

TUGAS AKHIR

**PERILAKU LENTUR PERKUATAN BALOK BETON
BERTULANG DENGAN GROUTING DAN GFRP SHEET**

***FLEXURAL BEHAVIOR OF STRENGTHENED REINFORCED
CONCRETE BEAMS WITH GROUTING AND GFRP SHEET***

**YUQNI MAULIDYA
D011 18 1014**



PROGRAM SARJANA DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

2022

LEMBAR PENGESAHAN (TUGAS AKHIR)

**PERILAKU LENTUR PERKUATAN BALOK BETON BERTULANG DENGAN
GROUTING DAN GFRP SHEET**

Disusun dan diajukan oleh:

YUQNI MAULIDYA

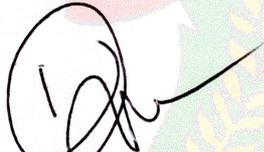
D011 18 1014

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

menyetujui,

Pembimbing I,

Pembimbing II,



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



Dr. Eng. Hj. Rita Irmawaty, ST, MT
NIP: 197206192000122001

Ketua Program Studi,



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

PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH

Yang bertanda tangan di bawah ini, nama Yuqni Maulidya dengan ini menyatakan bahwa skripsi yang berjudul **“Perilaku Lentur Perkuatan Balok Beton Bertulang Dengan Grouting Dan GFRP Sheer”**, adalah karya ilmiah penulis sendiri, dan belum pernah digunakan untuk mendapatkan gelar apapun dan dimanapun.

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

Gowa, 20 Agustus 2022

Yang membuat pernyataan,



Yuqni Maulidya

NIM: D011 18 1014

KATA PENGANTAR

Segala Puji dan Syukur Allah SWT Tuhan Yang Maha Esa, atas segala kebaikan dan karunia-Nya kepada setiap insan intelektual, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini. Tak lupa sholawat serta salam kepada baginda Rasulullah Muhammad SAW sebaik-baiknya suri tauladan. Penyusunan tugas akhir yang berjudul **“PERILAKU LENTUR PERKUATAN BALOK BETON BERTULANG DENGAN GROUTING DAN GFRP SHEET”** merupakan salah satu syarat yang diajukan untuk menyelesaikan studi pada Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa terselesaikannya Tugas Akhir ini tidak hanya dari penulis sendiri melainkan berkat ilmu, arahan, bimbingan serta bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan segala ketulusan, penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada :

1. **Bapak Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, S.T., M.T.**, selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
2. **Bapak Prof. Dr. Ir H. M. Wihardi Tjaronge S.T., M.Eng.**, selaku Ketua Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin sekaligus dosen penguji I
3. **Bapak Prof. Dr. Eng. Ir. Rudy Djamaluddin ST. M.Eng.**, selaku dosen pembimbing I, **Ibu Dr. Eng. Hj. Rita Irmawaty, S.T., M.T.**, selaku dosen pembimbing II, dan **Bapak Dr. Eng. Fakhruddin, S.T., M.Eng.**, selaku dosen pembimbing Laboratorium Riset Rekayasa dan Perkuatan Struktur yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan dan pengarahan serta kesabarannya dalam menghadapi kualitas keilmuan penulis dari awal penelitian hingga selesainya tugas akhir ini. Semoga kebaikan, kesehatan serta kemudahan senantiasa dilimpahkan kepada beliau.
4. **Bapak Dr. Eng. Ir. Andi Arwin Amiruddin, S.T., M.T.**, selaku Kepala Laboratorium Struktur dan Bahan Departemen Teknik Sipil Fakultas

Teknik Universitas Hasanuddin yang telah memberikan izin atas segala fasilitas yang digunakan.

5. Seluruh dosen Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
6. Seluruh staf dan karyawan Departemen Teknik Sipil, staf dan karyawan Fakultas Teknik serta staf Laboratorium dan asisten Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Yang istimewa penulis persembahkan kepada:

1. Kedua orang tua yang tercinta, yaitu ayahanda **Alm. Muh. Jufri**, dan ibunda **Suryana**, serta saudara tercinta **Nindya Dwi Putri** atas semua kasih sayang yang begitu tulus dan doa yang tiada henti serta nasehat-nasehat yang selalu melekat pada penulis di setiap waktu.
2. **Satria Umar Dani** selaku partner suka dan duka yang selama ini menemani dan banyak memberikan dorongan, bantuan, serta doa sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
3. **Fitri, Imran, dan Farhan** selaku teman seperjuangan dalam penelitian ini, yang selalu membantu dan menjadi teman berdiskusi dalam penyelesaian tugas akhir ini.
4. **Ica, Nadia, Wana, Upe, Ipa, Fitri, Asihana, Melani, Fikri, Radix, Charlie**, sebagai teman pertama penulis di dunia perkuliahan. Terima kasih untuk semua pengalaman baru paling menyenangkan yang diberikan selama penulis berkuliah di Teknik sipil.
5. Rekan-rekan di **Laboratorium Riset Perkuatan Struktur**, terkhusus **Kinah dan Innah** . Terima kasih karena telah menjadi teman berdiskusi yang baik dan telah menghidupkan suasana mukim perkuatan serta membuat penulisan tugas akhir ini menjadi sangat menyenangkan.
6. Untuk sahabat–sahabat yang terkasih **Elsya, Fifa, Aulia, Nunu, Elli, Mimi** yang selalu ada dan menghibur penulis selama ini.

7. Saudara-saudari **TRANSISI 2019**, teman-teman Departemen Teknik Sipil dan Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin **Angkatan 2018** yang memberikan begitu banyak warna dan pengalaman yang sangat berharga dari awal hingga akhir nanti.

Penulis menyadari bahwa setiap karya buatan manusia tidak akan pernah luput dari kekurangan, oleh karena itu kritik dan saran dari pembaca sangat penulis harapkan demi kesempurnaan Tugas Akhir ini.

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

Gowa, Juli 2022

Penulis

ABSTRAK

Penurunan kekuatan struktur yang terjadi pada suatu konstruksi beton selain karena umur layannya, juga diakibatkan oleh korosi pada tulangan. Korosi menyebabkan beton mengalami pengelupasan (*spalling*) dan pengurangan luasan tulangan. Untuk mengatasi berbagai kerusakan yang terjadi maka diperlukan metode perbaikan dan perkuatan yang tepat. Grouting merupakan metode perbaikan kerusakan struktur yang sering kali digunakan saat ini karena memenuhi persyaratan standar corps of engineering *CDR C-621* dan *ASTM C-1107*. Grouting adalah proses memberikan campuran air dan sika grout 215 karena memiliki karakteristik tidak menyusut, tidak korosif, dan dapat mengalir dengan baik sehingga dapat dengan mudah mengisi bagian-bagian kecil pada beton. *Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)* sebagai material yang mempunyai kuat tarik yang tinggi, superior dalam daktilitas, bobotnya yang ringan sehingga mudah dalam mobilisasi, menjadikan GFRP sebagai pilihan untuk perbaikan struktur. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perilaku lentur serta pola retak dan mode kegagalan balok beton bertulang yang diperkuat dengan grouting dan *GFRP Sheet*.

Tahapan penelitian terbagi atas dua yaitu pengujian kuat tekan mortar grouting dan pengujian lentur balok beton bertulang. Pengujian kuat tekan mortar grouting menggunakan sampel silinder 50 mm x 100 mm, diuji pada umur 28 hari. Sementara itu, pengujian lentur balok menggunakan sampel balok dengan dimensi 150 mm x 200 mm x 3300 mm sebanyak tiga buah yang terdiri dari balok kontrol, balok dengan perbaikan grouting, serta balok dengan perkuatan mortar grouting dan *GFRP Sheet*.

Hasil penelitian menunjukkan penggunaan mortar grouting dan *GFRP sheet* sebagai material perbaikan dan perkuatan mampu meningkatkan beban maksimum balok beton bertulang. Sementara itu, balok BGR memiliki perilaku yang lebih daktil dibandingkan semua benda uji. Dari mode kegagalan sambungan, balok dengan perkuatan mortar grouting mengalami kegagalan *debonding* sedangkan balok dengan perkuatan grouting dan *GFRP sheet* mengalami kegagalan delaminasi dan kegagalan *debonding* pada lekatan *GFRP*.

Kata kunci: korosi, *spalling*, sika grout, GFRP

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH	iii
KATA PENGANTAR	iv
ABSTRAK	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xiii
BAB 1. PENDAHULUAN.....	1
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	3
C. Tujuan Penelitian.....	3
D. Manfaat Penelitian.....	4
E. Batasan Masalah.....	4
F. Sistematika Penulisan	5
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA.....	7
A. Penelitian Terdahulu	7
B. Beton Bertulang.....	10
C. Kapasitas Lentur Balok Beton Bertulang	13
D. Kegagalan Balok Beton Bertulang.....	18
E. Pola Retak Pada Beton Bertulang.....	20
F. Lendutan	22
G. Metode Perbaikan dan Perkuatan	24
H. Mortar Grouting	27
I. Fiber Reinforced Polymer (FRP)	28
J. Kapasitas Lentur Balok Beton Bertulang dengan Perkuatan FRP	33
K. Mode Kegagalan pada Balok dengan Perkuatan GFRP	37
BAB 3. METODE PENELITIAN.....	39
A. Bagan Alir Penelitian	39

B. Lokasi dan Waktu Penelitian	40
C. Alat dan Bahan.....	41
D. Jenis Penelitian	48
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN	59
A. Karakteristik Mekanis Tulangan	59
B. Pengujian Sifat Mekanis Beton.....	60
C. Kuat Tekan Mortar Grouting	63
D. Pengujian Lentur Balok	64
D.1. Hubungan Beban-Lendutan.....	66
D.2. Beban Maksimum	71
D.3. Hubungan Beban-Regangan Beton.....	73
D.4. Hubungan Beban-Regangan Baja	74
D.5. Hubungan Beban-Regangan GFRP	75
E. Pola Retak dan Mode Kegagalan.....	76
E.1. Pola Retak dan Mode Kegagalan Balok BK.....	76
E.2. Pola Retak dan Mode Kegagalan Balok BGR.....	78
E.3. Pola Retak dan Mode Kegagalan Balok BGRF-S	80
BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN	84
A. Kesimpulan.....	84
B. Saran.....	84
DAFTAR PUSTAKA	86

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Perilaku Lentur Pada Beban Sebelum Retak	14
Gambar 2. Perilaku Lentur Beton Setelah Retak.....	15
Gambar 3. Perilaku Lentur Pada Beban Ultimit.....	16
Gambar 4. Blok Tegangan Ekuivalen.....	17
Gambar 5. Pola Retak Lentur.....	21
Gambar 6. Pola Retak Geser	21
Gambar 7. Pola Retak Geser Lentur	22
Gambar 8. Hubungan Antara Beban Dan Lendutan (Nawy, 2003)	24
Gambar 9. Konsep Perbaikan Dan Perkuatan Struktur	26
Gambar 10. GFRP-S Tyfo SEH-51A Dan <i>Epoxy Resin</i> Tyfo S	32
Gambar 11. Regangan Untuk Metode ACI 440-2R-08.....	35
Gambar 12. Putusnya FRP Dan Hancurnya Beton Pada Sisi Tekan	37
Gambar 13. Bagan Alir.....	40
Gambar 14. Pengujian Tarik Tulangan.....	41
Gambar 15. <i>Universal Testing Machine</i>	42
Gambar 16. <i>Mixer</i>	43
Gambar 17. Silinder 50 mm x 100 mm	43
Gambar 18. (a) FLA-2-11 (<i>gauge factor</i> 2,12±1%), (b) <i>strain gauge</i> baja, (c) <i>CN Adhesive</i>	44
Gambar 19. (a) PL-60 11 (<i>gauge factor</i> 2,09±1%), (b) <i>strain gauge</i> beton, (c) <i>CN Adhesive</i>	44
Gambar 20. (a) PL-60 11 (<i>gauge factor</i> 2,09±1%), (b) <i>strain gauge</i> beton, (c) <i>CN Adhesive</i>	45
Gambar 21. LVDT (<i>Linear Variable Displacement Transducer</i>)	45
Gambar 22. Alat Uji Statik Kapasitas 1500 kN	46
Gambar 23. (a) <i>Load Cell</i> 200 kN (b) <i>Data Logger</i> TDS 530.....	46
Gambar 24. Mortar Grouting	47
Gambar 25. <i>Sika Bond</i>	47
Gambar 26. Serat GFRP	48
Gambar 27. Detail Benda Uji Tipe 1 (Balok Normal)	51

Gambar 28. Detail Benda Uji Tipe 2 (Balok Bertulang Perbaikan Grouting).....	51
Gambar 29. Detail Benda Uji tipe 3 (Beton Bertulang Mortar Grouting Dengan Perkuatan GFRP <i>Sheet</i>).....	52
Gambar 30. Pabrikasi Benda Uji Beton Normal	53
Gambar 31. Perawatan Beton	54
Gambar 32. Pencampuran Mortar Grouting	54
Gambar 33. Pengecoran Material Perbaikan	55
Gambar 34. Tahapan Pemasangan GFRP	57
Gambar 35. Penempatan <i>Strain Gauge</i> Beton.....	58
Gambar 36. <i>Set-Up</i> Benda Uji.....	58
Gambar 37. Pengujian Kuat Tarik Tulangan Baja	60
Gambar 38. Pengujian Karakteristik Mekanis Beton	61
Gambar 39. Uji Kuat Tekan Mortar.....	63
Gambar 40. Hubungan Beban-Lendutan	68
Gambar 41. Hubungan Beban-Lendutan Pada Semua Benda Uji	71
Gambar 42. Beban Maksimum.....	71
Gambar 43. Potongan Melintang Balok BK Dan BGR.....	72
Gambar 44. Hubungan Beban-Regangan Beton.....	73
Gambar 45. Hubungan Beban-Regangan Baja.....	74
Gambar 46. Hubungan Beban-Regangan GFRP Pada Balok BGRF-S ..	75
Gambar 47. Pola Retak Pada Balok Kontrol (BK)	76
Gambar 48. Retak Awal Balok BK.....	77
Gambar 49. Kehancuran Sisi Tekan Pada Balok BK	77
Gambar 50. Pola Retak Pada Balok Grouting (BGR).....	78
Gambar 51. Retak Awal Pada Balok BGR	78
Gambar 52. <i>Micro-crack</i> Pada Sambungan	79
Gambar 53. Pengukuran Lebar Retak Balok BGR	79
Gambar 54. <i>Debonding</i> Antara Beton Normal Dan Mortar Grouting	80
Gambar 55. Pola Retak Pada Balok Grouting Dan GFRP <i>Sheet</i> (BGRF-S)	80

Gambar 56. Retak Awal Pada Balok BGRF-S.....	81
Gambar 57. Pengukuran Lebar Retak Balok BGRF-S	81
Gambar 58. <i>Micro-Crack</i> Pada Sambungan.....	82
Gambar 59. Delaminasi Antara Beton Normal Dan Mortar Grouting.....	82
Gambar 60. <i>Debonding</i> Antara Beton Grouting Dan GFRP	83

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Spesifikasi GFRP Tyfo SEH-51A.....	31
Tabel 2. Karakteristik Material Resin Epoksi	33
Tabel 3. Variasi Benda Uji 150 X 200 X 3300 Mm.....	50
Tabel 4. Hasil Pengujian Kuat Tarik Baja	59
Tabel 5. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton	62
Tabel 6. Hasil Pengujian Kuat Tarik Belah Beton	62
Tabel 7. Hasil Pengujian Kuat Lentur Beton	62
Tabel 8. Hasil Pengujian Kuat Tekan Grouting.....	64
Tabel 9. Kapasitas Beban dan Momen Berdasarkan Analisa Teoritis dan Hasil Pengujian Balok	65
Tabel 10. Rekapitulasi Nilai Beban – Lendutan	70

BAB 1. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Indonesia merupakan negara yang beriklim tropis, yang setiap harinya menyebabkan perubahan temperatur dan kelembaban yang cukup besar sehingga meningkatkan potensi korosi pada bahan bangunan baik gedung maupun jembatan. Sebagai contoh runtuhnya Jembatan Tamanroya yang berada di Kepulauan Selayar dan gedung di Jalan Bridgen Katamso, Jakarta barat yang menurut ahli forensik mengalami kerusakan struktur akibat korosi pada tulangan.

Korosi menyebabkan beton mengalami pengelupasan (*spalling*). *spalling* yang terjadi diakibatkan oleh volume tulangan yang mengembang menekan beton sehingga menyebabkan retak muncul semakin banyak dipermukaan. Korosi juga menyebabkan terjadinya pengurangan luasan tulangan yang mengakibatkan penurunan kapasitas elemen struktur. Sehingga dibutuhkan tulangan eksternal untuk mengganti tulangan yang mengalami kerusakan. Untuk mengatasi berbagai kerusakan yang terjadi maka diperlukan metode perbaikan dan perkuatan yang tepat. Secara umum perbaikan dilakukan untuk mengembalikan fungsi kinerja struktur seperti semula, sementara perkuatan dilakukan sebagai upaya untuk pencegahan sebelum struktur mengalami kegagalan. Perbaikan struktur diperlukan apabila kerusakan yang terjadi menyebabkan degradasi kekuatan struktur.

Grouting merupakan metode perbaikan kerusakan struktur yang sering kali digunakan karena sifatnya yang mirip dengan beton. Pemilihan material menjadi salah satu persyaratan untuk mendapatkan perbaikan yang tahan lama. Grouting adalah proses memberikan campuran air dan sika grout. Semen grout memiliki karakteristik yang encer sehingga dapat dengan mudah mengisi bagian-bagian kecil. Semen grouting merupakan beton mutu tinggi yang tidak bersifat korosif dan tidak susut. Akan tetapi, disamping dengan kelebihanannya, material ini hanya mampu menutupi *spalling* yang terjadi pada beton, sehingga dibutuhkan tulangan eksternal sebagai pengganti tulangan tarik dan meningkatkan kekuatan beton.

Untuk mengganti tulangan yang mengalami kerusakan alternatif lain yang dapat dilakukan adalah dengan memotong tulangan yang berkarat kemudian memasang tulangan baru dengan cara di las. Tetapi jika terjadi peningkatan pada fungsi bangunan, maka diperlukan pemasangan tulangan yang lebih praktis. *Glass Fiber Reinforced Polymer* (GFRP) sebagai material yang mempunyai kuat tarik yang tinggi, superior dalam daktilitas, bobotnya yang ringan sehingga mudah dalam mobilisasi, menjadikan GFRP sebagai pilihan untuk perbaikan struktur. Kuat tarik yang sangat tinggi tersebut membuat GFRP sangat cocok digunakan sebagai *eksternal reinforce* yang menerima gaya tarik pada elemen struktur dan meningkatkan kekuatan beton.

Salah satu faktor yang berpengaruh terhadap kinerja GFRP adalah rekatannya terhadap beton. Hal ini dapat tercapai apabila GFRP merekat

pada beton yang memiliki mutu yang baik. Jika GFRP merekat pada matriks yang lemah maka kekuatannya tidak maksimal. Mortar grouting merupakan material yang cocok digunakan karena memiliki mutu yang baik, sehingga GFRP akan bekerja secara maksimal karena telah merekat pada matriks yang kuat.

Berdasarkan latar belakang tersebut di atas, maka penting dilakukan penelitian yang bersifat eksperimental terkait bagaimana perilaku penambahan GFRP *sheet* dalam perkuatan beton bertulang dengan material grouting sebagai bidang melekatnya GFRP ditinjau dari pola retak yang terjadi. Maka disusun penelitian dengan judul yaitu **“PERILAKU LENTUR PERKUATAN BALOK BETON BERTULANG DENGAN GROUTING DAN GFRP SHEET”**.

B. Rumusan Masalah

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

1. Bagaimana perilaku lentur perkuatan balok beton bertulang dengan metode grouting dan GFRP *Sheet*
2. Bagaimana pola retak dan mode kegagalan perkuatan balok beton bertulang dengan metode grouting dan GFRP *Sheet*

C. Tujuan Penelitian

1. Menganalisis perilaku lentur perkuatan balok beton bertulang dengan metode grouting dan GFRP *Sheet*.

2. Menganalisis pola retak dan mode kegagalan perkuatan balok beton bertulang dengan metode grouting dan GFRP *Sheet*.

D. Manfaat Penelitian

Melalui penelitian ini diharapkan memberi sejumlah manfaat sebagai berikut:

1. Memberikan pemahaman informasi mengenai bagaimana perilaku lentur balok beton bertulang dengan perbaikan menggunakan metode grouting dan perkuatan GFRP *Sheet*.
2. Menjadi pertimbangan dan bahan referensi untuk penelitian terkait yang berhubungan dengan perbaikan dan perkuatan struktur pada beton bertulang yang mengalami korosi

E. Batasan Masalah

Agar penelitian ini lebih terarah dan fokus pada tujuan penelitian yang ingin dicapai maka perlu dibuat batasan masalah sebagai berikut:

1. Penelitian dilakukan terhadap benda uji balok beton bertulang dengan dimensi 150 mm x 200 mm x 3300 mm yang diperkuat dengan material grouting dan *Glass Fiber Reinforced Polymer* (GFRP)
2. Mutu beton yang digunakan dalam penelitian ini adalah $f'c$ 20 MPa
3. Menggunakan tulangan ulir diameter 13 mm dan tulangan polos diameter 8 mm

4. Menggunakan mortar grouting komersial dari pencampuran air dengan Sika Grout 215 (*New*)
5. Menggunakan Mortar Lem Beton Sikabond
6. Menggunakan GFRP dari Fyfo.Co LLC
7. Terdapat 3 benda uji terdiri dari:
 - a) 1 (satu) benda uji balok beton normal sebagai balok kontrol.
 - b) 1 (satu) benda uji balok beton yang diperkuat dengan mortar grouting sepanjang 2700 mm.
 - c) 1 (satu) benda uji balok beton yang diperkuat dengan mortar grouting dan *Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) Sheet* sepanjang 2700 mm.
8. Benda uji diberi beban lentur dengan beban dua titik secara monotonik menggunakan alat uji statik dengan kapasitas 1500 kN.
9. Pembebanan dilakukan hingga benda uji mengalami keruntuhan.

