,000	17662,500	620.000	35,103
N I	149,950	17650,727	615.000	34,843
N I	150,250	17721,424	550.000	31,036
N I	150,350	17745,021	465.000	26,205
N II	149,750	17603,674	550.000	31,243
N II	150,150	17697,843	490.000	27,687
N II	150,150	17697,843	630.000	35,598
N II	149,900	17638,958	515.000	29,197
N II	150,450	17768,634	645.000	36,300
N II	151,100	17922,500	590.000	32,920
N III	150,800	17851,402	685.000	38,372
N III	149,850	17627,193	630.000	35,740
N III	149,950	17650,727	705.000	39,942
N III	149,500	17544,946	590.000	33,628
N III	150,500	17780,446	715.000	40,213
N III	149,450	17533,212	525.000	29,943
				32,669

Kuat desak beton rerata (f_{cr}):

$$f_{cr} = f'_c + m$$

dimana: nilai margin (m) =1,64.Sd

= 1,64.4,808 = 6,888 MPa

Kuat desak beton (f'_c):

$$f'_c = f_{cr} - m$$

= 32,669 - 6,888

= 25,781 MPa

LAMPIRAN 5

Lampiran 5.1

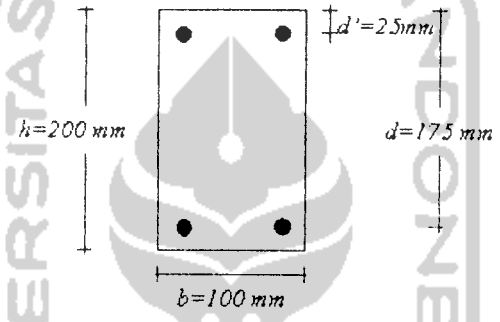
ANALISA TEORITIS
MOMEN DAN KELENGKUNGAN

Dari data diketahui:

Baja tulangan Ø 6 : A= 28,274 mm^2 ; A_s' = 56,549 mm^2 ; f_y' = 402 MPa,

Baja tulangan Ø 12: A= 113,097 mm^2 ; A_s' = 226,195 mm^2 ; f_y = 373,333 MPa,

Kuat tekan beton f_c' = 25,781 MPa.



1. Momen-kelengkungan pada saat kondisi retak (M_{cr}-κ_{cr})

Data :

$$E_s = 200.000\ MPa$$

$$E_c = 4700.\sqrt{f'c} = 4700.\sqrt{25,781} = 23864,247\ \text{MPa}$$

Untuk modulus keruntuhan balok (f_r)

$$f_r = 0,75.\sqrt{f'c} = 0,75.\sqrt{25,781} = 3,808\ \text{MPa}$$

Momen inersia sebelum retak (I_g):

$$I_g = \frac{1}{12}.bh^3 = \frac{1}{12}.100.200^3 = 66666666,67\ \text{mm}^4$$

Jarak garis netral dari serat terluar beton tarik (y_t).

$$y_t = \tfrac{1}{2}(h) = \tfrac{1}{2}(200) = 100 \text{ mm}$$

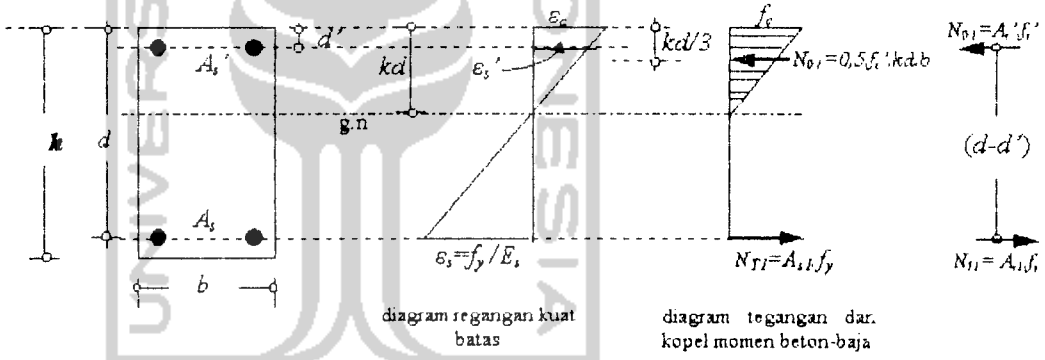
Momen pada saat timbul retak yang pertama kali (M_{cr}):

$$M_{cr} = \frac{f_r . I_g}{y_t} = \frac{3{,}808.66666666{,}67}{100} = 2538666{,}67 \text{ N.mm} = 2{,}539 \text{ kN.m}$$

Kelengkungan pada saat retak pertama (κ_{cr}):

$$\kappa_{cr} = \frac{M_{cr}}{E_c . I_g} = \frac{1509206{,}66}{23864{,}247.66666666{,}67} = 0{,}00159 \text{ rad/m}$$

2. Momen-kelengkungan pada saat luluh pertama (M_y- κ_y)



Rasio Modulus Elastisitas (n):

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{200.000}{23864{,}247} = 8{,}381$$

Rasio tulangan tarik (ρ):

$$\rho = \frac{A_s}{b.d} = \frac{226{,}195}{100.200} = 0{,}001131$$

Rasio tulangan tekan (ρ'):

$$\rho = \frac{A_s'}{b.d} = \frac{56,549}{100.200} = 0,00283$$

Faktor tinggi garis netral (k) adalah:

$$k = \left[(\rho + \rho')^2 .n^2 + 2\left(\rho + \frac{\rho' d'}{d} \right) n \right]^{\frac{1}{2}} - (\rho + \rho')n$$

$$= \left[(0,001131 + 0,00283)^2 .8,381^2 + 2\left(0,001131 + \frac{0,00283.25}{175} \right) .8,381 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$- (0,001131 + 0,00283)8,381$$

$$= (0,014 + 0,196)^{\frac{1}{2}} - 0,1185$$

$$= 0,339$$

maka diperoleh kedalaman garis netral (kd):

$$k.d = 0,339.175 = 59,325 \text{ mm}$$

Momen pada saat luluh pertama (M_y):

$$M_y = A_s . f_y . \left(d - \frac{kd}{3} \right)$$

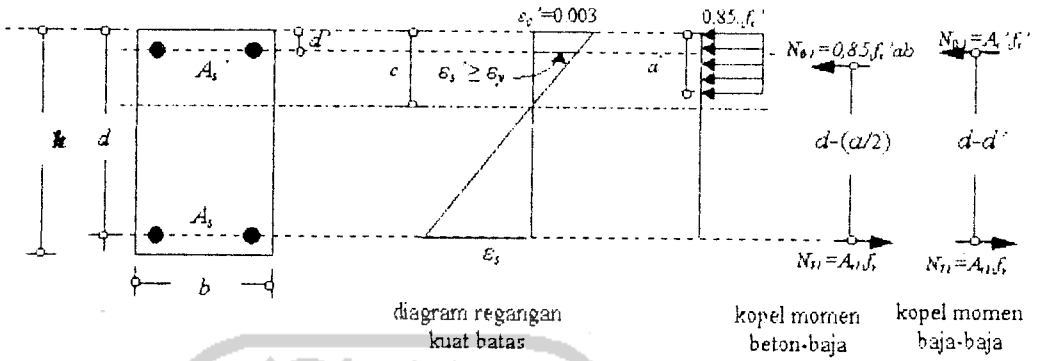
$$= 226,195 . 373,333 \left(175 - \frac{59,325}{3} \right)$$

$$= 13108034,01 \text{ N.mm} = 13,108 \text{ kN.m}$$

Kelengkungan pada saat luluh pertama (κ_y):

$$\kappa_y = \frac{\varepsilon_s}{d(1-k)} = \frac{0,00147}{175(1-0,339)} = 0,0127 \text{ rad/m}$$

3. Momen-kelengkungan pada kondisi ultimit (M_u- κ_u)



Dengan anggapan baja tarik dan baja tekan telah luluh:

$$a = \frac{(A_s - A_s')f_y}{(0{,}85.f_c')b} = \frac{(226{,}195 - 56{,}549)373{,}333}{(0{,}85.25{,}781)100} = 28{,}902 \text{ mm}$$

$$c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{28{,}902}{0{,}85} = 34{,}002 \text{ mm}$$

Kontrol:

$$\varepsilon_s' = 0{,}003.\frac{c - d'}{c} = 0{,}003.\frac{34{,}002 - 25}{34{,}002} = 0{,}00079$$

$$\varepsilon_s = 0{,}003.\frac{d - c}{c} = 0{,}003.\frac{175 - 34{,}002}{34{,}002} = 0{,}01244$$

$$\varepsilon_y = \frac{f_y}{E_s} = \frac{373{,}333}{200.000} = 0{,}00187$$

Terbukti bahwa $\varepsilon_s' < \varepsilon_y < \varepsilon_s$ kondisi ini menunjukkan baja tulangan tekan belum luluh dan baja tulangan tarik luluh, hal ini berarti anggapan awal adalah salah.

