

TUGAS AKHIR

**PENGARUH PENGGUNAAN *GLASS FIBER
REINFORCED POLYMER* (GFRP) JENIS *WOVEN
ROVING* 200 DALAM PERKUATAN BALOK BETON
BERTULANG**

**(*THE EFFECT OF WOVEN ROVING 200 GLASS FIBER
REINFORCED POLYMER (GFRP) ON THE
STRENGTHENING OF REINFORCED CONCRETE
BEAMS*)**

**Diajukan Kepada Universitas Islam Indonesia Yogyakarta Untuk Memenuhi
Persyaratan Memperoleh Derajat Sarjana Teknik Sipil**



**Hanifardhi
20511395**

**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
2024**

TUGAS AKHIR

**PENGARUH PENGGUNAAN *GLASS FIBER*
REINFORCED POLYMER (GFRP) JENIS *WOVEN*
ROVING 200 DALAM PERKUATAN BALOK BETON
BERTULANG**

**(*THE EFFECT OF WOVEN ROVING 200 GLASS FIBER*
REINFORCED POLYMER (GFRP) ON THE
STRENGTHENING OF REINFORCED CONCRETE
BEAMS)**



Disusun oleh

Hanifardhi
20511395

Telah diterima sebagai salah satu persyaratan
untuk memperoleh derajat Sarjana Teknik Sipil

Diuji pada tanggal
Oleh Dewan Penguji

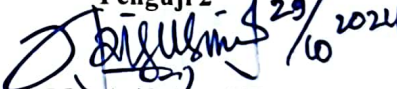
Pembimbing


Elvis Saputra, S.T., M.T.
NIK : 205111302

Penguji 1


Sarwidi, Prof. Ir., MSCE., Ph.D., IP-U.
NIK : 845110101

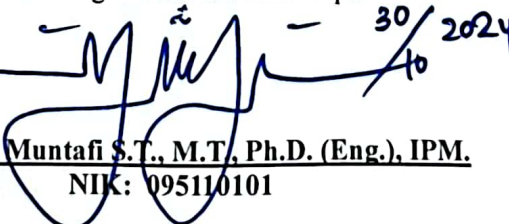
Penguji 2


Anggit Mas Arifudin, S.T., M.T.
NIK : 185111304

Mengesahkan,



Ketua Program Studi Teknik Sipil


Yunalia Muntafi S.T., M.T., Ph.D. (Eng.), IPM.
NIK: 095110101

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa laporan Tugas Akhir yang saya susun sebagai syarat untuk penyelesaian program Sarjana di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia merupakan hasil karya saya sendiri. Adapun bagian-bagian tertentu dalam penulisan laporan Tugas Akhir yang saya kutip dari hasil karya orang lain telah dituliskan dalam sumbernya secara jelas sesuai dengan norma, kaidah, dan etika penulisan karya ilmiah. Apabila di kemudian hari ditemukan seluruh atau sebagian laporan Tugas Akhir ini bukan hasil karya saya sendiri atau adanya plagiasi dalam bagian-bagian tertentu, saya bersedia menerima sanksi, termasuk pencabutan gelar akademik yang saya sandang sesuai dengan perundang-undangan yang berlaku.

Yogyakarta, 18 Oktober 2024

Yang membuat pernyataan,



Hanifardhi

(20511395)

PERSEMBAHAN

Dengan segala kerendahan hati, syukur yang tak terhingga, dan rasa cinta yang mendalam, kupersembahkan tugas akhir ini kepada:

Allah SWT

Yang Maha Pengasih dan Maha Penyayang. Segala kekuatan, kemudahan, dan harapan yang aku temukan di setiap langkah hanyalah karena rahmat-Mu. Tiada daya dan upaya selain atas kehendak-Mu. Semoga setiap kata dan usaha dalam karya ini menjadi amal yang Engkau ridhoi.

Keluargaku Tercinta

Yang telah menjadi sumber kekuatan, inspirasi, dan cinta tanpa syarat. Terima kasih atas doa yang tak pernah terputus, dukungan yang tulus, dan pengorbanan yang tanpa batas. Setiap keberhasilan ini bukanlah milikku seorang, melainkan hasil dari cinta dan perjuangan kita bersama. Terutama kepada **Ibuku** tersayang Ibu “Erlinawati” yang senantiasa menjadi pilar kekuatan dengan kasih sayangnya.

Ayah

Ayah tercinta bapak “Syaifuddin”, meski ragamu tak lagi di sini, cinta dan kenangan tentangmu selalu hidup dalam setiap detak jantungku. Terima kasih atas kasih sayangmu, pengorbananmu, dan pelajaran hidup yang tak ternilai. Doa-doamu mengiringiku hingga hari ini. Semoga Allah SWT melapangkan jalanmu, mengampuni segala khilaf, dan menempatkanmu di tempat terbaik di sisi-Nya. Setiap keberhasilan ini, aku persembahkan untukmu, sebagai bukti bahwa warisan perjuanganmu tak pernah sia-sia.

Semoga karya ini menjadi langkah kecil menuju masa depan yang lebih baik, dan semoga keberkahan senantiasa menyertai kita semua.

Aamiin.

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas limpahan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “Pengaruh Penggunaan *Glass Fiber Reinforced Polymer* (GFRP) Jenis *Woven Roving* 200 Dalam Perkuatan Balok Beton Bertulang” dengan baik.

Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat dalam menyelesaikan pendidikan di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Islam Indonesia. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji efektivitas penggunaan lembaran GFRP jenis *woven roving* 200 sebagai material perkuatan pada balok beton bertulang. Penulis berharap penelitian ini dapat memberikan kontribusi bagi pengembangan teknik perkuatan struktur bangunan, khususnya dalam bidang rekayasa sipil.

Dalam proses penyusunan Tugas Akhir ini, penulis mendapatkan banyak bantuan, dukungan, dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih kepada:

1. Allah SWT yang telah melancarkan dan memudahkan segala urusan dalam penelitian dan penulisan Tugas Akhir ini.
2. Ibu Ir. Yuliana Muntafi, S.T., Ph.D. (Eng)., IPM. Selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil, atas segala dukungan dan fasilitas yang diberikan.
3. Bapak Elvis Saputra, S.T., M.T, selaku dosen pembimbing, yang telah memberikan arahan, bimbingan, serta waktu yang tak ternilai dalam penyusunan Tugas Akhir ini.
4. Seluruh dosen dan staf Jurusan Teknik Sipil Universitas Islam Indonesia, yang telah memberikan ilmu dan bantuan selama masa studi.
5. Seluruh Laboran dari Laboratorium Bahan Konstruksi dan Laboratprium Struktur Jurusan Teknis Sipil Universitas Islam Indonesia.

6. Keluarga tercinta, Ayah Syaifuddin dan Ibu Erlinwati tersayang serta Abang Dian, Abang Alfi, Kakak Puji, Kakak Erza dan Adik Yaya, yang selalu memberikan dukungan moral, material, dan doa sepanjang proses penyusunan Tugas Akhir ini.
7. Orang spesial tercinta yang selalu menemani dan membantu pengerjaan Tugas Akhir hingga selesai memberikan dukungan bentuk apapun yang tidak ada habis-habisnya hingga menjadi penyemangat kepada penulis.
8. Rekan-rekan mahasiswa Teknik Sipil Angkatan 2020 khususnya teman-teman dari “*NEXT TRIP*” dan Teman seperjuangan dari kota Tembilahan selalu siap membantu, yang selalu memberikan dukungan dan motivasi.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun demi perbaikan dan penyempurnaan penelitian ini di masa mendatang. Semoga karya ini dapat bermanfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang teknik sipil.

Akhir kata, penulis mengucapkan terima kasih dan berharap semoga penelitian ini dapat bermanfaat bagi pihak yang membutuhkan.

Yogyakarta, 18 Oktober 2024

Penulis,

Hanifardhi

20511395

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	iii
PERSEMBAHAN	iv
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
ABSTRAK	xiv
ABSTRACT	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	3
1.4 Manfaat	3
1.5 Batasan Masalah	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Umum	5
2.2 Penelitian Terdahulu	7
BAB III LANDASAN TEORI	17
3.1 Beton Bertulang	17
3.1.1 Semen	20
3.1.2 Agregat kasar dan Halus	20
3.1.3 Kuat Tekan beton	21

3.1.4 Kuat Tarik Beton	22
3.1.5 Modulus elastisitas beton	22
3.1.6 Slump Test	23
3.1.7 Baja Tulangan	23
3.2 <i>Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)</i>	24
3.3 Perkuatan Balok Beton Bertulang Dengan FRP	25
3.4 Balok Dengan FRP	28
3.5 Perencanaan Campuran Beton (<i>Mix Design</i>)	29
3.6 Berat Volume Beton	35
3.7 Kuat Tekan Beton	36
3.8 Kuat Lentur Beton	37
BAB IV METODOLOGI PENELITIAN	45
4.1 Tinjauan Umum	45
4.2 Teknik Pengumpulan Data	45
4.3 Bahan yang Digunakan	46
4.4 Peralatan Penelitian	46
4.5 Tahapan Penelitian	47
4.5.1 Persiapan	47
4.5.2 Pengujian Material	47
4.5.3 Rencana Campuran Beton (<i>Trial mix design</i>)	48
4.5.4 Pembuatan Benda Uji	48
4.5.5 Perawatan Benda Uji	50
4.5.6 Penambahan Lapis GFRP	51
4.5.7 Pengujian Benda Uji	53
4.5.8 Analisis Data	54

4.5.9 Bagan Alir Penelitian	55
BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN	58
5.1 Pengujian Material Beton	58
5.1.1 Pengujian Agregat Halus	58
5.1.2 Pengujian Agregat Kasar	61
5.2 Perhitungan Percobaan Rencana Campuran Beton (Trial Mix Design)	64
5.3 Data Hasil Trial Mix Design	69
5.4 Pengujian Glass Fiber	70
5.5 Perhitungan Proporsi Campuran Benda Uji Balok	71
5.5.1 Proporsi Beton untuk 1m^3	72
5.5.2 Proporsi campuran beton untuk sampel balok	72
5.6 Perhitungan Teoritis Balok Beton Bertulang	73
5.6.1 Analisis Kapasitas Lentur Balok Kontrol	73
5.7 Kinerja Balok Beton Bertulang	78
5.7.1 Kinerja Balok Kontrol	78
5.7.2 Kinerja Balok Perkuatan Pada beban 50% dari Balok Kontrol	80
5.7.3 Kinerja Balok Perkuatan Pada beban 75% dari Balok Kontrol	82
5.8 Pengaruh perkuatan <i>Glass Fiber Reinforced Polymer</i> (GFRP) Terhadap Kinerja Balok Beton Bertulang	83
5.8.1 Perkuatan GFRP Terhadap Kinerja Balok Pada Beban 50% Balok Kontrol	83
5.8.2 Perkuatan GFRP Terhadap Kinerja Balok Pada Beban 75% Balok Kontrol	85
5.9 Pola Retak dan Kegagalan Balok	87
5.9.1 Balok Kontrol	87
5.9.2 Balok Pada beban 50% Balok Kontrol	89

	x
5.9.3 Balok Pada beban 75% Balok Kontrol	91
5.10 Perbandingan Balok Kontrol dan Diperkuat GFRP	93
5.10.1 Balok Kontrol dan Balok Beban 50%	93
5.10.2 Balok Kontrol dan Balok Beban 75%	95
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN	99
6.1 Kesimpulan	99
6.2 Saran	100
DAFTAR PUSTAKA	101
LAMPIRAN	104

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Perbandingan Penelitian	12
Tabel 3. 1 Tulangan Ulir dan Ukurannya	24
Tabel 3. 2 Faktor Pengali Deviasi Standar	29
Tabel 3. 3 Perkiraan Kekuatan Tekan	30
Tabel 3. 4 Perkiraan Kadar Air Bebas (kg/m ³)	32
Tabel 3. 5 Persyaratan Minimum Jumlah Semen dan Nilai FAS Maksimum	33
Tabel 3. 6 Klasifikasi Beton Berdasarkan Berat Volume	36
Tabel 4. 1 Rincian Sampel Balok Uji	50
Tabel 5. 1 Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Halus	58
Tabel 5. 2 Pengujian Modulus Halus Butir Agregat Halus	59
Tabel 5. 3 Pengujian Kandungan Lumpur Agregat Halus	61
Tabel 5. 4 Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Kasar	62
Tabel 5. 5 Pengujian Modulus Halus Butir Agregat Kasar	63
Tabel 5. 6 Pengujian Trial Mix Design	70
Tabel 5. 7 Hasil Uji Tarik GFRP	70
Tabel 5. 8 Perbandingan Balok Kontrol dan Balok perkuatan 1	94
Tabel 5. 9 Perbandingan Balok Kontrol dan Balok perkuatan 2	95

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3. 1 Distribusi Tegangan pada Penampang sebelum Retak	19
Gambar 3. 2 Distribusi Tegangan pada Penampang Retak	19
Gambar 3. 3 Proses debonding dan delaminasi sistem FRP eksternal	27
Gambar 3. 4 Sistem angkur FRP	28
Gambar 3. 5 Grafik Hubungan Antara Kuat Tekan dan Faktor Air Semen	31
Gambar 3. 6 Grafik Persentase Agregat Halus	34
Gambar 3. 7 Grafik Berat Isi Beton	35
Gambar 3. 8 Distribusi Regangan dan Tegangan pada Balok Tulangan Tunggal	37
Gambar 3. 9 Distribusi Regangan dan Tegangan pada Balok Tulangan Rangkap	39
Gambar 3. 10 Faktor Reduksi Kuat Lentur	41
Gambar 3. 11 Pembebanan Benda Uji Balok Beton	42
Gambar 3. 12 Bending Moment Diagram dari Gaya Akibat Beban Sendiri	42
Gambar 3. 13 Bending Moment Diagram dari Gaya Akibat Pengujian	43
Gambar 3. 14 <i>Free Body Diagram</i> dari Gaya Akibat Pengujian	44
Gambar 4. 1 Detail benda uji balok Kontrol dan Penulangan balok	49
Gambar 4. 2 Detail benda uji balok perkuatan menggunakan GFRP	50
Gambar 4. 3 Pengamplasan permukaan balok sebelum pemasangan GFRP	51
Gambar 4. 4 Pelapisan epoksi ke permukaan balok	52
Gambar 4. 5 Pemasangan GFRP pada balok menggunakan roller	52
Gambar 4. 6 Penutupan balok dengan plastik agar terhindar dari debu	53
Gambar 4.7 <i>Setup</i> Uji posisi LVDT	54
Gambar 4.8 <i>Flowchart</i> Penelitian	56
Gambar 4.9 Lanjutan <i>Flowchart</i> Penelitian	57
Gambar 5. 1 Grafik Analisis Saringan Agregat Halus	60
Gambar 5. 2 Grafik Analisis Saringan Agregat Kasar	64
Gambar 5. 3 Grafik Hubungan Antara Kuat Tekan dan FAS	66
Gambar 5. 4 Grafik Persentase Agregat Halus	67
Gambar 5. 5 Grafik Berat Isi Beton	68

Gambar 5. 6	Sampel GFRP sebelum Pengujian Kuat Tarik	71
Gambar 5. 7	Sampel GFRP setelah Pengujian Kuat Tarik	71
Gambar 5. 8	Grafik Beban dan lendutan pada balok kontrol	80
Gambar 5. 9	Grafik Beban dan lendutan pada balok Perkuatan 1A dan 1B sebelum diberi GFRP	81
Gambar 5. 10	Grafik Beban dan lendutan pada balok Perkuatan 2A dan 2B sebelum diberi GFRP	83
Gambar 5. 11	Grafik Beban dan lendutan pada balok Perkuatan 1A dan 1B setelah diberi GFRP	85
Gambar 5. 12	Grafik Beban dan lendutan pada balok Perkuatan 2A dan 2B setelah diberi GFRP	86
Gambar 5. 13	Pola Retak pada Balok Kontrol 1	88
Gambar 5. 14	Pola Retak pada Balok Kontrol 2	89
Gambar 5. 15	Pola Retak Balok Perkuatan 1A sebelum diberi GFRP pembebanan 50% dari Balok kontrol (kiri) dan Sesudah diberi GFRP (Kanan)	90
Gambar 5. 16	Pola Retak Balok Perkuatan 1B sebelum diberi GFRP pembebanan 50% dari Balok kontrol (kiri) dan Sesudah diberi GFRP (Kanan)	91
Gambar 5. 17	Pola Retak Balok Perkuatan 2A sebelum diberi GFRP pembebanan 75% dari Balok kontrol (kiri) dan Sesudah diberi GFRP (Kanan)	92
Gambar 5. 18	Pola Retak Balok Perkuatan 2B sebelum diberi GFRP pembebanan 75% dari Balok kontrol (kiri) dan Sesudah diberi GFRP (Kanan)	93
Gambar 5. 19	Perbandingan Beban Maksimum Balok Kontrol, Balok Perkuatan 1 dan Balok Perkuatan 2	96
Gambar 5. 20	Perbandingan Lendutan Balok Kontrol, Balok Perkuatan 1 dan Balok Perkuatan 2	97
Gambar 5. 21	Perbandingan Momen Maksimum Balok Kontrol, Balok Perkuatan 1 dan Balok Perkuatan 2	97

ABSTRAK

Seiring bertambahnya usia dan kerusakan akibat gempa, komponen beton bertulang mengalami penurunan kekuatan. Untuk mengatasi kerusakan struktur bangunan, terdapat dua opsi: pembongkaran dan penggantian dengan bangunan baru atau *retrofitting* dengan memperkuat struktur yang ada. Salah satu metode *retrofitting* yang efektif adalah penggunaan *Glass Fiber Reinforced Polymer* (GFRP).

Penelitian ini menggunakan SNI 03-2384-2000 dalam membuat campuran beton dengan kuat tekan beton sebesar 25 MPa. Penggunaan baja tulangan SNI dengan kuat tarik baja sebesar 420 MPa. Pengujian GFRP dilakukan menggunakan peraturan ASTM, Uji tarik pada komposit berdasarkan ASTM D3039. Sampel balok memiliki tiga variasi dengan masing-masing setiap variasi mempunyai dua buah sampel balok, dua balok kontrol, dua balok masing-masing perkuatan GFRP setelah beban 50% dan 75% dari beban maksimum kontrol.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa balok dengan perkuatan GFRP mampu menahan beban lebih tinggi dibandingkan balok kontrol, dengan peningkatan sebesar 13,61% pada kondisi pembebanan 50% dan 9,45% pada pembebanan 75%. Momen lentur maksimum balok yang diperkuat mencapai 22,029 kNm, lebih tinggi dibandingkan balok kontrol yang hanya mencapai 19,711 kNm. Namun, beberapa balok mengalami deformasi getas setelah mencapai kekuatan maksimumnya, menunjukkan keterbatasan GFRP dalam aspek daktilitas. Dari hasil penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa penggunaan GFRP tipe *Woven Roving* 200 efektif dalam meningkatkan kapasitas lentur balok beton bertulang.

Kata Kunci: GFRP, perkuatan lentur, balok beton bertulang, beban maksimum, momen lentur.

ABSTRACT

As buildings age and sustain damage from earthquakes, the strength of reinforced concrete elements declines. To address structural damage, two options are available: demolition and replacement with new structures, or retrofitting by strengthening the existing structure. One effective retrofitting method involves the use of Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP).

This study follows SNI 03-2384-2000 for designing concrete mixtures, targeting a compressive strength of 25 MPa. Reinforcing steel bars comply with SNI standards, with a tensile strength of 420 MPa. The GFRP testing follows ASTM standards, specifically tensile tests on composite materials according to ASTM D3039. The beam samples are divided into three variations, with each variation consisting of two beam specimens, two control beams, and two beams reinforced with GFRP after being subjected to 50% and 75% of the control beams' maximum load.

The test results show that beams reinforced with GFRP can withstand higher loads than the control beams, with improvements of 13,61% under 50% loading conditions and 9,45% under 75% loading conditions. The maximum flexural moment of the reinforced beams reached 22,029 kNm, exceeding the control beams' maximum moment of 19,711 kNm. However, some beams exhibited brittle deformation after reaching their maximum strength, highlighting GFRP's limitations in terms of ductility.

In conclusion, the use of Woven Roving 200 GFRP effectively enhances the flexural capacity of reinforced concrete beams, although attention must be given to the reduced ductility observed in the specimens.

Key Words: *GFRP, flexural strengthening, reinforced concrete beams, maximum load, flexural moment.*

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan wilayah yang terletak pada area Cincin Api Pasifik, yang merupakan jalur seismik aktif yang mengelilingi samudra Pasifik dan menjadi tempat pusat aktivitas gempa bumi serta letusan gunung berapi. Kondisi tersebut menjadikan Indonesia rentan terhadap gempa bumi dan dapat mengakibatkan potensi keruntuhan bangunan yang tinggi. Keruntuhan bangunan umumnya terjadi akibat kerusakan pada komponen struktural, terutama pada struktur yang banyak digunakan dalam konstruksi di Indonesia, seperti beton bertulang.

Beton bertulang merupakan kombinasi antara beton dan baja tulangan yang bekerja secara komposit. Beton memiliki kekuatan tekan yang tinggi, namun masih tergolong lemah untuk menahan gaya tarik. Oleh karena itu, tulangan baja ditambahkan untuk mengatasi kekurangan tersebut sehingga tercipta material yang lebih kuat dan tahan lama. Meskipun demikian, setiap komponen struktur beton bertulang termasuk balok memiliki batas usia rencana dan akan mengalami penurunan kekuatan seiring bertambahnya usia balok. Selain itu, faktor lingkungan alam seperti gempa bumi juga dapat mempercepat kerusakan struktur beton bertulang.

Ada dua pilihan dalam mengatasi kerusakan struktur bangunan, yaitu dengan cara membongkar dan menggantinya dengan bangunan baru atau memperkuat kembali menggunakan metode *Retrofitting*, yaitu memperbaiki dan memperkuat struktur bangunan yang sudah berdiri. Seiring dengan berkembangnya teknologi di bidang konstruksi, perkuatan struktur menggunakan *Fiber Reinforced Polymer* (FRP) menjadi salah satu solusi yang efektif, karena FRP merupakan material komposit yang dikenal karena kekuatannya dan dapat diterapkan untuk memperkuat berbagai komponen bangunan.

FRP memiliki beberapa jenis, di antaranya *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) dan *Glass Fiber Reinforced Polymer* (GFRP). Pada penelitian ini, peneliti memilih menggunakan GFRP sebagai material perkuatan karena selain kuat, material ini memiliki ketahanan terhadap air, bahan kimia, dan korosi, terutama dalam lingkungan yang terpapar garam atau air laut. Selain itu, GFRP juga lebih ekonomis dibandingkan CFRP, sehingga cocok untuk diaplikasikan dalam berbagai proyek konstruksi.

Salah satu keunggulan GFRP terletak pada bobotnya yang ringan, sehingga memudahkan transportasi dan pemasangan tanpa membutuhkan alat berat. Proses pemasangan GFRP juga dapat dilakukan tanpa mengganggu aktivitas di sekitar lokasi konstruksi. GFRP sering digunakan untuk memperkuat komponen struktur yang mengalami penurunan kekuatan, salah satunya balok beton bertulang. Pada balok yang mengalami kerusakan, terutama pada area lentur, pemasangan lembaran GFRP diharapkan dapat memulihkan atau bahkan meningkatkan kapasitas balok dalam menahan beban.

Meskipun *Glass Fiber Reinforced Polymer* (GFRP) memiliki beberapa keunggulan, material ini juga memiliki beberapa kelemahan seperti kekuatan yang lebih rendah dibandingkan CFRP, paparan jangka panjang terhadap sinar ultraviolet (UV) dapat menyebabkan degradasi pada material GFRP serta keterbatasan dalam perbaikan dan pemantauan. Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini difokuskan pada pengaruh dan efektivitas GFRP dalam memperkuat kekuatan lentur pada balok beton bertulang yang telah mengalami kerusakan akibat beban. Diharapkan, penelitian ini dapat memberikan pemahaman mengenai seberapa besar pengaruh pemasangan GFRP terhadap peningkatan kekuatan lentur balok beton bertulang dalam memperbaiki dan memperkuat balok yang telah mengalami kerusakan akibat beban.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang di atas, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana pengaruh dari perkuatan GFRP terhadap balok beton bertulang?
2. Seberapa efektif penggunaan GFRP sebagai material untuk memperkuat balok beton bertulang terhadap beban maksimum, lendutan dan momen maksimum?

1.3 Tujuan

Adapun tujuan yang ingin diperoleh dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mengetahui pengaruh dari perkuatan GFRP terhadap balok beton bertulang.
2. Mengetahui seberapa efektif penggunaan GFRP sebagai material untuk memperkuat balok beton bertulang terhadap beban maksimum, lendutan dan momen maksimum.

1.4 Manfaat

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi teoritis dengan memperkaya pemahaman kita mengenai metode penguatan struktur. Hal ini termasuk memperoleh wawasan yang lebih mendalam tentang solusi untuk tantangan yang dihadapi dalam struktur serta teknik perbaikan yang efektif. Tambahan lagi, hasil penelitian ini diharapkan dapat meningkatkan pemahaman insinyur terhadap material GFRP, sifat-sifatnya, dan prinsip-prinsip desain yang terkait dengannya.
2. Penelitian ini dapat dijadikan referensi untuk para pembaca dan penelitian selanjutnya dalam perkuatan balok beton bertulang.
3. Memberikan referensi pembelajaran bagi para perencana dan berbagai kalangan konstruksi dalam perencanaan balok beton bertulang.

1.5 Batasan Masalah

Dalam pelaksanaan penelitian ini, diberikan batasan masalah agar penelitian dapat terfokus. Batasan masalah tersebut di antaranya adalah sebagai berikut.

1. Benda uji balok beton bertulang menggunakan cetakan dengan dimensi lebar (B) = 150 mm, Tinggi (H) = 200 mm dan Panjang (L) = 1400 mm.
2. Metode *Two point load* dipilih karena merupakan metode yang umum digunakan untuk pengujian lentur balok beton bertulang.
3. Mutu yang digunakan adalah beton normal dengan mutu $f'_c = 25$ MPa.
4. Baja tulangan yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja polos dengan mutu baja tulangan pokok $f_y = 420$ Mpa dan tulangan sengkang $f_y = 280$ Mpa.
5. Spesifikasi baja tulangan yang digunakan adalah baja tulangan pokok atas P10 mm, tulangan pokok bawah D13 mm, dan tulangan sengkang P8 mm.
6. Agregat yang digunakan dalam penelitian ini adalah agregat halus (pasir) dan Kasar (kerikil) berasal dari Laboratorium Bahan Kontruksi Teknik Sipil Universitas Islam Indonesia.
7. Fiber yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Woven Roving* 200.
8. Metode perencanaan balok beton bertulang yang digunakan menggunakan standar SNI-2847-2019.
9. Metode campuran (*mix design*) yang digunakan menggunakan standar SNI 03-2834-2000.
10. Topik penelitian yang diambil adalah perkuatan dengan menggunakan serat kaca, Lembaran GFRP diaplikasikan pada muka bawah balok dibagian lentur balok serta sedikit penambahan pada geser balok untuk mempertimbangkan apabila terjadi geser.
11. Penelitian ini dilakukan dalam kondisi laboratorium. Pengaruh faktor lingkungan seperti suhu, kelembaban, atau paparan bahan kimia tidak akan dipertimbangkan.
12. Penelitian ini hanya mempertimbangkan balok beton yang telah mengeras selama 28 hari.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Dalam rangka penelitian, keberadaan referensi sangat penting untuk mendukung pencapaian tujuan peneliti. Referensi tersebut menjadi kunci untuk memperoleh hasil yang akurat dan memberikan pedoman dalam mengatasi permasalahan yang mungkin timbul. Sumber referensi, seperti Tinjauan Pustaka, dapat berasal dari penelitian sebelumnya, jurnal, makalah, dan buku.

2.1 Umum

Indonesia adalah negara yang sering mengalami gempa bumi. Akibatnya, masyarakat sering merasakan dampak negatif berupa kerusakan pada infrastruktur bangunan. Material yang paling banyak digunakan dalam konstruksi infrastruktur adalah beton konvensional, yang sayangnya mudah rusak dan kurang tahan terhadap gempa. Di sisi lain, pemerintah terus berupaya membangun infrastruktur sebagai bagian dari upaya pemerataan ekonomi dan memenuhi kebutuhan masyarakat yang terus berkembang. Oleh karena itu, diperlukan inovasi dalam teknologi bahan bangunan yang dapat mendukung percepatan pembangunan infrastruktur, dengan memanfaatkan bahan lokal dan sesuai dengan kondisi setempat. Sejalan dengan program pemerintah dalam pengembangan material canggih untuk mendukung infrastruktur, penelitian untuk mengembangkan beton yang berkelanjutan dan tahan gempa sangat dibutuhkan. Desain bangunan tahan gempa harus mempertimbangkan kekuatan lateral serta kemampuan deformabilitas dan daktilitas struktur yang terbatas namun tidak runtuh. Faktor penting dalam menciptakan bangunan yang tahan gempa adalah desain yang aman dan penggunaan material berkualitas dalam konstruksi.

