

***STUDI PERKUATAN BALOK BETON BERTULANG DENGAN LAPISAN
FRP HYBRID***

*Reinforced Concrete Beams Strengthened with Externally Bonded Hybrid FRP
Sheets*

**JOEY SEQUOIADENDRON LIMBONGAN
D012211003**



**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

PENGAJUAN TESIS

**STUDI PERKUATAN BALOK BETON BERTULANG DENGAN LAPISAN
FRP HYBRID**

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister
Program Studi Magister Teknik Sipil

Disusun dan diajukan oleh

**JOEY SEQUOIADENDRON LIMBONGAN
D012211003**

Kepada

**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

TESIS

STUDI PERKUATAN BALOK BETON BERTULANG DENGAN LAPISAN FRP HYBRID

JOEY SEQUOIADENDRON LIMBONGAN
D012211003

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Tesis yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi pada Program Magister Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 1 Februari 2023 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama



Prof. Dr. Ir. Rudy Djamaluddin, M.Eng.

NIP. 197011081994121001

Pembimbing Pendamping

Dr. Eng. Rita Irmawaty, ST., MT.

NIP. 197206192000122001

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin



Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, ST. MT. IPM

NIP. 197309262000121002

Ketua Program Studi
S2 Teknik Sipil



Dr. M. Asad Abdurrahman, ST. MEng. PM

NIP. 197303061998021001

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Joey S. Limbongan

Nomor mahasiswa : D012211003

Program studi : S2 Teknik Sipil

Dengan ini menyatakan bahwa, tesis berjudul “STUDI PERKUATAN BALOK BETON BERTULANG DENGAN LAPISAN FRP HYBRID” adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing (Prof. Dr. Ir. Rudy Djamaluddin, M.Eng. selaku Pembimbing Utama dan Dr. Eng. Rita Irmawaty, ST., MT. selaku Pembimbing Pendamping). Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka tesis ini. Sebagian dari isi tesis ini telah dipublikasikan di Prosiding (IOP Publishing doi:10.1088/1755-1315/1117/1/012003) sebagai artikel dengan judul “Reinforced Concrete Beams Strengthened with Externally Bonded Hybrid FRP Sheets”.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa tesis ini kepada Universitas Hasanuddin.

Gowa, 23 Januari 2023

Yang menyatakan



Joey S. Limbongan

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan yang maha esa atas rahmatnya sehingga tesis ini dapat diselesaikan. Menggabungkan dua buah serat dengan modulus elastisitas yang berbeda memiliki tingkat kesulitan sendiri. Dalam upaya untuk meningkatkan daktalitas dari serat tersebut dilakukan dari tahap studi pustaka hingga melahirkan gagasan dibuatnya suatu sistem FRP hybrid.

Bukan hal yang mudah untuk mewjutkan gagasan-gagasan tersebut dalam sebuah susunan tesis. Berkat bimbingan, arahan dan motivasi berbagai pihak maka tesis ini bisa disusun sebagaimana yang telah dipersyaratkan, dan untuk itu penulis dengan ini menyampaikan ucapan terimakasih kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Rudy Djamaluddin, M.Eng. selaku Pembimbing Utama dan Dr. Eng. Rita Irmawaty, ST., MT. selaku Pembimbing Pendamping
2. Prof. Dr. Ir. Muh. Wihardi Tjaronge., ST., M.Eng., Dr. Eng. Ir. A. Arwin Amiruddin, ST.,MT. dan Dr. Eng. Fakhruddin, ST.,M.Eng selaku penguji
3. Rektor Universitas Hasanuddin Prof.Dr.Ir. Jamaluddin Jompa, M.Sc. dan Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Prof. Dr.Eng. Ir. M. Isran Ramli,ST.MT. yang telah memfasilitasi saya menempuh program magister serta para dosen.
4. Dr. Eng. Ir. A. Arwin Amiruddin, ST.,MT. selaku kepala laboratorium struktur dan bahan serta laboran dan asisten laboratorium.
5. Kepada Dr. Jasman S.T., M.T., atas bimbingan selama masa penelitian dan penyusunan tesis.

Akhirnya, kepada kedua orang tua tercinta saya mengucapkan terima kasih dan sembah sujud atas doa, pengorbanan dan memotivasi mereka selama saya menempuh pendidikan. Penghargaan yang besar juga saya sampaikan kepada sanak saudara dan teman-teman atas motivasi dan dukungan yang tak ternilai.

Penulis

Joey S. Limbongan

ABSTRAK

JOEY S. LIMBONGAN. **STUDI PERKUATAN BALOK BETON BERTULANG DENGAN LAPISAN HYBRID FRP** (dibimbing oleh Prof. Dr. Rudy Djamaluddin, ST., M. Eng. dan Dr. Eng. Rita Irmawaty, ST., MT.)

Fiber Reinforced Polymer (FRP) merupakan salah satu alternatif perkuatan struktur yang ramai dikembangkan karena sifatnya yang memiliki kuat tarik yang tinggi, tidak mengalami korosi dan bobotnya yang ringan. Namun di lain sisi FRP relatif getas jika dibandingkan dengan tulangan baja konvensional. Penelitian ini menggunakan FRP hybrid yang terdiri dari GFRP dan CFRP. GFRP memiliki kuat tarik yang lebih rendah dari CFRP, sedangkan CFRP memiliki kuat tarik yang lebih tinggi tetapi regangan yang lebih kecil. Oleh karena itu, perlu dilakukan pengurangan kekuatan tarik dari CFRP dengan cara mengurangi luas penampangnya. Dengan menggabungkan GFRP dengan CFRP, diharapkan CFRP yang lebih getas akan mengalami keruntuhan terlebih dahulu diikuti GFRP yang lebih elastis, sehingga terjadi keruntuhan bertahap/sekuensial. Penelitian ini dibagi menjadi dua tahapan, yaitu uji kuat tarik hybrid FRP untuk menentukan variasi FRP hybrid yang mengalami fase keruntuhan sekuensial dan uji lentur balok untuk mengetahui pengaruh perkuatan FRP hybrid pada balok beton bertulang. Untuk uji kuat tarik FRP hybrid digunakan variasi FRP hybrid yaitu GC30 (lebar CFRP 30% dari lebar GFRP), GC40 (lebar CFRP 40% dari lebar GFRP) dan GC50 (lebar CFRP 50% dari lebar GFRP). Variasi yang menunjukkan perilaku keruntuhan sekuensial, kemudian akan diterapkan pada balok beton bertulang dengan dimensi 150x200x3300) mm. Sementara untuk pengujian lentur balok terdapat dua variasi, yaitu balok kontrol (BK) tanpa perkuatan FRP hybrid dan balok yang diperkuat dengan FRP hybrid (BGC). Hasil uji kuat tarik FRP hybrid, menunjukkan bahwa kegagalan sekuensial terjadi pada GC30 dan GC40. Namun GC40 memiliki beban ultimit yang lebih tinggi yaitu 24,86 kN sehingga untuk perkuatan pada balok beton bertulang digunakan variasi GC40. Berdasarkan hasil uji lentur BGC mengalami peningkatan kuat lentur sebesar 59,40% jika dibandingkan dengan BK. Untuk mode kegagalan yang terjadi yaitu kegagalan *debonding* akibat retak lentur (*Intermediate Crack Debonding*).

Kata Kunci: Balok Beton Bertulang, Perkuatan, FRP Hybrid

ABSTRACT

JOEY S. LIMBONGAN. **Reinforced Concrete Beams Strengthened with Externally Bonded Hybrid FRP Sheets** (supervised by Prof. Dr. Rudy Djamaluddin, ST., M. Eng. dan Dr. Eng. Rita Irmawaty, ST., MT.)

Fiber Reinforced Polymer (FRP) is one of the most widely developed alternative structural strengthening due to its high tensile strength, non-corrosion and lightweight. However, FRP is relatively brittle when compared to conventional steel reinforcement. This study uses a hybrid FRP consisting of GFRP and CFRP. GFRP has a lower tensile strength than CFRP, while CFRP has a higher tensile strength but smaller strain. Therefore, it is necessary to reduce the tensile strength of CFRP by reducing its cross-sectional area. By combining GFRP with CFRP, it is expected that the more brittle CFRP will collapse first followed by the more elastic GFRP, resulting in gradual/sequential collapse. This research was divided into two stages, namely the FRP hybrid tensile strength test to determine the variation of hybrid FRP that experienced sequential failure phases and beam flexure test to determine the effect of hybrid FRP reinforcement on reinforced concrete beams. For the hybrid FRP tensile strength test, hybrid FRP variations were used, namely GC30 (CFRP width 30% of GFRP width), GC40 (CFRP width 40% of GFRP width) and GC50 (CFRP width 50% of GFRP width). Variations showing sequential failure behavior will then be applied to reinforced concrete beams with dimension of (150x200x3300) mm. While for the beam flexural test there are two variations, control beam (BK) without hybrid FRP reinforcement and beam reinforced with hybrid FRP (BGC). The results of the hybrid FRP tensile strength test showed that sequential failure occurred in GC30 and GC40. However, GC40 has a higher ultimate load of 24.86 kN, so variations of GC40 are used for reinforcement in reinforced concrete beams. Based on the flexural test results, BGC experienced an increase in flexural strength of 59.40% when compared to BK. The failure mode that occurs is debonding failure due to flexural crack (Intermediate Crack Debonding).