Untuk mencari kedalaman garis netral baru (c) dihitung dengan persamaan kuadrat.

$$(0{,}85.f_c'.b.\beta_1)c^2 + (600.A_s' - A_s.f_y)c - 600.d'.A_s' = 0$$

$$(0{,}85.25{,}781.100.0{,}85)c^2 + (600.56{,}549 - 226{,}195.373{,}333)c - 600.25.56{,}549 = 0$$

$$(1862{,}677)c^2 + (-50516{,}658)c - 848235 = 0$$

Diperoleh kedalaman garis netral (c):

$$c = 38{,}844 \text{ mm}$$

$$a = \beta_1.c = 0{,}85.38{,}844 = 33{,}017 \text{ mm}$$

$$f_s' = \varepsilon_s'.E_s = \frac{(c-d')0{,}003}{c}.E_s = \frac{(38{,}844-25)0{,}003}{38{,}844}.200.000 = 213{,}840 \text{ MPa}$$

Jadi $f_s' = 213{,}840$ MPa $< f_y' = 402$ MPa.

Momen ultimit balok (M_u) adalah:

$$M_u = 0{,}85.f_c'.a.b\left(d - \frac{a}{2}\right) + A_s'.f_s'(d - d')$$

$$= 0{,}85.25{,}781.33{,}017.100\left(175 - \frac{33{,}017}{2}\right) + 56{,}549.213{,}840\,(175 - 25)$$

$$= 11467328{,}93 + 1813865{,}724$$

$$= 13281194{,}65 \text{ N.mm} = 13{,}281 \text{ kN.m}$$

Kelengkungan ultimit balok (κ_u) adalah:

$$\kappa_u = \frac{\varepsilon_{cu}}{c} = \frac{0{,}003}{38{,}844} = 0{,}000077 \text{ rad/ mm} = 0{,}0772 \text{ rad/ m}$$

LAMPIRAN 6

Lampiran 6.1

TABEL HUBUNGAN BEBAN - LENDUTAN DAN HUBUNGAN MOMEN – KELENGKUNGAN BALOK BETON BERTULANG

Tabel L 6.1.1 Jenis Balok: BN I

Beban (kN)	Dial 1 (mm)	Dial 2 (mm)	Dial 3 (mm)	Momen (kN.m)	Kelengkungan (1/m)
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,00000
2,500	0,135	0,220	0,188	0,750	0,00131
5,000	0,300	0,415	0,360	1,500	0,00189
7,500	0,480	0,630	0,510	2,250	0,00300
10,000	0,615	0,950	0,840	3,000	0,00494
12,500	0,725	1,210	0,980	3,750	0,00794
15,000	1,030	1,465	1,140	4,500	0,00844
17,500	1,320	1,910	1,460	5,250	0,01156
20,000	1,720	2,460	1,950	6,000	0,01389
22,500	1,890	2,750	2,120	6,750	0,01656
25,000	2,570	3,380	2,600	7,500	0,01767
27,500	2,620	3,600	2,860	8,250	0,01911
30,000	2,870	4,150	3,610	9,000	0,02022
32,500	3,150	4,470	3,700	9,750	0,02322
35,000	3,740	5,050	3,980	10,500	0,02644
35,750	4,260	5,640	4,420	10,725	0,02889
35,750	5,580	7,530	5,870	10,725	0,04011
35,750	5,920	8,400	6,310	10,725	0,05078
35,750	6,540	9,890	6,750	10,725	0,07211
35,750	6,890	10,640	7,160	10,725	0,08033

Tabel L 6.1.2 Jenis Balok: BPB I

Beban (kN)	Dial 1 (mm)	Dial 2 (mm)	Dial 3 (mm)	Momen (kN.m)	Kelengkungan (1/m)
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,0000
2,500	0,120	0,320	0,200	0,750	0,0036
5,000	0,470	0,725	0,520	1,500	0,0051
7,500	0,630	1,140	0,970	2,250	0,0076
10,000	1,010	1,590	1,320	3,000	0,0094
12,500	1,280	2,050	1,720	3,750	0,0122

Tabel L 6.1.2 Lanjutan

Beban (kN)	Dial 1 (mm)	Dial 2 (mm)	Dial 3 (mm)	Momen (kN.m)	Kelengkungan (1/m)
15,000	1,570	2,490	2,100	4,500	0,0146
17,500	2,230	3,260	2,740	5,250	0,0172
20,000	2,510	3,670	3,100	6,000	0,0192
22,500	3,000	4,240	3,480	6,750	0,0222
25,000	3,340	4,720	3,850	7,500	0,0250
27,500	4,075	5,520	4,520	8,250	0,0272
30,000	4,420	6,020	4,900	9,000	0,0302
32,500	5,010	6,840	5,720	9,750	0,0328
33,500	5,780	7,660	6,300	10,050	0,0360
33,500	7,620	9,605	7,910	10,050	0,0409
33,500	8,120	10,580	8,460	10,050	0,0509
33,500	8,730	11,850	9,250	10,050	0,0636
33,500	9,170	12,630	9,540	10,050	0,0728

Tabel L 6.1.3 Jenis Balok: BPBT I

Beban (kN)	Dial 1 (mm)	Dial 2 (mm)	Dial 3 (mm)	Momen (kN.m)	Kelengkungan (1/m)
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,00000
2,500	0,220	0,315	0,260	0,750	0,00167
5,000	0,420	0,675	0,610	1,500	0,00356
7,500	0,510	0,850	0,720	2,250	0,00522
10,000	0,650	1,070	0,910	3,000	0,00644
12,500	0,740	1,380	1,250	3,750	0,00856
15,000	1,030	1,760	1,530	4,500	0,01067
17,500	1,370	2,115	1,750	5,250	0,01233
20,000	1,730	2,690	2,290	6,000	0,01511
22,500	2,140	3,020	2,420	6,750	0,01644
25,000	2,650	3,650	2,910	7,500	0,01933
27,500	2,860	4,180	3,450	8,250	0,02278
30,000	3,270	4,525	3,640	9,000	0,02378
32,500	3,530	4,960	4,120	9,750	0,02522
35,000	3,875	5,330	4,280	10,500	0,02783
37,500	4,120	5,850	4,610	11,250	0,03300
40,000	4,590	6,360	4,830	12,000	0,03667

Tabel L 6.1.3 Lanjutan

Beban (kN)	Dial 1 (mm)	Dial 2 (mm)	Dial 3 (mm)	Momen (kN.m)	Kelengkungan (1/m)
42,500	4,930	7,090	5,460	12,750	0,04211
43,000	5,810	8,140	6,350	12,900	0,04578
43,000	6,440	9,230	6,970	12,900	0,05611
43,000	8,230	11,450	8,820	12,900	0,06500
43,000	9,340	13,280	9,910	12,900	0,08122

