

TUGAS AKHIR
**“PENGARUH LAPISAN *HYBRID* SERAT KARBON DAN
SERAT GELAS PADA KAPASITAS LENTUR BALOK
BETON BERTULANG”**



DISUSUN OLEH :
NUR LAYLA DIDIPU
D 111 09 107

JURUSAN SIPIL FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2013



KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
UNIVERSITAS HASANUDDIN FAKULTAS TEKNIK
JURUSAN TEKNIK SIPIL

KAMPUS TAMALANREA TELP. (0411) 587 636 FAX. (0411) 580 505 MAKASSAR 90245
E-mail : sipil.unhas@yahoo.co.id

LEMBAR PENGESAHAN

Tugas Akhir ini diajukan untuk memenuhi salah satu syarat untuk mendapatkan gelar Sarjana Teknik pada Program Studi S1 Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Makassar.

Judul : " *Pengaruh Lapisan Hybrid Serat Karbon Dan Serat Gelas Terhadap Kapasitas Lentur Balok Beton Bertulang.*"

Disusun Oleh :

Nama : Nur Layla Didipu

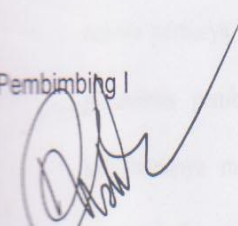
D111 09 107

Telah diperiksa dan disetujui
Oleh Dosen Pembimbing

Makassar, 26 November 2013

Pembimbing I

Pembimbing II


Dr. Rudy Djamaluddin, ST. M.Eng.
Nip. 19701108 1994121001


Dr. Eng. Hj. Rita Irmawati, ST.MT.
Nip. 197206192000122001

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Sipil,


Prof. Dr.Ir.H.Lawalenna Samang, MS.M.Eng.
Nip. 19601231 198503 1 001

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah Rabbil 'Alamin, segala puja dan puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT, Sang Penguasa alam semesta ini. Shalawat dan salam senantiasa tercurah kepada Nabi Muhammad SAW beserta keluarga, para sahabat dan semua pengikutnya yang setia hingga akhir zaman.

Tugas Akhir ini diajukan sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan studi Strata Satu pada Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Makassar. Penulis Mengangkat judul dari Tugas Akhir yaitu **PENGARUH LAPISAN *HYBRID* SERAT KARBON DAN SERAT GELAS PADA KAPASITAS LENTUR BALOK BETON BERTULANG** karena mengingat bahwa perlunya perkuatan pada elemen struktur gedung akibat faktor usia dan perubahan pembebanan pada bangunan tersebut yang menyebabkan tingkat kelayakannya menjadi berkurang. Selain itu perkuatan struktur juga untuk memperbaiki struktur akibat kesalahan dalam pelaksanaan konstruksi, serta memberikan tambahan faktor keamanan.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa banyak kendala yang dihadapi dalam penyusunan tugas akhir ini, namun berkat bantuan dari berbagai pihak, maka tugas akhir ini dapat juga terselesaikan. Oleh karena itu, dengan segala ketulusan dan kerendahan hati, penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada :

1. **Bapak DR.Ing Ir. Wahyu H. Piarah, MS, ME.**, selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

2. **Bapak Prof. Dr. Ir. H. Lawalenna Samang, M.S.M.Eng.** selaku ketua Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
3. **Bapak Dr. Rudi Djamaluddin, S.T., M.Eng** , selaku dosen pembimbing I sekaligus Kepala Laboratorium Struktur dan Bahan, yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan dan pengarahan mulai dari awal penelitian hingga selesainya penulisan ini.
4. **Ibu Dr. Eng. Rita Irmawati, ST. MT.**, selaku dosen pembimbing II, yang senantiasa meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan, pengarahan serta bantuan sampai akhir penyusunan tulisan ini.
5. **Bapak Sudirman Sitang, S.T.**, selaku staf Laboratorium Struktur dan Bahan Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin atas segala bimbingan dan pengarahan selama pelaksanaan penelitian di Laboratorium.
6. **P.T. Graha Citra Anugerah Lestari** atas bantuan dan kerjasamanya dalam menyediakan material *GFRP* dan *CFRP* (Tyfo® Fibrwrap® Composite Systems) dan literatur serta bantuan-bantuan lainnya.
7. **Kanda Haeril Abdi Hasanuddin** atas bantuan, bimbingan dan kerjasamanya selama proses penelitian hingga selesainya penyusunan Tugas Akhir.
8. **Kanda Aswin Perdana Duhri** atas bantuan, bimbingan serta kerjasamanya selama proses penelitian ini.
9. Seluruh dosen Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

10. Seluruh staf dan karyawan Jurusan Teknik Sipil, staf dan karyawan Fakultas Teknik serta staf Laboratorium dan asisten Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

Yang teristimewa penulis persembahkan kepada:

1. Ibunda dan ayahanda tercinta atas curahan kasih sayangnnya selama ini sehingga membuat ananda tetap tabah dan tegar dalam beraktivitas. Ananda tidak mungkin dapat membalas semua pengorbanannya dan inilah salah satu karya sebagai ungkapan terima kasih ananda. Jangan pernah bosan untuk mendoakan ananda dan semoga Allah SWT berkenan mempertemukan kita hingga di surgaNya kelak.
2. Keluarga besar ayahanda dan ibunda yang terhormat atas segala bentuk bantuan dan dukungan baik spiritual maupun materil, sehingga penulis dapat menyelesaikan studi dengan baik.
3. Kakanda dan Adinda yang tercinta atas segala bantuan dan dukungannya selama ini, sehingga penulis dapat menyelesaikan studi dengan baik. Semoga pintu-pintu kebaikan senantiasa terbuka buat kita semua.
4. Sahabat dan Saudara kami seluruh mahasiswa Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, terkhususnya kepada angkatan 2009 yang telah memberikan warna tersendiri. Khususnya kepada Anastasia Mani', Andi Cempana, Nurikhsani, Titik Kuntarti, Dewi Aryani, Imam Saleh, Rusmadi Siddiq, Tamsil Yunus, Moh. Rizal Lasarika, Hasmanullah, Ansari, dan lain-lain yang sudah bersedia membantu dalam penyusunan laporan ini. Maafkan atas segala kekhilafan saya. Terimakasih atas bantuan dan tegur spanya selama

ini. Jangan pernah berhenti untuk belajar dan mari kita raih takdir kesuksesan itu. Untuk semua junior, terima kasih atas bantuan dan dukungannya. Kepada semua senior, kami masih tetap menunggu bimbingan selanjutnya.

Akhirnya tidak ada yang sempurna kecuali Allah SWT, Sang Pemilik Kesempurnaan. Kritik dan saran yang bersifat membangun senantiasa penulis harapkan demi kesempurnaan Tugas Akhir ini. Besar harapan dari penulis semoga buah karya ini dapat bermanfaat bagi pihak yang berkepentingan terkhusus di dunia ketekniksipilan karena sang pemimpin kita pernah berpesan "sebaik-baik manusia adalah yang paling banyak manfaatnya bagi orang lain".

Makassar, November 2013

Penulis

Abstrak

Dewasa ini struktur beton yang sering kita jumpai banyak yang mengalami kerusakan. Kerusakan struktur tersebut dapat disebabkan oleh kualitas bahan yang tidak memenuhi spesifikasi, pembebanan yang berlebih, kriteria perencanaannya yang tidak sesuai dengan standar, ataupun disebabkan oleh bencana alam seperti gempa. Maka untuk mengurangi resiko-resiko yang akan terjadi dibutuhkan perencanaan struktur bangunan yang lebih berkualitas lagi. Saat ini telah berkembang cara meningkatkan infrastruktur salah satunya dengan penggunaan serat FRP (Fiber Reinforced Polymer) sebagai bahan komposit. Pemilihan material ini dikarenakan FRP merupakan tulangan yang tidak berkarat, ringan, dan memiliki kekuatan yang tinggi. Pada penelitian ini dikhususkan pada penggunaan GFRP dan CFRP terhadap perlakuan lentur balok beton bertulang. Pada penelitian ini direncanakan dua macam variasi yaitu Variasi I (BGC) yang terdiri dari 1 lapis GFRP penuh permukaan + 1 lapis CFRP dengan lebar $\frac{1}{3}$ lebar balok, dan Variasi II (BGCG) yang terdiri dari 1 lapis GFRP penuh permukaan + 1 lapis CFRP dengan lebar $\frac{1}{3}$ lebar balok + 1 lapis GFRP penuh permukaan. Adapun metode penelitian ini terdiri dari dua tahap pengujian yaitu pengujian balok beton bertulang normal yang dibebani hingga mencapai tulangan leleh dan pengujian balok beton bertulang yang diperkuat dengan GFRP dan CFRP. Hasil pengujian untuk balok beton bertulang yang telah diperkuat GFRP dan CFRP menunjukkan bahwa balok mampu menahan kapasitas beban hingga mencapai 175,19% untuk balok Variasi I dan 214,69% untuk balok Variasi II terhadap balok normal.

Kata kunci: Balok Beton Bertulang, Glass Fiber Reinforced Polymer, Carbon Fiber Reinforced polymer.

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
KATA PENGANTAR	ii
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR TABEL.....	ix
DAFTAR GAMBAR	x
BAB I PENDAHULUAN.....	I - 1
1.1 Latar Belakang	I - 1
1.2 Rumusan Masalah	I - 3
1.3 Tujuan Penelitian.....	I - 4
1.4 Batasan Masalah.....	I - 4
1.5 Sistematika Penulisan.....	I - 5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	II - 1
2.1 Beton Bertulang.....	II - 1
2.1.1 Pengertian	II - 1
2.1.2 Prinsip Dasar Beton Bertulang	II - 2
2.1.3 Metode Perencanaan Beton Bertulang	II - 2
2.1.4 Balok Beton Bertulang Normal	II - 3
2.1.5 Perencanaan Batas	II - 5

2.2 Karakteristik Beton.....	II – 6
2.2.1. Kekuatan Tekan	II - 6
2.2.2. Kekuatan Tarik.....	II - 6
2.2.3. Kekuatan Geser	II - 7
2.2.4. Kurva Tegangan-Regangan.....	II - 7
2.3 Desain dan Analisis Lentur Balok Beton Bertulang Rangkap	II - 9
2.4 Fiber Reinforced Polymer (FRP)	II - 12
2.4.1. Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)	II - 14
2.4.2. Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP).....	II -15
2.5 Epoxy Resin	II - 17
2.6 Mode Kegagalan.....	II - 18
2.7 Kapasitas Balok Beton Bertulang dengan FRP	II -19
2.8 Analisa Lendutan pada Balok.....	II - 19
2.9 Retak pada Balok.....	II - 23
BAB III METODE PELAKSANAAN DAN PENELITIAN	III - 1
3.1. Jenis Penelitian dan Desain Penelitian	III - 1
3.1.1. Jenis Penelitian.....	III - 1
3.1.2. Desain Penelitian.....	III - 4
3.2 .Kerangka Prosedur Penelitian	III - 8
3.3.Lokasi dan Waktu Penelitian.....	III - 9
3.4.Alat dan Bahan Penelitian	III - 9

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	IV - 1
4.1. Hasil Pengujian Agregat.....	IV - 1
4.1.1. Pemeriksaan Agregat.....	IV - 1
4.1.2. Komposisi Mix Design.....	IV - 2
4.1.3. Kuat Tekan Beton.....	IV - 2
4.1.4. Kuat Tarik Baja	IV - 3
4.1.5. Modulus Elasisitas.....	IV - 3
4.2. Hasil Analisis Balok Beton Bertulang	IV - 4
4.2.1. Perbandingan Beban Maksimum	IV - 6
4.2.2. Hubungan Beban Lendutan.....	IV - 8
4.2.3. Hubungan Beban Lendutan Tengah Bentang.....	IV - 14
4.2.4. Grafik Beban Regangan	IV - 15
4.2.5. Pola Retak Balok	IV - 20
4.2.6. Mode Kegagalan Balok.....	IV - 23
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	V - 1
5.1. Kesimpulan.....	V - 1
5.2. Saran	V - 2

DAFTAR PUSTAKA

DOKUMENTASI PELAKSANAAN KEGIATAN

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Data Karakteristik Material CFRP	II - 7
Tabel 2.2 Data karakteristik Material GFRP	II - 9
Tabel 2.3 Karakteristik Material Resin Epoksi.....	II - 20
Tabel 4.1 Hasil Pemeriksaan Karakteristik Agregat	IV - 1
Tabel 4.2 Komposisi Bahan Campuran Beton untuk 1 m ³	IV - 2
Tabel 4. 3 Hasil Pengujian Kuat Tekan Benda Uji	IV - 2
Tabel 4. 4 Hasil Pengujian Kuat Tarik Baja Tulangan	IV - 3
Tabel 4. 5 Hasil Pengujian Modulus Elastisitas Benda Uji	IV - 4
Tabel 4. 6 Beban Balok Bertulang Normal.....	IV - 5
Tabel 4. 7 Beban Balok Bertulang yang diperkuat FRP	IV - 5
Tabel 4. 8 Peningkatan Kapasitas Balok Bertulang Normal.....	IV - 5
Tabel 4. 9 Beban dan Lendutan untuk Setiap Variasi Balok	IV - 14

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 CFRP (<i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i>)	I - 3
Gambar 2. 2 GFRP (<i>Glass Fiber Reinforced Polymer</i>)	I - 3
Gambar 2. 1 Kurva Tegangan-Regangan Beton	II - 8
Gambar 2. 2 Kurva Tegangan-Regangan Baja	II - 8
Gambar 2. 3 Balok dengan Tulangan Rangkap	II - 9
Gambar 2. 4 Regangan Untuk Metode ACI 440-2R-08	II - 19
Gambar 2. 5 Hubungan Beban-Defleksi pada Balok (E.G.Nawy : 1990)	II - 19
Gambar 2. 8 Jenis Retakan Pada Beton	II - 24
Gambar 3. 1 Desain Beban dan Balok	III - 5
Gambar 3. 2 Desain Tulangan dan Penampang Balok.....	III - 5
Gambar 3. 3 Desain Posisi FRP	III - 5
Gambar 3. 4 Desain Penampang Permukaan Balok FRP	III - 6
Gambar 3. 5 Variasi Benda Uji balok Beton Bertulang.....	III - 7
Gambar 3. 6 Kerangka Prosedur Penelitian	III - 9
Gambar 4. 1 Alat Pengujian Kuat Tekan Beton.....	IV - 3
Gambar 4.2 Alat LVDT	IV - 4
Gambar 4.3 Beban Maksimum dan Persentase Peningkatan Baban.....	IV - 7
Gambar 4.4 Grafik Hubungan Beban-Lendutan Balok Normal	IV - 8
Gambar 4.5 Grafik Hubungan Beban-Lendutan BGC-1.....	IV - 9
Gambar 4.6 Grafik Hubungan Beban-Lendutan BGC-2.....	IV - 10
Gambar 4.7 Grafik Hubungan Beban-Lendutan BGCG-1.....	IV - 11
Gambar 4.8 Grafik Hubungan Beban-Lendutan BGCG-2.....	IV - 12

Gambar 4.9 Grafik Hubungan Beban-Lendutan BGCG-3.....	IV - 13
Gambar 4.10 Grafik Hubungan Beban-Lendutan Tengah Bentang.....	IV - 14
Gambar 4.11 Grafik Hubungan Beban-Regangan Balok Normal	IV - 16
Gambar 4.12 Grafik Hubungan Beban-Regangan Balok BGC	IV - 17
Gambar 4.13 Grafik Hubungan Beban-Regangan Balok BGCG.....	IV - 17
Gambar 4.14 Grafik Gabungan Beban-Regangan	IV - 18
Gambar 4.15 Grafik Beban-Regangan GFRP dan CFRP BGC	IV - 19
Gambar 4.16 Grafik Beban-Regangan GFRP dan CFRP BGCG	IV - 19
Gambar 4.17 Grafik gabungan BGC dan BGCG.....	IV - 20
Gambar 4.18 Pola Retak Beton Normal.....	IV - 20
Gambar 4.19 Pola Retak BGC-1	IV - 21
Gambar 4.20 Pola Retak BGC-2.....	IV - 21
Gambar 4.21 Pola Retak BGCG-1	IV - 21
Gambar 4.22 Pola Retak BGCG-2	IV - 22
Gambar 4.23 Pola Retak BGCG-3	IV - 22
Gambar 4.24 Moda Keruntuhan BGC-1	IV -23
Gambar 4.25 Mode Keruntuhan BGC-2	IV -23
Gambar 4.26 Mode Keruntuhan BGCG-1	IV - 24
Gambar 4.27 Mode Keruntuhan BGCG-2	IV - 24
Gambar 4.28 Mode Keruntuhan BGCG-3	IV - 24

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam dunia konstruksi, beton merupakan material utama yang memiliki peran penting untuk digunakan dalam suatu pembangunan struktur. Pada umumnya jenis beton yang digunakan dalam struktur tersebut adalah beton bertulang yaitu material komposit penyusun elemen struktur antara beton dengan tulangan baja yang saling bekerja sama dalam memikul gaya-gaya yang bekerja internal diakibatkan oleh beban eksternal. Alasan penggunaan beton itu sendiri dikarenakan oleh beberapa faktor antara lain segi material, pengerjaan tulangannya, pengecoran dan biaya, beton relatif mudah dan murah. Akan tetapi struktur beton yang sering kita jumpai sekarang ini banyak yang mengalami kerusakan. Kerusakan struktur tersebut dapat disebabkan oleh kualitas bahan yang tidak memenuhi spesifikasi, pembebanan yang berlebih, kriteria perencanaannya yang tidak sesuai dengan standar, ataupun disebabkan oleh bencana alam seperti gempa.

Maka untuk mengurangi resiko-resiko yang akan terjadi dibutuhkan adanya langkah nyata untuk memunculkan inovasi baru dalam perencanaan struktur bangunan yang lebih berkualitas lagi. Sehubungan dengan itu, dilakukanlah perbaikan struktur untuk meningkatkan kemampuannya dalam memikul beban-beban dan untuk mengembalikan atau meningkatkan kekuatan elemen struktur agar mampu menahan beban sesuai dengan beban rencana.