Keywords: Reinforced Concrete Beam, Strengthening, Hybrid FRP

DAFTAR ISI

| | |
|---|------|
| HALAMAN JUDUL..... | i |
| PENGAJUAN TESIS..... | ii |
| PERSETUJUAN TESIS..... | iii |
| PERNYATAAN KEASLIAN TESIS | iv |
| KATA PENGANTAR | v |
| ABSTRAK | vi |
| ABSTRACT | vii |
| DAFTAR ISI..... | viii |
| DAFTAR TABEL..... | x |
| DAFTAR GAMBAR | xi |
| DAFTAR LAMPIRAN..... | xiii |
| DAFTAR NOTASI DAN SIMBOL | xiv |
| BAB I PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1. Latar Belakang..... | 1 |
| 1.2. Rumusan Masalah | 4 |
| 1.3. Tujuan Penelitian..... | 4 |
| 1.4. Batasan Masalah..... | 5 |
| 1.5. Sistematika Penulisan..... | 5 |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA..... | 7 |
| 2.1. Penelitian Terdahulu..... | 7 |
| 2.2. Fiber Reinforced Polymer (FRP)..... | 8 |
| 2.3. Sistem perkuatan dengan FRP | 9 |
| 2.3.1. CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) | 11 |
| 2.3.2. GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) | 12 |
| 2.3.3. Resin Epoksi | 12 |
| 2.4. FRP Hybrid (Hybrid Fiber Reinforced Polymer) | 14 |

| | |
|--|-----------|
| 2.5. Perilaku Kuat Lentur Balok..... | 15 |
| 2.6. Prilaku Perkuatan Balok Beton Bertulang..... | 16 |
| 2.7. Kapasitas Lentur Balok Beton Bertulang | 17 |
| 2.7.1. Kapasitas Lentur Balok Beton Tulangan Tunggal..... | 17 |
| 2.7.2. Kapasitas Lentur Balok Beton Tulangan Rangkap..... | 19 |
| 2.8. Perilaku Kapasitas Lentur Balok Bertulang Perkuatan FRP | 21 |
| 2.9. Model Kegagalan..... | 25 |
| BAB III METODE PENELITIAN..... | 29 |
| 3.1. Rancangan Penelitian | 29 |
| 3.2. Waktu dan Lokasi Penelitian..... | 30 |
| 3.3. Alat dan Bahan Penelitian | 30 |
| 3.4. Pelaksanaan Penelitian | 32 |
| 3.5. Desain Penelitian | 34 |
| 3.6. Tahap Analisis Data | 38 |
| 3.7. Standar Penelitian..... | 38 |
| BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN | 40 |
| 4.1. Karakteristik Material..... | 40 |
| 4.1.1. Karakteristik Baja Tulangan | 40 |
| 4.1.2. Karakteristik Beton..... | 40 |
| 4.1.3. Karakteristik FRP Hybrid | 40 |
| 4.2. Karakteristik Balok Beton Bertulang Perkuatan FRP Hybrid..... | 44 |
| 4.2.1. Kapasitas Lentur Balok Beton Bertulang | 44 |
| 4.2.2. Hubungan Beban-Lendutan | 46 |
| 4.2.3. Hubungan Beban-Regangan | 49 |
| 4.2.4. Pola retak dan mode kegagalan | 52 |
| BAB V KESIMPULAN DAN SARAN..... | 60 |
| 5.1. Kesimpulan..... | 60 |
| 5.2. Saran | 60 |
| Daftar Pustaka | 62 |
| LAMPIRAN | 64 |

DAFTAR TABEL

| | |
|---|----|
| Tabel 1 Karakteristik CFRP-s (<i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i>)..... | 11 |
| Tabel 2 Karakteristik GFRP-s (<i>Glass Fiber Reinforced Polymer</i>) | 12 |
| Tabel 3 Karakteristik Material Resin Epoksi | 13 |
| Tabel 4 Variasi benda uji properti mekanis FRP..... | 33 |
| Tabel 5 Variasi Benda Uji Balok Beton Bertulang | 35 |
| Tabel 6 Hasil Uji Tarik Baja Tulangan | 40 |
| Tabel 7 Hasil Pengujian Karakteristik Beton | 40 |
| Tabel 8 Analisis desain awal FRP hybrid..... | 41 |
| Tabel 9 Hasil Analisis dan Pengujian Lentur Balok Beton Bertulang | 45 |
| Tabel 10 Kuat Lentur Balok Beton Bertulang..... | 46 |
| Tabel 11 Daktilitas Balok Uji | 48 |
| Tabel 12 Mode Kegagalan Balok Beton Bertulang..... | 59 |

DAFTAR GAMBAR

| | |
|---|----|
| Gambar 1 Perkuatan Girder Jembatan menggunakan Lembaran FRP | 1 |
| Gambar 2 Kurva tegangan-regangan FRP hybrida (K Naresh dkk, 2018)..... | 3 |
| Gambar 3 Grafik Tegangan-Regangan Tipikal Fiber dan Baja..... | 4 |
| Gambar 4 Tipikal bentuk serat tipe lembaran | 10 |
| Gambar 5 Pengujian kuat lentur balok dengan <i>Universal Testing Machine</i> | 16 |
| Gambar 6 Kurva Tegangan-Regangan | 17 |
| Gambar 7 Distribusi tegangan pada balok..... | 18 |
| Gambar 8 Penampang Balok Tulangan Rangkap..... | 20 |
| Gambar 9 Blok tegangan balok FRP | 22 |
| Gambar 10 Model analisis regangan FRP | 24 |
| Gambar 11 Putusnya FRP dan hancurnya beton pada sisi tekan..... | 25 |
| Gambar 12 Ragam Pelepasan Ikatan antara FRP dan Beton..... | 26 |
| Gambar 13 Diagram alir rancangan penelitian..... | 29 |
| Gambar 14 <i>Strain Gauge</i> dan Perekat | 31 |
| Gambar 15 LVDT (Linear Variable Displacement Transducer)..... | 31 |
| Gambar 16 Data logger TDS-530..... | 32 |
| Gambar 17 Detail Benda Uji Properti Mekanis..... | 33 |
| Gambar 18 Persiapan Benda Uji | 34 |
| Gambar 19 Model Pembebanan Balok..... | 35 |
| Gambar 20 Desain benda uji Balok Normal Ukuran 15x 20 x 330 cm..... | 35 |
| Gambar 21 Desain Benda Uji Balok dengan Perkuatan FRP Hybrid | 36 |
| Gambar 22 Titik pemasangan SGC pada benda uji beton..... | 37 |
| Gambar 23 Titik pemasangan SGS pada benda uji baja | 37 |
| Gambar 24 Titik pemasangan SGF pada benda uji FRP Hybrid..... | 38 |
| Gambar 25 Grafik Hubungan Beban-Regangan Desain Awal FRP Hybrid | 42 |
| Gambar 26 Grafik Hubungan Tegangan-Regangan FRP Hybrid..... | 43 |
| Gambar 27 Grafik Hubungan Beban-Lendutan Balok Kontrol (BK) | 47 |
| Gambar 28 Grafik Hubungan Beban-Lendutan Balok FRP Hybrid (BGC)..... | 47 |
| Gambar 29 Grafik Perbandingan BK-01 dan BGC-01..... | 47 |
| Gambar 30 Grafik Hubungan Beban-Regangan Baja Balok Kontrol (BK) | 49 |

| | |
|---|----|
| Gambar 31 Grafik Hubungan Beban-Regangan Baja Balok FRP (BGC)..... | 50 |
| Gambar 32 Grafik Hubungan Beban-Regangan Beton Balok Kontrol (BK)..... | 51 |
| Gambar 33 Grafik Hubungan Beban-Regangan Beton Balok FRP (BGC)..... | 51 |
| Gambar 34 Grafik Hubungan Beban-Regangan FRP Hybrid | 52 |
| Gambar 35 Pola retak sampel BK-01 | 53 |
| Gambar 36 Pola retak sampel BK-02 | 54 |
| Gambar 37 Pola retak sampel BK-03 | 55 |
| Gambar 38 Pola retak sampel BGC-01 | 56 |
| Gambar 39 Pola retak sampel BGC-02 | 57 |
| Gambar 40 Pola retak sampel BGC-03 | 58 |

DAFTAR LAMPIRAN

| | |
|--|----|
| Lampiran 1. Dokumentasi Pembuatan Sampel FRP Hybrid..... | 64 |
| Lampiran 2. Dokumentasi Pengujian Sampel FRP Hybrid | 65 |
| Lampiran 3. Dokumentasi Pembuatan Sampel Balok Beton Bertulang | 66 |
| Lampiran 4. Dokumentasi Pengujian Sampel Balok Beton Bertulang | 67 |

DAFTAR NOTASI DAN SIMBOL

| | |
|-----------------|--|
| ϵ_{bi} | = regangan beton |
| ϵ_{fe} | = regangan yang terjadi pada FRP |
| ϵ_{fu} | = regangan ultimit FRP |
| A_f | = Luas Penampang serat (mm^2) |
| E_f | = Modulus Elastisitas serat (Pa) |
| P_f | = Beban (N) |
| P_{fCU} | = Beban ultimit CFRP |
| P_{fG} | = Beban GFRP saat mencapai regangan ultimit CFRP |
| P_{fGU} | = Beban ultimit GFRP |
| f_f | = Tegangan serat (Pa) |
| ϵ_f | = Regangan serat |
| \emptyset | = faktor reduksi |
| b | = Lebar rata-rata dari benda uji (mm) |
| c | = tinggi blok tegangan ekuivalen |
| d | = Tinggi rata-rata benda uji (mm) |
| h | = tinggi balok |
| km | = koefisien lekatan FRP |
| L | = Panjang Bentang (mm) |
| M_n | = momen nominal (Nmm) |
| M_u | = momen ultimit (Nmm) |
| n | = jumlah lapis FRP |
| P | = Beban maksimum yang diberikan pada balok (N) |
| R | = Kuat Lentur (Mpa) |
| t_f | = tebal FRP (mm) |
| z | = lengan momen |

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Umumnya kerusakan struktur beton bertulang diakibatkan umur struktur, peningkatan beban layan ataupun akibat faktor alam. Struktur yang rusak akan langsung ganti tanpa adanya pertimbangan upaya perbaikan ataupun perkuatan. Dewasa ini perkembangan ilmu dan teknologi semakin pesat, termasuk perkembangan di bidang teknik sipil. Salah satu metode perbaikan struktur yang sedang berkembang adalah dengan menggunakan lapisan serat yang diperkuat dengan matriks polimer atau yang umum dikenal sebagai *Fiber Reinforced Polymer* (FRP).



Gambar 1 Perkuatan Girder Jembatan menggunakan Lembaran FRP

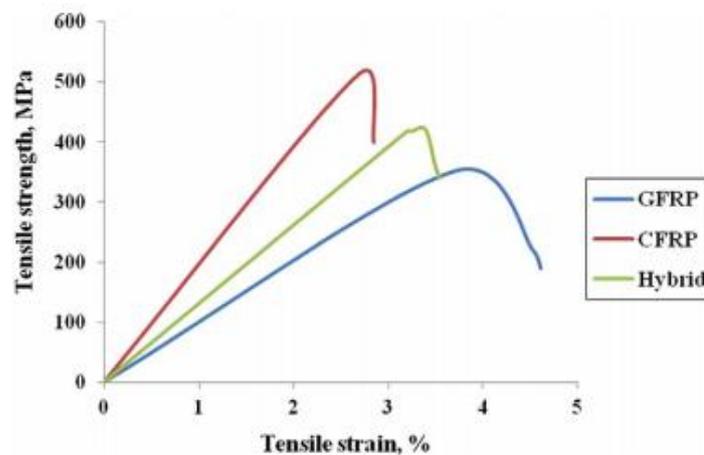
Jika diperhatikan pada **Gambar 1** terdapat upaya peningkatan kapasitas lentur balok girder dengan pengaplikasian lembaran FRP pada daerah lentur balok. Pemanfaatan material FRP pada struktur bangunan berguna untuk meningkatkan kemampuan dan mengembalikan kekuatan struktur beton bertulang. Penggunaan sistem FRP yang terpasang secara eksternal merupakan perkuatan yang efektif untuk merehabilitasi dan memperkuat elemen struktur yang telah rusak. Perbaikan dengan menggunakan FRP ini juga merupakan alternatif yang lebih ekonomis jika dibandingkan dengan rekonstruksi bangunan.

