

TUGAS AKHIR

**PERILAKU LENTUR BALOK BETON BERTULANG DENGAN
PERKUATAN *HYBRID* GFRP-CFRP DAN *U-WRAP***

***FLEXURAL BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE
BEAMS STRENGTHENING WITH HYBRID GFRP-CFRP AND
U-WRAP***

**ANDI FITRI RAMADHANI
D011 18 1036**



**PROGRAM SARJANA DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
2022**

LEMBAR PENGESAHAN (TUGAS AKHIR)

**PERILAKU LENTUR BALOK BETON BERTULANG DENGAN PERKUATAN
HYBRID GFRP-CFRP DAN U-WRAP**

Disusun dan diajukan oleh:

ANDI FITRI RAMADHANI

D011 18 1036

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 18 Agustus 2022 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

menyetujui,

Pembimbing I,

Pembimbing II,

Prof. Dr. Eng. Rudy Djamaluddin, ST, M.Eng
NIP: 197011081994121001

Dr. Eng. Fakhruddin, ST, M.Eng
NIP: 198702282019031005

Ketua Program Studi,



Prof. Dr. H. M. Wihardi Tjaronge, ST, M.Eng
NIP: 196805292002121002

PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH

Yang bertanda tangan di bawah ini, nama Andi Fitri Ramadhani, dengan ini menyatakan bahwa skripsi yang berjudul "**Perilaku Lentur Balok Beton Bertulang dengan Perkuatan *Hybrid* GFRP-CFRP dan *U-Wrap***", adalah karya ilmiah penulis sendiri, dan belum pernah digunakan untuk mendapatkan gelar apapun dan dimanapun.

Karya ilmiah ini sepenuhnya milik penulis dan semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Gowa, Juli 2022

Yang membuat pernyataan,



Andi Fitri Ramadhani
NIM: D011 18 1036

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kita panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa, atas berkat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul **“Perilaku Lentur Balok Beton Bertulang dengan Perkuatan *Hybrid* GFRP-CFRP dan *U-Wrap*”** yang merupakan salah satu syarat yang diajukan untuk menyelesaikan studi pada Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

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

1. **Bapak Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, S.T., M.T.**, selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
2. **Bapak Prof. Dr. Ir. H. M. Wihardi Tjaronge S.T., M.Eng.**, selaku Ketua Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
3. **Bapak Dr. Eng. Ir. Andi Arwin Amiruddin, S.T., M.T.**, selaku Kepala Laboratorium Struktur dan Bahan Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah memberikan izin atas segala fasilitas yang digunakan.
4. **Bapak Prof. Dr. Ir. Rudy Djamaluddin, S.T., M.Eng.**, selaku dosen pembimbing I yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan dan pengarahan mulai dari awal penelitian hingga selesainya penulisan ini.
5. **Bapak Dr. Eng. Fakhruddin, S.T., M.Eng.**, selaku dosen pembimbing II yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan dan pengarahan mulai dari awal penelitian hingga selesainya penulisan ini.
6. Seluruh dosen Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
7. Seluruh staf dan karyawan Departemen Teknik Sipil, staf dan karyawan Fakultas Teknik serta staf Laboratorium dan asisten Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Yang teristimewa penulis persembahkan kepada:

1. Kedua orang tua yang tercinta, yaitu ayahanda **Andi Khaerul Aksa** dan ibunda **Rohana** atas doa, kasih sayang, dan segala dukungan dan kebaikan selama ini, baik spritiual maupun material, serta seluruh keluarga besar atas sumbangsih dan dorongan yang telah diberikan.
2. Kakak tercinta **Andi Tenri Jemma** atas doa, kasih sayang, segala dukungan dan kebaikan selama ini.
3. **Alvia Mutmainnah, Annisa Nurul Inayah, Nila Febriani, Ummu Kalsum, Miranda S. dan Nurul Sakiah** selaku sahabat yang selalu memberikan semangat dalam penyelesaian tugas akhir ini.
4. **Pak Jasman S.T, M.T, Pak Sultan S.T, M.T** mahasiswa S3, **Kak Joey S.T, Kak Sugira S.T, Yuqni Maulidya, Farhan dan Imran Aiman** selaku rekan TA yang senantiasa yang memberi masukan, semangat dan doa dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
5. Teman seperjuangan **Nadia, Ica, Wana, Yuyun, Ipa, Upe, Yusriah, Asihana, Melani, Fiqih, Radix, Charlie dan Fikri** yang senantiasa banyak memberikan bantuan dan dukungan dalam penyelesaian tugas akhir ini.
6. Rekan-rekan di **Laboratorium Riset Perkuatan Struktur**, yang senantiasa membantu selama proses penelitian serta memberikan semangat dan dorongan dalam penyelesaian tugas akhir ini.
7. Saudara-saudari **TRANSISI 2019**, teman-teman Departemen Teknik Sipil dan Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin **Angkatan 2018** yang senantiasa memberikan warna yang begitu indah, dukungan yang tiada henti, semangat dan dorongan dalam penyelesaian tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa setiap karya buatan manusia tidak akan pernah luput dari kekurangan. Oleh karena itu penulis mengharapkan kepada pembaca kiranya dapat memberi sumbangan pemikiran demi kesempurnaan dan pembaharuan tugas akhir ini.

Akhirnya semoga Tuhan Yang Maha Esa melimpahkan berkat dan karunia-Nya kepada kita dan semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat, khususnya dalam bidang Teknik Sipil.

Gowa, Juli 2022



Andi Fitri Ramadhani

ABSTRAK

Kerusakan yang terjadi pada balok beton bertulang biasanya ditandai dengan munculnya retakan yang apabila tidak segera diatasi dapat menyebabkan keruntuhan struktur. Solusi yang dapat dilakukan adalah dengan melakukan perkuatan dan perbaikan struktur yang bertujuan untuk mengembalikan atau meningkatkan kembali kekuatan elemen struktur agar mampu menahan beban sesuai dengan beban rencana. Pada penelitian ini menggunakan sistem penggabungan dua lapisan FRP yang memiliki karakter berbeda yaitu *Glass Fiber Reinforced Polymer* (GFRP) dan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP). Dengan menggabungkan keduanya diharapkan jika beban yang dipikul berlebihan maka CFRP yang lebih getas akan gagal terlebih dahulu sehingga keruntuhan mendadak dapat dicegah. Karena diharapkannya CFRP gagal terlebih dahulu sehingga perlu dilakukan penyesuaian untuk mengurangi kekuatan tarik CFRP. Metode yang digunakan adalah dengan memperkecil lebar CFRP. Sehingga saat dilakukannya penggabungan diharapkan terjadinya kegagalan *Sequential Failure*. Penggunaan lapisan FRP memiliki kecenderungan kegagalan *debonding* yang terjadi sebelum perkuatan ultimit dari FRP tersebut tercapai, untuk mengantisipasi agar kekuatan tarik ini bisa bekerja secara optimal maka ditambahkan *U-Wrap* pada perkuatan struktur. Fungsi dari *U-Wrap* dalam perkuatan struktur untuk mencegah terjadinya kegagalan *debonding*.

Tahapan penelitian yaitu pengujian lentur balok beton bertulang dengan menggunakan alat *Universal Testing Machine* kapasitas 1500 kN. Pengujian lentur balok menggunakan sampel balok dengan dimensi 150 mm x 200 mm x 3300 mm sebanyak 3 buah yang terdiri dari balok kontrol (BN) dan Balok yang diperkuat lapisan FRP *Hybrid* GFRP-CFRP dan *U-Wrap* (BGC-U) dengan persentase GFRP adalah 100% dan CFRP 40% terhadap lebar balok.