Dalam perencanaan suatu struktur bangunan harus memenuhi peraturan-peraturan yang berlaku untuk mendapatkan suatu struktur bangunan yang aman

secara konstruksi berdasarkan ketentuan yang berlaku dalam Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung dan penjelasan SNI-2847-2019.

Beton merupakan komponen struktur yang terdiri dari bahan penyusunnya semen hidraulik (*portland cement*), agregat kasar, agregat halus, air dan bahan tambah (*admixture atau additive*). Sedangkan beton bertulang adalah suatu kombinasi antara beton dan baja yang dipadukan menjadi satu kesatuan secara komposit. Hal ini dilakukan untuk mengantisipasi beban tarik yang tidak dapat ditahan oleh beton, sehingga kombinasi komposit dari beton bertulang ini memiliki kekuatan dan ketahanan yang lebih baik daripada beton tanpa tulangan. Namun, beton bertulang memiliki kelemahan yang paling utama, ialah rendahnya kekuatan per satuan berat dari beton mengakibatkan beton bertulang menjadi berat yang akan sangat berpengaruh pada struktur.

Sampai saat ini, beton masih merupakan komponen yang dikenal dalam struktur bangunan dan banyak digunakan. Beton bertulang sering digunakan untuk bangunan. Beton secara bertahap kehilangan kekuatan dan bahkan dapat mengalami kerusakan atau kegagalan struktur. Ini terjadi tidak terlepas dari fungsi balok untuk menahan gaya momen, yang mengakibatkan lentur dan geser yang disebabkan oleh pembebanan yang berlebihan atau bencana alam seperti gempa bumi.

Setiap struktur beton bertulang memiliki umur rencana dan akan mengalami penurunan kekuatan bahkan mengalami kerusakan. Selain itu pengaruh lingkungan, perubahan fungsi struktur yang tidak sesuai rencana mengakibatkan kerusakan struktur yang lebih cepat. Jika hal itu terjadi, ada dua hal yang dapat dilakukan, yaitu membongkar struktur lama yang telah rusak lalu mengganti dengan struktur baru, atau memberikan perkuatan pada struktur tersebut dengan teknologi yang telah berkembang pada bidang konstruksi saat ini. Perkuatan atau *retrofit* dapat dilakukan dengan cara penambahan tulangan dengan *jacketing*, penambahan pelat baja, penambahan rangka batang, dan dengan penambahan FRP (*Fiber Reinforcement Polymer*).

FRP sendiri mempunyai banyak jenis, antara lain adalah CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) dan GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*).

Glass Fiber Reinforced Polymers (GFRP) adalah alternatif material yang dapat digunakan untuk memperkuat dan memperbaiki struktur. Meskipun GFRP cukup mahal, menggunakannya memiliki banyak keuntungan, seperti kuat tariknya yang tinggi, daktilitasnya yang tinggi, dan beratnya yang ringan, yang berarti tidak memerlukan peralatan yang berat untuk mengangkutnya ke lokasi. Selain itu, saat digunakan, GFRP tidak mengganggu aktivitas di daerah tersebut.

Kelebihan *Glass Fiber Reinforced Polymer* (GFRP) dibandingkan dengan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) dalam konteks kekuatan struktur seperti GFRP memiliki kekuatan yang tinggi, tahan air, dan tahan terhadap bahan kimia. Meskipun tidak sekuat CFRP, GFRP masih memberikan kekuatan yang cukup untuk banyak aplikasi. Selain itu GFRP memiliki ketahanan korosi yang lebih baik, terutama dalam lingkungan di mana beton terpapar garam atau air laut. Ini sangat penting dalam kekuatan struktur yang ada, terutama untuk meningkatkan kinerja seismik. Untuk harga GFRP biasanya lebih murah daripada CFRP, menjadikannya pilihan yang lebih ekonomis untuk banyak proyek. GFRP dapat memberikan kekuatan yang sama dengan CFRP tetapi dengan berat yang lebih ringan. Hal ini dapat mengurangi beban pada struktur yang ada saat melakukan kekuatan.

2.2 Penelitian Terdahulu

Tinjauan pustaka terhadap hasil- hasil penelitian sebelumnya yang sejenis sehubungan dengan balok beton bertulang eksternal dijelaskan sebagai berikut:

1. Uji Eksperimental Pengaruh *Glass Fibre Reinforced Polymer* (GFRP) Terhadap Perkuatan Sengkang Kolom Beton Bertulang
 Penelitian ini disusun oleh Zia Betros Malikul A (2017) dengan judul “Uji Eksperimental Pengaruh *Glass Fibre Reinforced Polymer* (GFRP) Terhadap Perkuatan Sengkang Kolom Beton Bertulang”. Penelitian ini bertujuan Mengetahui perilaku kerusakan kolom tanpa perkuatan tulangan sengkang menggunakan GFRP, perilaku kerusakan kolom dengan perkuatan tulangan sengkang menggunakan GFRP, beban maksimal yang dapat diterima kolom beton bertulang setelah diperkuat (*strengthening*) dengan GFRP, dan pengaruh

GFRP terhadap perkuatan sengkang sebagai pengekang pada kolom. Kesimpulan dari penelitian ini adalah sebagai berikut ini:

- a. Perilaku kerusakan yang terjadi pada benda uji KS (Kolom Standar) adalah kerusakan tekuk (*buckling*) pada daerah lapangan kolom, beton menjadi pecah dan terkelupas dari baja tulangan akibat tidak terkekang (*unconfined concrete*) dan mengalami keruntuhan mendadak (*sudden failure*).
 - b. Perilaku kerusakan benda uji KG1 (Kolom *Glass 1*) dan KG2 (Kolom *Glass 2*) yang terjadi mengalami perubahan dari benda uji KS (Kolom Standar) yaitu rusak bagian lapangan menjadi rusak pada bagian atas dan bawah. Hal ini dikarena pada bagian tengah kolom diperkuat dengan GFRP sehingga beton menjadi terkekang (*confined concrete*).
 - c. Beban maksimum yang mampu ditahan oleh kolom, untuk benda uji KS (Kolom Standar) sebesar 634,2333 KN, KG1 (Kolom *Glass 1*) sebesar 847,7563 KN, dan benda uji KG2 (Kolom *Glass 2*) sebesar 548,9146 KN.
 - d. Penggunaan GFRP sebagai pengekang pada perkuatan sengkang kolom beton bertulang mampu meningkatkan kapasitas beban aksial kolom tersebut dan kolom tidak mengalami kerusakan pada bagian yang terkekang dengan GFRP.
2. Perkuatan Lentur Balok Beton Bertulang Dengan *Glass Fiber Reinforced Polymer* (GFRP)

Penelitian ini disusun oleh Fikri Alami (2021) dengan judul “Perkuatan Lentur Balok Beton Bertulang Dengan *Glass Fiber Reinforced Polymer* (GFRP)”. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui dampak GFRP dalam memperkuat lentur balok. Kesimpulan dari penelitian ini adalah sebagai berikut ini:

- a. Balok beton bertulang yang dipasang GFRP (BL-1, BL-2, dan BL-3) mengalami peningkatan kapasitas beban bila dibandingkan dengan balok tanpa perkuatan (BL). Peningkatan tersebut sebesar 62,08 %, 68,60 %, dan 75,13 % pada benda uji secara berurut BL-1, BL-2 dan BL-3.
- b. Balok beton bertulang BL-1 memiliki sifat paling daktil karena mampu menahan deformasi yang cukup besar bila dibandingkan balok beton bertulang BL, BL-2 dan BL-3. Lendutan maksimum yang terjadi pada

balok BL sebesar 10,57 mm, sedangkan pada balok BL-1, BL-2 dan BL-3 masing-masing sebesar 24,95 mm , 14,58 mm dan 14,90.

- c. Momen batas balok beton BL sebesar 1889,30 kg-m saat kurvatur maksimum sebesar $7,183 \times 10^{-6}$ per mm, momen batas balok beton BL1 mencapai momen batas maksimum sebesar 3061,592 Kg-m pada saat kurvatur maksimum sebesar $1,95 \times 10^{-5}$, balok beton BL2 mencapai momen batas sebesar 3185,009 kg-m pada saat kurvatur maksimum sebesar $1,496 \times 10^{-5}$ dan balok BL3 mencapai momen batas sebesar 3246,717 Kg-m pada saat kurvatur maksimum sebesar $1,41 \times 10^{-5}$.
 - d. Beban maksimum balok BL berdasarkan hasil analisis metode ACI-440 yaitu sebesar 2,926 Ton, BL-1, BL-2 dan BL-3 masing-masing sebesar 7,123 T, 11,055 T dan 12,934 T. Metode ACI memberikan hasil yang lebih besar untuk balok yang diperkuat dengan GFRP dibandingkan hasil eksperimen hal ini dikarenakan metode ACI 440 mengasumsikan kegagalan terjadi pada tengah balok sementara pada eksperimen kegagalan terjadi pada ujung perkuatan GFRP.
 - e. Besarnya tegangan geser horizontal pada ujung FRP untuk balok BL-1 sebesar 0,01 Mpa, balok BL-2 0,05 MPa dan balok BL-3 sebesar 0,12 MPa, sedangkan besarnya rasio M_s/M_p adalah balok beton BL-1 sebesar 0,48 balok beton BL-2 sebesar 0,47 dan balok beton BL-3 sebesar 0,44.
 - f. Model kegagalan pada penelitian ini, untuk balok beton BL ialah keruntuhan lentur dan untuk balok beton BL-1, BL-2 dan BL-3 keruntuhan FRP yang terjadi ialah pilling-off atau pelat GFRP mengelupas.
3. Analisa Pengaruh Perkuatan Dengan *Glass Fiber Reinforced Polymer* (GFRP) Pada Struktur Balok Beton Bertulang.
- Penelitian ini disusun oleh Yusfar (2018) dengan judul “Analisa Pengaruh Perkuatan Dengan *Glass Fiber Reinforced Polymer* (GFRP) Pada Struktur Balok Beton Bertulang”. Tujuan penelitian ini adalah untuk Mempelajari perilaku lentur balok yang telah dilapisi dengan GFRP dari masing-masing produk, yaitu produk A dan Produk B dan membandingkan masing – masing peningkatan kekuatan atau kesanggupan dalam memikul beban terhadap

pemakaian GFRP dari dua produk yang berbeda. Kesimpulan dari penelitian ini adalah sebagai berikut ini:

- a. Terjadinya peningkatan kekuatan pada balok normal setelah dilakukan pelapisan(perkuatan) dengan GFRP satu lapis, yaitu pada produk A sebesar 10,72 % dan pada produk B terjadi peningkatan kekuatan sebesar 24,15 %.
- b. Dari hasil penelitian dengan perlakuan yang sama maka dapat diperoleh hasil bahwa GFRP dari produk B lebih unggul dari produk A, karena dapat memberikan peningkatan kekuatan lebih besar yaitu 24,15%.

4. Pengaruh Penggunaan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* Sebagai Bahan Pengganti Baja Tulangan Terhadap Kuat Lentur Beton.

Penelitian ini disusun oleh Amartya Rizki Ananda (2021) dengan judul “Pengaruh Penggunaan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* Sebagai Bahan Pengganti Baja Tulangan Terhadap Kuat Lentur Beton”. Penelitian ini bertujuan Mengetahui perilaku lekatan CFRP terhadap beton sebagai bahan pengganti baja tulangan pada beton bertulang, memahami pengaruh CFRP sebagai bahan pengganti baja tulangan pada beton bertulang terhadap berat volume balok dan memahami pengaruh CFRP sebagai bahan pengganti baja tulangan pada beton bertulang terhadap kuat lentur balok. Kesimpulan dari penelitian ini adalah sebagai berikut ini:

- a. Nilai tegangan lekatan yang diperoleh dari hasil pengujian pull out ialah sebesar 0,3437 MPa. Secara visual, benda uji mengalami putusnya tulangan CFRP tanpa terjadi keruntuhan lekatan yang dikarenakan kegagalan material.
- b. Hasil pengujian berat balok yang telah dilakukan ialah terjadinya penurunan berat volume pada balok variasi dimana nilainya yang paling besar hingga mencapai 4,8516% dari rata-rata berat volume balok kontrol dikarenakan nilai berat jenis dari CFRP yang kecil. Hal ini berarti CFRP dapat memberikan pengaruh terhadap berat balok beton bertulang berupa penurunan berat volume. Pola keruntuhan yang terjadi pada balok uji adalah terjadinya debonding failure yaitu lepasnya ikatan antara beton

dengan Pelat Baja “*stripplat*” sehingga dapat dikatakan bahwa material komposit tersebut belum bisa bekerja secara optimal. Hal tersebut dapat terjadi karena beberapa kemungkinan antara lain diakibatkan karena pelat baja yang “*stripplat*” yang terlalu tebal, proses pengerjaan perkuatan yang belum maksimal dan pembuatan balok beton bertulang yang tidak sesuai perencanaan.

- c. Pada pengujian kuat lentur balok beton yang telah dilaksanakan menghasilkan nilai penurunan kekuatan kuat lentur beton pada BV I sebesar 40,0764% dan sebesar 44,4145% pada BV II jika dibandingkan dengan rerata nilai kuat lentur beton balok kontrol. Hal ini dikarenakan CFRP yang putus terjadi secara satu-per satu, yang disebabkan oleh ketidakseimbangan kekuatan CFRP dalam sebuah balok. Selain itu, secara visual yang dapat diperhatikan ialah peristiwa keruntuhan beton yang terjadi secara tiba-tiba, sehingga dapat membahayakan bagi manusia. Menurut perhitungan anggaran biaya, penelitian ini menghabiskan total Rp3.100.000,00 untuk membuat sampel balok dan perkuatannya. Sedangkan harga 1 buah balok adalah Rp316.000,00 dan harga perkuatan Pelat Baja “*stripplat*” per balok adalah Rp606.000,00.

Tabel 2. 1 Perbandingan Penelitian

Peneliti	Malikul (2017)	Yusfar (2018)	Ananda (2020)	Alami (2021)	Hanifardhi (2024)
Judul	Uji Eksperimental Pengaruh <i>Glass Fibre Reinforced Polymer (GFRP)</i> Terhadap Perkuatan Senggang Kolom Beton Bertulang	Analisa Pengaruh Perkuatan Dengan <i>Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)</i> Pada Struktur Balok Beton Bertulang	Pengaruh Penggunaan <i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i> Sebagai Bahan Pengganti Tulangan Terhadap Kuat Lentur Beton	Perkuatan Lentur Balok Beton Bertulang Dengan <i>Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)</i> .	Pengaruh Penggunaan Glass Fiber Reinforced Polymer (Gfrp) Jenis Woven Roving 200 Dalam Perkuatan Balok Beton Bertulang

Lanjutan Tabel 2. 1 Perbandingan Penelitian

Peneliti	Malikul (2017)	Yusfar (2018)	Ananda (2020)	Alami (2021)	Hanifardhi (2024)
Tujuan	Mengetahui perilaku kerusakan kolom tanpa perkuatan tulangan sengkang menggunakan GFRP, perilaku kerusakan kolom dengan perkuatan tulangan sengkang menggunakan GFRP, beban maksimal yang dapat diterima kolom beton bertulang setelah diperkuat (<i>strengthening</i>) dengan GFRP, dan pengaruh GFRP terhadap perkuatan sengkang sebagai pengekang pada kolom.	Analisa Pengaruh Perkuatan Dengan <i>Glass Fiber Reinforced Polymer</i> (GFRP) Pada Struktur Balok Beton Bertulang.mempelajari perilaku lentur balok yang telah dilapisi dengan GFRP dari masing-masing produk, yaitu produk A dan Produk B dan membandingkan masing – masing peningkatan kekuatan atau kesanggupan dalam memikul beban terhadap pemakaian GFRP dari dua produk yang berbeda	Mengetahui dampak penggantian tulangan baja dengan CFRP terhadap kuat lentur, lekatan, dan berat volume balok beton bertulang.	Untuk mengetahui dampak GFRP dalam memperkuat lentur balok.	Untuk mengetahui pengaruh dan efektifitas GFRP untuk perkuatan struktur dengan tingkat kerusakan yang berbeda-beda. Tujuan ini bertujuan untuk mengevaluasi seberapa baik kinerja GFRP dalam meningkatkan kuat lentur struktur yang rusak.
Parameter	Kuat Tekan dan Kuat Geser	Kuat Lentur dan kuat lentur Penguatan GFRP	Kuat Lentur, berat volume beton, dan lekatan CFRP.	Kuat desak, kuat belah, dan kuat lentur.	Kuat Lentur Menggunakan Lembaran GFRP

Lanjutan Tabel 2. 1 Perbandingan Penelitian

Peneliti	Malikul (2017)	Yusfar (2018)	Ananda (2020)	Alami (2021)	Hanifardhi (2024)
Bahan Tambah	<i>Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)</i> menyelimuti di Kolom.	<i>Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)</i> dilapisi di balok.	<i>Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)</i> dengan ukuran dan jumlah tertentu yang direncanakan hampir menyerupai baja tulangan	<i>Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)</i> dalam bentuk lembar.	<i>Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) Woven Roving 200 (WR200)</i> dibagian bawah lentur balok.

Lanjutan Tabel 2. 1 Perbandingan Penelitian

Peneliti	Malikul (2017)	Yusfar (2018)	Ananda (2020)	Alami (2021)	Hanifardhi (2024)
Metode	<p>Pembuatan kolom beton bertulang, dilanjutkan Perakitan tulangan Kolom serta Pemasangan <i>strain gauge</i> pada tulangan, Pembuatan pola untuk kolom perkuatan GFRP, Pemasangan FRP Tyfo SHE-51A, Pengaturan posisi benda uji, LVDT, <i>strain gauge</i>, dan <i>load cell</i>, instalasi sensor LVDT, <i>strain gauge</i> dan <i>load cell</i> ke data <i>logger</i>, dilanjutkan kalibrasi sensor dan uji kolom dapat dilakukan.</p>	<p>Bahan uji dibuat sesuai desain rencana setelah sampai umurnya kita kan uji karakteristiknya untuk memastikan memenuhi syarat yang direncanakan, apabila telah memenuhi syarat maka akan kita cetak balok beton sesuai dengan dimensi dan setelah umur beton cukup maka kita akan <i>seting up</i> peralatan, untuk sampel balok yang akan dilapisi GFRP akan kita lapisi dulu dengan standar dari produk masing – masing.</p>	<p>Sebanyak 11 balok beton bertulang berukuran 200 x 300 x 2000 mm diuji, terdiri dari 3 balok kontrol dengan tulangan baja 3P10, 4 balok Variasi I (BVI) dengan 3 tulangan CFRP di bawah, dan 4 balok Variasi II (BVII) dengan 3 tulangan CFRP di bawah serta 2 tulangan baja 2P10 di atas. Pengujian akan mencakup berat, kuat lentur beton, dan <i>pull-out</i> pada kubus dengan tulangan CFRP untuk menguji lekatan CFRP terhadap beton.</p>	<p>Empat balok uji berukuran 20 cm x 30 cm x 300 cm dibuat, terdiri dari satu tanpa perkuatan dan tiga dengan 1, 2, dan 3 lapis GFRP. Balok dilengkapi <i>strain gauge</i> pada baja dan GFRP, menggunakan beton $f'c = 26,16$ MPa dan baja tulangan polos $f_y = 240$ MPa. Tulangan 2Ø12 dipasang untuk tarik dan tekan, dengan sengkang 2Ø12-225 di sepertiga bentang balok. Perekat Tyfo S (komponen A dan B) digunakan dengan rasio 2:1, dan GFRP tipe SEH51 dipilih karena kekuatan tariknya tinggi.</p>	<p>Pembuatan bahan uji dilakukan sesuai dengan desain rencana, menguji karakteristik agar memenuhi syarat yang telah direncanakan sebelumnya, setelah bahan uji cukup umur beton, setelah cukup umur beton bahan uji dilapisi menyeluruh dengan GFRP sesuai standar kemudian melakukan setting bahan uji ke alat uji dan menghitung balok bahan uji tersebut.</p>

Lanjutan Tabel 2. 1 Perbandingan Penelitian

Peneliti	Malikul (2017)	Yusfar (2018)	Ananda (2020)	Alami (2021)	Hanifardhi (2024)
Hasil	<p>Beban maksimum yang mampu ditahan oleh kolom, untuk benda uji KS (Kolom Standar) sebesar 634,2333 KN, KG1 (Kolom Glass 1) sebesar 847,7563 KN, dan benda uji KG2 (Kolom Glass 2) sebesar 548,9146 KN. Penggunaan GFRP sebagai pengekang pada perkuatan sengkang kolom beton bertulang mampu meningkatkan kapasitas beban aksial kolom tersebut dan kolom tidak mengalami kerusakan pada bagian yang terkekang dengan GFRP.</p>	<p>Terjadinya peningkatan kekuatan pada balok normal setelah dilakukan pelapisan(perkuatan) dengan GFRP satu lapis, yaitu pada produk A sebesar 10,72 % dan pada produk B terjadi peningkatan kekuatan sebesar 24,15 %. Kemudian dari hasil penelitian dengan perlakuan yang sama maka dapat diperoleh hasil bahwa GFRP dari produk B lebih unggul dari produk A, karena dapat memberikan peningkatan kekuatan lebih besar yaitu 24,15%.</p>	<p>Hasil pengujian berat balok yang telah dilakukan ialah terjadinya penurunan berat volume pada balok variasi dimana nilainya yang paling besar hingga mencapai 4,8516% dari rata-rata berat volume balok kontrol dikarenakan nilai berat jenis dari CFRP yang kecil. Hal ini berarti CFRP dapat memberikan pengaruh terhadap berat balok beton bertulang berupa penurunan berat volume.</p>	<p>Model kegagalan pada penelitian ini, untuk balok beton BL ialah keruntuhan lentur dan untuk balok beton BL-1, BL-2 dan BL-3 keruntuhan FRP yang terjadi ialah <i>pilling-off</i> atau pelat GFRP mengelupas.</p>	<p>GFRP jenis <i>Woven Roving</i> 200 berpengaruh terhadap peningkatan kuat lentur balok beton bertulang akan tetapi disaat balok mencapai kekuatan maksimumnya, balok mengalami penurunan perkuatan secara signifikan yang dapat diartikan bahwa balok mengalami deformasi getas. Sehingga penggunaan lembaran GFRP jenis <i>Woven Roving</i> 200 sebagai perkuatan balok beton bertulang efektif meningkatkan kekuatan balok namun kurang efektif apabila melihat dari segi daktilitasnya.</p>

BAB III

LANDASAN TEORI

Agar penelitian yang dilakukan tidak menyimpang maka diperlukan adanya suatu landasan teori supaya hasil yang dicapai dapat dipertanggungjawabkan dan disesuaikan dengan teori-teori dan rumus yang biasa digunakan.

3.1 Beton Bertulang

Beton polos (*plain concrete*) merupakan kombinasi dari semen, agregat halus (pasir), agregat kasar (kerikil), dan air, namun dalam beberapa kasus juga ditambahkan sejenis bahan tambahan (*admixtures*) guna mencapai kondisi yang diinginkan. Bila beton polos (*plain concrete*) tersebut ditambahkan material penguat yang berupa tulangan baja (*rebar*) maka beton tersebut kemudian akan dikenal sebagai beton bertulang (*reinforced concrete*).

Dalam catatan sejarah, teknik seperti beton bertulang sebenarnya sudah digunakan sejak jaman Yunani kuno yang dimana orang-orang pada masa itu membangun *stonework* (bangunan terbuat dari batu) dengan tambahan- tambahan elemen lain sebagai penguat (*reinforcement*). Baru pada pertengahan 1800-an, penggunaan beton bertulang mulai berkembang. Hal ini dapat dilihat dari banyaknya eksperimen yang dilakukan orang-orang dengan menggunakan material beton dan baja tulangan, meskipun pada dasarnya orang-orang tersebut tidak mengetahui perilaku atau perhitungan dari beton bertulang. Seperti halnya yang dilakukan oleh Joseph Monier pada tahun 1867, yang mempraktekkan penggunaan campuran beton dan besi (*iron-reinforced*) untuk membuat *concrete tubes* (tabung beton). Hal itu berlanjut hingga 1880-1881, dimana Joseph Monier memperoleh penghargaan dari pemerintahan Jerman terhadap karyanya berupa *railroad ties*, *water feeding troughs*, *circular flower pots*, *flat plate*, dan *irrigation channels*. Sejak itu semakin banyak orang-orang melakukan percobaan serupa (beton bertulang) sehingga banyak paten yang diusulkan; semisal: paten terhadap

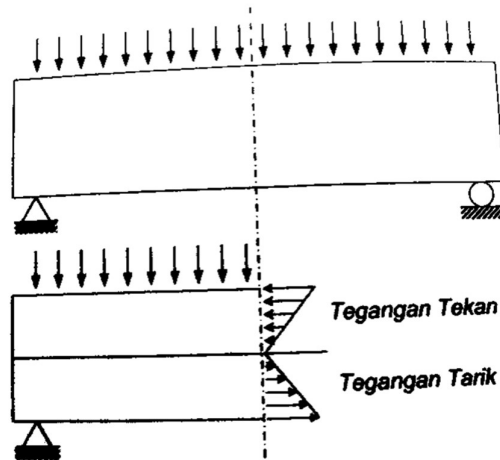
pembuatan pipa dan tangki (1868), pelat datar (1869), jembatan (1873), dan tangga (1875), meskipun pada dasarnya mereka juga tidak memiliki pengetahuan yang cukup dalam hal perhitungan desain.

Thaddeus Hyatt, di Amerika Serikat melakukan uji lentur terhadap 50 benda uji balok beton yang diberi tulangan tarik dari besi serta dipublikasikan di tahun 1877. Hyatt menyimpulkan bahwa beton dan baja dapat diasumsikan berperilaku secara homogen sebagai satu kesatuan. Kesimpulan ini yang menjadi landasan teori elastik dalam perencanaan beton bertulang. Selanjutnya E. L. Ransome dari Concrete Steel Company di San Fransisco, menggunakan beton bertulang pada 1879 serta pertama kali pula memperkenalkan jenis tulangan ulir di tahun 1884. Pada tahun 1902 Ransome menggunakan tulangan spiral untuk kolom, berdasarkan anjuran dari Armand Considere dari Prancis. Pengujian terhadap kuat tekan dan modulus elastisitas beton dilakukan oleh A. N. Talbot, F. E. Turneaure, dan M. O. Whitney. Pada tahun 1928, Eugene Freyssinet memperkenalkan konsep beton prategang, dengan memberikan suatu gaya pratekan di daerah tarik beton untuk mengurangi gejala retak yang besar.

Antara tahun 1915-1935 banyak dilakukan riset terhadap struktur beton bertulang terutama dengan topik kolom dengan beban aksial dan efek rangkai pada beton. Di tahun 1940 dilakukan riset terhadap kolom dengan beban eksentris. Di tahun 1963 *American Concrete Institute Code* (ACI Code) memperkenalkan metode desain berdasarkan konsep kekuatan, yang terus bertahan hingga beberapa tahun terakhir ini.

Beton merupakan material yang kuat dalam menahan tarik. Oleh karena itu, beton dapat mengalami retak jika beban yang dipikulnya menimbulkan tegangan tarik yang melebihi kuat tarik materialnya.

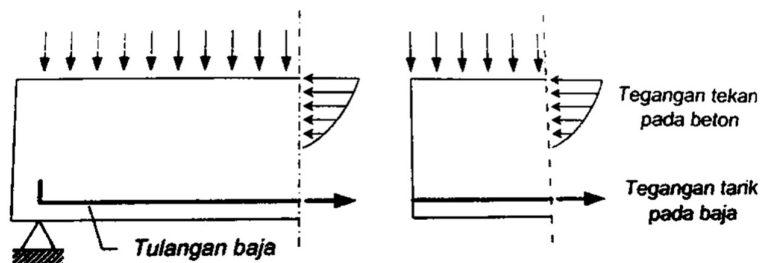
Pada struktur balok beton tanpa tulangan yang tergambar di bawah ini, momen yang timbul akibat beban luar pada dasarnya ditahan oleh kopel gaya-gaya dalam tarik dan tekan. Balok tersebut dapat runtuh secara tiba-tiba dan total jika retak terbentuk pada zona tarik penampang seperti pada Gambar 3.1 berikut ini.



Gambar 3. 1 Distribusi Tegangan pada Penampang sebelum Retak

(Sumber : Iswandi Imran dan Ediansjah Zulkifli, 2019)

Pada balok beton bertulang, tulangan baja ditanam di dalam beton sedemikian rupa sehingga gaya tarik yang dibutuhkan untuk menahan momen pada penampang retak dapat dikembangkan pada tulangan baja Seperti pada Gambar 3.2 berikut ini.



Gambar 3. 2 Distribusi Tegangan pada Penampang Retak

(Sumber : Iswandi Imran dan Ediansjah Zulkifli, 2019)

Jadi, dapat dikatakan di sini bahwa untuk mengatasi kelemahan beton dalam menahan Tarik maka ditambahkan tulangan baja pada bagian penampang balok beton yang berpotensi mengalami Tarik saat balok menahan beban.