Memiliki berbagai kelebihan dibanding bahan konvensional, merupakan penyebab aplikasi material komposit FRP ramai dikembangkan. Pengaplikasian

FRP pada berbagai jenis struktur, menunjukkan hasil yang cukup positif dalam membantu meningkatkan kinerja struktur. Beberapa penelitian terdahulu tentang penggunaan FRP pada balok lentur diantaranya: Alami, F (2010) menyatakan bahwa kemampuan struktur balok beton bertulang dalam memikul beban meningkat hingga 75.13% dengan perkuatan lapisan GFRP sebagai perkuatan eksternal pada balok beton bertulang. Hino. S dan Djameluddin R. (2011) dalam tulisannya menyebutkan bahwa dengan menggunakan lapisan GFRP sebagai perkuatan untuk balok beton bertulang dengan baja tulangan yang telah mengalami leleh, kapasitas lentur yang ditunjukkan masih lebih tinggi jika dibandingkan dengan balok kontrolnya. Akkas. A.M. dan Djameluddin R. (2014) juga menyatakan hal yang serupa, di mana dalam tulisannya membahas tentang balok beton bertulang yang diperkuat dengan lapisan GFRP dengan penambahan sabuk untuk meningkatkan daya lekat beton-GFRP, didapatkan hasil balok yang diperkuat dengan GFRP mengalami peningkatan kapasitas lentur jika dibandingkan dengan balok normal. Perkuatan balok beton bertulang menggunakan Carbon Fiber Reinforced polymer (CFRP) dalam bentuk NSM strip dan lembaran sebagai tulangan memanjang mampu meningkatkan kapasitas momen lentur dan penggunaan tulangan geser dari lembaran CFRP dalam bentuk U-wrap meningkatkan daktilitas balok (Rasheed, Harrison, Peterman, & Alkhrdaji, 2010). Sistem perkuatan yang berbeda pada awalnya dirancang untuk menghasilkan kekuatan lentur yang setara dimana beton hancur pada regangan tekan ultimate 0.003.

K Naresh dkk (2018), melakukan penelitian Analisis statistik kuat tarik GFRP, CFRP dan komposit hibrida terhadap sensitivitas laju regangan komposit hibrida dapat ditingkatkan dengan menambahkan lebih banyak serat gelas dan lebih sedikit serat karbon dalam matriks epoksi, komposit gelas lebih sensitif terhadap laju regangan dan komposit karbon kurang atau tidak sensitif terhadap laju regangan. Oleh karena itu, untuk meningkatkan efek laju regangan pada komposit hibrida, digunakan serat gelas 610 g/m² dan serat karbon 450 g/m² dalam penelitian ini. Hasil penelitian ini menunjukkan pengaruh laju regangan yang signifikan terhadap kuat tarik (0 °/ 90 °) GFRP dan komposit hibrid sedangkan pengaruh laju regangan terhadap kuat tarik komposit lapis silang serat karbon lebih kecil, untuk

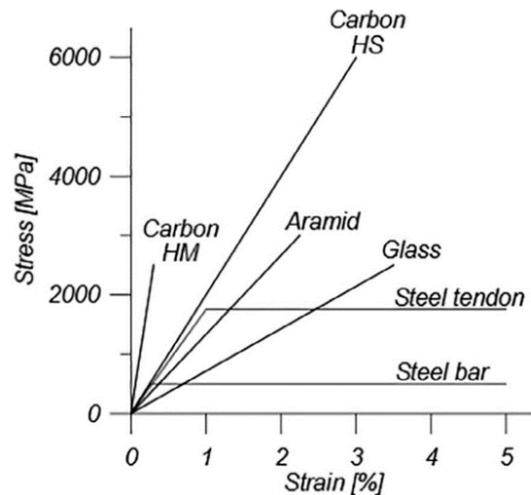
peningkatan laju regangan dari $8,3 \times 10^{-3}$ menjadi 542 s^{-1} . Hasil micrographs SEM menunjukkan mekanisme kegagalan, yaitu retak mikro antar permukaan serat-matriks dan retak mikro matriks pada pembebanan kuasi-statis dan terjadi debonding pada serat-matriks, retak matriks dan kerusakan matriks pada pembebanan dinamis. Kurva tegangan-regangan uji kuasi-statis dari GFRP, CFRP dan komposit hybrid ditunjukkan pada **Gambar 2**.



Gambar 2 Kurva tegangan-regangan FRP hybrida (K Naresh dkk, 2018)

Dalam pengaplikasiannya, lapisan FRP merupakan material yang non-korosif, memiliki kuat tarik yang relatif tinggi walaupun memiliki bobot yang ringan, dan *workability* yang baik. Namun di lain sisi FRP memiliki sifat getas sehingga jika terjadi kegagalan struktur, struktur akan gagal secara tiba-tiba. Maka perlu dibuat sebuah solusi yang dapat menjadi faktor keamanan.

Salah satu solusi yang dapat dilakukan adalah dengan menggabungkan dua jenis FRP yang memiliki karakter yang berbeda yaitu, *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) dan *Glass Fiber Reinforced Polymer* (GFRP). Pada **Gambar 3**, terlihat bahwa gelas memiliki sifat yang lebih elastis dari karbon. Hal ini diindikasikan oleh besar regangan (*strain*) yang dimilikinya lebih tinggi dari karbon. Diharapkan dengan menggabungkan keduanya jika beban yang dipikul berlebih, CFRP yang lebih getas akan gagal terlebih dahulu sehingga keruntuhan secara tiba-tiba dapat dicegah.



Gambar 3 Grafik Tegangan-Regangan Tipikal Fiber dan Baja

Permasalahan selanjutnya ialah pada umumnya CFRP memiliki kuat tarik yang lebih baik jika dibandingkan dengan GFRP, sehingga perlu dilakukan penyesuaian untuk menurunkan kuat tarik CFRP. Salah satu metode yang dapat digunakan yaitu dengan mengurangi luas penampang CFRP, sehingga dengan adanya pengurangan ini diharapkan CFRP akan gagal terlebih dahulu sebelum GFRP.

Berdasarkan pemikiran tersebut, maka disusunlah penelitian ini dengan judul: “Studi Perkuatan Balok Beton Bertulang dengan lapisan hybrid FRP”.

1.2. Rumusan Masalah

Adapun Rumusan Masalah pada penelitian ini, yakni:

1. Bagaimana properti material dari gabungan GFRP dan CFRP?
2. Berapa rasio perbandingan luas permukaan GFRP dan CFRP yang optimal diaplikasikan pada balok beton bertulang?
3. Berapa kapasitas penampang dari balok beton bertulang yang diperkuat dengan lapisan hybrid FRP?

1.3. Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, maka tujuan penelitian ini adalah:

1. Menganalisis properti material dari gabungan GFRP dan CFRP

2. Mengevaluasi rasio perbandingan luas permukaan GFRP dan CFRP yang optimal diaplikasikan pada balok beton bertulang
3. Mengevaluasi kapasitas penampang dari balok beton bertulang yang diperkuat dengan lapisan hybrid FRP

1.4. Batasan Masalah

Untuk mencapai tujuan di atas, maka penelitian yang dilakukan adalah uji tarik material baja dan FRP, uji kuat tekan beton dan uji kuat lentur balok beton bertulang. Adapun batasan masalah dalam penelitian ini yaitu:

1. Analisis hanya membahas tentang nilai kuat lentur dari balok perkuatan FRP hybrid
2. Mutu beton rencana (f'_c) sebesar 20 MPa
3. Baja tulangan yang digunakan untuk tulangan longitudinal adalah S13 kelas BjTS 420 dan P8 kelas BjTP 280 untuk tulangan sengkang
4. Lapisan FRP yang digunakan adalah gabungan antara GFRP dan CFRP dengan luas permukaan GFRP 100% dari luas permukaan penampang bawah beton dan CFRP dengan variasi 30%, 40% atau 50% dari luas permukaan penampang bawah beton
5. Dilakukan uji statik monoton pada balok beton bertulang

1.5. Sistematika Penulisan

Tesis ini dibagi menjadi lima bab yakni Pendahuluan, Tinjauan Pustaka, Metode Penelitian, Hasil Penelitian dan Pembahasan, serta Kesimpulan dan Saran. Berikut ini gambaran tiap bab:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini terdiri atas latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah serta sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Dalam bab ini diuraikan secara teoritis tentang teori, pemikiran dan hasil penelitian terdahulu yang berkaitan dengan penelitian ini. Bagian ini menjelaskan tentang kerangka dasar atau konsep dan teori yang akan digunakan untuk pemecahan masalah.

BAB III METODE PENELITIAN

Bab ini menjelaskan bagan alir penelitian, rancangan dan prosedur penelitian, waktu dan lokasi penelitian, bahan dan alat yang digunakan dalam penelitian, metode penelitian serta analisis yang digunakan.

BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Dalam bab ini diuraikan hasil pengujian, analisis data hasil pengujian dan pembahasan mengenai hasil yang didapatkan.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bagian ini berupa paparan kesimpulan yang dapatkan berdasarkan hasil dan pembahasan pada bab sebelumnya serta menyertakan saran-saran yang untuk penelitian-penelitian akan datang yang serupa.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian Terdahulu

Mufti Amir Sultan dan Rudy Djamaluddin (2018) dalam penelitiannya tentang pengaruh perkuatan lapisan GFRP pada balok beton bertulang ($f_c' = 20$ MPa) terhadap kapasitas lentur dan daktilitas balok. Di mana balok diuji dengan pembebanan statik dengan model pembebanan dua titik. Hasil studi menunjukkan bahwa dengan adanya perkuatan dengan lapisan GFRP pada balok, terdapat peningkatan kapasitas lentur dan daktilitas balok sebesar 37,96%.