Tabel L 6.1.4 Jenis Balok: BN II

Beban (kN)	Dial 1 (mm)	Dial 2 (mm)	Dial 3 (mm)	Momen (kN.m)	Kelengkungan (1/m)
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,0000
2,500	0,100	0,165	0,150	0,750	0,0009
5,000	0,210	0,350	0,250	1,500	0,0027
7,500	0,350	0,550	0,450	2,250	0,0033
10,000	0,725	1,025	0,850	3,000	0,0053
12,500	0,890	1,360	1,140	3,750	0,0077
15,000	1,450	1,950	1,650	4,500	0,0089
17,500	1,950	2,610	2,180	5,250	0,0121
20,000	2,340	3,140	2,670	6,000	0,0141
22,500	2,890	3,700	3,210	6,750	0,0144
25,000	3,250	4,120	3,590	7,500	0,0156
27,500	3,740	4,650	3,890	8,250	0,0186
30,000	3,995	5,080	4,290	9,000	0,0208
32,500	4,360	5,450	4,610	9,750	0,0214
35,000	4,730	5,960	5,140	10,500	0,0228
36,500	5,320	6,270	5,125	10,950	0,0233
36,500	5,510	7,300	6,340	10,950	0,0306
36,500	6,020	8,240	6,510	10,950	0,0439
36,500	6,520	9,380	6,730	10,950	0,0612
36,500	7,150	11,160	7,420	10,950	0,0861

Tabel L 6.1.5 Jenis Balok: BPB II

Beban (kN)	Dial 1 (mm)	Dial 2 (mm)	Dial 3 (mm)	Momen (kN.m)	Kelengkungan (1/m)
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,0000
2,500	0,230	0,320	0,280	0,750	0,0014
5,000	0,520	0,710	0,630	1,500	0,0030
7,500	0,900	1,290	1,190	2.250	0,0054
10,000	1,345	1,760	1,420	3,000	0,0084
12,500	1,680	2,220	1,770	3,750	0,0110
15,000	2,160	2,840	2,310	4,500	0,0134
17,500	2,560	3,310	2,685	5,250	0,0153
20,000	2,980	3,920	3,250	6,000	0,0179
22,500	3,400	4,420	3,680	6,750	0,0196
25,000	4,296	5,380	4,405	7,500	0,0229
27,500	4,520	5,810	4,740	8,250	0,0262
30,000	5,050	6,480	5,320	9,000	0,0288
32,500	5,440	6,980	5,610	9,750	0,0323
34,250	5,600	7,300	5,830	10,275	0,0352
34,250	6,050	8,240	6,570	10,275	0,0429
34,250	7,370	9,930	7,850	10,275	0,0516
34,250	8,840	11,920	9,430	10,275	0,0619
34,250	9,610	13,100	10,150	10,275	0,0716

Tabel L 6.1.6 Jenis Balok: BPBT II

Beban (kN)	Dial 1 (mm)	Dial 2 (mm)	Dial 3 (mm)	Momen (kN.m)	Kelengkungan (1/m)
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,0000
2,500	0,070	0,105	0,095	0,750	0,0005
5,000	0,380	0,550	0,460	1,500	0,0029
7,500	0,770	1,080	0,970	2,250	0,0047
10,000	1,140	1,525	1,350	3,000	0,0062
12,500	1,380	1,960	1,670	3,750	0,0097
15,000	1,760	2,285	1,900	4.500	0,0101
17,500	2,150	3,060	2,740	5,250	0,0137
20,000	2,500	3,420	3,030	6,000	0,0146
22,500	2,840	3,945	3,515	6,750	0,0171
25,000	3,460	4,550	3,950	7,500	0,0188

Tabel L 6.1.6 Lanjutan

Beban (kN)	Dial 1 (mm)	Dial 2 (mm)	Dial 3 (mm)	Momen (kN.m)	Kelengkungan (1/m)
27,500	3,730	4,920	4,250	8,250	0,0207
30,000	4,070	5,330	4,420	9,000	0,0241
32,500	4,430	5,820	4,890	9,750	0,0258
35,000	4,700	6,240	5,350	10,500	0,0270
37,500	5,200	6,730	5,750	11,250	0,0279
40,000	5,640	7,320	6,210	12,000	0,0310
42,500	6,130	7,950	6,670	12,750	0,0344
42,500	6,670	8,780	7,150	12,750	0,0416
42,500	7,040	9,560	7,520	12,750	0,0507
42,500	7,950	10,920	8,160	12,750	0,0637
42,500	9,230	12,845	9,620	12,750	0,0760

Tabel L 6.1.7 Jenis Balok: BN III

Beban (kN)	Dial 1 (mm)	Dial 2 (mm)	Dial 3 (mm)	Momen (kN.m)	Kelengkungan (1/m)
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,0000
2,500	0,060	0,115	0,097	0,750	0,0008
5,000	0,130	0,280	0,190	1,500	0,0027
7,500	0,210	0,460	0,350	2,250	0,0040
10,000	0,305	0,650	0,490	3,000	0,0056
12,500	0,580	0,950	0,720	3,750	0,0067
15,000	0,830	1,340	1,050	4,500	0,0089
17,500	1,170	1,720	1,245	5,250	0,0114
20,000	1,460	2,155	1,580	6,000	0,0141
22,500	1,850	2,600	1,950	6,750	0,0156
25,000	2,410	3,275	2,670	7,500	0,0163
27,500	2,700	3,590	2,980	8,250	0,0167
30,000	3,120	4,160	3,410	9,000	0,0199
32,500	3,650	4,750	3,920	9,750	0,0214
35,000	4,120	5,340	4,330	10,500	0,0248
36,850	4,690	6,070	4,800	11,055	0,0294
36,850	5,430	7,320	5,720	11,055	0,0388
36,850	6,920	9,200	7,140	11,055	0,0482
36,850	7,410	10,180	7,830	11,055	0,0569
36,850	8,530	12,060	8,850	11,055	0,0749

Tabel L 6.1.8 Jenis Balok: BPB III

Beban (kN)	Dial 1 (mm)	Dial 2 (mm)	Dial 3 (mm)	Momen (kN.m)	Kelengkungan (1/m)
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,0000
2,500	0,180	0,395	0,320	0,750	0,0032
5,000	0,390	0,810	0,690	1,500	0,0060
7,500	0,730	1,220	1,050	2,250	0,0073
10,000	1,020	1,640	1,430	3,000	0,0092
12,500	1,400	2,020	1,680	3,750	0,0107
15,000	1,670	2,395	1,920	4,500	0,0133
17,500	2,130	2,980	2,540	5,250	0,0143
20,000	2,300	3,240	2,670	6,000	0,0168
22,500	2,560	3,625	2,910	6,750	0,0198
25,000	3,090	4,315	3,500	7,500	0,0227
27,500	3,570	4,835	3,920	8,250	0,0242
30,000	4,200	5,720	4,620	9,000	0,0291
32,500	5,030	6,600	5,360	9,750	0,0312
33,500	6,140	7,760	6,210	10,050	0,0352
33,500	6,380	8,470	6,600	10,050	0,0440
33,500	8,130	10,650	8,520	10,050	0,0517
33,500	8,760	11,700	9,100	10,050	0,0616
33,500	9,070	12,450	9,430	10,050	0,0711

Tabel L 6.1.9 Jenis Balok: BPBT III

Beban (kN)	Dial 1 (mm)	Dial 2 (mm)	Dial 3 (mm)	Momen (kN.m)	Kelengkungan (1/m)
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,0000
2,500	0,285	0,380	0,320	0,750	0,0017
5,000	0,430	0,650	0,545	1,500	0,0036
7,500	0,520	0,825	0,680	2,250	0,0050
10,000	0,810	1,140	0,940	3,000	0,0059
12,500	0,930	1,420	1,260	3,750	0,0072
15,000	1,350	1,930	1,550	4,500	0,0107
17,500	1,640	2,320	1,870	5,250	0,0126
20,000	1,910	2,775	2,350	6,000	0,0143
22,500	2,320	3,150	2,540	6,750	0,0160
25,000	2,620	3,610	3,000	7,500	0,0178