Perkuatan struktur bertujuan untuk penambahan faktor keamanan akibat perubahan fungsi atau peningkatan beban rencana akibat perubahan tata cara perencanaan.

Saat ini telah berkembang cara meningkatkan infrastruktur salah satunya dengan penggunaan serat FRP (*Fiber Reinforced Polymer*) sebagai bahan komposit. Pemilihan material ini dikarenakan FRP merupakan tulangan yang tidak berkarat, ringan dan memiliki kekuatan yang tinggi. Pada umumnya ada tiga macam serat (*fiber*) yang dikenal yaitu GFRP (*glass fiber reinforced polymer*) atau serat gelas, AFRP (*aramid fiber reinforced polymer*) dan CFRP (*carbon fiber reinforced polymer*) atau serat karbon. Namun penelitian kali ini hanya difokuskan pada penggunaan CFRP dan GFRP terhadap perlakuan lentur balok beton bertulang.

CFRP maupun GFRP merupakan material yang keduanya sama-sama memiliki kelemahan dan kelebihan tersendiri. CFRP (*carbon fiber reinforced polymer*) merupakan sejenis plat baja tipis yang didalamnya terdapat serat-serat karbon dan fiber. CFRP digunakan pada konstruksi struktur bangunan yang sudah ada. Sedangkan GFRP (*glass fiber reinforced polymer*) merupakan serat yang paling banyak dipakai saat ini karena harganya yang relatif murah dan mudah didapatkan di pasaran. Kuat tarik fiber gelas yang kuat membuat GFRP dapat dimanfaatkan sebagai tulangan yang menerima gaya tarik pada elemen strukturnya. GFRP dapat dibuat dalam bentuk batangan atau plat. Pada umumnya persamaan antara CFRP dan GFRP adalah keduanya merupakan material yang tahan terhadap korosi, mempunyai kuat tarik yang tinggi,

superior dalam daktilitas, beratnya ringan sehingga tidak memerlukan peralatan yang berat untuk membawanya ke lokasi konstruksi, dan juga tidak mengganggu aktifitas yang ada pada daerah perbaikan struktur.

Akan tetapi CFRP tergolong lebih mahal jika dibandingkan dengan GFRP. Oleh sebab itu, pada penelitian ini untuk mempertimbangkan keekonomisan dari perencanaan struktur pada beton bertulang, penggunaan CFRP akan lebih sedikit daripada GFRP. Sehingga perpaduan antara CFRP dan GFRP ini pada balok beton bertulang akan saling bekerja sama dalam meneliti perilaku lentur balok tersebut.

Dari uraian di atas, maka saya berinisiatif untuk melakukan penelitian tentang bagaimana perilaku lentur balok beton bertulang akibat pelapisan serat (*fiber*) yaitu memadukan CFRP (*carbon fiber reinforced polymer*) dengan GFRP (*glass fiber reinforced polymer*). Adapun judul penelitian dalam penyusunan Tugas Akhir ini yaitu **“PENGARUH LAPISAN *HYBRID* SERAT KARBON DAN SERAT GELAS PADA KAPASITAS LENTUR BALOK BETON BERTULANG”**.

1.1 Rumusan Masalah

Yang menjadi rumusan masalah pada penelitian ini adalah :

1. Bagaimana perbandingan kapasitas beban dan lendutan beton bertulang normal dan beton yang dilapisi dengan perpaduan antara serat karbon dan serat gelas ?

2. Bagaimana perbandingan pola retak yang terjadi pada beton normal dan beton yang diperkuat oleh serat gelas dan serat karbon?

1.2 Tujuan Penelitian

1. Mengetahui pengaruh serat karbon dan serat gelas sebagai bahan penguat balok beton bertulang yang telah dibebani hingga tulangan meleleh.
2. Mengetahui perbandingan perilaku lentur balok beton bertulang normal dan balok beton dengan lapisan serat karbon dan serat gelas.

1.3 Batasan Masalah

Dalam mencapai maksud dan tujuan penelitian di atas, maka ruang lingkup penelitian dibatasi sebagai berikut :

1. Pada penelitian ini dimensi sampel uji yang dibuat adalah 270cm x 15cm x 20cm.
2. Menggunakan bahan beton normal dengan mutu $f'c = 25$ Mpa.
3. Jenis tulangan yang digunakan adalah tulangan ganda yang terdiri atas tulangan memanjang untuk serat tekan $\emptyset 10$, tulangan untuk serat tarik $\emptyset 6$, dan tulang geser $\emptyset 6$.
4. Balok yang akan dilapisi serat karbon maupun serat gelas telah dibebani hingga tulangan meleleh.
5. Tidak membahas pengaruh lapisan *hybrid* serat karbon dan serat gelas terhadap geser.

1.4 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang digunakan adalah membagi kerangka penulisan ke dalam bab dan sub bab, dengan maksud agar masalah yang dikemukakan akan menjadi lebih jelas dan mudah untuk dipahami.

Berikut ini adalah gambaran singkat mengenai bab yang akan dibahas dalam tulisan ini :

BAB I PENDAHULUAN

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

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini merupakan penjelasan mengenai teori dasar beserta rumus-rumus yang berhubungan dengan penelitian.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan penentuan dimensi balok, rancang campur beton, langkah penelitian, jenis penelitian, lokasi dan waktu penelitian, alat dan bahan penelitian, prosedur penelitian dan variable penelitian.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi pemaparan hasil penelitian dan pembahasan mengenai pengujian bahan, pengujian balok, perbandingan antara hasil desain dan hasil pengujian.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini merupakan bab penutup, berupa kesimpulan singkat mengenai analisa hasil yang diperoleh saat penelitian dengan saran-saran yang diusulkan berdasarkan hasil penelitian.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Beton Bertulang

2.1.1 Pengertian

Beton bertulang terdiri dari partikel-partikel agregat yang dilekatkan oleh pasta yang terbuat dari semen portland dan air. Pasta itu mengisi ruang-ruang kosong di antara partikel-partikel agregat dan setelah beton segar dicorkan, material ini mengeras sebagai akibat dari reaksi-reaksi kimia eksotermis antara semen dan air membentuk suatu bahan struktur yang padat dan tahan lama. Material ini telah banyak dan lazim digunakan di Indonesia.

Selain semen, beton juga terbentuk akibat adanya agregat dari campuran agregat halus dan kasar. Biasanya pasir untuk agregat halus dan kerikil atau batu pecah untuk agregat kasar. Agregat ringan yang terbuat dari serpih, batu tulis atau tanah liat menjadi bertambah penting. Agregat-agregat lain, seperti terak (slag) juga digunakan. Ukuran (dan juga gradasi) agregat mempunyai pengaruh yang penting terhadap jumlah semen dan air yang diperlukan untuk membuat satu satuan beton dari suatu konsistensi tertentu. Banyaknya air relatif terhadap banyaknya semen merupakan hal yang sangat penting dalam menentukan kekuatan beton.

Beton harus mempunyai sifat dapat dikerjakan yang memadai untuk menjamin konsolidasinya di dalam acuan (bekisting) tanpa ruang-ruang kosong yang berlebihan. Sifat ini biasanya secara tidak langsung diukur di lokasi

pekerjaan dengan pengujian slump. Slump yang diperlukan mungkin kecil apabila digunakan alat-alat penggetar (*vibrators*) untuk mengkonsolidasikan beton.

Perawatan pengerasan (*curing*) yang tepat dari beton menghendaki agar air dalam adukan tidak diperbolehkan menguap dari beton sampai beton telah mencapai kekuatan yang diinginkan. Beton yang kering-udara dapat mencapai kekuatannya apabila dibasahi kemudian. Temperature juga merupakan salah satu faktor yang penting terhadap kecepatan dimana beton mencapai kekuatannya, temperatur-temperatur yang rendah dapat memperlambat proses tetapi meningkatkan kekuatan potensial apabila temperatur normal dikembalikan. Temperatur-temperatur awal yang tinggi menghasilkan pengikatan yang cepat dan kehilangan permanen yang lama dari kekuatan potensial.

2.1.2 Prinsip Dasar Beton Bertulang

Beton merupakan material yang kuat terhadap tekan dan lemah terhadap tarik. Beton itu akan retak ketika mendapatkan tegangan tarik yang melebihi kekuatan tariknya. Sehingga untuk menahan gaya tarik, beton dikombinasikan dengan tulangan baja yang akan memberikan kelebihan dalam menahan adanya tegangan tarik. Dengan menanamkan tulangan baja pada beton seperlunya diperoleh beton bertulang dengan baja pemikul tarik sedangkan beton untuk pemikul tekan.

2.1.3 Metode Perencanaan Beton Bertulang

Menurut SNI 03-2847-2002 pasal 10 ayat 1, perencanaan elemen struktur beton bertulang dapat dilakukan dengan salah satu dari dua metode sebagai berikut :

1. Metode Beban Kerja

Dengan metode beban kerja, elemen struktur beton bertulang direncanakan kuat memikul beban-beban yang bekerja pada elemen , dimana pengertian kuat disini, ditandai dengan lebih kecil atau sama dengannya tegangan yang terjadi pada elemen akibat beban kerja tersebut dibandingkan dengan tegangan yang diizinkan, dimana tegangan izin adalah tegangan batas/ultimit material yang sudah dibagi dengan suatu faktor keamanan.

$$\sigma \leq \bar{\sigma} \quad (2.1)$$

2. Metode Kekuatan Batas/Ultimit

Dengan menggunakan metode kekuatan batas elemen struktur direncanakan harus kuat memikul beban terfaktor. Beban terfaktor adalah kombinasi beban-beban yang bekerja dimana masing-masing beban sudah dikalikan dengan suatu faktor keamanan tertentu. Tegangan-tegangan yang terjadi pada elemen tidak boleh melebihi tegangan batas/ultimit dari material. Atau dapat dikatakan secara umum :

$$\text{Kuat Perlu} \leq \text{Kuat Rencana}$$

Metode yang pertama (metode tegangan kerja) merupakan metode lama dalam merencanakan elemen struktur beton bertulang. SNI 03-2847-2002

lebih menyarankan untuk menggunakan metode kedua (metode kekuatan batas), karena lebih realistis.

2.1.4 Balok Beton Bertulang Normal

Balok beton bertulang akan mengalami lentur ketika beban bekerja, Lentur ini sebagai akibat dari regangan deformasi yang disebabkan oleh beban eksternal. Pada saat beban ditingkatkan, balok tersebut akan menahan regangan dan defleksi tambahan, sehingga terjadi retak lentur di sepanjang bentang balok. Penambahan yang terus menerus terhadap tingkat beban maka akan mengakibatkan kegagalan elemen struktural ketika beban eksternal mencapai kapasitas elemen tersebut.

Kegagalan pada balok beton bertulang pada dasarnya dipengaruhi oleh melelehnya tulangan baja dan hancurnya beton bertulang. Ada 3 kemungkinan yang bisa terjadi yang menyebabkan kegagalan balok beton bertulang, yaitu :

a. Kondisi *balanced reinforced*

Tulangan tarik mulai leleh tepat pada saat beton mencapai regangan batasnya dan akan hancur karena tekan.

Kondisi regangan : $\epsilon_c = 0.003$ dan $\epsilon_s = \frac{fy}{Es}$

Pada kondisi ini berlaku : $\rho = \rho_{balanced}$ dan $\epsilon_s = \epsilon_y$

b. Kondisi *Over-Reinforced*

Kondisi ini terjadi apabila tulangan yang digunakan lebih banyak dari yang diperlukan dalam keadaan balanced. Keruntuhan ditandai dengan hancurnya penampang beton terlebih dahulu sebelum tulangan baja meleleh.

Pada kondisi ini berlaku: $\rho > \rho_{balanced}$ dan $\varepsilon_s < \varepsilon_y$

c. Kondisi *Under-Reinforced*

Kondisi ini terjadi apabila tulangan tarik yang dipakai pada balok kurang dari yang diperlukan untuk kondisi balanced. Keruntuhan ditandai dengan lelehnya tulangan baja terlebih dahulu dari betonnya.

Pada kondisi ini berlaku : $\rho < 75\% \rho_{balanced}$ dan $\varepsilon_s < \varepsilon_y$

Dalam perencanaan elemen struktur, suatu elemen struktur harus direncanakan berada pada kondisi under-reinforced.

2.1.5 Perencanaan Batas

Ada beberapa kondisi yang dapat dijadikan batasan pada perencanaan elemen beton bertulang :

1. Kondisi Batas Ultimit, yang dapat disebabkan oleh :
 - Hilangnya keseimbangan global atau lokal
 - *Rupture* : hilangnya ketahanan lentur dan geser elemen-elemen struktur
 - Keruntuhan *progressive* akibat adanya keruntuhan lokal pada daerah sekitarnya.
 - Pembentukan sendi plastis
 - Keidakstabilan struktur
 - *Fatigue*
2. Kondisi Batas Kemampuan Layan, yakni menyangkut berkurangnya fungsi struktur, antara lain :
 - Defleksi yang berlebihan pada kondisi layan
 - Lebar retak yang berlebih

- Vibrasi yang mengganggu
3. Kondisi Batas Khusus, yaitu menyangkut kerusakan/keruntuhan akibat beban abnormal, antara lain :
- Keruntuhan pada kondisi gempa ekstrim
 - Kebakaran, ledakan atau tabrakan kendaraan
 - Korosi atau jenis keruntuhan lainnya akibat keruntuhan

Perencanaan yang memperhatikan kondisi-kondisi batas di atas disebut perencanaan batas. Konsep perencanaan batas ini digunakan sebagai prinsip dasar peraturan beton Indonesia (SNI 03-2847-2002).

2.2 Karakteristik beton

2.2.1 Kekuatan Tekan

Kekuatan tekan beton tergantung pada tipe campuran, waktu dan kualitas perawatan. Kekuatan tekan diperoleh berdasarkan hasil uji tekan laboratorium terhadap benda uji baik silinder ataupun kubus pada saat umur beton 28 hari. Mengenai frekuensi pengetesan dianggap memuaskan jika : (1) rata-rata semua set dari tiga tes kekuatan yang berurutan sama atau melebihi kuat tekan yang disyaratkan. (2) tidak ada tes kekuatan individual (rata-rata dua silinder yang jatuh dibawah kuat tekan yang disyaratkan). Pada dasarnya kuat tekan desain seharusnya bukanlah kekuatan silinder rata-rata. Harga desain haruslah dipilih sebagai kekuatan silinder minimum yang mungkin.

2.2.2 Kekuatan Tarik

Kekuatan tarik beton relatif rendah. Suatu pendekatan yang baik terhadap kekuatan tarik beton f_{ct} adalah $0,10 f'_c < f_{ct} < 0,20 f'_c$. Karena kontribusi yang

diberikan oleh kekutan tarik beton relative rendah maka dalam perencanaan kekutan tarik beton bisa diabaikan. Metode yang sering digunakan untuk memperoleh kekuatan tekan adalah tes pembelahan tarik.

Untuk anggota-anggota elemen struktur yang dikenai lentur, harga modulus hancur (*modulus of rupture*) f_r dipergunakan dalam desain lebih tinggi dari pada kekuatan pembelahan tarik. ACI mensyaratkan suatu harga sebesar $7,5\sqrt{f'_c}$ untuk modulus hancur beton kekuatan-normal bobot-normal.

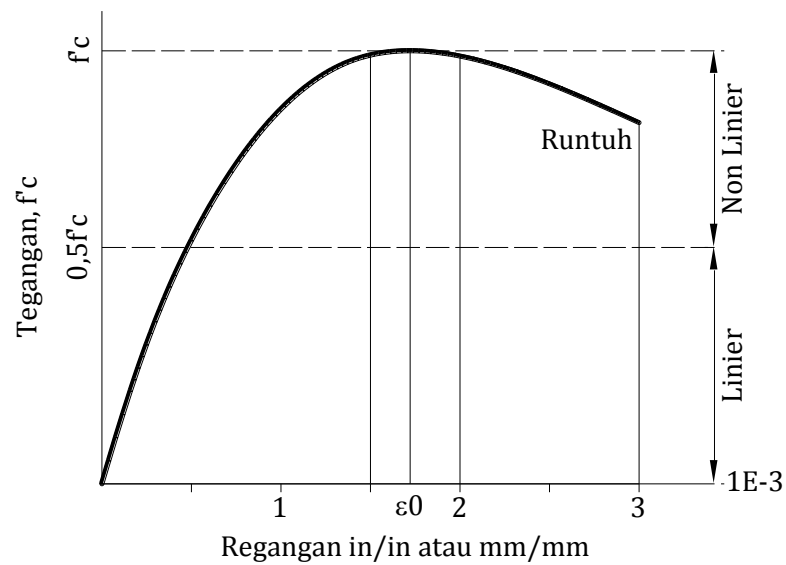
2.2.3 Kekuatan Geser

Kekuatan geser lebih sulit untuk ditentukan secara ekperimental dari pada tes-tes yang didiskusikan terdahulu karena adanya kesulitan didalam memisahkan geser dari tegangan-tegangan lainnya. Hal ini merupakan salah satu penyebab dari variasi yang besar pada harga-harga kekuatan geser yang dilaporkan dalam pustaka, yang bervariasi mulai 20% dari kekuatan tekan untuk pembebanan normal sampai suatu persentase yang jauh lebih tinggi mencapai 85% dari kekuatan tekan pada keadaan dimana geser langsung terjadi dalam kombinasi dengan tekan.