Hasil penelitian menunjukkan penggunaan lapisan FRP *Hybrid* GFRP-CFRP dan *U-Wrap* sebagai perkuatan mampu meningkatkan beban maksimum 54,81%. Balok BGC-U juga memiliki perilaku yang lebih daktail dibandingkan balok kontrol (BN). Dari mode kegagalan, balok BN mengalami kegagalan *under-reinforced* sedangkan balok BGC-U mengalami kegagalan *debonding*.

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH	ii
KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
BAB 1. PENDAHULUAN.....	1
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	4
C. Tujuan Penelitian	4
D. Manfaat Penelitian.....	5
E. Batasan Masalah	5
F. Sistematika Penulisan	6
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	8
A. Penelitian Terdahulu	8
B. Beton Bertulang	11
C. Kapasitas Lentur Balok Bertulang	13
D. Kapasitas Lentur Balok Beton Bertulang Perkuatan FRP	15
E. Mode Kegagalan	18
F. Metode Perbaikan dan Perkuatan	22
G. Karakteristik Meterial.....	25
G.1 <i>Fiber Reinforced Polymer (FRP)</i>	25
G.2 <i>Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)</i>	27
G.3 <i>Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)</i>	28
G.4 <i>Epoxy Resin</i>	29
G.5 <i>Fiber Reinforced Polymer Hybrid (FRP Hybrid)</i>	31
BAB 3. METODE PENELITIAN.....	33
A. Bagan Alir Penelitian	33

B.	Lokasi dan Waktu Penelitian	34
C.	Alat dan Bahan Penelitian	34
	C.1. Alat Ukur Lendutan	34
	C.2. Alat Ukur Regangan Baja Tulangan	35
	C.3. Alat Ukur Regangan Beton	35
	C.4. Alat Ukur Regangan FRP	36
	C.5. Alat Uji Pembebanan	36
	C.6. Alat Pengujian Benda Uji	37
D.	Jenis Penelitian	37
	D.1 Pengujian Karakteristik Mekanis Tulangan	37
	D.2 Pengujian Karakteristik Mekanis Beton	38
	D.3. Pengujian Lentur Balok Beton Bertulang	39
E.	Desain Penelitian	40
	E.1. Teori Komposit	40
	E.2. Desain <i>Hybrid</i>	41
	E.3. Desain Balok Beton Bertulang	42
F.	Tahapan Penelitian	44
Bab 4.	Hasil dan pembahasan	50
A.	Pengujian Tarik Tulangan Baja	50
B.	Pengujian Sifat Mekanis Beton.....	51
C.	Kapasitas Lentur Balok	54
	C.1. Benda Uji BN	54
	C.2. Benda Uji BGC-U	55
	C.3. Perbandingan Analisa dan Eksperimen	57
D.	Perilaku Lentur Balok Beton Bertulang	58
	D.1. Hubungan Beban dan Lendutan	58
	D.2. Hubungan Beban dan Regangan Beton	62
	D.3. Hubungan Beban dan Regangan Baja	66
	D.4. Hubungan Beban dan Regangan FRP	69
E.	Distribusi Regangan FRP	70
F.	Pola Retak.....	71
G.	Mode Kegagalan	74

BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN	79
A. Kesimpulan	79
B. Saran	80
DAFTAR PUSTAKA.....	81

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Perilaku Lentur Pada Beban Ultimit	13
Gambar 2. Blok Tegangan Balok FRP	15
Gambar 3. (a) <i>Cover debonding</i> . (b) <i>FRP debonding from laminate end</i> . CDC (<i>Critical Diagonal Crack</i>) <i>debonding</i> . (d) IC (<i>Intermediate Crack</i>) <i>debonding</i>	19
Gambar 4. Konsep Perbaikan dan Perkuatan Struktur	24
Gambar 5. <i>Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)</i>	27
Gambar 6. <i>Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)</i>	28
Gambar 7. Mikrograf optik laminasi komposit yang gagal di bawah pembebanan lentur.....	32
Gambar 8. Bagan Alir Penelitian	33
Gambar 9. <i>Linear Variable Displacement Transducer (LVDT)</i>	34
Gambar 10. (a) FLA-2-11 (<i>gauge factor</i> $2,12 \pm 1\%$), (b) <i>strain gauge</i> baja, (c) <i>CN Adhesive</i>	35
Gambar 11. (a) PL-60 11 (<i>gauge factor</i> $2,09 \pm 1\%$), (b) <i>strain gauge</i> beton, (c) <i>CN Adhesive</i>	35
Gambar 12. (a) PL-60 11 (<i>gauge factor</i> $2,09 \pm 1\%$), (b) <i>strain gauge</i> beton, (c) <i>CN Adhesive</i>	36
Gambar 13. Alat Uji Pembebanan	36
Gambar 14. Dimensi Benda Uji	38
Gambar 15. Set Up Benda Uji	39
Gambar 16. Desain Teori Komposit	40
Gambar 17. Grafik Teori Hybrid	41
Gambar 18. Daerah I Teori <i>Hybrid</i>	42
Gambar 19. Daerah I Teori <i>Hybrid</i>	42
Gambar 20. Desain Model Pembebanan Balok.....	42
Gambar 21. Desain Benda Uji BN	43
Gambar 22. Desain Benda Uji BGC-U	44
Gambar 23. Pabrikasi Benda Uji Balok	45

Gambar 24. Perawatan Beton	45
Gambar 25. Proses pemasangan Lapisan FRP Hybrid GFRP-CFRP dan <i>U-Wrap</i>	48
Gambar 26. Penempatan <i>Strain Gauge</i> Beton	49
Gambar 27. Set Up Pengujian Benda Uji	49
Gambar 28. Pengujian Kuat Tarik Tulangan Baja	51
Gambar 29. Pengujian Sifat Mekanis Beton	54
Gambar 30. Hubungan Beban – Lendutan Benda Uji BN	58
Gambar 31. Hubungan Beban – Lendutan Benda Uji BGC-U	60
Gambar 32. Hubungan Beban – Lendutan Kedua Variasi Benda Uji	61
Gambar 33. Hubungan Beban – Regangan Beton Benda Uji BN	63
Gambar 34. Hubungan Beban – Regangan Beton Benda Uji BGC-U	64
Gambar 35. Hubungan Beban – Regangan Beton Kedua Variasi Benda Uji	65
Gambar 36. Hubungan Beban – Regangan Baja Benda Uji BN	66
Gambar 37. Hubungan Beban – Regangan Baja Benda Uji BGC-U	67
Gambar 38. Hubungan Beban – Regangan Baja Kedua Benda Uji	68
Gambar 39. Hubungan Beban – Regangan FRP Benda Uji BGC-U	69
Gambar 40. Distribusi Regangan FRP benda uji BGC-U	71
Gambar 41. Pola Retak Benda Uji BN	72
Gambar 42. Pola Retak Benda Uji BGC-U	73
Gambar 43. Mode Kegagalan Benda Uji BN	74
Gambar 44. Pengukuran Lebar Retak Benda Uji BN	75
Gambar 45. Mode Kegagalan Benda Uji BGC-U	76
Gambar 46. Pengukuran Lebar Retak Benda Uji BGC-U	77

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Karakteristik CFRP (<i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i>)	28
Tabel 2. Karakteristik <i>Glass Fiber Reinforced Polymer</i> (GFRP).....	29
Tabel 3. Karakteristik Material <i>Epoxy Resin</i>	30
Tabel 4. Variasi Benda Uji Balok Beton Bertulang	42
Tabel 5. Hasil Uji Kuat Tarik Tulangan Baja	50
Tabel 6. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton	52
Tabel 7. Hasil Pengujian Kuat Tarik Belah Beton	52
Tabel 8. Hasil Pengujian Kuat Lentur Balok	53
Tabel 9. Kapasitas Beban dan Momen Berdasarkan Eksperimen BN	55
Tabel 10. Kapasitas Beban dan Momen Berdasarkan Eksperimen BGC-U	56
Tabel 11. Rekapitulasi Hasil Analisa dan Eksperimen	57
Tabel 12. Hubungan Beban dan Lendutan	62
Tabel 13. Hubungan Beban dan Regangan Beton	66

BAB 1. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Beton telah menjadi material komposit yang paling banyak digunakan dalam industri konstruksi modern seperti pada pembangunan sarana dan prasarana (infrastruktur) yang ada. Beton tersusun dari komposisi utama agregat kasar dan agregat halus, air dan semen Portland atau yang biasa di sebut dengan beton konvensional.