F. Sistematika Penulisan

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

BAB I PENDAHULUAN

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

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

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

BAB III METODE PENELITIAN

Dalam bab ini, dijelaskan metode yang digunakan dalam penelitian ini, langkah-langkah yang digunakan dalam penelitian ini yang dituangkan dalam bentuk bagan alir penelitian, lokasi dan waktu penelitian, data penelitian berupa jenis dan sumber data serta analisis yang digunakan dalam mengolah data yang didapatkan dari lapangan maupun dari laboratorium.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam bab ini, disusun hasil-hasil pengujian diantaranya adalah hasil pengujian karakteristik mortar geopolimer dan pengujian geser balok.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

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

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

A. Penelitian Terdahulu

Andi Safirah Annisa Marwiji (2021) melakukan penelitian tentang Analisis Pola Kegagalan Balok Beton Bertulang Yang Diperkuat Dengan Material Grouting Dan Serat PVA. Tujuan Penelitian ini untuk menganalisis pola retak balok beton bertulang yang diperkuat dengan material grouting dan serat PVA. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah eksperimen yaitu dengan cara melakukan perkuatan pada beton dengan metode grouting dan serat PVA. Adapun kesimpulan yang didapatkan pada penelitian ini adalah:

1. Analisis pola retak yang terjadi pada balok kontrol (CB), balok diperkuat grouting (GR), dan balok diperkuat grouting dan serat PVA (GR-F) menunjukkan bahwa ketiga benda uji mengalami retak lentur yang ditandai dengan munculnya retak pada sisi tarik merambat dan merambat ke sisi tekan balok. Jumlah retak balok GR lebih banyak daripada balok CB dan GR-F. Penambahan serat PVA pada balok GR-F mampu memberikan *bridging effect* yang dapat menghambat lebar dan laju perkembangan retak.
2. Mode kegagalan yang terjadi pada ketiga benda uji merupakan kegagalan *under-reinforced* ditandai dengan lelehnya tulangan sebelum hancurnya beton. Pada Balok GR-F ditemukan adanya kegagalan debonding akibat tidak sempurnanya lekatan pada daerah sambungan beton normal dan mortar grouting

Hariati dan Yayuk Setyaning Astutik (2020) melakukan penelitian tentang Studi Komparatif Kerusakan Beton Pada Struktur Kolom Yang Keropos Dengan Metode Grouting. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi faktor apa saja yang menjadi penyebab terjadinya kerusakan pada struktur beton yang keropos berdasarkan penelitian sebelumnya serta menganalisis hasil perbandingan nilai kuat tekan beton dengan solusi metode grouting menggunakan sikagrout 215 dan menggunakan campuran semen dan air. Penelitian ini menggunakan sampel beton berbentuk kubus ukuran 15cm x 15 cm x 15cm yang dibagi menjadi tiga jenis sampel yaitu beton normal sebanyak 6 kubus, beton yang sengaja dibuat keropos dengan metode grouting menggunakan sikagrout 215 sebanyak 6 kubus, dan beton yang sengaja dibuat keropos dengan metode grouting menggunakan campuran semen dan air (pasta semen) sebanyak 6 kubus. Setiap kubus akan diuji kuat tekannya pada umur 7, 21 dan 28 hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penyebab keropos pada beton disebabkan oleh beberapa faktor di antaranya adalah faktor air semen, kurangnya proses pemadatan, rasio agregat yang digunakan, serta workability yang kurang baik. Hasil kuat tekan beton di umur 28 hari menunjukkan bahwa kuat tekan beton normal sebesar 230.459 kg/cm², beton grouting dengan Sikagrout 215 sebesar 318.532 kg/cm², dan beton grouting dengan campuran semen dan air 316.707 kg/cm². Beton grouting dengan menggunakan sikagrout 215 memiliki nilai yang terbesar diantara ketiga sampel tersebut. Sehingga dalam penelitian

ini metode grouting menggunakan pilihan yang tepat untuk melakukan perbaikan beton yang keropos.

Muh. Hushardi Husain (2018) melakukan penelitian tentang Pengaruh Perkuatan Geser GFRP *Sheet* Terhadap Perilaku Pola Kegagalan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh perkuatan geser GFRP *sheet* terhadap kapasitas geser dan pola kegagalan balok beton bertulang. Pada penelitian ini digunakan benda uji berupa balok beton bertulang dengan dimensi 15 cm x 35 cm x 3300 cm, dengan mutu beton yang digunakan 25 MPa. Benda uji dibuat dalam 4 variasi yaitu 1 balok normal dan 3 balok perkuatan. Balok perkuatan pertama diperkuat dengan perkuatan geser GFRP dengan lebar sabuk 75 mm (BGU75). Balok perkuatan kedua diperkuat dengan perkuatan geser GFRP dengan lebar sabuk 100 mm (BGU100). Balok perkuatan ketiga diperkuat dengan perkuatan geser GFRP dengan lebar sabuk 500 mm (BGUF). Ketiga balok perkuatan diperkuat setelah tulangan geser meleleh dengan sabuk GFRP berbentuk *U-Shape* dan pembebanan dengan statik monotonik. Dan hasil penelitian menunjukkan perkuatan geser GFRP *sheet* mampu mengembalikan kekuatan balok sebelum terjadi retak geser dengan persentase BGU75, BGU100, dan BGUF mencapai 89.8 %, 91.1 % dan 94.8%. Sampai pada beban ultimit semua balok perkuatan tidak mengalami debonding ataupun rupture pada GFRP, tetapi terjadi concrete crushing pada sisi tekan balok yang terjadi setelah tulangan tarik meleleh sehingga balok masih dalam kondisi *under reinforced*.

Ray Rusandy (2016) melakukan penelitian pada benda uji balok beton bertulang yang diperkuat dengan *Glass Fiber Reinforced Polymer* pada seluruh daerah geser dengan bentuk sabuk *U-Shape*. Pada penelitian ini didapat beberapa kesimpulan berikut:

1. Perkuatan geser dengan lembaran GFRP memberikan peningkatan kekuatan geser pada balok. Rata-rata peningkatan kekuatan geser balok adalah 6,1 % terhadap balok normal.
2. Perkuatan geser dengan lembaran GFRP mempengaruhi perilaku lentur balok. Balok yang diperkuat menjadi bersifat lebih daktil dibanding balok normal yang terlihat dari balok yang diperkuat mengalami lendutan lebih besar sebelum mengalami kegagalan. Peningkatan daktilitas balok yang diperkuat adalah 152 % terhadap balok normal.
3. Perkuatan dengan lembaran GFRP mampu mencegah penyebaran retak geser akibat pembebanan sebelumnya dan mencegah munculnya retak geser yang baru sehingga pola retak berkembang adalah retak lentur saja, dengan demikian model kegagalan yang terjadi setelah balok diperkuat adalah kegagalan lentur dan tidak lagi terjadi kegagalan geser.

B. Beton Bertulang

Menurut SNI 2847 – 2013 beton merupakan campuran semen portland atau semen hidrolis lainnya, agregat halus, agregat kasar, dan

air, dengan atau tanpa bahan campuran tambahan (*admixture*). Dalam dunia konstruksi gedung, beton digunakan untuk bangunan pondasi, kolom, balok, pelat atau pelat cangkang. Dalam konstruksi jalan, beton digunakan sebagai lapisan perkerasan kaku (*rigid pavement*).

Beton adalah suatu campuran yang terdiri dari pasir, kerikil, batu pecah, atau agregat-agregat lain yang dicampur menjadi satu dengan suatu pasta yang terbuat dari semen dan air membentuk suatu massa mirip-batuan. Seperti substansi-substansi mirip batuan lainnya, beton memiliki kuat tekan yang tinggi dan kuat tarik yang sangat rendah. (Jack C. Mc Comac, 2001).

Beton bertulang ini mempunyai sifat sesuai dengan sifat bahan penyusunnya, yaitu sangat kuat terhadap beban tarik maupun beban tekan, sedangkan beban tekan cukup ditahan oleh beton (Asroni, 2010). Dibawah ini adalah beberapa karakteristik mekanik beton:

1. Kuat Tekan Beton

Kuat tekan merupakan nilai kekuatan tekan maksimum yang dihasilkan dari beban dibagi dengan luas penampang yang menerima beban. Kuat tekan beton tergantung pada tipe campuran, waktu dan kualitas perawatan.

Menurut ChuKia Wang (1993), Kuat tekan (f'_c) diperoleh berdasarkan hasil uji tekan laboratorium terhadap benda uji baik silinder ataupun kubus pada saat umur beton 28 hari. Mengenai frekuensi pengetestan dianggap memuaskan jika nilai rata-rata pengujian kekuatan

yang berurutan sama atau melebihi f'_c yang disyaratkan dan tidak ada tes kekuatan individual. Semakin rendah perbandingan air-semen, semakin tinggi kekuatan-tekan. Suatu jumlah tertentu air diperlukan untuk memberikan aksi kimiawi di dalam pengerasan beton, kelebihan air meningkatkan kemampuan pengerjaan (mudahnya beton untuk dicorkan) akan tetapi menurunkan kekuatan. Suatu ukuran dari pengerjaan beton ini diperoleh dengan percobaan *slump*.

Menurut peraturan SNI 03-2847-2002, pasal 7.1.3, kuat tekan beton f'_c yaitu kuat tekan silinder beton yang disyaratkan pada waktu berumur 28 hari. Pada saat beban ultimit, retak yang searah dengan arah pembebanan menjadi dapat terlihat dengan jelas dan beton akan segera hancur. Diketahui bahwa semakin rendah kekuatan beton, semakin tinggi regangan kegagalan, panjang dari bagian awal yang relatif linear meningkat dengan meningkatnya kekuatan tekan beton dan terjadi penurunan daktilitas yang nyata dengan peningkatan kekuatan.

2. Kuat Tarik Beton

Perilaku beton pada saat diberikan beban aksial tarik agak berbeda dengan perilaku beton saat diberikan beban tekan. Hubungan tegangan regangan tarik beton pada umumnya bersifat linear sampai terjadinya retak yang biasanya langsung diikuti oleh keruntuhan beton.

Kekuatan tarik beton lebih sulit diukur dibanding kuat tekannya karena masalah penjepitan (*gripping*) pada mesin. Ada sejumlah metode yang tersedia untuk menguji kekuatan tarik dan yang paling sering

digunakan adalah tes pembelahan silinder. Selain itu juga digunakan *rupture* f_r , Nawy, Edward G (1998).

3. Modulus Elastis Beton

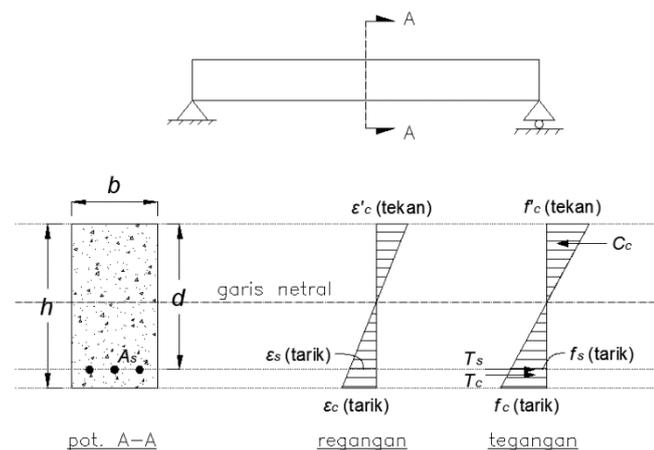
Dari hubungan tegangan – regangan tekan beton terlihat bahwa sudut α yaitu sudut antara garis lurus kurva yang ditarik dari kondisi tegangan nol sampai tegangan tekan sebesar $0,45 \cdot f'_c$ dan garis regangan ϵ_c' . Modulus elastis beton E_c merupakan tangens dari sudut α tersebut.

C. Kapasitas Lentur Balok Beton Bertulang

Balok beton bertulang merupakan elemen struktur yang dominan menahan gaya lentur pada saat beban diberikan. Pada saat beban ditingkatkan maka nilai regangan dan defleksi balok akan semakin meningkat yang diiringi dengan timbulnya retak-retak lentur sepanjang bentang balok tersebut. Penambahan beban secara terus-menerus akan mengakibatkan kegagalan elemen struktural ketika beban eksternal telah melebihi kapasitas elemen balok tersebut.

Untuk lebih memahami kondisi tegangan dan regangan beton pada saat dibebani maka akan diuraikan secara lebih terperinci mengenai hal tersebut. Nilai tegangan pada daerah tekan beton bersifat linear atau kira-kira sebanding dengan regangannya hanya sampai pada tingkat pembebanan tertentu pada kondisi $0,45 f'_c$. Pada tingkat pembebanan ini, apabila beban ditambah terus-menerus maka keadaan sebanding akan

lenyap dan diagram tegangan tekan pada penampang balok beton akan berbentuk seperti kurva tegangan-regangan beton.



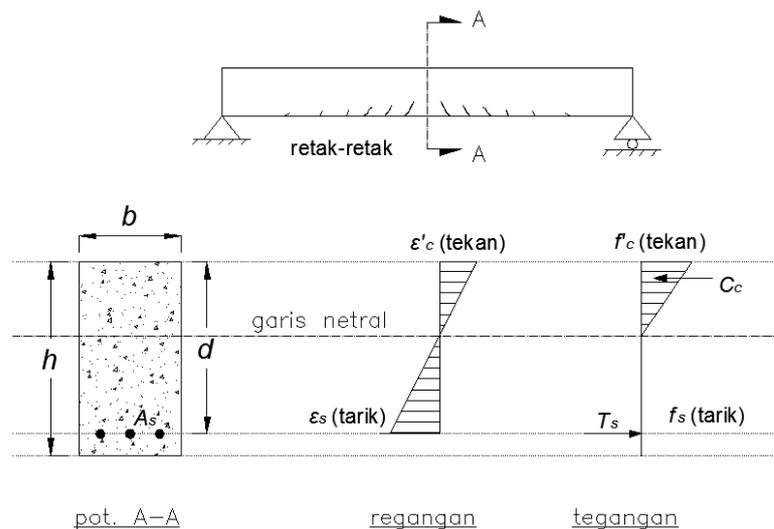
Gambar 1. Perilaku Lentur Pada Beban Sebelum Retak

Secara jelasnya dapat diuraikan pada Gambar 1. Pada kondisi pembebanan sebelum terjadinya retak pada beton, beton dan baja tulangan secara bersama-sama bekerja dalam menahan gaya tarik yang bekerja sementara beton pada sisi tekan hanya menahan gaya tekan saja. Distribusi tegangan pada kondisi ini masih bersifat *linear*, bernilai nol pada garis netral dan sebanding dengan nilai regangan yang terjadi. Hal ini hanya dijumpai apabila tegangan maksimum yang timbul pada sisi tarik masih cukup rendah di mana nilainya masih berada di bawah nilai modulus keruntuhan (*rupture modulus*).

Pada kondisi pembebanan setelah retak di mana nilai pembebanan yang diberikan telah melebihi nilai pembebanan sebelum terjadinya retak pada beton, nilai kuat tarik beton telah dilampaui sehingga beton mulai

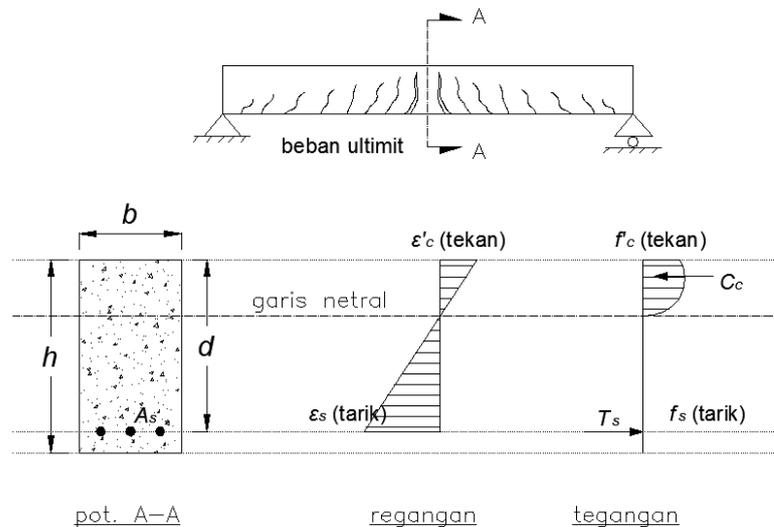
mengalami retak rambut seperti tampak pada Gambar 2. Pada kondisi ini beton tidak dapat meneruskan gaya tarik melintasi daerah retak yang disebabkan karena kondisi lebar retak yang menyebabkan terputusnya aliran distribusi tegangan sepanjang sisi tarik beton.

Akibatnya maka distribusi tegangan tarik pada daerah beton yang retak akan terhenti dan kemudian selanjutnya diambil alih sepenuhnya oleh baja tulangan. Tulangan akan mulai meregang dan apabila nilai beban semakin ditingkatkan maka tulangan akan mencapai kondisi lelehnya. Distribusi tegangan tarik pada tulangan ini terjadi hingga kondisi $0.5 f_c$. Pada keadaan ini nilai tegangan beton tekan masih dianggap bernilai sebanding dengan nilai regangannya dimana model tegangan yang terjadi masih berbentuk blok segitiga seperti terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Perilaku Lentur Beton Setelah Retak

Apabila nilai beban diberikan lebih besar lagi maka nilai regangan serta tegangan tekan akan meningkat dan cenderung untuk tidak sebanding lagi antara keduanya, di mana tegangan tekan pada beton akan mulai membentuk kurva *nonlinear*.



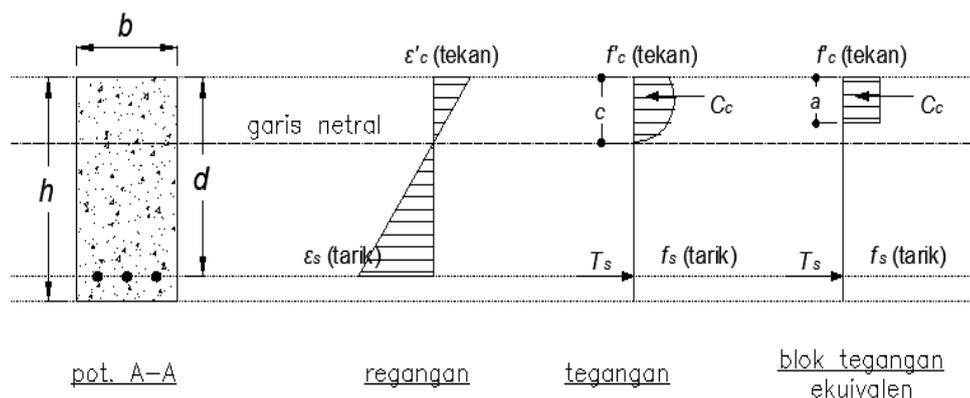
Gambar 3. Perilaku Lentur Pada Beban Ultimit

Kurva tegangan di atas garis netral penampang balok atau pada daerah tekan balok akan berbentuk sama dengan kurva tegangan-regangan beton seperti yang terlihat pada Gambar 3 bentuk distribusi tegangan ini berupa garis lengkung dengan nilai nol pada garis netral.

Pada Gambar 3 dapat dilihat model distribusi tegangan dan regangan yang timbul pada kondisi pembebanan mendekati pembebanan ultimit. Bentuk distribusi tegangan aktual yang melengkung ini tentunya menimbulkan kesulitan tersendiri dalam menghitung volume blok tegangan tekan.

Model persegi Whitney yang diusulkan tahun 1937 mengusulkan agar digunakan blok tegangan segiempat ekuivalen yang dapat digunakan untuk menghitung gaya tekan tanpa harus kehilangan ketelitiannya. Blok tegangan ekuivalen ini mempunyai tinggi a dan tegangan tekan rata-rata sebesar $0.85 f'_c$. Nilai ini diperoleh berdasarkan hasil percobaan pada beton yang berumur lebih dari 28 hari.

Dengan menggunakan semua asumsi di atas maka perhitungan volume blok tegangan tekan dapat lebih mudah dilakukan dengan hanya menggunakan rumus volume balok sederhana. Bentuk blok tegangan ekuivalen ini dapat dilihat pada Gambar 4. Apabila kapasitas batas kekuatan beton pada daerah tekan telah terlampaui maka balok akan mengalami kehancuran. Sampai dengan tahap ini tampak bahwa tercapainya kapasitas ultimit merupakan proses yang tidak dapat berulang karena beton telah melewati kondisi elastisnya.



Gambar 4. Blok Tegangan Ekuivalen

Komponen struktur balok yang telah retak disertai dengan kondisi baja tulangan yang telah meleleh tentunya ditandai dengan nilai lendutan yang besar. Lendutan besar yang terjadi pada balok tidak akan kembali ke kondisinya yang semula dipengaruhi oleh kondisi baja tulangan yang telah meleleh. Berdasarkan penjelasan-penjelasan yang telah diuraikan sebelumnya maka dalam memperhitungkan kapasitas momen ultimit suatu komponen struktur, kuat tarik beton biasanya diabaikan (tidak diperhitungkan). Seluruh gaya tarik yang terjadi hanya dilimpahkan pada baja tulangan di daerah tarik.

Dengan demikian maka bentuk penampang beton pada daerah tarik tidaklah mempengaruhi kekuatan lentur. Tinggi penampang yang menentukan adalah tinggi efektif d , yaitu jarak dari serat tekan terluar terhadap titik berat tulangan tarik. Nilai regangan beton tekan maksimum pada serat tekan terluar ditetapkan sebesar 0.003. Penetapan nilai tersebut didasarkan atas hasil-hasil pengujian yang menunjukkan bahwa umumnya regangan beton hancur berada di antara nilai 0.003 dan 0.004.

D. Kegagalan Balok Beton Bertulang

Kegagalan pada balok beton bertulang pada dasarnya dipengaruhi oleh melelehnya tulangan baja dan hancurnya beton bertulang. Menurut Nawy Edward G. (2008), Ada tiga kemungkinan yang bisa terjadi yang menyebabkan kegagalan balok beton bertulang, yaitu :

a. Kondisi *balanced reinforced*

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

Kondisi regangan : $\varepsilon_c = 0,003$ dan $\varepsilon_s = \frac{f_y}{E_s}$

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

b. Kondisi *Over-Reinforced*

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

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

c. Kondisi *Under-Reinforced*

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

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

Balok disebut *under-reinforced* jika balok mempunyai lebih sedikit tulangan dari pada yang diperlukan untuk suatu perbandingan seimbang. Jika sebuah balok berada dalam keadaan *under-reinforced* dan beban ultimit sudah hampir tercapai, baja akan mulai meleleh meskipun tegangan pada beton tekan masih belum mencapai tegangan ultimitnya.