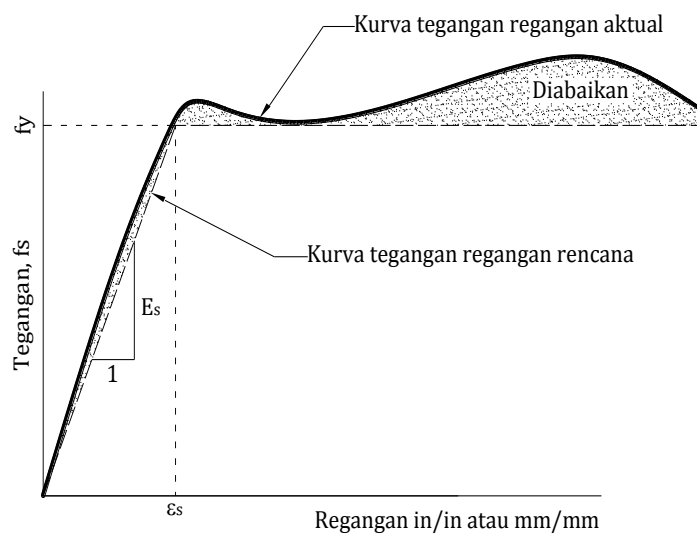
2.2.4 Kurva Tegangan-Regangan

Kurva tegangan-regangan menunjukkan suatu kurva tegangan-regangan tipikal yang diperoleh dari hasil penelitian menggunakan spesimen beton silinder yang dibebani tekan unaksial sehingga beton itu hancur. Perilaku tegangan-regangan masih bersifat linier pada saat tegang pada nilai $0,5 f'_c$ dan berubah menjadi nonlinier jika tegangan lebih besar dari $0,5 f'_c$. tegangan maksimum (f'_c) terjadi pada regangan antara 0,0015 dan 0,002. Regangan pada tegangan puncak

disebut $\epsilon_0 = 2,4 \times 10^{-4} \sqrt{f'_c}$. Regangan pada batas/ultimit beton berkisar antara 0,003 hingga 0,008 namun dalam praktek antara 0,003 hingga 0,004. ACI menetapkan *lower bound* (batas aman) regangan maksimum serat desak beton sebesar $\epsilon_{cu} = 0.003$ (begitu pula dengan SNI 03-2847-2002). Sementara untuk BS 8110 sebesar $\epsilon_{cu} = 0.0035$.



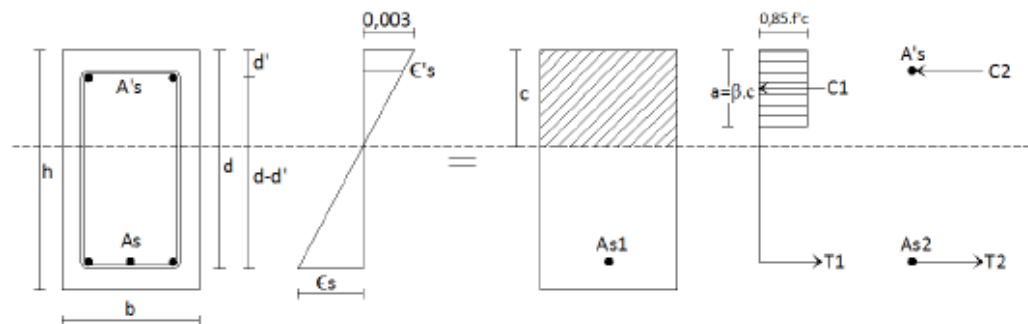
Gambar 2.1 Kurva Tegangan-Regangan Beton



Gambar 2.2 Kurva Tegangan-Regangan Baja

Kurva tegangan regangan baja akibat beban tarik ditunjukkan seperti pada gambar di atas dimana nilai modulus elastisitas baja adalah bernilai $E_s = 200.000$ Mpa. F_y adalah nilai tegangan yang diberikan ke baja yang mengakibatkan melelehnya baja. Jika tegangan baja $f_s < f_y$, maka $f_s = E_s * \epsilon_s$, namun jika tegangan baja tulan $\epsilon_s > f_y/E_s$, maka $f_s = f_y$.

2.3 Desain dan Analisis Lentur Balok Beton Bertulang Rangkap



Gambar 2.3 Balok dengan Tulangan pada Daerah Tekan dan Tarik
(Edward G. Nawy, 1990)

Dikatakan beton bertulang rangkap karena pada struktur beton terjadi dua macam tegangan yaitu tegangan tekan dan tarik. Maka pada beton tersebut diperlukan adanya tulangan atas dan tulangan bawah. Ini disebabkan karena gaya gempa yang arahnya bolak-balik juga diperhitungkan.

Beban-beban yang bekerja pada beton, akan mengakibatkan struktur akan mengalami lentur dan deformasi sebagai akibat regangan yang terjadi karena adanya beban luar yang bekerja. Di sepanjang balok akan terjadi retak lentur ketika beban bertambah. Dengan semakin bertambahnya beban, maka balok

tersebut akan mengalami keruntuhan balok yaitu pada saat beban luarnya sudah mencapai kapasitas lentur balok.

Jika suatu balok terbuat dari material yang elastis linier, isotropis, dan homogen, maka tegangan lentur maksimumnya dapat diperoleh dengan rumus:

$$f = \frac{M \cdot c}{I} \quad (2.2)$$

Dimana f adalah tegangan maksimum, M adalah momen maksimum, c adalah tinggi sumbu netral pada saat beban maksimum, dan I adalah momen inersia penampang balok.

Pada keadaan beban batas, balok beton bertulang bukanlah material yang homogen dan juga tidak elastis, rumus lentur balok tersebut tidak dapat digunakan untuk menghitung tegangannya. Akan tetapi prinsip-prinsip dasar tentang teori lentur masih dapat digunakan pada analisis melintang balok beton bertulang. Asumsi-asumsi umum yang digunakan dalam memperkirakan perilaku penampang adalah sebagai berikut :

1. Distribusi tegangan dianggap linier. Asumsi ini berdasarkan hipotesis Bernouilli yaitu penampang yang datar sebelum mengalami lentur akan tetap datar dan tegak lurus terhadap sumbu netral setelah mengalami lentur.
2. Regangan pada baja dan beton disekitarnya sama sebelum terjadi retak pada beton atau leleh pada baja.

Agar keseimbangan gaya horisontal terpenuhi, gaya tekan C pada beton dan tulangan desak dan gaya tarik dari tulangan tarik dan beton sebelum retak harus saling mengimbangi, jadi harus

$$\Sigma C = \Sigma T \quad (2.3)$$

Ada dua hal yang harus dikontrol pada analisis beton bertulang rangkap yaitu kontrol keserasian regangan dan kontrol keseimbangan gaya-gaya internal yang bekerja dalam penampang. Setelah keduanya terkontrol barulah momen internal penampang dapat ditentukan. Selanjutnya analisis penampang didasarkan pada tahapan perubahan perilaku dari elemen penyusun penampang dalam memprediksi perilaku balok dalam melawan beban luar. Adapun tahapan perilaku itu sendiri adalah sebagai berikut :

1. Tahapan pertama adalah tahapan dimana beton pada sisi tarik belum mengalami retak. Pada tahapan ini akan diperoleh beban atau momen yang menyebabkan retaknya beton pada sisi tarik..
2. Tahapan kedua adalah tahapan dimana beton tarik telah retak dan tulangan tarik telah mencapai leleh dan menjelang plastis. Namun tahapan ini bisa menjadi tahapan ketiga akibat beton desak lebih dahulu mengalami leleh. Hal ini sangat tergantung pada mutu beton dan mutu baja tulangan yang menyusun penampang serta luas penampang keduanya.
3. Tahapan ketiga adalah tahapan dimana beton tarik telah retak dan beton pada sisi tekan menjelang leleh.
4. Tahapan keempat adalah tahapan dimana tulangan tarik telah plastis dan beton pada sisi desak telah plastis dan beton pada sisi desak mencapai ultimit.

5. Tahapan kelima adalah tahapan dimana tulangan desak berubah menjadi tulangan tarik. Namun tahapan ini dapat menjadi tahapan keempat tergantung pada mutu beton dan baja tulangannya serta luas masing-masing.
6. Tahapan keenam adalah tahapan dimana beton pada sisi desak runtuh. Pada tahapan ini akan diperoleh beban runtuh.

2.4 Fiber Reinforced Polymer (FRP)

FRP merupakan suatu material komposit yang digunakan dalam konstruksi sipil. Bahan ini menggabungkan polimer resin, *filler*, dan *fiber*. Resin yang digunakan adalah *polyester*, *vinylester* atau *epoxy*, dan *filler* yang digunakan adalah *kaolin clay*, *calcium carbonate*, dan *alumina*. Sedangkan *fiber* terdiri dari beberapa jenis *glass*, *carbon* dan *aramide*.

Material komposit punya beberapa kelebihan seperti berkekuatan tinggi, ringan dan punya daya tahan yang tinggi (BRE and Trennd:2000). Selain itu FRP juga bahan non korosi, netral terhadap gaya magnet jika dibandingkan terhadap baja, FRP punya kuat tarik lebih besar, modulus elastisitas kecil dan hubungan tegangan-regangan elstatis.

FRP untuk jenis *grid* digunakan untuk perkuatan pelat. Pengembangan penggunaan FRP pada rekayasa sipil terdiri dari dua bagian, yang pertama untuk rehabilitasi dan perbaikan struktur dan kedua untuk pembuatan konstruksi baru yang sepenuhnya menggunakan FRP maupun komposit dengan beton. Menurut BRE dan Trennd 2000 Itd terdapat beberapa keuntungan menggunakan FRP sebagai bahan perkuatan struktur :

1. Teknik yang digunakan dalam pemasangan tidak mengganggu penggunaan struktur lainnya.
2. Meningkatkan kapasitas struktur dengan penambahan berat struktur sendiri adalah minimum.
3. Teknik yang digunakan relatif cepat, meminimalkan waktu bekerja.
4. Material FRP lebih tipis dan lebih ringan daripada menggunakan perkuatan dari baja.

Sedangkan menurut Carin L. Robert and Wallman keuntungan FRP sebagai tulangan yaitu :

1. Tulangan FRP tidak berkarat
2. Tulangan FRP sangat ringan
3. Tulangan FRP memiliki kekuatan yang tinggi.

Keuntungan pemakaian FRP menurut Hartono dan Santosa, 2003 antara lain :

1. Kuat tarik yang tinggi ($\pm 7 - 10$ kali lebih tinggi U39)
2. Sangat ringan (density : $1,4 - 2,4 \text{ gr/cm}^3$, 4 – 6 kali lebih ringan dari baja)
3. Pelaksanaan sangat mudah dan cepat
4. Memungkinkan tidak perlu penutupan lalu lintas
5. Tidak perlu area kerja yang luas
6. Tidak diperlukan join meskipun batang yang diperekat cukup panjang
7. Tidak berkarat

Akan tetapi perlu diperhatikan kelemahan-kelemahan pemakaian bahan ini, antara lain kurang tahan terhadap suhu yang tinggi. Dengan suhu sekitar 70°C bahan perekat *epoxy resin* akan berubah dari kondisi keras menjadi lunak, bersifat

plastis sehingga daya lekatnya akan menurun. Selain itu material FRP ini juga tidak tahan terhadap sinar ultra violet. Maka untuk mengatasi kelemahan ini perlu dilakukan proteksi, misalnya pelapisan atau penutupan dengan mortar. FRP terdiri atas tiga macam berdasarkan bahan seratnya yaitu *Glass Fiber Reinforced Polymer* (GFRP) yang terbuat dari serat gelas, *Aramid Fiber Reinforced Polymer* (AFRP) yang terbuat dari aramid, dan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) yang terbuat dari karbon. Namun pada penelitian ini hanya dikhususkan pada pembahasan mengenai GFRP dan CFRP.

2.4.1 Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)

CFRP merupakan salah satu jenis *Fiber Reinforced Polymer* (FRP) yang terbuat dari karbon. CFRP merupakan sejenis plat baja tipis yang mengandung serat-serat karbon dan *fiber*. Pemakaian CFRP biasanya disebabkan oleh :

1. Terjadinya kesalahan dalam perencanaan
2. Adanya kerusakan-kerusakan di bagian struktur sehingga dikhawatirkan tidak lagi berfungsi dengan yang diharapkan.
3. Adanya perubahan fungsi pada system struktur dan adanya penambahan beban yang melebihi beban rencana.



Gambar 2.4 CFRP

Kelebihan dari material ini adalah lebih baik dibandingkan GFRP maupun AFRP dilihat dari kekuatan dan elastisitasnya yang jauh lebih bagus. Yaitu mempunyai kuat tarik yang lebih tinggi dari kuat tarik baja tulangan sebesar 2800 Mpa, mempunyai kekakuan yang cukup tinggi dimana modulus elastisitasnya (E) sebesar 165.000 Mpa, tidak mengalami korosi karena terbuat dari bahan non logam, mempunyai penampang yang kecil dan sangat ringan dengan berat 1,5 g/cm³ serta mudah dalam pemasangannya. Adapun kekurangannya adalah CFRP masih tergolong sangat mahal.

Interaksi antara beton dan CFRP dapat dibentuk oleh material perekat yang memberikan ikatan antara kedua bahan tersebut melalui aksi adhesi. Penggunaan material perekat pada struktur beton yang ditulangi CFRP akan memberikan dampak positif pada struktur karena penempatan CFRP pada penampang beton tidak perlu menanamkan dalam beton, mengingat bahan tersebut tahan korosi karena terbuat dari bahan non logam. Jadi bahan komposit CFRP tidak dibutuhkan adanya cover, sehingga diharapkan jarak dapat dioptimalkan sehingga dapat menghasilkan kapasitas momen lentur yang maksimal pula.

Tabel 2.1 Karakteristik CFRP

Properties	CFRP
Kuat tarik	2800 MPa
Modulus-E	165.000 MPa
ϵ_{cu}	>1,7%

Tebal / Lebar	0,8 mm / 50 mm
Berat isi	1,5 g/cm ³

2.4.2 *Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)*

GFRP terbuat dari kaca cair yang dipanaskan sekitar 2300°F dan dipintal dengan bantuan Bushing Platinumrhodium pada kecepatan 200 mph. GFRP dapat dijumpai di pasaran dengan harga yang murah dan paling banyak dalam bentuk lembaran, dimana keuntungan untuk tipe lembaran ini adalah kemudahan dalam aplikasi yaitu mudah ditempel pada permukaan beton dengan menggunakan bahan perekat, memiliki kekuatan tarik yang tinggi, ketahanan yang tinggi terhadap kimia, memiliki sifat isolasi yang baik. Adapun kekurangannya dari material ini adalah berat jenisnya yang tinggi, memiliki sifat kekerasan yang tinggi, dan ketahanan kelelahan yang relatif rendah.



Gambar 2.5 GFRP

Sebagai penguatan eksternal, GFRP lembaran digunakan untuk :

- a. Perbaikan balok dan slab beton yang rusak, dengan asumsi bahwa *debonding* antara FRP dan beton tidak menyebabkan kegagalan elemen struktur

- b. Mengatasi pertambahan lebar retakan akibat beban layanan
- c. Meningkatkan kekuatan lentur akibat peningkatan beban seperti beban gempa dan beban lalu lintas
- d. Merencanakan beton baru yang memiliki daktilitas tinggi
- e. Perbaiki struktur akibat kesalahan desain atau konstruksi
- f. Meningkatkan kemampuan geser beton
- g. Meningkatkan kemampuan pengekangan kolom beton
- h. Perbaiki struktur lama dan bersejarah.

Beberapa jenis serat kaca yang tersedia di pasaran adalah :

- (a) *E-Glass*, yang memiliki kandungan alkali yang lebih rendah dan merupakan jenis yang paling banyak digunakan. Keuntungannya memiliki sifat mekanis yang tinggi
- (b) *Z-Glass*, digunakan untuk mortar semen dan beton karena memiliki resistensi yang tinggi terhadap serangan alkali
- (c) *A-Glass*, yang memiliki kandungan alkali tinggi
- (d) *C-Glass*, yang digunakan untuk aplikasi yang memerlukan ketahanan korosi yang besar untuk asam, seperti aplikasi kimia.
- (e) *S atau R-Glass*, yang diproduksi untuk ekstra kekuatan tinggi dan modulus yang tinggi.

Tabel 2.2Karakteristik material GFRP

KEADAAN LEPAS		KEADAAN KOMPOSIT		
SIFAT MATERIAL	NILAI TEST	SIFAT MATERIAL	NILAI TEST	
			TEST	DESAIN
Tegangan Tarik	3.24 GPa	Tegangan Ultimit	575 MPa	460 MPa
Modulus Tarik	72.4 GPa	Regangan	0.022	0.022
Regangan Maks.	0.045	Modulus Tarik	26.1 GPa	20.9 GPa
Kerapatan	2.55 g/cm ³	Teg. Tarik ultimit	25.8 GPa	20.7 GPa
Tebal Fiber	0.366 mm	Tebal komposit	1.3 mm	1.3 mm

Sumber : *Fyfo.Co LLC*

2.5 Epoxy Resin

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

Resin epoxy yang paling banyak digunakan adalah Bisphenol A Eter Diglisidil.

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

Beberapa keuntungan *resin epoxy* sebagai berikut :

- a. Berbagai sifat mekanis memungkinkan pilihan yang lebih banyak

- b. Tidak ada penguapan selama proses pengeringan
- c. Rendahnya penyusutan selama proses pengeringan
- d. Ketahanan yang baik terhadap bahan kimia
- e. Memiliki sifat adhesi yang baik terhadap berbagai macam pengisi, serat dan substrat lainnya

Kelemahan *resin epoxy* adalah biaya yang relatif mahal dan proses pengeringan yang relatif lama.