Balok adalah salah satu elemen struktur beton bertulang yang berfungsi untuk menopang tegangan tarik dan tekan yang disebabkan oleh adanya beban lentur yang terjadi pada suatu struktur. Balok sebagai salah satu komponen struktur yang umumnya menggunakan beton bertulang sebagai material penyusunnya, terkadang masih sering terjadi kesalahan dalam desainnya. Hal ini dapat menyebabkan kerusakan struktur secara keseluruhan. Selain kesalahan dalam mendesain, kerusakan pada balok dapat terjadi karena kesalahan saat proses pengerjaan, perawatan awal yang tidak tepat, penggunaan fungsi struktur yang tidak sesuai rencana, ataupun faktor alam.

Kerusakan yang terjadi pada balok beton bertulang biasanya ditandai dengan munculnya retakan yang apabila tidak segera diatasi dapat menyebabkan keruntuhan struktur. Jika hal tersebut terjadi ada dua hal yang dapat dilakukan yaitu membongkar struktur yang lama lalu

menggantinya dengan struktur yang baru, atau dengan melakukan perbaikan dan perkuatan struktur.

Perbaikan dan perkuatan struktur pada umumnya bertujuan untuk mengembalikan atau meningkatkan kekuatan elemen struktur agar mampu menahan beban sesuai dengan beban rencana. Umumnya, struktur perlu diperkuat apabila terjadi perubahan fungsi sehingga perlu adanya tambahan faktor keamanan pada saat perencanaan.

Saat ini telah muncul inovasi perkuatan struktur dalam perencanaan struktur bangunan yang lebih berkualitas untuk keperluan peningkatan kapasitas dalam memikul beban yaitu dengan penambahan lapisan FRP (*Fiber Reinforced Polymer*) seperti serat gelas atau GFRP (*glass fiber reinforced polymer*), serat carbon atau CFRP (*carbon fiber reinforced polymer*) dan serat aramid atau AFRP (*aramyd fiber reinforced polymer*). Material *Fiber Reinforced Polymer* (FRP) merupakan material yang tahan terhadap korosi, mempunyai kekuatan yang tinggi, daktalitas sangat baik, mempunyai tingkat rasio antara kekuatan dan berat yang ringan, tidak mengganggu kondisi operasional pada lokasi pekerjaan dan biaya pemasangan dan pemeliharaan yang murah. Penggunaan sistem FRP yang terpasang secara eksternal merupakan perkuatan yang efektif untuk merehabilitasi dan memperkuat elemen struktur yang telah rusak.

Fiber Reinforced Polymer (FRP) merupakan material yang tahan terhadap korosi dan memiliki kekuatan tarik yang relatif tinggi. Namun di sisi lain FRP memiliki sifat getas sehingga jika suatu struktur mengalami

kegagalan, maka struktur tersebut akan runtuh secara tiba-tiba. Sehingga perlu dibuat suatu solusi yang dapat menjadi faktor keamanan.

Salah satu solusi yang dapat dilakukan adalah dengan menggabungkan dua lapisan FRP yang memiliki karakter berbeda yaitu *Glass Fiber Reinforced Polymer* (GFRP) dan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP). GFRP memiliki sifat yang lebih elastis dibandingkan CFRP. Dengan menggabungkan keduanya diharapkan jika beban yang dipikul berlebihan maka CFRP yang lebih getas akan gagal terlebih dahulu sehingga keruntuhan mendadak dapat dicegah.

CFRP memiliki kekuatan tarik yang lebih baik dari GFRP. Karena diharapkan gagal terlebih dahulu sehingga perlu dilakukan penyesuaian untuk mengurangi kekuatan tarik CFRP. Penyesuaian yang digunakan adalah dengan mengurangi lebar CFRP. Pada pengurangan ini, diharapkan CFRP akan gagal sebelum GFRP maka beban yang dipikul akan tertransfer ke GFRP. Sehingga saat dilakukannya penggabungan antara GFRP dan CFRP diharapkan terjadinya kegagalan berurut (*Sequential Failure*). Dimana jika kegagalan berurut ini terjadi regangan pada balok akan bertambah sehingga kapasitas lentur dari balok akan mengalami peningkatan.

Permasalahan selanjutnya penggunaan lapisan FRP dalam perkuatan struktur memiliki kecenderungan kegagalan debonding yang terjadi sebelum perkuatan ultimit dari FRP tersebut tercapai, dalam kondisi ini lapisan FRP masih memiliki kekuatan tarik yang masih sangat tinggi,

sehingga terjadi debonding pada saat kekuatan tarik masih dalam keadaan rendah, untuk mengantisipasi agar kekuatan tarik ini bisa bekerja secara optimal maka ditambahkan *U-Wrap* pada perkuatan struktur. Fungsi dari *U-Wrap* dalam perkuatan struktur untuk mencegah terjadinya kegagalan *debonding*.

Berdasarkan latar belakang di atas, maka penting dilakukan penelitian eksperimental yaitu **“PERILAKU LENTUR BALOK BETON BERTULANG DENGAN PERKUATAN *HYBRID* GFRP-CFRP DAN *U-WRAP*”**.

B. Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian pada latar belakang, maka dapat dibuat rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana perilaku lentur balok beton bertulang dengan perkuatan FRP *Hybrid* GFRP-CFRP dan *U-Wrap*.
2. Bagaimana pola retak balok beton bertulang yang telah diperkuat dengan lapisan FRP *Hybrid* GFRP-CFRP dan *U-Wrap*.

C. Tujuan Penelitian

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

1. Menganalisis kapasitas lentur balok beton bertulang dengan perkuatan lapisan FRP *Hybrid* GFRP-CFRP dan *U-Wrap*.

2. Menganalisis pola retak balok beton bertulang yang telah diperkuat dengan lapisan FRP Hybrid GFRP-CFRP dan *U-Wrap*.

D. Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat dalam perkuatan elemen struktur dengan mendapatkan metode yang digunakan untuk menghasilkan perilaku balok yang lebih daktail

E. Batasan Masalah

Dalam melakukan penelitian tentunya terdapat beberapa hal penting yang menjadi fokus utama. Fokus utama penelitian dapat diperoleh secara lebih tersistematis dan tidak meluas dengan cara memberikan batasan masalah terhadap hal-hal yang perlu ditinjau dalam melakukan penelitian. Batasan-batasan masalah dalam penelitian ini antara lain:

1. Benda uji yang digunakan adalah balok beton bertulang dengan dimensi 150 mm x 200 mm x 3300 mm sebanyak sembilan sampel. Desain balok mengacu pada standar ASTM-C293-68, ACI-440-IR-06 dan ACI-440-2R-08.
2. Mutu beton yang digunakan dalam penelitian ini adalah mutu beton normal f'_c 20 MPa.
3. Perkuatan lentur menggunakan lembaran FRP *Hybrid GFRP* (*Glass Fiber Reinforced Polymer*) dan CFRP (*Carbon Fiber*

Reinforced Polymer) yang didesain sesuai dengan standar ASTM D-3039.