Tabel L 6.1.9 Lanjutan

Beban (kN)	Dial 1 (mm)	Dial 2 (mm)	Dial 3 (mm)	Momen (kN.m)	Kelengkungan (1/m)
27,500	3,140	4,200	3,460	8,250	0,0200
30,000	3,480	4,680	3,860	9,000	0,0224
32,500	3,870	5,230	4,340	9,750	0,0250
35,000	4,060	5,510	4,510	10,500	0,0272
37,500	4,450	6,420	5,620	11,250	0,0308
40,000	5,460	7,260	6,100	12,000	0,0329
42,500	5,770	7,850	6,370	12,750	0,0396
43,250	6,150	8,370	6,490	12,975	0,0456
43,250	7,970	10,630	8,210	12,975	0,0564
43,250	8,130	11,420	8,570	12,975	0,0682
43,250	9,460	13,550	10,380	12,975	0,0807

Lampiran 6.2

TABEL HUBUNGAN BEBAN - LENDUTAN DAN MOMEN - KELENGKUNGAN BALOK BETON BERTULANG RERATA

Tabel L 6.2.1 Jenis Balok: BN

Beban (kN)	Dial 1 (mm)	Dial 2 (mm)	Dial 3 (mm)	Momen (kN.m)	Kelengkungan (1/m)
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,0000
2,500	0,098	0,167	0,145	0,750	0,0010
5,000	0,213	0,348	0,267	1,500	0,0024
7,500	0,347	0,547	0,437	2,250	0,0034
10,000	0,548	0,875	0,727	3,000	0,0053
12,500	0,732	1,173	0,947	3,750	0,0074
15,000	1,103	1,585	1,280	4,500	0,0087
17,500	1,480	2,080	1,628	5,250	0,0117
20,000	1,840	2,585	2,067	6,000	0,0140
22,500	2,210	3,017	2,427	6,750	0,0155
25,000	2,743	3,592	2,953	7,500	0,0165
27,500	3,020	3,947	3,243	8,250	0,0181
30,000	3,328	4,463	3,770	9,000	0,0203
32,500	3,720	4,890	4,077	9,750	0,0220
35,000	4,197	5,450	4,483	10,500	0,0247
36,367	4,757	5,993	4,782	10,910	0,0272
36,367	5,507	7,383	5,977	10,910	0,0365
36,367	6,287	8,613	6,653	10,910	0,0476
36,367	6,823	9,817	7,103	10,910	0,0634
36,367	7,523	11,287	7,810	10,910	0,0804

Tabel L 6.2.2 Jenis Balok: BPB

Beban (kN)	Dial 1 (mm)	Dial 2 (mm)	Dial 3 (mm)	Momen (kN.m)	Kelengkungan (1/m)
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,0000
2,500	0,177	0,345	0,177	0,750	0,0027
5,000	0,460	0,748	0,460	1,500	0,0047
7,500	0,753	1,217	0,753	2,250	0,0068

Tabel L 6.2.2 Lanjutan

Beban (kN)	Dial 1 (mm)	Dial 2 (mm)	Dial 3 (mm)	Momen (kN.m)	Kelengkungan (1/m)
10,000	1,125	1,663	1,125	3,000	0,0090
12,500	1,453	2,097	1,453	3,750	0,0113
15,000	1,800	2,575	1,800	4,500	0,0138
17,500	2,307	3,183	2,307	5,250	0,0156
20,000	2,597	3,610	2,597	6,000	0,0180
22,500	2,987	4,095	2,987	6,750	0,0205
25,000	3,575	4,805	3,575	7,500	0,0235
27,500	4,055	5,388	4,055	8,250	0,0259
30,000	4,557	6,073	4,557	9,000	0,0294
32,500	5,160	6,807	5,160	9,750	0,0321
33,750	5,840	7,573	5,840	10,125	0,0355
33,750	6,683	8,772	6,683	10,125	0,0426
33,750	7,873	10,387	7,873	10,125	0,0514
33,750	8,777	11,823	8,777	10,125	0,0623
33,750	9,283	12,727	9,283	10,125	0,0718

Tabel L 6.2.3 Jenis Balok: BPBT

Beban (kN)	Dial 1 (mm)	Dial 2 (mm)	Dial 3 (mm)	Momen (kN.m)	Kelengkungan (1/m)
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,0000
2,500	0,192	0,267	0,225	0,750	0,0013
5,000	0,410	0,625	0,538	1,500	0,0034
7,500	0,600	0,918	0,790	2,250	0,0050
10,000	0,867	1,245	1,067	3,000	0,0062
12,500	1,017	1,587	1,393	3,750	0,0085
15,000	1,380	1,992	1,660	4,500	0,0105
17,500	1,720	2,498	2,120	5,250	0,0129
20,000	2,047	2,962	2,557	6,000	0,0147
22,500	2,433	3,372	2,825	6,750	0,0165
25,000	2,910	3,937	3,287	7,500	0,0186
27,500	3,243	4,433	3,720	8,250	0,0211
30,000	3,607	4,845	3,973	9,000	0,0234
32,500	3,943	5,337	4,450	9,750	0,0253
35,000	4,212	5,693	4,713	10,500	0,0274

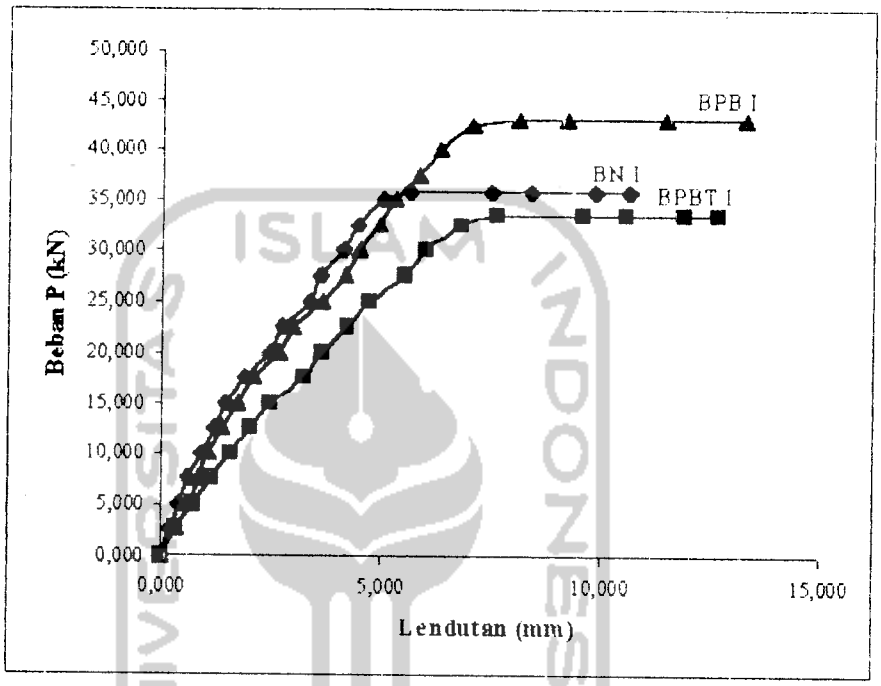
Tabel L 6.2.3 Lanjutan

Beban (kN)	Dial 1 (mm)	Dial 2 (mm)	Dial 3 (mm)	Momen (kN.m)	Kelengkungan (1/m)
37,500	4,590	6,333	5,327	11,250	0,0306
40,000	5,230	6,980	5,713	12,000	0,0335
42,500	5,610	7,630	6,167	12,750	0,0387
42,917	6,210	8,430	6,663	12,875	0,0443
42,917	7,150	9,807	7,567	12,875	0,0544
42,917	8,103	11,263	8,517	12,875	0,0656
42,917	9,343	13,225	9,970	12,875	0,0793

