



DISERTASI

**STUDI PERKUATAN FRP TERHADAP KAPASITAS GESER
COLD-JOINT LONGITUDINAL PADA BALOK BETON
BERTULANG**

*Study FRP Retrofitting of Shear Capacity on Cold Joint
Longitudinal of Reinforced Concrete Beam*

ARDI AZIS SILA

D013211008



**PROGRAM STUDI DOKTOR ILMU TEKNIK SIPIL
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**



PENGAJUAN DISERTASI

STUDI PERKUATAN FRP TERHADAP KAPASITAS GESER COLD-JOINT LONGITUDINAL PADA BALOK BETON BERTULANG

Disertasi
Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Doktor
Program Studi Ilmu Teknik Sipil

Disusun dan diajukan oleh

ttd

**ARDI AZIS SILA
D013211008**

Kepada

**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

DISERTASI

STUDI PERKUATAN FRP TERHADAP KAPASITAS GESER COLD-JOINT LONGITUDINAL PADA BALOK BETON BERTULANG

ARDI AZIS SILA
D013211008

Telah dipertahankan dihadapan Panitia Ujian Disertasi yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi pada Program Doktor Ilmu Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 04 November 2024 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,
Promotor



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

NIP. 197206192000122001

Co-Promotor



Prof. Dr. Ir. M. Wihardi Tjaronge, ST.M.Eng.

NIP. 196805292002121002

Co-Promotor



Prof. Dr. Eng. H. Rudy Djamaluddin, S.T.,

M.Eng

NIP. 197011081994121001

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin



.Muhammad Isran Ramli, ST. MT.

IPM, ASEAN.Eng

197309262000121002

Ketua Program Studi
S3 Ilmu Teknik Sipil



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

NIP. 197206192000122001





PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Ardi Azis Sila
Nomor Mahasiswa : D013211008
Program Studi : S3 Ilmu Teknik Sipil

Dengan ini menyatakan bahwa, disertasi berjudul “STUDI PERKUATAN FRP TERHADAP KAPASITAS GESER COLD-JOINT LONGITUDINAL PADA BALOK BETON BERTULANG” adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing (Prof. Dr.Eng. Ir. Hj. Rita Irmawaty, ST., MT sebagai Promotor, Prof. Dr. Ir. H.M. Wihardi Tjaronge, ST.,M.Eng sebagai co-promotor-1 dan Prof. Dr.Eng. H. Rudy Djamaluddin, ST.,M.Eng co-promotor-2). Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka disertasi ini. Sebagian dari isi disertasi ini telah dipublikasikan di Prosiding (The 5th Internasional Symposium on Infrastructure Development (ISID 2023), sebagai artikel dengan judul “FLEXURAL BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE BEAM WITH GFRP SHEETS” dan di Jurnal Internasional (Engineering, Technology & Applied Science Research, Volume 14 No. 5, 2024, Halaman 17357-17462, dan DOI: <https://doi.org/10.48084/etasr.8622>) sebagai artikel dengan judul “A STUDY ON THE RETROFITTING OF THE SHEAR CAPACITY ON COLD JOINT LONGITUDINAL RC BEAMS”.

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

Gowa, 04 November 2024

Yang menyatakan




Ardi Azis Sila



KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji dan syukur penulis haturkan kehadiran Allah Subhanahu wata'ala atas selesainya penulisan disertasi ini. Tema pokok disertasi ini berkaitan dengan metode perbaikan balok dan perkuatan balok menggunakan material mortar *grouting*, lembaran GFRP, dan angkur *dynabolt*. Bukan hal yang mudah untuk mewujudkan gagasan-gagasan tersebut dalam sebuah susunan disertasi, berkat bimbingan, arahan dan motivasi berbagai pihak maka disertasi ini bisa disusun sebagaimana kaidah-kaidah dalam penulisan ilmiah, untuk itu penulis menyampaikan terima kasih terkhusus kepada:

1. **Prof. Dr.Eng. Hj. Rita Irmawaty, ST., MT**, selaku promotor, yang selalu memberi semangat, bimbingan, koreksi dan saran hingga penulisan disertasi ini dapat diselesaikan.
2. **Prof. Dr. Ir. H. Muh. Wihardi Tjaronge, ST., M.Eng**, selaku ko-promotor, atas bantuan, bimbingan, koreksi dan saran mulai dari ide penelitian, pelaksanaan penelitian hingga terwujudnya disertasi ini.
3. **Prof. Dr.Eng H. Rudy Djamaluddin, ST., M.Eng**, selaku ko-promotor, atas bantuan, bimbingan, koreksi dan saran mulai dari ide penelitian, pelaksanaan penelitian hingga terwujudnya disertasi ini.
4. Ketua Unit Penjaminan Mutu S3, Departemen Teknik Sipil Universitas Hasanuddin, Bapak **Prof. Dr. Ir. H. Muhammad Saleh Pallu, M.Eng** yang telah banyak memberikan bimbingan dalam penulisan jurnal.
5. Kedua Orang Tua tercinta ayahanda **H. Abd. Azis Sila**, dan ibunda **Hj. Najemiah** atas pengorbanan dan doa yang tak putus-putus kepada kami anaknya hingga hari ini. Terkhusus untuk Istri tercinta **Ir. Milla Dwi Astari, ST., M.Eng** yang selalu setia menemani dalam suka duka menjalani studi S3 dan ke-dua anak kami **Khaleed Athazio Dinamika** dan **Ghaziya Khaireen Arsilla** atas do'a, dukungan, kesabaran dan pengorbanannya. Tak lupa saudara-saudari tercinta **Harianti, SS.**, **Sardi Azis, SE.**, **Pandy Azis Sila, Amd.**, **Maulida Puspayanti, Apt.**, dan **Wiwi Indasari Azis, S.Tr.**, atas semua



kasih sayang dan doa serta bantuan moril maupun material selama ini, serta semua keluarga yang selalu mendukung dan mendoakan kami.

6. **Dr.Eng. H. Fakhrudin, ST., M.Eng.,** beserta **Rekan-rekan mahasiswa S3, S2 dan S1** di ruang Laboratorium Riset Rekayasa dan Perkuatan Struktur UNHAS yang telah banyak membantu selama proses pengujian bahan benda uji di Laboratorium.
7. **Muhammad Ali, ST.,MT.** sebagai teman riset untuk berbagi tugas dalam penyelesaian disertasi ini.

Semoga segala bantuan, motivasi, dan saran yang telah diberikan mendapat imbalan yang berlipat ganda dari Allah Yang Maha Kuasa. Keterbatasan kemampuan, pengetahuan penulis sehingga disertasi ini masih belum sempurna seperti yang diharapkan, untuk itu koreksi tambahan masih sangat diharapkan dalam perbaikan disertasi ini. Harapan penulis, Disertasi ini dapat memberi manfaat kepada pihak-pihak yang membutuhkan.