4. Pengujian yang dilakukan berupa pengujian lentur dengan beban statik.

F. Sistematika Penulisan

Agar lebih terarah, sistematika penulisan yang dilakukan sesuai tahapan-tahapan yang dipersyaratkan sehingga Tugas Akhir yang dihasilkan lebih sistematis. Sistematika penulisan penelitian ini dapat diurutkan yaitu:

BAB I PENDAHULUAN

Pokok-Pokok bahasan dalam BAB ini adalah latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Dalam bab ini diuraikan secara sistematis tentang teori, pemikiran, dan hasil penelitian terdahulu yang memiliki hubungan dengan penelitian ini. Bab ini memberikan kerangka dasar mengenai konsep dan teori yang akan digunakan untuk pemecahan masalah.

BAB III METODE PENELITIAN

Dalam bab ini, dijelaskan metode yang digunakan dalam penelitian, langkah-langkah yang dituangkan dalam bentuk

bagan alir penelitian, lokasi dan waktu penelitian, data penelitian berupa jenis dan sumber data serta analisis yang digunakan dalam mengolah data yang didapatkan dari laboratorium.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam bab ini, disusun hasil-hasil pengujian lentur balok.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Merupakan bab yang menyimpulkan hasil dari analisis penelitian dan memberikan saran-saran dan rekomendasi penelitian.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

A. Penelitian Terdahulu

Penelitian sebelumnya dilakukan oleh Selejdak (2017) mengenai Analisa Balok Lentur yang diperkuat dengan FRP sebagai bahan penguat utama dengan asumsi beban bekerja searah serat. Penelitian dilakukan untuk mengetahui jenis material perkuatan yang paling efektif dari berbagai jenis FRP. Adapun FRP yang digunakan yaitu GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*), CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*), AFRP (*Aramyd Fiber Reinforced Polymer*). Dari penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwa kekuatan lentur tertinggi dihasilkan oleh balok yang diperkuat dengan CFRP, dan Kekuatan lentur terendah dihasilkan balok yang diperkuat dengan GFRP. Balok dengan CFRP memiliki kekuatan tarik tertinggi dan modulus elastisitasnya relatif tinggi. Balok yang diperkuat dengan AFRP dan GFRP menerima momen yang hampir sama, meski ada perbedaan kekuatan tarik.

Penelitian yang dilakukan oleh Patrico G. (2014) mengenai perbandingan kekuatan lentur balok beton bertulang dengan menggunakan perkuatan CFRP dan GFRP. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh CFRP terhadap perilaku lentur balok beton bertulang, mengetahui pengaruh GFRP terhadap perilaku lentur baok bertulang, dan mengetahui perbandingan perkuatan balok dengan menggunakan CFRP dan GFRP. Berdasarkan hasil penelitian ini

didapatkan kesimpulan bahwa CFRP dan GFRP berpengaruh terhadap kuat lentur balok. Beban maksimal yang bisa ditahan oleh perkuatan CFRP maupun GFRP lebih besar daripada beban maksimal yang ditahan balok kontrol. CFRP lebih baik dalam menambah kekuatan lentur balok daripada GFRP. Pertambahan besar beban yang bisa ditahan balok yang diperkuat dengan CFRP dari balok kontrol lebih besar dari pertambahan beban balok yang diperkuat dengan GFRP dari balok control. Hal ini dikarenakan mutu dan bahan dasar CFRP yang lebih baik dalam menahan beban daripada mutu dan bahan dasar GFRP. Selain itu, inersia penampang balok yang diperkuat CFRP lebih kecil daripada inersia dari balok yang diperkuat GFRP.

Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Rudy Djamaluddin dan Shinichi Hino (2011), mengenai kapasitas lentur perkuatan balok beton bertulang yang telah meleleh dengan menggunakan lembaran GFRP. Berdasarkan hasil penelitian ini didapatkan kesimpulan bahwa:

1. Kekakuan balok yang diperkuat dengan lembaran GFRP tidak terlalu dipengaruhi oleh kondisi awal dimana tulangan baja meleleh dan adanya retakan akibat pembebanan awal sebelum perkuatan. Hubungan beban-lendutan balok yang diperkuat memperlihatkan perilaku cukup baik walaupun memiliki karakteristik yang lebih getas dibanding balok beton bertulang biasa.
2. Perkuatan menggunakan lembaran GFRP pada balok beton bertulang yang telah mengalami leleh tulangan memiliki beban ultimit

yang lebih tinggi dari balok beton bertulang biasa. Namun jika dibandingkan dengan beban ultimit teoritis, beban ultimit hasil pengujian masih lebih rendah.

3. Pengaruh melelehnya tulangan dan adanya retakan pada saat perkuatan dengan lembaran GFRP memberi pengaruh pada turunnya beban ultimit balok dibandingkan dengan estimasi beban ultimit dengan menggunakan teori balok beton bertulang. Sehingga perlu dilakukan studi lebih lanjut terkait pengaruh leleh tulangan dan keberadaan retak terhadap kapasitas lentur balok beton bertulang yang diperkuat dengan lembaran GFRP.
4. Penurunan beban ultimit dibandingkan dengan estimasi teoritis juga dipicu oleh terjadinya kehilangan retakan lebih awal antara GFRP dengan beton terjadi sebelum beton mencapai tegangan hancurnya.
5. Pola retak pada balok yang diperkuat dengan lembaran GFRP menggambarkan mekanisme lentur balok beton bertulang yang berperilaku seperti asumsi beton bertulang dengan rekatan penuh.
6. Rekatan antara lembaran GFRP dengan permukaan beton merupakan faktor penentu beban ultimit balok. Terlepasnya rekatan menyebabkan penampang kehilangan kapasitas momennya lebih awal sebelum beton mencaai tegangan hancurnya.

Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Ary Subagia (2015) mengenai sifat mekanis hybrid komposit epoxy dengan penguat serat CFRP dan BFRP. Berdasarkan hasil, dapat disimpulkan bahwa hibridisasi

serat basalt dapat signifikan mempengaruhi dan meningkatkan durabiliti CFRP, dan menurunkan nilai produksi karena serat basalt murah serta ramah lingkungan. Karakteristik patahan akibat pengaruh pembebanan tarik banyak terjadi delaminasi antara epoxy dan serat. Ditinjau dari nilai ekonomis hybridisasi cukup signifikan menurunkan biaya produksi dibanding dengan komposit.

B. Beton Bertulang

Beton adalah suatu campuran yang terdiri dari pasir, kerikil, batu pecah, atau agregat-agregat lain yang dicampur menjadi satu dengan suatu pasta yang terbuat dari semen dan air membentuk suatu massa mirip-batuan. Satu atau lebih bahan *additive* ditambahkan untuk menghasilkan beton dengan karakteristik tertentu seperti kemudahan pengerjaan (*workability*), durabilitas, dan waktu pengerasan.