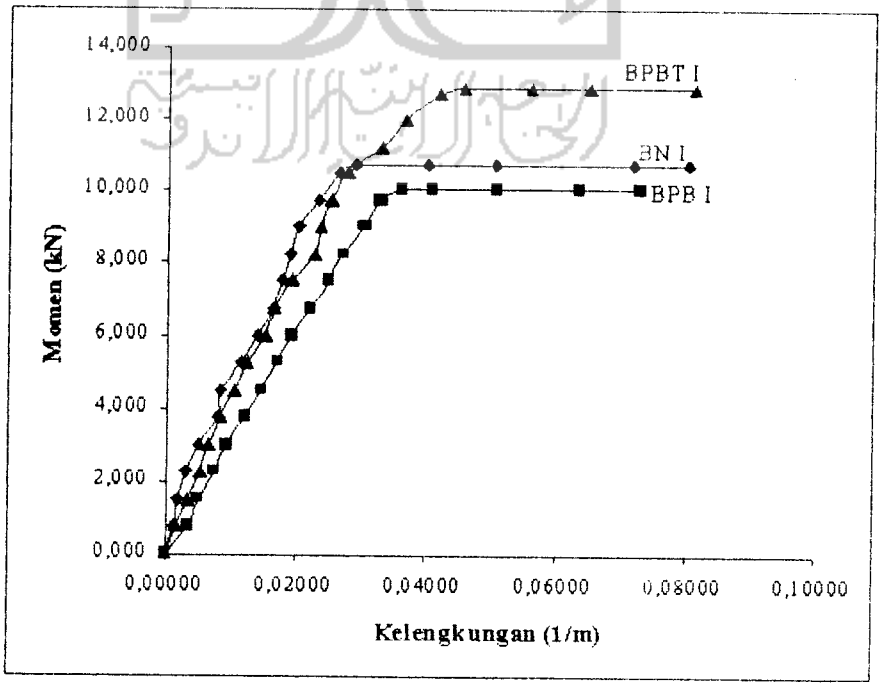
Lampiran 6.3

GRAFIK HUBUNGAN BEBAN - LENDUTAN DAN HUBUNGAN MOMEN – KELENGKUNGAN BALOK BETON BERTULANG (BALOK I)

Grafik L 6.3.1 Hubungan beban-lendutan balok I



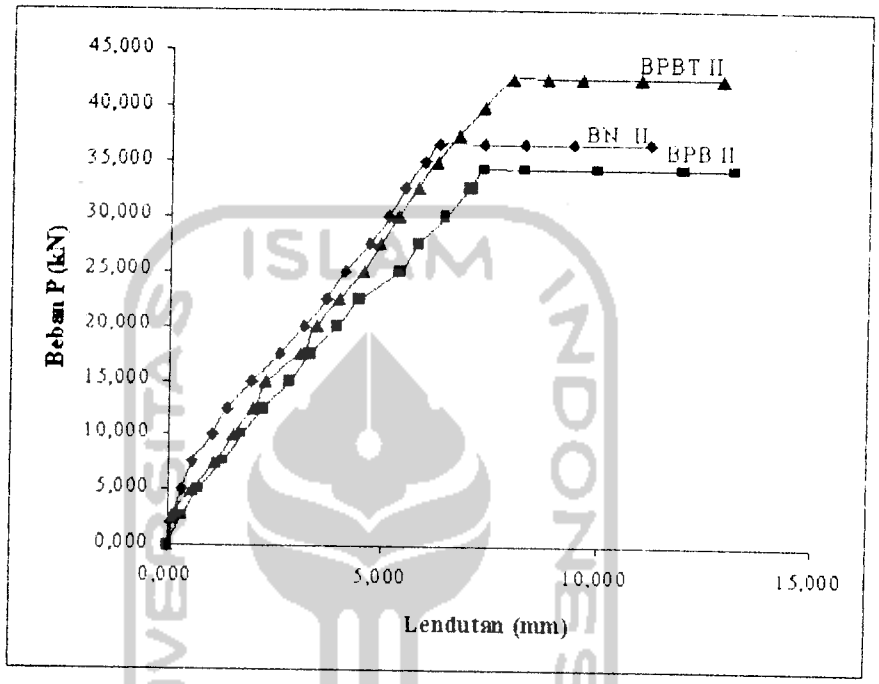
Grafik L 6.3.2 Hubungan momen-kelengkungan balok I



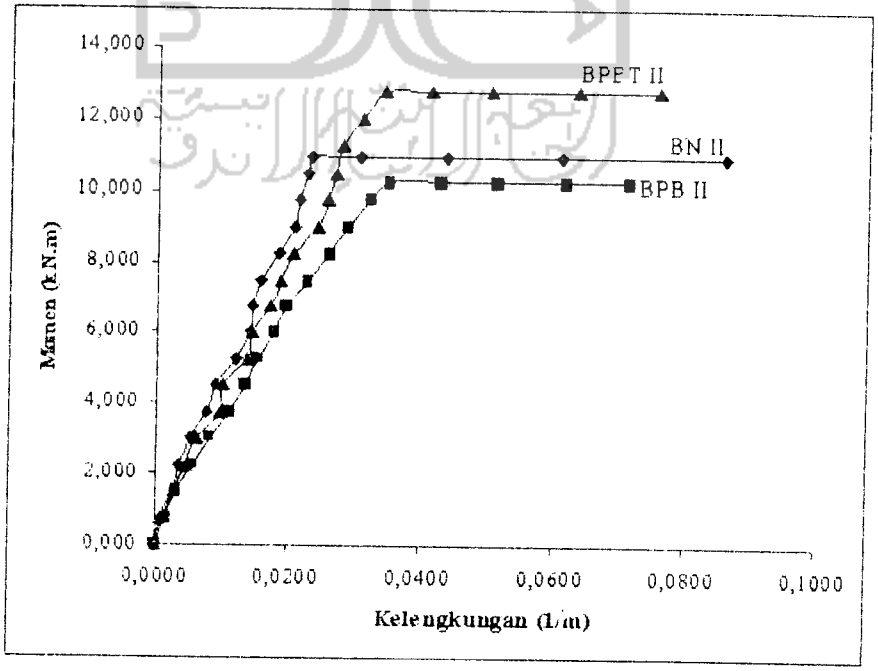
Lampiran 6.4

GRAFIK HUBUNGAN BEBAN – LENDUTAN DAN HUBUNGAN MOMEN – KELENGKUNGAN BALOK BETON BERTULANG (BALOK II)

Grafik L 6.4.1 Hubungan beban-lendutan balok II



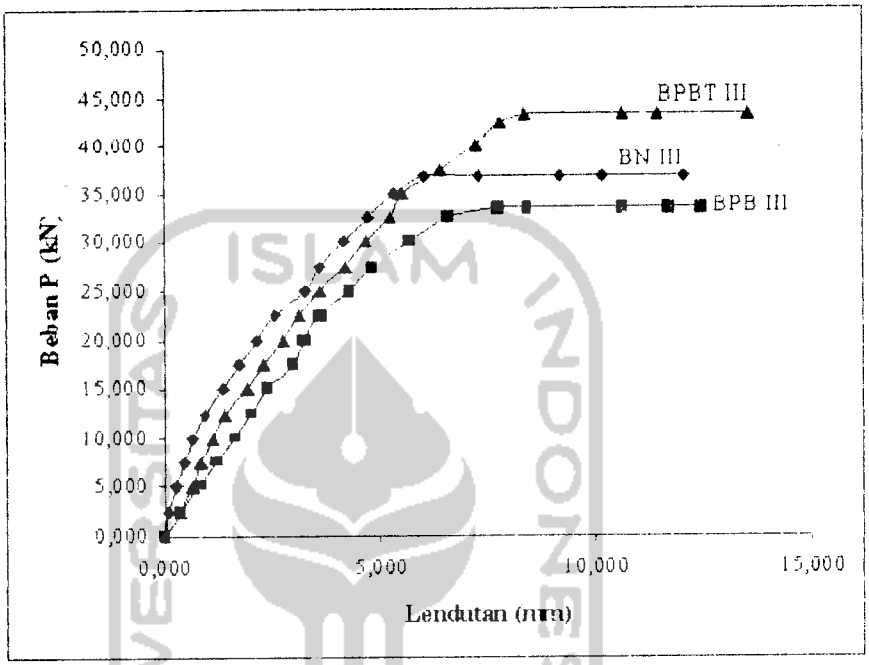
Grafik L 6.4.2 Hubungan momen-kelengkungan balok II