Makassar, November 2024

Penulis

Ardi Azis Sila.



ABSTRAK

ARDI AZIS SILA. *Studi Perkuatan FRP terhadap Kapasitas Geser Cold-Joint Longitudinal Pada Balok Beton Bertulang* (dibimbing oleh **Rita Irmawaty, Wihardi Tjaronge, dan Rudy Djamaluddin**).

Serangan klorida dan karbon dioksida pada baja tulangan adalah salah satu musuh utama pada elemen struktur beton bertulang seperti balok girder jembatan, bangunan laut, maupun bangunan terekspos lainnya. Karat yang terbentuk akibat serangan ini akan merambat perlahan-lahan kedalam beton menyebabkan kerusakan struktural yang berpotensi meruntuhkan balok beton bertulang. Tahapan korosi ini juga menciptakan karat yang volumenya lebih besar dari baja, memberikan tekanan pada selimut beton dan memicu terjadinya retak atau *spalling* pada permukaan beton. Jika paparan klorida ini berkelanjutan, *spalling* tidak dapat dihindarkan dan terjadi semakin parah dengan membuka akses bagi elemen korosif lainnya untuk menembus lebih dalam ke bagian inti beton dan merusak tulangan secara permanen. Untuk itu diperlukan perbaikan sesegera mungkin pada balok yang mengalami *spalling* agar struktur tetap aman dan fungsional. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi metode perbaikan balok beton bertulang pasca *spalling* dengan *grouting*, angkur *dynabolt* dan perkuatan GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*). Empat variasi balok beton bertulang diuji dengan ukuran 150 x 200 x 3300 mm, yaitu balok normal (BK), balok dengan perkuatan GFRP (BNS), balok dengan *grouting* dan lembaran GFRP (BGS), serta balok dengan *grouting*, angkur *dynabolt* dan lembaran GFRP (BGSDB). Masing-masing balok diuji lentur sampai mengalami keruntuhan untuk menganalisis kapasitas beban, lendutan, regangan baja dan beton, pola retak, dan mode kegagalan. Hasil menunjukkan Balok normal (BK) memiliki kapasitas beban maksimum rata-rata 19,47 kN, balok monolit BNS sebesar 34,88 kN, balok *grouting* dan perkuatan GFRP (BGS) sebesar 31,39 kN, sedangkan balok dengan *grouting*, angkur *dynabolt*, dan perkuatan GFRP sedikit lebih rendah yaitu 29,89 kN dibanding balok BGS. Nilai maksimum regangan baja untuk balok BK 21197 $\mu\epsilon$, BGS 13095 $\mu\epsilon$, BNS 5671 $\mu\epsilon$, dan BGSDB 4787 $\mu\epsilon$. Balok BGSDB memperlihatkan penurunan regangan baja tertinggi sebesar 77,42% diikuti oleh balok BNS dengan penurunan sebesar 73,24%, dan terakhir balok BGS dengan penurunan sebesar 38,22%. Perbaikan mortar *grouting*, angkur *dynabolt* dan perkuatan GFRP meningkatkan kemampuan balok, serta terbukti mencegah delaminasi dini pada sambungan cold-joint *longitudinal* sehingga lembaran GFRP dapat bekerja maksimal dalam menahan beban lentur sehingga beban ultimitnya meningkat. Secara keseluruhan Perkuatan GFRP pada sisi bawah balok sebagai pengganti tulangan yang terkorosi sangat efektif dalam mengembalikan kinerja balok meskipun belum sama dengan kondisi initial balok.

Kata kunci: Balok beton bertulang, perkuatan GFRP, *spalling*, korosi, *dynabolt*



ABSTRACT

ARDI AZIS SILA. *Study of FRP Retrofitting of Shear Capacity on Cold Joint Longitudinal in Reinforced Concrete Beam* (supervised by **Rita Irmawaty, Wihardi Tjaronge, dan Rudy Djamaluddin**).

Chloride and carbon dioxide attacks on reinforcing steel are one of the main enemies on solid concrete structural elements such as bridge girder RC-beams, marine structures or other exposed buildings. The rust formed as a result of this attack will slowly squeeze into the concrete causing structural damage that could potentially collapse the rigid concrete beams. This corrosion stage also creates rust which is larger in volume than steel, puts pressure on the concrete cover and triggers cracking or spalling on the concrete surface. If this chloride exposure continues, spalling cannot be avoided and becomes more severe by opening access for other corrosive elements to penetrate deeper into the concrete and damage the reinforcement permanently. For this reason, it is necessary to repair beams that experience spalling as soon as possible so that the structure remains safe and functional. The study aims to evaluate methods of repair of post-spalling solid concrete beams with grouting, dynabolt hooks and GFRP reinforcements. (Glass Fiber Reinforced Polymer). Four variations of RC-beams were tested with dimensions of 150 x 200 x 3300 mm, i.e. normal beams (BK), GFRP reinforced (BNS), grouting beams and G FRP sheets (BGS), as well as grouting beams, dynabolt angles and GFRPs (BGSDB). Each beam was tested for sliding to collapse to analyze load capacity, slide, steel and concrete stretch, cracks patterns, and failure modes. The results showed that normal beams (BK) had an average maximum load capacity of 19,47 kN, BNS monolith beam of 34.88 kN grouting beams and GFRP reinforcements (BGS) increased their maximum load by 31.39 kN while beams with grouting, dynabolt angles, and a slightly lower GFRPs reinforcement of 29.97 kN compared to BNS beams. The maximum of steel strain for BK beams is 21197 $\mu\epsilon$, BGS 13095 $\mu\epsilon$, BNS 5671 $\mu\epsilon$, and BGSDB 4787 $\mu\epsilon$. The BGSDB beam shows the highest reduction in steel strain of 77.42%, followed by the BNS beam with a decrease of 73.24%, and finally the BGS beam with a decrease of 38.22%. Improvements in grouting mortar, dynabolt anchors and GFRP reinforcement increase the beam's capabilities, and are proven to prevent premature delamination in longitudinal cold-joint connections so that GFRP sheets can work optimally in resisting bending loads so that the ultimate load increases. Overall, GFRP reinforcement on the bottom side of the beam as a replacement for corroded reinforcement is very effective in restoring the beam's performance even though it is not the same as the beam's initial condition.