Tabel 2.3Karateristik Material Resin Epoxy

SIFAT MATERIAL EPOXI		
Waktu pengeringan : 72 Jam (Suhu ruang :60°C)		
SIFAT MATERIAL	METODE ASTM	NILAI TEST
Kekuatan Tarik	ASTM D-638	72.4 Mpa
Modulus Tarik		3.18 Gpa
Persen Regangan	ASTM D-638	5%
Kekuatan Lentur	ASTM D-790	123.4 Mpa
Modulus Lentur	ASTM D-790	3.12 Gpa

Sumber : *Fyfo.Co LLC*

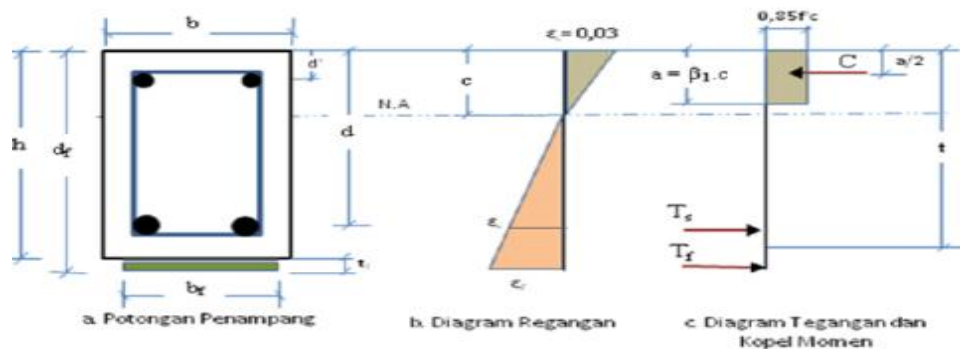
2.6 Mode Kegagalan

Beberapa mode kegagalan yang sering terjadi pada balok yang diperkuat dengan FRP yaitu :

- a. Rusaknya FRP setelah tulangan tarik meleleh
- b. Hancurnya beton sekunder setelah tulangan tarik meleleh
- c. Inti beton rusak karena tekanan sebelum tulangan tarik meleleh
- d. Lepasnya ikatan antara FRP dan beton (debonding)

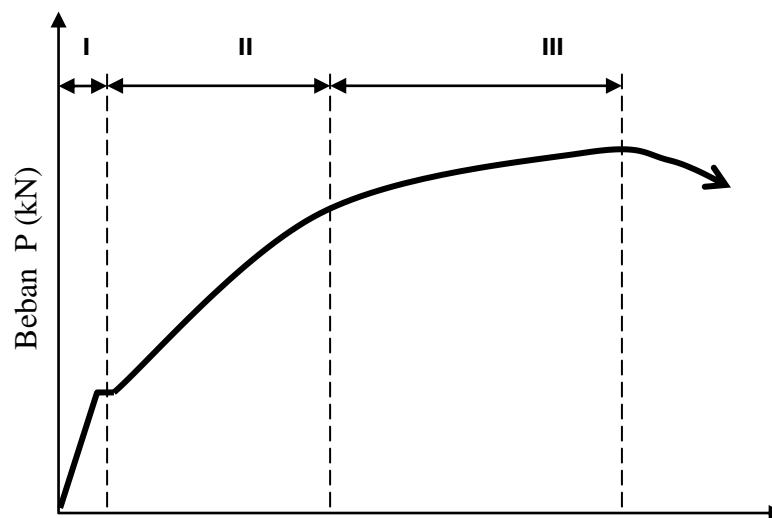
2.7 Kapasitas Balok Beton Bertulang dengan FRP (ACI 440-2R-08)

Untuk perkutan lentur dengan FRP, perhitungan desain mengacu pada ACI committee 440.



Gambar 2.6 Regangan Untuk Metode ACI 440-2R-08

2.8 Analisa Lendutan pada Balok



Gambar 2.7 Hubungan Beban-Defleksi pada Balok (E.G.Nawy : 1990)

Hubungan beban-defleksi balok beton bertulang pada dasarnya dapat diidealisasikan menjadi bentuk trilinear sebelum terjadi ruptur seperti pada diagram

Daerah I :Taraf praretak, dimana batang-batangnya strukturalnya bebas retak. Segmen praretak dari kurva beban - defleksi berupa garis lurus yang memperlihatkan perilaku elastis penuh. Tegangan tarik maksimum pada balok lebih kecil dari kekuatan tariknya akibat lentur atau lebih kecil dari modulus rupture (f_r) beton. Kekakuan lentur EI balok dapat diestimasi dengan menggunakan modulus Young E_c dari beton, dan momen inersia penampang balok tak retak.

Daerah II :Taraf beban pascaretak, dimana batang-batang struktural mengalami retak-retak terkontrol yang masih dapat diterima, baik distribusinya maupun lebarnya. Balok pada tumpuan sederhana retak akan terjadi semakin lebar pada daerah lapangan, sedangkan pada tumpuan hanya terjadi retak minor yang tidak lebar. Apabila sudah terjadi retak lentur maka kontribusi kekuatan tarik beton sudah dapat dikatakan tidak ada lagi. Ini berarti pula kekakuan lentur penampangnya telah berkurang sehingga kurva beban –defleksi di daerah ini akan semakin landai dibanding pada taraf praretak. Momen Inersia retak disebut I_{cr} .

Daerah III :Taraf retak *pasca-serviceability*, dimana tegangan pada tulangan tarik sudah mencapai tegangan lelehnya. Diagram beban defleksi daerah III jauh lebih datar dibanding daerah sebelumnya. Ini diakibatkan oleh hilangnya kekuatan penampang karena retak yang cukup banyak dan lebar sepanjang bentang. Jika beban terus ditambah, maka regangan es pada tulangan sisi yang tertarik akan terus bertambah melebihi regangan lelehnya ϵ_y tanpa adanya tegangan tambahan. Balok yang tulangan tariknya telah leleh dikatakan telah runtuh secara struktural. Balok ini akan terus mengalami defleksi tanpa adanya

penambahan beban dan retaknya semakin terbuka sehingga garis netral terus mendekati tepi yang tertekan. Pada akhirnya terjadi keruntuhan tekan skunder yang mengakibatkan kehancuran total pada beton daerah momen maksimum dan segera diikuti dengan terjadinya rupture

Lendutan pada komponen struktur merupakan fungsi dari panjang bentang, perletakan dan kondisi ujung bentang, jenis beban, baik beban terpusat ataupun beban merata dan kekakuan lentur komponen.

2.9 Retak pada Balok

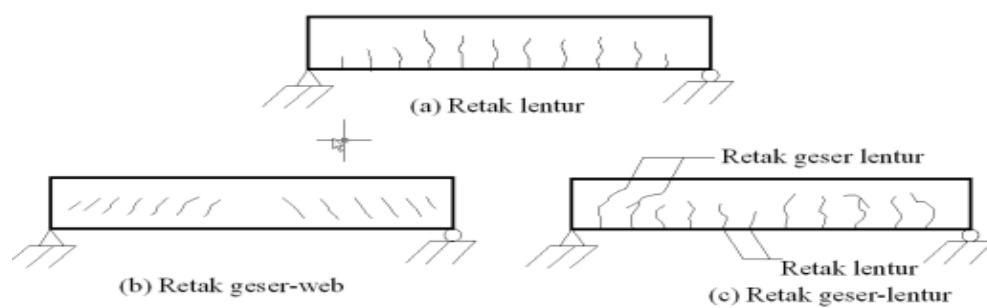
Retak terjadi pada umumnya menunjukkan bahwa lebar celah retak sebanding dengan besarnya tegangan yang terjadi pada batang tulangan baja tarik dan beton pada ketebalan tertentu yang menyelimuti batang baja tersebut. Meskipun retak tidak dapat dicegah, namun ukurannya dapat dibatasi dengan cara menyebar atau mendistribusikan tulangan.

Apabila struktur dibebani dengan suatu beban yang menimbulkan momen lentur masih lebih kecil dari momen retak maka tegangan yang timbul masih lebih kecil dari *modulus of rupture* beton $f_r = 0,70 \sqrt{f'_c}$ ($7,5 \sqrt{f'_c}$ psi). Apabila beban ditambah sehingga tegangan tarik mencapai f_r , maka retak kecil akan terjadi. Apabila tegangan tarik sudah lebih besar dari f_r , maka penampang akan retak.

Pada dasarnya ada tiga jenis keretakan pada balok :

1. Retak lentur (*flexural crack*), terjadi di daerah yang mempunyai harga momen lentur lebih besar dan gaya geser kecil. Arah retak terjadi hampir tegak lurus pada sumbu balok (gambar 2.8a)

2. Retak geser pada bagian balok (*web shear crack*), yaitu keretakan miring yang terjadi pada daerah garis netral penampang dimana gaya geser maksimum dan tegangan aksial sangat kecil (gambar 2.8b)
3. Retak geser (*flexural shear crack*), terjadi pada bagian balok yang sebelumnya telah terjadi keretakan lentur. Retak geser lentur merupakan perambatan retak miring dari retak lentur yang sudah terjadi sebelumnya (gambar 2.8c).



Gambar 2.8 Jenis Retakan pada Beton

BAB III

METODE PELAKSANAAN DAN PENELITIAN

3.1 Jenis Penelitian dan Desain Penelitian

3.1.1 Jenis Penelitian

Pada penelitian ini saya melakukan uji eksperimental dan kajian pustaka tentang perilaku lentur balok beton bertulang yang diperkuat dengan menggunakan GFRP dan CFRP. Adapun tahap-tahap penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Uji fisik material baja tulangan

Pengujian ini meliputi pengujian kuat tarik tulangan $\emptyset 10$ yang akan digunakan sebagai tulangan memanjang pada serat tekan dan diameter $\emptyset 6$ untuk serat tarik. Adapun tulangan geser menggunakan tulangan $\emptyset 6$. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui tegangan leleh dan modulus elastisitas baja.

2. Pembuatan Benda Uji

Agregat yang digunakan diambil dari sungai Bili-bili baik pasir maupun kerikil. Semen yang digunakan adalah Semen Portland Komposit dari Tonasa (40 kg per zak) yang diuji di laboratorium Teknik Sipil Unhas dan perhitungan lebih lengkapnya dapat dilihat pada lampiran.

3. Uji fisik material beton normal

Dalam penelitian ini dilakukan pembuatan rancangan campuran beton normal dengan $f'c = 25$ MPa. Sebelum dilakukan pengecoran balok

tersebut, bahan-bahan pembentuk benda uji dilakukan pemeriksaan material seperti kadar organik, kadar lumpur, penyerapan dan analisis ayakan pada agregat halus dan kasar

Uji fisik material beton yang dilakukan terdiri dari; pengujian kuat tekan, uji lentur, serta modulus elastisitas. Untuk pengujian kuat tekan, modulus elastisitas digunakan alat “Concrete Compression Testing Machine” kapasitas 100 ton dengan beberapa alat tambahan.

4. Prosedur Pemasangan GFRP dan CFRP

Sampel balok penelitian diperbaiki, bagian permukaan balok yang akan diperkuat dibersihkan, dihaluskan permukaannya dan dipersiapkan sebelum pemasangan GFRP maupun CFRP, dengan urutan sebagai berikut:

1. Menyediakan segala bahan dan peralatan yang diperlukan;
2. Meratakan permukaan balok yang akan diperkuat dengan CFRP dan GFRP serta membersihkannya dari segala kotoran;
3. Memastikan permukaan beton dalam keadaan kering agar *epoxy resin* melekat baik;
4. Memotong lembaran Tyfo S sesuai ukuran permukaan dasar balok;
5. Mempersiapkan campuran bahan perekat Tyfo S komponen A dan komponen B dengan perbandingan berat 1:0,46. Proses pengadukan tidak boleh berlebihan hingga menghasilkan busa dan gelembung yang bisa terperangkap sebagai rongga udara dalam perekat;
6. Mengoleskan bahan perekat pada permukaan balok dan lembaran Tyfo S;

7. Menempelkan bahan perkuatan yang telah dipotong dan diberi perekat dengan arah longitudinal balok dan ditekan perlahan terhadap perekat yang masih basah. Rongga udara yang terjebak antara lapisan perkuatan dengan permukaan beton akan dilepas dengan tekanan roller searah serat perkuatan agar perekat menyatu dengan serat dan permukaan beton. Penekanan roller tegak lurus arah serat tidak diperbolehkan karena dapat mengubah arah serat atau merusak serat;
8. Mengoleskan perekat tahap kedua diatas permukaan Tyfo S yang sudah dilekatkan seluruhnya untuk menjamin lekatan serat ke permukaan beton, beton ditekan dengan roller agar bahan perekat dapat melapis secara merata kepermukaan Tyfo S;
9. Mendinginkan benda uji minimal selama 72 jam sebelum dilakukan pengujian

5. Pengujian Lentur Balok Beton bertulang.

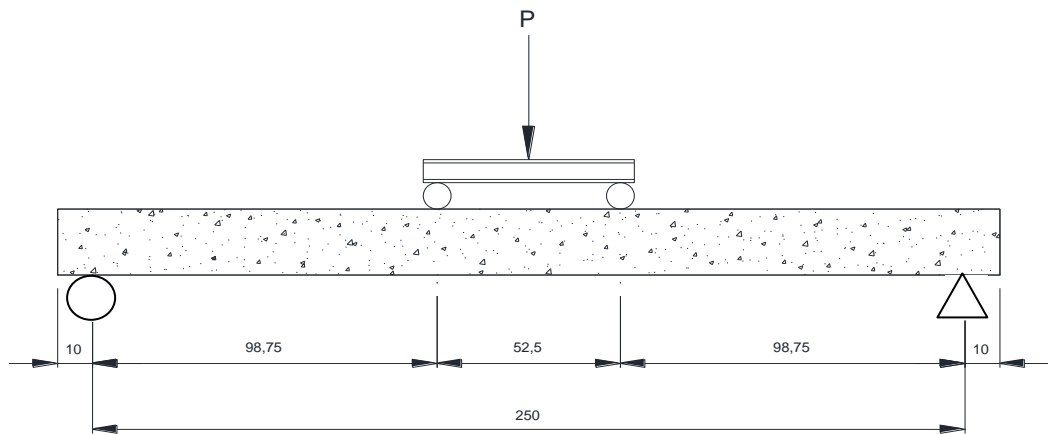
1. Pengujian dilakukan diatas *Statif Loading Frame Test* untuk menguji kekuatan lentur balok dengan panjang bentang 270 cm dan penampang berbentuk persegi empat berdimensi 15 cm x 20 cm dengan beban maksimum direncanakan 30 kN.
2. Pengujian lentur pada balok beton bertulang dilaksanakan pada sampel yang telah berumur diatas 28 hari. Benda uji ini terdiri dari 1 buah Balok beton bertulang normal, 2 buah balok beton bertulang yang diperkuat dengan 1 lapis GFRP (dengan lebar sebesar 1 balok

penuh) dan 1 lapis CFRP (dengan lebar $1/3$ balok), dan 3 buah balok beton bertulang yang diperkuat dengan 2 lapis GFRP (pada sisi luar dengan lebar 1 balok penuh), 1 lapis CFRP (di bagian tengahnya dengan lebar $1/3$ balok) dengan variasi benda uji terlampir. Pada balok yang akan menggunakan CFRP ataupun GFRP, akan ditekan terlebih dahulu hingga beban mulai terlihat retak, kemudian pada balok tersebut akan ditempelkan CFRP dan GFRP kemudian dilakukan penekanan kembali hingga balok tersebut tidak dapat menahan beban yang diberikan (runtuh).

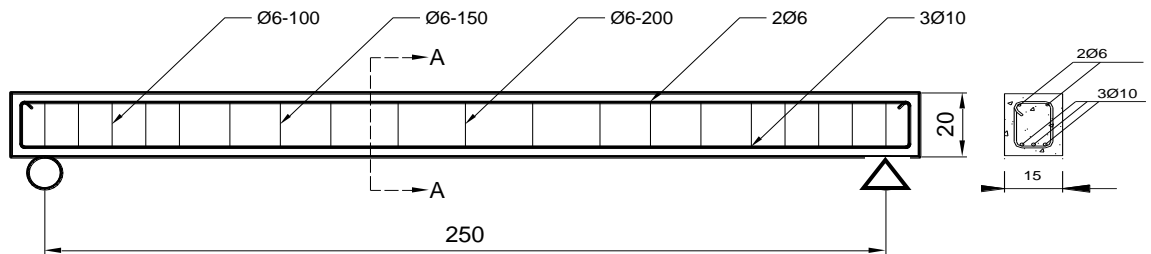
3. Pada pengujian balok beton bertulang ini dilakukan untuk mengetahui kemampuan balok dalam memikul beban. Pengujian ini membahas antara lain: hubungan beban dan lendutan.
4. Dari hasil penelitian dibagi menjadi 3 Daerah yaitu:
 - Daerah I, yaitu pada saat mulai dilakukan pembebanan sampai terjadinya retak awal.
 - Daerah II, yaitu pada saat mulai retak sampai tulangan leleh.
 - Daerah III, yaitu pada saat berakhirnya Daerah II sampai beban maksimum.