Saddam Husein, Rudi Djamaluddin, Rita Irmawaty dan Kusnadi (2020) menyajikan dalam tulisannya mengenai analisis kapasitas lentur dan pola kegagalan pada balok beton dengan perkuatan tulangan GFRP. Dalam penelitian ini dilakukan pengujian beban titik terhadap 6 sampel yang terdiri dari 2 balok beton normal dengan tulangan baja, 2 balok beton perkuatan tulangan GFRP dan 2 balok beton perkuatan tulangan GFRP tanpa selimut beton. Hasil penelitian menunjukkan peningkatan kapasitas lentur pada balok dengan tulangan GFRP sebesar 39,76% jika dibandingkan dengan balok tulangan baja. Pola kegagalan balok beton tulangan GFRP tanpa selimut mengalami keruntuhan yang terjadi secara tiba-tiba dengan kondisi tulangan terdeformasi yang disertai dengan retak diagonal. Retakan menjalar menuju sumbu netral beton yang tertekan hingga terjadi keruntuhan yang tiba-tiba, sedangkan pada sampel balok beton tulangan baja mengalami kegagalan lentur yang ditandai dengan retakan yang terjadi pada sisi tekan dan membentuk retakan yang sejajar dengan arah pembebanan.

Koosha Khorramian dan Pedram Sadeghian (2021), melakukan penelitian dengan menggunakan strip CFRP longitudinal untuk meningkatkan kekakuan lentur kolom yang efektif untuk perkuatan kolom ramping dan kolom berbeban eksentrik di mana kekakuan lentur tambahan diperlukan untuk kontrol tekuk. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penggunaan pembungkus tanpa laminasi CFRP longitudinal lebih efektif daripada sistem hibrid yang diusulkan untuk perkuatan kolom beton skala kecil yang diberi beban aksial.

Szmigiera dkk (2019), melakukan eksplorasi tentang penggabungan antara Basalt Fiber Reinforced Polymer (BFRP) dengan CFRP dengan tujuan mendapatkan Hybrid Fiber Reinforced Polymer (HFRP) dengan properti mekanis yang lebih baik daripada BFRP dan lebih ekonomis dari CFRP. Variasi benda uji yang digunakan yaitu, (C:B): 1:1, 1:2, 1:3, 1:4, dan 1:9. Berdasarkan pengujian, didapatkan hasil pada kombinasi 1:3 didapatkan peningkatan modulus elastisitas sebesar 68% dan kuat tarik sebesar 15.8% jika dibandingkan dengan BFRP.

K Naresh dkk (2018), melakukan penelitian Analisis statistik kuat tarik GFRP, CFRP dan komposit hibrida terhadap sensitivitas laju regangan komposit hibrida dapat ditingkatkan dengan menambahkan lebih banyak serat gelas dan lebih sedikit serat karbon dalam matriks epoksi, komposit gelas lebih sensitif terhadap laju regangan dan komposit karbon kurang atau tidak sensitif terhadap laju regangan. Oleh karena itu, untuk meningkatkan efek laju regangan pada komposit hibrida, digunakan serat gelas 610 g/m² dan serat karbon 450 g/m² dalam penelitian ini. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa terdapat pengaruh laju regangan yang signifikan terhadap kuat tarik (0 °/ 90 °) GFRP dan komposit hibrida sedangkan pengaruh laju regangan terhadap kuat tarik komposit lapis silang serat karbon lebih kecil, untuk peningkatan laju regangan dari $8,3 \times 10^{-3}$ menjadi 542 s^{-1} . Hasil micrographs SEM menunjukkan mekanisme kegagalan, yaitu retak mikro antar permukaan serat-matriks dan retak mikro matriks pada pembebanan kuasi-statis dan terjadi debonding pada serat-matriks, retak matriks dan kerusakan matriks pada pembebanan dinamis.

2.2. Fiber Reinforced Polymer (FRP)

FRP merupakan material komposit yang merupakan gabungan dari serat dan polimer. Beberapa jenis material pembentuk FRP diantaranya yaitu kaca, Kevlar, karbon dan lainnya. Jenis FRP yang terbuat dari serat kaca (*Glass Fiber Reinforced Polymer* (GFRP)) dan yang terbuat dari karbon (*Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP)). GFRP sendiri dibuat dari kaca yang dipanaskan pada suhu $\pm 1000^\circ\text{C}$ yang kemudian dipintal dengan menggunakan *Bushing Platinumrhodium* berkecepatan 150 kmph.

Material serat komposit punya beberapa kelebihan jika dibandingkan dengan baja tulangan konvensional seperti kuat tarik yang relatif lebih tinggi, ringan dan merupakan bahan non-korosif tidak seperti baja. FRP umumnya digunakan pada rekayasa sipil yang untuk rekonstruksi, perbaikan struktur serta untuk pembuatan struktur baru yang memanfaatkan FRP sebagai pengganti baja tulangan konvensional. Menurut BRE dan Trennd (2000), menggunakan FRP sebagai bahan perkuatan struktur memiliki beberapa keunggulan sebagai berikut:

- Pengaplikasiannya tidak mempengaruhi fungsi struktur lainnya
- Meningkatkan kapasitas struktur
- Waktu kerja yang cepat
- Material FRP lebih tipis dan berbobot lebih ringan daripada perkuatan menggunakan tulangan/pelat baja.

Sedangkan Keuntungan penggunaan FRP menurut Hartono dan Santosa (2003), yaitu:

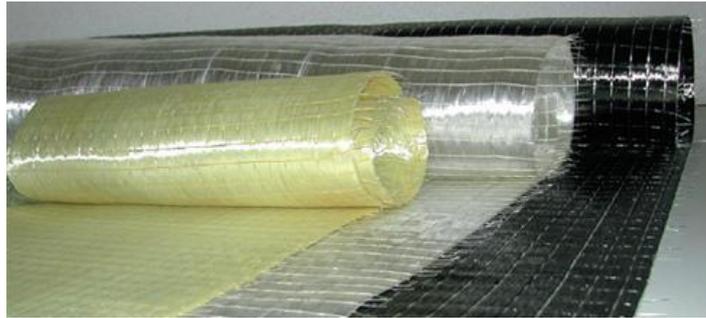
- Kuat tarik yang tinggi
- Ringan (4 hingga 6 kali lebih ringan dari bobot baja)
- Pelaksanaan yang relatif cepat dan mudah
- Tidak mengganggu fungsi struktur
- Area kerja yang minim
- Tidak diperlukan sambungan meskipun area yang cakup cukup luas
- Non-korosif

Namun perlu juga ditinjau kembali beberapa kekurangan pemakaian bahan serat komposit ini, diantaranya kurang tahan terhadap suhu yang tinggi. Konsistensi perekat resin epoksi dapat berubah dari keadaan keras menjadi keadaan plastis pada suhu sekitar 70°C, yang dapat melemahkan ikatannya dengan permukaan beton. Selain itu, perekat resin epoxy juga tidak tahan terhadap sinar UV. Oleh karena itu, untuk mengatasi kelemahan tersebut perlu dilakukan proteksi misalnya dengan *coating* tambahan atau pelapisan dengan mortar.

2.3. Sistem perkuatan dengan FRP

FRP adalah material yang terbuat dari serat material buatan seperti yang diikat oleh matriks, seperti epoksi atau polyester. Keuntungan dari penggunaan FRP

antara lain pemasangan yang mudah, kuat tarik yang tinggi, ringan serta sifatnya yang non-korosif (ISIS Canada, 2006). Bahan FRP terdiri dari serat dan matriks, di mana serat memberikan kekuatan dan kekakuan sementara matriks memegang serat bersama-sama, melindungi serat dari abrasi dan korosi dan juga transfer tekanan ke serat. Untuk memahami bentuk FRP-s hasil parikan dapat diperhatikan pada **Gambar 4**.



Gambar 4 Tipikal bentuk serat tipe lembaran

Ada berbagai jenis FRP, tergantung pada serat yang digunakan, diantaranya yang umum digunakan untuk perkuatan struktur yaitu GFRP (*glass fiber reinforced polymer*) yang menggunakan serat gelas dan CFRP (*carbon fiber reinforced polymer*) yang menggunakan serat karbon. Material GFRP ini merupakan material yang paling banyak digunakan saat ini dikarenakan sifat daktilitasnya yang besar, harganya yang lebih murah dan lebih mudah didapatkan di pasaran sedangkan material CFRP memiliki kekuatan yang lebih baik, mempunyai modulus elastis (kekakuan) yang cukup tinggi dan lebih banyak digunakan untuk memperkuat dan memperbaiki struktur. Sifat –sifat mekanis yang dimiliki kedua material FRP ini dapat dikombinasi dengan matriks *epoxy* menjadi satu lapisan hibrid dapat dianggap sebagai solusi alternatif dalam memperkuat dan memperbaiki elemen struktur beton bertulang untuk penghematan biaya (ekonomis), dengan pemakaian volume lembar GFRP lebih besar dari pada lembar CFRP. Atas pemikiran tersebut maka digunakan lapisan hibrid dalam penelitian ini.

Lembaran GFRP dan lembaran CFRP adalah tipe lembaran yang mudah direkatkan pada bagian permukaan struktur yang akan diperkuat dengan bantuan epoksi sebagai perekat. Biasanya proses penempelan sangat berperan penting terhadap struktur dengan perkuatan lapisan disebabkan karena seringnya dijumpai permasalahan *debonding* yang terjadi pada struktur tersebut yang umumnya

diakibatkan karena bahan perekat yang kurang baik, mutu beton yang kurang memadai, lebar lapisan FRP yang lebih kecil daripada lebar penampang balok dan/atau pelaksanaan penempelan lapisan FRP yang kurang sempurna.

2.3.1. CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer)

CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) adalah salah satu jenis FRP yang digunakan pada struktur bangunan yang memerlukan perkuatan tambahan. Teknik perkuatan seperti ini selain efisien, juga tidak mengalami perkaratan seperti perkuatan plat baja yang dipasang secara eksternal. Fungsi utama perkuatan dengan CFRP adalah untuk meningkatkan daya dukung, kapasitas lentur, geser, aksial dan/atau daktilitas struktur. Daya tahan CFRP yang tinggi, dapat meningkatkan sisi ekonomisnya jika digunakan pada lingkungan dengan kadar asam yang tinggi dimana baja mudah terkorosi. Penggunaan CFRP lebih populer dikarenakan banyaknya kelebihan yang dimiliki seperti bobotnya yang ringan, pengaplikasian yang lebih mudah, biaya instalasi dan pemeliharaan yang relatif rendah. Namun di lain sisi kerugian yang paling mendasar dari penggunaan CFRP sebagai sistem perkuatan struktur adalah harga materialnya yang relatif lebih mahal. (Meier, 1997).

Adapun karakteristik material dalam keadaan lepas dan komposit dari serat karbon diperlihatkan pada **Tabel 1**.