Kata kunci: RC-Beam, GFRP strengthening, spalling, corrosion, dynabolt



DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL.....	i
PENGAJUAN DISERTASI.....	ii
PERSETUJUAN DISERTASI.....	iii
PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI	iv
ABSTRAK	vii
ABSTRACT.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR NOTASI.....	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	8
1.3 Tujuan Penelitian.....	9
1.4 Manfaat Penelitian	9
1.5 Batasan Penelitian	9
BAB II KERANGKA KONSEPTUAL DAN HIPOTESIS PENELITIAN	11
2.1 KERANGKA KONSEPTUAL	11
2.2 HIPOTESIS PENELITIAN	19
2.3 DESAIN PENELITIAN.....	21
BAB III ANALITIS DAN DESAIN PERKUATAN BALOK BETON BERTULANG DENGAN GFRP.....	26
3.1. PENDAHULUAN	26
3.2. PERHITUNGAN ANALITIK	28
BAB IV STUDI PENGARUH PENAMBAHAN ANGKUR <i>DYNABOLT</i> PADA <i>COLD-JOINT LONGITUDINAL</i> TERHADAP PERILAKU LENTUR DAN GESER BALOK BETON BERTULANG.....	32
4.1 ABSTRAK	32



4.2	PENDAHULUAN	33
4.3	BAHAN DAN MATERIAL	38
4.3.1	Pengujian property material	38
4.3.2	Pengujian baja tulangan.....	39
4.3.3	Pembuatan Benda Uji Balok Beton Bertulang.....	41
4.3.4	Mortar <i>Grouting</i>	42
4.4	METODOLOGI PENELITIAN.....	42
4.4.1	Lokasi Penelitian	42
4.4.2	Pabrikasi Benda Uji Balok Beton Bertulang.....	43
4.4.3	Pengujian Benda Uji Balok Beton Bertulang.....	44
4.5	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	46
4.5.1	Sifat-Sifat Bahan	46
4.5.2	Perilaku Lentur Balok Beton Bertulang.....	50
4.6	KESIMPULAN	79
4.7	DAFTAR PUSTAKA	80
BAB V ANALISIS POLA RETAK DAN KEGAGALAN BALOK BETON BERTULANG PASCA- <i>SPALLING</i> DENGAN PERBAIKAN <i>GROUTING</i> , ANGKUR <i>DYNABOLT</i> DAN PERKUATAN GFRP.....		84
5.1	ABSTRAK.....	84
5.2	PENDAHULUAN	85
5.3	METODOLOGI.....	87
5.4	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	88
5.5	KESIMPULAN	94
5.6	DAFTAR PUSTAKA	95
BAB VI PEMBAHASAN UMUM.....		98
6.1	PERILAKU LENTUR BALOK BETON BERTULANG.....	98
6.2	KAPASITAS PERKUATAN GFRP	106
6.3	POLA RETAK DAN MODE KEGAGALAN	114
6.4	ANALISIS MENGGUNAKAN <i>FINITE ELEMENT METHOD</i> (FEM)..	120
6.5	KEBAHARUAN / NOVELTY.....	131
BAB VII KESIMPULAN DAN SARAN.....		132



7.1 KESIMPULAN132

7.2 SARAN133

DAFTAR PUSTAKA133

DAFTAR LAMPIRAN

DOKUMENTASI PENELITIAN



DAFTAR TABEL

Nomor	Halaman
Tabel 1. Variasi benda uji balok beton bertulang	23
Tabel 2. Kode strain gauge pada beton	24
Tabel 3. Kode <i>strain gauge</i> pada baja.....	24
Tabel 4. Kode strain gauge pada FRP	25
Tabel 5. Regangan oleh baja dan GFRP	30
Tabel 6. Tegangan oleh baja dan GFRP.....	30
Tabel 7. Lengan momen oleh baja dan GFRP.....	30
Tabel 8. Persentase momen oleh baja dan GFRP	31
Tabel 9. Lendutan teoritis pada balok	31
Tabel 10. Spesifikasi GFRP type Mape Wrap G dalam bentuk dry sheet (Glass Fabrics).....	38
Tabel 11. Identitas benda uji besi tulangan.....	39
Tabel 12. Karakteristik mortar grouting.....	42
Tabel 13. Hasil pengujian tarik baja tulangan.....	46
Tabel 14. Hasil pengujian kuat tekan beton	47
Tabel 15. Hasil pengujian kuat tekan <i>grouting</i>	48
Tabel 16. Kaut tarik dan Kuat Geser Angkur <i>Dynabolt</i>	49
Tabel 17. Hasil perhitungan kebutuhan jarak angkur <i>dynabolt</i>	50
Tabel 18. Kapasitas beban dan momen seluruh benda uji	51
Tabel 19. Persentase peningkatan kapasitas beban balok perkuatan terhadap balok kontrol (BK).....	52
Tabel 20. Rekap Hubungan beban lendutan untuk semua benda uji	55
Tabel 21. Rekap Hubungan beban-regangan baja untuk semua benda uji	62
Tabel 22. Rekap Hubungan beban-regangan beton untuk semua benda uji	68
Tabel 23. Hasil pengujian beban ultimit	99
Tabel 24. Parameter perhitungan kapasitas rekatan GFRP	111
Tabel 25. Kapasitas GFRP dan tegangan rekatan GFRP untuk semua benda uji	113
Tabel 26. Perbandingan hasil eksperimen dan FEM.....	123



DAFTAR GAMBAR

Nomor	Halaman
Gambar 1. Korosi pada girder jembatan yang menyebabkan <i>spalling</i>	1
Gambar 2. Proses korosi pada tulangan baja	2
Gambar 3. <i>Grouting</i> pada beton bertulang.....	3
Gambar 4. Lembaran CFRP pada beton bertulang	4
Gambar 5. (a) <i>Cover debonding</i> . (b) <i>FRP debonding from laminate end</i> . (c) <i>CDC (Critical Diagonal Crack) debonding</i> . (d) <i>IC (Intermediate Crack) debonding</i>	6
Gambar 6. Perilaku geser antara beton lama dan baru (<i>grouting</i>)	7
Gambar 7. Pemasangan angkur <i>dynabolt</i> pada sambungan	8
Gambar 8. Korosi pada baja tulangan yang menyebabkan <i>spalling</i>	11
Gambar 9. Penggunaan FRP sebagai perkuatan pada girder jembatan.....	14
Gambar 10. Kerangka konseptual penelitian	18
Gambar 11. Desain benda uji balok normal tanpa perkuatan (BK)	21
Gambar 12. Desain benda uji monolit dengan perkuatan GFRP (BNS).....	22
Gambar 13. Desain benda uji dengan mortar <i>grouting</i> dan perkuatan GFRP (BGS)	22
Gambar 14. Desain benda uji dengan angkur <i>dynabolt</i> , <i>grouting</i> , dan perkuatan GFRP (BGSDDB).....	23
Gambar 15. Penempatan strain gauge (SG) beton pada beton benda uji balok	24
Gambar 16. Titik pemasangan strain gauge baja pada tulangan lentur.....	24
Gambar 17. Titik pemasangan strain gauge FRP pada ketiga variasi benda uji balok	25
Gambar 18. Balok Menahan Beban Ultimit.....	28
Gambar 19. Diagram tegangan-regangan baja dan GFRP.....	29
Gambar 20. Gesekan geser.....	35
Gambar 21. Mekanisme ketahanan geser interface.....	36
Gambar 22. Perbaikan beton bertulang: (a) <i>grouting</i> (b) angkur <i>dynabolt</i> (c) GFRP sheet.....	37
Gambar 23. Pengujian Material Baja (SNI 03-6861.2-2002)	39
Gambar 24. Benda uji diameter ≤ 15 mm	40