3.1.1 Semen

Menurut SNI 2847:2019, semen adalah bahan perekat atau lem yang dapat memberikan perkerasan terhadap material campuran lainnya menjadi suatu bentuk yang kaku dan tahan lama. Semen biasanya digunakan dalam campuran beton, yang terdiri dari semen Portland atau semen hidrolis lainnya, agregat halus, agregat kasar, dan air, dengan atau tanpa bahan tambahan (*adimixture*). Beton ini kemudian mengeras melalui proses hidrasi antara semen dan air, membentuk material yang memiliki kekuatan tekan yang tinggi, tetapi ketahanan terhadap tarik rendah.

Semen atau *hydraulic cement* yang biasa digunakan secara umum pada struktur beton bertulang adalah jenis *portland cement*. Pemberian nama tersebut tidak terlepas dari hasil paten yang diperoleh Joseph Aspdin dari Leeds, Inggris, pada tahun 1824. Beton yang terbuat dari semen portland, setidaknya membutuhkan waktu sekitar 28 hari untuk mencapai kekuatan maksimum. Setelah itu beton bisa digunakan secara maksimal untuk memikul beban yang bekerja.

3.1.2 Agregat kasar dan Halus

Agregat adalah salah satu komponen penting yang menyusun material beton. Komposisi agregat sekitar 75% dari volume beton. Hal ini cukup bisa dimengerti karena dari sisi harga, agregat jauh dibawah harga semen sehingga wajar bila komposisi dalam adonan beton lebih dominan. Dengan jumlah sebanyak itu, tentu properties dari agregat memiliki pengaruh yang cukup besar terhadap properties dari beton. Selain berpengaruh pada kekuatan (*strength*) dan kekakuan (*stiffness*) beton, properties agregat juga sangat mempengaruhi durabilitas dari beton itu sendiri. Agregat yang digunakan dalam campuran beton dibagi menjadi dua, yaitu: agregat halus (*fine aggregate*) berupa pasir dan agregat kasar (*coarse*) berupa batu kerikil. Aturan terkait agregat diatur dalam SNI 2847:2019, Pasal 26.4.1.2; Hal-621. Dalam pasal tersebut, engineer diarahkan untuk merujuk ASTM (*American Society for Testing and Material*) C33M untuk agregat berat normal dan ASTM C330M untuk agregat berat ringan.

Definisi sederhana dari agregat halus adalah material yang memiliki ukuran halus yang bisa lolos dari saringan/ayakan yang berdiameter kurang dari 5 mm. Umumnya yang dimaksud agregat halus dalam campuran beton adalah pasir (*sand*). Sedangkan agregat kasar adalah material yang ukurannya relatif lebih besar yang dimana ukuran maksimumnya tidak boleh melebihi jarak bersih dari tulangan yang berdekatan.

Batu alam biasanya paling umum digunakan sebagai agregat kasar dari beton, yang menyebabkan berat jenis beton menjadi 2.320 kg/m^3 . Ketika beton ditambahkan tulangan sebagai reinforcement, berat normal dari beton menjadi 2.400 kg/m^3 .

Semakin maju teknologi, para ahli berlomba-lomba untuk mengeleminasi kekurangan yang ada pada beton normal. Salah satu kekurangan dari beton normal adalah tingginya berat jenis beton. Hal ini memberikan dampak yang cukup luas terutama dari sisi ekonomi. Oleh karena itu, dikembangkan beton yang memiliki berat jenis yang jauh lebih ringan atau dikenal dengan istilah *Lightweight-Aggregate Concrete*. Beton jenis ini memiliki berat jenis sekitar 300 hingga 1.850 kg/m^3 . Pada dasarnya ada tiga metode yang memungkinkan untuk membuat beton lebih ringan, antara lain: mengganti agregat dengan agregat yang lebih ringan, menambahkan gelembung udara (*air bubbles*) ke dalam mortar, dan menciptakan *No-fines Concrete* dengan memanfaatkan *sand friction* dari agregat.

3.1.3 Kuat Tekan beton

Kuat tekan beton sangat dipengaruhi oleh komposisi material penyusunnya (semen, agregat halus, agregat kasar dan air serta *admixture*). Bila bicara kuat tekan beton (*compressive strength*), yang dimaksud disini adalah hasil nilai dari pengujian tekan *uniaxial* terhadap benda uji silinder.

Umumnya ukuran silinder yang digunakan adalah diameter 150 mm dan tinggi 300 mm. Namun ada juga silinder dengan ukuran diameter 200 mm dan tinggi 400 mm. Nilai dari hasil uji tekan (*compressive strength*) tersebut dijadikan parameter untuk menyatakan mutu dari campuran beton dengan notasi, f_c , (satuan MPa). Umumnya tes uji tekan beton dilakukan saat beton telah berumur 28 hari.

Namun ada beberapa kasus yang dimana benda uji yang digunakan adalah berbentuk kubus dengan panjang sisi 150 mm atau 200 mm, seperti yang terlihat pada Gambar 1.2. Nilai mutu yang digunakan pun sedikit berbeda dibandingkan dengan benda uji silinder. Untuk pengujian dengan menggunakan kubus, notasi kuat tekan yang digunakan umumnya adalah K (satuan kg/cm²), misalnya: Mutu K-100, yang artinya kuat tekan sebesar 100 kg/cm².

3.1.4 Kuat Tarik Beton

Kuat tarik dari beton merupakan salah satu parameter penting dalam desain struktur beton guna memperhitungkan fenomena retak (*crack*) pada struktur beton. Penentuan kuat tarik dari beton biasanya dilakukan dengan *split-cylinder test* yang sesuai dengan ASTM C496M. Benda uji yang digunakan adalah sama dengan yang digunakan dalam uji tekan (Silinder diameter 150 mm dan tinggi 300 mm), namun yang membedakan adalah cara pembebanan selama tes dilakukan. Benda uji silinder akan terbelah setengah bila kekuatan tarik telah tercapai.

3.1.5 Modulus elastisitas beton

Pada dasarnya, besaran modulus elastisitas (E_c) beton bervariasi berdasarkan kekuatan dari beton itu sendiri. Selain itu, besaran modulus elastisitas (E_c) juga dipengaruhi oleh umur beton, properties dari agregat dan semen, laju pembebanan dan tipe/ukuran benda uji. Berdasarkan SNI 2847- 2019; Pasal 19.2.2, besaran modulus elastisitas untuk beton normal dapat diperoleh dengan rumus pendekatan seperti yang terlihat pada persamaan 3.1.

$$E_c = 4700\sqrt{f'_c} \quad (3.1)$$

Modulus elastisitas ini didefinisikan sebagai slope dari garis lurus yang ditarik, dari kondisi tegangan nol ke kondisi tegangan tekan sebesar $0,45f'_c$ pada kurva tegangan-regangan beton.

3.1.6 Slump Test

Slump test adalah metode yang digunakan untuk mengukur konsistensi atau kemudahan aliran beton dalam suatu *batch*. Tes ini dilakukan dengan menggunakan kerucut *slump*, atau *Abrams cone*, yang terbuka di kedua ujungnya. Beton segar dituangkan ke dalam kerucut *slump*, lalu kerucut tersebut diangkat perlahan. Perbedaan antara tinggi kerucut dan tinggi beton yang jatuh diukur sebagai *slump* beton. Berikut adalah beberapa poin penting tentang *slump test*:

- a. *Slump test* dilakukan untuk mengukur *workability* atau *fluiditas* beton segar, sehingga merupakan ukuran kemudahan aliran beton.
- b. Tes ini melibatkan pengisian kerucut *slump* dengan beton segar dalam tiga lapisan. Setiap lapisan beton harus dipukul dengan batang logam berujung bulat sepanjang 2 kaki (600 mm) dan berdiameter 5/8 inci (16 mm).
- c. Jika mengangkat kerucut menyebabkan beton jatuh dan menyebar, tinggi penyebaran tersebut diukur dan disebut sebagai *slump* beton.
- d. *Slump test* digunakan secara luas dalam konstruksi karena memerlukan beberapa peralatan dan prosedur yang sederhana.
- e. Tes ini tidak hanya mengamati konsistensi antar *batch*, tetapi juga mengidentifikasi cacat dalam campuran, memberikan kesempatan kepada operator untuk memperbaiki campuran sebelum dituangkan di lokasi.

3.1.7 Baja Tulangan

Beton memang memiliki kelemahan dalam menahan tegangan tarik, oleh karena itu, dalam prakteknya, beton sering digunakan bersamaan dengan baja tulangan atau kawat baja yang memiliki kekuatan tarik yang baik. Standar Nasional Indonesia (SNI) untuk beton membatasi penggunaan baja tulangan hanya pada baja tulangan atau kawat baja saja dalam elemen beton bertulang.

Ada dua jenis tulangan baja yang umum digunakan di pasaran, yaitu tulangan polos (BJTP) dan tulangan ulir/sirip (BJTS). Tulangan polos biasanya memiliki tegangan leleh minimum sebesar 240 MPa, sedangkan tulangan ulir biasanya memiliki tegangan leleh minimum sebesar 400 MPa. Diameter baja tulangan ulir yang tersedia di pasaran dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Spesifikasi baja tulangan yang umum digunakan antara lain adalah ASTM A 615M (1993a) dan ASTM A 706M (1993b). Kedua spesifikasi ini memberikan standar untuk baja tulangan yang digunakan dalam beton bertulang, termasuk persyaratan untuk komposisi kimia, sifat mekanis, dan dimensi.

Tabel 3. 1 Tulangan Ulir dan Ukurannya

Jenis	Diameter Nominal	Berat per meter
	(mm)	(Kg)
D10	10	0,617
D13	13	1,042
D16	16	1,578
D19	19	2,226
D22	22	2,984
D25	25	3,853
D29	29	5,185
D32	32	6,313
D36	36	7,990

Sumber : Iswandi Imran dan Ediansjah Zulkifli, 2019

3.2 *Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)*

Fiber Reinforced Polymer (FRP), juga dikenal sebagai plastik yang diperkuat serat, adalah material komposit yang terdiri dari matriks polimer yang diperkuat dengan serat. Serat ini biasanya terbuat dari berbagai material, seperti kaca, karbon, atau aramid, meskipun serat lain seperti kertas, kayu, atau asbes kadang-kadang digunakan¹. Matriks polimer biasanya adalah resin *termosetting* seperti *epoxy*, *vinylester*, atau *polyester*, meskipun resin *formaldehida.fenol* masih digunakan. FRP umumnya digunakan dalam industri penerbangan, otomotif, kelautan, dan konstruksi.

Dalam konstruksi, *Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)* atau *fiberglass*, digunakan dalam berbagai aplikasi karena sifatnya yang ringan, tahan korosi, dan

kuat. GFRP menjadi tambahan yang bagus untuk metode konstruksi tradisional seperti beton dan baja. GFRP juga digunakan secara luas untuk rehabilitasi banyak struktur, termasuk dek jembatan, struktur modular, struktur beton, dan struktur pra-cetak.

Berikut beberapa manfaat penggunaan GFRP dalam konstruksi:

1. Biaya

Dibandingkan dengan polimer yang diperkuat serat karbon, GFRP bisa lebih murah dalam beberapa aplikasi. Ini bisa sangat menguntungkan saat menyelesaikan proyek besar, seperti dek jembatan seluruhnya atau struktur beton besar.

2. Tahan Korosi

GFRP secara inheren tahan terhadap korosi. Ini membuatnya menjadi pilihan yang bagus untuk lingkungan yang sangat keras, seperti struktur di garis pantai. Ketahanan terhadap korosi ini membantu pemilik struktur menghemat biaya pemeliharaan dan prosedur pencegahan korosi.

3. Aplikasi

Karena polimer yang diperkuat serat jauh lebih fleksibel daripada metode penguatan beton dan baja tradisional, mereka bisa digunakan pada berbagai desain solusi.

3.3 Perkuatan Balok Beton Bertulang Dengan FRP

Fiber Reinforced Polymer (FRP) adalah material komposit yang terdiri dari matriks polimer yang diperkuat dengan serat. Serat ini bisa berupa serat karbon, kaca, aramid, atau fiber lainnya. FRP biasanya digunakan dalam bentuk pelat atau lembaran tipis dan digunakan untuk memperkuat struktur.

Berikut adalah tiga prinsip utama penggunaan FRP dalam perkuatan struktur:

1. Meningkatkan kapasitas momen lentur pada balok atau plat dengan menggunakan FRP pada bagian tarik.
2. Meningkatkan kapasitas geser pada balok dengan menambahkan FRP di bagian sisi pada daerah geser.

3. Meningkatkan kapasitas beban aksial dan geser pada balok dengan menambahkan FRP di sekeliling balok.

Ada beberapa keuntungan dan kerugian dalam menggunakan FRP sebagai perkuatan struktur antara lain (Pratama, I Made Yana, 2014):

Keuntungan FRP :

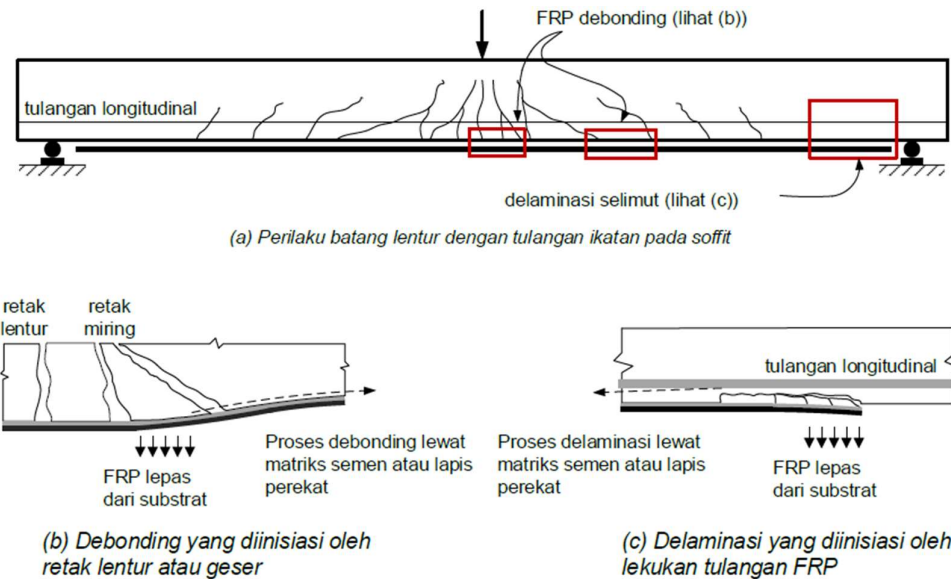
- a. Kuat tarik sangat tinggi.
- b. Material FRP lebih tipis dan lebih ringan dari pada perkuatan baja.
- c. Perkuatan dengan FRP dapat menambah kekuatan lentur dan geser tanpa mempengaruhi berat sendiri struktur.
- d. Tidak mengalami karat.

Kerugian FRP :

- a. Material FRP tidak tahan api sehingga harus dilapisi lapisan tahan kebakaran.
- b. Pemasangan FRP memerlukan biaya yang relatif mahal.
- c. Material FRP tidak tahan terhadap sinar ultraviolet sehingga diperlukan pelapisan atau penutupan dengan mortal pada bagian yang langsung terkena sinar ultraviolet.

Perkembangan dalam teknologi material komposit *Fiber Reinforced Polymer* (FRP) telah menciptakan kesempatan baru dalam bidang perbaikan dan penguatan struktur beton bertulang. Ada tiga jenis utama FRP yang dibedakan berdasarkan jenis serat yang digunakan, yaitu *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (dengan serat karbon), *Glass Fiber Reinforced Polymer* (dengan serat kaca), dan *Aramid Fiber Reinforced Polymer* (dengan serat aramid).

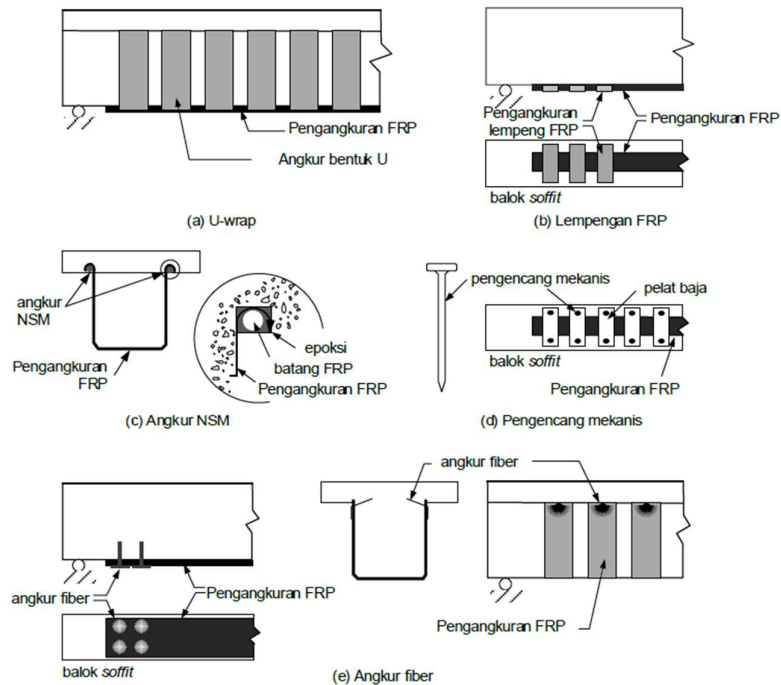
Pada saat pemasangan FRP dapat mengalami berbagai masalah seperti Delaminasi selimut atau terlepasnya lekatan FRP (debonding) terjadi jika gaya yang terjadi dalam FRP tidak dapat ditahan oleh beton pada daerah lekatan FRP dan beton dapat dilihat pada Gambar 3.3. Peristiwa ini dikenal dengan debonding, dan tidak memperhatikan daerah dimana proses kehilangan lekatan terjadi.



Gambar 3. 3 Proses *debonding* dan delaminasi sistem FRP eksternal

(Sumber : SNI 8971:2021)

Sistem angkur seperti balutan U, penyambung mekanis, angkur serat dan angkur-U terbukti dapat menghambat, dan kadang bahkan mencegah debonding dari FRP memanjang, contoh dapat dilihat dalam bagan Gambar 3.4. Penelitian lain menunjukkan bahwa sistem angkur ini dapat meningkatkan regangan efektif pada FRP lentur bahkan sampai batas runtuh tarik FRP. (Lee et al. 2010; Orton et al. 2008)



Gambar 3. 4 Sistem ankur FRP

(Sumber : SNI 8971:2021)

3.4 Balok Dengan FRP

Tata cara perhitungan beban maksimum yang dapat dipikul balok dengan FRP telah diatur dalam *ACI Committee 440* yaitu sebagai berikut :

Kapasitas momen nominal perkuatan lentur dengan menggunakan FRP dapat dihitung dengan rumus :

$$M_n = [A_s f_s (d - a/2) + A_s' f_s' (d-d') + \Psi f T_{Fe} (h-a/2)] \quad (3.2)$$

dimana :

- b = lebar balok
- y = letak titik penampang
- n = nilai perbandingan E_s/E_c
- A_s = luas tulangan tarik

- A_s' = luas tulangan tekan
 d = Jarak serat tarik terluar terhadap tulangan
 d' = jarak serat tekan terluar terhadap tulangan

3.5 Perencanaan Campuran Beton (*Mix Design*)

Perencanaan komposisi campuran beton dalam penelitian ini mengacu pada SNI 03-2843-2000. Berikut adalah langkah-langkah yang terlibat dalam perencanaan campuran beton (*mix design*).

a. Kuat tekan rencana

Kuat tekan rata-rata yang ditargetkan dihitung menurut rumus berikut.

$$F_{cr} = f_{c'} + M \quad (3.5)$$

dimana :

$$M = 1,64 \times S_r \quad (3.6)$$

dengan :

f_{cr} = kuat tekan rata-rata rencana (mPa)

$f_{c'}$ = kuat tekan rencana (mPa)

M = nilai tambah

1,64 = tetapan statistik

S_r = deviasi standar rencana

Nilai deviasi standar rencana dapat dilihat pada Tabel 3.2 berikut.

Tabel 3. 2 Faktor Pengali Deviasi Standar

Jumlah Pengujian	Faktor Pengali Deviasi Standar
Kurang dari 15	Lihat butir 4.2.3.1 1) (5)
15	1,16
20	1,08
25	1,03
30 atau lebih	1,00

Sumber : SNI 03-2834-2000

Dengan catatan untuk jumlah benda uji kurang dari 15 buah, maka nilai f_{cr} tidak kurang dari $(f_c' + 12)$ MPa.

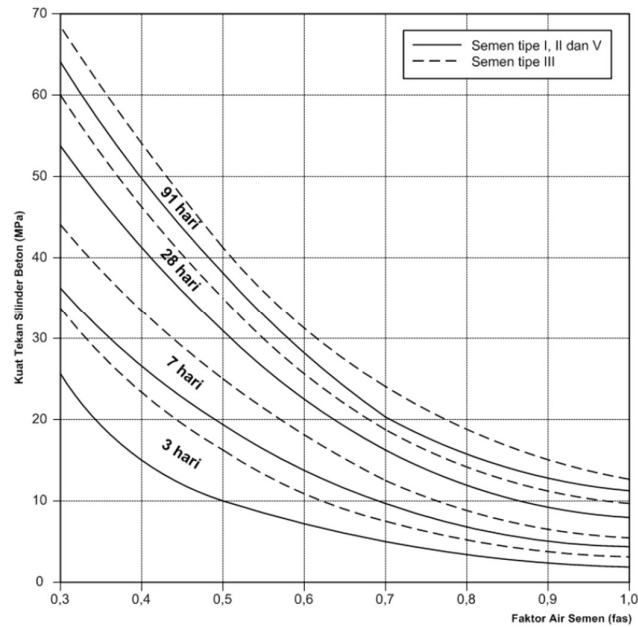
b. Faktor Air Semen (FAS)

Hubungan antara kuat tekan dan faktor air semen dapat dianalisis dengan memeriksa Tabel 3.3 dan Grafik Gambar 3.5 yang terdapat dalam penelitian ini.

Tabel 3. 3 Perkiraan Kekuatan Tekan

Jenis semen ...	Jenis agregat Kasar	Kekuatan tekan (MPa)					
		Pada umur (hari)				Bentuk	
		3	7	28	29	Bentuk uji	
Semen Portland Tipe I	Batu tak dipecahkan	17	23	33	40	Silinder	
	Batu pecah	19	27	37	45		
Semen tahan sulfat Tipe II, V	Batu tak dipecahkan	20	28	40	48	Kubus	
	Batu pecah	25	32	45	54		
Semen Portland tipe III	Batu tak dipecahkan	21	28	38	44	Silinder	
		25	33	44	48		
	Batu tak dipecahkan	25	31	46	53	Kubus	
		30	40	53	60		

Sumber : SNI 03-2834-2000



Gambar 3. 5 Grafik Hubungan Antara Kuat Tekan dan Faktor Air Semen

(Sumber : SNI 03-2834-2000)

c. Kadar Air Bebas

Nilai *slump* ditetapkan sesuai dengan keadaan pelaksanaan pekerjaan agar beton mudah dituang, dipadatkan, dan diratakan. Selanjutnya, kadar air bebas dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

$$\text{Kadar air bebas} = \frac{2}{3} Wh + \frac{1}{3} Wk \quad (3.7)$$

Dengan :

Wh = perkiraan jumlah air untuk agregat halus

Wk = perkiraan jumlah air untuk agregat kasar

Untuk nilai Wh dan Wk dapat dilihat pada Tabel 3.4 berikut.

Tabel 3. 4 Perkiraan Kadar Air Bebas (kg/m³)

Slump (mm)		0-10	10-30	30-60	60-180
Ukuran besar butir agregat maksimum	Jenis agregat	---	---	---	---
10	Batu tak dipecahkan	150	180	205	225
	Batu pecah	180	205	230	250
20	Batu tak dipecahkan	135	160	180	195
	Batu pecah	170	190	210	225
40	Batu tak dipecahkan	115	140	160	175
	Batu pecah	155	175	190	205

Sumber : SNI 03-2834-2000

d. Kadar semen

Kadar semen dapat ditentukan dengan rumus berikut.

$$\text{Kadar Semen} = \frac{\text{Kadar air bebas}}{\text{faktor air semen}} \quad (3.8)$$

Selanjutnya, kita menetapkan persyaratan jumlah semen minimum dan faktor air semen maksimum. Jika jumlah semen berubah karena lebih kecil dari jumlah semen minimum atau lebih besar dari jumlah semen maksimum yang telah ditentukan, maka faktor air semen harus diperhitungkan ulang.

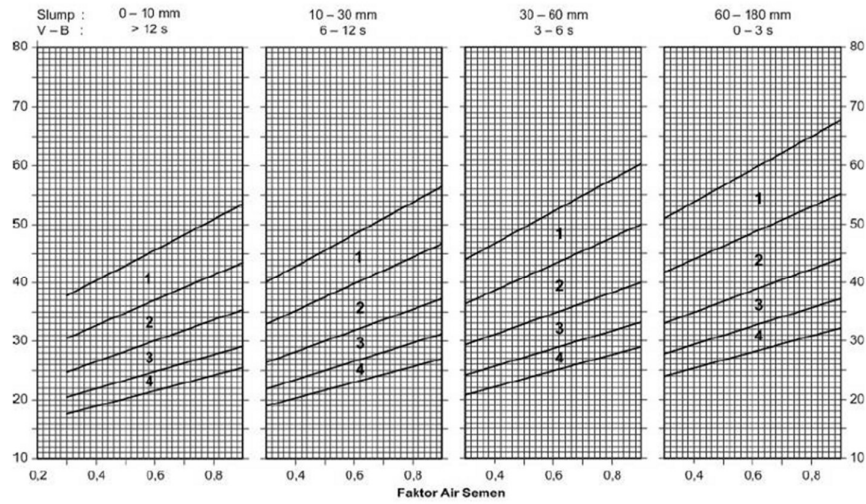
Tabel 3. 5 Persyaratan Minimum Jumlah Semen dan Nilai FAS Maksimum

Lokasi ---	Jumlah Semen minimum Per m ³ beton (kg)	Nilai Faktor Air- Semen Maksimum
Beton di dalam ruang bangunan:		
a. keadaan keliling non-korosif	275	0,60
b. keadaan keliling korosif disebabkan oleh kondensasi atau uap korosif	325	0,52
Beton di luar ruangan bangunan:		
a. tidak terlindung dari hujan dan terik matahari langsung	325	0,60
b. terlindung dari hujan dan terik matahari langsung	275	0,60
Beton masuk ke dalam tanah:		
a. mengalami keadaan basah dan kering berganti-ganti	325	0,55
b. mendapat pengaruh sulfat dan alkali dari tanah		Lihat Tabel 5
Beton yang kontinu berhubungan:		
a. air tawar		
b. air laut		Lihat Tabel 6

Sumber : SNI 03-2834-2000

e. Kadar Agregat Halus

Persentase agregat halus dihitung berdasarkan data *slump* dan FAS, serta mempertimbangkan gradasi butir agregat halus. Selanjutnya, persentase agregat halus dapat ditentukan dengan mengacu pada grafik Gambar 3.6 dalam penelitian ini.



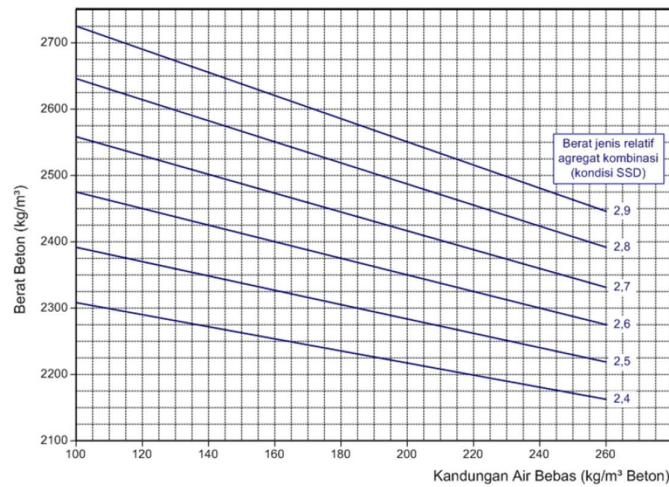
Grafik 4 : Persen Pasir terhadap Kadar Total Agregat yang dianjurkan
Untuk ukuran butir maksimum 20 mm

Gambar 3. 6 Grafik Persentase Agregat Halus

(Sumber : SNI 03-2834-2000)

f. Berat Isi beton

Berat isi beton ditentukan dengan mengacu pada grafik Gambar 3.10 dalam penelitian ini, berdasarkan kadar air bebas dan berat jenis relatif dari agregat gabungan.



Gambar 3. 7 Grafik Berat Isi Beton

(Sumber : SNI 03-2834-2000)

g. Komposisi material

Setelah mengetahui berat air dan berat semen yang digunakan, serta berat isi beton, kita dapat menghitung berat agregat gabungan. Dengan demikian, dari nilai persentase dan berat yang sudah diketahui, kita dapat menentukan berat masing-masing material atau komponen penyusun beton dalam 1 m³ campuran beton.

3.6 Berat Volume Beton

Berat volume atau berat isi beton (*unit weight*), menurut SNI 1973:2008, adalah perbandingan antara berat suatu benda dengan satuan volume benda tersebut. Berat volume dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$D = \frac{m}{V} \quad (3.10)$$

Dengan :

D = berat volume (kg/m³)

m = berat benda (kg)

V = volume benda (m³)

Biasanya, berat isi teoritis beton ditentukan di laboratorium dan nilainya diasumsikan tetap untuk semua campuran yang dibuat dengan komposisi dan bahan yang identik. Nilai ini diperoleh dari pengujian dan analisis material beton.