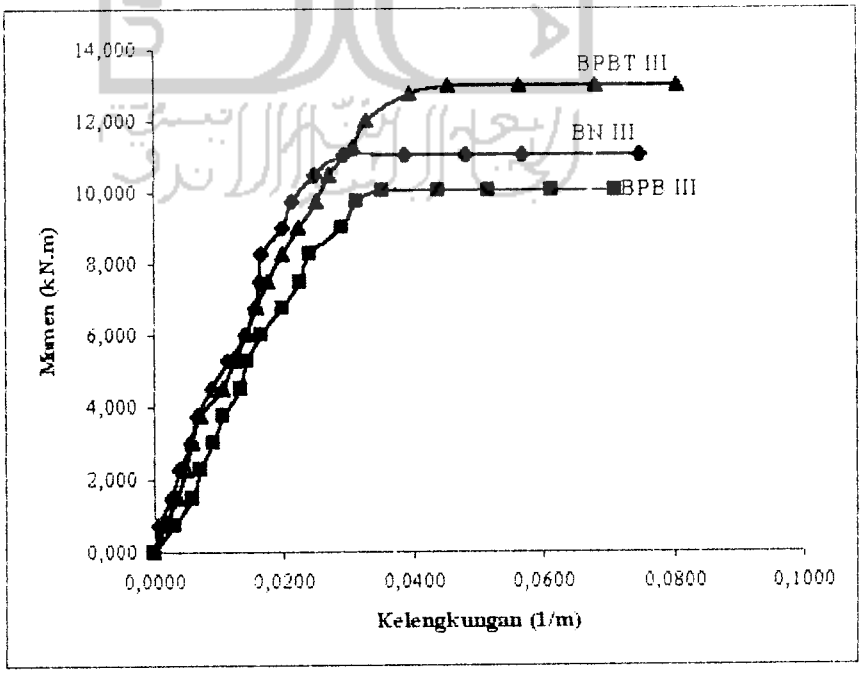
Lampiran 6.5

GRAFIK HUBUNGAN BEBAN - LENDUTAN DAN HUBUNGAN MOMEN – KELENGKUNGAN BALOK BETON BERTULANG (BALOK III)

Grafik L 6.5.1 Hubungan beban-lendutan balok III



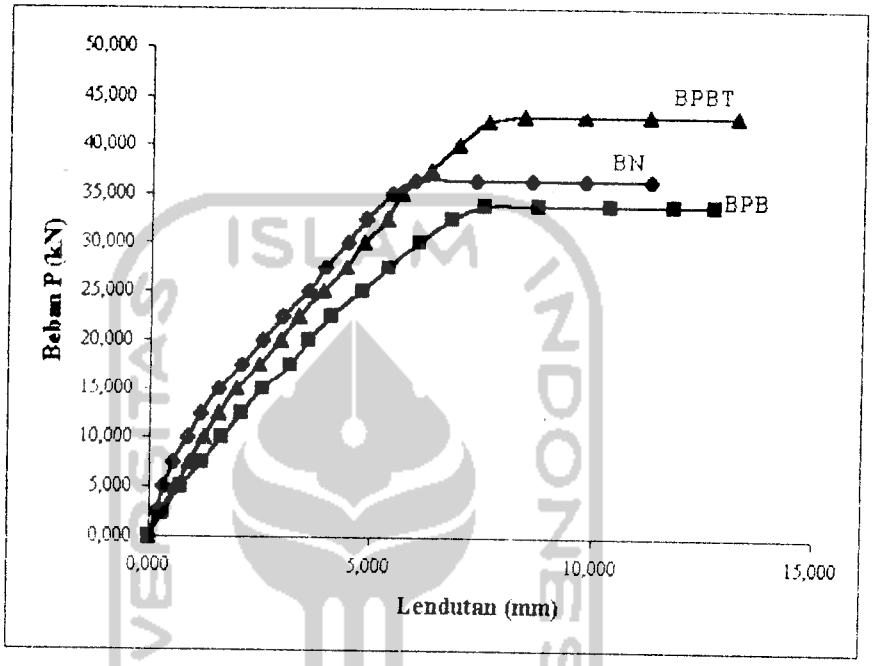
Grafik L 6.5.2 Hubungan momen-kelengkungan balok III



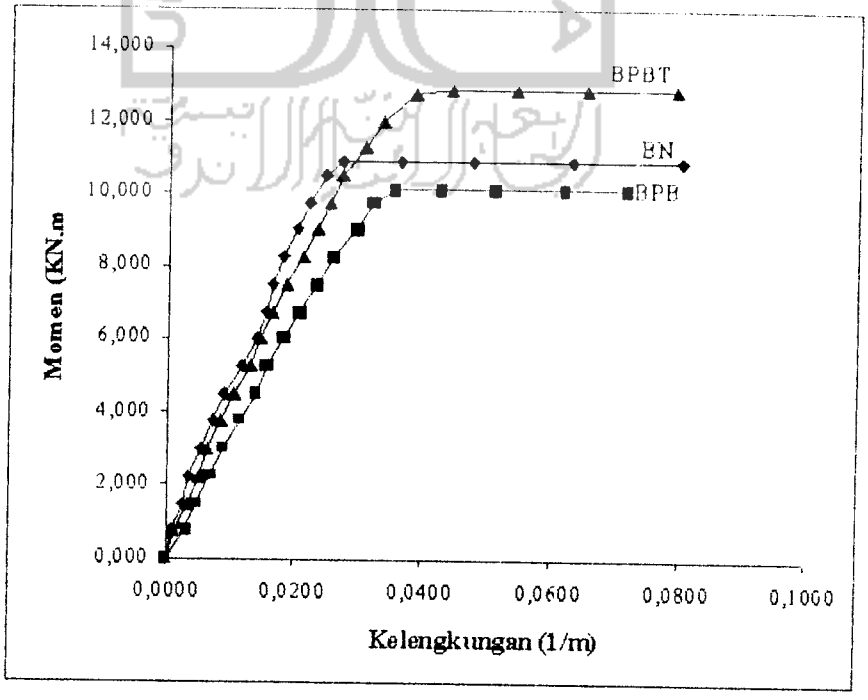
Lampiran 6.6

GRAFIK HUBUNGAN BEBAN - LENDUTAN DAN HUBUNGAN MOMEN – KELENGKUNGAN BALOK BETON BERTULANG RERATA

Grafik L 6.6.1 Hubungan beban-lendutan rerata



Grafik L 6.6.1 Hubungan momen-kelengkungkan rerata



LAMPIRAN 7



Gambar L7.1: Pengadukan campuran beton dengan menggunakan *concrete mixer*



Gambar L 7.2: Pemadatan campuran beton menggunakan *vibrator* pada saat pengecoran



Gambar L 7.3: Pengukuran *slamp* campuran beton



Gambar L 7.4: Pembongkaran bekisting setelah selesai proses



Gambar L 7.5: Proses pembakaran balok uji dengan menggunakan tungku pembakaran



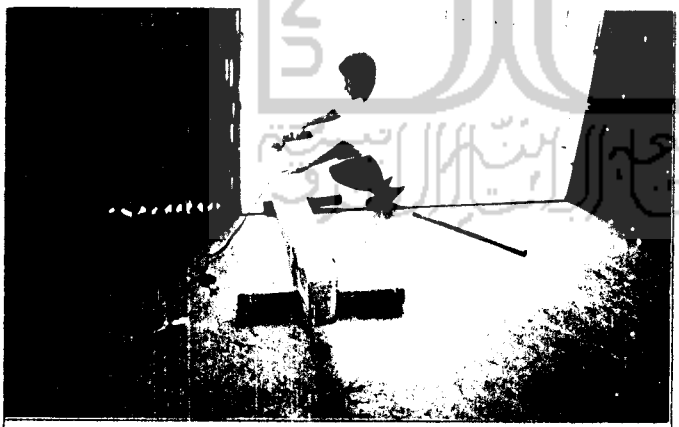
Gambar L 7.6: *Burner* yang digunakan sebagai alat untuk membakar benda uji di dalam tungku



Gambar L 7.7: Pada balok pasca bakar, terlihat balok mengalami retak dan berwarna pink keabu-abuan



Gambar L 7.8: Pengeboran balok beton sebagai tempat pemasangan agkur (baut)



Gambar L 7.9: Pekerjaan *chipping* menggunakan gerinda yang tujuannya untuk menciptakan permukaan beton yang kasar