Gambar 25. Pengujian Kuat Tekan Beton.....	41
Gambar 26. Pengujian mortar <i>grouting</i>	42
Gambar 27. Pembuatan benda uji balok beton bertulang	43
Gambar 28. Desain set-up benda uji	44
Gambar 29. Set up benda uji di laboratorium	45
Gambar 30. Angkur <i>Dynabolt</i> M10 panjang 100m jenis <i>Hex Flange Nut</i>	48
Gambar 31. Histogram beban maksimum benda uji.....	52
Gambar 32. Hubungan beban - lendutan benda uji BK	56
Gambar 33. Hubungan beban - lendutan benda uji BNS	57
Gambar 34. Hubungan beban - lendutan benda uji BGS.....	58
Gambar 35. Hubungan beban - lendutan benda uji BGSDB	59
Gambar 36. Hubungan beban-regangan baja balok BK.....	63
Gambar 37. Hubungan beban-regangan baja balok BNS	64
Gambar 38. Hubungan beban-regangan baja balok BGS	65
Gambar 39. Hubungan beban-regangan baja balok BGSDB.....	66
Gambar 40. Hubungan beban-regangan beton balok BK	68
Gambar 41. Hubungan beban-regangan beton balok BNS	69
Gambar 42. Hubungan beban-regangan beton balok BGS	70
Gambar 43. Hubungan beban-regangan beton balok BGSDB.....	71
Gambar 44. Hubungan beban-regangan GFRP balok BNS.....	73
Gambar 45. Hubungan beban-regangan GFRP balok BGS	74
Gambar 46. Hubungan beban-regangan GFRP balok BGSDB	75
Gambar 47. Distribusi regangan balok BK.....	76
Gambar 48. Distribusi regangan balok BNS.....	77
Gambar 49. Distribusi regangan balok BGS.....	78
Gambar 50. Distribusi regangan balok BGSDB	79
Gambar 51. Pola retak beton BK	89
Gambar 52. Pola retak balok beton BNS	90
Gambar 53. Pola retak balok beton BGS	91
Gambar 54. Pola retak balok beton BGSDB.....	92
Gambar 55. Mode keruntuhan balok BGS.....	93



Gambar 56. Mode keruntuhan balok BGSDB	94
Gambar 57. Hubungan lendutan dan beban untuk semua variasi	100
Gambar 58. Hubungan beban-regangan baja seluruh variasi benda uji.....	102
Gambar 59. Hubungan beban-regangan beton semua variasi balok.....	103
Gambar 60. Hubungan beban-regangan GFRP semua variasi balok.....	105
Gambar 61. Distribusi regangan GFRP balok BNS.....	107
Gambar 62. Distribusi regangan GFRP balok BGS.....	108
Gambar 63. Distribusi regangan GFRP balok BGSDB	109
Gambar 64. Hasil uji lentur variasi benda uji	117
Gambar 65. Kontur tegangan balok kontrol (BK) saat beban <i>crack</i>	120
Gambar 66. Kontur tegangan balok kontrol (BK) saat beban ultimit.....	120
Gambar 67. Kontur tegangan balok monolit + GFRP (BNS) saat beban <i>crack</i> ..	121
Gambar 68. Kontur tegangan balok monolit + GFRP (BNS) saat beban ultimit.	121
Gambar 69. Kontur tegangan balok grouting + GFRP (BGS) saat beban <i>crack</i> .	121
Gambar 70. Kontur tegangan balok grouting + GFRP (BGS) saat beban ultimit	122
Gambar 71. Kontur tegangan balok grouting + Dynabolt+ GFRP (BGSDB) saat beban <i>crack</i>	122
Gambar 72. Kontur tegangan balok grouting + Dynabolt+ GFRP (BGSDB) saat beban ultimit	122
Gambar 73. Perbandingan hasil FEM dan eksperimen pada grafik P- Δ	123
Gambar 74. Perbandingan hasil FEM dan eksperimen pada grafik P- Δ balok monolit + GFRP (BNS).....	124
Gambar 75. Perbandingan hasil FEM dan eksperimen pada grafik P- Δ balok <i>grouting</i> + GFRP (BGS)	124
Gambar 76. Perbandingan hasil FEM dan eksperimen pada grafik P- Δ balok <i>grouting</i> + <i>dyanbolt</i> + GFRP (BGSDB)	125
Gambar 77. Perbandingan hasil FEM dan eksperimen pada grafik P- ϵ_{beton} balok kontrol (BK).....	125
Gambar 78. Perbandingan hasil FEM dan eksperimen pada grafik P- ϵ_{beton} balok monolit + GFRP (BNS).....	126



Gambar 79. Perbandingan hasil FEM dan eksperimen pada grafik $P-\epsilon_{\text{beton}}$ balok <i>grouting</i> + GFRP (BGS)	126
Gambar 80. Perbandingan hasil FEM dan eksperimen pada grafik $P-\epsilon_{\text{beton}}$ balok <i>grouting</i> + <i>dynabolt</i> + GFRP (BGSDDB)	127
Gambar 81. Perbandingan hasil FEM dan eksperimen pada grafik $P-\epsilon_{\text{baja}}$ balok kontrol (BK).....	127
Gambar 82. Perbandingan hasil FEM dan eksperimen pada grafik $P-\epsilon_{\text{baja}}$ balok monolit + GFRP (BNS).....	128
Gambar 83. Perbandingan hasil FEM dan eksperimen pada grafik $P-\epsilon_{\text{baja}}$ balok <i>grouting</i> + GFRP (BGS)	128
Gambar 84. Perbandingan hasil FEM dan eksperimen pada grafik $P-\epsilon_{\text{baja}}$ balok <i>grouting</i> + <i>dynabolt</i> + GFRP (BGSDDB)	129
Gambar 85. Perbandingan hasil FEM dan eksperimen pada grafik $P-\epsilon_{\text{GFRP}}$ balok monolit + GFRP (BNS).....	129
Gambar 86. Perbandingan hasil FEM dan eksperimen pada grafik $P-\epsilon_{\text{GFRP}}$ balok <i>grouting</i> + GFRP (BGS)	130
Gambar 87. Perbandingan hasil FEM dan eksperimen pada grafik $P-\epsilon_{\text{GFRP}}$ balok <i>grouting</i> + <i>dynabolt</i> + GFRP (BGSDDB)	130