Jika beban terus diperbesar, tulangan akan memanjang sehingga terjadi lendutan dan muncul retak besar pada beton tarik. Kondisi ini menjadi peringatan bahwa beban harus dikurangi atau struktur akan rusak dan runtuh. Hal inilah yang menjadi pertimbangan suatu balok harus didesain tetap dalam kondisi *under-reinforced*. Peningkatan komponen struktur lentur boleh dilakukan dengan menambahkan pasangan tulangan tekan dan tulangan tarik secara bersamaan.

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

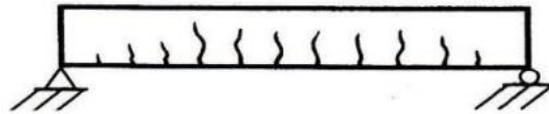
E. Pola Retak Pada Beton Bertulang

Menurut Amri (2005:252) retakan dapat terjadi oleh berbagai sebab. Pada stadium awal kerusakan komponen struktur diawali dengan lendutan. Bila batas lendutan ijin terlampaui maka stadium kerusakan akan berlanjut pada retakan lentur. Bila kemampuan lentur dilampaui maka kerusakan akan berlanjut pada stadium yang lebih tinggi yaitu berupa retak geser.

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

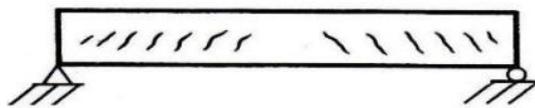
Pada dasarnya ada tiga jenis keretakan pada balok, (Gilbert, 1990) :

1. Retak lentur (*flexural crack*), terjadi di daerah yang mempunyai harga momen lentur lebih besar dan gaya geser kecil. Arah retak terjadi hampir tegak lurus pada sumbu balok. Retak lentur adalah retak vertikal yang memanjang dari sisi tarik balok dan mengarah ke atas sampai daerah sumbu netralnya.



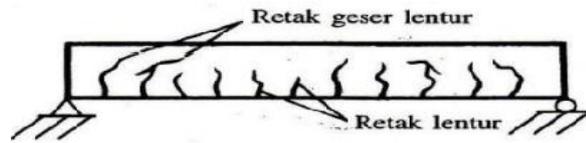
Gambar 5. Pola Retak Lentur

2. Retak Geser (*Web Shear Crack*), keretakan miring akibat geser dapat terjadi pada balok sebagai retak bebas maupun sebagai perpanjangan retak lentur. Akan tetapi pada beberapa kasus retak geser akan berkembang secara bebas pada balok meskipun tidak ada retak lentur pada daerah tersebut. Retak miring yang terjadi pada daerah garis netral penampang dimana gaya geser maksimum dan tegangan aksial sangat kecil.



Gambar 6. Pola Retak Geser

3. Retak Geser-Lentur (*Flexural Shear Crack*), merupakan perpaduan retak geser dan retak lentur. Retak geser-lentur terjadi pada bagian balok yang sebelumnya telah terjadi keretakan lentur



Gambar 7. Pola Retak Geser Lentur

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

F. Lendutan

Satu hal yang penting dari struktur beton bertulang adalah masalah lendutan yang terjadi akibat beban yang bekerja. Struktur beton bertulang yang mengalami lentur harus direncanakan agar mempunyai kekakuan yang cukup untuk membatasi lendutan yang mungkin memperlemah kekuatan maupun kemampuan layan struktur pada beban kerja. Berkaitan dengan hal tersebut, bila bentang panjang maka lendutan akan besar. Untuk memperkecil lendutan biasanya dengan memperbesar kekakuan penampang (EI).

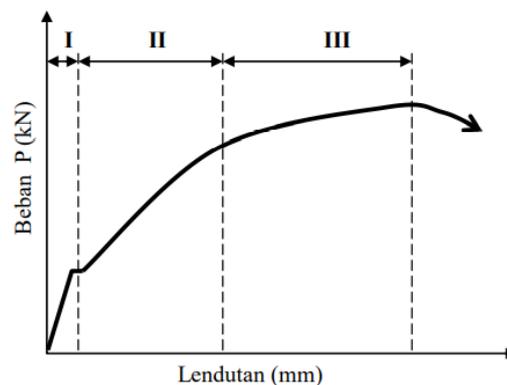
Menurut Nawy (2003), Hubungan beban-defleksi balok beton bertulang pada dasarnya dapat diidealisasikan sebagai berikut :

Daerah I: Taraf praretak, dimana batang-batangnya strukturalnya bebas retak. Segmen praretak dari kurva beban - defleksi berupa garis lurus yang memperlihatkan perilaku elastis penuh. Tegangan tarik maksimum pada balok lebih kecil dari kekuatan tariknya akibat lentur atau lebih kecil dari modulus *rupture* (f_r) beton.

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

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

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



Gambar 8. Hubungan Antara Beban Dan Lendutan (Nawy, 2003)

G. Metode Perbaikan dan Perkuatan

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

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

metode perbaikan dalam menangani kerusakan yang umum terjadi pada beton :

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



Gambar 9. Konsep Perbaikan Dan Perkuatan Struktur

Beberapa metode perkuatan yang umum dilakukan dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. *Concrete Jacketing* adalah suatu metode perkuatan dengan cara menyelimuti beton yang telah ada dengan beton tambahan. Dalam melakukan perkuatan dengan *concrete jacketing* biasanya digunakan bahan *micro-concrete* yang memiliki sifat dapat memadat tanpa bantuan vibrator (*self compaction*). Teknik perkuatan ini digunakan pada kolom dengan tujuan untuk memperbesar penampang kolom sehingga kekuatan geser beton menjadi meningkat.
2. *Steel Jacketing* adalah metode perkuatan kolom persegi beton bertulang. *Steel jacketing* terdiri dari empat sudut baja longitudinal yang ditempatkan di setiap sudut kolom. Sudut longitudinal ini

terhubung bersama menjadi sebuah kerangka yang dihubungkan dengan *strap* baja *transversal*.

3. *Fiber Reinforced Polymer* Perkuatan pada balok dilakukan dengan menggunakan *fiber carbon*. Metode perkuatan menggunakan FRP dilakukan dengan cara menempelkan pada permukaan beton dengan menggunakan perekat *epoxy*. FRP merupakan bahan yang ringan, kuat, dan tahan terhadap korosi.

Pemilihan metode perkuatan dipengaruhi oleh beberapa pertimbangan, antara lain:

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

H. Mortar Grouting

Berdasarkan SNI 03-6825-2002 mortar didefinisikan sebagai campuran material yang terdiri dari agregat halus (pasir), bahan perekat (tanah liat, kapur, semen Portland) dan air dengan komposisi tertentu. Mortar memiliki nilai penyusutan yang relative kecil. Mortar harus tahan terhadap penyerapan air serta kekuatan geser yang dapat memikul gaya-

gaya yang bekerja pada mortar tersebut. Jika penyerapan air pada mortar terlalu besar maka mortar akan mengeras dengan cepat dan kehilangan adhesinya.

Mortar grouting adalah bahan pengisi yang digunakan untuk perbaikan suatu komponen struktur. Sika Grout 215 merupakan salah satu produsen bahan bangunan dan produk kimia yang sering digunakan dalam suatu proyek konstruksi. Dalam pengerjaan grouting tentunya dibutuhkan semen grouting yang siap pakai dan mempunyai karakteristik tidak susut, dapat mengalir dengan baik serta memenuhi persyaratan standar *corps of engineering* CDR C-621 dan ASTM C-1107 yang keseluruhannya terdapat pada Sika Grout 215. Sika Grout 215 berfungsi sebagai komponen semen grouting untuk memperbaiki beton yang keropos dan juga untuk pengisi celah dan rongga, serta dapat diaplikasikan pada stuktur bangunan.

I. Fiber Reinforced Polymer (FRP)

FRP adalah material yang terbuat dari *fiber* (serat) material sintetis seperti *glass*, *aramid* atau *carbon* yang disatukan oleh zat matrik, seperti *epoxy* atau *polyester*. Pengembangan penggunaan FRP pada rekayasa sipil terdiri dari dua bagian, pertama untuk rehabilitasi dan perbaikan struktur dan kedua untuk pembuatan konstruksi baru yang sepenuhnya menggunakan FRP ataupun komposit dengan beton. Penggunaan

FRP dalam perkuatan struktur antara lain pada balok, pelat, jembatan, kolom.

Bahan komposit FRP terdiri dari serat kontinu berkekuatan tinggi, seperti kaca, karbon, atau kabel baja, yang tertanam dalam matriks polimer. Serat menyediakan elemen penguat utama sementara matriks polimer (resin epoksi) bertindak sebagai pengikat, melindungi serat, dan mentransfer beban ke dan di antara serat. Terdapat beberapa jenis material pembentuk FRP seperti karbon, kaca, kevlar dan material alami lainnya seperti goni. Produk FRP yang terbuat dari kaca lebih dikenal dengan *Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)*.

Perbandingan antara kekuatan beton dan serat merupakan faktor yang sangat menentukan dalam memberikan karakteristik mekanis produk yang dihasilkan. Persyaratan fungsional yang dimiliki oleh serat sebagai penguat antara lain:

1. Modulus elastisitas yang tinggi untuk memberikan kekuatan pada komposit
2. Kekuatan patah yang tinggi
3. Mempunyai kekuatan yang seragam di antara serat
4. Mempunyai tingkat kestabilan yang tinggi saat penanganan

Menurut Rocca et al., (2009), beberapa mode kegagalan yang sering terjadi pada struktur yang menggunakan FRP yaitu:

1. Rusaknya FRP setelah tulangan tarik meleleh (*rupture failure of FRP*)

2. Lepasnya ikatan antara FRP dan beton (*debonding failure*)

3. Kegagalan tekan beton

Glass Fiber Reinforced Polymer (GRFP) merupakan salah satu jenis FRP. GRFP serat polimer yang terbuat dari matriks plastik diperkuat oleh serat halus dari kaca (Esmaeeli et al., 2017). Material GFRP yang sangat laku dipasaran adalah dalam bentuk lembaran, dimana keuntungan yang diperoleh dari GFRP tipe lembaran adalah kemudahan dalam aplikasi yaitu lembaran GFRP ini dapat ditempelkan dengan mudah pada bagian permukaan anggota struktur yang rusak dengan bantuan perekat (resin) Karena itu jumlah dan arah dari serat akan berpengaruh terhadap kuat tarik GFRP. Semakin cermat penataannya makin banyak serat yang dapat dimasukkan sehingga semakin besar pula kuat tariknya., biaya yang relatif murah dibandingkan FRP dengan bahan yang lain, kekuatan tarik yang tinggi, ketahanan yang tinggi terhadap kimia, memiliki sifat isolasi yang baik (Wu et al., 2005).

Ada beberapa keuntungan penggunaan FRP sebagai perkuatan struktur, antara lain:

1. Kuat tarik sangat tinggi (\pm 7-10 kali lebih tinggi dari U39)
2. Sangat ringan (*density* 1.4-2.6 gr/cm³, 4-6 kali lebih ringan dari baja)
3. Pelaksanaan sangat mudah dan cepat
4. Memungkinkan untuk tidak menutup lalu lintas

5. Tidak memerlukan area kerja yang luas
6. Tidak memerlukan *joint*, meskipun bentang yang harus diperkuat cukup panjang
7. Tidak berkarat (non logam)

Pada penelitian ini GFRP yang digunakan adalah *type* SEH51A. Adapun spesifikasi karakteristik material GFRP-S dapat dilihat pada Tabel berikut ini:

Tabel 1. Spesifikasi GFRP Tyfo SEH-51A

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

(Sumber: Fyfe.Co LLC)

Tabel 1. menunjukkan data karakteristik material GFRP dalam keadaan lepas atau dalam kondisi kering. Serat-serat inilah yang digunakan dalam membentuk lembaran GFRP dengan ketebalan tertentu,

dan menunjukkan spesifikasi lembaran komposit GFRP tipe SEH-51A. Tebal lembaran GFRP yang digunakan yaitu 1,3 mm. GFRP memiliki nilai kuat tarik ultimit yang berbeda berdasarkan arah serat di mana pada arah utama serat, nilai kuat tarik GFRP sebesar 460 MPa sedangkan pada arah tegak lurus arah utama serat (90° terhadap arah utama serat), nilai kuat tariknya hanya sebesar 20,7 MPa.

Dalam penggunaannya, GFRP digabungkan dengan suatu bahan perekat (*Epoxy Resin*) yang akan merekatkan lembaran fiber pada beton. Bahan perekat yang akan digunakan pada penelitian ini berupa *Epoxy* dengan nama Tyfo SEH52 yang merupakan produk dari Fyfe. Co terdiri dari 2 (dua) komponen yaitu komponen A (resin) dan komponen B (hardener). Perbandingan campuran antara bagian A: bagian B = 2:1.



Tyfo SHE-51A Tyfo S Component A Tyfo S Component B

Gambar 10. GFRP-S Tyfo SEH-51A Dan *Epoxy Resin* Tyfo S

Tabel 2. Karakteristik Material Resin Epoksi

Properti Material Epoksi		
Waktu pengeringan : 72 jam (Suhu 60 °C)		
Properti	Metode ASTM	Nilai Test
Kekuatan Tarik	ASTMD-638	72.4 Mpa
Modulus Tarik	-	3.18 Gpa
Persen Regangan	ASTMD-638	5%
Kekuatan Lentur	ASTM D-790	123.4 Mpa
Modulus Lentur	ASTM D-790	3.12 Gpa

Sumber : Fyfo.Co LLC

J. Kapasitas Lentur Balok Beton Bertulang dengan Perkuatan FRP

Seperti yang telah diuraikan sebelumnya bahwa kondisi beton bertulang sebelum beton retak (prareta) maka tulangan dan beton bekerja bersama-sama pada daerah tarik. Dengan demikian maka untuk menentukan nilai lendutan yang terjadi tentunya juga menggunakan nilai momen inersia penampang utuh dengan asumsi bahwa beton belum mengalami keretakan sehingga momen inersia penampang masih utuh sepenuhnya. Rumus perhitungan momen inersia penampang utuh dapat dilihat pada Persamaan (2.1).

$$I_g = \frac{1}{12}bh^3 \dots\dots\dots (2.1)$$

Setelah beton mengalami retak maka beton akan memasuki daerah pascareta di mana kondisi ini dimulai dengan munculnya retak pertama. Apabila telah terjadi retak lentur maka kontribusi kekuatan tarik beton dapat dikatakan sudah tidak ada lagi. Hal ini berarti pula bahwa kekakuan

lentur penampangnya telah berkurang sehingga kurva hubungan beban-defleksi akan semakin landai dibandingkan dengan taraf praretak. Pada tahap ini digunakan nilai momen inersia penampang retak I_{cr} . Nilai I_{cr} ini dapat dihitung menggunakan Persamaan (2.2)

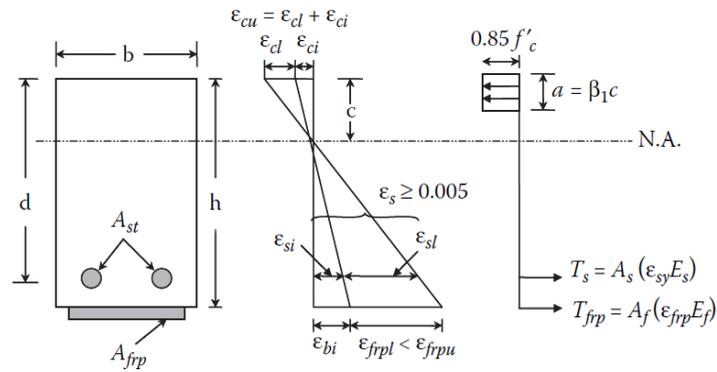
$$I_{cr} = \frac{1}{3}bc^3 + \frac{E_s}{E_c}A_s(d - c)^2 \dots\dots\dots (2.2)$$

$$I_{cr} = \frac{1}{3}bc^3 + \frac{E_s}{E_c}A_s(d - c)^2 + \frac{E_f}{E_c}A_f(h - c)^2 \dots\dots\dots (2.3)$$

Bila dalam perhitungan balok beton menggunakan FRP maka Persamaan (2.2) dapat diperluas menjadi Persamaan (2.3) dengan memperhitungkan pengaruh kontribusi FRP.

Pedoman perencanaan untuk FRP dapat mengacu pada standard ACI yaitu “*ACI 440.2R-08, Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP System for Strengthening Concrete Structures*”.

Untuk perkuatan lentur dengan FRP, perhitungan desain mengacu pada ACI *committee* 440.2R-08 . Dalam mendesain balok dengan perkuatan FRP, digunakan nilai regangan di bawah dari regangan putus FRP, hal ini dimaksudkan agar nantinya tipe kegagalan yang terjadi pada balok adalah kegagalan *debonding*. Perhitungan tersebut disajikan pada Gambar 11 dan dalam rumus-rumus berikut.



Gambar 11. Regangan Untuk Metode ACI 440-2R-08

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

$$\phi M_n \geq M_u \dots \dots \dots (2.4)$$

dimana :

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

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

$$k_m = \frac{1}{60 \epsilon_{fu}} \left(1 - \frac{n E_f t_f}{360.000} \right) \leq 0,90 \text{ untuk } n E_f t_f \leq 180.000 \dots \dots \dots (2.5)$$

dimana :

- k_m = koefisien lekatan FRP
- ϵ_{fu} = regangan ultimit FRP
- n = jumlah lapis FRP

E_f = elastisitas FRP (Mpa)

t_f = tebal FRP (mm)

Dengan memberikan asumsi bahwa nilai regangan maksimum pada beton sebesar 0,003, maka regangan yang terjadi pada FRP dapat dihitung dengan Persamaan (2.6).

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} \left(\frac{h-c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq k_m \varepsilon_{fu} \dots \dots \dots (2.6)$$

dimana :

ε_{fe} = regangan yang terjadi pada FRP

ε_{fu} = regangan ultimit beton

h = tinggi balok

c = tinggi blok tegangan ekuivalen

ε_{bi} = regangan beton

Setelah mendapatkan nilai regangan pada FRP, Nilai tegangan pada FRP dapat dihitung dengan Persamaan (2.7).

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe} \dots \dots \dots (2.7)$$

dimana :

f_{fe} = tegangan yang terjadi pada FRP

Dengan menggunakan Persamaan (2.7) dan (2.8) nilai regangan dan nilai tegangan pada tulangan dapat dihitung. Setelah diketahui nilai regangan dan tegangan pada tulangan dan FRP, posisi garis netral dapat

dicek berdasarkan gaya dalam yang terjadi dengan menggunakan Persamaan (2.8).

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi} \left(\frac{d-c}{h-c} \right) \dots \dots \dots (2.8)$$

$$f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y \dots \dots \dots (2.9)$$

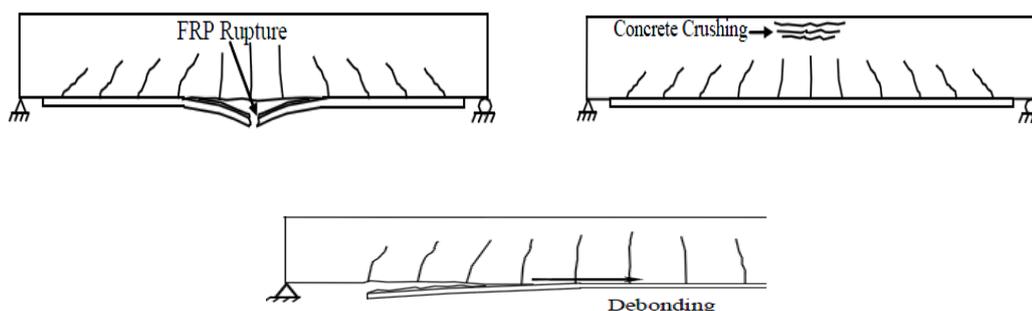
$$c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\gamma f_c \beta_1 b} \dots \dots \dots (2.10)$$

Kapasitas momen nominal perkuatan lentur dengan menggunakan FRP dapat dihitung dengan Persamaan (2.11). Untuk perkuatan lentur *ACI committee 440* merekomendasikan nilai faktor reduksi untuk FRP (ψ_f) sebesar 0,85.

$$M_n = A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \psi_f A_f f_{fe} \left(h - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \dots \dots \dots (2.11)$$

K. Mode Kegagalan pada Balok dengan Perkuatan GFRP

Model kegagalan yang terjadi pada balok beton yang diperkuat dengan FRP secara umum dapat dibedakan atas tiga yaitu rusak atau putusya FRP (*FRP rupture*), hancurnya beton pada sisi tekan (*concrete crushing*) dan lepasnya ikatan antara beton dengan FRP (*debonding*).



Gambar 12. Putusnya FRP Dan Hancurnya Beton Pada Sisi Tekan

Model kegagalan secara berurutan ditunjukkan pada Gambar 12. yakni berupa putusnya lapisan FRP yang terjadi setelah melelehnya tulangan dan hancurnya beton pada sisi tekan. Hancurnya beton pada sisi tekan terjadi sebelum tulangan tarik meleleh sehingga kondisi ini identik dengan kondisi *over-reinforced*. Selain itu, terdapat pula kondisi di mana tulangan tarik telah meleleh namun disertai dengan hancurnya beton pada sisi tekan tanpa disertai putusnya FRP.