Tabel 1 Karakteristik CFRP-s (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*)

| SIFAT MATERIAL CFRP | | | |
|---------------------|------------------------|-------------------------|------------|
| KEADAAN LEPAS | | KEADAAN KOMPOSIT | |
| SIFAT MATERIAL | NILAI TEST | SIFAT MATERIAL | NILAI TEST |
| Tegangan Tarik | 4.00 Gpa | Tegangan tarik Ultimate | 986.00 Mpa |
| Modulus Tarik | 230.00 Gpa | Modulus Tarik | 95.80 Gpa |
| Regangan maks | 1.70 % | Regangan | 1.00 % |
| Kerapatan | 1.74 g/cm ² | | |
| Tebal Fiber | 0.36 mm | Tebal Komposit | 1.00 mm |

Sumber: *Fyfe.Co.LLC*

2.3.2. GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer)

Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) adalah serat kaca yang direkatkan dengan matriks polimer. Sama halnya dengan CFRP, GFRP juga memiliki kuat tarik yang besar dan bobot bahan yang ringan. Meskipun sifat kekuatan yang agak lebih rendah dari serat komposit yang menggunakan karbon, namun biaya fabrikasinya jauh lebih murah. Kuat tarik dan sifatnya yang ringan juga sangat menjadi salah satu kelebihan bila dibandingkan dengan baja dan dapat dibentuk dengan mudah.

Penggunaan GFRP biasanya digunakan untuk perkuatan struktur. Selain itu, GFRP merupakan bahan yang tahan akan terpaan cuaca, tahan air laut, dan lainnya sehingga dapat digunakan untuk interior maupun eksterior ruangan. (Jenova, 2013). Untuk mengetahui karakteristik GFRP-s dapat diperhatikan pada **Tabel 2**.

Tabel 2 Karakteristik GFRP-s (Glass Fiber Reinforced Polymer)

| SIFAT MATERIAL GFRP | | | |
|---------------------|------------------------|-------------------------|------------|
| KEADAAN LEPAS | | KEADAAN KOMPOSIT | |
| SIFAT MATERIAL | NILAI TEST | SIFAT MATERIAL | NILAI TEST |
| Tegangan Tarik | 3.24 Gpa | Tegangan Tarik ultimate | 575.00 Mpa |
| Modulus Tarik | 72.40 Gpa | Modulus Tarik | 26.10 Gpa |
| Regangan maks | 4.50% | Regangan | 2.20% |
| Kerapatan | 2.55 g/cm ² | | |
| Tebal Fiber | 0.36 mm | Tebal Komposit | 1.30 mm |

Sumber: *Fyfe.Co.LLC*,

2.3.3. Resin Epoksi

Resin epoksi adalah larutan yang digunakan sebagai matriks untuk menggabungkan sifat-sifat serat. Campuran resin epoksi terdiri dari bahan-bahan yang dicampur bersama hingga larut dan disebut polimer. Campuran dengan epoksi lain dapat digunakan untuk mencapai performa tertentu dan property mekanis yang diinginkan. Resin epoksi yang paling umum digunakan yaitu *Bisphenol A Eter Diglisidil*. Resin epoksi dikeringkan dengan menambahkan pengeras anhidrida atau

amina. Setiap pengeras menghasilkan polimer yang berbeda dan sifat yang diinginkan pada produk jadi. Waktu pengerasan dapat diatur dengan memilih *hardener* atau katalis yang tepat sesuai kebutuhan proses.

Beberapa keuntungan resin epoksi sebagai berikut :

- Pilihan yang lebih beragam akibat berbagai sifat mekanik
- Penyusutan akibat pengeringan yang rendah
- Ketahanan terhadap sifat kimiawi yang baik
- Bersifat adesif yang baik pada bermacam jenis serat dan substrat lainnya

Epoksi bekerja secara kimiawi ke permukaan bagian struktural. Ikatan kimiawi terbilang cukup praktis karena tidak menyebabkan konsentrasi tegangan, pengimplementasian yang lebih mudah daripada perekat mekanis dan tidak merusak bahan dasar atau komposit. Perekat yang paling cocok untuk material komposit adalah perekat dengan komponen berbasis epoksi. Epoksi terdiri dari campuran 2 komponen. Komponen utamanya adalah cairan organik yang termasuk golongan epoksi.

Permukaan yang direkatkan perlu disiapkan untuk meningkatkan daya lekat. Permukaan harus bersih dan kering, bebas dari emulsi, oksida dan debu. Bahan perekat yang digunakan dalam penelitian ini juga merupakan produk dari Fyfe Co. dengan kode produk Tyfo S, komponen A dan komponen B. Proses pencampuran komponen A dan komponen B menggunakan perbandingan 2:1. Adapun karakteristik dapat diamati pada **Tabel 3**.

Tabel 3 Karakteristik Material Resin Epoksi

| SIFAT MATERIAL EPOKSI | | |
|-----------------------|------------|------------|
| SIFAT MATERIAL | METODE | NILAI TEST |
| Kekuatan Tarik | ASTM D-638 | 72.40 Mpa |
| Modulus Tarik | | 3.18 Gpa |
| Persen Regangan | ASTM D-638 | 5.00 % |
| Kekuatan Lentur | ASTM D-790 | 123.40 Mpa |
| Modulus Lentur | ASTM D-790 | 3.12 Gpa |

Sumber: *Fyfe.Co.LLC*,

2.4. FRP Hybrid (Hybrid Fiber Reinforced Polymer)

Pengembangan material komposit meningkatkan performanya berdasarkan penggabungan dua atau lebih serat dalam satu matriks polimerik, yang mengarah pada sistem material canggih yang disebut komposit hybrid dengan sifat material yang sangat beragam (Prabhakaran et al., 2012). Tantangan utama yang hanya dapat dipenuhi melalui pemahaman tentang hubungan antara arsitektur material dan respons mekanis. Efek hybrid positif atau negatif dari properti mekanik yang dipilih dari aturan perilaku komposit karbon / epoksi dan komposit gelas / karbon (Marom et al., 1978). Manders dan Bader (1981) melaporkan efek hybrid dan peningkatan regangan kegagalan hingga 50% untuk komposit serat gelas / serat karbon. Kegagalan regangan fase karbon meningkat karena proporsi relatif serat karbon menurun dan serat karbon terdispersi lebih halus. Yerramalli dan Waas (2003) telah mempertimbangkan komposit hybrid karbon / gelas dengan fraksi volume serat keseluruhan 30%. Kegagalan pemisahan dan pembengkokan dicatat saat memuat laminasi hybrid di bawah kecepatan pemuatan statis dan dinamis. Zhang et al. (2012) mempelajari perilaku mekanis komposit hybrid yang terbuat dari penguat karbon / gelas dan metode pemrosesan yang digunakan adalah 'hand lay-up' yang bukan merupakan praktik terbaik untuk mendapatkan laminasi berkualitas tinggi. Penambahan penguat keras seperti silikon karbida, alumina dan titanium karbida meningkatkan kekerasan, kekuatan dan ketahanan aus komposit (Amar Patnaik et al., 2009; dan Chauhan et al., 2009). Pengalasan serat gelas ke dalam matriks polimer menghasilkan material komposit yang menghasilkan kombinasi menarik antara sifat fisik dan mekanik (Schwartz, 1984). Efektivitas perkuatan pada dasarnya bergantung pada adhesi antara matriks dan serat, sehingga ini merupakan faktor kunci dalam menentukan sifat akhir dari material komposit, terutama sifat mekaniknya (Yosoyima et al., 1984; Yosoyima et al., 1990; dan Pukzky et al., 1995).

Dalam pengaplikasiannya, untuk menentukan luas penampang CFRP yang diperlukan pada FRP hybrid, dapat dilakukan analisis awal dengan menggunakan pendekatan sebagai berikut:

$$E_f = \frac{f_f}{\varepsilon_f} \dots\dots\dots (1)$$

Di mana:

E_f = Modulus Elastisitas serat (Pa)

f_f = Tegangan serat (Pa)

ε_f = Regangan serat

dan;

$$f_f = \frac{P_f}{A_f} \dots\dots\dots (2)$$

Di mana:

f_f = Tegangan fiber (Pa)

P_f = Beban (N)

A_f = Luas Penampang serat (mm²)

Disederhanakan menjadi;

$$P_f = E_f \cdot \varepsilon_f \cdot A_f \dots\dots\dots (3)$$

Dengan target CFRP pada FRP hybrid akan gagal terlebih dahulu sebelum GFRP, maka kapasitas beban ultimit GFRP harus lebih tinggi dari jumlah kapasitas beban ultimit CFRP dan kapasitas beban GFRP pada saat regangan putus CFRP tercapai. Pemikiran ini dapat disederhanakan dalam persamaan sebagai berikut:

$$P_{fCU} + P_{fG} < P_{fGU} \dots\dots\dots (4)$$

Di mana:

P_{fCU} = Beban ultimit CFRP

P_{fG} = Beban GFRP saat mencapai regangan ultimit CFRP

P_{fGU} = Beban ultimit GFRP

Substitusi nilai P persamaan (3) dengan persamaan (4), didapatkan:

$$E_{fC} \cdot \varepsilon_{fCU} \cdot A_{fC} + E_{fG} \cdot \varepsilon_{fCU} \cdot A_{fG} < E_{fG} \cdot \varepsilon_{fGU} \cdot A_{fG} \dots\dots\dots (5)$$

2.5. Perilaku Kuat Lentur Balok

Pengujian kuat lentur dilakukan dengan menggunakan alat "Universal Testing Machine" dengan kapasitas 1500 KN. Metode pengujian yang dilakukan sesuai standar ASTM - C293-68 pada **gambar 5**. untuk setiap jenis balok normal, GFRP, CFRP, dan FRP Hibrid (GFRP dan CFRP) diuji pada umur 28 hari.