DAFTAR NOTASI

Lambang / Singkatan	Arti dan keterangan
f'_c	= Kuat Tekan Beton (MPa)
%	= Persen
P	= Beban (N)
A	= Luas Area Penampang (mm^2)
L	= Panjang Benda Uji
D	= Diameter Benda Uji
ϵ_c	= Regangan Tekan Beton
ϵ_s	= Regangan Tarik Baja
ϵ_{cr}	= Regangan Crack
ϵ_y	= Regangan Yield
ϵ_{ult}	= Regangan Ultimit
C	= Resultan Gaya
T_s	= Resultan Gaya Tarik Dari Baja
FRP	= <i>Fiber Reinforced Polymer</i>
ACI	= American Concrete Institute
SNI	= Standar Nasional Indonesia
ASTM	= American Standard Testing and Material
UTM	= Universal Testing Machine
\emptyset	= Faktor Reduksi
Mn	= Momen Nominal (kN/m)
Mu	= Momen Ultimit (kN/m)



Lambang / Singkatan	Arti dan keterangan
ϵ_{fu}	= Regangan Ultimit FRP
n	= Jumlah Lapis FRP
E_f	= Elastisitas FRP (Mpa)
t_f	= Tebal FRP (mm)
ϵ_{fe}	= Regangan yang terjadi pada FRP
ϵ_{fu}	= Regangan Ultimit Beton
h	= Tinggi Balok
c	= Tinggi Balok Tegangan Ekuivalen
ϵ_{bi}	= Regangan Beton
f_{fe}	= Tegangan yang terjadi pada FRP
z	= Besar Lengan Momen
ϵ_f	= Regangan FRP
GFRP	= <i>Glass Fiber Reinforced Polymer</i>
ΔL	= Perpendekan Beton (mm)
T	= Tension / Daerah Lentur
Tuf	= Kapasitas rekatan ultimit
σ_f	= Tegangan Rekatan FRP
f_y	= Tegangan Leleh Baja
A_s	= Luas Area Penampang Tulangan Lentur
A_s'	= Luas Area Penampang Tulangan Tekan
d	= Tinggi Efektif Penampang
d'	= Tinggi Selimut Beton (mm)
GPa	= GigaPascal



Lambang / Singkatan	Arti dan keterangan
MPa	= MegaPascal
mm	= millimeter
cm	= centimeter
FLKB-2-11-5LJC-F	= Alat Ukur Regangan Baja Tulangan
FLAB-2-11-5LJCF	= Alat Ukur Regangan FRP
PL-60-11-5LJC-F	= Alat Ukur Regangan Beton
LVDT	= <i>Linear Variable Displacement Transducer</i>
kN	= kiloNewton
kg	= kilogram
Ø8	= Besi Polos Diameter 8
D10	= Besi Ulir Diameter 10
BK	= Balok Kontrol
BNS	= Monolit + GFRP Sheet
BGS	= Mortar <i>Grouting</i> + GFRP Sheet
SGC	= Strain Gauge pada Beton
SGS	= Strain Gauge pada Baja
SGF	= Strain Gauge pada GFRP
LVDT	= Linear Variable Displacement Transducer
BJTP	= Baja Tulangan Beton Polos
BJTS	= Baja Tulangan Beton Sirip
$\mu\varepsilon$	= <i>micro strain</i>
τ	= Tegangan geser



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Beton sebagai salah satu material konstruksi yang paling banyak digunakan saat ini terutama di negara berkembang seperti di Indonesia. Hal ini menjadi tantangan bagi para pelaku konstruksi dalam membuat beton yang tidak hanya memiliki mutu yang baik sesuai spesifikasi namun juga memiliki ketahanan atau *durability* sesuai umur rencana bangunan tersebut. Beton sebagai bahan struktural pada bangunan biasanya dipadukan dengan besi tulangan sebagai satu kesatuan monolit dengan tujuan perpaduan kedua unsur material yang non homogen tersebut dapat menghasilkan kinerja yang tinggi sesuai yang diharapkan.

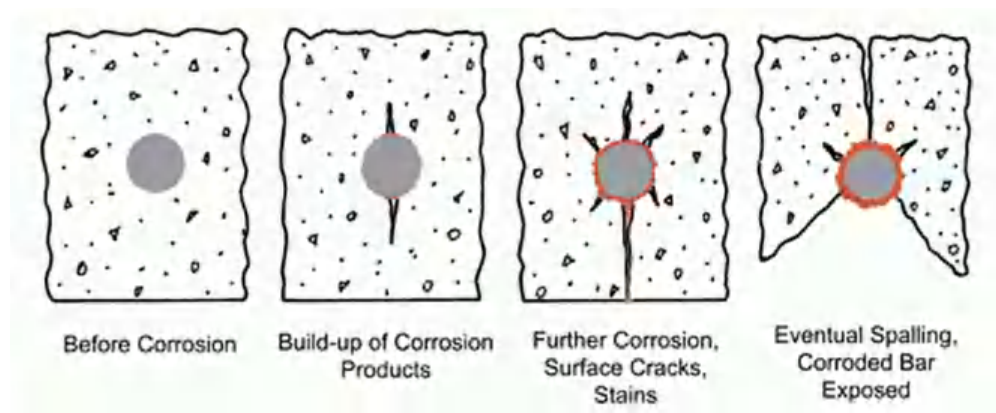
Adanya kontaminasi air dan udara dapat menghasilkan asam karbonat yang menimbulkan korosi pada baja atau besi tulangan. Akibat adanya tulangan dalam beton membuat beton bertulang mudah terkorosi dan menyebabkan selimut beton terkelupas atau *spalling*. Seiring berjalannya waktu *spalling* ini akan terjadi dan dapat mempengaruhi kinerja dari struktur beton. Hal ini jika dibiarkan secara terus menerus dan struktur tetap menerima beban kerja seperti biasanya maka hal fatal yang akan terjadi yaitu keruntuhan struktur secara tiba-tiba.



Gambar 1. Korosi pada girder jembatan yang menyebabkan *spalling*



Spalling pada penutup beton merupakan fenomena kompleks yang mempengaruhi tidak hanya keadaan batas ultimit dari komponen struktur beton, tetapi juga respons layanan dan daya tahannya (Moccia et al., 2021). Di antara beberapa faktor penyebab terjadinya *spalling* adalah terjadinya korosi, yang mempengaruhi komponen-komponen struktur beton bertulang dimana umur layanan struktur menurun disertai kinerja struktural (Qiao et al., 2015). Penelitian Zhang et al., (2021) menunjukkan bahwa *spalling* penutup beton akibat korosi diawali dengan retak miring yang berakar dari tulangan baja yang terkorosi dan merambat secara diagonal ke permukaan, diikuti dengan retak tegak lurus yang merambat dari permukaan ke tulangan baja yang terkorosi. Retak *spalling* menyebar dengan meningkatnya kehilangan korosi.