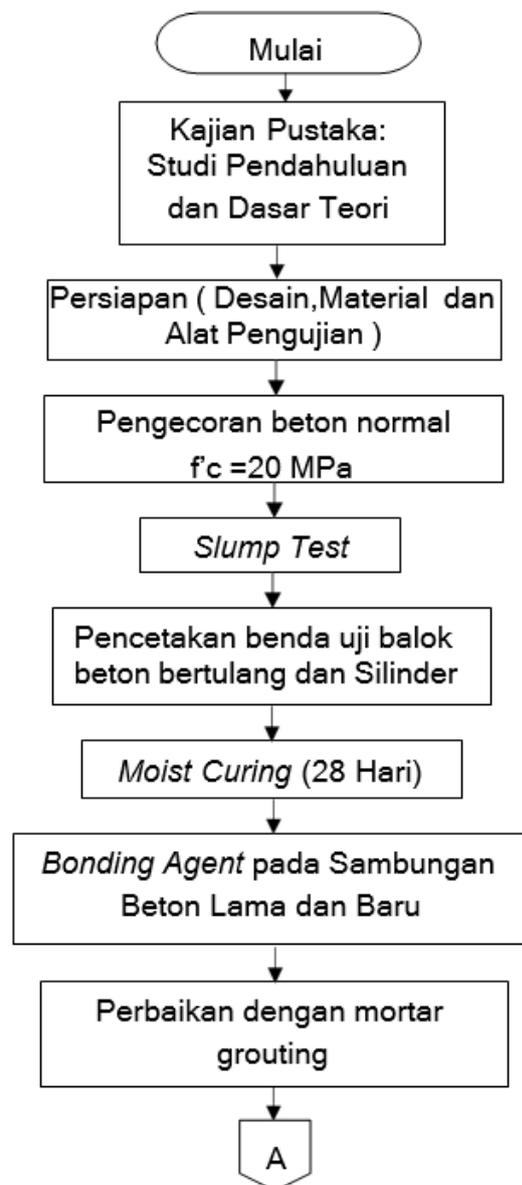
Debonding atau lepasnya ikatan antara FRP dengan beton ini merupakan masalah yang kritis dan sangat penting dari penggunaan material FRP dalam hal perbaikan dan perkuatan struktur. Bidang rekatan, dalam hal ini merupakan bidang antara FRP dengan beton, biasanya merupakan bagian terlemah di mana *debonding*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

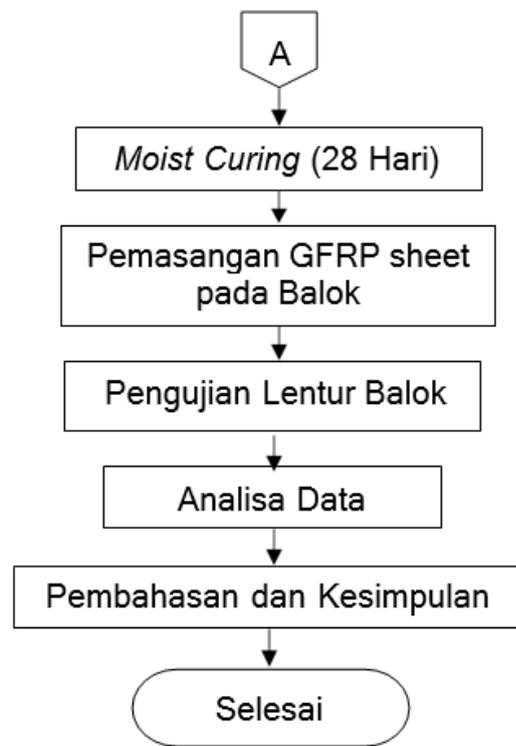
Hal ini disebabkan karena adanya konsentrasi tegangan yang tinggi pada daerah tersebut saat terjadi transfer gaya dari beton ke FRP. Daerah – daerah kritis terjadinya *debonding* terletak pada ujung lapisan FRP dan juga area sekitar adanya retak geser maupun lentur.

BAB 3. METODE PENELITIAN

A. Bagan Alir Penelitian

Keseluruhan penelitian yang dilakukan di Laboratorium disusun pada bagan alir sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 13.





Gambar 13. Bagan Alir

B. Lokasi dan Waktu Penelitian

Lokasi dan Waktu Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Struktur dan Bahan, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Gowa. Jenis penelitian yang dilakukan merupakan studi eksperimental laboratorium berupa pengujian lentur balok yang diperkuat dengan mortar grouting dan GFRP *Sheet*. Penelitian dilaksanakan selama 4 bulan terhitung dari bulan Januari - April 2022.

C. Alat dan Bahan

C.1. Pengujian Karakteristik Mekanis Tulangan

Pengujian karakteristik mekanis tulangan bertujuan untuk mengetahui tegangan leleh (f_y) dan modulus elastisitas baja (E_s). Pengujian ini meliputi uji kuat tarik pada tulangan ulir diameter 13 yang digunakan sebagai tulangan memanjang dan tulangan polos diameter 8 sebagai tulangan geser. Untuk balok beton normal adalah tulangan polos diameter 8 mm untuk sengkang vertikal serta tulangan longitudinal atas menggunakan tulangan polos diameter 8 mm dan tulangan longitudinal bawah menggunakan tulangan ulir diameter 13 mm sedangkan tulangan longitudinal dengan asumsi pasca spalling menggunakan tulangan ulir 8 mm dengan kuat tekan beton f'_c 20 Mpa berdasarkan uji selinder setelah umur 28 hari. Baja tulangan diuji sifat mekanisnya dengan mengacu pada SNI 2052:2017 dimana benda uji tarik harus lurus dan utuh atau tidak boleh dibubut dengan tujuan untuk memperkecil diameter. Pengujian dilakukan menggunakan UTM (*Universal Testing Machine*) pada Laboratorium Struktur dan Bahan sebagaimana ditampilkan pada Gambar 14.



Gambar 14. Pengujian Tarik Tulangan

C.2. Pengujian Sifat Mekanis Beton

Benda uji dibuat menggunakan beton ready mix dengan perencanaan kuat tekan desain 20 MPa sehingga mutu beton perlu dikontrol dengan pengujian sifat mekanis beton. Pengujian sifat mekanis beton terdiri dari pengujian kuat tekan, pengujian kuat tarik belah, dan pengujian kuat lentur beton. Gambar menunjukkan *Universal Testing Machine* yang digunakan untuk menguji sifat mekanis pada beton.



Gambar 15. *Universal Testing Machine*

C.3. Pengujian Kuat Tekan Mortar Grouting

Alat yang digunakan pada pengujian kuat tekan mortar grouting adalah sebagai berikut :

1. *Mixer* dengan kapasitas 20 liter, digunakan untuk mencampur bahan mortar grouting seperti pada Gambar 16.



Gambar 16. *Mixer*

2. Mould silinder ukuran 50 x 100 mm, dapat dilihat pada Gambar 17.



Gambar 17. Silinder 50 mm x 100 mm

3. Timbangan.
4. *Compression Testing Machine*

Adapun bahan yang digunakan pada pengujian kuat tekan mortar grouting adalah sebagai berikut

1. Air
2. Mortar grouting komersial

C.4. Pengujian Lentur Balok

Peralatan yang digunakan pada pengujian lentur balok dapat dirincikan sebagai berikut

1. Alat Ukur Regangan

Untuk mengukur regangan yang terjadi pada tulangan dipasang *strain gauge* tipe FLA-2-11 (*gauge factor* $2,12 \pm 1\%$) yang ditempatkan pada tulangan longitudinal menggunakan perekat CN *Adhesive* sebagaimana dapat dilihat pada gambar 18.



Gambar 18. (a) FLA-2-11 (*gauge factor* $2,12 \pm 1\%$), (b) *strain gauge* baja, (c) CN *Adhesive*

2. Alat ukur regangan beton

Alat ukur regangan beton adalah *strain gauge* tipe PL-60 11 (*gauge factor* $2,09 \pm 1\%$), yang dilekatkan pada permukaan beton sesuai posisi-posisi yang direncanakan yang dapat dilihat seperti pada Gambar 19.



Gambar 19. (a) PL-60 11 (*gauge factor* $2,09 \pm 1\%$), (b) *strain gauge* beton, (c) CN *Adhesive*

3. Alat ukur regangan FRP

Alat ukur regangan FRP adalah *strain gauge* tipe FLA-6-11-5L (*gauge factor* $2,12 \pm 1\%$), yang dilekatkan pada permukaan FRP ditengah bentang. Perekat yang digunakan untuk merekatkan strain gauge pada permukaan FRP adalah CN *Adhesive* yang dapat dilihat seperti pada gambar 20.



Gambar 20. (a) PL-60 11 (*gauge factor* $2,09 \pm 1\%$), (b) *strain gauge* beton, (c) CN *Adhesive*

4. Alat ukur lendutan

Untuk mengukur besar dan arah lendutan yang terjadi pada balok uji selama pembebanan digunakan LVDT (*Linear Variable Displacement Transducer*) yang dapat dilihat seperti pada gambar 21.



Gambar 21. LVDT (*Linear Variable Displacement Transducer*)

5. Alat Uji Pembebanan

- a. Pengujian lentur balok dilakukan menggunakan alat uji statik dimana benda uji yang akan dibebani diletakkan pada *loading frame* seperti gambar 22.



Gambar 22. Alat Uji Statik Kapasitas 1500 kN

- b. *Load cell* kapasitas 200 kN untuk mengetahui besar beban
- c. *Data logger* TDS-530, untuk merekam secara otomatis data yang diukur oleh *strain gauge*, LVDT, dan *load cell*.



(a)



(b)

Gambar 23. (a) *Load Cell* 200 kN (b) *Data Logger* TDS 530

C.5. Bahan

Adapun material yang digunakan pada pengujian lentur balok adalah sebagai berikut:

1. Beton *ready mix* dengan mutu rencana $f'c$ 20 MPa
2. Tulangan baja ulir konvensional diameter 13 mm
3. Tulangan baja polos konvensional diameter 8 mm
4. Mortar grouting komersial, ditunjukkan pada Gambar 24.



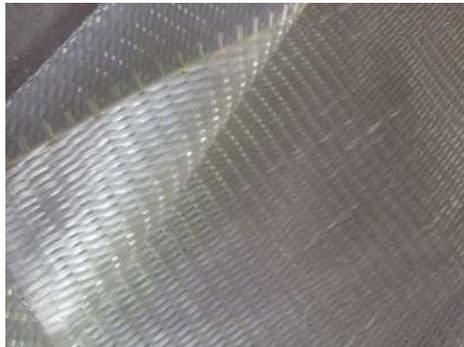
Gambar 24. Mortar Grouting

5. Sika *Bond*, untuk meningkatkan kelekatan antara beton normal dengan mortar grouting yang dapat dilihat pada gambar 25.



Gambar 25. Sika *Bond*

6. *Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)*



Gambar 26. Serat GFRP

D. Jenis Penelitian

Penelitian yang dilakukan adalah uji eksperimental dan kajian pustaka tentang perilaku lentur balok beton bertulang yang diperkuat dengan menggunakan Grouting dan GFRP *Sheet*. Penelitian ini dilaksanakan dengan tahapan-tahapan sebagai berikut:

D.1. Pengujian Karakteristik Mekanis Tulangan

Pengujian ini meliputi pengujian kuat tarik baja tulangan polos diameter 8 mm sebagai tulangan pada serat tekan, tulangan polos diameter 8 mm sebagai tulangan geser, dan tulangan ulir diameter 13 mm yang akan dipakai sebagai tulangan lentur pada serat tarik. Proses pengujian dilakukan dengan menggunakan alat *Universal Testing Machine* (UTM) sesuai SNI 2052:2014 (ASTM E8/E8M-09 2010).

D.2. Pembuatan Benda Uji Balok Beton Bertulang dan Silinder

Benda uji yang digunakan berbentuk balok dengan ukuran 150 mm x 200 mm x 3300 mm untuk pengujian lentur dan beton silinder diameter 100 mm x 200 mm untuk pengujian karakteristik material beton. Pembuatan benda uji menggunakan standar SNI 2493:2011. Dan untuk pengujian kuat tekan beton menggunakan standar SNI 03-6825-2002.

D.3. Pengujian Kuat Tekan Mortar Grouting

Pengujian kuat tekan mortar grouting dilakukan setelah sampel berumur 28 hari. Sampel yang digunakan adalah silinder ukuran 50 x 100 mm sebanyak 3 buah. Material utama yang digunakan pada penelitian ini adalah mortar grouting merk Sika Grout 215 *New*. Untuk pengujian kuat tekan menggunakan standar SNI 03-6825-2002.

D.4. Pengujian Lentur Balok

Pada pengujian lentur terdapat 3 jenis benda uji yang terdiri dari balok beton normal sebagai balok kontrol, balok yang diperkuat dengan mortar grouting, dan balok yang diperkuat dengan mortar grouting dan GFRP *Sheet*. Benda uji balok dibuat menggunakan beton ready mix dengan mutu rencana sebesar 20 MPa. Secara keseluruhan benda uji terdiri dari 1 buah benda uji. Benda uji memiliki dimensi 150 mm x 200 mm x 3300 mm yang kemudian diperkuat dengan mortar grouting sepanjang

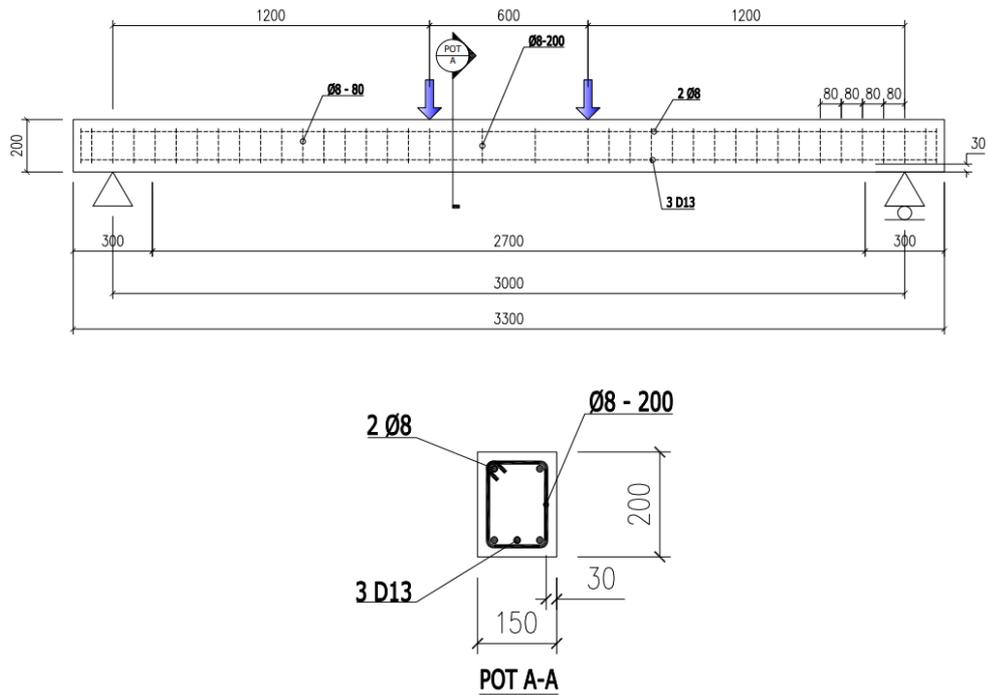
2700 mm. Untuk pengujian kuat tekan menggunakan standar SNI 4431:2011.

D.5. Desain Penelitian

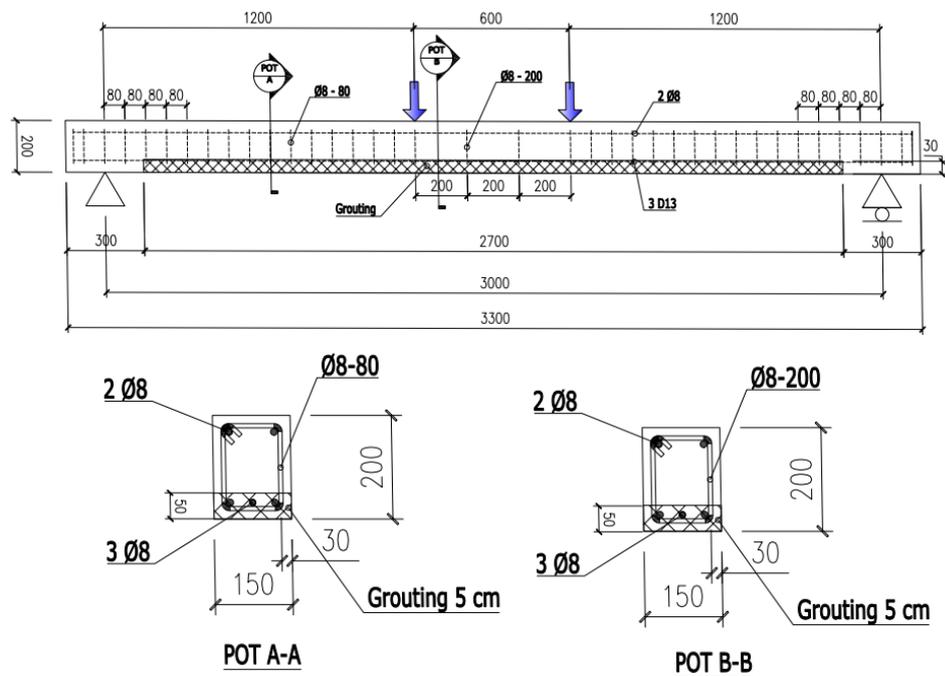
Dimensi dan tulangan balok dianalisa dengan metode kekuatan batas (*ultimate strength design*) dan pengujian balok dilakukan dengan instrumen standar umum pengujian balok. Ada tiga tipe balok yang diuji dalam penelitian ini dengan dimensi benda uji panjang 150 x 200 x 3300 mm, hal ini bisa dilihat pada Gambar 25-29. Setiap variasi benda uji terdiri atas 1 buah specimen dengan mutu beton f'_c 20 MPa. Adapun variasi benda uji yang digunakan dapat dilihat sebagai berikut:

Tabel 3. Variasi Benda Uji 150 X 200 X 3300 Mm

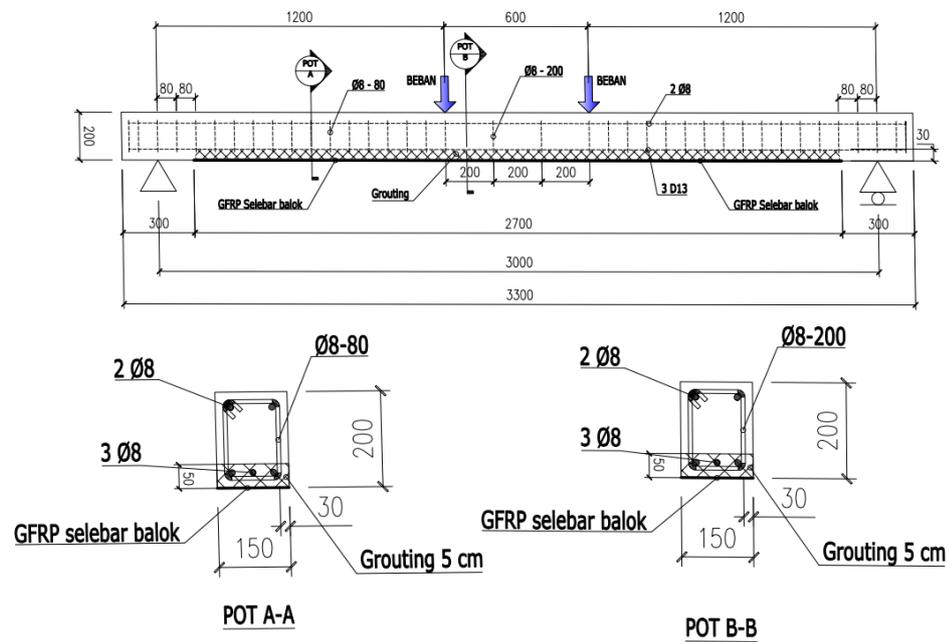
Kode Benda Uji	Material Perbaikan	Jumlah balok
BK	-	1
BGR	Mortar Grouting komersial	1
BGRF-S	Mortar Grouting + GFRP Sheet	1



Gambar 27. Detail Benda Uji Tipe 1 (Balok Normal)



Gambar 28. Detail Benda Uji Tipe 2 (Balok Bertulang Perbaikan Grouting)



Gambar 29. Detail Benda Uji tipe 3 (Beton Bertulang Mortar Grouting Dengan Perkuatan GFRP Sheet)

D.6. Tahapan Penelitian

Persiapan benda uji pengujian lentur diawali dengan perakitan tulangan dan persiapan bekisting. Selanjutnya dilakukan pemasangan strain gauge baja pada tulangan tarik. Setelah persiapan benda uji telah selesai dilakukan pengecoran dengan menggunakan beton *ready mix* yang sudah diuji nilai *slump*. Urutan pabrikasi ditunjukkan pada Gambar 30.



(a) Perakitan Tulangan



(b) Persiapan Bekisting



(c) Pemasangan Strain Gauge

(d) *Slump test*

(e) Pengecoran

Gambar 30. Pabrikasi Benda Uji Beton Normal

Setelah pabrikasi benda uji beton normal telah selesai maka dilakukan perawatan beton. Perawatan beton dilakukan saat beton sudah mulai mengeras yang bertujuan untuk menjaga agar beton tidak cepat kehilangan air dan menjaga kelembapan/suhu beton sehingga beton

dapat mencapai mutu beton yang diinginkan. Perawatan beton ditunjukkan pada Gambar 31.



Gambar 31. Perawatan Beton

Beton normal yang telah mencapai umur 28 hari akan diberi perkuatan menggunakan mortar grouting yang telah dicampur menggunakan *mixer* sesuai dengan komposisi yang sudah ditentukan sebelumnya. Proses pencampuran mortar grouting ditunjukkan pada Gambar 32.



Gambar 32. Pencampuran Mortar Grouting

Antara beton lama (beton normal) dan beton baru (mortar grouting) ditambahkan bahan perekat berupa Sika *Bond*, yaitu perekat berbahan dasar emulsi polyvinyl asetat yang dapat dilihat pada Gambar 33.

Penambahan bonding agent ini dimaksudkan untuk meningkatkan kelekatan antara dua material. Setelah pengaplikasian, mortar grouting dituang pada benda uji.