Besarnya Kuat Lentur dihitung berdasarkan persamaan :

$$R = \frac{3PL}{2bd^2} \dots\dots\dots (6)$$

Sumber : ASTM -C293-68,2000

Dimana :

R = Kuat Lentur (Mpa)

P = Beban maksimum yang diberikan pada balok (N)

L = Panjang Bentang (mm)

b = Lebar rata-rata dari benda uji (mm)

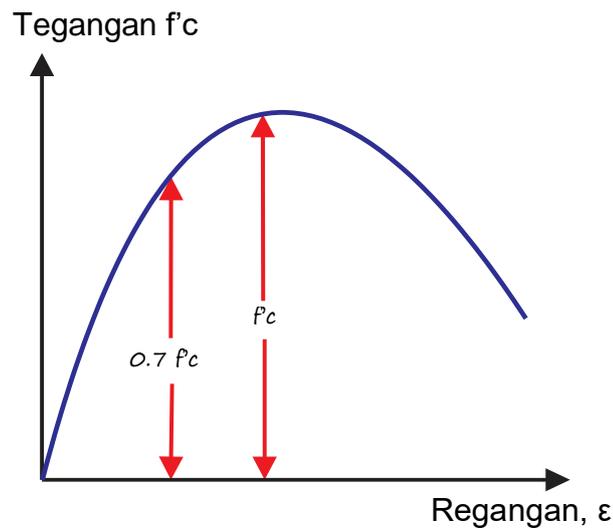
d = Tinggi rata-rata benda uji (mm)



Gambar 5 Pengujian kuat lentur balok dengan *Universal Testing Machine*

2.6. Prilaku Perkuatan Balok Beton Bertulang

Kekuatan tekan beton tergantung pada komposisi campuran (*mix design*), metode pengerjaan serta waktu dan kualitas perawatan. Kuat tekan diperoleh berdasarkan hasil uji tekan laboratorium terhadap beton berumur 28 hari dengan benda uji berbentuk silinder maupun kubus. Hasil pengujian dapat dianggap sesuai jika: (1) rata-rata hasil pengujian semua sampel uji yang didapatkan minimal sama atau melebihi kuat tekan yang disyaratkan. (2) standar deviasi data hasil pengujian yang tergolong rendah (hasil pengujian masing-masing sampel tidak terlalu jauh terpaut dari rata-rata dari keseluruhan data). Pada dasarnya kuat tekan rencana seharusnya bukanlah kekuatan rata-rata, namun kekuatan silinder yang paling minimum dari hasil pengujian.



Gambar 6 Kurva Tegangan-Regangan

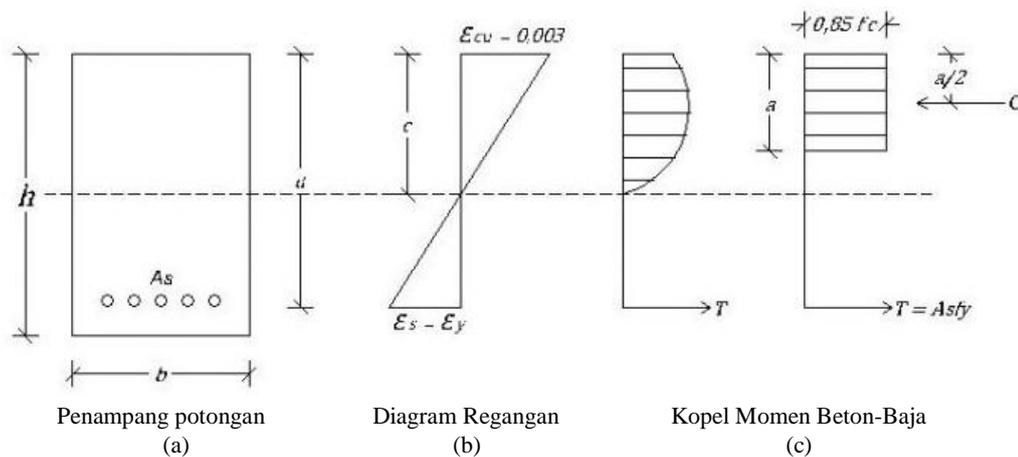
Gambar 6 merupakan tipikal kurva tegangan regangan yang diperoleh dari pengujian kuat tekan satu arah selama rentang waktu tertentu. Bagian kurva dari titik 0% hingga 40% dari tegangan ultimitnya, $f'c$, pada dasarnya garis grafik yang terbentuk dapat dianggap linier untuk penggunaan praktis. Setelah mencapai 70% dari tegangan ultimitnya, material kehilangan sebagian besar kekakuannya, dari grafik dapat diperhatikan jika garis grafik yang awalnya linear mulai melengkung. Pada saat beban ultimit, retak diagonal menjadi dapat diamati dengan jelas, dan keruntuhan beton terjadi segera setelahnya. Selain itu, semakin rendah kuat tekan beton, semakin tinggi regangan ultimitnya. Sepanjang dari bagian awal grafik tegangan-regangan yang relatif linear memanjang seiring meningkatnya kualitas beton. Semakin baik kualitas betonnya semakin rendah daktalitas yang dimiliki beton uji tersebut.

2.7. Kapasitas Lentur Balok Beton Bertulang

2.7.1. Kapasitas Lentur Balok Beton Tulangan Tunggal

Kekuatan lentur struktur penting dalam hal pengaruhnya terhadap kekuatan dan kekakuan struktur dalam hal kapasitas beban. Kekuatan lentur struktur meningkat ketika struktur diperkuat atau diperbaiki. Hal ini disebabkan penambahan kekuatan tarik pada struktur, meningkatkan beban layan yang mampu dipikul oleh struktur dan mengurangi defleksi yang terjadi. Di zaman modern kini,

banyak perbaikan telah dilakukan pada struktur bangunan. Hal ini disebabkan kondisi bangunan yang tidak kuat menahan beban yang dipikul oleh struktur. Ketidakcukupan bahan bangunan dapat disebabkan oleh kualitas beton yang tidak direncanakan, peningkatan beban bangunan, kebakaran, gempa bumi, perubahan operasional bangunan dan penuaan bahan bangunan. Perkuatan atau *retrofit* dapat dilakukan dengan berbagai cara diantaranya penambahan pelat baja, penambahan rangka batang, penambahan tulangan dengan *jacketing* dan dengan penambahan lapisan *FRP (Fiber Reinforcement Polymer)* secara eksternal. Penggunaan FRP mempunyai fungsi yang hampir sama dengan penggunaan plat baja yaitu berperan sebagai perkuatan balok beton, yaitu meingkatkan kemampuan tarik dari balok beton.



Gambar 7 Distribusi tegangan pada balok

Gambar 7 menunjukkan bahwa C adalah resultan gaya tekan dalam, T adalah resultan semua gaya tekan di atas garis nol. Sedangkan T adalah gaya drag internal yang dihasilkan, yang merupakan jumlah dari semua gaya drag yang dihitung di bawah garis netral. Kedua gaya ini memiliki garis sejajar dengan besaran yang sama tetapi bekerja dalam arah yang berlawanan dan dipisahkan oleh jarak z , membentuk sepasang modul penampang internal, nilai terbesar disebut gaya lentur atau momen tahanan penampang komponen struktur tersebut. Pasangan ketegangan antara C dan T juga bisa disebut keseimbangan gaya. Menurut teori kekuatan ultimit, baja tarik mencapai titik leleh ($f_s = f_y$) dan beton tekan mencapai kondisi tegangan maksimum $\epsilon'c = 0,003$. Modulus penampang menahan momen lentur desain aktual yang disebabkan oleh beban eksternal. Oleh karena itu,

ketika merencanakan dimensi balok, jumlah dan luas permukaan baja tulangan harus sedemikian rupa sehingga dapat menyebabkan modulus penampang sekurang-kurangnya sama dengan momen lentur maksimum yang dihasilkan oleh beban eksternal.

Menurut Nawy (1990), pada balok beton bertulang, beban yang bekerja pada struktur menyebabkan terjadinya lentur dan deformasi bagian struktur. Beban tersebut dapat berupa beban berat, beban kerja, beban susut, beban akibat perubahan temperatur, dan lain-lain. Sebagai suatu sistem konstruksi kaku suatu balok, stabilitasnya harus terjamin agar balok dapat menahan tegangan tarik dan tekan. Sebuah balok dapat memiliki momen lentur positif dan momen lentur negatif. Ketika balok yang dibebani menghasilkan momen positif, tegangan tekan dihasilkan di bagian atas lamina sementara tegangan tarik dihasilkan di bagian bawah lamina. Tegangan lentur dihasilkan dari momen lentur eksternal. Tegangan ini mempengaruhi ukuran penampang balok. Proses desain, yang mencakup spesifikasi dan analisis bagian, biasanya dimulai dengan persyaratan kurva. Kemudian faktor lain seperti geser, lentur, retak dan panjang penyaluran tulangan hingga memenuhi persyaratan. (Nawy, 1990)

Rumus - rumus yang digunakan adalah sebagai berikut :

$$C = 0,85 \cdot f'c \cdot a \cdot b \dots\dots\dots (7)$$

$$Ts = As \cdot fys$$

$$C = T$$

$$0,85 \cdot f'c \cdot a \cdot b = As \cdot fys \dots\dots\dots (8)$$

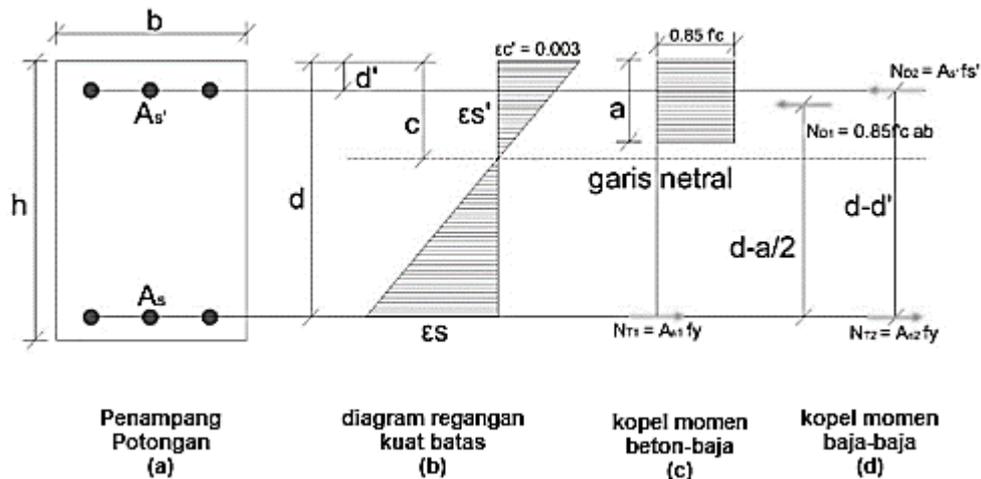
dengan Ts adalah resultan gaya tarik dari baja dan

Bertambahnya resultan gaya tarik pasti berpengaruh terhadap kekuatan lentur dari beton tersebut.

2.7.2. Kapasitas Lentur Balok Beton Tulangan Rangkap

Pada prinsipnya, balok beton bertulang dilihat dari dua perspektif yang berbeda dalam hal gaya tahanan. Kekuatan yang dimaksud disini adalah kuat tekan beton N_D dan kuat tekan, kuat tekan total dibagi menjadi dua bagian yaitu kuat tekan yang diserap beton N_{D1} dan kuat tekan yang diserap tulangan tekan N_{D2} . Untuk menganalisis modulus penampang dalam balok, dipertimbangkan dua sambungan

momen dalam, yaitu sepasang beton bertulang dengan tulangan tarik dan sepasang tulangan baja tekan ditambah tulangan tarik, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 8**. Gaya momen total suatu balok bertulang ganda adalah jumlah dari kedua kopel momen dalam.