3.1.2. Desain Penelitian

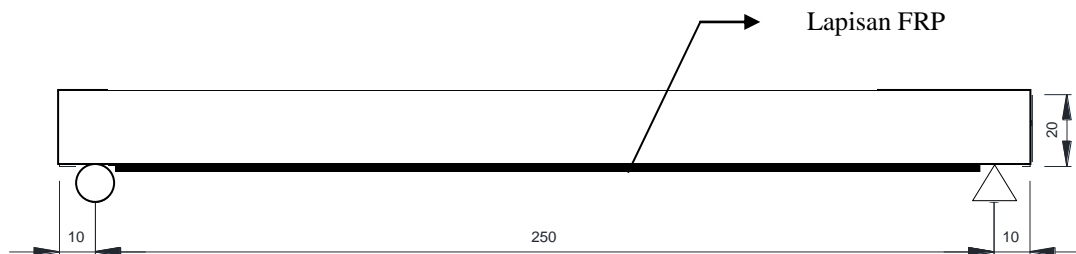
Dimensi dan tulangan balok dianalisa dengan metode kekuatan batas (*ultimate strength design*) dan pengujian balok dilakukan dengan instrumen standar umum pengujian balok. Desain balok sebagai berikut:



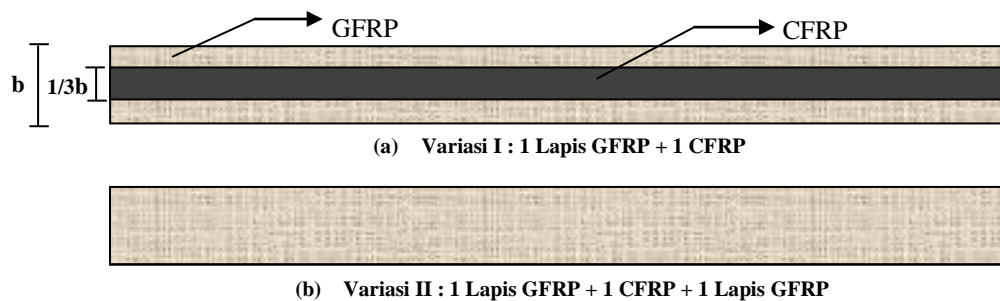
Gambar 3.1 Desain Beban dan Balok



Gambar 3.2 Desain Tulangan dan Penampang Balok



Gambar 3.3 Desain Posisi FRP



Gambar 3.4 Desain Penampang Permukaan Balok yang dilapisi FRP

Adapun variasi benda uji balok bertulang yang digunakan dapat dilihat sebagai berikut :

a. Beton Normal

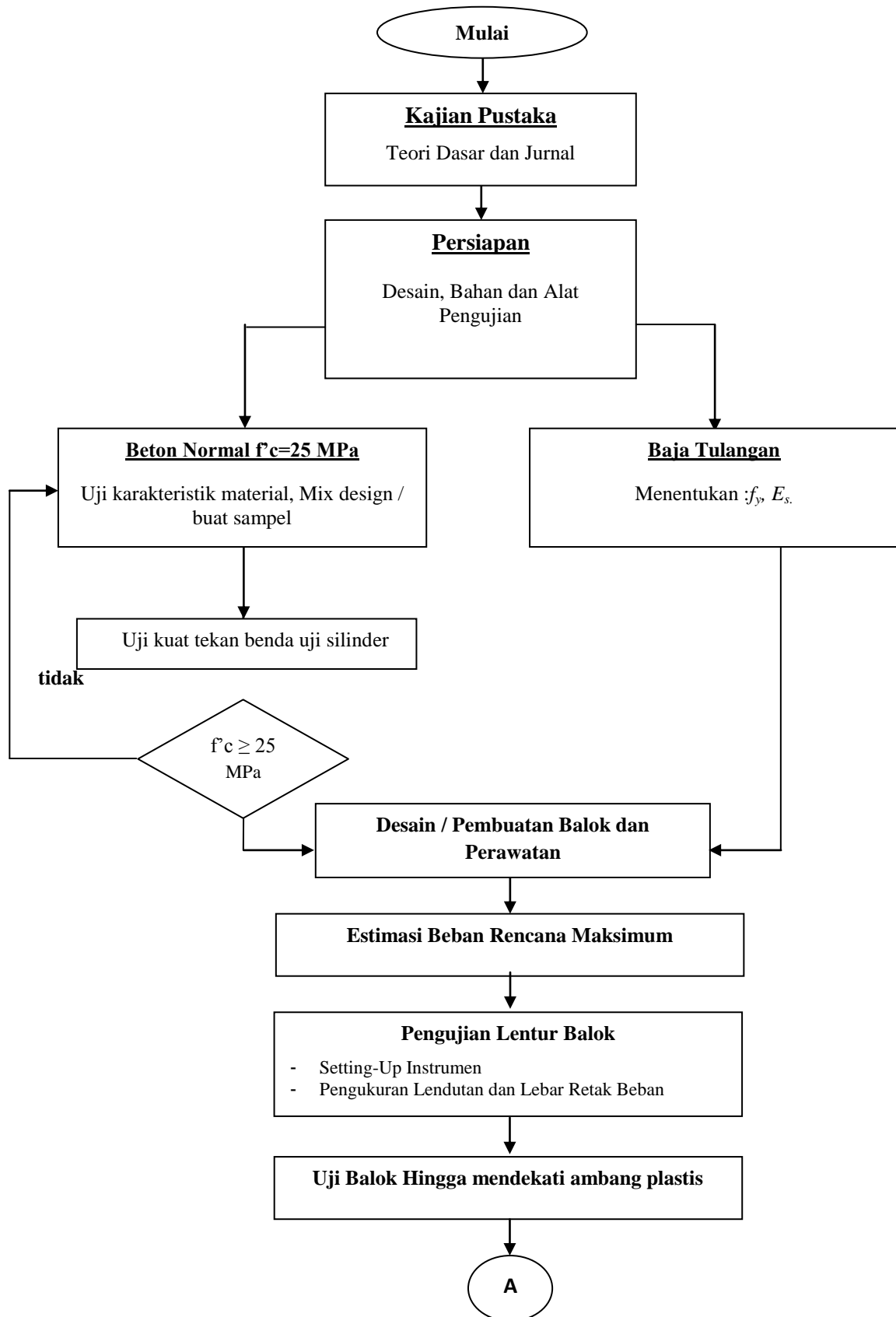
No	Kode Sampel	Jumlah Sampel	Keterangan
1	B-G0	1 buah	

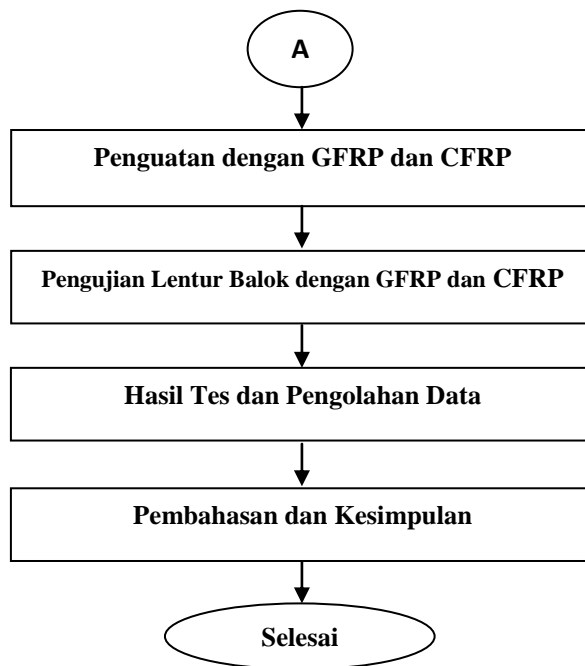
b. Beton Normal dengan Lapis GFRP dan CFRP

No	Kode Sampel	Jumlah Sampel	Keterangan
1	BCG	2 buah	1 lapis GFRP dan 1 lapis CFRP
2	BGCG	3 buah	1 lapis GFRP + 1 lapis CFRP + 1 lapis GFRP

Gambar 3.5 Variasi Benda Uji Balok Beton Bertulang

3.2 Kerangka Prosedur Penelitian





Gambar 3.6 Kerangka Prosedur Penelitian

3.3 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini akan dilaksanakan di Laboratorium Bahan dan Struktur, Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin dan Laboratorium Bahan Politeknik Negeri Ujung Pandang. Lama penelitian direncanakan selama 5 bulan.

3.4 Alat dan Bahan Penelitian

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah :

- a. *Universal testing Machine* kapasitas 100 ton untuk uji tekan beton silinder, tarik dan modulus elastisitas baja.
- b. Mesin Pencampur bahan beton kapasitas 0.2 m³ (*Mixer*)
- c. *Statif Loading Frame Test* kapasitas 150 ton untuk uji lentur balok
- d. Cetakan silinder ukuran 15 cm x 30 cm
- e. Cetakan balok ukuran 15 cm x 20 cm x 270 cm
- f. Alat slump test
- g. LVDT untuk mengukur lendutan kapsitas 50 mm

h. *Strain Gauge* untuk mengukur regangan pada balok.

Sedangkan pemakaian bahan pada penelitian ini meliputi :

- Semen Portland Komposit (Portland Composite Cement, PCC)
- Agregat halus dan kasar (pasir dan batu pecah), berasal dari Bili-Bili (sesuai standar SNI03-1969-1990 dan SNI 03-1970-1990)
- *Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)*, *Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)* dan *Epoxy* dari *Tyfo Fyfe*.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengujian Agregat

4.1.1 Pemeriksaan Agregat

Pengujian agregat dilakukan di Laboratorium Struktur dan Bahan Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Pengujian agregat berupa agregat kasar (batu pecah) dan agregat halus (pasir). Pengujian agregat didasarkan pada standar ASTM. Hasil rekapitulasi pengujian agregat dapat dilihat pada Tabel 4.1. Berdasarkan hasil pengujian karakteristik agregat yang diperoleh pada Tabel 4.1 di bawah maka dapat disimpulkan bahwa agregat yang digunakan pada pengecoran termasuk dalam kategori agregat yang bagus dan baik untuk digunakan sebagai material beton.

Tabel 4.1 Hasil Pemeriksaan Karakteristik Agregat

No	Jenis pengujian	Sat	Hasil pengujian		Spesifikasi SNI	
			Pasir	Kerikil	Pasir	Kerikil
1	Kadar lumpur	%	3,3	0,80	Maks 5	Maks 1
2	Berat jenis SSD	-	2,0	2,61	1,6-3,3	1,6 – 3,3
3	Penyerapan air	%	1,42	1,30	2	4
4	Kadar organik	No	NO.1		< 3	-
5	Modulus kehalusan	%	3,28	6,62	1,5 – 3,8	6 – 7,1
6	Berat volume lepas	Kg/ltr	1,58	1,856	1,4 – 1,9	1,6 – 1,9
7	Berat volume padat	Kg/ltr	1,71	1,886	1,4 – 1,9	1,6 – 1,9

Sumber : Hasil Pengujian-Laboratorium Struktur & Bahan Jurusan Sipil FT-UH - 2013

4.1.2 Komposisi Mix Design

Dari hasil perhitungan dan uji coba mix design beton, diperoleh komposisi agregat dan faktor air semen dapat dilihat pada **Tabel 4.2**.

Tabel 4.2 Komposisi Bahan Campuran Beton untuk 1 m³

BAHAN BETON				
BERAT BETON/ m ³ (kg)	AIR	SEMEN	PASIR	KERIKIL
	171	447	573	1008

Sumber : Hasil Pengujian-Laboratorium Struktur & Bahan Jurusan Sipil FT-UH - 2013

4.1.3 Kuat Tekan Beton

Tabel 4.3 berikut akan memperlihatkan hasil pengujian kuat tekan beton benda uji.

Tabel 4.3 Hasil Pengujian Kuat Tekan Benda Uji

NO.	TANGGAL		UMUR	BERAT	SLUMP	LUAS (A)	BEBAN (P _{max})	Kuat Tekan	Kuat Tekan Rata-Rata
	COR	TEST	(HARI)	(kg)	(mm)	(cm ²)	(kN)	(Mpa)	(Mpa)
1	10/07/2013	13/07/2013	3	12.01	100.00	17678.57	225.00	12.74	11.89
2		13/07/2013	3	12,10	100.00	17678.57	195.00	11.04	
3		13/07/2013	3	12.12	100.00	17678.57	210.00	11.89	
1	10/07/2013	17/07/2013	7	12.22	100.00	17678.57	295.00	16.17	17.09
2		17/07/2013	7	12.19	100.00	17678.57	320.00	18.12	
3		17/07/2013	7	12.26	100.00	17678.57	300.00	16.99	
1	10/07/2013	28/07/2013	28	12.44	100.00	17678.57	440.00	24.91	25.38
2		28/07/2013	28	12.48	100.00	17678.57	460.00	26.04	
3		28/07/2013	28	12.37	100.00	17678.57	445.00	25.19	

Sumber : Hasil Pengujian-Laboratorium Struktur & Bahan Jurusan Sipil FT-UH - 2013



Gambar 4.1 Alat Pengujian Kuat Tekan Beton

4.1.4 Kuat Tarik Baja Tulangan

Pengujian kuat tarik tulangan polos ini dilakukan untuk mengetahui nilai tegangan tulangan polos pada saat mengalami kondisi leleh dan maksimum seperti terlihat pada Tabel 4.4 di bawah ini.

Tabel 4.4 Hasil Pengujian Kuat Tarik Baja Tulangan

Sampel	Diameter tulangan	Luas tulangan	Beban leleh	Beban maksimum	Tegangan leleh	Tegangan maksimum
	<i>Mm</i>	<i>mm²</i>	<i>kN</i>	<i>kN</i>	<i>Mpa</i>	<i>Mpa</i>
I	Ø 6	28.26	14.50	17.90	513.09	633.40
II	Ø 10	78.50	24.50	33.20	312.10	422.93

Sumber : Hasil Pengujian-Laboratorium

4.1.5 Modulus Elastisitas

Tabel 4.5 berikut akan memperlihatkan hasil pengujian kuat lentur beton benda uji.

Tabel 4.5 Hasil Pengujian Modulus ElastisitasBenda Uji

NO.	TANGGAL		UMUR	Modulus Elastisitas	Rata-rata	Δ Maks	Rata-rata
	COR	TEST	(HARI)	(Mpa)	(Mpa)	(mm)	(mm)
1	18/06/2013	16/07/2013	28	22247.71	22356.34	0.41	0.40
2			28	22464.98		0.39	

Sumber : Hasil Pengujian-Laboratorium Struktur & Bahan Jurusan Sipil FT-UH - 2013

4.2 Hasil Analisis Balok Beton Bertulang

Pengujian balok beton dilakukan saat umur beton mencapai 28 hari. Pengujian balok ini dilakukan dengan meletakkan balok pada diatas 2 tumpuan dan dibebani 2 beban terpusat. Pembebanan dilakukan secara bertahap sampai balok runtuh. Adapun data-data yang diambil pada penelitian ini adalah beban retak pertama, beban ultimit, lendutan, regangan pada beton. Nilai lendutan diperoleh dari pembacaan LVDT yang diletakkan di bawah specimen balok.



Gambar 4.2 Alat LVDT

Pengujian balok beton terdiri dari tahapan pengujian sebagai berikut :

1. Tahapan Pertama, pengujian balok beton bertulang normal hingga mencapai beban ultimit sebesar 16.8 kN.

Tabel 4.6 Kapasitas Momen Balok Bertulang Normal

Kode balok	Nilai beban	
	Beban Ultimit (kN)	Momen Ultimit (kNm) (M / EI)
Balok Normal BN	16,8	8,295

Sumber :Hasil Pengujian-Laboratorium Struktur & Bahan Jurusan Sipil FTUH-GOWA 2013

2. Tahapan kedua, pengujian balok hingga retak dengan asumsi 85% beban ultimit. Kemudian diperkuat dengan GFRP dan CFRP.
3. Tahapan ketiga, pengujian lentur balok beton bertulang yang diperkuat dengan GFRP dan CFRP. Pengujian dimaksudkan untuk memperoleh data beban maksimum untuk masing-masing variasi.

Tabel 4.7 Kapasitas Momen Balok Bertulang yang diperkuat dengan FRP

Kode balok	Nilai beban	
	Beban Ultimit (kN)	Momen Ultimit (kNm) (M / EI)
BGC 1	45,65	22,54
BGC 2	46,80	23,11
BGCG 1	57,80	28,54
BGCG 2	50,60	24,98
BGCG 3	50,15	24,76

Sumber :Hasil Pengujian-Laboratorium Struktur & Bahan Jurusan Sipil FTUH-GOWA 2013

Pada tabel 4.7 di atas terlihat balok *Variasi I* (1 lapis GFRP pada permukaan penuh, 1 lapis CFRP 1/3 lebar balok) BGC-1 dan BGC-2 kapasitas

momen maksimumnya tidak jauh berbeda pula yaitu sebesar 22,54 kNm dan 23,11 kNm. Namun ketika perkuatan ditambahkan dengan 1 lapis GFRP di bawahnya untuk *Variasi II* (1 lapis GFRP permukaan penuh, 1 lapis CFRP 1/3 lebar balok, 1 lapis GFRP permukaan penuh) kapasitas momen maksimumnya mengalami kenaikan hingga mencapai 28,54 kNm, 24,98 kNm, dan 24,76 kNm.

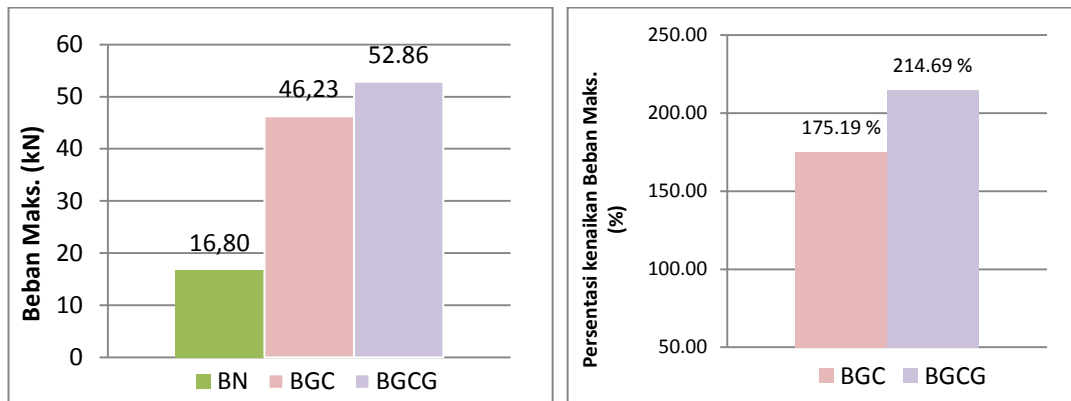
4.2.1 Perbandingan Beban Maksimum

Balok yang diuji diberikan pembebanan sebesar 100 kg (1 kN) secara bertahap hingga mencapai pembebanan maksimum. Besar perkuatan yang terjadi dapat dilihat pada tabel 4.7 di bawah ini.