Gambar 2. Proses korosi pada tulangan baja

Shen et al., (2021) Korosi baja pada beton akan cepat terjadi di lingkungan yang keras, seperti daerah pesisir, tropis, atau gurun di mana kadar garam yang tinggi dan suhu ekstrim mempercepat laju pembusukannya. Akibatnya, seluruh struktur runtuh karena penurunan kinerja struktural yang parah. Ada juga gempa bumi yang sering terjadi di seluruh dunia dalam beberapa tahun terakhir. Untuk daerah yang rawan gempa kondisi *spalling* pada bangunan merupakan ancaman besar yang bisa menimbulkan korban jiwa yang lebih banyak serta kerusakan konstruksi yang akan lebih banyak menimbulkan biaya kerugian (Jung et al., 2019). Kekuatan ekspansif yang disebabkan oleh korosi baja dapat menyebabkan retak, *spalling* dan pewarnaan beton, dan menyebabkan hilangnya ikatan struktural antara agregat dan struktur beton (ACI Committee 222, 1996).



Jika dibiarkan maka *spalling* akan cenderung semakin cepat dan menyebar sehingga pada akhirnya struktur bisa menjadi tidak stabil (Zhu & François, 2014). Beton yang telah terkelupas harus diperbaiki tidak hanya dengan memperbaiki tetapi dengan mengidentifikasi dan memperbaiki akar penyebabnya untuk memastikan bahwa struktur tidak berbahaya bagi pengguna (Luckai, 2011). Jika struktur dibiarkan memburuk maka nilai aset akan berkurang dan, lebih jauh lagi, biaya perawatan akan cenderung meningkat karena korosi dan *spalling* menjadi lebih luas (Zandi, 2015).

Ada beberapa metode perbaikan yang dapat dilaksanakan pada beton pasca *spalling* diantaranya yang paling banyak dilakukan adalah dengan *grouting*. *Grouting* dianggap metode yang paling mudah dan paling murah untuk dilaksanakan, selain itu bahan *grouting* berupa semen grout memiliki daya susut yang rendah serta mutu yang tinggi sehingga diharapkan dapat menggantikan beton yang mengalami *spalling*. Korosi pada balok yang dilakukan perbaikan dengan cara *grouting* akan memiliki efek yang berbeda pada perilaku retak, kurva defleksi beban, dan mode kegagalan balok (Wang et al., 2014). Penelitian Minh et al., (2007) menjelaskan bahwa *grouting* yang tepat dapat melindungi tendon prategang dari korosi meskipun retakan lebih lebar akibat korosi yang terselubung.



Gambar 3. *Grouting* pada beton bertulang

Sumber: <https://theconstructor.org/>

Komponen beton bertulang yang mengalami korosi sampai adanya *spalling* akan berdampak terjadinya keruntuhan disebabkan oleh kehilangan ikatan antara beton dan tulangan. Hal ini menunjukkan bahwa bila retak bisa dicegah atau



ditunda, tingkat kekuatan struktural dapat dipertahankan dalam ikatan beton bertulang yang berkarat. *Fiber Reinforced Polymer* (FRP) adalah alternatif yang menjanjikan untuk perbaikan elemen beton yg rusak serta telah mengalami penurunan kekuatan. Selain rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi, daya tahan pada lingkungan yg dapat membahayakan serta kuat lelah struktur yg tinggi. Lembaran FRP bisa dengan praktis mengikat atau menguatkan secara eksternal terhadap lempengan beton bertulang, balok, serta kolom (ACI 440, 1996). Penggunaan laminasi FRP dalam rehabilitasi serta perkuatan struktur yg telah terkorosi adalah sebuah penemuan terbaru. Banyak peneliti telah berusaha dalam mengkarakterisasi kinerja struktur beton bertulang yang rusak akibat korosi dan telah banyak isu yang tersedia pada literatur terkait perilaku struktural balok dan telah diperkuat menggunakan lembaran FRP.



a. Bending reinforcement



b. Shear reinforcement

Gambar 4. Lembaran CFRP pada beton bertulang

Sumber: <https://conc-tech.com/>

Beberapa penelitian yang dilakukan telah memberikan hasil yang menunjukkan bahwa penggunaan FRP sebagai bahan laminasi pada beton telah berhasil membatasi dan mencegah terjadinya retak dan *spalling* yang diakibatkan oleh terjadinya korosi pada tulangan beton. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan lembaran FRP untuk memperkuat balok beton berkarat adalah teknik yang efisien yang dapat menjaga integritas struktural dan meningkatkan perilaku balok tersebut (Pantelides et al., 2008). Lembar GFRP diterapkan secara eksternal



dengan mengikatnya pada permukaan beton untuk diterapkan agar memperkuat struktur yang terus memburuk (Djamaluddin et al., 2019).

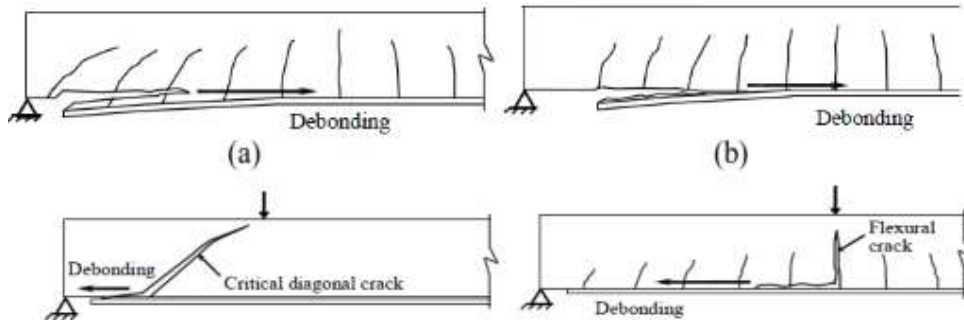
Penelitian Machmud et al., (2019) menggunakan lembaran GFRP dan CFRP sebagai perkuatan struktur menunjukkan bahwa penggunaan CFRP di daerah tarik meningkatkan kapasitas beban secara signifikan dibandingkan dengan GFRP, dan penambahan sabuk kurang efektif dalam meningkatkan kapasitas beban. Lembaran FRP yang tersusun dari kaca yaitu *Glass Fiber Reinforced Plastics* (GFRP) paling umum digunakan karena biayanya yang relatif lebih rendah dibandingkan dengan bahan FRP lainnya (Djamaluddin et al., 2016). Penelitian Hijriah et al., (2018) menunjukkan bahwa balok dengan perkuatan GFRP mampu meningkatkan kapasitas lentur dari balok sebesar 4.14 % terhadap balok normal. Mode keruntuhan yang terjadi pada benda uji disebabkan karena kegagalan lekatan antara beton dengan GFRP (delaminasi).