Gambar 8 Penampang Balok Tulangan Rangkap

Kuat momen dari pasangan kopel tulangan tekan dan tarik tambahan dapat dihitung dengan persamaan:

$$M_{n2} = N_{T2} \cdot Z_2 \dots\dots\dots (9)$$

Dengan asumsi bahwa tulangan tarik telah luluh terlebih dahulu maka dianggap $f_s = f_y$ sehingga persamaan 3 menjadi:

$$M_{n2} = A_{S2} \cdot f_y \cdot (d - d') \dots\dots\dots (10)$$

Keseimbangan gaya-gaya: $\Sigma (H) = 0$, sehingga $N_{D2} = N_{T2}$, maka:

$$A_{S'} \cdot f_s' = A_{S2} \cdot f_y \dots\dots\dots (11)$$

Dengan asumsi bahwa tulangan tekan telah Iuluh terlebih dahulu maka $f_s' = f_y$ sehingga persamaan 4 menjadi:

$$A_{S'} \cdot f_y = A_{S2} \cdot f_y \dots\dots\dots (12)$$

Dimana: $A_{S'} = A_{S2}$

Maka setelah disubstitusikan dapat ditulis sebagai berikut:

$$M_{n2} = A_{S'} \cdot f_y \cdot (d - d') \dots\dots\dots (13)$$

Sementara untuk menentukan kuat momen dari pasangan kopel gaya beton tekan dan tulangan tarik dihitung sebagai berikut:

$$M_{n1} = N_{T1} \cdot Z_1 \dots\dots\dots (14)$$

Dengan asumsi bahwa tulangan tarik telah Ieleh terlebih dahulu maka

dianggap $f_s = f_y$ sehingga menjadi:

$$M_{n1} = A_{S1} \cdot f_s (d - 0.5a) \dots\dots\dots (15)$$

Karena: $A_S = A_{S1} + A_{S2}$, maka $A_{S1} = A_S - A_{S2}$ dan $A_{S2} = A_{S'}$,
maka $A_{S1} = A_S - A_{S'}$

Setelah disubstitusikan maka persamaan dapat ditulis sebagai berikut:

$$M_{n1} = (A_S - A_{S'}) \cdot f_y (d - 0.5a) \dots\dots\dots (16)$$

Dengan menjumlahkan kedua momen kopel tersebut akan diperoleh kuat momen ideal balok beton bertulang rangkap sebagai berikut:

$$M_n = M_{n1} + M_{n2} = (A_S - A_{S'}) f_y (d - 0.5a) + A_{S'} f_y (d - d') \dots\dots\dots (17)$$

Momen tahanan M_u diperoleh dengan mengalikan faktor reduksi kekuatan terhadap momen nominal M_n sehingga dapat ditulis sebagai berikut:

$$M_u = \phi M_n \dots\dots\dots (18)$$

Asumsi ini mengacu pada asumsi dasar bahwa baik tulangan tarik meleleh sebelum atau sekurang-kurangnya ketika tegangan beton mencapai 0,003. Keadaan ini dapat dianalisa, tetapi tergantung pada posisi garis netral bagian balok beton bertulang. Posisi garis netral dapat ditentukan dengan terlebih dahulu menghitung tegangan pada daerah tekan beton.

$$N_T = N_{D1} + N_{D2}$$

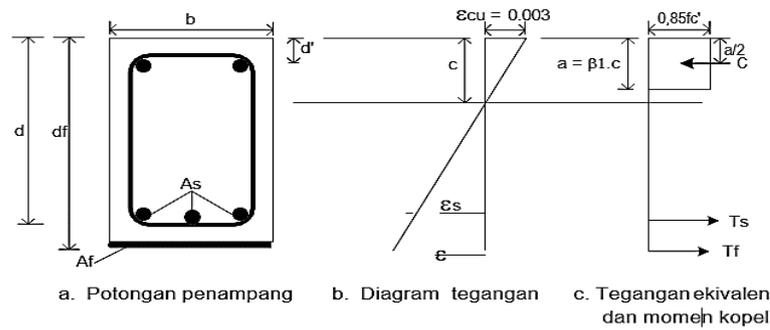
$$A_S f_y = (0.85 f'_c) \cdot a b + A_{S'} f_{s'}$$

$$a = \frac{(A_S - A_{S'}) f_y}{(0.85 f'_c) b} \text{ atau } a = \frac{A_{S1} - f_v}{(0.85 f'_c) b} \dots\dots\dots (19)$$

Setelah tinggi tegangan beton tekan diperoleh (a), maka letak garis netral juga dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan $a = \beta_1 \cdot c$.

2.8. Perilaku Kapasitas Lentur Balok Bertulang Perkuatan FRP

Perhitungan desain kuat lentur balok FRP mengacu pada standar ACI 440.2R-08. Tahapan perhitungan tersebut disajikan dalam rumus- rumus berikut, yang mengacu pada **Gambar 9**.



Gambar 9 Blok tegangan balok FRP

Dalam mendesain kekuatan lentur diperlukan faktor reduksi terhadap momen yang terjadi.

$$\phi M_n \geq M_u \dots\dots\dots (20)$$

Di mana :

- ϕ = faktor reduksi
- M_n = momen nominal (Nmm)
- M_u = momen ultimit (Nmm)

Untuk melindungi kemampuan lekatan FRP diberikan persamaan untuk menghitung koefisien lekatan yaitu:

$$k_m = \frac{1}{60\epsilon_{fu}} \left(1 - \frac{nE_f t_f}{360000} \right) \leq 0.9 \text{ untuk } nE_f t_f \leq 180000 \dots\dots\dots (21)$$

Di mana:

- k_m = koefisien lekatan FRP
- ϵ_{fu} = regangan ultimit FRP
- n = jumlah lapis FRP
- E_f = elastisitas FRP (Mpa)
- t_f = tebal FRP (mm)

Dengan memberikan asumsi bahwa nilai regangan maksimum pada beton sebesar 0,003, maka regangan yang terjadi pada FRP dapat dihitung dengan persamaan (22).

$$\epsilon_{fe} = \epsilon_{cu} \left(\frac{h-c}{c} \right) - \epsilon_{bi} \leq k_m \epsilon_{fu} \dots\dots\dots (22)$$

Di mana:

- ϵ_{fe} = regangan yang terjadi pada FRP
- ϵ_{fu} = regangan ultimit beton

- h = tinggi balok
 c = tinggi blok tegangan ekivalen
 ϵ_{bi} = regangan beton

Nilai tegangan pada FRP dapat dihitung dengan persamaan (23)

$$f_{fe} = E_{fe} \epsilon_{fe} \dots\dots\dots (23)$$

Di mana:

- f_{fe} = tegangan yang terjadi pada FRP

Daktilitas adalah perbandingan antara regangan maksimum dan regangan leleh baja tulangan pada balok yang dibebani secara aksial.

$$\mu_{\epsilon} = \frac{\epsilon_u}{\epsilon_v} \dots\dots\dots (24)$$

Daktilitas kelengkungan adalah perbandingan antara sudut kelengkungan maksimum dengan kelengkungan leleh dari suatu elemen struktur akibat momen lentur. Persamaan matematik daktilitas kelengkungan sebagai berikut:

$$\mu_{\phi} = \frac{\phi_u}{\phi_v} \dots\dots\dots (25)$$

Nilai tegangan dan regangan pada tulangan dapat dihitung setelah diketahui nilai regangan dan tegangan pada tulangan dan FRP. Posisi garis netral dapat diperkirakan berdasarkan gaya dalam yang terjadi dengan menggunakan persamaan (25). Daktilitas perpindahan adalah perbandingan struktur maksimum terhadap perpindahan struktur pada saat leleh persamaan (26).

$$\mu_{\delta} = \frac{\delta_u}{\delta_v} \dots\dots\dots (26)$$

Nilai regangan dan tegangan pada tulangan dan FRP

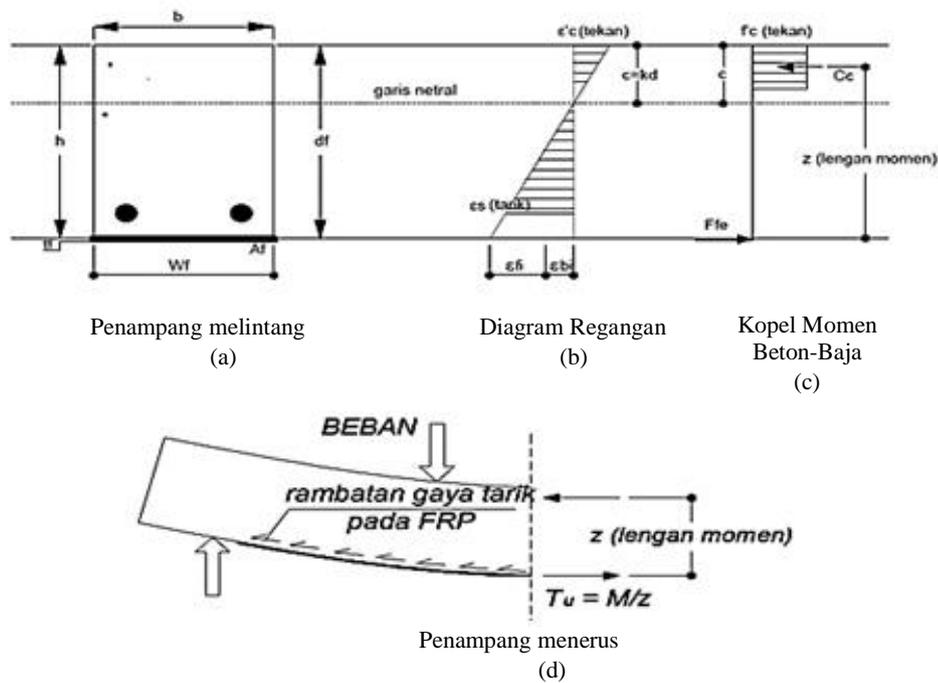
$$\epsilon_s = \epsilon_{fe} + \epsilon_{bi} \left(\frac{d-c}{h-c} \right) \dots\dots\dots (27)$$

$$f_s = E_s \epsilon_s \leq f_y \dots\dots\dots (28)$$

$$c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\gamma f_c \beta_1 b} \dots\dots\dots (29)$$

Kapasitas momen nominal balok beton bertulang dengan perkuatan lentur menggunakan FRP dapat dihitung menggunakan persamaan (30). ACI 440.2R-08 merekomendasikan nilai faktor reduksi untuk FRP (ψ_f) sebesar 0,85.

$$M_n = A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \psi_f A_f f_{fe} \left(h - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \dots\dots\dots (30)$$



Gambar 10 Model analisis regangan FRP

Gambar 10 menunjukkan model analisis regangan FRP yang digunakan. Model analisis ini dapat digunakan sebagai referensi dalam desain balok perkuatan FRP. Sebelumnya telah diuraikan persamaan-persamaan yang digunakan dalam mendesain balok dengan perkuatan FRP, namun tentunya diperlukan suatu analisis terhadap hasil olahan data eksperimen sebagai kondisi nyata dari pengujian yang dilakukan.