Tabel 4.8 Peningkatan Kapasitas Balok Beton Bertulang

No.	Kode Balok		Beban Maks. (kN)	Beban Maks. Rata-rata (kN)	% perkuatan balok terhadap balok Normal
1	BN		16.8	-	-
2	BGC	BGC-1 BGC-2	45.65 46.81	46.23	175.19 %
3	BGCG	BGCG-1 BGCG-2 BGCG-3	57.81 50.65 50.15	52.86	214.69 %

Sumber : Hasil Pengujian-Laboratorium Struktur & Bahan Jurusan Sipil FTUH-GOWA 2013



a) Histogram Beban Maksimum

b) Persentase Peningkatan Balok dengan GFRP dan CFRP terhadap Balok Normal

Gambar 4.3 Beban maksimum dan Peningkatan terhadap balok normal

Berdasarkan gambar 4.3, dapat dijelaskan bahwa beban maksimum rata-rata untuk balok dengan *Variasi I* (1 lapis GFRP penuh pada permukaan balok, 1 lapis CFRP 1/3 lebar balok (BGC)) yaitu sebesar 46.23 kN dengan persentase perkuatan balok terhadap balok normal yaitu 175.19 % terhadap balok normal. Sedangkan untuk *Variasi II* (1 lapis GFRP penuh pada permukaan balok, 1 lapis CFRP 1/3 lebar balok, 1 lapis GFRP penuh pada permukaan balok (BGCG)) terlihat bahwa beban maksimum rata-rata sebesar 52.86 kN dengan persentase peningkatan perkuatannya sebesar 214.69 % terhadap balok normal. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa untuk balok *Variasi II*, lebih besar dalam menahan terjadinya lentur dibandingkan dengan balok *Variasi I*. Ini karena pengaruh jumlah dan jenis FRP yang dilapisi pada balok, dimana pada balok *Variasi II* dilapisi dengan 1 lapis GFRP penuh pada permukaan balok, 1 lapis CFRP dengan 1/3 lebar balok, dan 1 Lapis GFRP penuh pada permukaan balok lagi di atasnya.

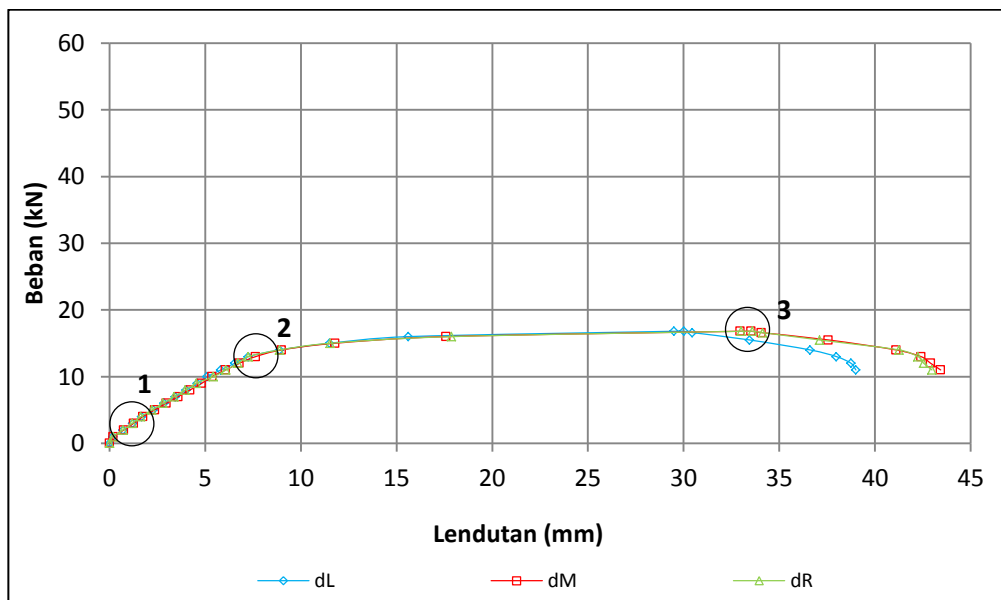
4.2.2 Hubungan Beban-Lendutan

Idealisasi hubungan beban dan lendutan dapat dikelompokkan sebagai berikut:

- Tahap pertama sebelum terjadi retak (*precracking*)
- Tahap kedua setelah terjadi retak (*post cracking*)
- Tahap ketiga, dimana tulangan tarik sudah leleh tetapi balok masih mampu menahan beban, atau dengan kata lain balok sudah mengalami keruntuhan (*post serviceability cracking*).

Hubungan beban dan lendutan yang terjadi selama pengujian adalah sebagai berikut :

❖ Balok Normal

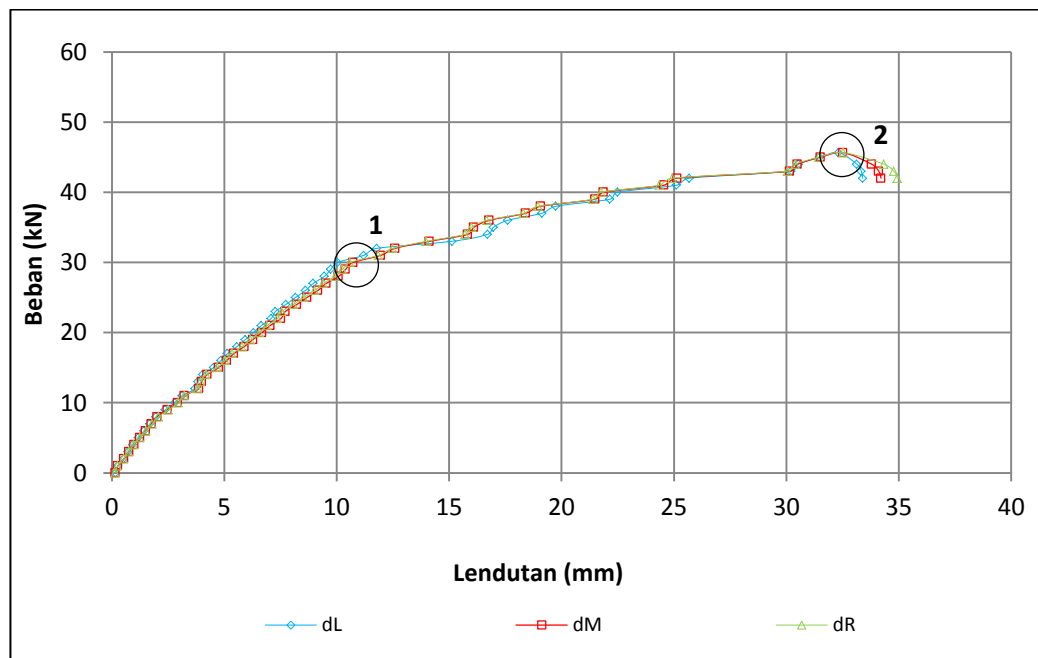


Gambar 4.4 Grafik Hubungan Beban Lendutan Balok Beton Normal

Gambar 4.4 dapat dilihat bahwa balok mengalami retak awal pada beban 2 kN dengan lendutan sebesar 0.2 mm pada daerah 1. Selanjutnya balok

memasuki daerah plastis pada daerah 2 dimana pada saat ini tulangan meleleh yang ditandai dengan peningkatan lendutan yang lebih besar tanpa diikuti dengan peningkatan beban yang signifikan sehingga kurva beban lendutan jauh lebih datar dibandingkan dengan sebelumnya. Pada kondisi ini beban mencapai 14 kN dengan lendutan sebesar 9 mm. Kemudian pada daerah 3 balok sudah mencapai beban maksimum sebesar 16.8 kN dengan lendutan yang terjadi sebesar 32.9 mm.

❖ Balok BGC-1

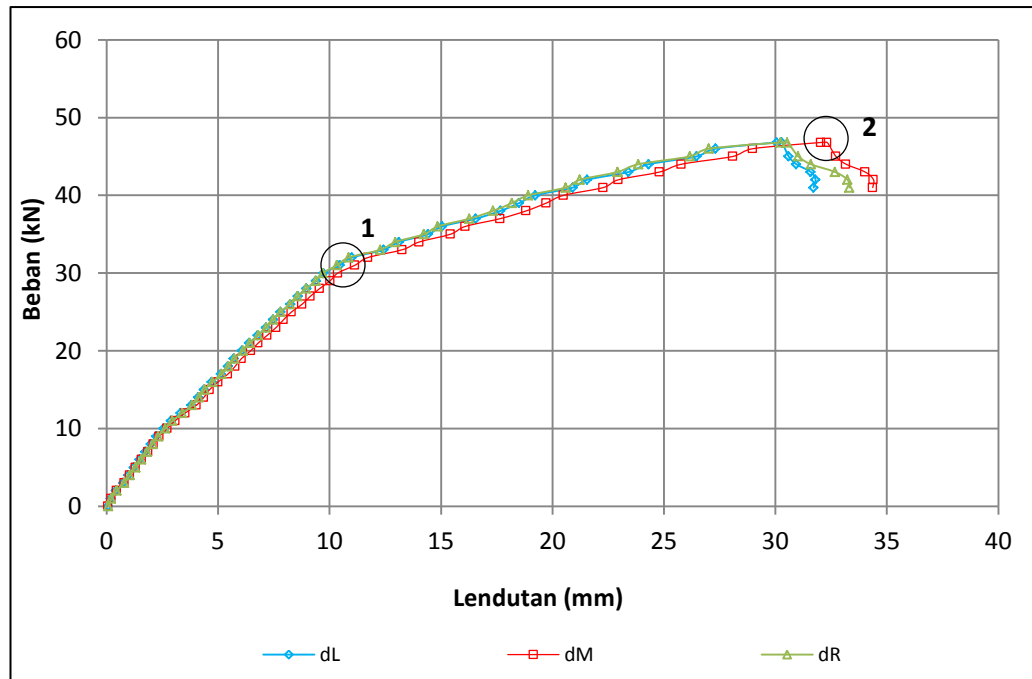


Gambar 4.5 Grafik Hubungan Beban Lendutan BGC-1

Gambar 4.5 memperlihatkan balok dengan perkuatan GFRP dan CFRP memperlihatkan hubungan antara beban dan lendutan yang koheren dan masih berupa garis linier. Ketika memasuki daerah 1 pada beban sebesar 30 kN terjadi perubahan kelandaian grafik. Hal tersebut disebabkan karena terjadinya

penurunan kekakuan. Kondisi ini terus terjadi hingga mencapai beban maksimum sebesar 45.65 kN dengan lendutan sebesar 32.5 mm di daerah 2.

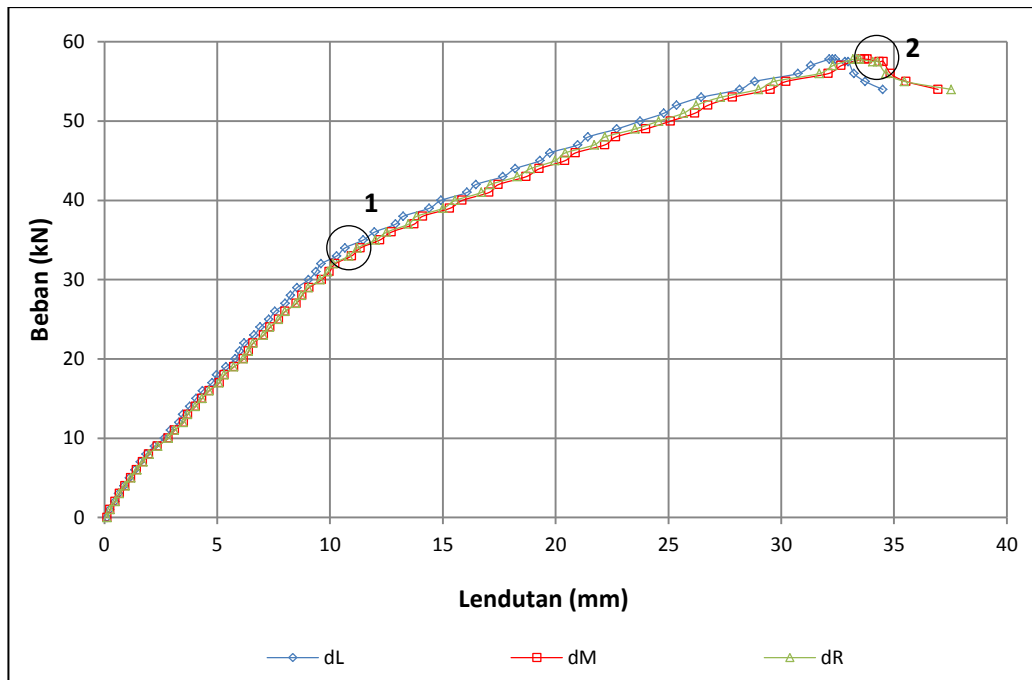
❖ Balok BGC-2



Gambar 4.6 Grafik Hubungan Beban lendutan BGC-2

Gambar 4.6 memperlihatkan balok dengan perkuatan GFRP dan CFRP memperlihatkan hubungan antara beban dan lendutan yang koheren dan masih berupa garis linier. Ketika memasuki daerah 1 pada beban sebesar 30 kN terjadi perubahan kelandaian grafik. Hal tersebut disebabkan karena terjadinya penurunan kekakuan. Kondisi ini terus terjadi hingga mencapai beban maksimum sebesar 46.8 kN dengan lendutan sebesar 32.0 mm di daerah 2.

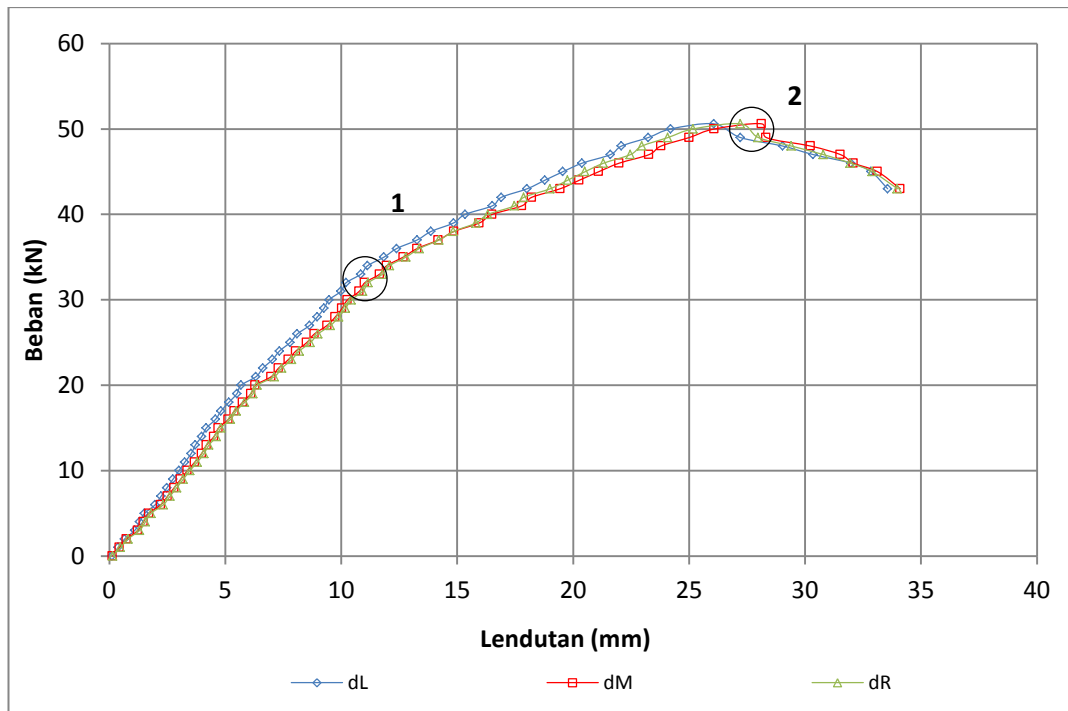
❖ Balok BGCG-1



Gambar 4.7 Grafik Hubungan Beban Lendutan Balok BGCG-1

Gambar 4.7 memperlihatkan balok dengan perkuatan GFRP dan CFRP memperlihatkan hubungan antara beban dan lendutan yang koheren dan masih berupa garis linier. Ketika memasuki daerah 1 pada beban sebesar 33 kN terjadi perubahan kelandaian grafik. Hal tersebut disebabkan karena terjadinya penurunan kekakuan. Kondisi ini terus terjadi hingga mencapai beban maksimum sebesar 57.8 kN dengan lendutan sebesar 33.8 mm di daerah 2.

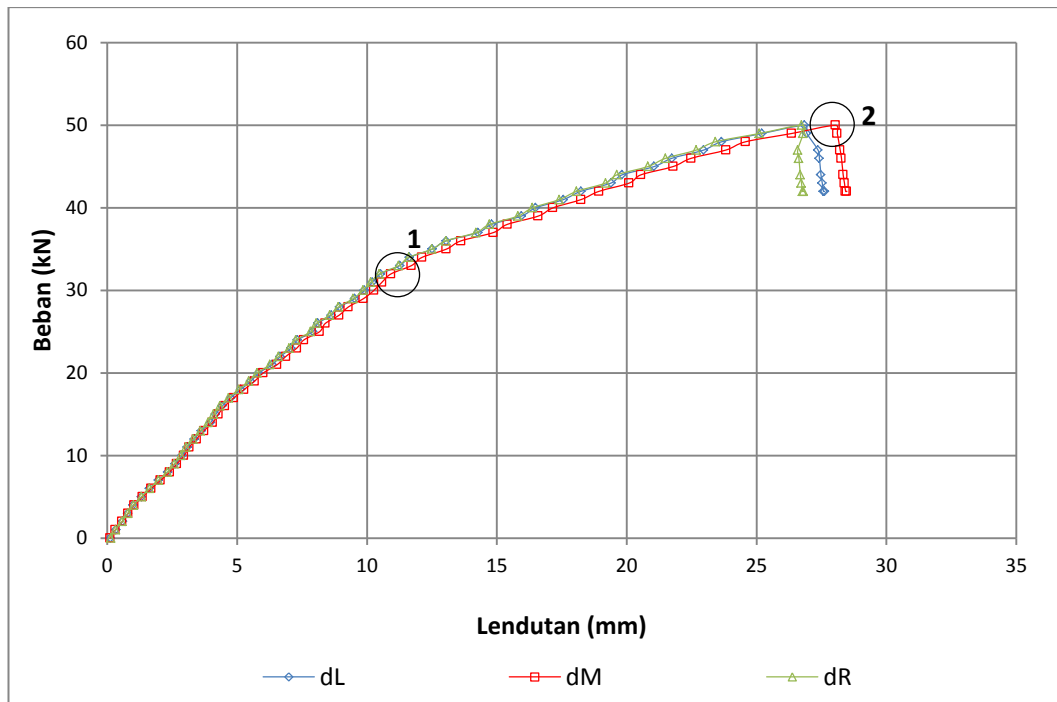
❖ Balok BGCG-2



Gambar 4.8 Grafik Hubungan Beban Lendutan BGCG-2

Gambar 4.8 memperlihatkan balok dengan perkuatan GFRP dan CFRP memperlihatkan hubungan antara beban dan lendutan yang koheren dan masih berupa garis linier. Ketika memasuki daerah 1 pada beban sebesar 36 kN terjadi perubahan kelandaian grafik. Hal tersebut disebabkan karena terjadinya penurunan kekakuan. Kondisi ini terus terjadi hingga mencapai beban maksimum sebesar 50.6 kN dengan lendutan sebesar 28.1 mm di daerah 2.