Menurut *American Concrete Institute* (ACI), beton dapat diklasifikasikan berdasarkan berat volumenya seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.6 berikut.

Tabel 3. 6 Klasifikasi Beton Berdasarkan Berat Volume

Klasifikasi	Berat Volume Beton (kg/m ³)
Beton ultra ringan	300 – 1100
Beton ringan	1100 – 1600
Beton ringan struktural	1450 – 1900
Beton normal	2100 - 2550
Beton berat	2900 - 6100

Sumber : *American Concrete Institute* (ACI)

3.7 Kuat Tekan Beton

Kuat tekan beton mengacu pada besarnya beban per satuan luas yang menyebabkan benda uji beton hancur ketika diberi gaya tekan tertentu oleh mesin tekan. Kekuatan tekan beton merupakan sifat terpenting dalam kualitas beton, lebih penting daripada sifat-sifat lainnya. Beberapa hal yang perlu diperhatikan tentang kekuatan tekan beton adalah komposisi bahan, pengaruh air, dan kelebihan air. Semua faktor ini harus dipertimbangkan dengan cermat dalam desain campuran beton agar memenuhi persyaratan kekuatan dan kualitas yang diinginkan.

Cara menentukan nilai kuat tekan beton :

$$f'_c = \frac{P}{A} \quad (3.11)$$

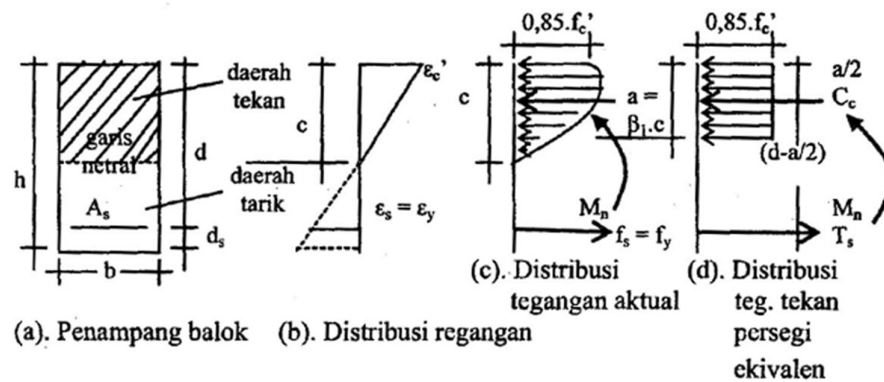
Dengan :

- f'_c = Kuat tekan beton (MPa)
 A = luas penampang benda uji (mm^2)
 P = beban tekan (N)

3.8 Kuat Lentur Beton

Beban yang bekerja pada struktur, termasuk beban gravitasi, beban angin, perubahan temperatur, dan susut, mengakibatkan lentur dan deformasi pada elemen struktur. Pada balok, fenomena lentur terjadi karena adanya regangan yang timbul akibat regangan luar.

Tegangan lentur merupakan hasil dari momen lentur luar. Tegangan ini hampir selalu menentukan dimensi geometris penampang beton bertulang. Proses desain yang mencakup pemilihan dan analisis penampang biasanya dimulai dengan memastikan pemenuhan syarat terhadap lentur, kecuali untuk komponen struktur yang khusus seperti pondasi. Setelah itu, faktor-faktor lain seperti kapasitas geser, defleksi, retak, dan panjang penyaluran tulangan dianalisis hingga memenuhi persyaratan. Ilustrasi distribusi regangan dan tegangan untuk balok tulangan tunggal dapat dilihat pada Gambar 3.8 di bawah ini.



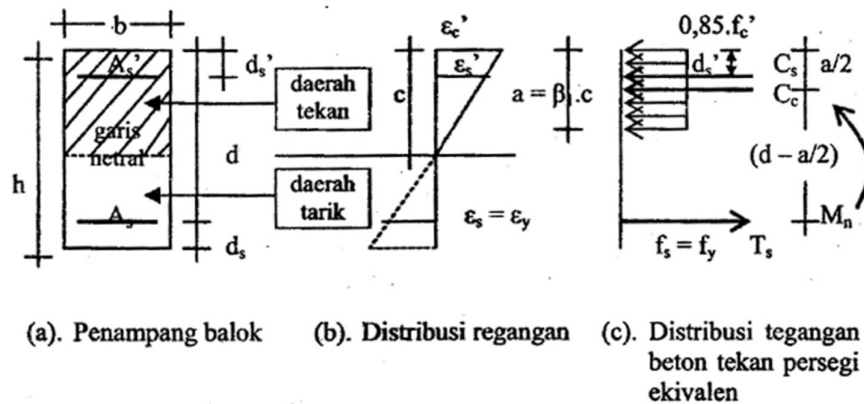
Gambar 3. 8 Distribusi Regangan dan Tegangan pada Balok Tulangan Tunggal

(Sumber : Asroni, 2010)

Keterangan notasi pada Gambar 3.13 di atas adalah sebagai berikut.

- a = tinggi blok tegangan beton tekan persegi ekuivalen (mm)
- A_s = luas tulangan tarik (mm^2)
- b = lebar penampang balok (mm)
- c = jarak antara garis netral dan tepi serat beton tekan (mm)
- C_c = gaya tekan beton (kN)
- d = tinggi efektif penampang balok (mm)
- d_s = jarak antara titik berat tulangan tarik dan tepi serat beton tarik (mm)
- E_s = modulus elastisitas baja tulangan (200.000 MPa)
- f_c' = tegangan tekan beton yang disyaratkan pada umur 28 hari (MPa)
- f_s = tegangan tarik baja tulangan (MPa)
- f_y = tegangan tarik baja tulangan pada saat leleh (MPa)
- h = tinggi penampang balok (mm)
- M_n = momen nominal aktual (kNm)
- T_s = gaya tarik baja tulangan (kN)
- β_1 = faktor pembentuk blok tegangan beton tekan persegi ekuivalen, yang nilainya bergantung pada mutu beton
- ϵ_c' = regangan tekan beton, dengan ϵ_c' maksimal (ϵ_{cu}') = 0,003
- ϵ_s = regangan tarik baja tulangan
- ϵ_y = regangan tarik baja tulangan pada saat leleh.

Tulangan longitudinal yang mengalami tarik maupun tekan pada balok ditempatkan sejajar dengan sumbu balok. Biasanya, tulangan tarik dipasang lebih banyak daripada tulangan tekan. Untuk perhitungan pada balok persegi panjang dengan tulangan rangkap, berikut ini adalah gambar penampang balok yang dilengkapi dengan distribusi regangan dan tegangan beton seperti yang terlihat pada Gambar 3.9.



Gambar 3. 9 Distribusi Regangan dan Tegangan pada Balok Tulangan Rangkap

(Sumber : Asroni, 2010)

Pada perencanaan beton bertulang, diusahakan kekuatan beton dan baja agar dimanfaatkan dengan sebaik-baiknya. Untuk beton, karena sangat kuat menahan beban tekan, maka dimanfaatkan kuat tekan beton jangan sampai melebihi batas runtuh pada regangan tekan beton maksimal, yaitu nilai $\epsilon_{cu}' = 0,003$. Sedangkan untuk baja tulangan Tarik yang tertanam di dalam beton, dapat dimanfaatkan kekuatan sepenuhnya sampai mencapai batas leleh, yaitu nilai tegangan Tarik baja (f_s) sama dengan tegangan leleh (f_y).

Gaya tekan pada beton dapat dihitung berdasarkan hubungan antara tegangan dan regangan beton seperti yang terlihat pada Gambar 3.12. Karena gaya merupakan hasil perkalian antara tegangan dan luas penampang, kita dapat menghitung besar gaya tekan beton (C_c) sebagai berikut:

$$C_c = 0,85 \times f_c' \times a \times b \quad (3.12)$$

Gaya tarik pada baja tulangan (T_s) dapat dihitung dengan mengalikan luas penampang baja tulangan dengan tegangan lelehnya. Rumusnya adalah sebagai berikut:

$$T_s = A_s \times f_y \quad (3.13)$$

Dari grafik distribusi tegangan-regangan di atas, terlihat bahwa besar gaya tekan beton (C_c) sama dengan gaya tarik baja tulangan (T_s), dan kedua gaya tersebut berlawanan arah dengan jarak sebesar $(d - a/2)$. Arah gaya tekan beton (C_c) berada di sebelah atas ke kiri, sedangkan arah gaya tarik baja tulangan (T_s) berada di sebelah bawah ke kanan, sehingga membentuk momen kopel (disebut juga momen nominal aktual atau M_n). Momen ini dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$M_n = C_c \times (d - a/2) \text{ atau} \quad (3.14)$$

$$M_n = T_s \times (d - a/2) \quad (3.15)$$

Dari rumus di atas, kita dapat menyimpulkan bahwa nilai gaya tekan beton (C_c) sama dengan nilai gaya tarik baja tulangan (T_s). Dengan demikian, kita dapat menghitung tinggi blok tegangan tekan beton persegi (a) sebagai berikut:

$$C_c = T_s \quad (3.16)$$

$$0,85 \times f'_c \times a \times b = A_s \times f_y \quad (3.17)$$

Maka,

$$a = \frac{A_s \times f_y}{0,85 \times f'_c \times b} \quad (3.18)$$

Kemudian, dilanjutkan dengan menghitung nilai momen rencana (M_r).

$$M_n = T_s \times (d - a/2) \quad (3.19)$$

$$M_r = \phi \times M_n \quad (3.20)$$

Dimana nilai faktor reduksi kuat lentur (ϕ) diperoleh dengan menghitung nilai ϵ_t yaitu nilai regangan dari tulangan terluar.

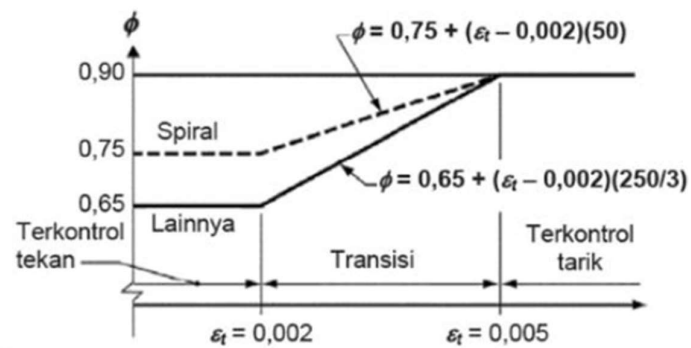
$$\epsilon_t = \frac{d_t - c}{c} \times 0,003 \quad (3.21)$$

dengan,

ϵ_t = nilai regangan tulangan terluar

d_t = jarak antara titik berat tulangan tarik terluar dan tepi serat beton tarik (mm)

c = jarak antara garis netral dan tepi serat beton tekan (mm)



Gambar 3. 10 Faktor Reduksi Kuat Lentur

(Sumber : SNI 2847:2013)

Pada perencanaan beton bertulang, regangan tekan beton (ϵ_c') sebesar 0,003.

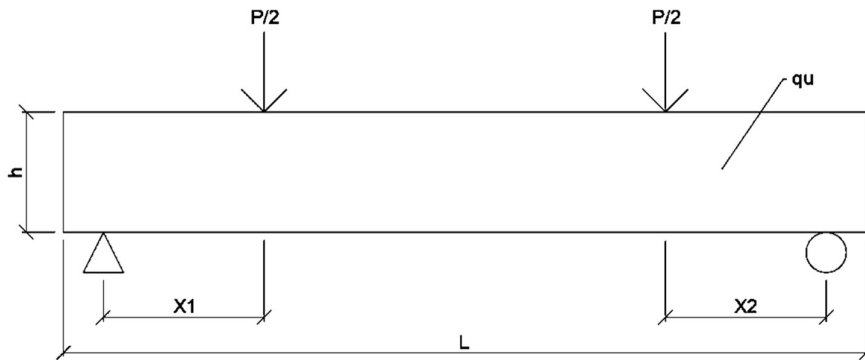
$$\frac{\epsilon_c'}{c} = \frac{\epsilon_y}{d-c} \quad (3.22)$$

$$\epsilon_c' = \frac{c}{d-c} \times \epsilon_y \text{ atau} \quad (3.23)$$

$$\epsilon_c' = \frac{a}{\beta_1 \times d - a} \times \epsilon_y \quad (3.24)$$

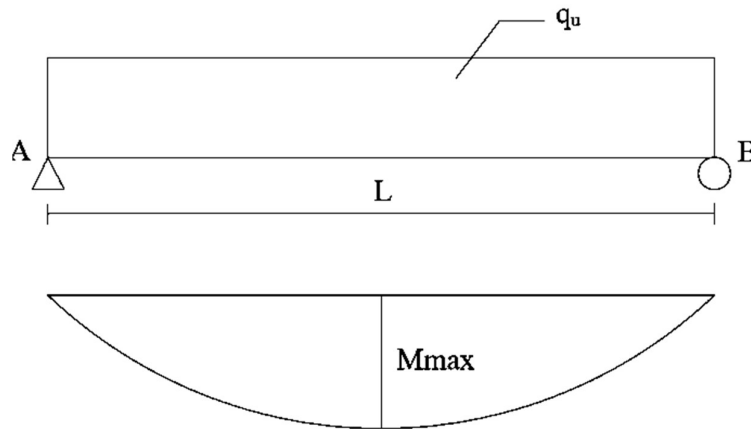
Dimana nilai regangan tekan beton (ϵ_c') harus lebih kecil dari 0,003.

Pada pengujian yang dilaksanakan, *setting up* benda uji untuk pengujian kuat lentur balok akan tampak seperti pada Gambar 3.11 di bawah ini.



Gambar 3. 11 Pembebanan Benda Uji Balok Beton

Gambar 3.112 di bawah ini menggambarkan diagram momen lentur (*bending moment diagram*) dari beban merata atau gaya akibat beban sendiri yang bekerja pada balok beton.



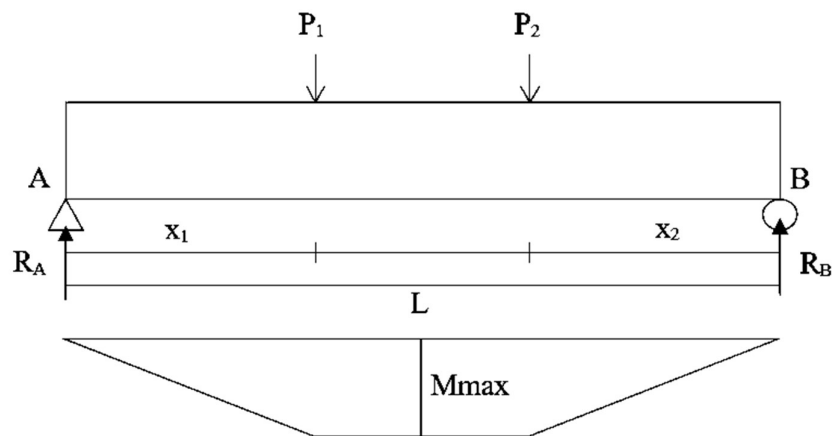
Gambar 3. 12 Bending Moment Diagram dari Gaya Akibat Beban Sendiri

Sehingga, untuk menghitung nilai momen maksimum dari gaya yang bekerja seperti gambar di atas, digunakan rumus seperti pada persamaan 3.25 ini.

$$M_{max} = \frac{1}{8} \times q_u \times L^2 \quad (3.25)$$

$$q_u = \frac{W}{L \text{ balok}} \quad (3.26)$$

Sedangkan pada Gambar 3.13 ini menunjukkan *bending moment diagram* dari gaya yang bekerja pada saat pengujian.

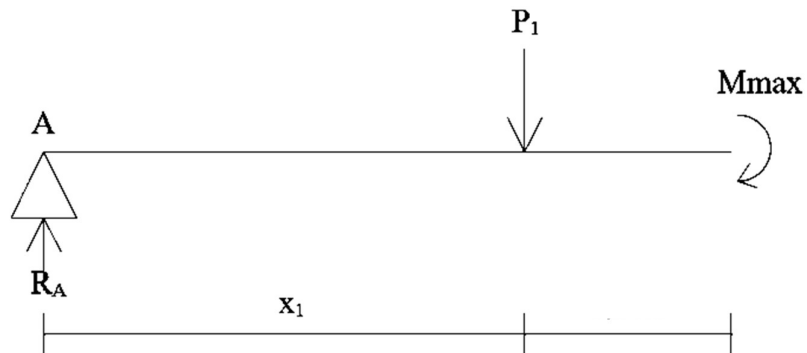


Gambar 3. 13 *Bending Moment Diagram* dari Gaya Akibat Pengujian

Dari gambar di atas, diperoleh rumus untuk memperoleh nilai R_A ialah seperti yang ditunjukkan pada persamaan 3.27 di bawah ini.

$$R_A = \frac{(P_1 \times (L - x_1)) + (P_2 \times x_2)}{L \text{ balok}} \quad (3.27)$$

Untuk memperoleh nilai momen maksimal dari gaya akibat pengujian ini akan dijelaskan dengan gambar free body diagram seperti yang ditampilkan pada Gambar 3.14 berikut ini.



Gambar 3. 14 Free Body Diagram dari Gaya Akibat Pengujian

Dari penjelasan gambar di atas, maka untuk rumus momen maksimal (M_{max}) dari gaya akibat pengujian dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$M_{max} = (R_A \times (\frac{1}{2} \times L)) - (P_1 \times (\frac{1}{2} \times x_3)) \quad (3.28)$$

Sehingga, rumus akhir momen maksimal (M_{max}) untuk pengujian yang dilakukan dapat dihitung dengan persamaan 3.28 di bawah ini.

$$M_{max} = (\frac{1}{8} \times q_u \times L^2) + [(R_A \times (\frac{1}{2} \times L)) - (P_1 \times (\frac{1}{2} \times x_3))] \quad (3.29)$$

dengan :

P_1 = P_2 = beban maksimum dari hasil pengujian (kN)

q_u = beban merata (kN/m)

W = berat balok (kN)

x_1 = jarak dari tumpuan ke titik pembebanan sebelah kiri (m)

x_2 = jarak dari tumpuan ke titik pembebanan sebelah kanan (m)

x_3 = jarak antara beban P_1 dan P_2

L = jarak dari tumpuan kiri ke tumpuan kanan (m)

L_{balok} = jarak fisik balok (m)

R_A = reaksi di titik A (kN)

BAB IV

METODOLOGI PENELITIAN

4.1 Tinjauan Umum

Metode penelitian, yang juga dikenal sebagai metode ilmiah, merupakan serangkaian prosedur atau tahapan yang digunakan untuk memperoleh pengetahuan ilmiah. Proses ini melibatkan pengumpulan, analisis, dan identifikasi variabel penelitian. Penelitian dilakukan melalui metode eksperimental yang dijalankan di laboratorium.

4.2 Teknik Pengumpulan Data

Pengumpulan data dijalankan untuk memfasilitasi analisis terhadap penggunaan GFRP sebagai tulangan dalam meningkatkan kapasitas balok beton. Dua jenis data digunakan dalam penelitian ini, yakni data primer dan data sekunder.

1. Data Primer

Dalam konteks penelitian ini, data primer merujuk pada data yang diperoleh langsung dari hasil pengujian yang dijalankan. Data ini mencakup catatan pembebanan maksimum pada setiap pengujian, data mengenai berat balok beton, pola retak pada balok, lendutan yang terjadi dan sebagainya.

2. Data Sekunder

Data sekunder merujuk pada informasi yang diperoleh secara tidak langsung melalui sumber-sumber seperti buku, catatan, bukti yang sudah ada, atau arsip, baik yang telah dipublikasikan maupun belum. Dalam konteks penelitian ini, data sekunder yang digunakan mencakup Standar Nasional Indonesia (SNI), *American Standard Test Method* (ASTM), dan berbagai jurnal penelitian yang relevan dengan topik penelitian, seperti spesifikasi bahan komponen beton, prosedur pengujian, dan teori yang mendukung pembahasan penelitian.

4.3 Bahan yang Digunakan

Pemakaian bahan pada penelitian ini meliputi :

1. *Glass Fiber Reinforced Polimer* (GFRP) Jenis *Woven Raving* 200.
2. Epoksi merek ALF
3. Semen Portland yang digunakan adalah Semen *portland* tipe 1 merek Tiga Roda dengan ukuran 1 sak atau 40 kg.
4. Pasir (agregat halus) dan Kerikil (agregat kasar) berasal dari Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik Prodi Teknik Sipil Universitas Islam Indonesia.
5. Air yang digunakan berasal dari Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik Prodi Teknik Sipil Universitas Islam Indonesia.
6. Baja tulangan yang digunakan merupakan baja ulir 10 mm dan 13 mm sebagai tulangan pokok kemudian baja polos 8 mm untuk sengkang dengan merek *Krakatau Steel* (KS).
7. Kawat bendrat digunakan untuk mengikat antara baja pokok dan sengkang serta mengikat tahu beton ke tulangan.

4.4 Peralatan Penelitian

Adapun peralatan yang digunakan pada penelitian ini sebagai berikut :

1. *Mixer* atau pengaduk beton, berfungsi untuk mengaduk campuran beton.
2. Cetakan atau bekisting dengan ukuran panjang 1400 mm, tinggi 200 mm, dan lebar 150 mm yang terbuat dari kayu.
3. Timbangan dengan kapasitas 20 kg.
4. Saringan dan vibrator saringan.
5. Cetakan silinder dengan ukuran diameter 15 cm dan tinggi 30 cm.
6. Alat uji tekan beton yaitu *Compression Testing Machine*.
7. *Load cell* digunakan untuk membaca beban yang dibebankan ke beton.
8. Karung basah untuk menutupi beton pada tahap perawatan beton.
9. *Hydraulic Jack Cylinder* untuk pemberian beban secara bertahap hingga balok mengalami retak.

10. LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) Untuk membaca lendutan pada balok.
11. Alat bantu lain seperti cangkul, sekop, cetok, wadah, ember, kuas, silinder ukur, oven, alat uji *slump*, palu, catut, dan lain sebagainya.

4.5 Tahapan Penelitian

Dalam pelaksanaan penelitian ini, Tahapan-tahapan pelaksanaan penelitian adalah sebagai berikut.

4.5.1 Persiapan

Pada tahap ini, akan dilakukan berbagai persiapan yang berkaitan dengan penelitian yang akan dijalankan, seperti yang akan dijelaskan berikut ini.

1. Merancang dimensi beton serta tulangan yang akan digunakan.
2. Mempersiapkan alat dan bahan penelitian.

4.5.2 Pengujian Material

Pada tahap ini, akan dilakukan serangkaian pengujian dan inspeksi terhadap komponen-komponen penyusun beton, termasuk agregat halus, agregat kasar, dan tulangan GFRP. Berikut adalah beberapa pengujian yang akan dijalankan.

1. Uji berat jenis dan penyerapan air agregat halus berdasarkan SNI 1970-1990.
2. Uji berat jenis dan penyerapan air agregat kasar berdasarkan SNI 1969-1990.
3. Uji analisa saringan agregat halus berdasarkan SNI 1968-1990.
4. Uji analisa saringan agregat kasar berdasarkan SNI 1968-1990.
5. Uji berat volume gembur dan berat volume padat agregat halus berdasarkan SNI 4804-1998.
6. Uji berat volume gembur dan berat volume padat agregat kasar berdasarkan SNI 4804-1998
7. Uji butiran lolos ayakan No.200 (uji kandungan lumpur dalam pasir) berdasarkan SNI 4142-1996.
8. Uji Tarik Pada Komposit berdasarkan ASTM D3039

9. Uji Kuat Tekan Beton berdasarkan SNI 1974-2011
10. Uji kuat lentur beton normal dengan dua titik pembebanan berdasarkan SNI 4431-2011

4.5.3 Rencana Campuran Beton (*Trial mix design*)

Pada tahap ini, akan dilakukan kalkulasi percobaan untuk merencanakan campuran beton (*trial mix design*) berdasarkan pedoman perhitungan dari SNI 03-2834-2000.

4.5.4 Pembuatan Benda Uji

Tahapan dalam pembuatan benda uji beton adalah sebagai berikut.

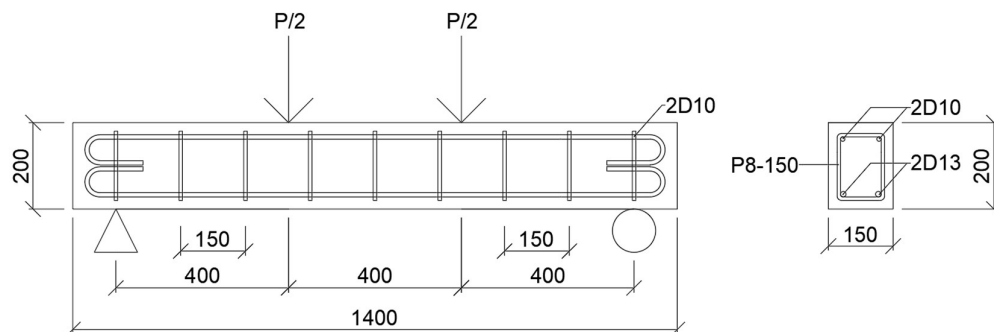
1. Benda uji silinder.
 - a. Bahan penyusun seperti agregat kasar dan halus, air, dan semen disiapkan sesuai dengan kebutuhan yang telah dihitung sesuai SNI 03-2834-2000 dan peralatan untuk menakar seperti timbangan dan gelas ukur.
 - b. Melakukan penimbangan bahan penyusun sesuai *mix design* yang telah dibuat.
 - c. Memasukkan bahan penyusun yang telah di timbang sesuai dengan kebutuhan *mix design* ke dalam ember guna memudahkan pencampuran.
 - d. Cetakan silinder disiapkan dan diolesi dengan oli seluruh permukaannya
 - e. Menyiapkan *mixer* beton dan tempat menuangkan beton segar.
 - f. Memasukkan agregat kasar dan halus dalam keadaan SSD pada *mixer* beton lalu dinyalakan diaduk hingga merata.
 - g. Semen dimasukkan ke *mixer* beton dan diaduk hingga merata.
 - h. Menuangkan air perlahan dengan tujuan untuk mengontrol ke enceran campuran beton segar.
 - i. Melakukan uji *slump*.
 - j. Jika uji *slump* beton telah memenuhi syarat, campuran beton segar ke dalam cetakan silinder dengan memasukkan 1/3 bagian dari silinder dan ditumbuk secara merata sebanyak 25 kali dan dipukul menggunakan

palu karet hingga beton merata tanpa adanya rongga udara, proses tersebut diulangi hingga beton segar memenuhi silinder.

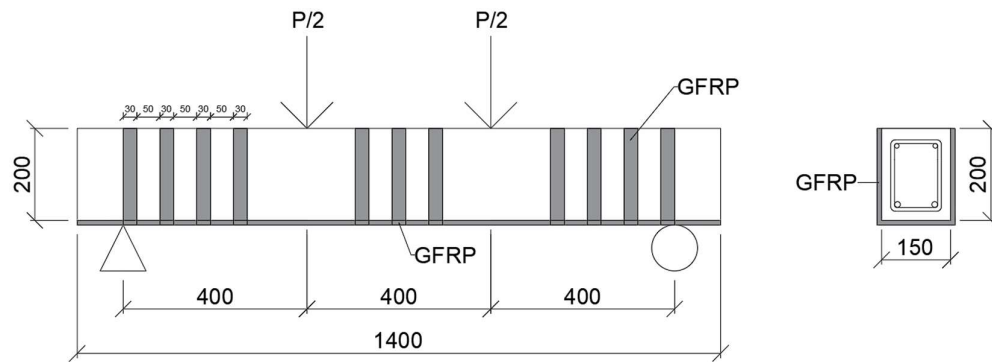
- k. Permukaan benda uji diratakan menggunakan sekop kecil.
- l. Setelah 24 jam beton dibuka dari cetakan dan dilakukan proses *curing*

2. Benda Uji Balok

- a. Enam balok beton bertulang persegi panjang disiapkan dalam pengujian penelitian ini. Benda uji tersebut yaitu dua balok beton bertulang normal tanpa perkuatan dengan kode BK (Balok Kontrol), empat balok beton bertulang diperkuat dengan GFRP dengan kode BP1 (Balok Perkuatan 1) dan BP2 (Balok Perkuatan 2).
- b. Semua benda uji mempunyai penampang persegi panjang, berukuran lebar 150 mm, tinggi 300 mm, dan panjang total 1400 mm. Tulangan geser yaitu sengkang baja menggunakan diameter 8 mm akan diberi jarak dengan interval 150 mm. Tulangan pokok terdiri dari dua batang tulangan ulir dengan diameter 10 mm dan 13 mm disetiap masing masing tulangan tarik dan tekannya. Selimut beton sebesar 25 mm.