Persamaan-persamaan di atas dimulai dari persamaan (27) hingga persamaan (29) hanya digunakan dalam mendesain benda uji sebelum melakukan pengujian eksperimen yang sebenarnya. Selanjutnya setelah melakukan pengujian eksperimen maka data hasil eksperimen ini akan digunakan dalam persamaan-persamaan berikut untuk menghitung nilai kapasitas rekatan yang terjadi.

Untuk menghitung kapasitas beban komposit FRP, nilai z dari lengan momen harus dihitung terlebih dahulu. Nilai torsi ini dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (31). Namun nilai c pada persamaan (32) tidak diketahui, sehingga nilai c ini harus dihitung terlebih dahulu.

Untuk mendapatkan nilai C pada Persamaan (31) digunakan Persamaan (32), dengan menggunakan nilai elongasi hasil pengujian pada persamaan ini. Nilai regangan yang digunakan merupakan hasil eksperimen yang diperoleh untuk

menghitung kapasitas ikatan akhir menurut keadaan tegangan ultimit beton dan regangan ultimit FRP.

$$z = (h - \frac{1}{2}c) \dots\dots\dots (31)$$

$$c = \frac{\epsilon_c h}{(\epsilon_f + \epsilon_c)} \dots\dots\dots (32)$$

Di mana:

- z = lengan momen
- h = tinggi balok
- c = tinggi blok tegangan ekuivalen
- ϵ = regangan beton
- f = regangan FRP

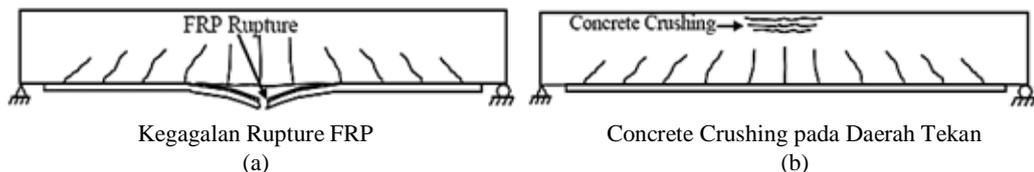
Kapasitas ikatan, T_u dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (33). Nilai T_u sendiri diperoleh menurut prinsip keseimbangan gaya dengan membagi nilai momen putus M_u dengan lengan momen z . Dengan demikian, nilai kapasitas rekatan GFRP-S dapat diperoleh dengan menggunakan data pengujian yang dilakukan.

$$T_u = \frac{M_u}{(h - 0.5c)} \dots\dots\dots (33)$$

2.9. Model Kegagalan

Beberapa mode kegagalan yang umumnya terjadi pada balok yang diperkuat dengan lapisan FRP antara lain:

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

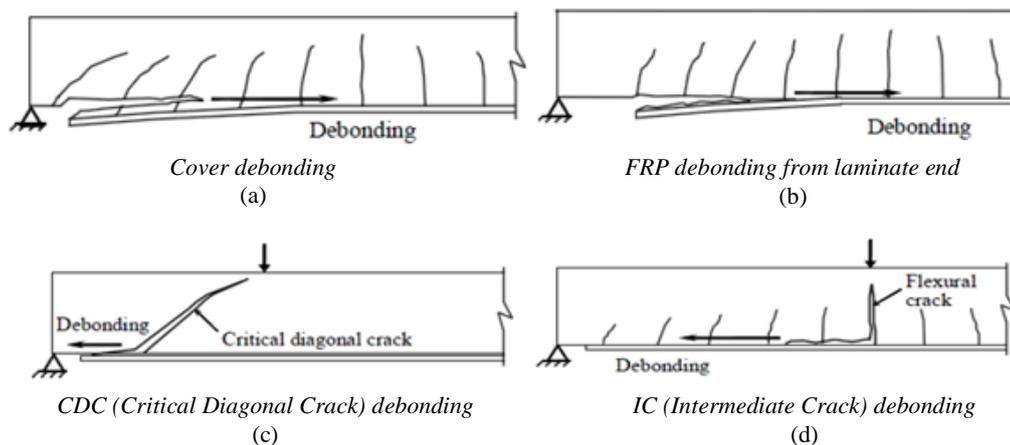


Gambar 11 Putusnya FRP dan hancurnya beton pada sisi tekan

Gambar 11 memperlihatkan keadaan keruntuhan berturut-turut sebagai keruntuhan lapisan FRP, yang terjadi setelah tulangan meledak dan beton telah

mengalami keruntuhan pada sisi tekannya. Penghancuran beton pada sisi tekanan terjadi sebelum tulangan tarik meleleh, sehingga keadaan ini identik disebut *over-reinforced*.

Selain itu, ada juga keadaan di mana tulangan tarik telah meleleh, tetapi beton di sisi tekan hancur tanpa FRP putus. Mode kegagalan berikutnya adalah mode kegagalan *debonding* atau delaminasi. Mode kegagalan *debonding* merupakan mode kegagalan yang paling umum diamati pada balok bertulang yang diperkuat dengan lapisan FRP. *Debonding* adalah pemutusan ikatan antara beton dan FRP. Mode kegagalan ini dapat dibagi menjadi empat jenis yaitu lepasnya selimut beton pada ujung lapisan FRP (*cover debonding*), lepasnya lapisan FRP tanpa ikut terlepasnya beton (*FRP debonding from laminate end*), lepasnya FRP akibat retak geser-lentur (*FRP debonding from flexure-shear crack*), dan lepasnya FRP akibat retak lentur murni (*FRP debonding from flexural crack*), yang dapat dilihat pada **Gambar 12**.



Gambar 12 Ragam Pelepasan Ikatan antara FRP dan Beton

Delaminasi antara FRP dan permukaan beton merupakan masalah utama dalam penggunaan bahan FRP dalam hubungannya dengan perbaikan dan perkuatan struktur. Area lekatan dalam hal ini area antara FRP dan beton, biasanya merupakan titik terlemah dimana banyak terjadi delaminasi. Hal ini disebabkan konsentrasi tegangan yang tinggi di zona transisi gaya dari beton ke FRP. Titik kritis terjadi delaminasi berada di ujung lapisan FRP dan di sekitar retakan geser dan/atau lentur.

Hal ini disebabkan akibat adanya konsentrasi tegangan yang tinggi pada daerah retakan saat terjadi perpindahan gaya dari beton ke FRP. Titik terjadinya pelepasan lapisan FRP terjadi pada ujung lapisan FRP serta area sekitar titik retakan.

Gambar 12 (a) menunjukkan kegagalan *cover debonding*. Fenomena ini disebabkan oleh penjalaran retakan yang terjadi pada tarik balok beton. Mode kegagalan ini diawali dari timbulnya retakan di ujung lembaran FRP yang kemudian semakin meluas, membentuk pola retakan yang sejajar dengan arah tulangan longitudinalnya, yang pada akhirnya mengakibatkan pelepasan selimut beton.

Pada **Gambar 12 (b)** ditunjukkan kegagalan delaminasi akibat pelepasan lapisan FRP tanpa adanya pelepasan selimut beton. Pada fenomena *FRP debonding from laminate end*, kegagalan diawali peningkatan tegangan permukaan pada ujung lapisan FRP. Kegagalan ini dapat diakibatkan karena bahan perekat yang kurang baik, lebar pemasangan lapisan FRP yang lebih kecil daripada lebar permukaan balok dan/atau proses pengerjaan yang kurang sempurna.

Gambar 12 (c) menunjukkan kegagalan delaminasi yang disebabkan oleh retak lentur dan geser. Pelepasan FRP ini juga disebut sebagai pelepasan CDC (*Critical Diagonal Crack Debonding*). Jenis kegagalan CDC ini terjadi pada balok dimana lapisan FRP terletak di zona momen geser tinggi tetapi rendah, seperti di titik dekat tumpuan balok. Tulangan geser yang ada pada titik ini kurang mampu menyerap gaya geser yang terjadi, sehingga terjadi retak geser-lentur yang besar dimana pola kegagalan geser yang terjadi lebih dominan daripada pola kegagalan lentur. Hal ini diindikasikan dengan retakan yang terjadi membentuk sudut mendekati 45° . Seiring bertambahnya lebar retak, tegangan permukaan yang semakin besar terjadi antara beton dan lapisan FRP menjalar ke salah satu ujung lapisan FRP.

Pada balok dengan tulangan geser yang cukup, retak geser lentur hanya berupa retak kecil dan retak pendek dalam jumlah besar tanpa dominasi retak geser lentur besar. Salah satu tindakan untuk mencegah kegagalan tersebut adalah dengan menambahkan sabuk FRP pada area geser yang besar untuk memastikan bahwa kuat geser balok lebih besar daripada kuat lenturnya.

Gambar 12 (d) menunjukkan kegagalan debonding FRP akibat retak lentur. Fenomena ini bermula ketika terjadi retak lentur pada beton, dimana konsentrasi tegangan muncul pada titik retakan. Konsentrasi tegangan berada di tengah bentang di zona momen maksimum. Tegangan tarik yang terjadi terkonsentrasi pada sisi tengah dan tidak menyebar ke ujung lapisan FRP. Tegangan tarik kemudian ditransmisikan atau dipindahkan ke lapisan FRP, sehingga tegangan permukaan lokal antara lapisan FRP dan beton meningkat dan terkonsentrasi di dalam dan sekitar daerah retak.

Setelah tegangan tersebut mencapai titik kritisnya, tegangan tersebut mulai menyebar ke ujung FRP dan menyebabkan ikatan antara FRP dengan beton berkurang hingga terjadi delaminasi. Lepasnya lapisan FRP ini kemudian mulai menyebar dari bagian tengah hingga ujung lapisan FRP, yang akhirnya mengakibatkan lepasnya sebagian lapisan FRP pada sisi bentang balok. Peristiwa debonding seperti itu sering disebut sebagai *FRP debonding from flexural crack* atau juga dapat disebut *IC (intermediate crack) debonding*.