(a) *Bonding Agent*

(b) Pengecoran Mortar Grouting

Gambar 33. Pengecoran Material Perbaikan

Setelah umur beton 28 hari dilakukan pembukaan bekisting yang melekat pada beton. Selanjutnya dilakukan pemasangan lembaran GFRP sheet pada Variasi ke tiga. pemasangan Lapisan GFRP sheet, dengan urutan sebagai berikut:

- a. Meratakan permukaan balok grouting yang akan diperkuat dengan Lapisan GFRP sheet serta membersihkannya dari segala kotoran yang mungkin mengurangi lekatan beton;
- b. Memotong lembaran Tyfo SEH-51 sesuai ukuran permukaan dasar balok;
- c. Mempersiapkan campuran bahan perekat epoxy resin komponen A dan komponen B dengan perbandingan berat 2:1. Proses

pengadukan tidak boleh berlebihan hingga menghasilkan busa dan gelembung yang bisa terperangkap sebagai rongga udara dalam perekat;

- d. Mengoleskan bahan perekat pada permukaan balok dan lembaran GFRP *Tyfo* SEH-51;
- e. Menempelkan bahan perkuatan yang telah dipotong dan diberi perekat dengan arah longitudinal balok dan ditekan perlahan terhadap perekat yang masih basah. Rongga udara yang terjebak antara lapisan perkuatan dengan permukaan beton akan dilepas dengan tekanan *roller* searah serat perkuatan agar perekat menyatu dengan serat dan permukaan beton. Penekanan *roller* tegak lurus arah serat 45 tidak diperbolehkan karena dapat mengubah arah serat atau merusak serat;
- f. Mengoleskan perekat tahap kedua diatas permukaan GFRP *Tyfo* SEH-51 yang telah dilekatkan seluruhnya untuk menjamin lekatan serat ke permukaan beton. Beton ditekan dengan roller agar bahan perekat dapat melapisi permukaan GFRP *Tyfo* SEH-51 secara merata;
- g. Mendiamkan benda uji minimal selama 72 jam sebelum dilakukan pengujian lentur kembali hingga balok mengalami kegagalan lentur. Urutan pemasangan lembaran GFRP *sheet* ditunjukkan pada Gambar 34.



(a) Meratakan permukaan benda uji



(b) Memotong lembaran GFRP

(c) Mengoleskan *Epoxy Resin*

(d) Menempelkan GFRP

(e) Mengoleskan *Epoxy Resin*

(f) Mendinginkan benda Uji

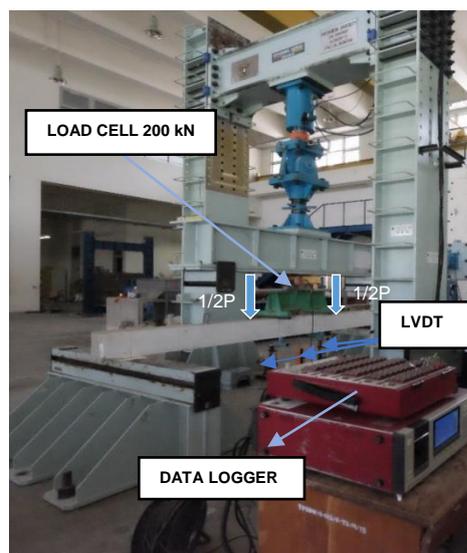
Gambar 34. Tahapan Pemasangan GFRP

Pengujian lentur pada balok beton bertulang dilaksanakan setelah mortar grouting berumur di atas 28 hari. Benda uji dibebani dengan beban monotonik pada dua titik menggunakan alat uji statik berkapasitas 1500

kN. Pembebanan menggunakan kontrol lendutan dengan kecepatan pembebanan 0.2 mm/detik. Untuk mengukur lendutan yang terjadi dipasang tiga buah LVDT pada sisi bawah balok. *Load cell* berkapasitas 200 kN berfungsi membaca pembebanan yang terjadi. *Strain gauge* beton dipasang pada 3 titik berbeda pada daerah tekan bentang balok dengan ketentuan penempatan seperti Gambar 35. Semua instrument tersebut terhubung pada data *logger* yang akan menyimpan semua data yang diambil selama pengujian berlangsung. *Set-up* pengujian balok lentur ditunjukkan pada Gambar 36.



Gambar 35. Penempatan *Strain Gauge* Beton



Gambar 36. *Set-Up* Benda Uji

BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Karakteristik Mekanis Tulangan

Karakteristik mekanis tulangan baja didapatkan dari hasil uji tarik tulangan baja pada alat UTM (*Universal Testing Machine*). Uji kuat tarik tulangan baja dilakukan sebelum pembuatan benda uji. Hal ini dimaksudkan untuk mengetahui mutu baja tulangan sebelum digunakan agar sesuai dengan design awal rencana benda uji. Hasil pengujian ditunjukkan pada tabel 4.

Tabel 4. Hasil Pengujian Kuat Tarik Baja

Tulangan	L_0	L_1	ΔL	P_{leleh}	$P_{ultimate}$	f_y	f_u	ε
	mm	mm	mm	kN	kN	MPa	MPa	%
Ø8-1	400	453	53	18,9	24,9	375,8	565.29	13,25
Ø8-2	404	463	59	19,0	25,0	377,4	489.65	14,60
Ø8-3	402	458	56	18,8	24,8	374,6	561.31	13,93
Rata-rata		458	56	18,9	24,9	375,9	496,0	13,93
D13-1	402	460	58	43,6	60,7	328,5	466.21	14,43
D13-2	403	470	67	40,4	59,7	304,1	468.33	16,63
D13-3	402	468	66	41,3	60,7	311,0	473.20	16,42
Rata-rata		141	41	41,7	60,4	314,5	455,0	15,83

Dimana : L_0 = panjang mula-mula (mm)

L_1 = panjang setelah pengujian (mm)

ΔL = pertambahan panjang (mm)

P_{leleh} = beban saat tulangan meeleh (kN)

$P_{ultimate}$ = beban maksimum (kN)

F_y = tegangan saat tulangan meeleh (MPa)

F_u = tegangan maksimum (MPa)

ε = regangan

Berdasarkan Tabel 4, kuat tarik leleh rata-rata baja tulangan polos diameter 8 mm ($\varnothing 8$) sebesar 375,9 MPa dan baja tulangan ulir diameter 13 mm (D13) sebesar 314,5 MPa.

Berdasarkan hasil pengujian kuat tarik, baja tulangan yang digunakan menurut SNI 2052-2017 untuk baja tulangan $\varnothing 8$ termasuk BJTP 280 dan untuk baja tulangan D13 termasuk BjTS 280.

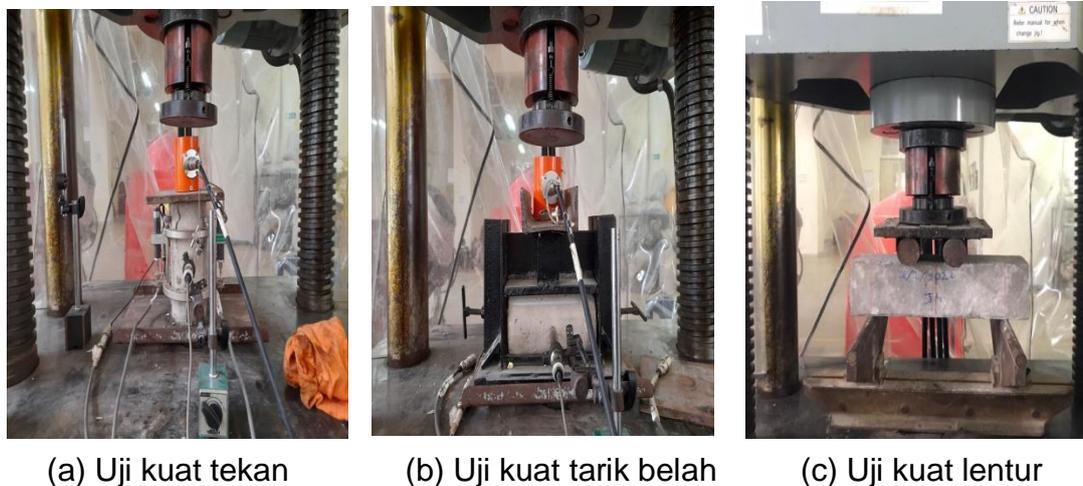


Gambar 37. Pengujian Kuat Tarik Tulangan Baja

B. Pengujian Sifat Mekanis Beton

Karakteristik mekanis beton yang dibahas dalam penelitian ini mencakup kuat tekan beton, kuat tarik belah beton, dan kuat lentur beton.

Nilai kuat tekan beton didapatkan dari pengujian sampel silinder diameter 150 mm x 300 mm sebanyak 3 buah. Nilai kuat tarik belah beton didapatkan dari pengujian sampel silinder diameter 100 mm x 200 mm sebanyak 3 buah. Nilai kuat lentur beton didapatkan dari pengujian sampel balok ukuran 3300 mm x 150 mm x 200 mm sebanyak 3 buah. Beton yang digunakan dalam pengujian ini merupakan bahan yang sama yang digunakan pada sampel balok beton bertulang dengan nilai kuat tekan rencana 20 MPa. Untuk struktur beton bertulang umumnya menggunakan beton dengan kuat tekan berkisar 17-30 MPa. Pengujian karakteristik mekanis beton dapat dilihat pada Gambar 38.



Gambar 38. Pengujian Karakteristik Mekanis Beton

Hasil pengujian kuat tekan, kuat tarik belah dan kuat lentur beton disajikan pada Tabel 5, Tabel 6, dan Tabel 7.

Tabel 5. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

Sampel	Beban (kN)	Luas Penampang (mm ²)	Kuat Tekan (MPa)
1	398	17671	22,52
2	379	17671	21,45
3	402	17671	22,75
Kuat tekan rata-rata			22,24
Standar deviasi			0,44
Mutu beton (f'c)			20

Tabel 6. Hasil Pengujian Kuat Tarik Belah Beton

Sampel	Beban (kN)	Diameter (mm)	Panjang (mm)	Kuat Tarik (MPa)
1	61,01	100	200	1,94
2	50,31	100	200	1,60
3	68,17	100	200	2,17
Kuat tarik belah beton				1,90

Tabel 7. Hasil Pengujian Kuat Lentur Beton

Sampel	Beban (kN)	b (mm)	h (mm)	L (mm)	Kuat Lentur (MPa)
1	13,1	100	100	300	3,93
2	14	100	100	300	4,20
3	13,9	100	100	300	4,17
Kuat lentur rata-rata					4,10
Standar deviasi					0,09

Berdasarkan ketiga tabel di atas, maka didapatkan nilai kuat tekan beton sebesar 22,24 MPa, hasil ini mendekati kuat tekan desain yaitu 20 MPa. kuat tarik belah beton sebesar 1,90 MPa, dan kuat lentur beton sebesar 4,10 MPa.

C. Kuat Tekan Mortar Grouting

Benda uji pada pengujian kuat tekan mortar grouting berupa sampel silinder 50 x 100 mm. Sebelum diuji, benda uji ditimbang terlebih dahulu kemudian dilakukan pengujian kuat tekan mortar grouting menggunakan alat *Compression Testing Machine* yang dapat dilihat pada Gambar 39.



Gambar 39. Uji Kuat Tekan Mortar

Rekapitulasi hasil pengujian mortar grouting pada umur pengujian 28 hari masing-masing ditunjukkan pada tabel 8.

Tabel 8. Hasil Pengujian Kuat Tekan Grouting

Sampel	Beban (kN)	Luas Penampang (mm ²)	Kuat Tekan (MPa)
BGR-1	65	1963	33,10
BGR-2	61	1963	31,07
BGR-3	70	1963	35,65
Kuat tekan rata-rata			33,27

Berdasarkan tabel di atas didapatkan bahwa hasil uji kuat tekan rata-rata untuk mortar grouting, didapatkan nilai 33,27 Mpa sedangkan nilai kuat tekan beton normal sebesar 22.24 Mpa.

D. Pengujian Lentur Balok

Pengujian lentur balok dilakukan untuk menganalisis pengaruh penggunaan mortar grouting dan perkuatan GFRP terhadap perilaku lentur balok beton bertulang. Perilaku lentur didiskusikan berdasarkan perilaku beban-lendutan, beban maksimum, beban-regangan beton, beban-regangan baja, serta beban-regangan GFRP.

Tabel 9 menunjukkan hasil pengamatan pengujian kapasitas momen dan beban berdasarkan analisa teoritis dan hasil pengujian pada kondisi awal retak, leleh, dan ultimit.

Tabel 9. Kapasitas Beban dan Momen Berdasarkan Analisa Teoritis dan Hasil Pengujian Balok

	Uraian	Satuan	Tipe		
			BK	BGR	BGRF-S
Analisa	Pcrack-anls	kN	4,92	4,43	4,93
	Mcrack-anls	kNm	2,37	2,37	3,76
	Pyield-anls	kN	23,05	8,05	24,18
	Myield-anls	kNm	14,63	5,63	15,31
	<i>Pultimate-anls</i>	kN	23,67	15,00	33,91
	<i>Multimate-anls</i>	kNm	15,01	9,80	21,15
Hasil Pengujian	Pcrack-eksp	kN	3,40	3,47	6,73
	Mcrack-eksp	kNm	2,84	2,88	4,84
	Pyield-eksp	kN	26,18	11,99	15,46
	Myield-eksp	kNm	16,51	8,00	10,08
	<i>Pultimate-eksp</i>	kN	28,12	14,73	28,92
	<i>Multimate-eksp</i>	kNm	17,67	9,64	18,15
Rasio	M_{eksp} / M_{anls}	%	1,19	0,98	0,85

Pada balok BK hasil analisa teoritis didapatkan kapasitas lentur sebesar 23,67 kN dan dari hasil pengujian sebesar 29,74 kN, nilai dari hasil pengujian lebih tinggi dari hasil analisa teoritis dengan rasio 1,19 %. Terjadinya perbedaan dari hasil pengujian dan analisa teoritis dikarenakan pada pengujian di Laboratorium dilakukan penyederhanaan nilai tulangan tarik pada daerah lentur dengan metode pendekatan pada perhitungan analisis.

Pada balok yang telah diberikan perbaikan mortar grouting didapatkan hasil analisa teoritis balok BGR sebesar 15,00 kN dan dari hasil pengujian sebesar 14,73 kN, nilai dari hasil pengujian lebih rendah dari hasil analisa teoritis dengan rasio 0,98 %. Terjadinya perbedaan dari hasil pengujian dan analisa teoritis dikarenakan adanya pengurangan luasan tulangan akibat korosi yang berpengaruh terhadap penurunan kapasitas lentur balok pada saat pengujian. Sehingga pada saat balok diberikan beban, balok mengalami kegagalan debonding.

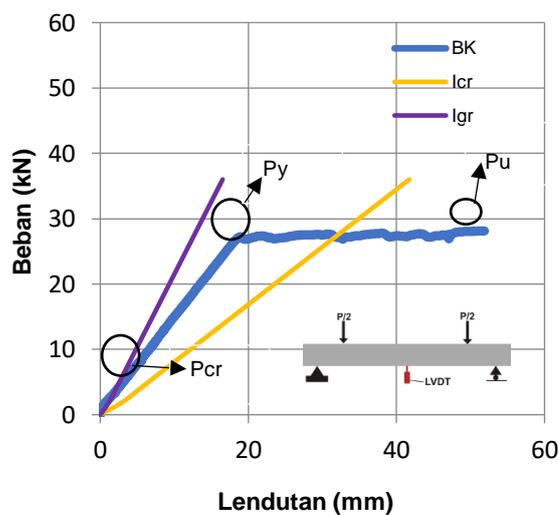
Pada balok yang telah diberikan perkuatan mortar grouting dan GFRP *sheet* didapatkan hasil analisa teoritis balok BGR-S sebesar 33,91 kN dan hasil pengujian sebesar 28,92 %, nilai dari hasil pengujian lebih rendah dari hasil analisa teoritis dengan rasio 0,85 %. Hal ini disebabkan karena adanya pengurangan luasan akibat korosi, sehingga menyebabkan penurunan kapasitas lentur yang sangat signifikan dan menyebabkan lepasnya grouting pada pertengahan pengujian serta GFRP *sheet* tidak bekerja secara maksimal.

D.1. Hubungan Beban-Lendutan

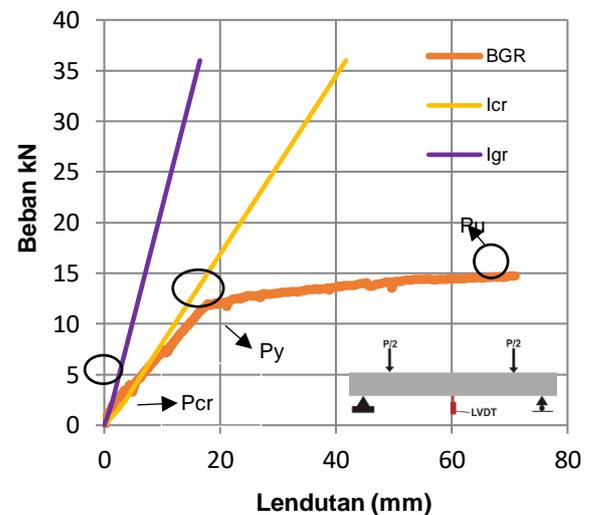
Secara umum, perilaku hubungan beban-lendutan dibagi menjadi 3 fase. Fase pertama adalah fase dimana beton masih dalam kondisi elastis. Fase kedua adalah fase pasca retak, dan fase ketiga adalah fase dimana tulangan leleh. Peralihan dari masing-masing fase ditandai dengan perubahan kekakuan grafik hubungan beban-lendutan. Titik

peralihan pertama digunakan untuk mengidentifikasi retak awal dan titik peralihan kedua digunakan untuk mengidentifikasi leleh pada tulangan.

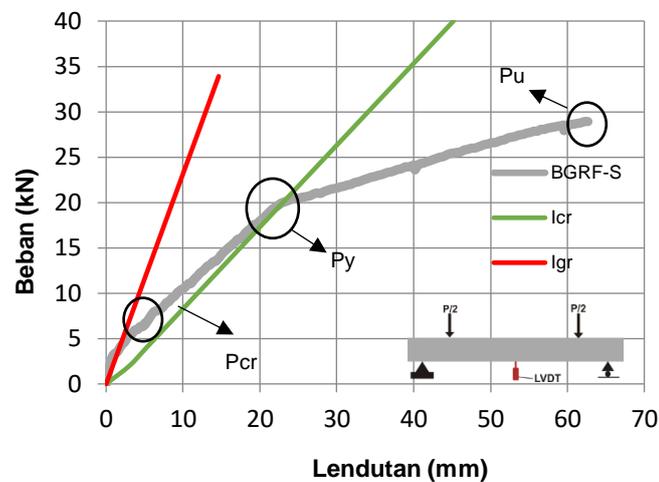
Gambar 40 menunjukkan hubungan beban-lendutan balok BK, BGR dan BGRF-S. Lendutan yang ditunjukkan pada gambar tersebut menunjukkan lendutan yang terjadi pada tengah bentang. Efek material perbaikan (mortar grouting) dapat diamati dengan membandingkan perilaku beban lendutan balok BK dan BGR. Sementara efek penambahan GFRP dapat diamati dengan membandingkan perilaku beban-lendutan balok BGR dan BGRF-S.



(a) Balok Kontrol (BK)



(b) Balok Grouting (BGR)



(c) Balok Grouting dengan GFRP Sheet (BGRF-S)

Gambar 40. Hubungan Beban-Lendutan

Gambar 40 (a) menunjukkan hubungan beban lendutan yang terjadi pada balok kontrol (BK). Grafik menunjukkan bahwa baja tulangan bersifat elastisitas penuh hingga balok mengalami retak awal dimana nilai beban sebesar 3,47 kN dengan lendutan sebesar 2,00 mm. Setelah retak awal, balok kemudian memperlihatkan sifat elastoplastis baja hingga tulangan mengalami leleh dimana nilai beban sebesar 26,19 kN dengan lendutan sebesar 16,12 mm. Setelah tulangan leleh, beban masih menunjukkan peningkatan namun sudah tidak proporsional. Dapat dilihat dari dari kurva hubungan yang menjadi lebih datar dibanding sebelum tulaangan leleh, hal ini terjadi sampai balok mengalami keruntuhan (*failure*) pada beban ultimit sebesar 28,12 dengan lendutan sebesar 51,86 mm. Akibat lebar retak yang bertambah, maka kekakuan lentur berkurang dimana inersia efektif berada diantara nilai inersia gross (I_g) dan inersia crack (I_{cr}).

Gambar 40 (b) menunjukkan hubungan beban – lendutan yang terjadi pada balok dengan perbaikan mortar grouting (BGR). Grafik menunjukkan bahwa balok mengalami retak awal dimana nilai beban sebesar 3,47 kN dengan lendutan sebesar 3,54 mm. Setelah retak awal, balok kemudian memperlihatkan sifat elastoplastis baja hingga tulangan mengalami leleh dimana nilai beban sebesar 11,99 kN dengan lendutan sebesar 17,90 mm. Setelah tulangan leleh, beban masih menunjukkan peningkatan namun sudah tidak proporsional. Dapat dilihat dari kurva hubungan menjadi jauh lebih datar dibanding sebelumnya, hal ini terjadi sampai balok mengalami keruntuhan (*failure*) pada beban ultimit sebesar 14,73 kN dengan lendutan sebesar 70,94 mm. Balok BGR memiliki daktilitas yang lebih tinggi dibandingkan balok BK. Hal ini dapat dilihat dari lendutan pada beban maksimum balok BGR yang meningkat 37% dibandingkan balok BK. Gambar 42 (b) juga menunjukkan bahwa bahwa balok grouting tidak sesuai dengan kriteria desain karena berada diluar garis batas I_g dan I_{cr} hal ini dikarenakan beton yang mengalami kegagalan debonding pada saat diberikan pembebanan, hal ini disebabkan karena adanya pengurangan luasan tulangan akibat korosi yang berpengaruh terhadap penurunan kapasitas lentur dalam memikul beban.