Gambar 4. 1 Detail benda uji balok Kontrol dan Penulangan balok



Gambar 4. 2 Detail benda uji balok perkuatan menggunakan GFRP

Tabel 4. 1 Rincian Sampel Balok Uji

Kode	Jumlah Balok	Deskripsi	Metode Tes
BK	2	Beton bertulang normal tanpa perkuatan	Secara bertahap beban akan diterapkan sampai runtuh.
BP1	2	Beban 50% sebelum diberi perkuatan GFRP	Beban awal akan diterapkan (50%) dari beban keruntuhan, selanjutnya diberi GFRP, kemudian akan diterapkan beban bertahap hingga terjadi keruntuhan.
BP2	2	Beban 75% sebelum diberi perkuatan GFRP	Beban awal akan diterapkan (75%) dari beban keruntuhan, selanjutnya diberi GFRP, kemudian akan diterapkan beban bertahap hingga terjadi keruntuhan.

4.5.5 Perawatan Benda Uji

Balok beton, setelah dicetak selama 3 hari, bekistingnya dibuka, diberi kode, dan dirawat dengan menutupi beton dengan karung basah selama sekitar 28

hari. Sementara itu, silinder beton, setelah 24 jam pencetakan, bekistingnya dibuka, diberi kode, dan dirawat selama 7 hari di bak perendaman.

4.5.6 Penambahan Lapis GFRP

GFRP dipasang sepanjang permukaan bawah balok dengan jumlah 3 lapis serta dipasang angkur menggunakan GFRP membentuk *U-Wrap* dengan ukuran setiap angkur 30 mm untuk lebar nya dan panjangnya mengelilingi kanan, bawah dan kiri balok dengan total panjang 550 mm. Penambahan lapis GFRP pada bagian bawah balok diberi 3 lapis *Fiber* dikarenakan fiber jenis *Woven Roving* 200 ini memiliki tebal yang cukup tipis dan untuk memaksimalkan penulangan sehingga diberikan 3 lapis *Fiber*. Pelapisan dilakukan setelah balok beton mendapat 50% dan 75% dari beban maksimal Balok Beton bertulang Kontrol (BK) dengan cara sebagai berikut:

1. Meratakan permukaan beton dengan menggunakan gerinda kemudian membersihkannya dengan menggunakan amplas dan kawat sikat.



Gambar 4. 3 Pengamplasan permukaan balok sebelum pemasangan GFRP

2. Mencampur resin epoksi dan *hardener* dengan perbandingan 1:1 kemudian melapisinya pada permukaan beton.



Gambar 4. 4 Pelapisan epoksi ke permukaan balok

3. Pemasangan *Glass Fiber* yang diratakan dengan menggunakan *roller*.



Gambar 4. 5 Pemasangan GFRP pada balok menggunakan *roller*

4. Memberikan lapisan penutup resin epoksi untuk melindungi serat gelas kemudian dikeringkan.
5. Lama pengeringan dari resin epoksi di lakukan selama 7 hari dan ditutup dengan plastik agar terhindar dari debu sehingga GFRP dapat melekat pada permukaan bawah balok dengan baik.

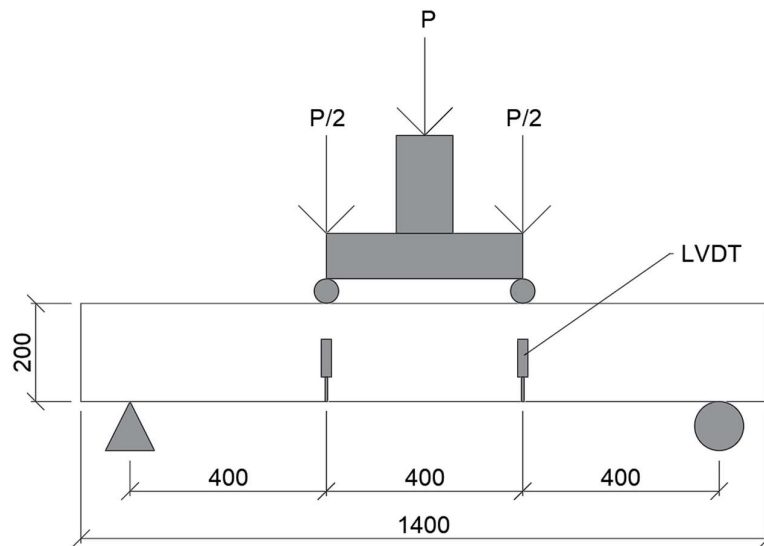


Gambar 4. 6 Penutupan balok dengan plastik agar terhindar dari debu

4.5.7 Pengujian Benda Uji

1. *Set Up* Pengujian

Balok uji diletakkan di atas perletakan sederhana dengan sistem pembebanan *two point load*. *LVDT* dipasang masing masing pada jarak 40 cm dari tumpuan untuk mengukur besar lendutan yang terjadi. Balok dibebani sampai mencapai kekuatan batas atau beban tidak mengalami peningkatan. Setup pengujian balok seperti ditunjukkan pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Setup Uji posisi LVDT

2. Pengujian balok Kontrol

Balok kontrol diberi beban hingga mencapai beban maksimum nya, kemudian dicatat untuk sebagai acuan pembebanan apada balok perkuatan selanjutnya.

3. Pengujian balok perkuatan dengan GFRP

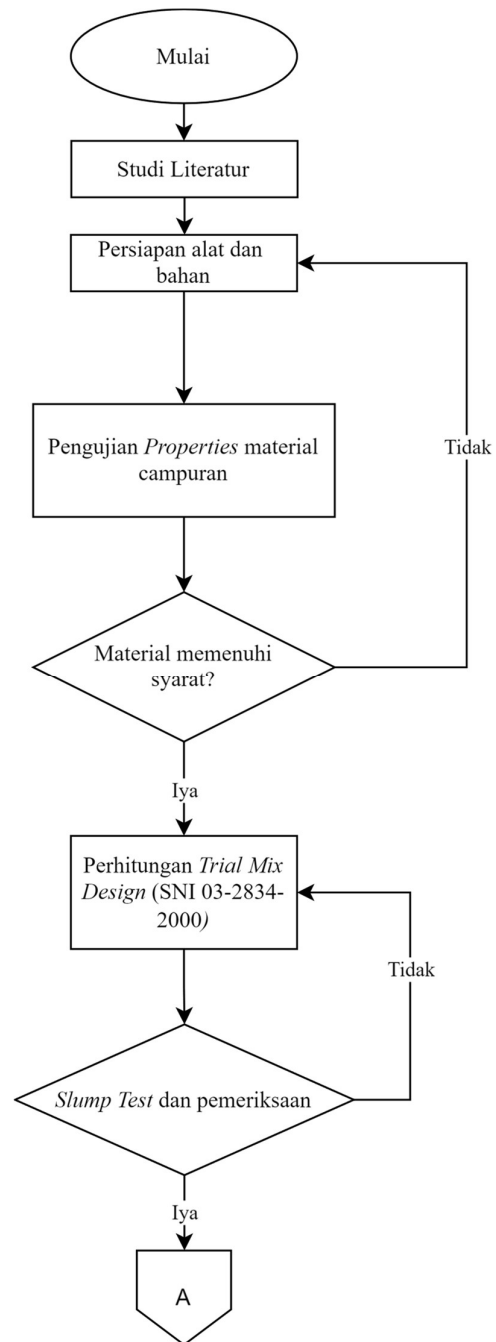
Balok Perkuatan akan dilakukan pengujian 50% dan 75% dari beban maksimum balok kontrol kemudian dilakukan pemasangan GFRP setelah itu diberi beban lagi hingga mencapai beban maksimum dari balok perkuatan tersebut.

4.5.8 Analisis Data

Analisis data dalam penelitian merupakan proses pengolahan data dengan tujuan menggali informasi yang relevan sebagai dasar untuk pengambilan keputusan. Proses ini memiliki peran penting karena membantu peneliti memahami data yang telah terkumpul dan menyajikan hasil penelitian dalam bentuk yang dapat dipahami serta digunakan untuk memecahkan masalah atau menjawab pertanyaan penelitian.

4.5.9 Bagan Alir Penelitian

Suatu penelitian ilmiah dilaksanakan dalam sistematika yang jelas dan teratur, sehingga diperoleh hasil yang sesuai dengan tujuan. Dari uraian yang telah dijelaskan diatas dapat dibuat sebuah bagan alir atau *flowchart*. Berikut adalah bagan alir pelaksanaan penelitian yang dapat dilihat pada gambar 4.8 dan Gambar 4.9.



Gambar 4.8 *Flowchart* Penelitian



Gambar 4.9 Lanjutan *Flowchart* Penelitian

BAB V

HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1 Pengujian Material Beton

Pertama-tama bahan-bahan beton harus diuji untuk mengetahui sifat dan karakteristiknya. Uji ini memastikan apakah bahan tersebut sesuai dengan rencana campuran beton (*mix design*) untuk membuat campuran beton yang baik.

5.1.1 Pengujian Agregat Halus

Pengujian yang dilakukan untuk agregat halus dalam penelitian ini antara lain, uji berat jenis dan penyerapan, uji berat volume padat/gembur, uji modulus halus butir, dan uji kandungan lumpur (uji lolos saringan No.200).

1. Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Halus.

Hasil pengujian dan analisis berat jenis dan penyerapan agregat halus dapat dilihat pada Tabel 5.1 berikut.

Tabel 5. 1 Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Halus

Uraian		Hasil
Berat pasir kering mutlak, gram	(Bk)	484
Berat pasir kondisi jenuh kering muka (SSD), gram		500
Berat piknometer berisi pasir dan air, gram	(Bt)	1173
Berat piknometer berisi air, gram	(b)	850
Berat jenis curah $Bk / (B + 500 - Bt)$	(1)	2,704
Berat jenis jenuh kering muka $500 / (B + 500 - Bt)$	(2)	2,793
Berat jenis semu $Bk / (B + Bk - Bt)$	(3)	2,969
Penyerapan air, % $(500 - Bk) / Bk \times 100\%$	(4)	3,306%

Hasil pengujian menunjukkan bahwa berat jenis kering muka (SSD) agregat halus adalah 2,793. Nilai ini akan digunakan dalam perencanaan campuran beton (*mix design*). Selain itu, ditemukan juga bahwa agregat halus menyerap air sebesar 3,306%.

2. Pengujian Modulus Halus Butir Agregat Halus

Hasil pengujian dan analisis modulus halus butir agregat halus dapat dilihat pada Tabel 5.2 berikut.

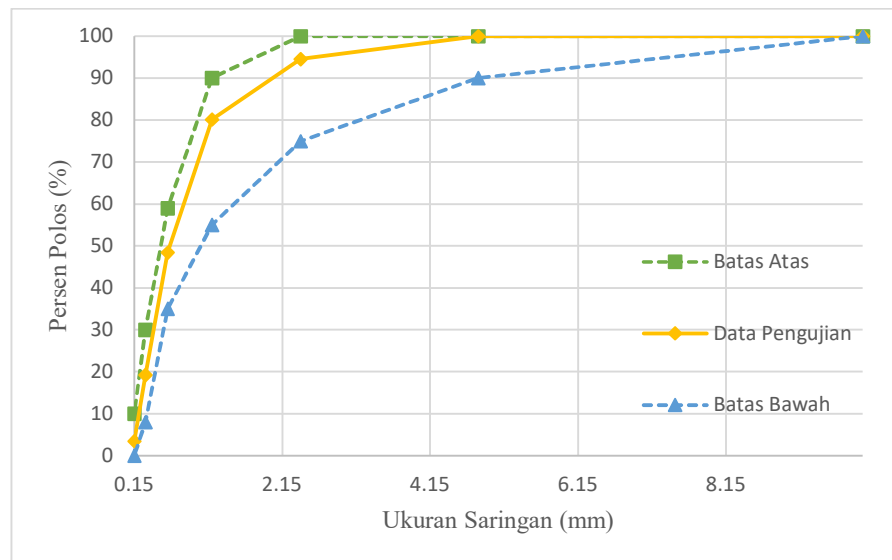
Tabel 5. 2 Pengujian Modulus Halus Butir Agregat Halus

Lubang Ayakan (mm)	Berat Tertinggal (gram)	Berat Tertinggal (%)	Berat Tertinggal Kumulatif (%)	Persen Lolos Kumulatif (%)
10	0	0	0	100
4,8	0	0	0	100
2,4	109	5,45	5,45	94,55
1,2	288	14,40	19,85	80,15
0,6	635	31,75	51,60	48,40
0,3	583	29,15	80,75	19,25
0,15	316	15,80	96,55	3,45
Sisa	69	3,45	100	0
Jumlah	2000	100	254,20	

Berdasarkan data dari Tabel 5.2 di atas, maka dapat dihitung nilai modulus halus butir sebagai berikut.

$$\text{Modulus Halus Butir (MHB)} = \frac{254,20}{100} = 2,542$$

Hasil pengujian MHB digunakan untuk menentukan daerah gradasi agregat halus. Hasil perhitungan di atas menunjukkan bahwa agregat halus berada di batas yang disyaratkan, yaitu di daerah gradasi II, di mana agregat halus adalah pasir agak kasar. Dari hasil perhitungan di atas, diperoleh kurva gradasi agregat halus seperti Gambar 5.1 di bawah ini yang di plot dalam gradasi pasir (sedang) II sesuai dengan SNI 03-2834-2000.



Gambar 5. 1 Grafik Analisis Saringan Agregat Halus

3. Pengujian Kandungan Lumpur Agregat Halus (Uji Lolos Saringan No. 200)

Hasil pengujian dan analisis kandungan lumpur agregat halus dapat dilihat pada Tabel 5.3 berikut.

Tabel 5. 3 Pengujian Kandungan Lumpur Agregat Halus

Uraian	Hasil Pengamatan
Berat Agregat Kering Oven, gram (w1)	500
Berat Agregat Kering Oven setelah dicuci, gram (w2)	495,4
Berat yang Lolos Ayakan No. 200, % $[(w1 - w2) / w1] \times 100\%$	0,90%

Hasil pengujian menunjukkan bahwa agregat halus mengandung 0,90% lumpur, yang masih memenuhi standar PBI 1971 karena di bawah batas maksimal 5%. Namun, agregat yang lolos saringan no. 200 berbentuk bulat dan kurang baik dalam interlocking, sehingga semakin tinggi kandungan lumpur, semakin rendah kualitas beton yang dihasilkan.

5.1.2 Pengujian Agregat Kasar

Pengujian yang dilakukan untuk agregat kasar dalam penelitian ini antara lain, uji berat jenis serta penyerapan dan uji modulus halus butir. Berikut ini adalah hasil dari pengujian yang telah dilakukan.

1. Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Kasar

Hasil pengujian dan analisis berat jenis dan penyerapan agregat kasar dapat dilihat pada Tabel 5.4 berikut.

Tabel 5. 4 Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Kasar

Uraian		Hasil
Berat kerikil kering mutlak, gram	(Bk)	4854
Berat kerikil kondisi jenuh kering muka (SSD), gram	(Bj)	5000
Berat kerikil dalam air, gram	(Ba)	2937
Berat jenis curah $Bk / (B + 500 - Bt)$	(1)	2,353
Berat jenis jenuh kering muka $500 / (B + 500 - Bt)$	(2)	2,424
Berat jenis semu $Bk / (B + Bk - Bt)$	(3)	2,532
Penyerapan air, % $(500 - Bk) / Bk \times 100\%$	(4)	3,01%

Hasil pengujian menunjukkan bahwa berat jenis kering muka (SSD) agregat kasar adalah 2,424. Nilai ini akan digunakan dalam perencanaan campuran beton (*mix design*). Selain itu, agregat kasar menyerap air sebesar 3,01%.

2. Pengujian Modulus Halus Butir Agregat Kasar

Hasil pengujian dan analisis modulus halus butir agregat kasar dapat dilihat pada Tabel 5.5 berikut.

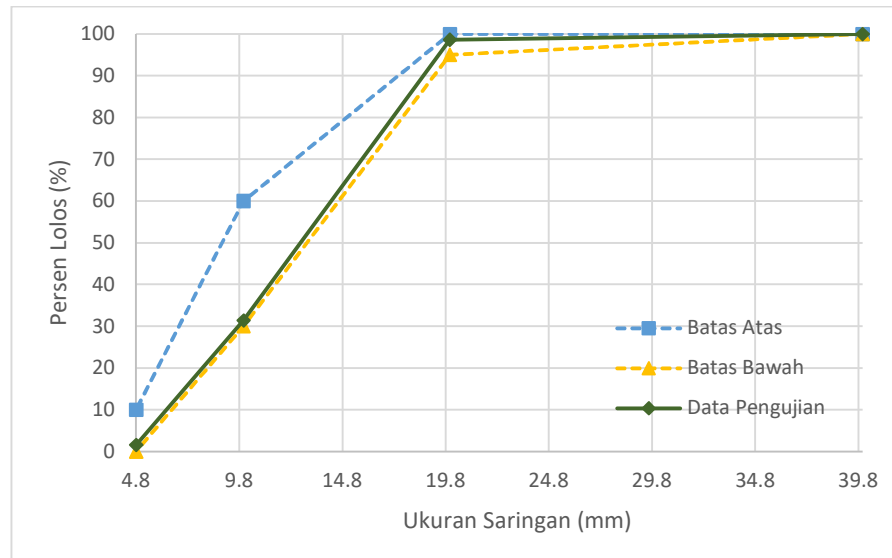
Tabel 5. 5 Pengujian Modulus Halus Butir Agregat Kasar

Lubang Ayakan (mm)	Berat Tertinggal (gram)	Berat Tertinggal (%)	Berat Tertinggal Kumulatif (%)	Persen Lolos Kumulatif (%)
40	0	0	0	100
20	69	1,380	1,380	98,620
10	4494	89,880	91,260	8,740
4,8	347	6,940	98,200	1,800
2,4	12	0,240	98,440	1,560
1,2	9	0,180	98,620	1,380
0,6	0	0	98,620	1,380
0,3	0	0	98,620	1,380
0,15	0	0	98,620	1,380
Sisa	69	1,380	100	0
Jumlah	5000	100	683,760	

Berdasarkan data dari Tabel 5.5 di atas, maka dapat dihitung nilai modulus halus butir sebagai berikut.

$$\text{Modulus Halus Butir (MHB)} = \frac{683,760}{100} = 6,838$$

Dari hasil perhitungan di atas, diperoleh kurva gradasi agregat kasar seperti Gambar 5.2 di bawah ini yang di plot dalam gradasi kerikil atau koral ukuran maksimum 20 mm sesuai dengan SNI 03-2834-2000.



Gambar 5. 2 Grafik Analisis Saringan Agregat Kasar

Pada gambar di atas menunjukkan bahwa grafik hasil pengujian didapatkan hasil bahwa agregat hasil pengujian lebih masuk ke dalam daerah gradasi agregat dengan ukuran maksimum 20 mm. Sehingga, dapat diasumsikan bahwa agregat kasar yang digunakan memiliki ukuran agregat maksimum sebesar 20 mm.

5.2 Perhitungan Percobaan Rencana Campuran Beton (Trial Mix Design)

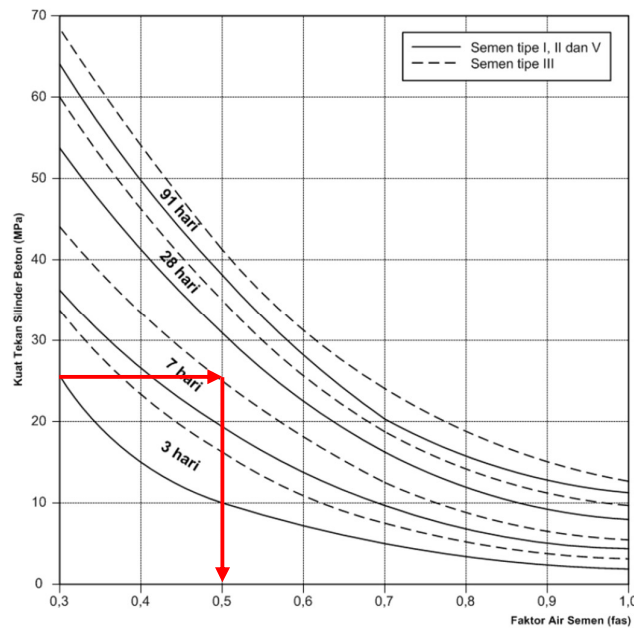
Perencanaan campuran beton ini menggunakan metode SNI 03-2834-2000. Langkah-langkah perhitungan dan keterangan lebih lanjut dapat dilihat pada sub bab 3.5. Berikut adalah perhitungan *trial mix design* untuk membuat sampel silinder uji.

1. Rencana kuat tekan atau kuat desak (f'_c) untuk beton uji adalah 25 MPa dengan benda uji berbentuk silinder.
2. Bahan pengikat atau semen menggunakan semen Portland Tipe I yaitu Semen Tiga Roda
3. Hasil pengujian analisis saringan menunjukkan bahwa agregat kasar yang digunakan memiliki ukuran maksimal 20 mm.

4. Hasil pengujian analisis saringan menunjukkan bahwa agregat halus yang digunakan memiliki susunan butiran yang sesuai dengan gradasi no. 2.
5. Penelitian ini menggunakan tiga sampel, karena jumlahnya kurang dari 15. Berdasarkan data pada Tabel 3.2, kita dapat menentukan nilai kuat tekan rencana yang dibutuhkan, yaitu sebesar 12 MPa.
6. Kuat tekan rata-rata yang ditargetkan (f_{cr}) diperoleh dari persamaan 3.6.

$$\begin{aligned} f_{cr} &= 25 + 12 \\ &= 37 \text{ MPa} \end{aligned}$$

7. Menentukan faktor air semen (FAS)
 - a. Penelitian menunjukkan bahwa pada beton dengan campuran semen *portland* tipe I dan agregat kasar berupa batu pecah, kekuatan tekan beton silinder setelah 28 hari mencapai 37 MPa. Informasi ini dapat ditemukan di Tabel 3.3.
 - b. Selanjutnya, kita dapat menentukan nilai FAS dengan menggunakan informasi yang telah kita dapatkan sebelumnya, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.9. Kemudian, kita dapat melihat nilai FAS yang spesifik saat f_{cr} sama dengan 37 MPa pada Gambar 5.3 berikut ini.



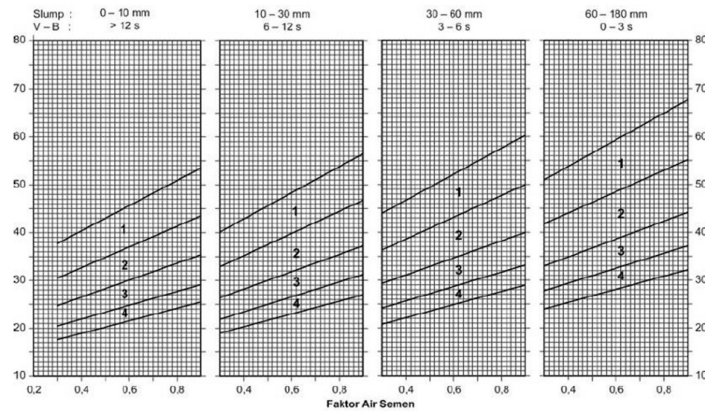
Gambar 5. 3 Grafik Hubungan Antara Kuat Tekan dan FAS

Dari gambar, kita dapatkan nilai FAS rencana sebesar 0,5. Nilai FAS ini harus memenuhi syarat minimum semen dan nilai FAS maksimum seperti pada Tabel 3.5. Karena beton akan diletakkan di dalam ruangan yang terlindungi dari terpapar hujan dan sinar matahari langsung, maka nilai FAS maksimum adalah 0,6. Kita mengambil Nilai FAS sebesar 0,51.

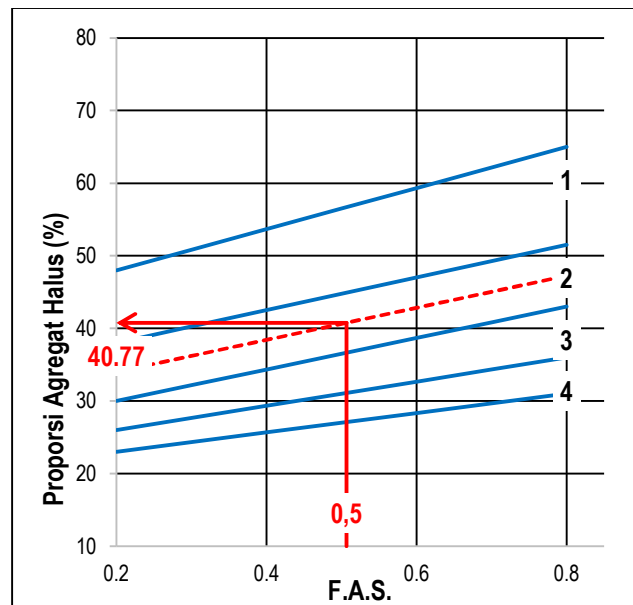
8. Nilai slump rencana yang digunakan berada di antara nilai 60 – 180 mm.
9. Nilai kadar air bebas agregat kasar dengan ukuran butir maksimum 20 mm dan nilai slump 60-180 mm dapat dilihat pada Tabel 3.4, yaitu sebesar 225 kg/m³.
10. Jumlah semen yang digunakan per m³ beton.
 - a. Kadar semen dapat dihitung menggunakan persamaan 3.8.
 - b. Tabel 3.5 Untuk beton yang akan digunakan di area luar bangunan yang terpapar hujan dan sinar matahari langsung, diperlukan setidaknya 325 kg semen per kubik meter beton.

Nilai jumlah semen 444,210 kg/m³ dipilih dari poin a dan b untuk digunakan dalam perhitungan *mix design* berikutnya.

11. Dari Gambar 3.9, kita dapat menghitung persentase agregat halus. Berdasarkan nilai slump (konsistensi beton) antara 60 hingga 180 mm dan distribusi ukuran butiran agregat halus yang sesuai dengan gradasi no. 2, kita dapat menentukan persentase yang relevan, seperti yang terlihat pada Gambar 5.4.



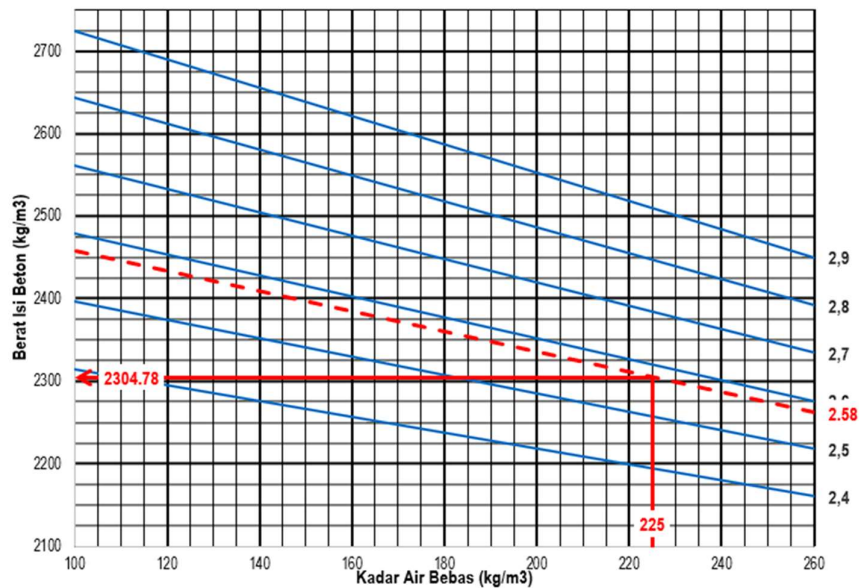
Grafik 4 : Persen Pasir terhadap Kadar Total Agregat yang dianjurkan
Untuk ukuran butir maksimum 20 mm



Gambar 5. 4 Grafik Persentase Agregat Halus

Dari Gambar diatas didapatkan persentase proporsi Agregat halus sebesar 40,77% dan Proporsi Agregat Kasar didapatkan sebesar 59,23%.

12. Hasil pengujian menunjukkan bahwa berat jenis agregat halus adalah $2,793 \text{ gram/cm}^3$ dan agregat kasar adalah $2,424 \text{ gram/cm}^3$. Didapatkan Berat jenis gabungan sebesar $2,580 \text{ gram/cm}^3$.
13. Untuk menentukan berat isi beton, kita dapat menggunakan grafik pada Gambar 3.10. Misalkan kita tahu nilai kadar air bebas sebesar 225 kg/m^3 dan berat jenis agregat gabungan adalah $2,580 \text{ gram/cm}^3$. Maka, kita dapat memperkirakan berat isi beton basah yang telah dipadatkan dengan mengacu pada Gambar 5.5.



Gambar 5. 5 Grafik Berat Isi Beton

Berdasarkan gambar di atas, nilai berat isi beton yang didapatkan sebesar $2304,780 \text{ kg/m}^3$.

14. Menghitung komposisi dari masing-masing material beton.
- a. Kadar agregat gabungan = berat isi beton – kadar semen kadar air – bebas
- $$\begin{aligned} \text{Kadar agregat gabungan} &= 2304,780 - 444,210 - 225 \\ &= 1635,793 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{b. Kadar agregat halus} &= \frac{\%AH}{100} \times \text{kadar agregat gabungan.} \\
 &= \frac{40,77}{100} \times 1635,793 \\
 &= 670,675 \text{ kg/m}^3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{c. Kadar agregat kasar} &= \frac{\%AK}{100} \times \text{kadar agregat gabungan.} \\
 &= \frac{59,23}{100} \times 1635,793 \\
 &= 965,118 \text{ kg/m}^3
 \end{aligned}$$

15. Setelah menghitung komposisi setiap material, dalam setiap 1 m³ beton, diperoleh komposisi campuran dengan proporsi teoritis sebagai berikut.