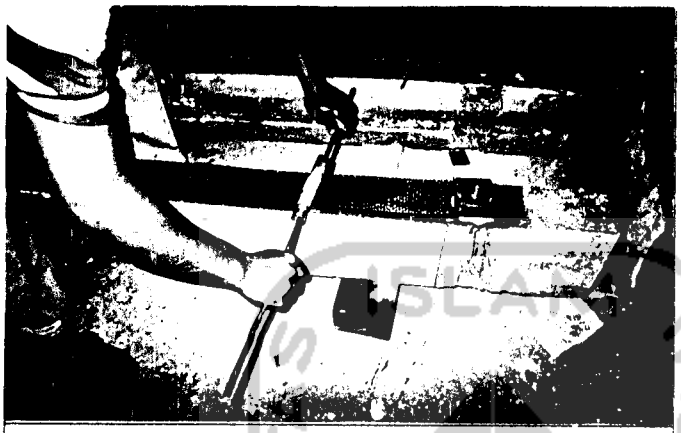
Gambar L 7.10: Pengukuaran dan pemotongan TFC



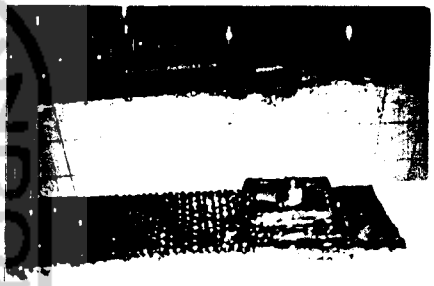
Gambar L 7.11: Pencampuran *epoxy resin* sebagai lapisan perekat TFC



Gambar L 7.12: Proses pengeleman TFC pada permukaan beton yang sudah di *chipping* dengan menggunakan kuas alat bantu lainya

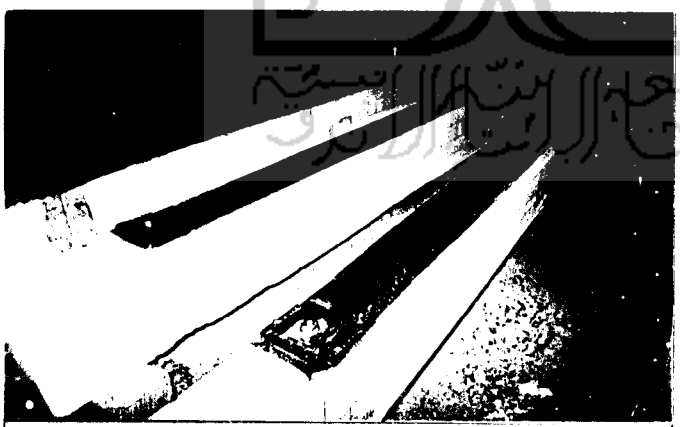


Gambar L 7.13: Pelapisan pertama resin sebagai lapisan perekat TFC dengan menggunakan *roller*

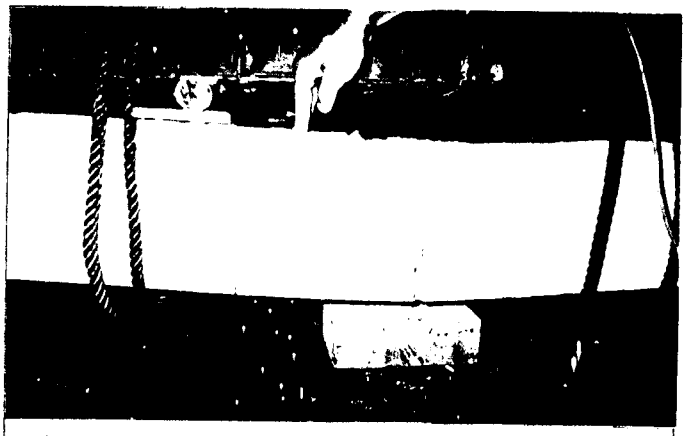




Gambar L 7.14: Ujung TFC yang dikaitkan pada angkur (baut)



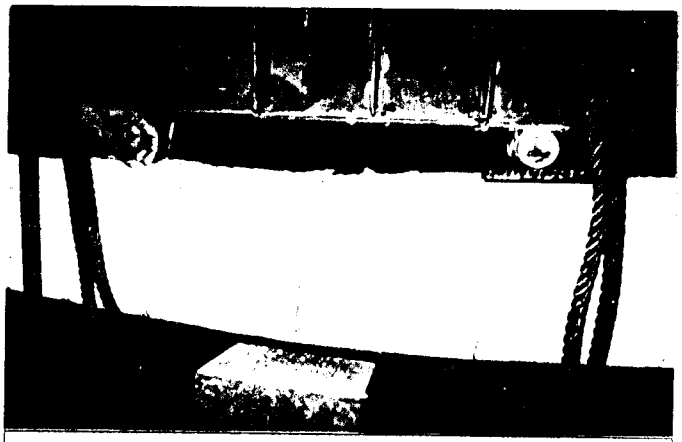
Gambar L 7.15: TFC yang sudah terpasang



Gambar L 7.16: Proses pelaksanaan uji lentur pada balok normal, dan disini terlihat terjadinya kerusakan lentur



Gambar L 7.17: Proses pelaksanaan uji lentur pada balok pasca bakar, disini terlihat terjadi kerusakan lentur, beton desak hancur dan tulangan baja tekan luluh



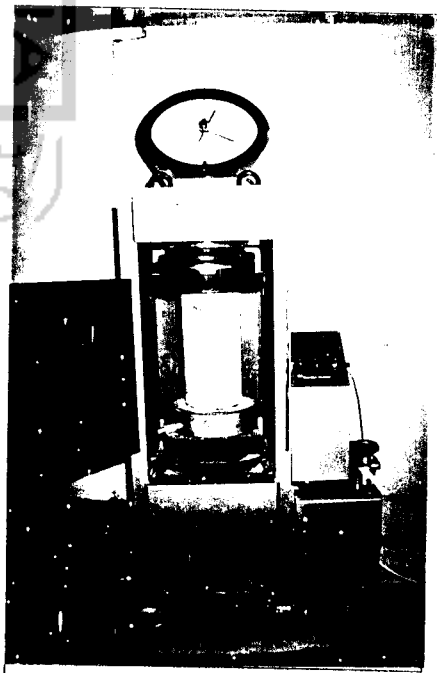
Gambar L 7.18: Terjadi *debonding failure* disepanjang lekatan antara TFC dan beton



Gambar L 7.19: Ujung TFC yang dikaitkan dengan angkur tidak terlepas, sedangkan pada bagian tengah dan bagian dekat angkuar terjadi *debonding failure*



Gambar L 7.20: Proses pemasangan benda uji dan alat pada saat pengujian lentur dilaboratorium



Gambar L 7.21: Pelaksanaan pengujian kuat desak silinder beton



Gambar L 7.22:
Pelaksanaan uji tarik baja tulangan

FREYSSINET Concrete Structures & Repairs

STRUCTURAL STRENGTHENING WITH TFC®

1 - SUBJECT

The TFC® process is a patented process for structural reinforcement by the gluing of carbon/carbon based additional reinforcement. This reinforcement has been developed by FREYSSINET in partnership with the LCPC, ATOFINDLEY and SOFICAR and is marketed by FREYSSINET.
The process is based on the principle of the placement of a high tensile strength material judiciously glued onto the tension zones of the element to be reinforced to improve its performance and functioning. Essentially the role of the TFC® process is the structural reinforcement against the forces arising from bending and shear effects.

2 - DESCRIPTION

TFC® is a composite matrix formed in situ from carbon/carbon fibre fabric in an epoxy resin binder / glue applied cold to the support to form an integral whole by adherence and so provide the required supplementary reinforcement. The composite rivals the highest quality steels in its mechanical characteristics without the inconvenience of susceptibility to corrosion.
The advantages of fabricating the composite directly on the support are the ability to mould it to the form of the element to be reinforced, to avoid the handling of heavy and cumbersome steel plates which are difficult to place and to avoid the creation of a glued interface between the resin and the composite. In addition the perfect moulding of the composite to the concrete ensures a uniform thickness of glue thus limiting the concentration of shear stresses which could initiate adhesion failure in the areas where the resin is thin.
This simplicity of installation and the fact that it is not necessary to support heavy plates and apply pressure while the glue hardens makes TFC® a very economic reinforcement system.