Beton bertulang adalah beton yang direncanakan dengan asumsi bahwa baja dan beton bekerja sama dalam menahan gaya yang bekerja dimana tulangan baja menahan gaya tarik dan beton hanya menerima gaya tekan. Balok beton bertulang akan mengalami lentur pada saat beban bekerja. Lentur pada balok adalah akibat regangan deformasi yang disebabkan oleh beban eksternal. Pada saat beban ditingkatkan, balok tersebut menahan regangan dan defleksi tambahan, mengakibatkan retak-retak lentur sepanjang bentang dari balok tersebut. Beton bertulang memiliki kuat tekan yang relatif lebih tinggi dibandingkan dengan

kebanyakan bahan yang lain dan mempunyai ketahanan yang tinggi terhadap api dan air, bahkan merupakan bahan struktur terbaik untuk bangunan yang banyak bersentuhan dengan air.

a. Kuat Tekan

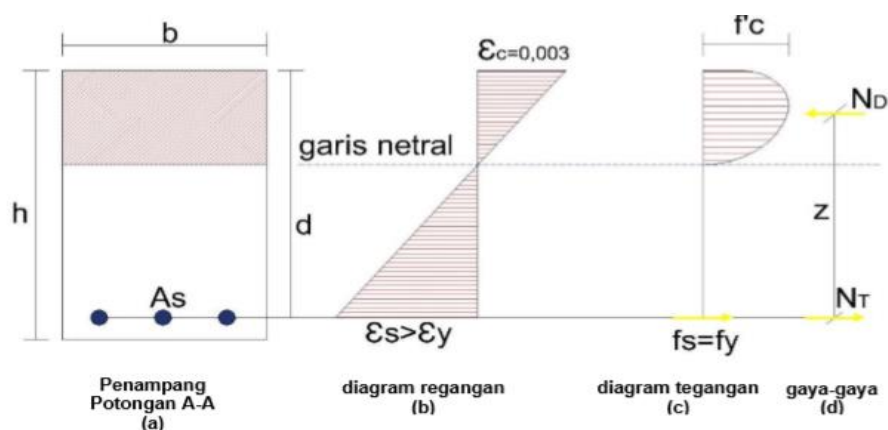
Kuat tekan beton tergantung pada tipe campuran, waktu dan kualitas perawatan. Kekuatan tekan diperoleh berdasarkan hasil uji tekan laboratorium terhadap benda uji baik silinder ataupun kubus pada saat umur beton 28 hari. Mengenai frekuensi pengetesan dianggap memuaskan jika: (1) rata-rata semua set dari 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. (Duhri, 2013)

b. Kuat Tarik

Kuat 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 kekuatan tarik beton relative rendah maka dalam perencanaan kekuatan tarik beton bisa diabaikan. Metode yang sering yang digunakan untuk memperoleh kekuatan tekan adalah pengujian tarik. Untuk anggota-anggota elemen stuktur yang dikenai lentur, harga modulus hancur (*modulus of rupture*) f_r dipergunakan dalam desain lebih tinggi dari pada kekuatan pembelahan tarik.

C. Kapasitas Lentur Balok Bertulang

Kuat lentur balok beton terjadi karena berlangsungnya mekanisme tegangan-regangan yang timbul di dalam balok, pada keadaan tertentu dapat diwakili oleh gaya-gaya dalam. Kuat lentur balok dikenal sebagai modulus runtuh (*modulus of rupture*). Pada suatu kondisi tertentu balok dapat menahan beban yang terjadi hingga regangan tekan lentur beton maksimum $(\epsilon'_c)_{maks}$ mencapai 0.003 sedangkan regangan tarik tulangan mencapai regangan leleh. Jika hal itu terjadi, maka nilai $\epsilon_u = \epsilon_y$ dan penampang disamakan mencapai keseimbangan regangan (penampang bertulangan seimbang). Berdasarkan pada asumsi tersebut dapat dilakukan pengujian regangan, tegangan, dan gaya-gaya yang timbul pada penampang balok yang bekerja menahan momen batas (M_u), yaitu momen yang timbul akibat beban luar yang bekerja pada saat terjadi kehancuran.



Gambar 1. Perilaku Lentur Pada Beban Ultimit

Resultan Gaya tekan dalam dan resultan gaya tarik dalam arah garis kerjanya sejajar sama besar namun berlawanan arah dengan jarak z

hingga membentuk kopel momen tahanan dalam, dimana nilai maksimumnya disebut sebagai kuat lentur. (Istimawan, 1996)

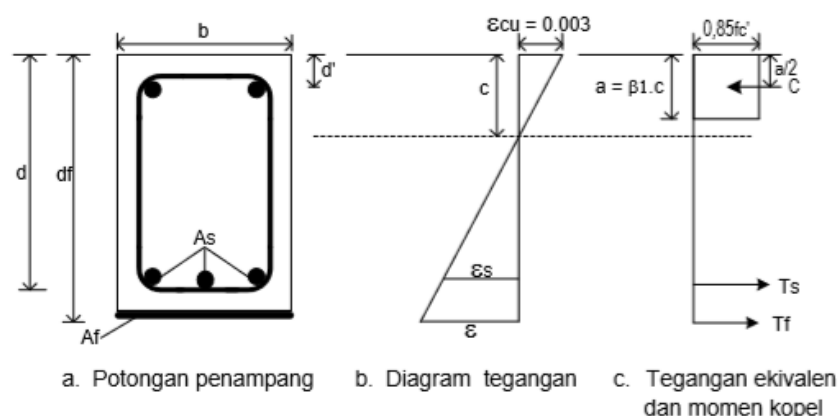
Kurva tegangan di atas garis netral penampang balok atau pada daerah tekan balok akan berbentuk seperti **Gambar 1** dimana distribusi tegangan berupa garis lengkung dengan nilai nol pada garis netral. **Gambar 1** menunjukkan model distribusi tegangan regangan yang timbul pada saat kondisi pembebanan mendekati beban ultimit. N_D merupakan resultan gaya tekan dalam dan merupakan resultan gaya tekan pada daerah yang berada diatas garis netral. Sedangkan N_T merupakan resultan gaya tarik dalam dan merupakan seluruh gaya tarik yang direncanakan untuk daerah yang berada di bawah garis netral.

Momen tahanan dalam tersebut akan memikul momen lentur secara aktual yang diakibatkan oleh beban luar. Untuk tujuan perencanaan, balok yang dibebani harus disusun sesuai dengan komposisi dimensi balok beton dan umlah luasan tulangan yang dapat menahan momen akibat beban luar. Yang pertama harus terlebih dahulu mengetahui resultan total gaya beton tekan N_D dan letak garis kerja dihitung terhadap serat tepi tekan terluar, sehingga jarak z dapat dihitung. Nilai N_D dan N_T dihitung dengan menyederhanakan bentuk distribusi tegangan lengkung diubah dengan bentuk ekuivalen yang lebih sederhana dengan memanfaatkan nilai intensitas tegangan rata-rata agar nilai dan letak resultan tidak berubah.

Nilai tegangan pada daerah tekan beton akan bersifat linear atau kira-kira sebanding dengan nilai regangannya hingga tingkat pembebanan tertentu. Apabila beban ditambah secara terus-menerus, maka keadaan sebanding tersebut akan lenyap dan muncul retak pada balok. Retak terjadi ketika nilai pembebanan yang diberikan telah melebihi nilai kuat tarik beton sehingga beton mulai mengalami retak rambut. Pada kondisi ini beton tidak dapat meneruskan gaya tarik melintasi daerah retak disebabkan kondisi lebar retak yang menyebabkan terputusnya aliran distribusi tegangan di sepanjang sisi tarik beton.

D. Kapasitas Lentur Balok Beton Bertulang Perkuatan FRP

Perhitungan desain kuat lentur balok FRP mengacu pada standar ACI 440.2R-08. Tahapan perhitungan tersebut disajikan dalam rumus rumus berikut, seperti yang terlihat pada **Gambar 2**.