❖ Balok BGCG-3



Gambar 4.9 Grafik hubungan Beban Lendutan BGCG-3

Gambar 4.9 memperlihatkan balok dengan perkuatan GFRP dan CFRP memperlihatkan hubungan antara beban dan lendutan yang koheren dan masih berupa garis linier. Ketika memasuki daerah 1 pada beban sebesar 34 kN terjadi perubahan kelandaian grafik. Hal tersebut disebabkan karena terjadinya penurunan kekakuan. Kondisi ini terus terjadi hingga mencapai beban maksimum sebesar 50.2 kN dengan lendutan sebesar 28.0 mm di daerah 2.

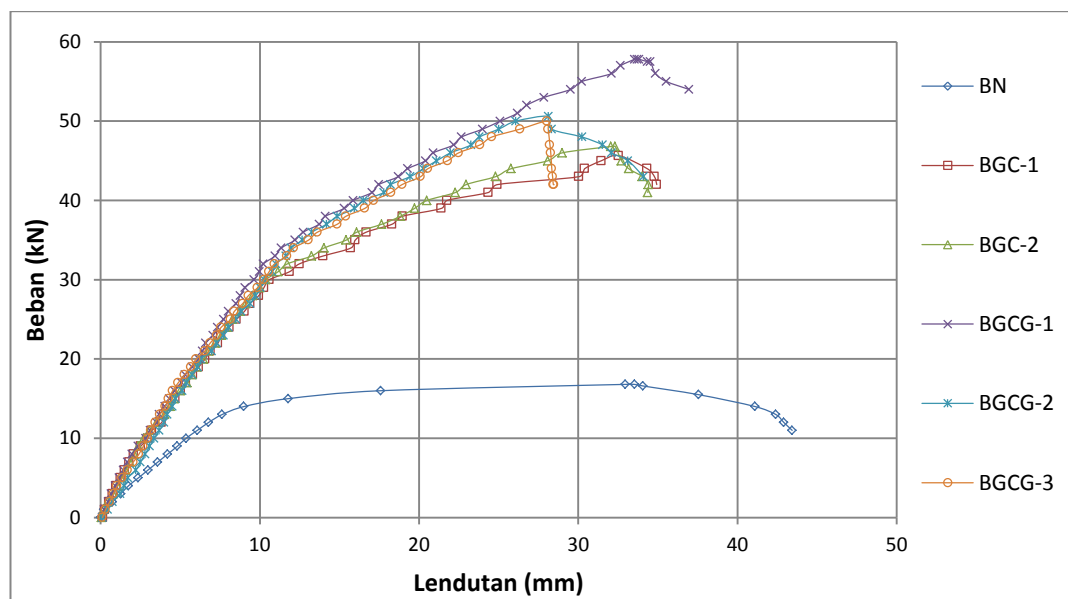
Penjelasan mengenai hubungan beban dan lendutan di atas lebih rinci dapat dilihat pada tabel 4.9 seperti di bawah ini.

Tabel 4.9 Beban dan Lendutan untuk setiap variasi balok

No.	Kode Balok	Kondisi			
		Daerah 1		Daerah 2	
		Beban (kN)	Lendutan (mm)	Beban (kN)	Lendutan (mm)
1	BN	14.0	9.0	16.8	32.9
2	BGC-1	30.0	10.7	45.7	32.5
3	BGC-2	30.0	10.4	46.8	32.0
4	BGCG-1	33.0	10.9	57.8	33.8
5	BGCG-2	36.0	13.3	50.6	28.1
6	BGCG-3	34.0	12.1	50.2	28.0

Sumber : Hasil Pengujian-Laboratorium Struktur & Bahan Jurusan Sipil FTUH-Gowa 2013

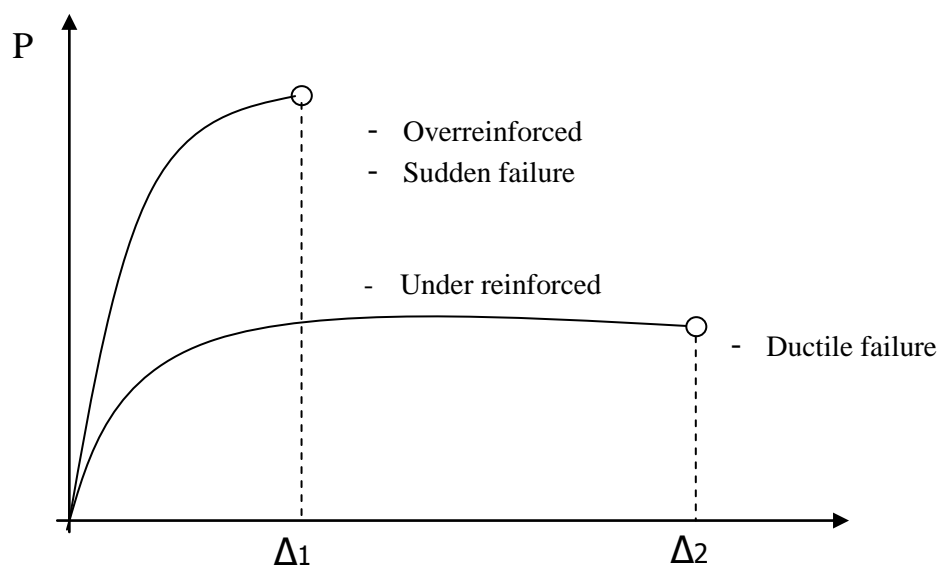
4.2.3 Hubungan beban lendutan tengah bentang



Gambar 4.10 Grafik Hubungan Beban Lendutan Tengah bentang (ΔM)

Gambar 4.10 menunjukkan bahwa balok normal pada kondisi plastis bebannya mencapai 14 kN dengan besar lendutan yang terjadi yaitu 9 mm. Namun karena adanya perkuatan oleh balok Variasi I (1 lapis GFRP penuh permukaan, 1

lapis CFRP 1/3 lebar balok (BGC)) maka terjadi peningkatan beban rata-rata hingga 30 kN. Peningkatan beban ini disebabkan karena baik GFRP maupun CFRP memiliki kemampuan untuk menahan beban lentur dan akan bekerja secara maksimal ketika balok normal memasuki kondisi plastis. Sedangkan untuk balok yang diperkuat dengan Variasi II (1 lapis GFRP penuh permukaan, 1 lapis CFRP 1/3 lebar balok, 1 lapis GFRP penuh permukaan (BGCG-1, BGCG-2, BGCG-3)) peningkatan beban rata-ratanya hingga 35 kN lebih besar lagi dibandingkan dengan Variasi I.



Gambar 4.11 Grafik Typikal Beban-Lendutan

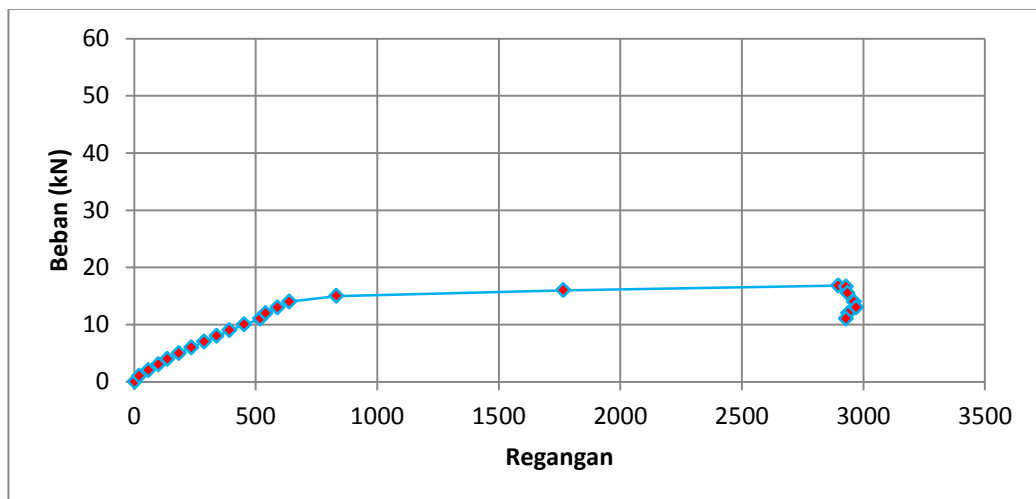
Pada gambar 4.11 memperlihatkan typical beban-lendutan yang sesuai dengan keadaan struktur yang terjadi seperti pada gambar 4.10 dimana struktur balok normal yang sebelum dilapisi GFRP dan CFRP sesuai dengan struktur yang dirancang *under reinforced*, maka sebelum runtuh akan terjadi peningkatan lendutan tanpa disertai peningkatan beban secara signifikan, sehingga

memberikan peringatan kepada manusia untuk menyelamatkan diri. Sedangkan untuk balok yang sudah diperkuat dengan GFRP dan CFRP kondisi struktur telah berada pada *over reinforced* yang mengakibatkan beton telah hancur terlebih dahulu dan biasa disebut keruntuhan tekan (*compression failure*) maka balok menjadi getas sehingga keruntuhan akan terjadi tiba-tiba.

4.2.4 Grafik Beban Regangan

a) Hubungan Beban-Regangan pada Beton

❖ Balok Normal

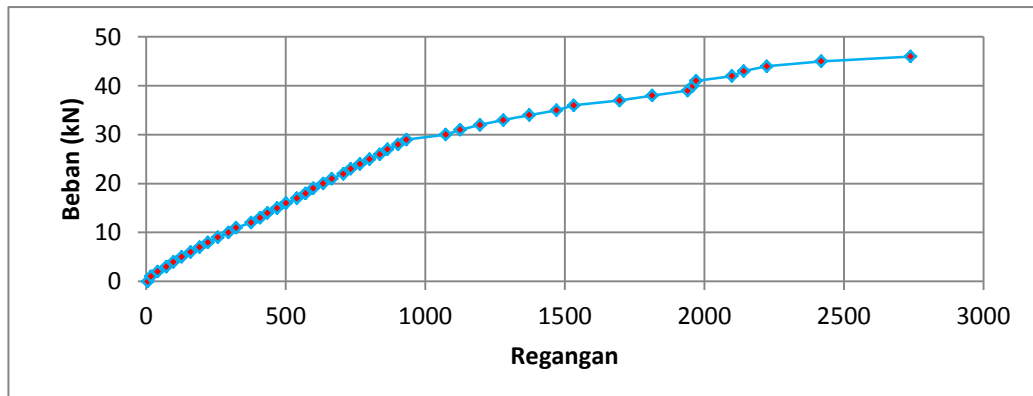


Gambar 4.12 Grafik Hubungan Beban Regangan Balok Normal

Gambar 4.12 memperlihatkan pada awal pembebanan grafik terlihat linier hingga mencapai beban 14,0 kN. Selanjutnya terdapat jarak (*space*) yang besar yang disebabkan oleh terjadinya retak di daerah tekan beton akibat beban yang diterima. Sehingga pada kondisi ini terjadi perubahan regangan tiba-tiba. Hal ini

terjadi hingga mencapai beban maksimum sebesar 16,8 kN. Adapun nilai regangan yang terjadi sebesar 2897.

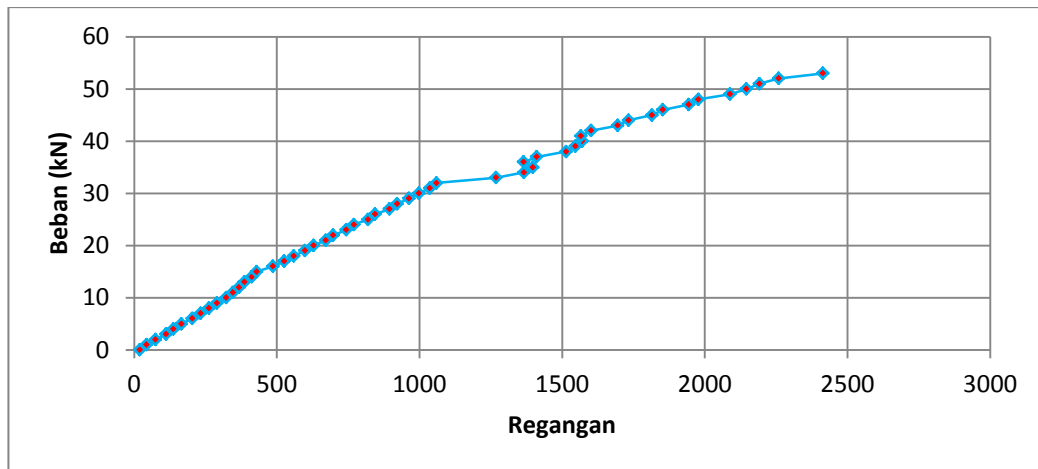
❖ Balok BGC



Gambar 4.13 Grafik Hubungan Beban-Regangan Balok BGC

Gambar 4.13 memperlihatkan pada awal pembebanan grafik terlihat linier hingga mencapai beban 29 kN. Selanjutnya terdapat jarak (*space*) yang cukup besar yang disebabkan oleh terjadinya retak di daerah tekan beton akibat beban yang diterima. Sehingga pada kondisi ini terjadi perubahan regangan yang tiba-tiba. Hal ini terjadi hingga mencapai beban maksimum sebesar 46 kN. Adapun nilai regangan yang diperoleh sebesar 2739.

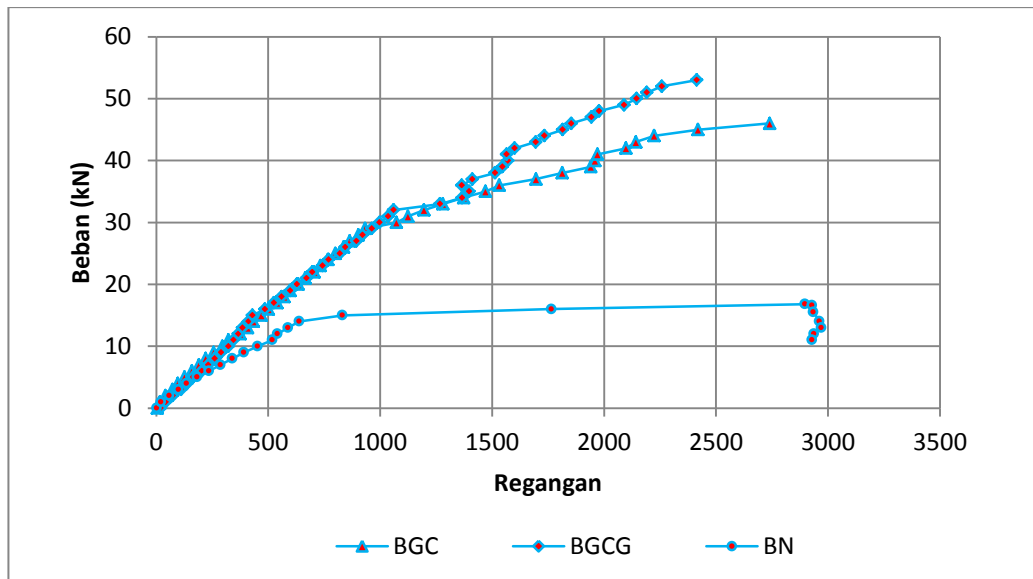
❖ Balok BGCG



Gambar 4.14 Grafik Hubungan Beban-Regangan Balok BGCG

Gambar 4.14 memperlihatkan pada awal pembebanan grafik terlihat linier hingga mencapai beban 32 kN. Selanjutnya terdapat jarak (*space*) yang cukup besar yang disebabkan oleh terjadinya retak di daerah tekan beton akibat beban yang diterima. Sehingga pada kondisi ini terjadi perubahan regangan yang tiba-tiba. Hal ini terjadi hingga mencapai beban maksimum sebesar 53 kN. Adapun nilai regangan yang diperoleh sebesar 2414.