- | | |
|------------------|--------------|
| a. Semen | = 444,210 kg |
| b. Agregat halus | = 670,675 kg |
| c. Agregat kasar | = 965,118 kg |
| d. Air | = 225 kg |

5.3 Data Hasil Trial Mix Design

Pada tahap *trial mix design*, peneliti mengambil tiga sampel silinder beton yang telah dibuat. Pengujian *trial mix design* dilakukan menggunakan mesin uji tekan beton *compression testing machine* (CTM) setelah silinder beton berumur 7 hari dan dirawat dengan cara direndam air, kemudian dikeringkan sehari sebelum pengujian. Pengujian setelah 7 hari perendaman cukup kemudian bisa dilakukan penkonversian menjadi 28 hari beton.

Tujuan dari pengujian ini adalah untuk menentukan nilai kuat desak (f'_c) pada silinder beton. Hasil *trial mix design* akan membantu kita merencanakan komposisi campuran beton yang akan digunakan pada sampel balok dalam pengujian kuat lentur.

Berikut adalah ringkasan hasil analisis dari pengujian *trial mix design* dengan kuat tekan desak nya (f'_c) sudah di konversi menjadi 28 hari yang telah dilakukan dan tercatat dalam Tabel 5.7.

Tabel 5. 6 Pengujian Trial Mix Design

Sampel	Diameter (mm)	Tinggi (mm)	Luas Penampang (mm ²)	Beban Maksimum (kN)	f' _c (MPa)
Silinder 1	150	300	17671,46	372,68	32,446
Silinder 2	150	300	17671,46	351,91	30,636
Silinder 3	150	300	17671,46	328,92	28,635

Setelah menganalisis hasil pengujian *trial mix design*, ditemukan bahwa nilai terbesar kuat desak (f'_c) pada silinder beton adalah 32,446 MPa dan nilai terkecilnya adalah 28,635 MPa. Perlu dicatat bahwa perhitungan awal *trial mix design* sebenarnya menargetkan nilai f'_c sebesar 25 MPa. Dari perbedaan ini, kita dapat menyimpulkan bahwa proporsi campuran beton yang dihasilkan dari *mix design* dapat digunakan sebagai acuan untuk merancang komposisi beton pada balok uji utama.

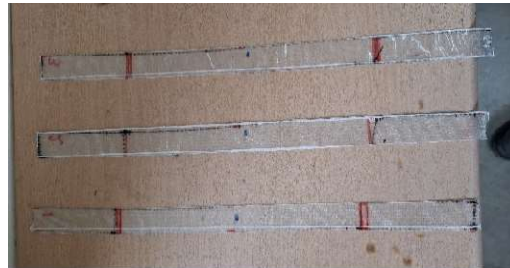
5.4 Pengujian Glass Fiber

Pengujian *Glass Fiber* dilakukan menggunakan peraturan ASTM, Uji Tarik Pada Komposit berdasarkan ASTM D3039. Pengujian ini untuk mengetahui kuat tarik GFRP yang akan digunakan pada perkuatan balok beton bertulang, hasil pengujian kuat GFRP dapat dilihat pada Tabel 5.6 berikut ini:

Tabel 5. 7 Hasil Uji Tarik GFRP

No	Sampel	Panjang Lo3 (mm)	Panjang Lo1 (mm)	Lebar (mm)	Tebal (mm)	Luas Penampang (mm ²)	Kuat Tarik (MPa)
1	Sampel 1	450	250	25	0,55	13,75	21,39
2	Sampel 2	450	250	25	0,55	13,75	64,19
3	Sampel 3	450	250	25	0,55	13,75	74,89

Pengujian *Glass Fiber* dari Tabel 5.3 diatas didapatkan bahwa angka sampel yang pertama cukup jauh berbeda dengan sampel 2 dan sampel 3, sehingga tidak dapat digunakan oleh karena itu hanya sampel 2 dan sampel 3 menjadi patokan hasil dari kuat tarik GFRP yaitu dengan kuat tarik rata-rata sebesar 69,540 MPa.



Gambar 5. 6 Sampel GFRP sebelum Pengujian Kuat Tarik



Gambar 5. 7 Sampel GFRP setelah Pengujian Kuat Tarik

5.5 Perhitungan Proporsi Campuran Benda Uji Balok

Berdasarkan hasil pengujian *trial mix design* sebelumnya, nilai rata-rata kuat desak (f'_c) pada silinder beton adalah 30,572 MPa. Dengan perbandingan ini, kita dapat menyimpulkan bahwa proporsi campuran beton dari *mix design* tersebut dapat digunakan sebagai acuan untuk merancang komposisi beton pada sampel balok. Langkah selanjutnya adalah menghitung proporsi bahan dan memastikan bahwa campuran beton memenuhi persyaratan kuat desak yang diinginkan.

5.5.1 Proporsi Beton untuk 1 m^3

Dalam pelaksanaannya, peneliti melakukan 2 kali *trial* karena terjadinya penyusutan sehingga *trial* pertama mengalami kekurangan beton, kemudian peneliti tambahkan 30% dari setiap material agar tidak terjadi kekurangan material saat pembuatan balok beton. Penambahan 30% dilakukan dikarenakan pembuatan campuran dilakukan oleh seorang amatiran yang dapat mengalami penyusutan yang sangat banyak. Proporsi campuran beton yang dibutuhkan untuk setiap 1 m^3 beton adalah sebagai berikut.

1. Semen = 577,473 kg
2. Agregat halus = 871,876 kg
3. Agregat kasar = 1254,654 kg
4. Air = 292,5 kg

5.5.2 Proporsi campuran beton untuk sampel balok

Untuk menentukan proporsi campuran beton balok, terlebih dahulu melakukan perhitungan volume beton balok.

$$\begin{aligned}
 \text{Volume balok} &= b \times h \times L \\
 &= 150 \times 200 \times 1400 \\
 &= 42000000 \text{ mm}^3 \\
 &= 0,042 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

Proporsi campuran beton untuk sampel balok.

1. Material = proporsi 1 m^3 x Volume balok
2. Semen = $577,473 \times 0,042$
= 24,254 kg
3. Agregat halus = $871,876 \times 0,042$
= 36,619 kg
4. Agregat kasar = $1254,654 \times 0,042$
= 52,695 kg
5. Air = $292,5 \times 0,042$
= 12,285 kg

Berdasarkan perhitungan didapatkan nilai proporsi campuran untuk satu balok sampel ukuran 150 mm x 200 mm x 1400 mm material semen sebesar 24,254 kg, agregat halus sebesar 36,619 kg, agregat kasar 52,695 kg dan air sebanyak 12,285 kg.

5.6 Perhitungan Teoritis Balok Beton Bertulang

5.6.1 Analisis Kapasitas Lentur Balok Kontrol

Balok Kontrol merupakan balok untuk balok acuan beban maksimum pada balok perkuatan nantinya. Mutu beton dan baja telah ditentukan. Dimensi dan jumlah tulangan yang dipakai sudah ditentukan, data balok bisa dilihat sebagai berikut:

- | | |
|---|---------------|
| 1. Lebar (b) | = 150 mm |
| 2. Tinggi (h) | = 200 mm |
| 3. Tinggi efektif (d) | = 160,5 mm |
| 4. Jarak dari tulangan tarik terluar (d') | = 38 mm |
| 5. Tebal Selimut (s) | = 25 mm |
| 6. Diameter tulangan Lentur Tekan | = 10 mm |
| 7. Jumlah tulangan Lentur Tekan | = 2 buah |
| 8. Diameter tulangan Lentur tarik | = 13 mm |
| 9. Jumlah tulangan Lentur Tarik | = 2 buah |
| 10. Diameter tulangan Sengkang | = 8 mm |
| 11. Jarak antar sengkang | = 150 mm |
| 12. Kuat tekan beton rencana (f'_c) | = 25 MPa |
| 13. Kuat tarik baja (f_y) | = 420 MPa |
| 14. Modulus Elastisitas Baja (E_s) | = 200.000 MPa |
| 15. Kuat tarik GFRP (f_y GFRP) | = 69,541 MPa |

Data diatas telah ditentukan kemudian perhitungan analisis balok bisa dilihat sebagai berikut:

1. Nilai Rasio Tulangan.

$$\text{Luas Tulangan Tarik (As)} = n \times (1/4 \times \pi \times D^2)$$

$$\begin{aligned}
 &= 2 \times (1/4 \times \pi \times 13^2) \\
 &= 265,465 \text{ mm}^2 \\
 \text{Luas Tulangan Tekan (As')} &= n \times (1/4 \times \pi \times D^2) \\
 &= 2 \times (1/4 \times \pi \times 10^2) \\
 &= 157,079 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Rasio Tulangan Tarik } (\rho) &= A_s / (b \times d) \\
 &= 265,465 / (150 \times 160,5) \\
 &= 0,011
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Rasio Tulangan Tekan } (\rho') &= A_s' / (b \times d) \\
 &= 157,079 / (150 \times 160,5) \\
 &= 0,0065
 \end{aligned}$$

2. Cek tulangan tekan sudah luluh ataukah belum.

$$\text{Nilai } \beta_1 (f'_c < 28 \text{ MPa}) = 0,85$$

Agar tulangan tekan sudah luluh, maka harus dipenuhi persyaratan:

$$\begin{aligned}
 K &= (\rho - \rho') \geq \\
 &0,85 \times \beta_1 \times \left(\frac{f'_c}{f_y}\right) \times \left(\frac{600}{600 - f_y}\right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 K &= (0,011 - 0,0065) \geq \\
 &0,85 \times 0,85 \times \left(\frac{25}{420}\right) \times \left(\frac{600}{600 - 420}\right)
 \end{aligned}$$

$$K = 0,0339$$

$$(\rho - \rho') = K$$

$$0,0045 < 0,0339 \text{ (tulangan tekan belum luluh)}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Rasio tulangan Seimbang } (\rho_b) &= 0,85 \times \beta_1 \times \left(\frac{f'_c}{f_y}\right) \times \left(\frac{600}{600 + f_y}\right) \\
 &= 0,85 \times 0,85 \times \left(\frac{25}{420}\right) \times \left(\frac{600}{600 + 420}\right) \\
 &= 0,0253
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Rasio tulangan Max } (\rho_{\max}) &= ((0,003 + \left(\frac{f_y}{E_s}\right)) / 0,008) \times \rho_b \\
 &= ((0,003 + \left(\frac{420}{200000}\right)) / 0,008) \times 0,0253 \\
 &= 0,0161
 \end{aligned}$$

$$(\rho - \rho') = \rho_{\max}$$

$$0,0045 < 0,0161 \text{ (penampang terkendali tarik)}$$

Sehingga, Nilai Faktor Reduksi (ϕ) :

$$\text{Faktor Reduksi } (\phi) = 0,9$$

3. Nilai Kuat Momen Kapasitas (M_n)

Dengan memperhitungkan luas beton yang ditempati oleh tulangan baja, maka dapat dituliskan rumusan untuk besarnya gaya tekan pada tulangan (C_s) dan gaya tekan pada beton (C_c) sebagai berikut :

$$\begin{aligned} C_s &= A_s' \times \left(600 \times \left(\frac{c-d'}{c} \right) - 0,85 \times f'c \right) \\ &= 157,079 \times \left(600 \times \left(\frac{c-38}{c} \right) - 0,85 \times 25 \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_c &= 0,85 \times f'c \times \beta_1 \times b \times c \\ &= 0,85 \times 25 \times 0,85 \times 150 \times c \end{aligned}$$

Karena $T_s = A_s \times f_y = C_s + C_c$, maka :

$$A_s \times f_y = C_s + C_c$$

$$\begin{aligned} 265,465 \times 420 &= \left(157,079 \times \left(600 \times \left(\frac{c-38}{c} \right) - 0,85 \times 25 \right) \right) + (0,85 \times 25 \times 0,85 \times 150 \times c) \end{aligned}$$

$$(0,85 \times 25 \times 0,85 \times 150)c^2 + [(600 \times 157,079) - (0,85 \times 25 \times 157,079) - 265,465 \times 420]c - 600 \times 157,079 \times 38 = 0$$

$$c = 40,354 \text{ mm}$$

didapatkan nilai $c = 40,354$, sehingga nilai a , C_c , dan C_s dapat dihitung :

$$\begin{aligned} a &= \beta_1 \times c \\ &= 0,85 \times 40,354 \\ &= 34,301 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_c &= 0,85 \times f'c \times \beta_1 \times b \times c \\ &= 0,85 \times 25 \times 0,85 \times 150 \times 40,354 \\ &= 109.334,737 \text{ N} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_s &= A_s' \times \left(600 \times \left(\frac{c-d'}{c} \right) - 0,85 \times f'c \right) \\ &= 157,079 \times \left(600 \times \left(\frac{40,354-38}{40,354} \right) - 0,85 \times 25 \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 2.160,386 \text{ N} \\
 M_n &= C_c \left(d - \frac{a}{2}\right) + C_s (d - d') \\
 &= 109.334,737 \left(160,5 - \frac{34,301}{2}\right) + \\
 &\quad 2.160,386 (160,5 - 38) \\
 &= 15.937.722,065 \text{ Nmm} \\
 &= 15,937 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

Balok kontrol didapat kapasitas momen sebesar $M_n = 15.937.722,065 \text{ Nmm}$ atau dalam satuan kNm adalah 15,937 kNm.

5.6.2 Analisis Kapasitas Lentur Balok Perkuatan dengan GFRP

Balok perkuatan menggunakan GFRP dapat dihitung mengacu pada SNI 8971-2021 tentang Panduan perancangan dan pelaksanaan sistem lembaran serat berpolimer terlekat eksternal untuk perkuatan struktur beton. Untuk mutu GFRP didapat dari Pengujian di laboratorium. Data balok perkuatan GFRP sebagai berikut:

- | | |
|---|---------------|
| 1. Lebar (b) | = 150 mm |
| 2. Tinggi (h) | = 200 mm |
| 3. Tinggi efektif (d) | = 160,5 mm |
| 4. Jarak dari tulangan tarik terluar (d') | = 38 mm |
| 5. Tebal Selimut (s) | = 25 mm |
| 6. Diameter tulangan Lentur Tekan | = 10 mm |
| 7. Jumlah tulangan Lentur Tekan | = 2 buah |
| 8. Diameter tulangan Lentur tarik | = 13 mm |
| 9. Jumlah tulangan Lentur Tarik | = 2 buah |
| 10. Diameter tulangan Sengkang | = 8 mm |
| 11. Jarak antar sengkang | = 150 mm |
| 12. Kuat tekan beton rencana (f'_c) | = 25 MPa |
| 13. Kuat tarik baja (f_y) | = 420 MPa |
| 14. Modulus Elastisitas Baja (E_s) | = 200.000 MPa |

15. Kuat tarik GFRP (f_y GFRP)	= 69,541 MPa
16. Jumlah Lapis fiber (n)	= 3 Lapis
17. Ketebalan per lapis fiber (tf)	= 0,55 mm
18. Kuat tarik maksimum (ffe)	= 69,54 MPa
19. Faktor reduksi lingkungan	= 0,75
20. Reduksi fiber	= 0,85

Balok tanpa perkuatan atau balok normal tulangan rangkap dapat dihitung dengan rumus $T_s = C_s + C_c$, karena ada penambahan perkuatan tulangan menggunakan GFRP momen rencana dapat dihitung sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 \text{Luas penampang fiber (Af)} &= n \times t_f \times w \\
 &= 3 \times 0,55 \times 150 \\
 &= 247,5 \text{ mm}^2 \\
 F_{fe} \times \text{Reduksi lingkungan} &= 69,54 \times 0,75 \\
 &= 52,155 \text{ MPa} \\
 T_s + T_{fe} &= C_s + C_c \\
 (A_s \times f_y) + (A_f \times F_{fe}) &= C_s + C_c \\
 (265,465 \times 420) + (247,5 \times 52,16) &= (157,079 \times (600 \times (\frac{c-38}{c}) - 0,85 \\
 &\quad \times 25)) + (0,85 \times 25 \times 0,85 \times 150 \times c) \\
 (0,85 \times 25 \times 0,85 \times 150)c^2 + [(600 \times 157,079) - (0,85 \times 25 \times 157,079) - 265,465 \times \\
 420 + 247,5 \times 69,54]c - 600 \times 157,079 \times 38 &= 0 \\
 c &= 43,06 \text{ mm} \\
 \text{didapatkan nilai } c &= 40,354, \text{ sehingga nilai } a, C_c \text{ dan } C_s \text{ dapat dihitung :} \\
 a &= \beta_1 \times c \\
 &= 0,85 \times 43,06 \\
 &= 36,601 \text{ mm} \\
 C_c &= 0,85 \times f'_c \times \beta_1 \times b \times c \\
 &= 0,85 \times 25 \times 0,85 \times 150 \times 43,06 \\
 &= 116.666,062 \text{ N} \\
 C_s &= A_s' \times (600 \times (\frac{c-d'}{c}) - 0,85 \times f'_c)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 157,079 \times (600 \times (\frac{43,06-38}{43,06}) - 0,85 \\
 &\quad \times 25) \\
 &= 7.737,424 \text{ N} \\
 M_n &= C_c (d - \frac{a}{2}) + C_s (d - d') + (\psi f \times T_{fe} \\
 &\quad \times (h - \frac{a}{2})) \\
 &= 116.666,062 (160,5 - \frac{36,601}{2}) + \\
 &\quad 7.737,424 (160,5 - 38) + (0,85 \times \\
 &\quad (247,5 \times 52,155 \times (200 - \frac{36,601}{2})) \\
 &= 19.531.309,16 \text{ Nmm} \\
 &= 19,531 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

Balok Perkuatan GFRP dapat menahan momen kapasitas sebesar $M_n = 19.531.309,16 \text{ Nmm}$ atau dalam satuan kNm adalah 19,531 kNm.

Secara teoritis penambahan perkuatan berupa GFRP dengan jenis *fiber Woven Roving 200* pada balok beton bertulang dapat meningkatkan perkuatan yang awal nya balok kontrol hanya dapat menahan momen rencana sebesar 15,937 kNm setelah diberi perkuatan GFRP meningkat menjadi 19,531 kNm, atau dalam persen meningkat sebanyak 22,55%.

5.7 Kinerja Balok Beton Bertulang

Saat kita melakukan uji lentur pada balok dan memberikan beban, balok akan melengkung di tengah bentangnya. Kita mengukur lendutan ini menggunakan alat pengukur LVDT hingga akhirnya balok mengalami keruntuhan dan tidak dapat menahan beban lagi.

Pengujian ini menghasilkan lendutan atau defleksi yang dapat kita lihat dari hubungan Tegangan dan Lendutan.

5.7.1 Kinerja Balok Kontrol

Balok kontrol merupakan balok acuan untuk mendapatkan nilai beban maksimum yang dapat ditahan oleh balok sampel, atau balok kontrol ini merupakan

balok beton bertulang normal tanpa di perkuat. Hasil dari Pengujian lentur balok pada balok kontrol 1 dan 2 sebagai berikut:

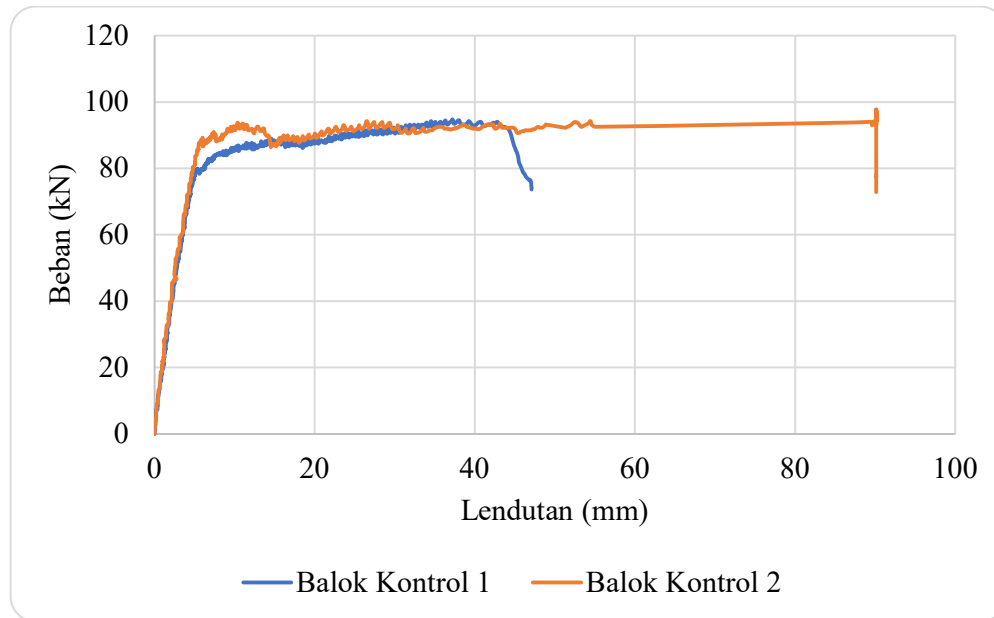
1. Balok Kontrol 1 (BK-1)

Balok Kontrol 1 menunjukkan beban maksimal yang dapat ditahan sebesar 94,752 kN setelah dilakukannya pengujian balok tersebut, dengan lendutan sebesar 37,221 mm Momen maksimum yang terjadi pada balok kontrol 1 sebesar 19,103 kNm. Dibandingkan dengan balok normal teoritis yang hanya sebesar 15,937 kNm persentase selisihnya sebesar 19,87% cukup besar kemungkinan mutu beton yang ada pada sampel uji memiliki mutu yang lebih tinggi.

2. Balok Kontrol 2 (BK-2)

Balok Kontrol 2 menunjukkan beban maksimal yang dapat ditahan sebesar 97,776 kN setelah dilakukannya pengujian balok tersebut, dengan lendutan sebesar 72,646 mm. Momen maksimum yang terjadi pada balok kontrol 2 sebesar 19,711 kNm. Dibandingkan dengan balok normal teoritis yang hanya sebesar 15,937 kNm persentase selisihnya sebesar 23,68% cukup besar kemungkinan mutu beton yang ada pada sampel uji memiliki mutu yang lebih tinggi.

Hubungan beban dan lendutan pada Balok Kontrol 2 dapat dilihat pada grafik Gambar 5.8 berikut.



Gambar 5. 8 Grafik Beban dan lendutan pada balok kontrol

Pada balok kontrol 1 didapat beban maksimum sebesar 94,752 kN dan balok kontrol 2 didapat beban maksimum sebesar 97,776 kN, Momen maksimum masing-masing balok kontrol adalah 19,103 kNm dan 19,711 kNm, apabila dibandingkan dengan perhitungan balok teoritisnya kapasitas balok kontrol sebesar 15,940 kNm lebih kecil daripada saat pengujian kemungkinan disebabkan oleh mutu material yang tidak sama persis seperti di teori, akan tetapi hasilnya tetap tidak jauh berbeda. Grafik diatas menunjukkan balok memiliki sifat daktail karena mengalami kenaikan yang bertahap. Hubungan beban dan lendutan pada balok kontrol pada grafik diatas memiliki kinerja yang hampir mirip sehingga dapat menjadi acuan untuk batas pembebanan pada balok perkuatan pada GFRP.

5.7.2 Kinerja Balok Perkuatan Pada beban 50% dari Balok Kontrol

Balok Perkuatan yang pertama itu diuji sebesar 50% dari beban maksimum Balok Kontrol (BK) dengan nilai beban maksimum dari Balok Kontrol sebesar 96,264 kN, sehingga 50% dari beban maksimum adalah 48,132 kN. Balok Perkuatan yang pertama akan diuji hingga beban mencapai 48,132 kN. Ini

dilakukan sebelum diberi GFRP. Hasil pengujian dari Balok Perkuatan Pada beban 50% dari Balok Kontrol sebelum diperkuat GFRP sebagai berikut.

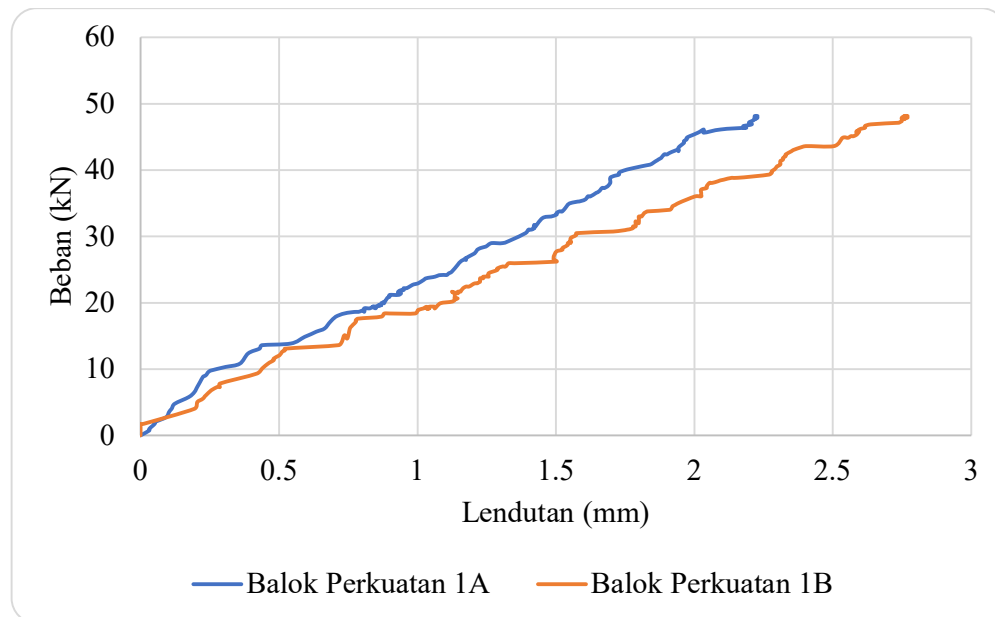
1. Balok Perkuatan 1A (BP-1A)

Balok Perkuatan 1A menunjukkan kestabilan peningkatan kekuatan dengan lendutan pada beban 50% dari Balok kontrol sebesar 2,218 mm.

2. Balok Perkuatan 1B (BP-1B)

Balok Perkuatan 1B menunjukkan kestabilan peningkatan kekuatan dengan lendutan pada beban 50% dari Balok kontrol sebesar 2,759 mm.

Hubungan beban dan lendutan pada Balok Perkuatan 1A dan 1B sebelum diberi GFRP dapat dilihat Gambar 5.9 berikut.



Gambar 5. 9 Grafik Beban dan lendutan pada balok Perkuatan 1A dan 1B sebelum diberi GFRP

Pengujian balok perkuatan 1A dan 1B sebelum diperkuat GFRP dan diberi beban 50% dari balok kontrol memiliki kinerja yang hampir mirip dengan lendutan balok perkuatan 1A sebesar 2,218 mm dan balok perkuatan 1B sebesar 2,759 mm

dan dilihat dari grafik diatas balok masih mengalami daktilail oleh karena itu bisa dilanjutkan dengan pelapisan GFRP untuk pengujian selanjutnya.

5.7.3 Kinerja Balok Perkuatan Pada beban 75% dari Balok Kontrol

Balok Perkuatan yang kedua itu diuji sebesar 75% dari beban maksimum Balok Kontrol (BK) dengan nilai beban maksimum dari Balok Kontrol sebesar 96,264 kN, sehingga 75% dari beban maksimum adalah 72,198 kN. Balok Perkuatan yang kedua akan diuji hingga beban mencapai 72,198 kN. Ini dilakukan sebelum diberi GFRP. Hasil pengujian dari Balok Perkuatan Pada beban 75% dari Balok Kontrol sebelum diperkuat GFRP sebagai berikut.

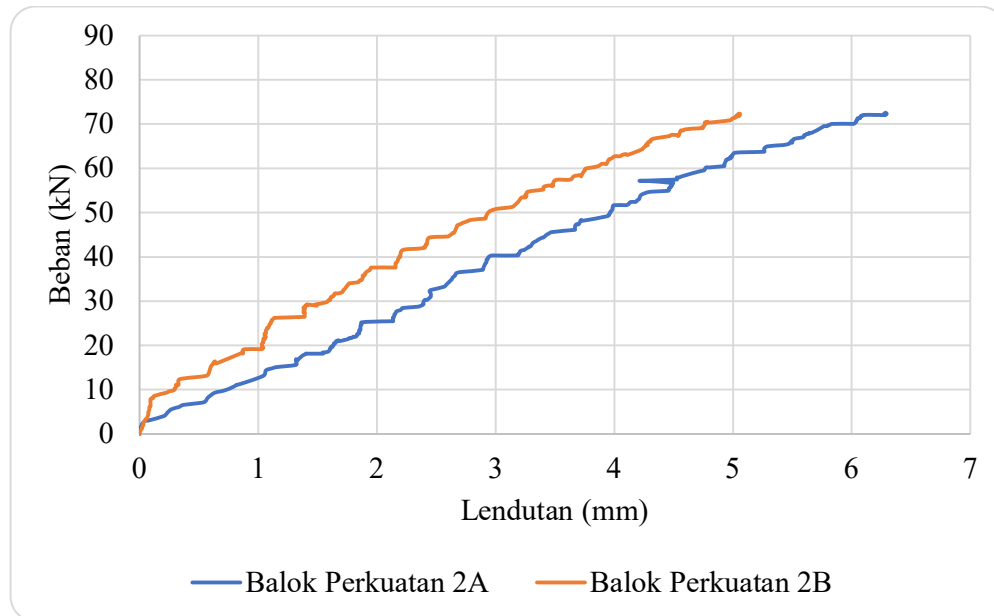
1. Balok Perkuatan 2A (BP-2A)

Balok Perkuatan 2A menunjukkan kestabilan peningkatan kekuatan dengan lendutan pada beban 75% dari Balok kontrol sebesar 6,285 mm

2. Balok Perkuatan 2B (BP-2B)

Balok Perkuatan 2B menunjukkan kestabilan peningkatan kekuatan dengan lendutan pada beban 75% dari Balok kontrol sebesar 5,049 mm

Hubungan beban dan lendutan pada Balok Perkuatan 2A dan 2B sebelum diberi GFRP dapat dilihat Gambar 5.10 berikut.