Gambar 2. Blok Tegangan Balok FRP

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

$$\phi Mn \geq Mu. \dots\dots\dots(1)$$

dimana :

- ϕ = faktor reduksi
- Mn = momen nominal (Nmm)
- Mu = momen ultimit (Nmm)

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

$$k_m = \frac{1}{60\varepsilon_{fu}} \left(1 - \frac{n E_f t_f}{360.000} \right) \leq 0.90 \text{ untuk } n E_f t_f \leq 180.000 \dots\dots\dots(2)$$

dimana :

- 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 (3).

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} \left(\frac{h-c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq k_m \varepsilon_{fu} \dots\dots\dots(3)$$

dimana :

- ε_{fe} = regangan yang terjadi pada FRP

ε_{fu}	= regangan ultimit beton
h	= tinggi balok (mm)
c	= tinggi blok tegangan ekuivalen
ε_{bi}	= regangan beton

Nilai tegangan pada FRP dapat dihitung dengan Persamaan (4)

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe} \dots \dots \dots (4)$$

dimana :

$$f_{fe} \quad = \text{tegangan yang terjadi pada FRP}$$

Dengan menggunakan persamaan Daktilitas regangan adalah perbandingan antara regangan maksimum dan regangan leleh pada balok yang dibebani aksial tekan-tarik.

$$\mu_\varepsilon = \frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_v} \dots \dots \dots (5)$$

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

$$\mu_\varphi = \frac{\varphi_u}{\varphi_v} \dots \dots \dots (6)$$

Nilai regangan dan nilai tegangan pada tulangan dapat dihitung. Setelah diketahui nilai regangan dan tegangan pada tulangan dan FRP, posisi garis netral dapat dicek berdasarkan gaya dalam yang terjadi dengan menggunakan persamaan daktilitas perpindahan adalah

perbandingan struktur maksimum terhadap perpindahan struktur pada saat leleh Persamaan (7).

$$\mu_{\delta} = \frac{\delta u}{\delta v} \dots\dots\dots(7)$$

Nilai regangan dan tegangan pada tulangan dan FRP

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi} \left(\frac{d-c}{h-c} \right) \dots\dots\dots (8)$$

$$f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y \dots\dots\dots(9)$$

$$C = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\gamma f_c \beta_1 b} \dots\dots\dots(10)$$

Kapasitas momen nominal perkuatan lentur dengan menggunakan FRP dapat dihitung dengan Persamaan (11). Untuk perkuatan lentur ACI *committee* 440.2R-08 merekomendasikan nilai faktor reduksi untuk FRP (ψ_f) sebesar 0,85.

$$M_n = A f_{ss} \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \psi_f A_f f_{fe} \left(h - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \dots\dots\dots(11)$$

E. Mode Kegagalan

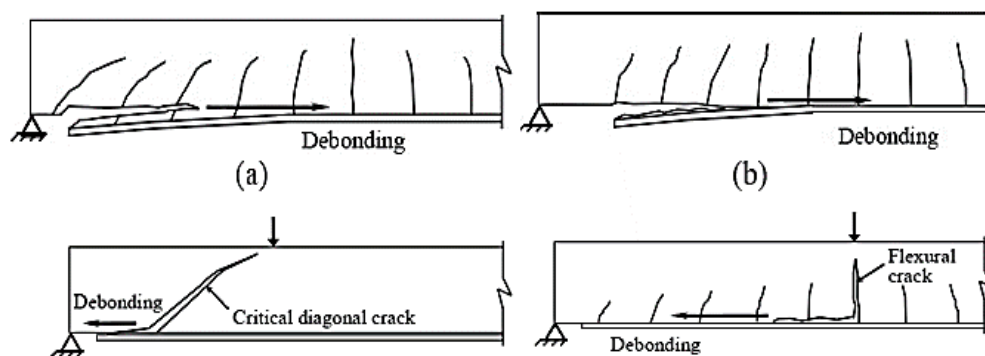
Beberapa mode kegagalan yang sering terjadi pada balok yang diperkuat dengan FRP yaitu:

- 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*).

a. *Debonding FRP*

Perkuatan eksternal dengan menggunakan lembaran FRP merupakan cara dan metode perkuatan yang efektif dan populer yang digunakan untuk konstruksi beton bertulang saat ini. Kinerja FRP ini biasanya ditentukan dan dipengaruhi oleh masalah rekatan antara FRP dengan beton. Hal ini dibuktikan dengan banyaknya dijumpai kasus kegagalan *debonding* pada struktur yang diperkuat dengan FRP.

Masalah *debonding* atau lepasnya ikatan antara FRP dengan beton ini merupakan masalah yang kritis dan sangat penting dari penggunaan material FRP dalam hal perbaikan dan perkuatan struktur. Bidang rekatan, dalam hal ini merupakan bidang antara FRP dengan beton, biasanya merupakan bagian terlemah di mana *debonding* paling sering terjadi.



Gambar 3. (a) *Cover debonding*. (b) *FRP debonding from laminate end*.
 CDC (*Critical Diagonal Crack*) *debonding*. (d) IC (*Intermediate Crack*)
debonding

Hal ini disebabkan adanya konsentrasi tegangan yang tinggi pada daerah tersebut saat terjadi transfer gaya dari beton ke FRP. Daerah kritis terjadinya *debonding* terletak pada ujung lapisan FRP dan juga area

sekitar adanya retak geser maupun lentur. Kegagalan akibat *debonding* dapat dibedakan atas 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*).

Gambar 3 (a) menunjukkan kegagalan *cover debonding*. Fenomena *cover debonding* atau disebut juga *concrete cover separation* diakibatkan karena adanya rambatan retak yang terjadi pada sepanjang sisi tulangan tarik. Kegagalan ini dimulai dengan munculnya retak di sekitar ujung lapisan FRP. Retak ini kemudian semakin merambat dan membentuk pola retakan yang hampir sejajar dengan daerah pemasangan tulangan sehingga pada akhirnya menyebabkan terlepasnya selimut beton.

Gambar 3 (b) menunjukkan kegagalan *debonding* akibat lepasnya lapisan FRP tanpa ikut terlepasnya beton. Pada fenomena lepasnya lapisan FRP tanpa ikut terlepasnya beton (*FRP debonding from laminate end*), kegagalan *debonding* diawali dengan terjadinya tegangan geser permukaan yang tinggi pada ujung lapisan FRP. Terjadinya *debonding* pada kondisi ini dimulai pada sisi ujung lapisan FRP kemudian merambat ke tengah balok. Kegagalan ini biasanya diakibatkan karena lebar pemasangan lapisan FRP yang lebih kecil daripada lebar penampang balok, bahan perekat yang kurang baik maupun pelaksanaan penempelan

lapisan FRP yang kurang sempurna.

Gambar 3 (c) menunjukkan kegagalan *debonding* akibat retak geser-lentur. Lepasnya FRP akibat retak geser-lentur (*FRP debonding from flexure-shear crack*) biasa disebut juga CDC (*Critical Diagonal Crack debonding*). Kegagalan CDC *debonding* semacam ini terjadi pada balok dengan penempatan lapisan FRP yang berada pada zona geser yang tinggi tetapi momennya rendah, misalnya pada lokasi dekat tumpuan balok sederhana. Pada lokasi tersebut tulangan geser yang diberikan hanya terbatas dan tidak mampu memikul gaya geser yang terjadi sehingga akan menyebabkan terjadinya retak geser-lentur yang besar di mana pola keruntuhan geser yang terjadi lebih dominan dibandingkan dengan pola keruntuhan lentur. Hal ini ditunjukkan dengan retakan diagonal yang cukup besar membentuk sudut mendekati 45° . Seiring dengan peningkatan lebar retak yang terjadi maka tegangan permukaan yang tinggi akan terjadi antara beton dengan lapisan FRP dan merambat ke ujung lapisan FRP yang didahului dengan terjadinya rambatan retak geser-lentur yang cukup besar dan hampir mencapai permukaan balok.