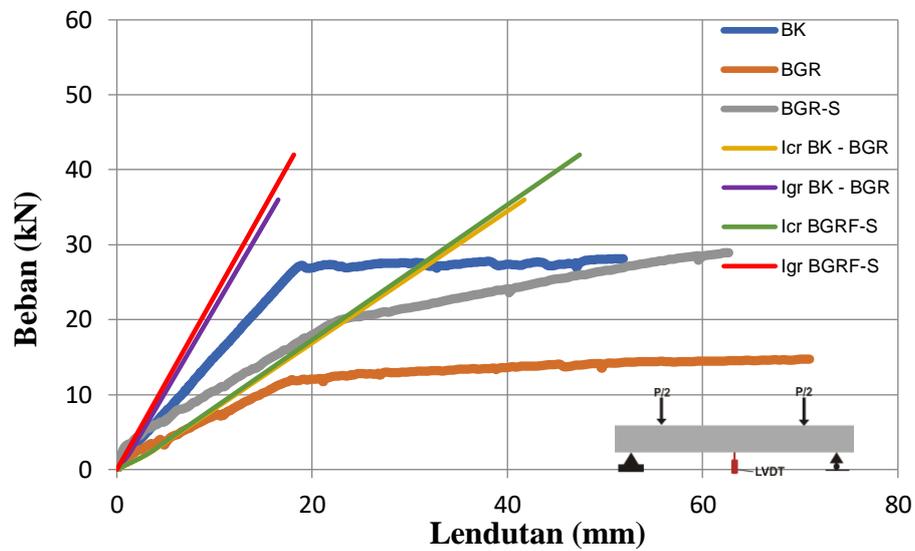
Gambar 40 (c) menunjukkan hubungan beban – lendutan yang terjadi pada balok dengan perkuatan mortar grouting dan GFRP *sheet* (BGRF-S), balok mengalami retak awal dimana nilai beban sebesar 6.73 kN dengan lendutan sebesar 5,06 mm. Setelah retak awal, balok

kemudian memperlihatkan sifat elastis baja hingga tulangan mengalami leleh dimana nilai beban sebesar 16,85 kN dengan lendutan sebesar 18,35 mm. Setelah tulangan leleh, beban masih menunjukkan peningkatan yang proporsional. Dapat dilihat dari kurva hubungan yang sifatnya sama dengan sifat baja Ketika sebelum leleh, hal ini terjadi sampai balok mengalami keruntuhan (*failure*) pada beban ultimit sebesar 28,92 kN dengan lendutan sebesar 62,66 mm. Balok BGRF-S memiliki daktilitas yang lebih tinggi dibandingkan balok BK. Hal ini dapat dilihat dari lendutan pada beban maksimum balok BGRF-S yang meningkat 20,82 % dibandingkan balok BK. Tetapi balok BGR lebih daktail dibandingkan balok BGRF-S, dengan rasio perbandingan 13,21 % pada beban maksimum. Akibat lebar retak yang bertambah, maka kekakuan lentur berkurang dimana inersia efektif berada diantara nilai inersia *gross* (I_g) dan inersia *crack* (I_{cr})

Tabel 10 menunjukkan hasil rekapitulasi nilai beban dan lendutan pada kondisi awal retak, leleh, dan ultimit.

Tabel 10. Rekapitulasi Nilai Beban – Lendutan

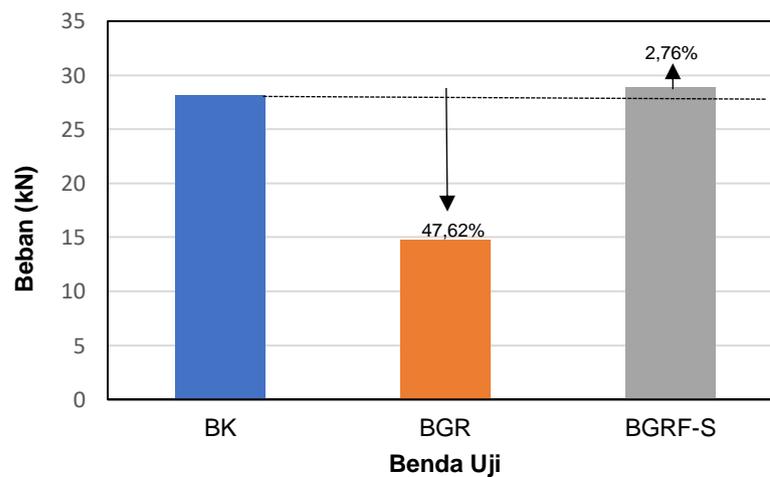
No	Kode	Beban (kN)			Lendutan (mm)		
		P_{cr}	P_y	P_u	δ_{cr}	δ_y	δ_u
1	BK	3,40	26,19	28,12	2,00	16,12	51,86
2	BGR	3,47	11,99	14,73	3,54	17,90	70,94
3	BGRF-S	6,73	16,85	28,92	5,06	18,38	62,66



Gambar 41. Hubungan Beban-Lendutan Pada Semua Benda Uji

D.2. Beban Maksimum

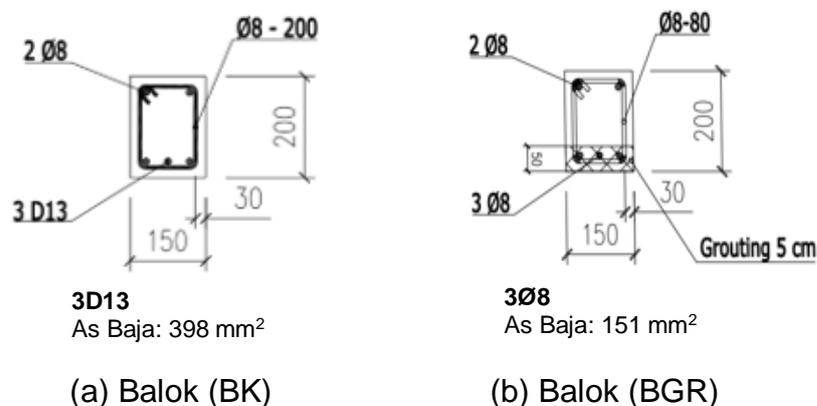
Gambar 42 menunjukkan beban maksimum pada masing-masing benda uji. Beban maksimum balok BK, BGR, BGRF-S adalah 28,12 kN, 14,73 kN, dan 28,92 kN.



Gambar 42. Beban Maksimum

Beban maksimum balok BGR menurun 47,62% dibandingkan balok BK karena adanya pengurangan luasan tulangan tarik dengan presentasi pengurangan luasan tulangan sebesar 62% terhadap tulangan balok kontrol. Seperti yang terlihat pada Gambar 43 luas tulangan BK adalah sebesar 398 mm^2 (3D13), sementara luas tulangan tarik pada BGR sebesar 151 mm^2 (3Ø8). Pengurangan luasan tulangan tersebut secara teoritis untuk mensimulasikan efek korosi pada struktur eksisting dan dengan adanya pengurangan luasan tulangan tarik tersebut menyebabkan kapasitas momen dari balok BGR lebih rendah dari balok BK. Sehingga hal inilah yang menyebabkan beban maksimum balok BGR lebih rendah dibanding balok BK dan perbaikan dengan mortar grouting belum cukup untuk untuk mengembalikan kapasitas beban balok yang mengalami *spalling* akibat korosi.

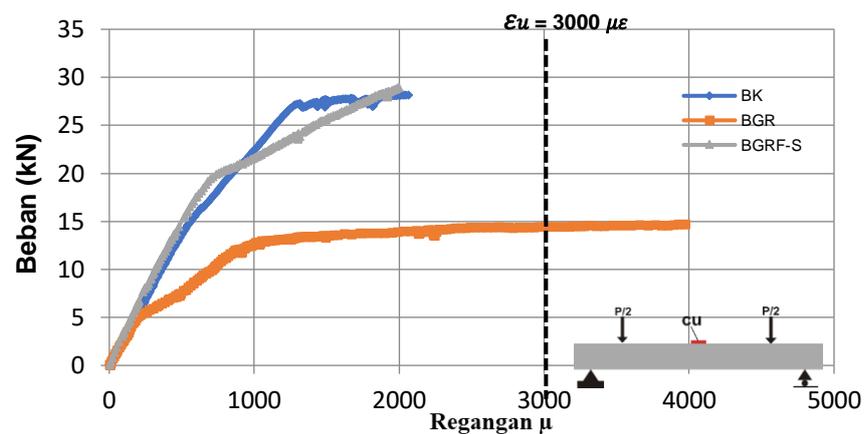
Beban maksimum balok BGRF-S meningkat 2,76% dibandingkan balok BK dan meningkat 49,16% dibandingkan balok BGR. Hal ini dikarenakan adanya efek GFRP *Sheet* sebagai *eksternal reinforcement* yang meningkatkan kuat tarik dan kapasitas beton.



Gambar 43. Potongan Melintang Balok BK Dan BGR

D.3. Hubungan Beban-Regangan Beton

Untuk mengevaluasi beban dan regangan pada beton maka dibuat hubungan beban dan regangan beton untuk semua benda uji seperti yang ditunjukkan pada Gambar 44.



Gambar 44. Hubungan Beban-Regangan Beton

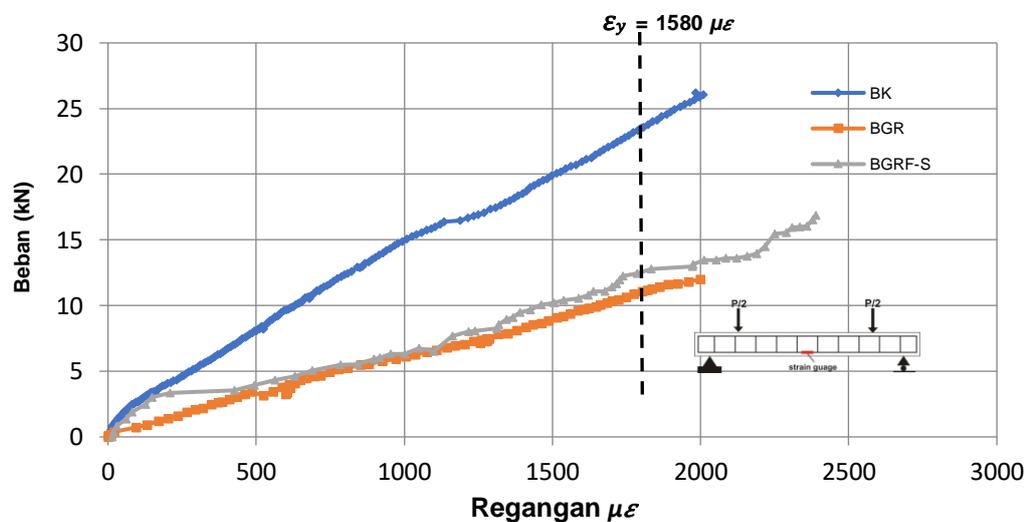
Pada balok BK kondisi leleh beban berada pada 26,19 kN dengan regangan sebesar $1214 \mu\epsilon$ hingga balok mengalami kegagalan pada beban 28,12 kN dengan regangan sebesar $2064 \mu\epsilon$. Pada balok BGR kondisi leleh beban berada pada 11,99 kN dengan regangan sebesar $864 \mu\epsilon$ hingga balok mengalami kegagalan pada beban 14,73 kN dengan regangan $3971 \mu\epsilon$. Pada balok BGRF-S kondisi leleh terjadi pada beban 16,85 kN dengan regangan sebesar $567 \mu\epsilon$ hingga balok mengalami kegagalan 28,92 kN dengan regangan sebesar $1997 \mu\epsilon$.

Dari hasil grafik hubungan beban-regangan beton, benda uji balok yang diberi perkuatan mortar grouting (BGR) mampu mencapai regangan ultimit beton sebelum hancur yaitu ϵ_u sebesar $3000 \mu\epsilon$. Sedangkan beton

yang diberi perkuatan mortar grouting dan GFRP sheet (BGRF-S) telah mengalami kehancuran terlebih dahulu sebelum mencapai regangan ultimit hal ini dikarenakan terlepasnya mortar grouting pada pertengahan pengujian sehingga GFRP sheet tidak bekerja secara maksimal dan balok mengalami keruntuhan.

D.4. Hubungan Beban-Regangan Baja

Untuk mengevaluasi beban dan regangan pada baja maka dibuat hubungan beban dan regangan baja untuk semua benda uji seperti yang ditunjukkan pada Gambar 45.



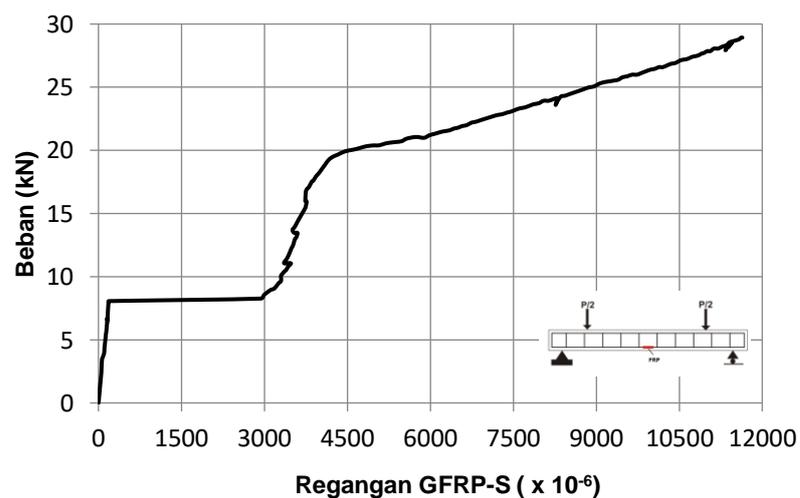
Gambar 45. Hubungan Beban-Regangan Baja

Pada saat beban maksimum, regangan baja pada balok BK, BGR, dan BGRF-S adalah $1932 \mu\epsilon$, $1997 \mu\epsilon$, dan $2387 \mu\epsilon$. Berdasarkan pengujian karakteristik mekanis tulangan baja, didapatkan regangan leleh ϵ_y

sebesar $1580 \mu\epsilon$. Hal ini menunjukkan bahwa tulangan baja pada semua balok telah mencapai regangan lelehnya pada saat beban maksimum. Efek GFRP *sheet* juga sangat berpengaruh terhadap perilaku regangan baja. Balok BGRF-S menunjukkan perilaku yang berbeda dibandingkan balok BK dan BGR dimana pada saat beban yang sama, balok BGRF-S memiliki regangan baja yang lebih besar dibandingkan balok BK dan BGR.

D.5. Hubungan Beban-Regangan GFRP

Untuk mengevaluasi beban dan regangan pada GFRP maka dibuat hubungan beban dan regangan GFRP untuk semua benda uji seperti yang ditunjukkan pada Gambar 46.



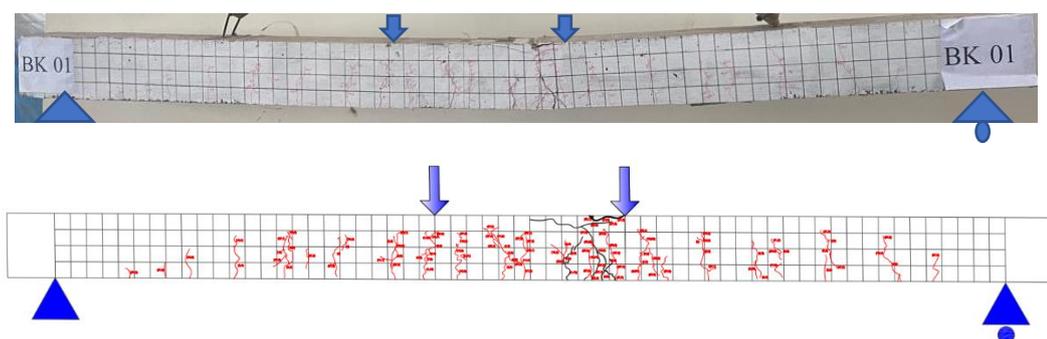
Gambar 46. Hubungan Beban-Regangan GFRP Pada Balok BGRF-S

Gambar 46 menunjukkan hubungan beban-regangan GFRP pada balok perkuatan mortar grouting dan GFRP Sheet. Pada saat beban maksimum sebesar 28,92 kN regangan GFRP pada balok BGRF-S adalah sebesar 11.640,2 $\mu\epsilon$.

E. Pola Retak dan Mode Kegagalan

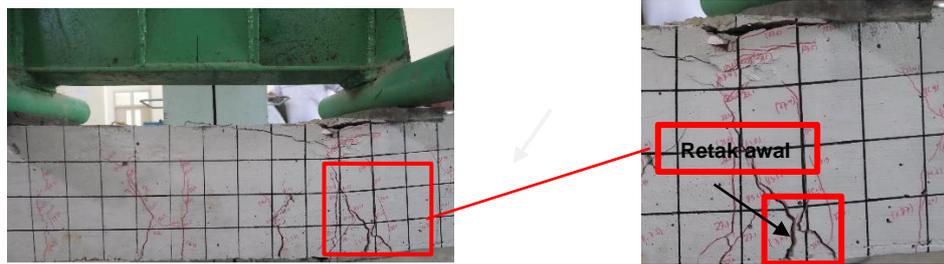
Pengamatan retak dilakukan selama pengujian. Berdasarkan pada pengujian balok beton bertulang dapat diamati bahwa pola retak yang terjadi adalah retak lentur. Retak lentur adalah retak vertikal yang memanjang dari sisi tarik balok dan mengarah ke atas sampai daerah sumbu netralnya. Penjelasan detail terkait pola retak dan mode kegagalan pada tiap benda uji dapat dilihat pada penjelasan di bawah ini.

E.1. Pola Retak dan Mode Kegagalan Balok BK



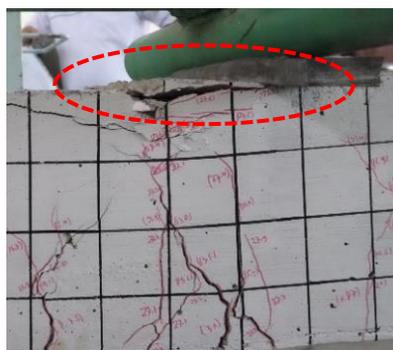
Gambar 47. Pola Retak Pada Balok Kontrol (BK)

Gambar 48 menunjukkan retak awal balok BK yang merupakan retak lentur pada beban 3,40 kN di daerah 1/3 tengah bentang tepat dibawah beban.



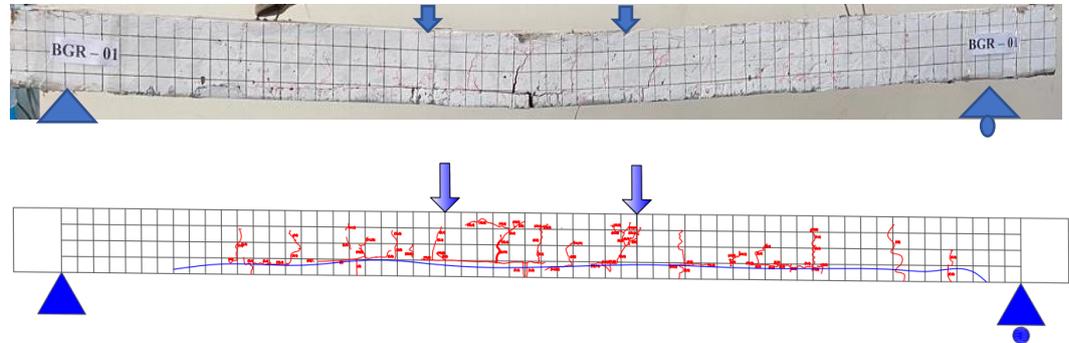
Gambar 48. Retak Awal Balok BK

Retak awal yang semula merupakan retak lentur terus mengalami perambatan retak yang bergerak dari sisi tarik menuju ke sisi tekan benda uji dan tipe retak yang terjadi adalah jenis retak geser-lentur (*Flexural Shear Crack*). Proses ini berlanjut sampai tercapainya beban puncak, di mana beban tidak lagi bertambah tetapi lendutan terus bertambah terutama pada bagian retak yang cukup lebar dan selanjutnya secara tiba-tiba menurun drastis. Setelah mencapai beban maksimum, beton mengalami kehancuran pada sisi tekan seperti yang terlihat pada Gambar 49.



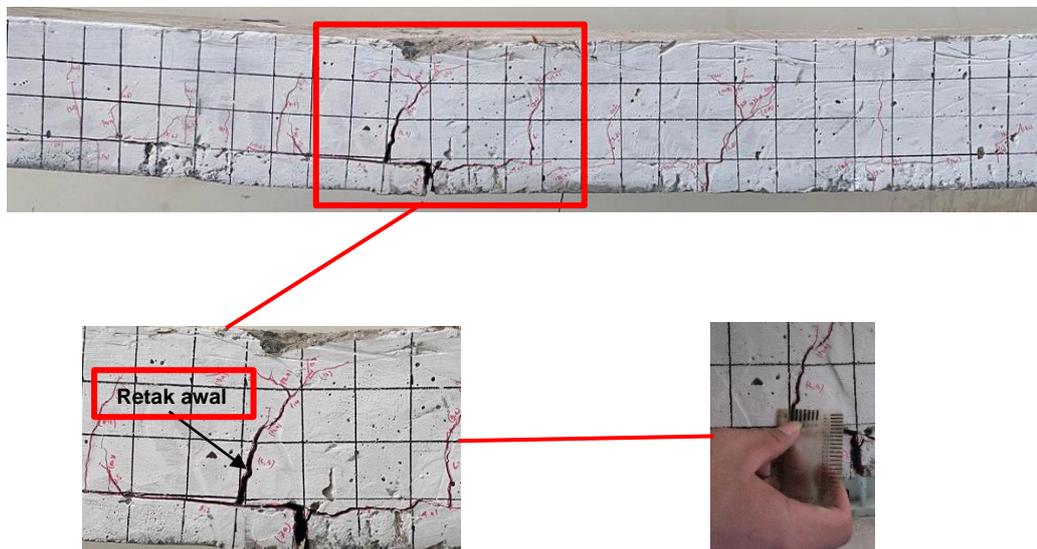
Gambar 49. Kehancuran Sisi Tekan Pada Balok BK

E.2. Pola Retak dan Mode Kegagalan Balok BGR



Gambar 50. Pola Retak Pada Balok Grouting (BGR)

Gambar 51 menunjukkan retak awal balok BGR yang terjadi pada beban 3,47 kN. Retak tersebut terjadi di tengah bentang dan bertambah panjang serta dimulai dari sambungan mortar grouting dan beton normal. Lebar retak maksimum pada retak awal adalah 2,20 mm.



Gambar 51. Retak Awal Pada Balok BGR

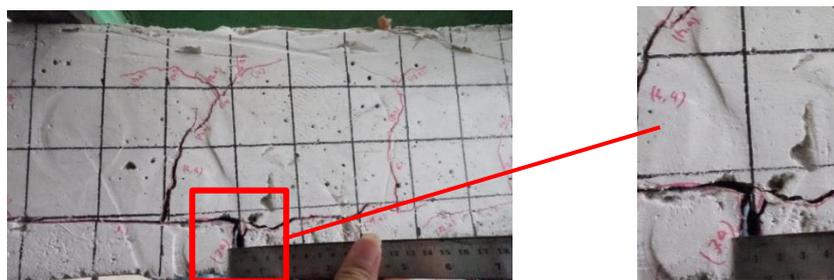
Pada balok BGR, ditemukan *micro-crack* pada sambungan beton normal dan mortar grouting seperti yang ditunjukkan pada gambar 51.