Perkuatan eksternal dengan menggunakan lembaran FRP merupakan cara dan metode perkuatan yang efektif dan populer yang digunakan untuk konstruksi beton bertulang saat ini. Kinerja FRP ini biasanya ditentukan dan dipengaruhi oleh masalah rekatan antara FRP dengan beton. Hal ini dibuktikan dengan banyaknya dijumpai kasus kegagalan debonding pada struktur yang diperkuat dengan FRP. Oleh karena itu masalah debonding atau lepasnya ikatan antara FRP dengan beton ini merupakan masalah yang kritis dan sangat penting dari penggunaan material FRP dalam hal perbaikan dan perkuatan struktur. Bidang rekatan, dalam hal ini merupakan bidang antara FRP dengan beton, biasanya merupakan bagian terlemah di mana debonding paling sering terjadi seperti pada **Gambar 5**.

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. Kegagalan akibat *debonding* dapat dibedakan atas empat jenis yaitu lepasnya selimut beton pada ujung lapisan FRP (*cover debonding*), lepasnya lapisan FRP tanpa ikut terlepasnya beton (*FRP debonding from laminate end*), lepasnya FRP akibat retak geser-lentur (*FRP debonding from*



flexure-shear crack) dan lepasnya FRP akibat retak lentur murni (*FRP debonding from flexural crack*).



Gambar 5. (a) *Cover debonding*. (b) *FRP debonding from laminate end*. (c) *CDC (Critical Diagonal Crack) debonding*. (d) *IC (Intermediate Crack) debonding*

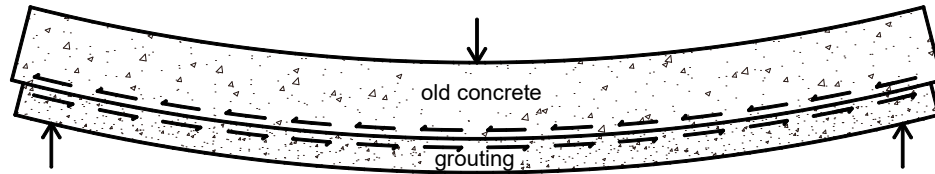
Gambar 5 (a) menunjukkan kegagalan *cover debonding*. Fenomena *cover debonding* atau disebut juga *concrete cover separation* diakibatkan karena adanya rambatan retak yang terjadi pada sepanjang sisi tulangan tarik. Kegagalan ini dimulai dengan munculnya retak di sekitar ujung lapisan FRP. Retak ini kemudian semakin merambat dan membentuk pola retakan yang hampir sejajar dengan daerah pemasangan tulangan sehingga pada akhirnya menyebabkan terlepasnya selimut beton.

Pada **Gambar 5 (b)** menunjukkan kegagalan debonding akibat lepasnya lapisan FRP tanpa ikut terlepasnya beton. Pada fenomena lepasnya lapisan FRP tanpa ikut terlepasnya beton (*FRP debonding from laminate end*), kegagalan debonding diawali dengan terjadinya tegangan geser permukaan yang tinggi pada ujung lapisan FRP. Terjadinya *debonding* pada kondisi ini dimulai pada sisi ujung lapisan FRP kemudian merambat ke tengah balok. Kegagalan ini biasanya diakibatkan karena lebar pemasangan lapisan FRP yang lebih kecil daripada lebar penampang balok, bahan perekat yang kurang baik maupun pelaksanaan penempelan lapisan FRP yang kurang sempurna.

Gambar 5 (c) menunjukkan kegagalan *debonding* akibat retak geser-lentur. Lepasnya FRP akibat retak geser-lentur (*FRP debonding from flexure-shear crack*) biasa disebut juga *CDC (Critical Diagonal Crack)* tanpa ikut terlepasnya beton (*FRP debonding from laminate end*), lepasnya FRP akibat retak geser-lentur (*FRP*



debonding from flexure-shear crack) dan lepasnya FRP akibat retak lentur murni (*FRP debonding from flexural crack*).



Gambar 6. Perilaku geser antara beton lama dan baru (*grouting*)

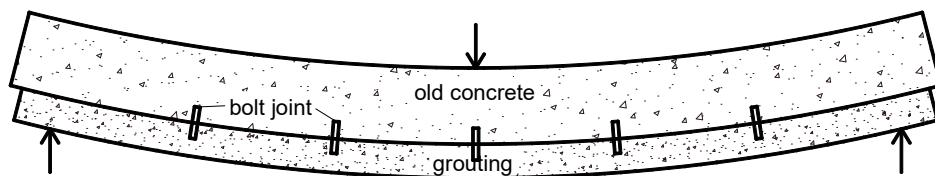
Winter et.al (1993) menjelaskan terjadinya tegangan geser yang diakibatkan oleh peristiwa lentur melalui balok yang tersusun dan balok utuh. **Gambar 6** di atas menunjukkan balok yang terletak pada dua perletakan sederhana yang memikul beban P sehingga terjadi pelenturan. Serat bawah balok akan bertambah panjang karena adanya tegangan tarik, dan sebaliknya serta bagian atas balok akan memendek karena adanya tegangan desak. Dengan demikian pada perbatasan balok atas dan balok bawah akan terjadi perbedaan deformasi yang akan mengakibatkan gaya geser. Adanya mortar *grouting* yang dilekatkan pada beton lama dalam rangka perbaikan akan memiliki perilaku geser yang berbeda satu sama lainnya. Geser tersebut tidak dapat dilawan oleh kekuatan bahan karena antara keduanya memiliki sifat homogenitas dan mutu yang berbeda sehingga tidak terjadi aksi homogen. Pada balok yang utuh gaya geser yang terjadi pada tengah tinggi balok akan dilawan oleh tegangan geser dari bahan untuk mempertahankan diri secara homogen.

Penggunaan bahan GFRP sebagai bahan perkuatan sangat ditunjang oleh lekatan antara beton lama dengan beton baru atau *grouting*, dimana perbaikan *grouting* berpengaruh terhadap mode kegagalan balok, balok dengan perkuatan mortar *grouting* mengalami kegagalan *debonding*, sedangkan balok kontrol mengalami kegagalan lentur. Hasil penelitian (Sugira Said *et al.*, 2022) menunjukkan bahwa perbaikan dengan mortar *grouting* pada balok yang mengalami *spalling* dan korosi tidak mampu mengembalikan kekuatan awal balok dan menurun sebesar 47,62%, sedangkan balok dengan tambahan perkuatan GFRP mengalami kegagalan *debonding* sehingga belum bekerja secara maksimal sesuai regangan tariknya sebelum balok mengalami keruntuhan. Dalam penelitian lain



oleh (Meichin, 2023) yang melakukan uji kuat geser langsung pada balok dari sambungan beton lama dan mortar *grouting* menggunakan ankur *dynabolt* D10 mm menunjukkan hasil kuat geser sambungan meningkat 75,18% dibanding balok tanpa ankur *dynabolt*.