Gambar 3 (d) menunjukkan kegagalan FRP *debonding from flexural crack*. Fenomena ini dimulai saat retak lentur terjadi pada beton, di mana konsentrasi tegangan terjadi pada daerah retakan. Lokasi konsentrasi tegangan berada pada sisi tengah di mana zona momen maksimum berada. Tegangan tarik yang terjadi hanya berpusat pada sisi tengah dan belum merambat ke ujung lapisan FRP. Tegangan tarik yang terjadi pada

daerah beton yang telah retak kemudian ditransfer atau dipindahkan ke lapisan FRP sehingga tegangan lokal permukaan antara lapisan FRP dengan beton akan semakin meningkat dan berpusat pada daerah retakan dan sekitarnya.

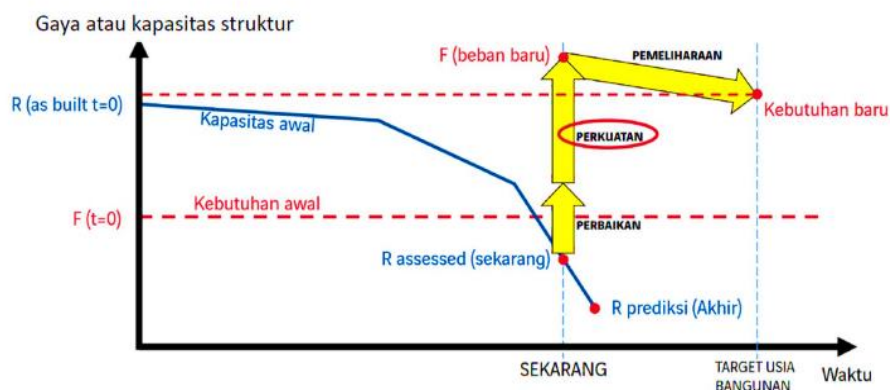
Seiring dengan peningkatan beban yang diberikan maka terjadi pula peningkatan tegangan lokal permukaan antara lapisan FRP dengan beton. Ketika tegangan ini telah mencapai nilai kritisnya maka tegangan ini akan mulai disalurkan atau mulai merambat ke salah satu ujung FRP dan menjadi penyebab terlepasnya ikatan antara FRP dengan beton atau biasa disebut dengan istilah *debonding*. Pelepasan lapisan FRP ini kemudian mulai merambat dari tengah ke ujung lapisan FRP hingga akhirnya menyebabkan terlepasnya sebagian lapisan FRP pada setengah bentang balok. Peristiwa *debonding* seperti ini biasa disebut dengan FRP *debonding from flexural crack* atau juga dapat disebut IC.

F. Metode Perbaikan dan Perkuatan

Perkuatan struktur biasanya dilakukan sebagai upaya pencegahan sebelum struktur mengalami kerusakan/kehancuran. Perkuatan struktur diperlukan apabila terjadi kerusakan yang menyebabkan degradasi yang berakibat tidak terpenuhi lagi persyaratan-persyaratan yang bersifat teknik yaitu kekuatan, kekakuan dan daktilitas, kestabilan, serta ketahanan terhadap kinerja tertentu (Triwiyono, 1998).

Pemilihan material dan penentuan metode perbaikan dan perkuatan didasarkan pada jenis kerusakan yang terjadi, besar dan luasnya kerusakan, faktor lingkungan, ketersediaan peralatan, waktu pelaksanaan, dan biaya yang dibutuhkan. Berikut merupakan beberapa metode perbaikan dalam menangani kerusakan yang umum terjadi pada beton :

1. Injeksi. Perbaikan injeksi dilakukan pada kerusakan akibat retak, dimana retak dibedakan menjadi dua yaitu retak struktur dan non-struktur. Untuk retak non-struktur digunakan metode injeksi dengan material pasta semen yang dicampur dengan expanding agent atau hanya melakukan sealing dengan material mortar polymer. Sedangkan untuk retak struktur digunakan metode injeksi dengan material epoxy yang memiliki viskositas rendah sehingga dapat mengisi sekaligus melekatkan kembali bagian beton yang terpisah.
2. Grouting. Perbaikan grouting adalah metode perbaikan dengan melakukan pengecoran memakai bahan non-shrink mortar. Metode ini dapat dilakukan secara manual atau menggunakan pompa dengan persyaratan material harus memiliki sifat mengalir dan tidak menyusut.
3. Shotcrete. Perbaikan shotcrete adalah menembakkan mortar dengan tekanan pada lubang atau permukaan beton yang memerlukan perbaikan. Metode ini dilakukan dengan memompa material yang telah dicampur melalui pipa kemudian mortar yang masih kering ditembak/dipompa dan akan tercampur dengan air di ujung saluran.



Gambar 4. Konsep Perbaikan dan Perkuatan Struktur

Beberapa metode perkuatan yang umum dilakukan dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. *Concrete Jacketing* adalah suatu metode perkuatan dengan cara menyelimuti beton yang telah ada dengan beton tambahan. Dalam melakukan perkuatan dengan concrete jacketing biasanya digunakan bahan *micro concrete* yang memiliki sifat dapat memadat tanpa bantuan *vibrator (self compaction)*. Teknik perkuatan ini digunakan pada kolom dengan tujuan untuk memperbesar penampang kolom sehingga kekuatan geser beton menjadi meningkat.
2. *Steel Jacketing* adalah metode perkuatan kolom persegi beton bertulang. Steel jacketing terdiri dari empat sudut baja longitudinal yang ditempatkan di setiap sudut kolom. Sudut longitudinal ini terhubung bersama menjadi sebuah kerangka yang dihubungkan dengan strap baja *transversal*.
3. *Fiber Reinforced Polymer* Perkuatan pada balok dilakukan dengan menggunakan *fiber carbon*. Metode perkuatan menggunakan FRP

dilakukan dengan cara menempelkan pada permukaan beton dengan menggunakan perekat *epoxy*. FRP merupakan bahan yang ringan, kuat, dan tahan terhadap korosi.

Pemilihan metode perkuatan dipengaruhi oleh beberapa pertimbangan, antara lain:

1. Efektifitas perkuatan.
2. Kemudahan pelaksanaan perkuatan .
3. Biaya, dalam hal ini terkait dengan pemilihan bahan agar diperoleh hasil perkuatan sesuai dengan yang diinginkan dan dapat tahan lama.

G. Karakteristik Meterial

G.1 *Fiber Reinforced Polymer (FRP)*

FRP merupakan material komposit yang digunakan dalam konstruksi sipil. Produk FRP yang terbuat dari kaca lebih dikenal dengan *Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)*. GFRP terbuat dari kaca cair yang dipanaskan sekitar 2300°F dan dipintal dengan bantuan *Bushing Platinumrhodium* pada kecepatan 200 mph, dan yang terbuat dari karbon dikenal dengan *Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)*.

Material komposit mempunyai beberapa kelebihan seperti berkekuatan tinggi, ringan dan punya daya tahan yang tinggi. Selain itu FRP juga merupakan bahan non korosi, netral terhadap gaya magnet jika dibandingkan terhadap baja, FRP punya kuat tarik lebih besar, modulus elastisitas kecil dan hubungan tegangan-regangan elastisitas. Terdapat

beberapa keuntungan menggunakan FRP sebagai bahan perkuatan struktur:

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

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.