Retak tersebut terjadi pada saat proses pengerasan (*hardening process*) karena grouting memiliki sifat yang getas (*brittle*) dan kuat tarik yang rendah sehingga jumlah retak balok BGR lebih banyak dibandingkan balok BK.



Gambar 52. *Micro-crack* Pada Sambungan

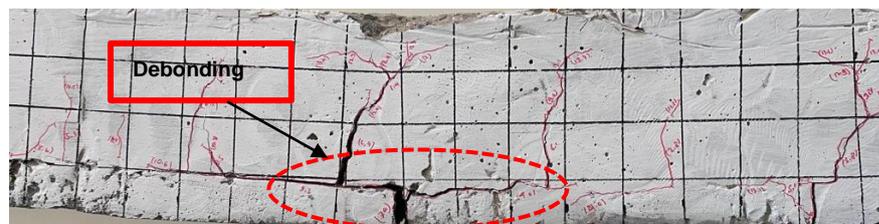
Pada saat beban puncak, beton pada sisi tekan hancur. Dari sisi perkembangan retak, hampir seluruh retak berawal dari *micro-crack* yang terjadi pada sambungan. Sesaat setelah beban puncak, dilakukan pengukuran lebar retak pada daerah yang mengalami retak maksimum seperti yang ditunjukkan pada Gambar 53 lebar retak sebesar 10 mm.



Gambar 53. Pengukuran Lebar Retak Balok BGR

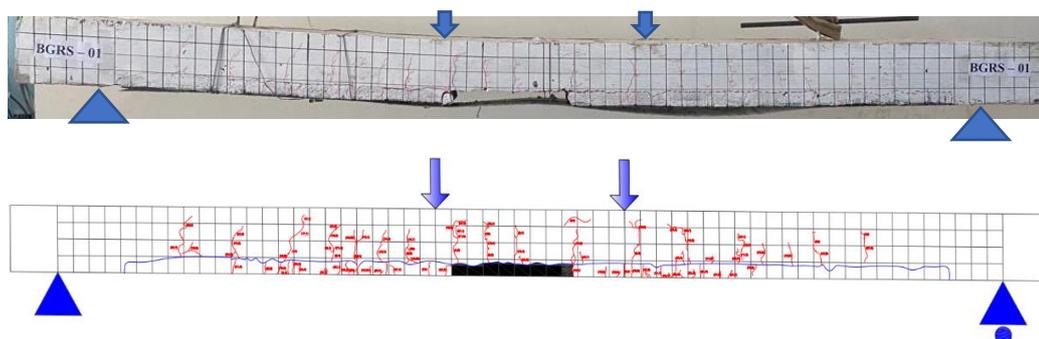
Dari mode kegagalan sambungan, balok mengalami kegagalan *debonding* yaitu hilangnya lekatan antara beton normal dan mortar

grouting yang terlihat dari terputusnya retak-retak pada sambungan seperti pada Gambar 54.



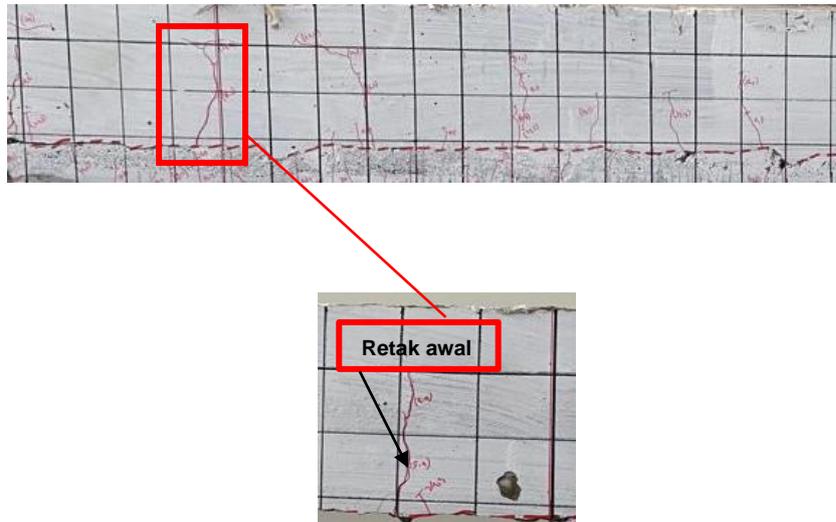
Gambar 54. *Debonding* Antara Beton Normal Dan Mortar Grouting

E.3. Pola Retak dan Mode Kegagalan Balok BGRF-S



Gambar 55. Pola Retak Pada Balok Grouting Dan GFRP Sheet (BGRF-S)

Gambar 56 menunjukkan retak awal balok BGRF-S yang terjadi pada beban 5,4 kN di daerah 1/3 tengah bentang tepat dibawah beban. Retak yang terjadi merupakan retak lentur yang ditandai dengan retakan yang terjadi pada sisi bawah menjalar ke atas dan membentuk retakan tegak lurus sumbu balok.



Gambar 56. Retak Awal Pada Balok BGRF-S

Dari sisi perkembangan retak, hampir seluruh retak berawal dari *micro-crack* yang terjadi pada sambungan. Sesaat setelah beban puncak, dilakukan pengukuran lebar retak pada daerah yang mengalami retak maksimum yaitu sebesar 1,20 mm seperti yang ditunjukkan pada Gambar 57.



Gambar 57. Pengukuran Lebar Retak Balok BGRF-S

Pada balok BGRF, ditemukan *micro-crack* pada sambungan beton normal dan mortar grouting seperti yang ditunjukkan pada Gambar 58. Retak tersebut terjadi pada saat proses pengerasan (*hardening process*)

karena grouting memiliki sifat yang getas (*brittle*) dan kuat tarik yang rendah.



Gambar 58. *Micro-Crack* Pada Sambungan

Pada saat beban ditingkatkan, terjadi kegagalan sambungan akibat adanya delaminasi beton normal dan mortar grouting seperti pada Gambar 59. Delaminasi ini terjadi pada tengah bentang yang merupakan daerah momen maksimum. Akibat delaminasi tersebut, retak yang terjadi pada mortar grouting tidak dapat diteruskan ke beton normal.



Gambar 59. Delaminasi Antara Beton Normal Dan Mortar Grouting

Dari mode kegagalan GFRP, akibat delaminasi yang terjadi antara beton normal dan mortar grouting balok mengalami kegagalan *debonding* yaitu lepasnya ikatan antara beton dengan GFRP seperti pada Gambar 60.



Gambar 60. *Debonding* Antara Beton Grouting Dan GFRP

BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan uraian hasil analisis data dan pembahasan, maka dapat dibuat beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Penggunaan mortar grouting dan GFRP *sheet* sebagai material perbaikan dan perkuatan mampu meningkatkan beban maksimum balok beton bertulang sebesar 2,76%, sedangkan balok dengan perbaikan grouting mengalami penurunan 47,62% terhadap balok kontrol. Selain itu, balok BGR memiliki perilaku yang lebih daktail dibandingkan balok BK dan balok BGRF-S.
2. Pola retak pada balok BGR dan BGRF-S memperlihatkan kemiripan yaitu retakan yang terjadi pada daerah sambungan. Sementara untuk mode kegagalan, pada balok BGR balok mengalami kegagalan *debonding* pada lekatan mortar grouting dan beton *eksisting*, sedangkan pada balok BGRF-S balok mengalami delaminasi antara mortar grouting dan beton *eksisting* dan terjadi kegagalan *debonding* pada lekatan GFRP.

B. Saran

Berdasarkan hasil eksperimental yang telah dilakukan, maka dapat disarankan beberapa hal sebagai berikut:

1. Perlu diperhatikan proses pengecoran material perbaikan grouting dan kebersihan pada permukaan beton sebelum dioleskan *bonding agent* agar tidak terjadi penumpukan pada bagian bawah yang dapat mempengaruhi kelekatan sambungan.
2. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai perilaku lentur balok beton bertulang yang diberi perkuatan mortar grouting dan GFRP *sheet*.

DAFTAR PUSTAKA

- ACI Committee 544. 2014. Fiber Reinforced Concrete. Farmington Hills, Mich: American Concrete Institute.
- ACI. Committee 440.2R-08, 2008. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. American Concrete Institute. U.S.A.
- Alami, Fikri. 2010. Perkuatan Lentur Balok Beton Bertulang dengan Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP-S). Seminar dan Pameran HAKI.
- Annisa, Andi Safirah. 2021. Failure Pattern Analysis Of Reinforced Concrete Beams Strengthened With Mortar Grouting And Pva Fiber. Departemen Teknik Sipil, Universitas Hasanuddin.
- Asroni Ali. 2010. Balok dan Pelat Beton Bertulang. Graha Ilmu. Yogyakarta.
- Asrullah. 2018. Kuat Tekan Beton dengan Menggunakan Sika Concrete Refair Mortar Sebagai Pengganti Semen Pada Campuran Beton K-300. Jurnal Teknik Sipil UNPAL Vol 8, No.2.
- Badan Standard Nasional Indonesia. 2002. SNI-03-2847-2002 Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung. Jakarta : Badan Standarisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. 2002. SNI 03-6825-2002 Metode Pengujian Kekuatan Tekan Mortar Semen Portland Untuk Pekerjaan Sipil. Jakarta : Badan Standarisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. 2011. SNI 4431:2011 Cara Uji Kuat Lentur Beton Normal Dengan Dua Titik Pembebanan. Jakarta : Badan Standarisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. 2014. SNI 2491:2014 Metode Uji Kekuatan Tarik Belah Spesimen Beton Silinder. Jakarta : Badan Standarisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. 2017. SNI 2052:2017 Baja Tulangan Beton. Jakarta : Badan Standarisasi Nasional.
- Djamaluddin, R. and Hino, S. 2011. Kapasitas Lentur Perkuatan Balok Beton Bertulang yang Telah Meleleh dengan Menggunakan Lembaran GFRP. *Dinamika Teknik Sipil* 11(3): 293 - 300.
- Djamaluddin, R., Akkas, M. and Hasanuddin, H. A. 2011. Debonding Behavior of GFRP Sheet Reinforced Concrete. *EACEF 2013* : SC-136.

- Hariati, and Astutik, Yayuk Setyaning. 2020. Studi Komparatif Kerusakan Beton Pada Struktur Kolom Yang Keropos Dengan Metode Grouting. Teknik Sipil Universitas Internasional Batam.
- Husain, Muh. Hushardi. 2018. Penelitian Tentang Pengaruh Perkuatan Geser GFRP Sheet Terhadap Perilaku Pola Kegagalan. Departemen Teknik Sipil, Universitas Hasanuddin.
- McCormac, Jack C.2001. Desain Beton Bertulang Edisi Kelima Jilid 1 dan 2. Jakarta: Erlangga.
- Nawy, Edward G. 1990. Beton Bertulang – Suatu Pendekatan Dasar. Jakarta : Penerbit Erlangga.
- Nawy, Edward G. 1998. Reinforced Concrete: A Fundamental Approach (Bambang Suryatmojo, Trans.). Bandung:Refika Aditama. (Karya asli diterbitkan 1985).
- Nawy, Edward G. 2003. Reinforced Concrete: A Fundamental Approach (Fifth Edition), Prentice-Hall International. Jakarta : Penerbit Erlangga.
- Rusandy, R. 2016. Perilaku Lentur Balok Beton Bertulang dengan Perkuatan Geser GFRP. Universitas Hasanuddin.
- Sulardi. 2018. Metode Perbaikan Spalling dan Delaminating Beton Pondasi Pompa dengan Metode Grouting Flowable Microconcrete. Media Ilmiah Teknik Sipil, Vol.6, 72-78.

LAMPIRAN

Perhitungan Kapasitas Momen – Balok Kontrol (BK)

1. Data Perencanaan

Kuat tekan beton	f'_c	=	20.0	MPa
Kuat leleh tulangan tarik	f_y	=	280	MPa
Kuat leleh tulangan tekan	f_y	=	280.0	MPa
Kuat leleh tulangan transversal	f_y	=	280	MPa
Modulus elastisitas beton	E_c	=	21533.0	MPa
Modulus elastisitas baja	E_s	=	200000	MPa
Berat jenis beton	γ_c	=	2400	kg/m ³
Lebar penampang	b	=	150	mm
Tinggi penampang	h	=	200	mm
Tinggi efektif penampang	d	=	155.50	mm
Jarak tulangan tekan ke serat tekan terluar	d'	=	42.00	mm
Luas tulangan tarik	A_s	=	3 D 13	= 398.20 mm ²
Luas tulangan tekan	A_s'	=	2 D 8	= 100.53 mm ²
Luas tulangan sengkang	A_{vs}	=	2 D 8	= 100.53mm ²

2. Momen Retak Pertama (M_{cr})

Pada kondisi retak pertama, momen retak (M_{crack}) terjadi pada saat serat tarik penampang balok mencapai modulus keruntuhan (F_r). Oleh SNI 2847.2013 pasal 9.5.2.3 diberikan persamaan sebagai berikut

$$M_{crack} = \frac{I_g \cdot f_r}{y_t}$$

Diketahui:

Hasil uji modulus keruntuhan $f_r = 0.7 \times F_c^{0.5} = 3.21$ MPa

Momen inersia penampang bruto :

$$I_g = \frac{b \cdot h^3}{12}$$

$$= 112435956.7 \text{ mm}^4$$

$$y_{\text{bawah}} = h - y_{\text{atas}} = 96.05 \text{ mm}$$

$$M_{\text{crack}} = \frac{I_g \cdot f_r}{y_t}$$

$$= \frac{112435956.7 \cdot 3.21}{96.05}$$

$$= 3754168.576 \text{ N.mm}$$

$$\boxed{M_{\text{crack}} = 3.7542 \text{ kN.m}}$$

Nilai P_{crack} diperoleh dengan cara substitusi M_{crack} ke persamaan :

$$M = 0.8019 + 0.6 P$$

$$3.7542 = 0.8019 + 0.6P$$

Diperoleh

$$\boxed{P_{\text{cr}} = 4.9204 \text{ kN}}$$

3. Momen Leleh (M_{yield})

Direncanakan menggunakan tulangan :

$$A_s = 3 \quad D \quad 13 = 398.20 \text{ mm}^2$$

$$A_s' = 2 \quad D \quad 8 = 100.53 \text{ mm}^2$$

Awal tulangan leleh

$$= \frac{E_s}{E_c} = 9.3 \quad ; \quad n_f = \frac{E_f}{E_c} = 0.97$$

$$k = 0.44065$$

$$kd = 68.521 \text{ mm}$$

Regangan tulangan tarik dari ujung atas balok

$$\varepsilon_y = \frac{f_y}{E_s} = \frac{280}{200000}$$

$$\varepsilon_y = 0.0014$$

Regangan beton bagian atas

$$\begin{aligned} \varepsilon_c &= \varepsilon_s \frac{k d}{d - k d} \\ &= 0.0014 \cdot \frac{68.52}{155.50 - 68.52} \end{aligned}$$

$$\varepsilon_c = 0.001103$$

Regangan tulangan tekan

$$\begin{aligned} \varepsilon_s' &= \varepsilon_c \frac{k d - d'}{k d} \\ &= 0.0011 \cdot \frac{68.521 - 42.00}{68.52} \end{aligned}$$

$$\varepsilon_s' = 0.000427$$

$$\begin{aligned} f_s' &= E_s \varepsilon_s' \\ &= 200000 \cdot 0.000427 \\ &= 85.376 \text{ MPa} \end{aligned}$$

... bila nilai f_s' lebih kecil dari nol gunakan nol

$$f_s' = 85.376 \text{ MPa}$$

Gaya tekan beton

$$\begin{aligned} C_c &= 0.5 f_c' b k d \\ &= 0.5 \cdot 20 \cdot 150.00 \cdot 68.52 \end{aligned}$$

$$C_c = 107869.30 \text{ N}$$

Gaya tekan baja

$$\begin{aligned} C_s &= A_s' f_s' \\ &= 100.53 \cdot 85.376 \end{aligned}$$

$$C_s = 8582.92 \text{ N}$$

$$\begin{aligned} T &= C_c + C_s \\ &= 107869.30 + 8582.92 \end{aligned}$$

$$T = 116452.22 \text{ N}$$

$$T = A_s f_y$$

$$= 111495.12 \text{ N}$$

Nilai selisih T harus mendekati nol

$$C_c + C_s - A_s f_y = 0$$

$$116452.22 - 111495.12 = -4957.09718$$

$$= -4957.1$$

$$\boxed{k = 0.44065}$$

Jarak gaya (c) dari ujung atas (y)

$$y = \frac{C_s d' + C_c \cdot 0.33 k d}{T}$$

$$= \frac{8582.92 + 42.00 + 107869.30 \cdot 22.84}{116452.22}$$

$$y = 24.252 \text{ mm}$$

Jarak pusat total gaya tekan ke pusat tulangan tarik

$$J_d = d - y$$

$$= 155.50 - 24.252$$

$$\boxed{J_d = 131.25 \text{ mm}}$$

Persamaan momen dan kurvatur

$$M_y = A_s f_y J_d$$

$$= 14633457.53 \text{ N.mm}$$

$$\boxed{M_y = 14.63 \text{ kN.m}}$$

$$\boxed{14.63 = 0.8019 + 0.6 P \text{ kN.m}}$$

$$M_y = M_{\text{maks pada tengah bentang}}$$

$$14.63 = 0.8019 + 0.6 P$$

$$13.83 = 0.6 P$$

$$\boxed{P = 23.05 \text{ kN}}$$

4. Momen Ultimit (Mu)

$$M_u = \Phi M_n$$

$$M_u = \Phi * A_s * f_y * \left(d - \frac{a}{2} \right) \text{ faktor reduksi untuk lentur } \Phi = 0.9$$

dimana :

$$\text{Untuk } f'_c \leq 20 \text{ MPa}$$

$$\beta_1 = 0.85$$

$$\text{Untuk } f'_c > 20 \text{ MPa}$$

$$\beta_1 = 0.85 - \frac{0.05 (f'_c - 20)}{7}$$

$$\text{Karena } f'_c = 20 \text{ MPa}$$

$$\text{Maka } \beta_1 = 0.85$$

$$a_b = \frac{600 \beta_1 d}{600 + f_y} = \frac{600 \cdot 0.85 \cdot 155.50}{600 + 280.00}$$

$$a_b = 90.119 \text{ mm}$$

$$\rho_b = \frac{A_{Sb}}{b d}$$

$$= \frac{0.85 f'_c a_b}{f_y d} = \frac{0.85 \cdot 20 \cdot 90.119}{280 \cdot 155.5}$$

$$\rho_b = 3.69\%$$

$$\rho_{\max} = 0.75 \rho_b = 0.0277$$

$$\rho_{\max} = 2.77\%$$

$$\rho_{\min} = \frac{1.4}{f_y} = 0.005$$

$$\rho_{\min} = 0.50\%$$

$$\rho = \frac{(A_s - A_s')}{b d} = \frac{(398.2 - 100.53)}{280 \cdot 155.5}$$

$$\rho = 1.28\%$$

Kontrol Tulangan Tekan Sudah Leleh atau Belum

$$a = \frac{(A_s - A_s') f_y}{0.85 f'_c b}$$

$$= \frac{(398.197 - 100.53096) \cdot 280}{0.85 \cdot 20.99 \cdot 150}$$

$$a = 31.143 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned}
 a_{\text{min leleh}} &= \frac{600 \beta_1 d'}{600 - f_y} \\
 &= \frac{600 \cdot 0.85 \cdot 42}{600 - 280}
 \end{aligned}$$

$a_{\text{min leleh}} = 66.938 \text{ mm}$

$$M_n = M_{nc} + M_{ns}$$

$M_n = 15006733.09 \text{ N.mm}$

 atau

$M_n = 1.50067 \text{ t.m}$

$$\emptyset M_n = 12005386.47 \text{ N.mm}$$
 atau $\emptyset M_n = 1.20054 \text{ t.m}$

$$\begin{aligned}
 \emptyset M_n &= M_{\text{maks}} \\
 1.2005 &= 0.0802 + 0.6 P \\
 1.1203 &= 0.6 P
 \end{aligned}$$

$P_{\text{maks}} = 1.86725 \text{ ton}$

Untuk beban 0.5 P maka :

$0.5 P_{\text{maks}} = 0.93362 \text{ ton}$

$$\begin{aligned}
 M_n &= M_{\text{maks}} \\
 1.5007 &= 0.0802 + 0.6 P \\
 1.4205 &= 0.6 P
 \end{aligned}$$

$P_{\text{maks}} = 2.36747 \text{ ton}$

Untuk beban 0.5 P maka :

$0.5 P_{\text{maks}} = 1.18374 \text{ ton}$

$P_u = 23.67 \text{ kN}$

Perhitungan Kapasitas Momen – Balok Grouting (BGR)

1. Data Perencanaan

Kuat tekan beton	f'_c	=	20.0	MPa
Kuat leleh tulangan tarik	f_y	=	280	MPa
Kuat leleh tulangan tekan	f_y	=	280.0	MPa
Kuat leleh tulangan transversal	f_y	=	280	MPa
Modulus elastisitas beton	E_c	=	21532.98	MPa
Modulus elastisitas baja	E_s	=	200000	MPa
Berat jenis beton	γ_c	=	2400	kg/m ³
Lebar penampang	b	=	150	mm
Tinggi penampang	h	=	200	mm
Tinggi efektif penampang	d	=	158.00	mm
Jarak tulangan tekan ke serat tekan terluar	d'	=	42.00	mm
Luas tulangan tarik	A_s	=	3 \emptyset 8	= 150.8 mm ²
Luas tulangan tekan	A_s'	=	2 D 8	= 100.53 mm ²
Luas tulangan sengkang	A_{vs}	=	2 D 8	= 100.54mm ²

2. Momen Retak Pertama (M_{cr})

Pada kondisi retak pertama, momen retak (M_{crack}) terjadi pada saat serat tarik penampang balok mencapai modulus keruntuhan (F_r). Oleh SNI 2847.2013 pasal 9.5.2.3 diberikan persamaan sebagai berikut

$$M_{crack} = \frac{I_g \cdot f_r}{y_t}$$

Diketahui:

Hasil uji modulus keruntuhan $f_r = 0.7 \times F_c^{0.5} = 3.21$ MPa

Momen inersia penampang bruto :

$$I_g = \frac{b \cdot h^3}{12}$$

$$= 106989086.3 \text{ mm}^4$$

$$y_{\text{bawah}} = h - y_{\text{atas}} = 99.25 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} M_{\text{crack}} &= \frac{I_g f_r}{y_t} \\ &= \frac{106989086.3 \cdot 3.21}{99.25} \\ &= 3457219.615 \text{ N.mm} \end{aligned}$$

$$\boxed{M_{\text{crack}} = 3.4572 \text{ kN.m}}$$

Nilai P_{crack} diperoleh dengan cara substitusi M_{crack} ke persamaan :

$$M = 0.8019 + 0.6 P$$

$$3.4572 = 0.8019 + 0.6P$$

Diperoleh

$$\boxed{P_{\text{cr}} = 4.4255 \text{ kN}}$$

3. Momen Leleh (M_{yield})

Direncanakan menggunakan tulangan :

$$\begin{aligned} A_s &= 3 \quad \emptyset \quad 8 &= 150.8 \text{ mm}^2 \\ A_s' &= 2 \quad D \quad 8 &= 100.53 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Awal tulangan leleh

$$= \frac{E_s}{E_c} = 9.3 \quad ; \quad n_f = \frac{E_f}{E_c} = 0.97$$

$$k = 0.44065$$

$$kd = 69.623 \text{ mm}$$

Regangan tulangan tarik dari ujung atas balok

$$\varepsilon_y = \frac{f_y}{E_s} = \frac{280}{200000}$$

$$\boxed{\varepsilon_y = 0.0014}$$

Regangan beton bagian atas

$$\begin{aligned}\epsilon_c &= \epsilon_s \frac{k d}{d - k d} \\ &= 0.0014 \cdot \frac{69.62}{158.00 - 69.62}\end{aligned}$$

$\epsilon_c = 0.001103$

Regangan tulangan tekan

$$\begin{aligned}\epsilon_s' &= \epsilon_c \frac{k d - d'}{k d} \\ &= 0.0011 \cdot \frac{69.623 - 42.00}{69.62}\end{aligned}$$

$\epsilon_s' = 0.000438$

$$\begin{aligned}f_s' &= E_s \epsilon_s' \\ &= 200000 \cdot 0.0004 \\ &= 87.515 \text{ MPa}\end{aligned}$$

... bila nilai f_s' lebih kecil dari nol gunakan nol

$f_s' = 87.515 \text{ MPa}$

Gaya tekan beton

$$\begin{aligned}C_c &= 0.5 f_c' b k d \\ &= 0.5 \cdot 20 \cdot 150.00 \cdot 69.62\end{aligned}$$

$C_c = 109603.54 \text{ N}$

Gaya tekan baja

$$\begin{aligned}C_s &= A_s' f_s' \\ &= 100.53 \cdot 87.515\end{aligned}$$

$C_s = 8797.99 \text{ N}$

$$\begin{aligned}T &= C_c + C_s \\ &= 109603.54 + 8797.99\end{aligned}$$

$T = 118401.52 \text{ N}$

$$\begin{aligned}T &= A_s f_y \\ &= 42223.01 \text{ N}\end{aligned}$$

Nilai selisih T harus mendekati nol

$$\begin{aligned}C_c + C_s - A_s f_y &= 0 \\ 118401.52 - 42223.01 &= -76178.5165\end{aligned}$$

$$k = 0.44065 = -766178.52$$

Jarak gaya (c) dari ujung atas (y)

$$y = \frac{C_s d' + C_c \cdot 0.33 k d}{T}$$

$$= \frac{8797.99 \cdot 42.00 + 109603.54 \cdot 23.21}{118401.52}$$

$$y = 24.604 \text{ mm}$$

Jarak pusat total gaya tekan ke pusat tulangan tarik

$$J_d = d - y$$

$$= 158.00 - 24.604$$

$$J_d = 133.40 \text{ mm}$$

Persamaan momen dan kurvatur

$$M_y = A_s f_y J_d$$

$$= 5632381.53 \text{ N.mm}$$

$$M_y = 5.63 \text{ kN.m}$$

$$14.63 = 0.8019 + 0.6 P \text{ kN.m}$$

$$M_y = M_{\text{maks pada tengah bentang}}$$

$$5.63 = 0.8019 + 0.6 P$$

$$4.83 = 0.6 P$$

$$P = 8.05 \text{ kN}$$

4. Momen Ultimit (Mu)

$$M_u = \Phi M_n$$

$$M_u = \Phi \cdot A_s \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right) \text{ faktor reduksi untuk lentur } \Phi = 0.9$$

dimana :

$$\text{Untuk } f'_c \leq 20 \text{ MPa}$$

$$\beta_1 = 0.85$$

$$\text{Untuk } f'_c > 20 \text{ MPa}$$

$$\beta_1 = 0.85 - \frac{0.05 (f'_c - 20)}{100}$$

7

Karena $f'_c = 20$ MPa

Maka $\beta_1 = 0.85$

$$a_b = \frac{600 \beta_1 d}{600 + f_y} = \frac{600 \cdot 0.85 \cdot 158.00}{600 + 280.00}$$

$$a_b = 91.568 \text{ mm}$$

$$\rho_b = \frac{A_{s_b}}{b d} = \frac{0.85 f'_c a_b}{f_y d} = \frac{0.85 \cdot 20 \cdot 91.568}{280 \cdot 158}$$

$$\rho_b = 3.69\%$$

$$\rho_{\max} = 0.75 \rho_b = 0.0277$$

$$\rho_{\max} = 2.77\%$$

$$\rho_{\min} = \frac{1.4}{f_y} = 0.005$$

$$\rho_{\min} = 0.50\%$$

$$\rho = \frac{(A_s - A_s')}{b d} = \frac{(150.8 - 100.53)}{280 \cdot 158}$$

$$\rho = 0.21\%$$

Kontrol Tulangan Tekan Sudah Leleh atau Belum

$$a = \frac{(A_s - A_s') f_y}{0.85 f'_c b} = \frac{(150.796 - 100.53096) \cdot 280}{0.85 \cdot 20 \cdot 150} \quad a = 5.259 \text{ mm}$$

$$a_{\min \text{ leleh}} = \frac{600 \beta_1 d'}{600 - f_y} = \frac{600 \cdot 0.85 \cdot 42}{600 - 280} \quad a_{\min \text{ leleh}} = 66.938 \text{ mm}$$

$$M_n = M_{nc} + M_{ns}$$

$$M_n = 9800917.405 \text{ N.mm}$$

$$\text{atau } M_n = 0.98009 \text{ t.m}$$

$$\emptyset M_n = 7840733.924 \text{ N.mm}$$

$$\text{atau } \emptyset M_n = 0.78407 \text{ t.m}$$

$$\begin{aligned} \emptyset M_n &= M_{\text{maks}} \\ 0.7841 &= 0.0802 + 0.6 P \\ 0.7039 &= 0.6 P \end{aligned}$$

$$P_{\text{maks}} = 1.49984 \text{ ton}$$

Untuk beban 0.5 P maka :

$$0.5 P_{\text{maks}} = 0.58657 \text{ ton}$$

$$\begin{aligned} M_n &= M_{\text{maks}} \\ 0.9801 &= 0.0802 + 0.6 P \\ 0.8999 &= 0.6 P \end{aligned}$$

$$P_{\text{maks}} = 1.49984 \text{ ton}$$

Untuk beban 0.5 P maka :

$$0.5 P_{\text{maks}} = 0.74992 \text{ ton}$$

$$P_u = 15 \text{ kN}$$

Perhitungan Kapasitas Momen – Balok Grouting GFRP (BGRFS)

1. Data Perencanaan

Kuat tekan beton	f'_c	=	20.0	MPa
Kuat leleh tulangan tarik	f_y	=	280	MPa
Kuat leleh tulangan tekan	f_y	=	280.0	MPa
Kuat leleh tulangan transversal	f_y	=	280	MPa
Modulus elastisitas beton	E_c	=	21532.98	MPa
Modulus elastisitas baja	E_s	=	200000	MPa
Berat jenis beton	γ_c	=	2400	kg/m ³
Lebar penampang	b	=	150	mm
Tinggi penampang	h	=	200	mm
Tinggi efektif penampang	d	=	158.00	mm
Jarak tulangan tekan ke serat tekan terluar	d'	=	42.00	mm
Luas tulangan tarik	A_s	=	3 \emptyset 8	= 150.8 mm ²
Luas tulangan tekan	A_s'	=	2 D 8	= 100.53 mm ²
Luas tulangan sengkang	A_{vs}	=	2 D 8	= 100.55mm ²

2. Momen Retak Pertama (M_{cr})

Pada kondisi retak pertama, momen retak (M_{crack}) terjadi pada saat serat tarik penampang balok mencapai modulus keruntuhan (F_r). Oleh SNI 2847.2013 pasal 9.5.2.3 diberikan persamaan sebagai berikut

$$M_{crack} = \frac{I_g \cdot f_r}{y_t}$$

Diketahui:

Hasil uji modulus keruntuhan $f_r = 0.7 \times F_c^{0.5} = 3.21$ MPa

Momen inersia penampang bruto :

$$I_g = \frac{b \cdot h^3}{12}$$

$$= 114268833.1 \text{ mm}^4$$

$$y_{\text{bawah}} = h - y_{\text{atas}} = 98.29 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} M_{\text{crack}} &= \frac{I_g f_r}{y_t} \\ &= \frac{114268833.1 \cdot 3.21}{99.25} \\ &= 3728524.315 \text{ N.mm} \end{aligned}$$

$$\boxed{M_{\text{crack}} = 3.7285 \text{ kN.m}}$$

Nilai P_{crack} diperoleh dengan cara substitusi M_{crack} ke persamaan :

$$M = 0.8019 + 0.6 P$$

$$3.7285 = 0.8019 + 0.6P$$

Diperoleh

$$\boxed{P_{\text{cr}} = 4.877 \text{ kN}}$$

3. Momen Leleh (M_{yield})

Direncanakan menggunakan tulangan :

$$\begin{aligned} A_s &= 3 \quad \emptyset \quad 8 = 150.8 \text{ mm}^2 \\ A_s' &= 2 \quad D \quad 8 = 100.53 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Awal tulangan leleh

$$= \frac{E_s}{E_c} = 9.3 ; n_f = \frac{E_f}{E_c} = 0.97$$

$$k = 0.4016$$

$$kd = 81.364 \text{ mm}$$

Regangan tulangan tarik dari ujung atas balok

$$\epsilon_y = \frac{f_y}{E_s} = \frac{280}{200000} \quad \boxed{\epsilon_y = 0.0014}$$

Regangan beton bagian atas

$$\begin{aligned}\epsilon_c &= \epsilon_s \frac{k d}{d - k d} \\ &= 0.0014 \cdot \frac{81.36}{158.00 - 81.36}\end{aligned}$$

$\epsilon_c = 0.001537$

Regangan tulangan tekan

$$\begin{aligned}\epsilon_s' &= \epsilon_c \frac{k d - d'}{k d} \\ &= 0.0015 \cdot \frac{81.364 - 42.00}{81.36}\end{aligned}$$

$\epsilon_s' = 0.002265$

$$\begin{aligned}f_s' &= E_s \epsilon_s' \\ &= 200000 \cdot 0.0007 \\ &= 148.67 \text{ MPa}\end{aligned}$$

... bila nilai f_s' lebih kecil dari nol gunakan nol

$f_s' = 148.67 \text{ MPa}$

Gaya tekan beton

$$\begin{aligned}C_c &= 0.5 f_c' b k d \\ &= 0.5 \cdot 20 \cdot 150.00 \cdot 81.36\end{aligned}$$

$C_c = 128087.53 \text{ N}$

Gaya tekan baja

$$\begin{aligned}C_s &= A_s' f_s' \\ &= 100.53 \cdot 148.67\end{aligned}$$

$C_s = 14946.20 \text{ N}$

$$\begin{aligned}T &= C_c + C_s \\ &= 128087.53 + 8797.99\end{aligned}$$

$T = 143033.72 \text{ N}$

$$\begin{aligned}T &= A_s f_y \\ &= 120725.72 \text{ N}\end{aligned}$$

Nilai selisih T harus mendekati nol

$$\begin{aligned}C_c + C_s - A_s f_y &= 0 \\ 143033.72 - 120725.72 &= -22308.006\end{aligned}$$

$$k = 0.4016 = -22308.01$$

Jarak gaya (c) dari ujung atas (y)

$$y = \frac{C_s d' + C_c \cdot 0.33 k d}{T}$$

$$= \frac{14946.20 + 42.00 + 128087.53 \cdot 27.12}{143033.72}$$

$$y = 28.676 \text{ mm}$$

Jarak pusat total gaya tekan ke pusat tulangan tarik

$$J_d = d - y$$

$$= 158.00 - 28.676$$

$$J_d = 120.82 \text{ mm}$$

Persamaan momen dan kurvatur

$$M_y = A_s f_y J_d$$

$$= 5632381.53 \text{ N.mm}$$

$$M_y = 15.31 \text{ kN.m}$$

$$15.31 = 0.8019 + 0.6 P \text{ kN.m}$$

$$M_y = M_{\text{maks pada tengah bentang}}$$

$$15.31 = 0.8019 + 0.6 P$$

$$14.51 = 0.6 P$$

$$P = 24.18 \text{ kN}$$

4. Momen Ultimit (Mu)

$$M_u = \Phi M_n$$

$$M_u = \Phi * A_s * f_y * \left(d - \frac{a}{2} \right) \text{ faktor reduksi untuk lentur } \Phi = 0.9$$

dimana :

Material yang digunakan : **GFRP**

Lokasi balok berada di **Interior**
sehingga digunakan

$$C_E = 0.75$$

$$\begin{aligned}
 f_{fu} &= C_E \cdot f_{fu}^* \\
 &= 0.75 \cdot 460 \\
 &= 345 \text{ N/mm}^2 \\
 \varepsilon_{fu} &= C_E \cdot \varepsilon_{fu}^* \\
 &= 0.75 \cdot 0.02 \\
 &= 0.015 \text{ mm/mm}
 \end{aligned}$$

Perhitungan pre-eliminatory

$$\begin{aligned}
 \beta_1 &= 1.05 - 0.05 \frac{f'_c}{6.9} \\
 &= 1.05 - 0.05 \cdot \frac{20.99}{6.9} \quad \boxed{\beta_1 = 0.8979}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_s &= 3 \cdot D \cdot \frac{1}{4} \pi \cdot 13^2 \\
 &= 3 \cdot \frac{1}{4} \pi \cdot 13^2 \quad \boxed{A_s = 398.1969 \text{ mm}^2}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_s' &= 2 \cdot D \cdot \frac{1}{4} \pi \cdot 8^2 \\
 &= 2 \cdot \frac{1}{4} \pi \cdot 8^2 \quad \boxed{A_s' = 100.531 \text{ mm}^2}
 \end{aligned}$$

digunakan 1 lembar GFRP tebal 1.3 mm

$$\begin{aligned}
 A_f &= n \cdot t_f \cdot w_f \\
 &= 1 \cdot 1.3 \cdot 150 \quad \boxed{A_f = 195 \text{ mm}^2}
 \end{aligned}$$

Nilai regangan balok sebelum balok ditempel FRP

Beban yang bekerja pada saat FRP ditempel hanya berat sendiri balok

$$\text{Nekivalen tulangan ke beton} = 9.2881$$

Untuk memperkirakan nilai c dapat digunakan

$$\begin{aligned}
 0 &= \frac{w_f \cdot c^2}{2} + [n \cdot A_s + (n - 1)] \cdot c - \\
 &\quad - (n - 1) \cdot A_s' \cdot d' \\
 0 &= \frac{150}{2} \cdot c^2 + 3706.8 \cdot c - 575114 - 349 \\
 0 &= 75 \cdot c^2 + 3706.8 \cdot c - 610109 \\
 \text{maka } c &= \mathbf{68.80536 \text{ mm}}
 \end{aligned}$$

berdasarkan hasil analisa awal leleh maka :

$$k = 0.44065 \quad (\text{saat kondisi awal tulangan leleh setelah retak})$$

$c = k d$ $= 68.52108 \text{ mm}$

Menentukan nilai regangan desain untuk FRP

$$\begin{aligned} \epsilon_{fd} &= 0.41 && \left(\frac{f'_c}{n E_f t_f} \right)^{0.5} \leq 0.9 \epsilon_{fu} \\ &= 0.41 && \left(\frac{20.99}{1 \cdot 20900 \cdot 1.3} \right)^{0.5} \\ &= 0.011396 && \leq 0.9 \cdot 0.02 \\ &0.011396 && < 0.018 \end{aligned}$$

... debonding akan terjadi sebelum FRP putus

gunakan

$\epsilon_{fd} = 0.011396$

Perkiraan nilai c (akan dicek kembali nantinya)

nilai c perkiraan sekitar

$$c = 0.2 d$$

(nilai c selanjutnya akan dicek kembali apakah sesuai atau tidak)

$$c = 0.2 d$$

$$= 0.2 \cdot 155.5$$

$$= 31.1 \text{ mm}$$

coba nilai

$$c = 60.823 \text{ mm}$$

Menghitung tegangan yang terjadi pada tulangan dan FRP

$$\begin{aligned} f_s &= E_s \epsilon_s \leq f_y \\ &= 200000 \cdot 0.00467 \\ &= 933.9557102 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

$$f_s = 933.9557 > 280$$

$$f'_s = 185.6839882 < 280$$

gunakan

$$f_s = 280 \text{ N/mm}^2$$

$$f'_s = 185.6839882 \text{ N/mm}^2$$

$$\begin{aligned}
 f_{fe} &= E_f \cdot \epsilon_{fe} \\
 &= 20900 \cdot 0.006863 \\
 &= 143.4342048 \text{ N/mm}^2
 \end{aligned}$$

Mengecek kesesuaian nilai c

$$\begin{aligned}
 \epsilon'_c &= \frac{1.7}{E_c} f'_c \\
 &= \frac{1.7}{21532.97704} \cdot 20.99 \\
 &= 0.001657
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \beta_1 &= \frac{4 \epsilon'_c - \epsilon_c}{6 \epsilon'_c - 2 \epsilon_c} \\
 &= \frac{4 \cdot 0.001657 - 0.003}{6 \cdot 0.001657 - 2 \cdot 0.003} \\
 &= 0.920294
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \alpha_1 &= \frac{3 \epsilon'_c \epsilon_c - \epsilon_c^2}{3 \beta_1 \epsilon'_c^2} \\
 &= 0.780069
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 c &= \frac{A_s f_s + A_f f_{fe} - A_s' f_s'}{\alpha_1 f'_c \beta_1 w_f} \\
 &= 53.44358 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Kontribusi tulangan terhadap kuat lentur

$$\begin{aligned}
 M_{ns} &= A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \\
 &= 14217013.2 \text{ N.mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_{ns}' &= A_s' (d - d') \\
 &= 101 \cdot 185.68 \cdot (156 - 42) \\
 \boxed{M_{ns}'} &= 2118703.42 \text{ N.mm} = \frac{0.211}{9} \text{ t.m}
 \end{aligned}$$

Kontribusi FRP terhadap kuat lentur

$$M_{nf} = A_f f_{fe} \left(d_f - \frac{\beta_1 c}{2} \right)$$

$$\boxed{M_{nf} = 4811130.67 \text{ N.mm}} = 0.4811 \text{ t.m}$$

Kuat lentur nominal gabungan

$$\begin{aligned} \phi M_n &= [M_{ns} + M_{ns}' + \psi_f M_{nf}] \\ &= 1 [1.4217 + 0.2119 + 1 \cdot 0.481131] \\ &= 2.11 \text{ t.m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_n &= \\ 2.11468 &= 0.0802 + 0.6 P \\ 2.03449 &= 0.6 P \end{aligned}$$

$$\boxed{P_u = 33.91 \text{ kN}}$$

Untuk Perhitungan lendutan secara teoritis dilakukan yaitu :

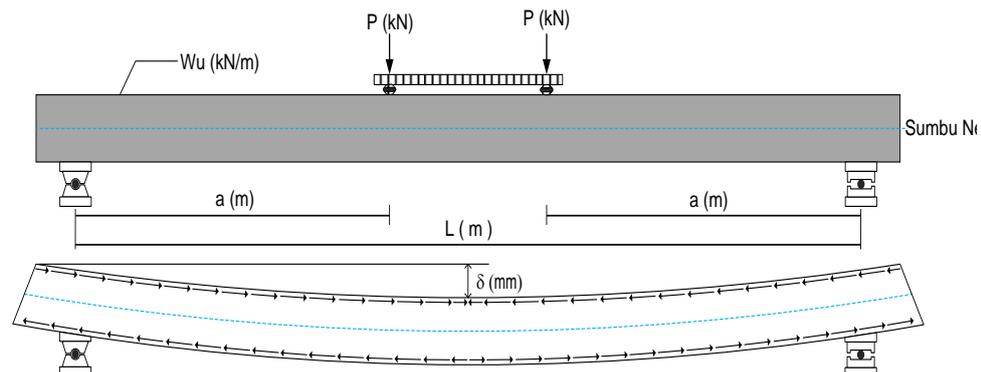
Dimana:

$$E_c = 21533 \text{ Mpa} = 21.5 \text{ kN/mm}^2$$

$$a = 1200 \text{ mm}$$

$$L = 3000 \text{ mm}$$

$$q = 0.9 \text{ kN/m} = 0.0009 \text{ kN/mm}$$



Untuk Icr

$$\delta = \frac{1}{24} \times \frac{P \cdot a}{E_c \cdot I_{cr}} \times (3L^2 - 4a^2) + \frac{5}{384} \times \frac{q \cdot L^4}{E_c \cdot I_{cr}}$$

$$= 0.042 \times \frac{1200P}{9.6E+08} \times 2.1E+07 + 0.013 \times \frac{72900000000}{957429493.9}$$

$$= 1.109220059 P + 0.99142418$$

Untuk I_g

$$\delta = \frac{1}{24} \times \frac{P \cdot a}{E_c \cdot I_g} \times (3L^2 - 4a^2) + \frac{5}{384} \times \frac{q \cdot L^4}{E_c \cdot I_g}$$

$$= 0.042 \times \frac{1200P}{2.2E+09} \times 2.1E+07 + 0.013 \times \frac{72900000000}{2153298000}$$

$$= 0.493196947 P + 0.44082089$$