Gambar 5. 10 Grafik Beban dan lendutan pada balok Perkuatan 2A dan 2B sebelum diberi GFRP

Pengujian balok perkuatan 2A dan 2B sebelum diperkuat GFRP dan diberi beban 75% dari balok kontrol memiliki kinerja yang hampir mirip dengan lendutan balok perkuatan 2A sebesar 6,285 mm dan balok perkuatan 2B sebesar 5,049 mm dan dilihat dari grafik diatas balok masih mengalami daktilitas oleh karena itu bisa dilanjutkan dengan pelapisan GFRP untuk pengujian selanjutnya.

5.8 Pengaruh perkuatan *Glass Fiber Reinforced Polymer* (GFRP) Terhadap Kinerja Balok Beton Bertulang

Pemasangan GFRP pada bagian bawah lentur balok dimaksudkan untuk menambah kekuatan pada balok, percobaan pemasangan ini dilakukan setelah dilakukannya pembebanan pada balok, kemudian ditunggu selama 7 hari untuk GFRP melekat dengan sempurna.

5.8.1 Perkuatan GFRP Terhadap Kinerja Balok Pada Beban 50% Balok Kontrol

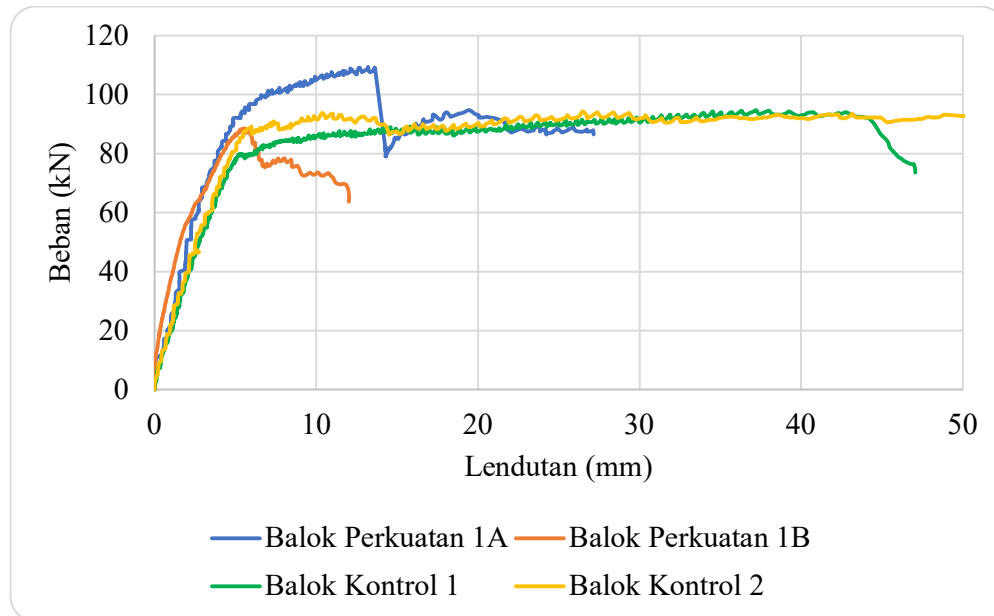
1. Balok Perkuatan 1A Setelah diberi GFRP

Pengujian balok yang diperkuat dengan GFRP pada balok yang telah diberi beban 50% yang pertama didapatkan data bahwa beban yang dapat ditahan sebesar 109,368 kN dan lendutan yang terjadi juga lebih kecil daripada Balok Kontrol yaitu sebesar 16,422 mm. Momen maksimum yang terjadi pada balok perkuatan 1A setelah diberi GFRP pembebanan 50% dari balok kontrol sebesar 22,029 kNm.

2. Balok Perkuatan 1B Setelah diberi GFRP

Pengujian balok yang diperkuat dengan GFRP pada balok yang telah diberi beban 50% yang kedua didapatkan data bahwa beban yang dapat ditahan sebesar 88,452 kN dan lendutan yang terjadi yaitu sebesar 5,568 mm. Momen maksimum yang terjadi pada balok perkuatan 1B setelah diberi GFRP pembebanan 50% dari balok kontrol sebesar 17,842 kNm.

Hubungan beban dan lendutan pada Balok Perkuatan 1A , 1B, balok kontrol 1 dan balok kontrol 2 setelah diperkuat GFRP dapat dilihat Gambar 5.11 berikut.



Gambar 5. 11 Grafik Beban dan lendutan pada balok Perkuatan 1A dan 1B setelah diberi GFRP

Pengujian balok perkuatan 1A dan 1B setelah diperkuat GFRP memiliki kinerja yang berbeda balok perkuatan 1A mengalami keruntuhan Lentur sedangkan balok perkuatan 1B mengalami geser yang kemungkinan disebabkan oleh mutu beton yang tidak sesuai dengan perhitungan, dengan lendutan balok perkuatan 1A sebesar 16,422 mm dan balok perkuatan 1B hanya sebesar 5,568 mm. Dilihat dari grafik diatas balok mengalami getas atau kaku tidak mengalami daktil dikarenakan terjadi penurunan garis grafik secara drastis ketika setelah mencapai beban maksimum masing-masing balok. Berbeda dengan balok kontrol yang mengalami kenaikan beban secara bertahap dan pelan, balok perkuatan 1A dan 1B cepat mencapai Beban maksimumnya dengan lendutan yang masih kecil kemudian mengalami petah secara tiba-tiba pada beban maksimumnya.

5.8.2 Perkuatan GFRP Terhadap Kinerja Balok Pada Beban 75% Balok Kontrol

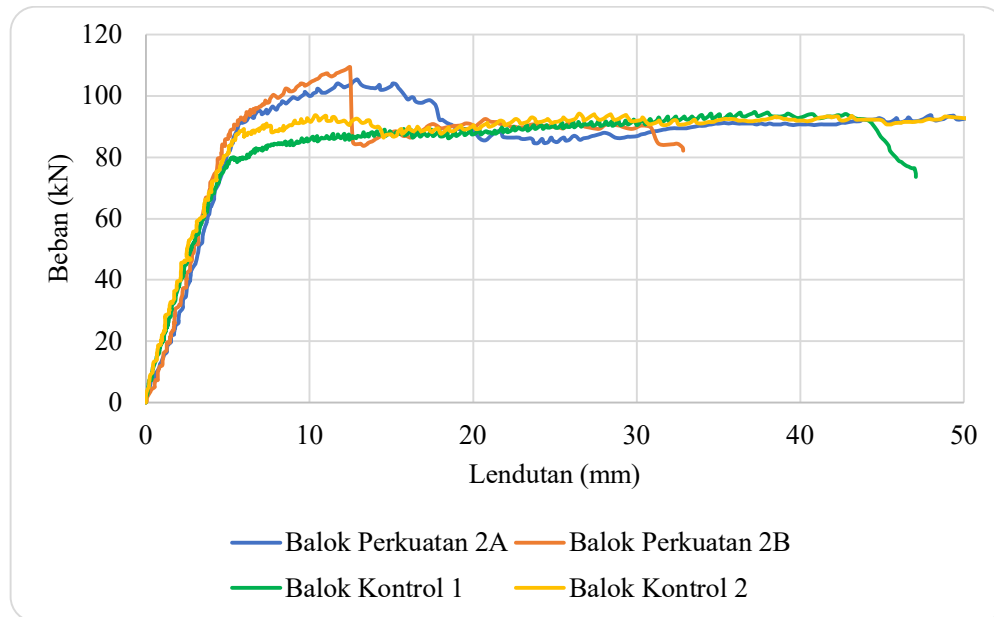
1. Balok Perkuatan 2A Setelah diberi GFRP

Setelah dilakukan pengujian balok yang diperkuat dengan GFRP pada balok yang telah diberi beban 75% yang pertama didapatkan data bahwa beban yang dapat ditahan sebesar 105,336 kN dan lendutan yang terjadi yaitu sebesar 15,934 mm. Momen maksimum yang terjadi pada balok perkuatan 2A setelah diberi GFRP pembebanan 75% dari balok kontrol sebesar 21,219 kNm.

2. Balok Perkuatan 2B Setelah diberi GFRP

Setelah dilakukan pengujian balok yang diperkuat dengan GFRP pada balok yang telah diberi beban 75% yang kedua didapatkan data bahwa beban yang dapat ditahan sebesar 109,368 kN dan lendutan yang terjadi yaitu sebesar 14,937 mm. Momen maksimum yang terjadi pada balok perkuatan 2B setelah diberi GFRP pembebanan 75% dari balok kontrol sebesar 22,025 kNm.

Hubungan beban dan lendutan pada Balok Perkuatan 2A , 2B, balok kontrol 1 dan balok kontrol 2 setelah diperkuat GFRP dapat dilihat Gambar 5.12 berikut.



Gambar 5. 12 Grafik Beban dan lendutan pada balok Perkuatan 2A dan 2B setelah diberi GFRP

Pengujian balok perkuatan 2A dan 2B setelah diperkuat GFRP memiliki kinerja yang mirip yaitu mengalami keruntuhan lentur, dengan lendutan balok perkuatan 2A sebesar 15,394 mm dan balok perkuatan 2B hanya sebesar 14,397 mm. Dilihat dari grafik diatas balok mengalami getas atau kaku tidak mengalami daktil dikarenakan terjadi penurunan garis grafik secara drastis ketika setelah mencapai beban maksimum masing-masing balok. Berbeda dengan balok kontrol yang mengalami kenaikan beban secara bertahap dan pelan, balok perkuatan 2A dan 2B cepat mencapai Beban maksimumnya dengan lendutan yang masih kecil kemudian mengalami petah secara tiba-tiba pada beban maksimumnya.

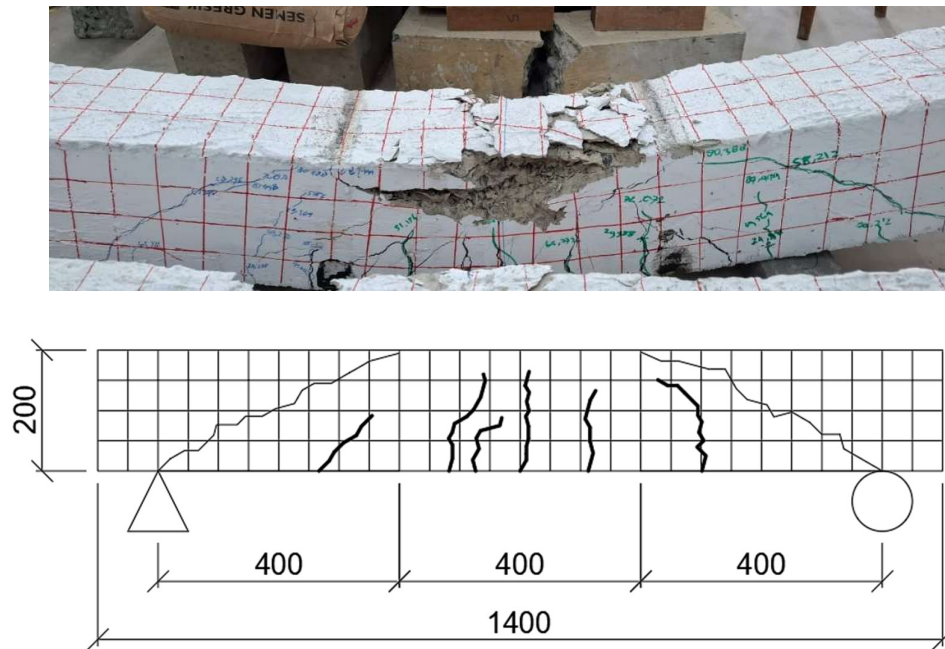
5.9 Pola Retak dan Kegagalan Balok

Peneliti mengamati pola retak yang berbeda pada masing-masing balok uji ketika menguji balok hingga terjadi keruntuhan. Di bawah ini terdapat gambaran mengenai pola retak yang muncul pada balok uji.

5.9.1 Balok Kontrol

1. Balok Kontrol 1

Pola retak pada balok kontrol pertama dapat dilihat pada Gambar 5.13 di bawah ini :

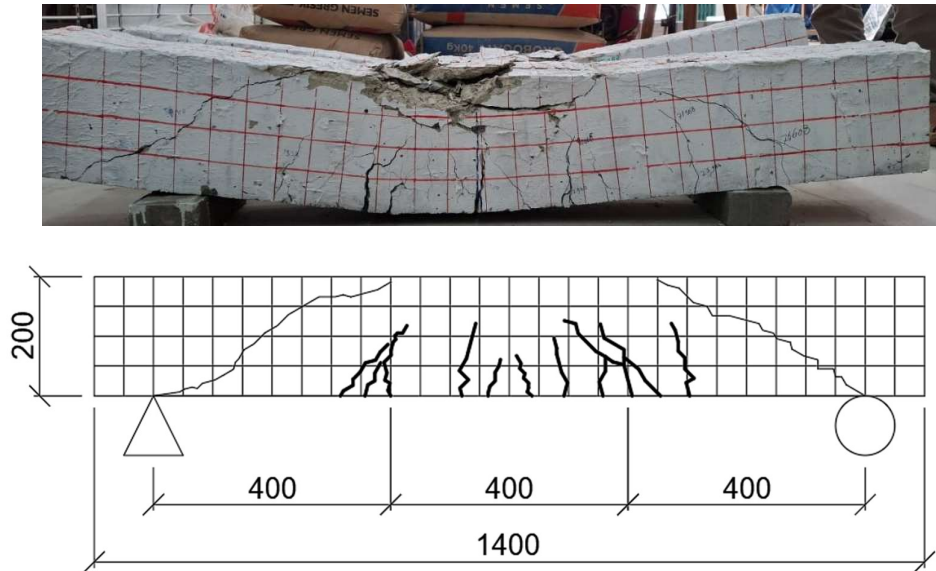


Gambar 5. 13 Pola Retak pada Balok Kontrol 1

Pola retak pada balok kontrol pertama diidentifikasi sebagai keruntuhan lentur karena balok mengalami daktil (terjadi secara bertahap) dan ditandai dengan adanya lendutan besar sebelum keruntuhan akhir. Pola retak banyak terjadi dibagian bawah balok, disebabkan karena Retak terjadi pada saat tegangan tarik pada tepi bawah penampang mencapai kuat tarik beton, pada saat retak terbentuk gaya tarik pada beton di lokasi retak akan ditransfer ke tulangan baja, sehingga efektivitas penampang beton dalam menahan momen menjadi berkurang. Setelah baja tulangan leleh, kelengkungan balok meningkat dengan cepat hingga tercapai kondisi runtuh.

2. Balok Kontrol 2

Pola retak pada balok kontrol pertama dapat dilihat pada Gambar 5.14 di bawah ini :



Gambar 5. 14 Pola Retak pada Balok Kontrol 2

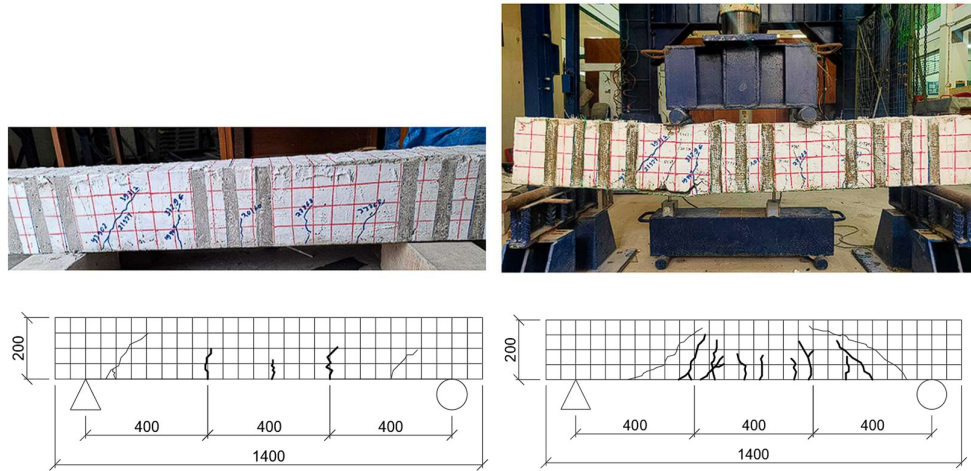
Pola retak pada balok kontrol pertama diidentifikasi sebagai keruntuhan lentur karena balok mengalami daktail (terjadi secara bertahap) dan ditandai dengan adanya lendutan besar sebelum keruntuhan akhir, ini sama seperti balok kontrol yang pertama, sehingga balok kontrol dapat kita jadikan menjadi balok acuan untuk balok perkuatan nantinya.

5.9.2 Balok Pada beban 50% Balok Kontrol

Pola keruntuhan dan kegagalan pada balok perkuatan dibagi menjadi dua pengamatan yang pertama dilakukan sebelum diperkuat GFRP dan pembebanan 50% dari beban maksimum balok kontrol kemudian dilakukan ulang pengamatan setelah dilakukan pelapisan perkuatan GFRP dan dilakukan sampai beban maksimum balok tersebut.

1. Balok Perkuatan 1A

Pola retak pada balok perkuatan 1A sebelum dan sesudah diberi GFRP dapat dilihat pada Gambar 5.15 di bawah ini :

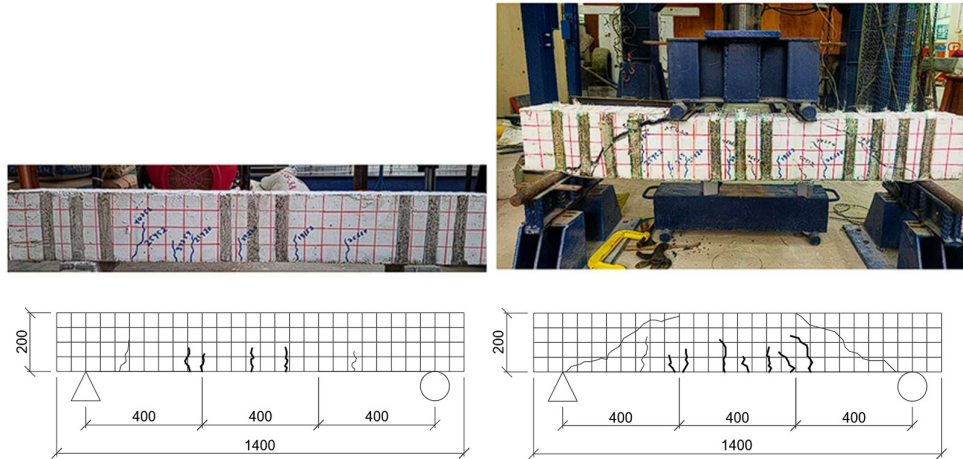


Gambar 5. 15 Pola Retak Balok Perkuatan 1A sebelum diberi GFRP pembebanan 50% dari Balok kontrol (kiri) dan Sesudah diberi GFRP (Kanan)

Retak pada balok sebelum diberi GFRP dan pembeban 50% dari balok kontrol hanya mengalami retak kecil dan terlihat bahwa retaknya merupakan retak lentur, kemudian untuk balok perkuatan 1A setelah diberi GFRP dan dilakukan pembebanan sampai maksimum Pada balok Perkuatan GFRP beban 50% ini terlihat bahwa balok mengalami retak lentur, akan tetapi GFRP yang terpasang mengalami delaminasi atau terlepasnya GFRP pada balok dan bagian tengah bentang GFRP juga mengalami putus.

2. Balok Perkuatan 1B

Pola retak pada balok perkuatan 1B sebelum dan sesudah diberi GFRP dapat dilihat pada Gambar 5.16 di bawah ini :



Gambar 5. 16 Pola Retak Balok Perkuatan 1B sebelum diberi GFRP pembebanan 50% dari Balok kontrol (kiri) dan Sesudah diberi GFRP (Kanan)

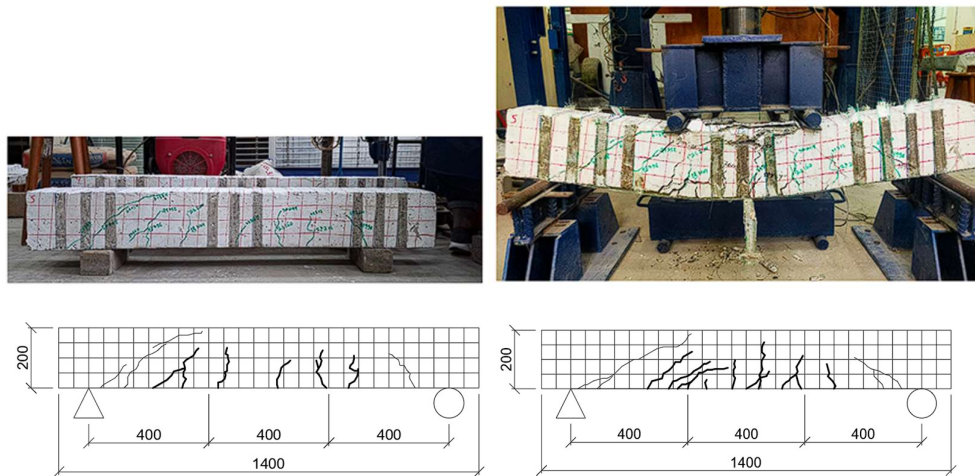
Retak pada balok sebelum diberi GFRP dan pembebanan 50% dari balok kontrol hanya mengalami retak kecil dan terlihat bahwa retaknya merupakan retak Lentur dan geser, kemudian untuk balok perkuatan 1A setelah diberi GFRP dan dilakukan pembebanan sampai maksimum Pada balok Perkuatan GFRP beban 50% ini terlihat bahwa balok mengalami retak geser dan GFRP yang terpasang mengalami deliminasi atau terlepasnya GFRP pada balok tapi tidak sampai mengalami putus pada GFRP nya.

5.9.3 Balok Pada beban 75% Balok Kontrol

Pola keruntuhan dan kegagalan pada balok perkuatan yang kedua dibagi menjadi dua pengamatan juga yang pertama dilakukan sebelum diperkuat GFRP dan pembebanan 75% dari beban maksimum balok kontrol kemudian dilakukan ulang pengamatan setelah dilakukan pelapisan perkuatan GFRP dan dilakukan sampai beban maksimum balok tersebut.

1. Balok Perkuatan 2A

Pola retak pada balok perkuatan 2A sebelum diberi GFRP dapat dilihat pada Gambar 5.17 di bawah ini :

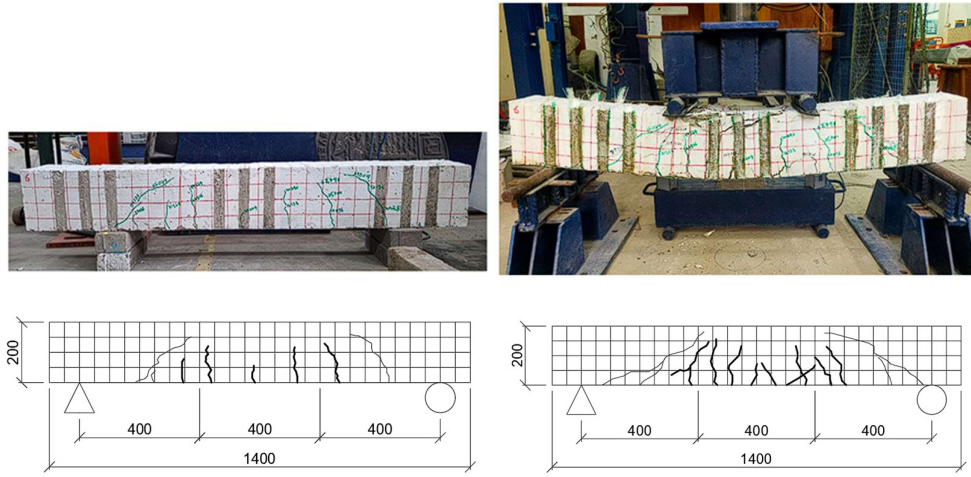


Gambar 5. 17 Pola Retak Balok Perkuatan 2A sebelum diberi GFRP pembebanan 75% dari Balok kontrol (kiri) dan Sesudah diberi GFRP (Kanan)

Retak pada balok sebelum diberi GFRP hanya mengalami retak kecil dan terlihat bahwa retaknya merupakan retak lentur. Pada balok Perkuatan GFRP beban 75% ini setelah dilakukan pelapisan GFRP dan dilakukan pengujian terlihat bahwa balok mengalami retak lentur dan GFRP yang terpasang mengalami delaminasi atau terlepasnya GFRP pada balok dan bagian tengah bentang GFRP juga mengalami putus total.

2. Balok Perkuatan 2B

Pola retak pada balok perkuatan 2B sebelum diberi GFRP dapat dilihat pada Gambar 5.18 di bawah ini :



Gambar 5. 18 Pola Retak Balok Perkuatan 2B sebelum diberi GFRP pembebanan 75% dari Balok kontrol (kiri) dan Sesudah diberi GFRP (Kanan)

Retak pada balok sebelum diberi perkuatan GFRP hanya mengalami retak kecil dan terlihat bahwa retaknya merupakan retak lentur. Pada balok Perkuatan GFRP beban 75% setelah dilapisi GFRP ini terlihat bahwa balok mengalami retak lentur, akan tetapi GFRP yang terpasang mengalami delaminasi pada balok dan bagian tengah bentang bawah GFRP juga mengalami putus.

5.10 Perbandingan Balok Kontrol dan Diperkuat GFRP

Dari hasil perhitungan yang kita dapatkan dari hasil pengujian maka kita dapat membuat perbandingan peningkatan kekuatan dari balok kontrol yang menjadi acuan balok beton normal (kontrol) dengan balok perkuatan menggunakan GFRP dengan beban masing-masing 50% dan 75%.

5.10.1 Balok Kontrol dan Balok Beban 50%

Perbandingan antara Balok kontrol dan balok perkuatan dengan GFRP beban 50% dapat dilihat pada Tabel 5.8 dan Gambar 5.19 berikut :

Tabel 5. 8 Perbandingan Balok Kontrol dan Balok perkuatan 1

No	Sampel	Beban Maksimum (kN)	Lendutan (mm)	Momen Maksimum (kNm)
1	Balok Kontrol 1	94,752	37,221	19,103
2	Balok Kontrol 2	97,776	72,646	19,711
3	Balok Perkuatan 1A	109,368	13,198	22,029
4	Balok Perkuatan 1B	88,452	5,568	17,842

Dari Tabel 5.8 diatas bisa kita lihat perbandingan antara balok kontrol dan balok perkuatan dengan GFRP beban 50%, balok yang diperkuat dengan GFRP mengalami peningkatan yang awalnya balok kontrol hanya dapat menerima beban masing-masing balok kontrol 1 dan 2 sebesar 94,752 kN dan 97,776 kN, balok perkuatan 1A dengan beban yang dapat diterima sebesar 109,368 kN, dari data tersebut dapat kita ketahui peningkatan beban maksimum yang dapat ditahan oleh balok setelah diperkuat dengan GFRP jenis *Woven Roving* 200 ini sebesar 13,61% pada balok 1A, pada balok yang telah diberi beban 50% dari balok kontrol namun balok perkuatan 1B mengalami penurunan disebabkan oleh balok mengalami kegagalan geser. Kemudian untuk beban maksimum balok perkuatan juga mengalami peningkatan yang awalnya momen maksimum pada balok kontrol 1 dan 2 masing-masing memiliki momen sebesar 19,103 dan 19,711 kNm sedangkan balok perkuatan 1A mencapai 22,029 kNm namun untuk balok perkuatan 1B mendapat momen maksimum dibawah balok kontrol sama seperti beban maksimumnya hanya mencapai 17,842 kNm nilai tersebut didapat dari perhitungan dari beban dikalikan dengan jarak nya, atau bisa dilihat pada lampiran. Pada saat beban maksimum tercapai balok mengalami penurunan kekuatan secara tiba-tiba atau biasa disebut getas atau kaku, sehingga sangat berbahaya untuk struktur yang dimana struktur balok diharapkan mengalami daktail.