G.2. Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)

CFRP adalah aplikasi lanjutan atau perkembangan dari FRP. *Carbon Fiber Reinforced Polymer* digunakan pada konstruksi struktur bangunan yang harus diperbaiki. Teknik perkuatan seperti ini dapat dibuat efisien, tidak menyebabkan karat seperti plat baja eksternal. Fungsi perkuatan dengan sistem komposit CFRP adalah untuk meningkatkan kekuatan atau memberikan peningkatan kapasitas lentur, geser, aksial dan daktilitas, atau berbagai kombinasi diantaranya.



Gambar 5. *Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)*

Penggunaan CFRP lebih populer mengingat banyaknya keuntungan yang dapat diperoleh seperti bobot unit yang kecil, mudah diaplikasikan dan ditangani, biaya instalasi dan pemeliharaan yang rendah. Kerugian yang paling prinsip penggunaan CFRP sebagai sistem perkuatan adalah harga material yang relatif lebih mahal (Meier, 1997). CFRP dalam bentuk lembaran, plat atau batangan dapat dipasang pada permukaan balok atau plat yang mengalami peregangan sebagai perkuatan lentur. Sebagai perkuatan geser balok, lembaran CFRP dapat direkatkan pada sisi balok. Penggunaan pada kolom, lembaran CFRP

atau pelapisan dapat ditempatkan pada bagian luar kolom untuk meningkatkan daktilitas dan kekuatan. (Maiman, 2013)

Tabel 1. Karakteristik *Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)*

SIFAT MATERIAL CFRP			
KEADAAN LEPAS		KEADAAN KOMPOSIT	
SIFAT MATERIAL	NILAI TEST	SIFAT MATERIAL	NILAI TEST
Tegangan Tarik	4,0 GPa	Tegangan Tarik ultimate 90° dari arah utama fiber	25,8 GPa
Modulus Tarik	230,0 GPa	Modulus Tarik	95,8 GPa
Regangan maks	1,7 %	Regangan	1,0 %
Kerapatan	1,74 g/cm ²	Tegangan tarik <i>Ultimate</i>	986 MPa
Tebal Fiber	0,36 mm	Tebal Komposit	1,0 mm

Sumber : *Fyfo.Co.LLC*

G.3. Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)

Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) adalah serat *polimer* yang terbuat dari matriks plastik diperkuat oleh serat halus dari kaca. GFRP merupakan jenis perkuatan yang memiliki kekuatan yang sangat besar, dan bahan yang ringan. Meskipun sifat kekuatan yang agak lebih rendah dari serat karbon dan kurang kaku.



Gambar 6. *Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)*

Penggunaan GFRP biasanya digunakan untuk perkuatan balok, kolom, dan struktur bangunan lainnya karena GFRP merupakan bahan yang tahan akan segala jenis cuaca, tahan dengan air yang mengandung garam seperti air laut, dan lainnya (Jenova, 2013).

Tabel 2. Karakteristik *Glass Fiber Reinforced Polymer* (GFRP)

SIFAT MATERIAL GFRP			
KEADAAN LEPAS		KEADAAN KOMPOSIT	
SIFAT MATERIAL	NILAI TEST	SIFAT MATERIAL	NILAI TEST
Tegangan Tarik	3, 24 GPa	Tegangan Tarik ultimate	575 MPa
Modulus Tarik	72,4 GPa	Modulus Tarik	26,1GPa
Regangan maks	4,50%	Regangan	2,20%
Kerapatan	2,55 g/cm ²	-	-
Berat per luasan	915 g/m ²	-	-
Tebal Fiber	0,36 mm	Tebal Komposit	1,3 mm

Sumber : *Fyfo.Co.LLC*,

G.4. Epoxy Resin

Epoxy Resin 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 dikeringkan dengan menambahkan anhidrida atau pengeras amina. Setiap pengeras menghasilkan profil larutan yang berbeda dan sifat yang diinginkan untuk produk jadinya.

Beberapa keuntungan *resin epoxy* sebagai berikut :

- Berbagai sifat mekanis memungkinkan pilihan yang lebih banyak

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

Tabel 3. Karakteristik Material *Epoxy Resin*

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	3.12Pa

FRP direkatkan pada permukaan elemen struktur secara kimiawi dengan perekat. Perekatan secara kimiawi sangat praktis karena tidak menyebabkan terjadinya konsentrasi tegangan, lebih mudah dilaksanakan dibandingkan dengan perekat mekanis dan tidak menyebabkan kerusakan pada material dasar atau material kompositnya. Perekat yang paling cocok digunakan pada material komposit adalah perekat yang mempunyai bahan dasar *epoxy resin*.

Perekat ini dibuat dari campuran 2 komponen. Komponen utamanya adalah cairan organik yang diisikan ke dalam kelompok *epoxy*. Permukaan yang akan dilekatkan harus dipersiapkan untuk mendapatkan

lekatan yang efektif. Permukaan harus bersih dan kering, bebas dari oksida, oli, minyak dan debu. Bahan perekat yang digunakan dalam penelitian ini juga merupakan produk dari Fyfe Co dengan nama Tyfo S komponen A dan komponen B. Untuk proses pencampuran antara komponen A dan komponen B digunakan perbandingan 2:1.

G.5. *Fiber Reinforced Polymer Hybrid (FRP Hybrid)*

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).

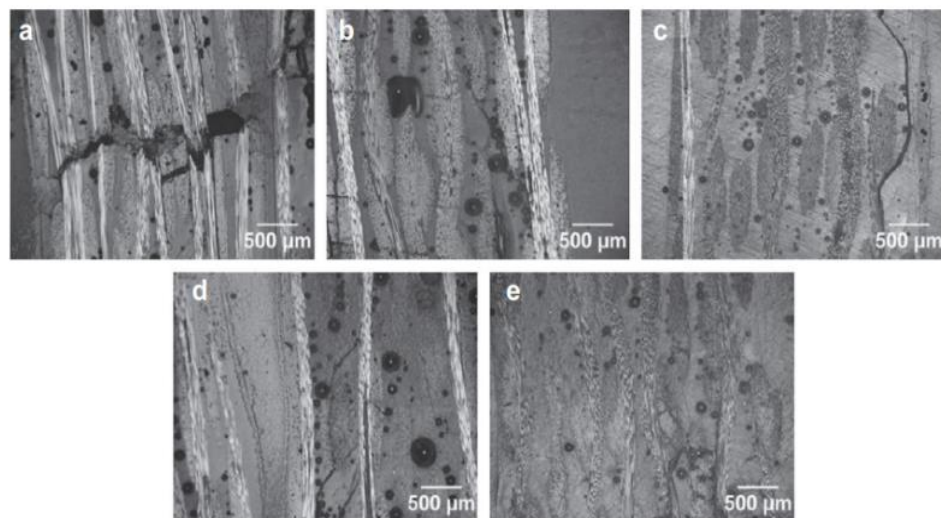
Tantangan utama yang hanya dapat dipenuhi melalui pemahaman tentang hubungan antara arsitektur material dan respons mekanis. Efek hybrid positif atau negatif dari properti mekanik yang dipilih dari aturan perilaku komposit karbon / epoksi dan komposit gelas / karbon (Marom et al., 1978).

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. Seperti yang terlihat pada

Gambar 7.



Gambar 7. Mikrograf optik laminasi komposit yang gagal di bawah pembebanan lentur

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). Pengenalan serat gelas ke dalam matriks polimer menghasilkan material