3 - APPLICATIONS

TFC® is used principally in concrete structures but is equally used with other materials such as steel, concrete or stone masonry, wood (solid, agglomerate or laminated), thermosetting resin laminates or even TFC® itself, after consultation with the FREYSSINET technical department.

TFC® reinforcement is applicable to all types of constructions: Domestic buildings, Road or rail bridges, Commercial or industrial buildings, Tanks and reservoirs, etc.....

The strengthening performed by TFC® may concern flexure and shear resistance of beams, slabs and walls, local strengthening due to openings or point loads, load capacity increase by column wrapping, seismic strengthening to provide resistance and ductility.

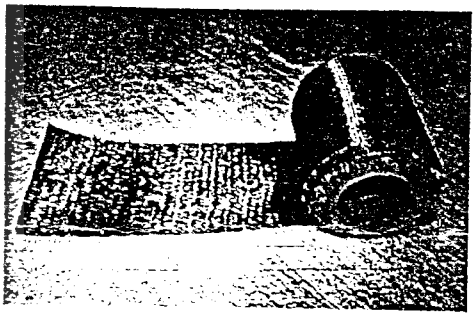
4 - CHARACTERISTICS

Fabric: - 70% longitudinal carbon fibres in the weft
- 30% transverse carbon fibres in the warp.

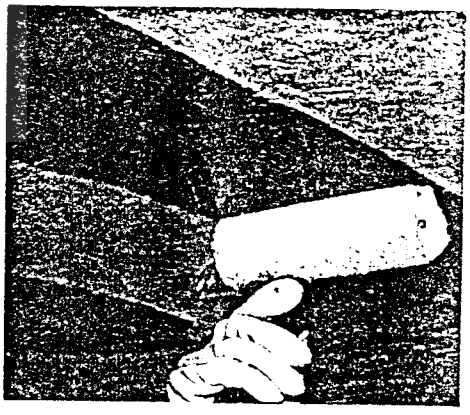
AVERAGE THICKNESS	1/10 mm	4.3
BREAKING STRESS	MPa	1400
MODULUS	GPa	105
BREAKING TENSION WEFT longitudinal, 1 cm width	daN	600
BREAKING TENSION WARP TRANSVERSE, 1 cm width	daN	250

5 - INSTALLATION

The fabric is stronger in the longitudinal direction.

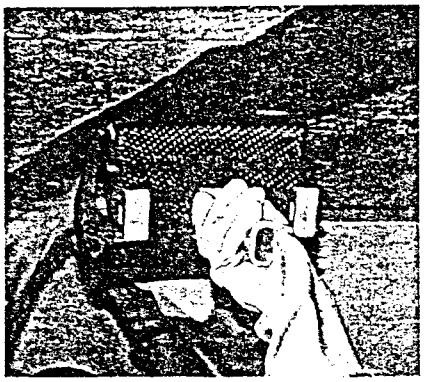


TFC® is installed in the following phases:
- Preparation of the receiving surface by sand blasting.
- First coat of resin.

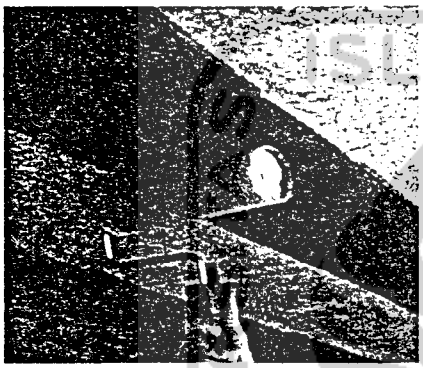


FREYSSINET International &Cie
1 bis, Rue du Petit Clamart 78 140 VELIZY CEDEX France
Tel : + 33 (0)1 46 01 84 84
Fax : + 33 (0)1 46 01 84 85
www.freyssinet.com

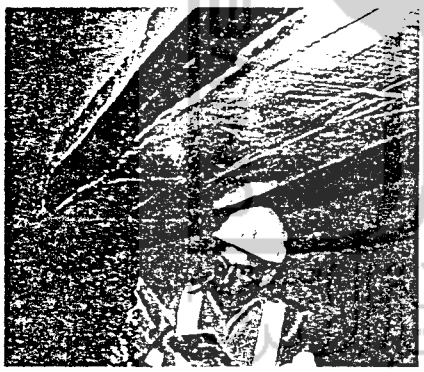
- Fabric



- Rolling



- Final coat of resin



- A paint or cement based coating can be provided on the hardened resin after spraying sand onto the wet resin.



6 - PRINCIPLES FOR CALCULATION

- The calculation rules approved by SOCOTEC and developed by FREYSSINET are included in the TFC® specification.
- These rules conform with the BAEL rules in France and are easily adaptable to the different national codes.
- It is necessary to superimpose the stresses in the materials under load before and after application of TFC®
- Allowed stress in TFC® at SLS: 450 MPa
- Allowed stress in TFC® at ULS: ~~840~~ Ultimate MPa
- Allowed stress in steel at SLS: ~~100 %~~ yield stress
- At the ends of the strips of TFC® bond is mobilised by adhesion over a length of 100 mm. The bond stress on the concrete over this length should be limited to 1.5 MPa.

7 - REFERENCES

More than 12000 m² of TFC® has been installed over hundreds of reinforcement projects since 1996 - several examples of applications:

- Reinforcement under a full slab,
- Slab and walls reinforcement around openings,
- Slab and beam bending reinforcement,
- Pier head reinforcement by wrapping,
- Bending reinforcement on a precast segmental bridge,
- Shear reinforcement of prefabricated presteressed beams.

8 – DISTRIBUTION

PPC, 18 route de Lyon - 71100 ST REMY - France
Pierre GRUCHY
Tel : (33) 3 85 42 15 03 Fax : (33) 3 85 42 15 10
pgruchy@freyssinet.com

Technical Contact :

Baruch GEDALIA
Tel : (33) 1 46 01 84 83
Fax : (33) 1 46 01 86 52
bgedalia@freyssinet.com

Christian TOURNEUR
Tel : (33) 1 64 53 73 10
Fax : (33) 1 64 53 73 99
ctourneur@freyssinet.com

Local Commercial Contact :

Local Technical Contact

Technical and commercial information contained in this document are liable to change. Though precise, they cannot involve Freyssinet's responsibility.

The standard widths of the TFC® fabric are :

- 300 mm,
- 200 mm,
- 150 mm,
- 75 mm.

The TFC® fabric is delivered in rolls of lengths as required up to a maximum of 50m. The fabric may be cut on site to the required length by means of a knife or a pair of scissors.

The TFC® fabric refers to the composite's reinforcement ; its mass per unit area is defined according to ISO 4605.

The fabric's fibres are covered with a grease increasing the chemical bonding with the matrix.

The fabric should be stored in a humidity-free, airy location. When properly stored, the fabric has no limit-use date.

7) TFC® COMPOSITE

The name TFC® composite is given to the assembly of the matrixed fabric in the synthetic resin.

The composite obtained in situ consists of about 40% fabric and 60% resin. These proportions vary within a range of plus or minus 7%, according to the conditions of use on the site (ambient temperature, nature of the backing etc.)

The properties given in the table below are the minimum guaranteed properties. They refer to the impregnated fabric which forms the body of the composite, and thus the effective strengthening section.

MECHANICAL PROPERTIES OF THE EFFECTIVE SECTION* OF THE COMPOSITE

(* minimum section not taking into account the excess resin during application)

Composition 65% fibres

35% matrix

Fabric 70% fibres in the warp

30% fibres in the weft

MEAN THICKNESS	mm	0.43
TENSILE STRENGTH	MPa	1400
E MODULUS	GPa	105
TENSILE STRENGTH 1 cm width of warp	N	6 000
TENSILE RUPTURE 1 cm width of weft	N	2 500

LAMPIRAN 8