5.10.2 Balok Kontrol dan Balok Beban 75%

Perbandingan antara Balok kontrol dan balok perkuatan dengan GFRP beban 75% dapat dilihat pada Tabel 5.9 dan Gambar 5.20 berikut :

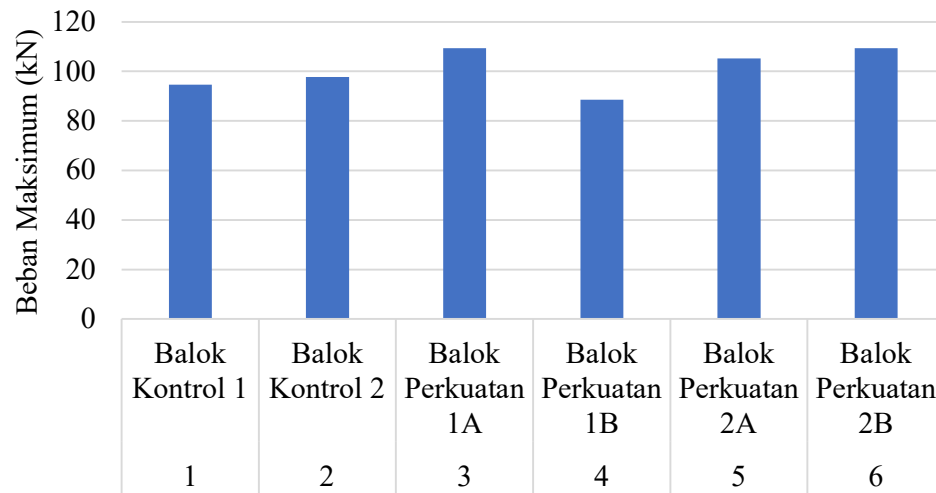
Tabel 5. 9 Perbandingan Balok Kontrol dan Balok perkuatan 2

No	Sampel	Beban Maksimum (kN)	Lendutan (mm)	Momen Maksimum (kNm)
1	Balok Kontrol 1	94,752	37,221	19,103
2	Balok Kontrol 2	97,776	72,646	19,711
3	Balok Perkuatan 2A	105,336	12,897	21,219
4	Balok Perkuatan 2B	109,368	12,652	22,025

Dari Tabel 5.9 bisa kita lihat perbandingan antara balok kontrol dan balok perkuatan dengan GFRP beban 75%, balok yang diperkuat dengan GFRP mengalami peningkatan yang awalnya balok kontrol hanya dapat menerima beban masing-masing balok kontrol 1 dan 2 sebesar 94,752 kN dan 97,776 kN, balok perkuatan dengan beban yang dapat diterima pada balok perkuatan 2A dan 2B sebesar 105,336 kN dan 109,368 kN, dari data tersebut dapat kita ketahui peningkatan beban maksimum yang dapat ditahan balok setelah diperkuat dengan GFRP jenis *Woven Roving* 200 ini mengalami peningkatan sebesar 9,42% pada balok yang telah diberi beban 75% (balok perkuatan 2A) dari balok kontrol sedangkan balok perkuatan 2B mengalami peningkatan beban maksimum sebesar 13,61%. Balok Perkuatan juga mengalami peningkatan pada beban maksimum nya yang awalnya momen maksimum pada balok kontrol 1 dan 2 masing-masing memiliki momen sebesar 19,103 dan 19,711 kNm kemudian mengalami peningkatan untuk balok perkuatan 2A sebesar 21,219 kNm dan 2B memiliki momen maksimum 22,025 kNm nilai tersebut didapat dari perhitungan dari beban dikalikan dengan jarak nya, atau bisa dilihat pada lampiran. Akan tetapi pada saat

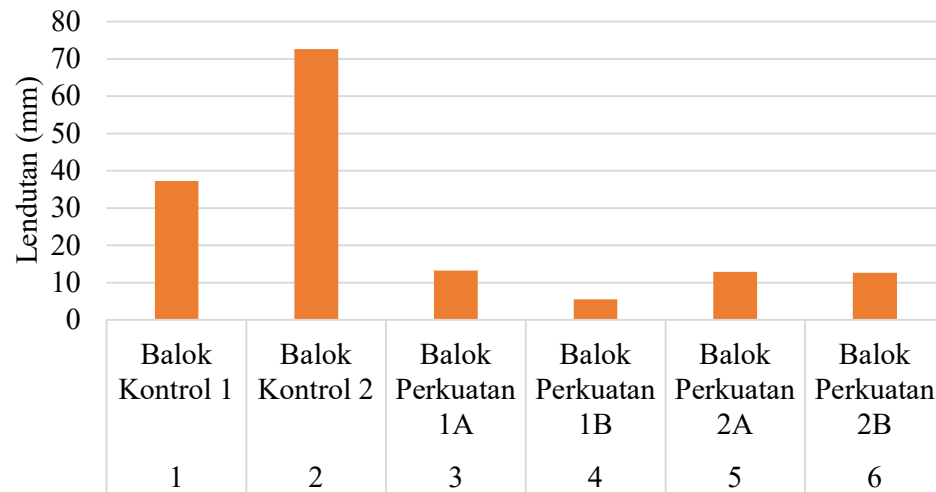
beban maksimum tercapai terjadi penurunan kekuatan secara tiba-tiba atau biasa disebut getas, sehingga sangat berbahaya untuk struktur yang dimana struktur balok diharapkan mengalami daktail sama seperti balok perkuatan 1 sebelumnya.

Perbandingan Beban Maksimum Balok Kontrol dengan balok perkuatan 1 dan Balok Perkuatan 2 dapat dilihat pada diagram Gambar 5.19 dibawah ini.



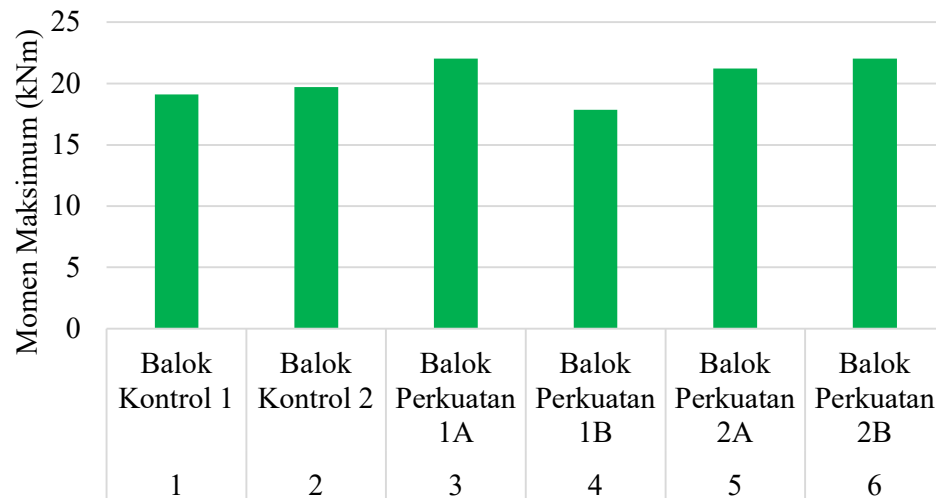
Gambar 5. 19 Perbandingan Beban Maksimum Balok Kontrol, Balok Perkuatan 1 dan Balok Perkuatan 2

Perbandingan Lendutan Balok Kontrol dengan balok perkuatan 1 dan Balok Perkuatan 2 dapat dilihat pada diagram Gambar 5.20 dibawah ini.



Gambar 5. 20 Perbandingan Lendutan Balok Kontrol, Balok Perkuatan 1 dan Balok Perkuatan 2

Perbandingan Momen Maksimum Balok Kontrol dengan balok perkuatan 1 dan Balok Perkuatan 2 dapat dilihat pada diagram Gambar 5.21 dibawah ini.



Gambar 5. 21 Perbandingan Momen Maksimum Balok Kontrol, Balok Perkuatan 1 dan Balok Perkuatan 2

Perbandingan Balok Kontrol dengan balok perkuatan 1 dan Balok Perkuatan 2 terdapat Lendutan, lendutan yang diambil merupakan lendutan yang berada di beban maksimum balok nya. Dapat dilihat pada diagram diatas menunjukkan bahwa balok yang tidak diperkuat GFRP bersifat daktail, sedangkan balok yang diperkuat GFRP mengalami getas.

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan serta hasil analisis dan pembahasan sebelumnya, beberapa kesimpulan dapat diambil dalam dua poin penting sebagai berikut.

1. Hasil dari pengujian lentur balok pada balok kontrol mendapatkan hasil beban maksimum dari dua balok kontrol masing-masing balok kontrol 1 dan 2 didapatkan beban maksimum 94,752 kN dan 97,776 kN, untuk Sampel Balok perkuatan 1A mengalami keruntuhan lentur dan peningkatan kekuatan yang dapat ditahan oleh balok yaitu sebesar 109,368 kN sedangkan balok perkuatan 1B mengalami penurunan disebabkan kualitas sampel beton yang kurang baik mendapatkan beban maksimum sebesar 88,452 kN, pengujian lentur balok perkuatan setelah pembebanan 75% dari beban maksimum balok kontrol untuk perkuatan 2A mendapatkan beban maksimum yang dapat ditahan oleh balok yaitu sebesar 105,336 kN dan balok perkuatan 2B mendapatkan beban maksimum senilai 109,368 kN. Hal ini disimpulkan bahwa balok perkuatan GFRP berpengaruh menaikkan beban maksimum dari balok.
2. Pengujian sampel balok setelah pembebanan 50% dan 75% dari balok kontrol didapatkan beban yang dapat diterima mengalami kenaikan. Untuk Balok perkuatan setelah pembebanan 50% mengalami kenaikan sebesar 13,61% dari beban maksimum balok kontrol kemudian untuk balok perkuatan setelah pembebanan 75% mengalami kenaikan sebesar tertinggi sebesar 9,45% dari beban maksimum balok kontrol. Hasil dari pengujian juga menunjukkan bahwa balok yang diperkuat GFRP momen maksimumnya mengalami peningkatan dari pada balok kontrol 1 dan balok kontrol 2 yang memiliki momen maksimum masing-masing sebesar 19,103 kNm dan 19,711 kNm. Peningkatan masing-masing balok perkuatan dari balok perkuatan 1A mendapatkan momen

maksimum sebesar 22,029 kNm, balok perkuatan 1B mendapatkan momen maksimum sebesar 17,842 kNm, balok perkuatan 2A mendapatkan momen maksimum sebesar 21,219 kNm dan balok perkuatan 2B mendapatkan momen maksimum 22,025 kNm. Balok perkuatan 1B mengalami penurunan momen maksimum dari pada balok kontrol dikarenakan balok mengalami geser saat pengujian sehingga tidak mencapai momen maksimum balok yang lebih tinggi dari balok kontrol. Akan tetapi disaat balok mencapai kekuatan maksimumnya, balok mengalami penurunan perkuatan secara signifikan yang dapat diartikan bahwa balok mengalami deformasi getas. Dari penjelasan tersebut penggunaan lembaran GFRP jenis *Woven Roving* 200 sebagai perkuatan balok beton bertulang efektif dalam meningkatkan kapasitas lentur struktur balok. Namun kurang efektif digunakan apabila memperhatikan kedaktailan balok tersebut.

6.2 Saran

Setiap kegiatan penelitian tidak lepas adanya masalah yang dihadapi oleh peneliti, begitu juga pada penelitian ini, berdasarkan hasil dari penelitian yang telah dilakukan disarankan beberapa hal untuk penelitian dimasa depan untuk perbaikan dan menjadi lebih dikembangkan menjadi lebih baik seperti berikut.

1. Peneliti menggunakan jenis *Glass Fiber Woven Roving* 200, kedepannya dapat dicoba menggunakan jenis fiber yang berbeda seperti *Woven Roving* 400, 600 dan 800.
2. Penggunaan epoksi yang berbeda dapat dilakukan dipenelitian dimasa depan.
3. Kegiatan pembuatan sampel pengujian diharapkan dilakukan dengan sesuai perhitungan dan prosedur agar tidak terjadi kesalahan pada saat pengujian.
4. Penelitian saat ini hanya menambahkan fiber di geser balok hanya sedikit, pada penelitian dimasa depan dapat lebih diperhatikan penambahan GFRP pada geser baloknya sesuai dengan SNI atau peraturan yang ada.

DAFTAR PUSTAKA

- ACI Committee 318. 2019. *Building code requirements for structural concrete (ACI 318-19) : an ACI standard ; Commentary on building code requirements for structural concrete (ACI 318R-19)*. Farmington Hills, MI :American Concrete Institute.
- ACI Committee 440. 2002. *Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures*. Farmington Hills, MI :American Concrete Institute.
- Alimi, Fikri dan Widyawati. R, 2010. *Studi Eksperimental Kekuatan Geser Balok Beton Bertulang dengan GFRP*, Jurnal Rekayasa. 14,(2), 109-123
- American Society for Testing and Materials. 2002. *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*. ASTM Designation: D 3039/D 3039M-00. West Conshohocken. PA.
- Ananda, Amarta. 2021. *Pengaruh Penggunaan Carbon Fiber Reinforced Polymer Sebagai Bahan Pengganti Baja Tulangan Terhadap Kuat Lentur Beton (The Effect Of Carbon Fiber Reinforced Polymer As The Replacement Of Reinforcing Steel On Concrete Flexural Strength)*. Tugas Akhir. Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.
- Asroni, A. 2010. *Balok dan Pelat Beton Bertulang*. Graha Ilmu. Yogyakarta.
- AY, N. I. 2023. *Studi Perbandingan Kuat Lentur Balok Beton Bertulang dengan Perkuatan Serat Karbon dan Hybrid Serat Gelas dan Karbon*. Journal of Applied Civil and Environmental Engineering, 3(1), 69-77.
- Ayesha, Siddika., Md., Abdullah, Al, Mamun., Rayed, Alyousef., Y.H., Mugahed, Amran. 2019. *Strengthening of reinforced concrete beams by using fiber-reinforced polymer composites: A review*. Journal of building engineering, 25:100798-. doi: 10.1016/J.JOBE.2019.100798
- Badan Standardisasi Nasional Jakarta. 2013. *Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung*. BSN. Jakarta.
- Chandra Paul, S., van Zijl, G. P. A. G., & Šavija, B. 2020. *Effect of fibers on durability of concrete: A practical review*. Materials, 13(20), 1-26. Article 4562.
- Christiawan, I. 2009. *Perkuatan (Strengthening) Struktur Beton dengan Fiber Reinforced Polymer (FRP)*. Tugas Akhir. Universitas Diponegoro. Semarang.
- Ginardi, I. P., Anggraini, R., & Suseno, H. 2014. *Perbandingan kekuatan lentur balok beton bertulang dengan menggunakan perkuatan CFRP dan GFRP* (Doctoral dissertation, Brawijaya University).

- Isneini, M., & Alami, F. 2019. *Studi perkuatan lentur balok beton bertulang menggunakan GFRP (Glass fiber reinforced polymer) dan WM (wiremesh)*. Jurnal Rekayasa Sipil dan Desain, 7(2), 235-246.
- Kumar, P, Kumar. S. 2019. *Experimental study on glass fiber reinforced concrete beam at different percentages*, International Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (www.jetir.org | UGC and issn Approved), ISSN:2349-5162, Vol.6, Issue 4, page no. pp437-444.
- Luastika, G. N., Lingga, A. A., & Lestyowati, Y. 2019. *Perkuatan Lentur Balok Beton Bertulang dengan Glass Fiber Reinforced Polymer*. JeLAST: Jurnal PWK, Laut, Sipil, Tambang, 6(2).
- Nurbaiah, M.N., Hanizah, A.H., Farhana, I.N. 2014. *Flexural Behavior of Reinforced Concrete (RC) Beams with Externally Bonded (EB) Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Sheets*. Springer, Singapore.
- Pramono, D. dan Suryadi, H.S. 2008. *Bahan Konstruksi Teknik*. Diktat Kuliah Universitas Gunadarma. Jakarta.
- Pranata, D. R., Witjaksana, B., & Tjendani, H. T. 2022, October. *Analisis Perkuatan Struktur Beton dengan Menggunakan Carbon Fiber Reinforced Polymer (Cfrp), dan Glass Fiber Reinforced Polymer (Gfrp) Terhadap Biaya*. In Senakama: Prosiding Seminar Nasional Karya Ilmiah Mahasiswa (Vol. 1, No. 1, pp. 35-45).
- Singh, Shamsheer Bahadur. 2024. *RC Structures Strengthened with FRP for Earthquake Resistance*. Singapore :Springer Singapore Pte. Limited.
- SNI. 1991. *Tata Cara Perhitungan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung*. Standar Nasional Indonesia. SK-SNI T-15-1991-03.
- SNI. 1994. *Semen Portland Komposit*. Standar Nasional Indonesia. SNI 15-2049-1994.
- SNI. 2000. *Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal*. Standar Nasional Indonesia. SNI 03-2843-2000.
- SNI. 2002. *Spesifikasi Bahan Bangunan Indonesia*. Standar Nasional Indonesia. SNI 03-6961-2002.
- SNI. 2002. *Tata Cara Perencanaan Struktur Baja Untuk Bangunan Gedung*. Standar Nasional Indonesia. SNI 03-1729-2002.
- SNI. 2008. *Cara Uji Berat Isi, Volume Produksi Campuran dan Kadar Udara Beton*. Standar Nasional Indonesia. SNI 1973:2008.
- SNI. 2013. *Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung*. Standar Nasional Indonesia. SNI 2847-2013.

- Sudiasa, I M. A., 2002. *Perilaku Runtuh Balok Beton Bertulang Dengan Penambahan Lapis Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)*. Tugas Akhir, Fakultas Teknik Universitas Udayana, Denpasar.
- Vernanda, D., Alami, F., & Issneini, M. 2019. *Studi Eksperimental Perkuatan Balok Beton Bertulang dengan Wiremesh dan GFRP*. Jurnal Rekayasa Sipil dan Desain, 7(1), 27-36.
- Wagola, E. S. 2021. *Analisis Kapasitas Lentur Balok Beton Bertulang dengan Perkuatan GFRP Akibat Rendaman Air Laut*. Journal of Science and Technology, 1(2), 119-129.

LAMPIRAN

Lampiran 1

Dokumentasi



Gambar 1 Persiapan Pengujian Material



Gambar 2 Pembersihan Material



Gambar 3 Persiapan *Glass Fiber*



Gambar 4 Pengecoran Sampel Balok



Gambar 5 Uji Slump beton Sebelum di aplikasikan ke Sampel balok



Gambar 6 Pembuatan Bekisting Untuk Sampel Balok Pengujian



Gambar 7 Perakitan Tulangan untuk Sampel balok



Gambar 8 Pembukaan Bekisting sampel balok Setelah 28 Hari



Gambar 9 Sampel Balok



Gambar 10 Pengecatan Sampel Balok



Gambar 11 Sampel GFRP sebelum dilakukan uji tarik GFRP



Gambar 12 Uji tarik GFRP menggunakan alat CTM



Gambar 13 Sampel GFRP setelah dilakukan uji tarik GFRP



Gambar 14 Pengujian Lentur Sampel Balok kontrol



Gambar 15 Epoksi untuk merekatkan Fiber ke Sampel Balok



Gambar 16 Gerinda Balok Sampel perkuatan sebelum penempelan Fiber



Gambar 17 Penempelan Fiber ke sampel balok perkuatan setelah di beri beban 50% dan 75% dari beban maksimum balok kontrol



Gambar 18 Pengujian sampel Balok perkuatan setelah diberi GFRP

Lampiran 2

Hasil

Pengujian

HASIL PENGUJIAN BERAT JENIS DAN PENYERAPAN AGREGAT HALUS
(BERDASARKAN SNI 03-1970-1990)

Nama Peneliti : Hanifardhi
NIM : 20511395
Tanggal Pembuatan :
Tanggal Pengujian :

Uraian	Hasil
Berat Pasir kering mutlak, gram (Bk)	484
Berat pasir kondisi jenuh kering muka (SSD), gram	500
Berat piknometer berisi pasir dan air, gram (Bt)	1173
Berat piknometer berisi air, gram (B)	850
Berat jenis curah, gram/cm ³ Bk/ (B + 500 - Bt)	(1) 2,704
Berat jenis jenuh kering muka, gram/cm ³ 500/ (B + 500 - Bt)	(2) 2,793
Berat jenis semu Bk/ (B + Bk - Bt)	(3) 2,969
Penyerapan air, % (500 - Bk) / Bk x 100%	(4) 3,306

Mengetahui Labora :
1 . :
2 . :

HASIL PENGUJIAN MODULUS HALUS BUTIR AGREGAT HALUS
(BERDASARKAN SNI 03-1970-1990)

Nama Peneliti : Hanifardhi
NIM : 20511395
Tanggal Pembuatan :
Tanggal Pengujian :

Lubang Ayakan (mm)	Berat Tertinggal (gram)	Berat Tertinggal (%)	Berat Tertinggal Kumulatif (%)	Persen Lolos Kumulatif (%)
10	0	0	0	100
4,8	0	0	0	100
2,4	109	5,45	5,45	94,55
1,2	288	14,40	19,85	80,15
0,6	635	31,75	51,60	48,20
0,3	583	29,15	80,75	19,25
0,15	316	15,80	96,55	3,45
Sisa	69	3,45	100	0
Jumlah	2000	100	254,20	

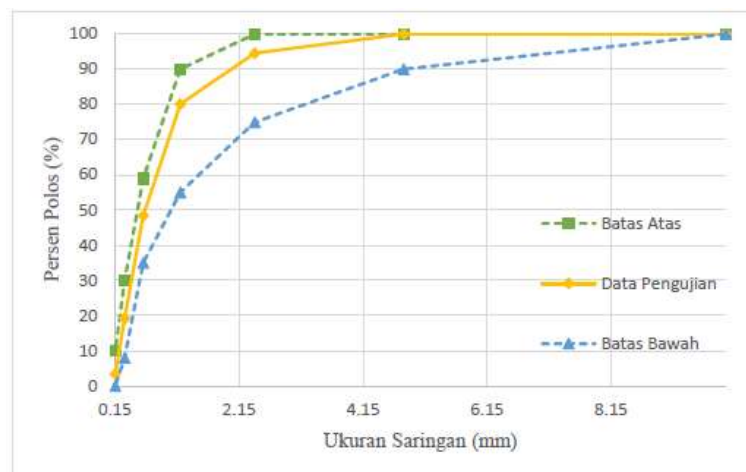
Mengetahui Labora :
1 . :
2 . :

HASIL PENGUJIAN MODULUS HALUS BUTIR AGREGAT HALUS (BERDASARKAN SNI 03-1970-1990)

Nama Peneliti : Hanifardhi
NIM : 20511395
Tanggal Pembuatan :
Tanggal Pengujian :

Hasil Analisa Saringan

- Pasir masuk ke dalam daerah gradasi Nomor II
- Jenis pasir berupa pasir agak kasar



Mengetahui Labora :
1 . :
2 . :

HASIL PENGUJIAN KANDUNGAN LUMPUR AGREGAT HALUS
(BERDASARKAN SNI 03-1970-1990)

Nama Peneliti : Hanifardhi
NIM : 20511395
Tanggal Pembuatan :
Tanggal Pengujian :

Uraian	Hasil Pengamatan
Berat Agregat Kering Oven, gram (w1)	500
Berat Agregat Kering Oven Setelah dicuci, gram (w2)	495,4
Berat yang Lolos Ayakan No. 200, % $[(w1 - w2)/w1] \times 100\%$	0,90 %

Mengetahui Labora :
1 . :
2 . :

HASIL PENGUJIAN BERAT JENIS DAN PENYERAPAN AGREGAT KASAR
(BERDASARKAN SNI 03-1970-1990)

Nama Peneliti : Hanifardhi
 NIM : 20511395
 Tanggal Pembuatan :
 Tanggal Pengujian :

Uraian	Hasil
Berat Kerikil kering mutlak, gram (Bk)	4854
Berat kerikil kondisi jenuh kering muka (SSD), gram (Bj)	5000
Berat kerikil dalam air, gram (Ba)	2937
Berat jenis curah, gram/cm ³ $Bk / (B + 500 - Bt)$ (1)	2,353
Berat jenis jenuh kering muka, gram/cm ³ $500 / (B + 500 - Bt)$ (2)	2,424
Berat jenis semu $Bk / (B + Bk - Bt)$ (3)	2,532
Penyerapan air, % $(500 - Bk) / Bk \times 100\%$ (4)	3,010

Mengetahui Labora :
 1 . :
 2 . :

HASIL PENGUJIAN MODULUS HALUS BUTIR AGREGAT KASAR
(BERDASARKAN SNI 03-1970-1990)

Nama Peneliti : Hanifardhi
 NIM : 20511395
 Tanggal Pembuatan :
 Tanggal Pengujian :

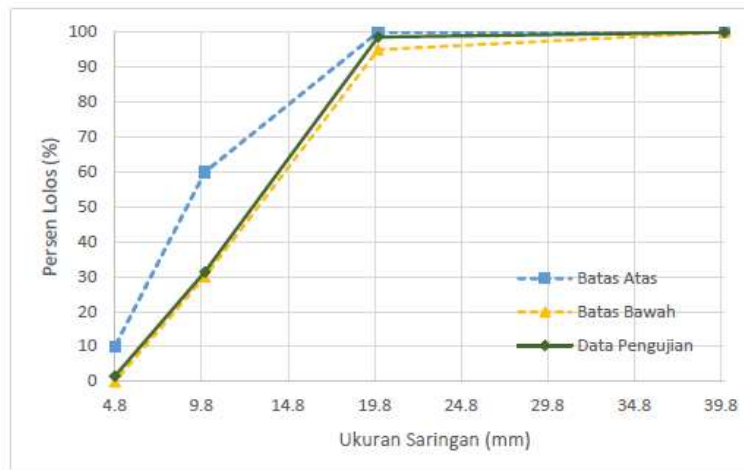
Lubang Ayakan (mm)	Berat Tertinggal (gram)	Berat Tertinggal (%)	Berat Tertinggal Kumulatif (%)	Persen Lolos Kumulatif (%)
40	0	0	0	0
20	69	1,380	1,380	98,620
10	4494	89,880	91,260	8,740
4,8	347	6,940	98,200	1,800
2,4	12	0,240	98,440	1,560
1,2	9	0,180	98,620	1,380
0,6	0	0	98,620	1,380
0,3	0	0	98,620	1,380
0,15	0	0	98,620	1,380
Sisa	69	1,380	100	0
Jumlah	5000	100	683,760	

Mengetahui Labora :
 1 . :
 2 . :

HASIL PENGUJIAN MODULUS HALUS BUTIR AGREGAT KASAR (BERDASARKAN SNI 03-1970-1990)

Nama Peneliti : Hanifardhi
NIM : 20511395
Tanggal Pembuatan :
Tanggal Pengujian :

Hasil Analisa Saringan
- ukuran Agregat kasar maksimal 20 mm



Mengetahui Labora :
1 . :
2 . :

HASIL PENGUJIAN TARIK GFRP
(BERDASARKAN ASTM D 3039)

Nama Peneliti : Hanifardhi
NIM : 20511395
Tanggal Pembuatan :
Tanggal Pengujian : 19 Agustus 2024

Benda Uji	Beban Ultimit		Tebal (mm)	Lebar (mm)	Luas (mm ²)	fu (Mpa)
	Pu (kgf)	Pu (N)				
GFRP 1	32	294,2	0,55	25	13,75	21,39
GFRP 2	91	892,41	0,55	25	13,75	64,19
GFRP 3	105.3	1032,64	0,55	25	13,75	74,89

Mengetahui Labora :

1 . :

2 . :

DATA UJI DESAK SILINDER BETON
(BERDASARKAN SNI 1974:2011)

Nama Peneliti : Hanifardhi
NIM : 20511395
Tanggal Pembuatan :
Tanggal Pengujian :

Sampel	Diameter (cm)	Tinggi (cm)	berat (kg)	Luas Penampang (cm)	Beban maks (kN)	f' _c (Mpa)
Silinder 1	15	30	12,33	176.715	372,68	32.446
Silinder 2	15	30	12,199	176.715	351,91	30.637
Silinder 3	15	30	12,54	176.715	328,92	28.635

Mengetahui Labora :
1 . :
2 . :

DATA UJI KUAT LENTUR BALOK BETON
(BERDASARKAN SNI 03-4431-1997)

Nama Peneliti : Hanifardhi
 NIM : 20511395
 Tanggal Pembuatan :
 Tanggal Pengujian : 21 Agustus 2024

Kode balok	Panjang Balok (m) a	Berat Balok (kN/m) b	Beban Max (kN) c	P/2 (kN) d = c/2	x1 (m) e	x2 (m) f	Momen Max (kNm) $g = ((1/8).b.c^2) + (d.0,5a)-(d.(0,5a-e))$
BK 1	1,2	0,849	94,752	47,376	0,4	0,4	19,103
BK 2	1,2	0,868	97,776	48,888	0,4	0,4	19,711
BP 1A	1,2	0,862	109,368	54,684	0,4	0,4	22,029
BP 1B	1,2	0,842	88,452	44,226	0,4	0,4	17,842
BP 2A	1,2	0,845	105,336	52,668	0,4	0,4	21,219
BP 2B	1,2	0,841	109,368	54,684	0,4	0,4	22,025

Mengetahui Labora :
 1 . :
 2 . :