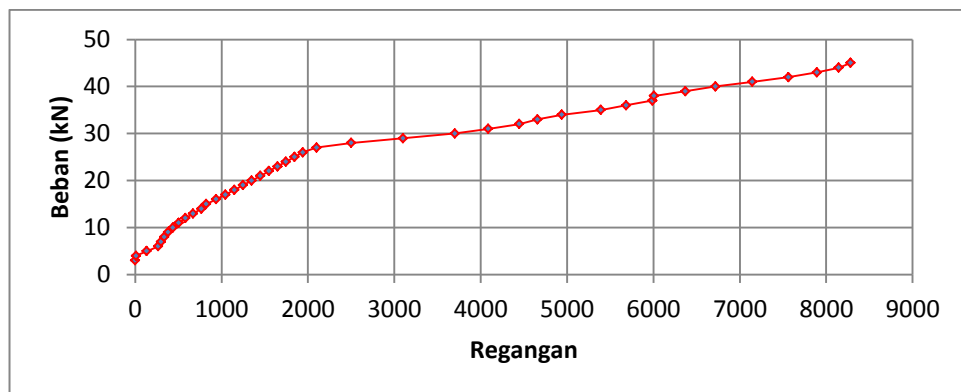
❖ Grafik Hubungan Beban-Regangan Gabungan



Gambar 4.15 Grafik Gabungan Beban-Regangan

b) Hubungan Beban-Regangan pada CFRP dan GFRP

❖ Balok BGC

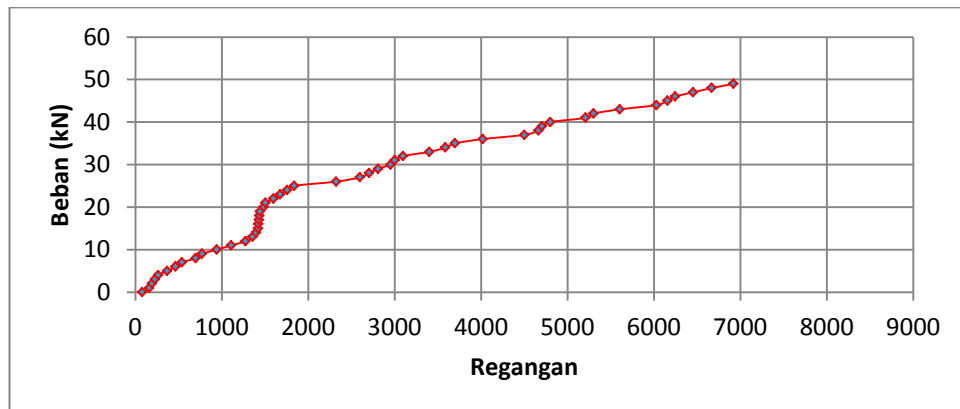


Gambar 4.16 Grafik Hubungan Beban-Regangan Balok BGC

Gambar 4.16 memperlihatkan pada awal pembebanan grafik terlihat linier. Selanjutnya terdapat jarak (*space*) yang cukup besar pada titik setelahnya yang disebabkan oleh terjadinya retak pada daerah tarik. Sehingga pada kondisi ini

terjadi perubahan regangan yang tiba-tiba. Hal ini terjadi hingga mencapai beban maksimum sebesar 45 kN. Adapun nilai regangan yang diperoleh sebesar 9555.

❖ Balok BGCG

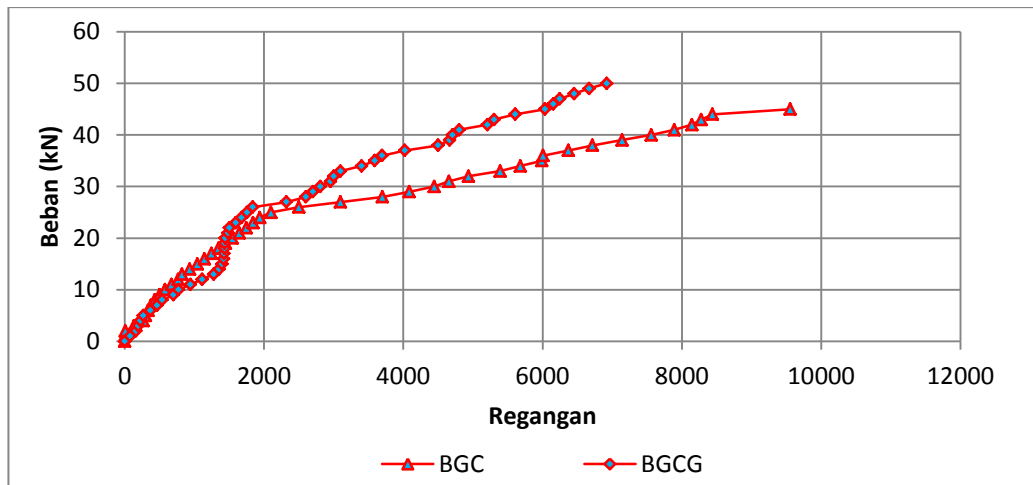


Gambar 4.17 Grafik Hubungan Beban-Regangan Balok BGCG

Gambar 4.17 memperlihatkan pada awal pembebanan grafik terlihat linier. Selanjutnya terdapat jarak (*space*) yang cukup besar pada titik setelahnya yang disebabkan oleh terjadinya retak pada daerah tarik. Sehingga pada kondisi ini terjadi perubahan regangan yang tiba-tiba. Hal ini terjadi hingga mencapai beban maksimum sebesar 50 kN. Adapun nilai regangan yang diperoleh sebesar 6923.

Dari pembahasan di atas dapat di lihat bahwa terdapat perbedaan nilai regangan yang diperoleh pada CFRP maupun GFRP pada setiap masing-masing variasi balok BGC dan BGCG. Dimana regangan yang diperoleh pada balok BGC lebih besar di bandingkan balok BGCG. Hal ini dikarenakan untuk balok BGC lapisan akhirnya adalah CFRP yang memiliki kuat tarik lebih besar dibandingkan dengan GFRP yang pada balok BGCG merupakan lapisan akhirnya. Adapun nilai regangan yang diperoleh adalah untuk balok BGC sebesar 9555 sedangkan untuk balok BGCG sebesar 6923.

❖ Grafik Hubungan Beban-Regangan Gabungan BGC dan BGCG

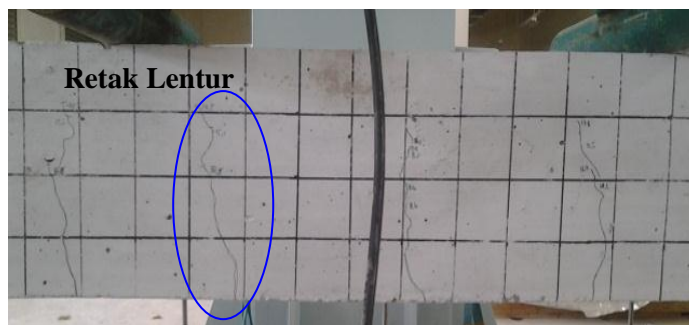


Gambar 4.18 Grafik Gabungan BGC dan BGCG

4.2.5 Pola Retak

Pola retak yang terjadi berupa retak lentur dan retak geser seperti berikut ini:

❖ Balok Normal



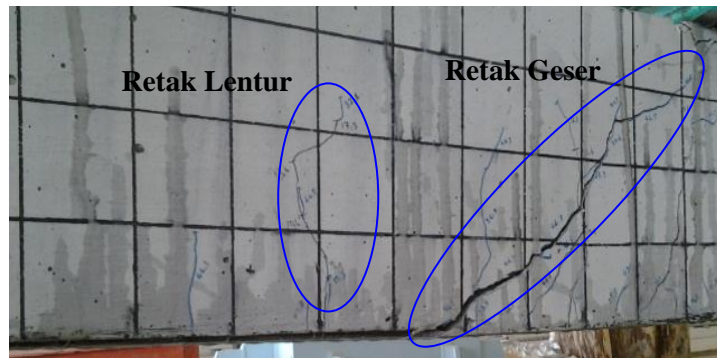
Gambar 4.19 Pola Retak Beton Normal

❖ Balok BGC-1



Gambar 4.20 Pola Retak Balok BGC-1

❖ Balok BGC-2



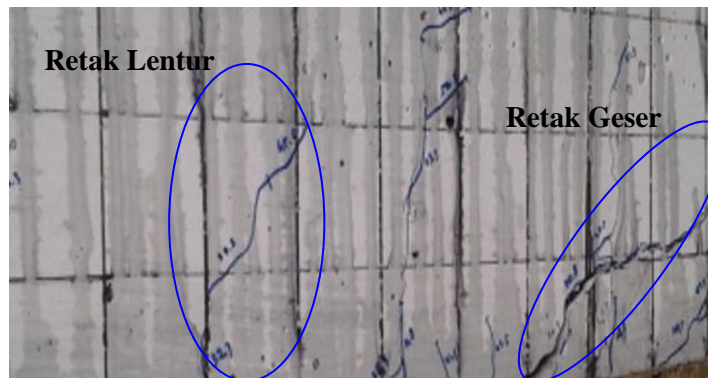
Gambar 4.21 Pola Retak Balok BGC-2

❖ Balok BGCG-1



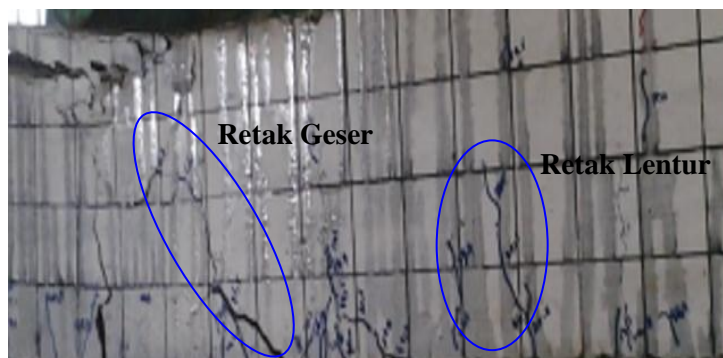
Gambar 4.22 Pola Retak Balok BGCG-1

❖ Balok BGCG-2



Gambar 4.23 Pola Retak Balok BGCG-2

❖ Balok BGCG-3



Gambar 4.24 Pola Retak Balok BGCG-3

Retak lentur adalah retak vertikal yang memanjang dari sisi tarik dan mengarah ke atas sampai daerah sumbu netral (McCormack, 2001). Sedangkan retak geser adalah keretakan miring yang terjadi pada daerah garis netral penampang dimana gaya geser maksimum dan tegang aksial sangat kecil. Untuk balok yang diperkuat dengan GFRP dan CFRP retak yang terjadi yaitu retak yang merupakan kelanjutan dari retak yang telah ada, dan retak yang merupakan retak baru

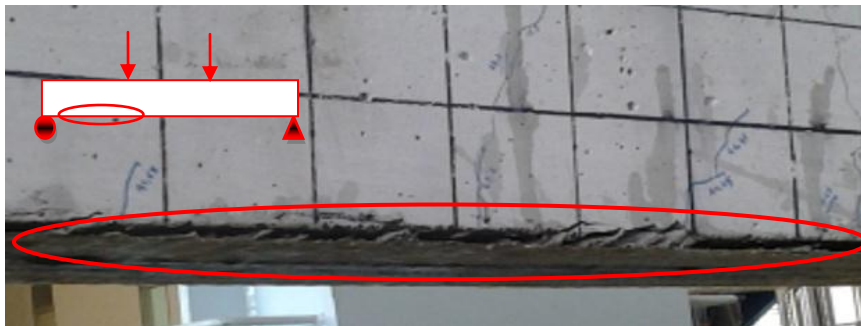
4.2.6 Mode Kegagalan

Beberapa mode kegagalan yang sering terjadi pada balok yang diperkuat dengan FRP yaitu :

- a. Rusaknya FRP setelah tulangan tarik meleleh
- b. Hancurnya beton sekunder setelah tulangan tarik meleleh
- c. Inti beton rusak karena tekanan sebelum tulangan tarik meleleh
- d. Lepasnya ikatan antara FRP dan beton (*debonding*)
- e. FRP putus (*FRP failure*)

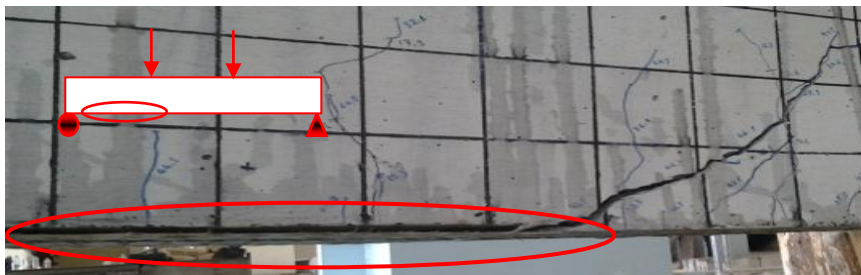
Mode kegagalan yang terjadi pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar di bawah ini :

❖ Balok BGC-1



Gambar 4.25 Mode kegagalan Balok BGC-1

❖ Balok BGC-2



Gambar 4.26 Mode kegagalan Balok BGC-2

❖ Balok BGCG-1



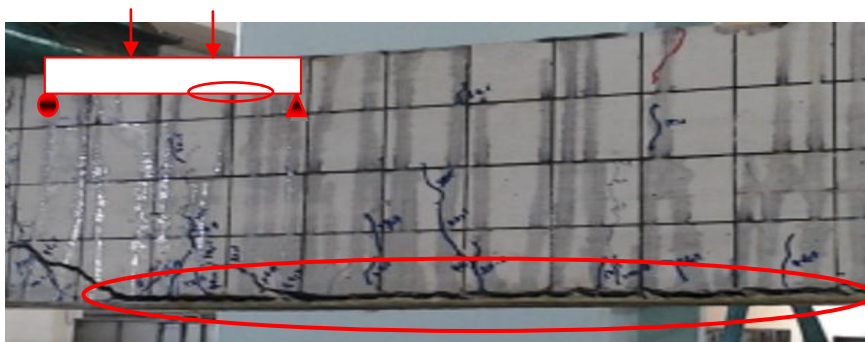
Gambar 4.27 Mode kegagalan Balok BGCG-1

❖ Balok BGCG-2



Gambar 4.28 Mode kegagalan Balok BGCG-2

❖ Balok BGCG-3



Gambar 4.29 Mode kegagalan Balok BGCG-3

Dari gambar di atas dapat dilihat mode kegagalan untuk semua balok yaitu lepasnya lekatan FRP dengan beton (*debonding failure*). Hal ini dikarenakan perpaduan GFRP dan CFRP tidak dapat lagi menahan beban yang telah

melampaui batas kapasitas baja tulangan dan beton. Kegagalan pada balok ini juga disebabkan oleh kelemahan *Epoxy* dan bidang kontak antara FRP dan beton masih kurang luas yaitu hanya terjadi pada satu sisi permukaan saja. Tidak seperti tulangan baja dan beton yang memiliki bidang kontak pada seluruh luas permukaan tulangan.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan di atas pada benda uji balok beton bertulang dengan perkuatan lentur perpaduan antara GFRP dan CFRP didapat beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Lapisan *hybrid* mampu meningkatkan kapasitas momen lentur dari 8,295 kNm hingga 28,54 kNm
2. Lapisan *hybrid* mampu meningkatkan kapasitas beban pada balok Variasi I (BGC) sebesar 175.19 % dan Variasi II (BGCG) sebesar 214.69 % terhadap balok normal.
3. Balok yang diperkuat dengan lapisan *hybrid* memiliki nilai regangan yang berbeda di tiap-tiap variasi. Untuk balok BGC nilai regangan yang diperoleh lebih besar dibandingkan dengan nilai regangan pada balok BGCG. Hal ini disebabkan balok BGC yang terdiri dari 1 lapis GFRP permukaan penuh, dan 1 lapis CFRP dengan lebar 1/3 bentang balok yaitu memiliki kuat tarik dari CFRP sebagai lapisan akhir yang sangat besar. Sedangkan untuk balok BGCG yang terdiri 1 lapis GFRP permukaan penuh, 1 lapis CFRP dengan lebar 1/3 bentang balok, dan 1 lapis GFRP permukaan penuh, dimana GFRP merupakan lapisan akhir pada variasi balok ini dengan kekuatan tariknya yang jauh lebih rendah dari CFRP.

4. Pola retak yang terjadi pada balok mengalami pola retak lentur dan pola retak geser.
5. Mode kegagalan yang terjadi pada balok semuanya mengalami lepasnya lekatan antara FRP dan beton (*debonding failure*). Sedangkan untuk lapisan *hybrid*-nya tidak terjadi kerusakan antara GFRP dan CFRP.

5.2. Saran

Berdasarkan hasil eksperimen yang telah dilakukan maka dapat disarankan beberapa hal yaitu:

- a. Pada penelitian ini diharapkan agar mode kegagalan balok dapat mengalami putusnya FRP pada lapisan hybrid antara GFRP dan CFRP. Namun dari hasil penelitian yang terjadi dominan mengalami *debonding failure* (lepasnya lekatan antara FRP dan beton). Oleh sebab itu perlu diadakan penelitian lebih lanjut untuk mengatasi keadaan ini misalnya memperhatikan permukaan balok supaya perekat *resin epoxy* dapat melekat dengan baik atau mengganti material perekatnyadengan yang lebih kuat lagi.
- b. Sebaiknya dilakukan penelitian lebih lanjut dengan variasi yang berbeda misalnya dengan penambahan sabuk dan penambahan dimensi balok agar memperluas daerah lekatan sehingga balok akan lebih kuat lagi dalam menahan perilaku lentur yang terjadi.

DAFTAR PUSTAKA

- ACI.Committee 440.2R-08, 2008.*Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*. American Concrete Institute. U.S.A
- Akkas, Abd Madjid dkk, 2008. *Struktur Beton Bertulang 1*. Makassar: Jurusan Teknik Sipil Universitas Hasanuddin.
- Bukorsyom, Febby, 2011. *Studi Perkuatan Lentur Balok Beton Bertulang Pasca Kerusakan Dengan Menggunakan Glass Fiber Reinforced Polimer Sheet*, Tesis, Program Magister Universitas Hasanuddin, Makassar.
- Duhri, Aswin Perdana, 2013.*Studi Pengaruh Sabuk Gfrp Diagonal Terhadap Kuat Lentur Balok Beton Bertulang*. Skripsi, Program Sarjana Universitas Hasanuddin, Makassar.
- Hanafi, Abd. Haris. dan Ahmad, 2011.*Kekuatan Lentur Balok Beton Bertulang Pasca Pembebanan Dengan Menggunakan Gfrp Sheet*, Skripsi, Program Sarjana Universitas Hasanuddin, Makassar.
- Nawi, Edward. G. *Beton Bertulang*. Bandung : Refika Aditama. 2010.

DOKUMENTASI PELAKSANAAN KEGIATAN

1. Penulangan Balok



2. Bekisting



3. Pengecoran



4. Perawatan



5. Pengujian Lentur Balok Normal

a. Pemasangan Strain Gauge pada Beton



b. Pengujian Balok Normal hingga Ambang Plastis



6. GFRP dan CFRP

a. Pemotongan GFRP dan CFRP



GFRP



CFRP

b. Pencampuran Resin Epoxy



Resin Epoxy Tyfo S



c. Pemasangan GFRP dan CFRP pada Balok



Pemasangan GFRP



Pemasangan CFRP

7. Pengujian Balok yang diperkuat GFRP dan CFRP



8. Hasil Pengujian