Berdasarkan uraian diatas maka penelitian ini akan berfokus pada pemodelan balok beton bertulang yang diasumsikan mengalami *spalling*, luas tulangan sebelumnya menggunakan D13 diganti menjadi D10 setelah itu dilakukan perbaikan dengan mortar *grouting*. Dengan asumsi adanya degradasi kekuatan akibat fungsi umur dan layan maka dilakukan juga penambahan GFRP sebagai perkuatan tarik dan geser pada balok beton tersebut. Untuk mencegah terjadinya delaminasi dini pada sambungan beton lama dan beton baru (*grouting*) maka dilakukan perkuatan geser menggunakan *bolt joint* dalam hal ini digunakan ankur *dynabolt*. Atas dasar hal tersebut maka kami menulis penelitian dengan judul “STUDI PERKUATAN FRP TERHADAP KAPASITAS GESER COLD-JOINT LONGITUDINAL PADA BALOK BETON BERTULANG”.



Gambar 7. Pemasangan ankur *dynabolt* pada sambungan

1.2 Rumusan Masalah

Mengacu pada latar belakang di atas maka ada beberapa pertanyaan sebagai rumusan masalah diantaranya sebagai berikut:

1. Bagaimana perilaku lentur balok beton bertulang dengan perbaikan mortar *grouting*, ankur *dynabolt* serta perkuatan GFRP.
2. Bagaimana perilaku geser pada *cold joint longitudinal* balok beton bertulang yang dilakukan perbaikan *grouting*, ankur *dynabolt* dan perkuatan GFRP
3. Bagaimana pola retak dan mode keruntuhan yang muncul pada balok beton bertulang dengan perbaikan *grouting*, ankur *dynabolt* dan perkuatan GFRP.



1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas maka tujuan penelitian ini adalah:

1. Menganalisa perilaku lentur balok beton bertulang dengan perbaikan *grouting*, angkur *dynabolt* serta perkuatan GFRP.
2. Menganalisa perilaku geser pada daerah sambungan (*cold joint*) balok beton bertulang dengan perbaikan *grouting*, angkur *dynabolt* serta perkuatan GFRP.
3. Mengevaluasi pola retak dan mode keruntuhan yang muncul pada balok beton bertulang serta menemukan korelasi antara perbaikan dengan *grouting* dan angkur *dynabolt* pada daerah sambungan *cold-joint longitudinal* serta perkuatan GFRP.

1.4 Manfaat Penelitian

Dengan adanya penelitian ini maka akan memberikan kontribusi baik secara teoritis maupun aplikasi dilapangan terutama mengenai metode perbaikan dan perkuatan balok beton bertulang pasca *spalling* menggunakan angkur *dynabolt*, mortar *grouting*, dan lembaran GFRP baik itu perilaku secara lentur maupun geser terutama pada sambungan *cold-joint longitudinal* serta bagaimana perilaku dan mode keruntuhan dari balok tersebut.

1.5 Batasan Penelitian

Agar penelitian ini tidak terlalu luas maka penulis memberikan batasan penelitian yaitu:

1. Dimensi balok beton bertulang 150x200x3300 mm dengan jarak tumpuan ke tumpuan 3000 mm. Disain balok mengacu pada standar ASTM-C293-68, ACI-440-1R-06 dan ACI-440-2R-08
2. Membuat 8 (delapan) buah benda uji balok beton bertulang, yang terdiri dari:
 - a. 2 (dua) buah balok beton bertulang dengan tulangan tarik 3D10 mm tanpa *grouting*.
 - b. 2 (dua) buah balok beton bertulang yang sama dengan point a kemudian dilakukan perkuatan dengan GFRP sheet pada bagian bawah selebar balok.
 - c. 2 (dua) buah balok beton bertulang, dengan asumsi telah mengalami *spalling* sehingga tulangan tarik pada beton berubah menjadi 3D10 mm,



kemudian dilakukan perbaikan mortar *grouting*, dan perkuatan GFRP pada bagian bawah selebar balok.

- d. 2 (dua) buah balok beton bertulang yang sama dengan point c kemudian dipasang angkur *dynabolt* pada posisi sambungan beton lama dengan mortar *grouting (cold-joint)* sebanyak 5 buah.
3. Beton yang digunakan berasal dari penyedia beton (*ready mix*) dengan mutu $f'c$ 25 MPa.
4. Bahan untuk *grouting* digunakan Semen Grouting SIKA GROUT 215 per 25 kg atau mortar lem Beton SikaGrout.
5. Untuk perkuatan balok digunakan FRP type glass dari MAPEI
6. Dilakukan uji lentur untuk mengetahui kapasitas lentur dan geser balok akibat beban statis.
7. Dilakukan analisis karakteristik dan perilaku keruntuhan balok dan kegagalan geser pada seluruh benda uji.



BAB II

KERANGKA KONSEPTUAL DAN HIPOTESIS PENELITIAN

2.1 Kerangka Konseptual

Penelitian ini berfokus pada pengujian balok yang mengalami *spalling* dan menyebabkan penurunan kemampuan daya layan atau *serviceability* sehingga membutuhkan perbaikan. Penting bagi kita untuk mengambil tindakan yang cepat dan tepat dalam memperbaiki kondisi balok yang mengalami *spalling* (Torres-Acosta et al., 2007). Asumsi awal terjadinya korosi pada tulangan dengan mengganti tulangan awal D13 menjadi D10 kemudian dilakukan perbaikan dengan mortar *grouting*. Untuk mengganti luasan tulangan yang berkurang akibat korosi maka dilakukan perkuatan menggunakan lembaran GFRP yang dipasang pada bagian bawah atau pada sisi tarik balok yang ditempel dan direkatkan menggunakan *epoxy resin*. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk melakukan simulasi fisik pada balok yang mengalami kerusakan permukaan atau *spalling* dan nampaknya perlu ditingkatkan dari segi *serviceability* atau kapasitas fungsi pelayanannya.



Gambar 8. Korosi pada baja tulangan yang menyebabkan *spalling*

Sumber: sikagroup

Balok dalam kondisi normal berfungsi sebagai titik awal teknik pemodelan. Namun, jika terjadi *spalling*, balok akan mengalami metamorfosis dengan



mengcilnya ukuran baja tulangan fleksibel pada struktur balok. Dampak struktural yang disebabkan oleh pengelupasan ditunjukkan oleh penurunan ini. Sebagai kesimpulan, penelitian ini menciptakan gambaran konseptual dan visual mengenai dampak *spalling* pada balok beton dan pentingnya meningkatkan kemudahan perawatan dalam situasi ini. **Gambar 8** menunjukkan bahwa korosi tulangan dapat menyebabkan kerusakan pada beton. Volume material korosi, akibat keberadaan zat agresif, sekitar 4 hingga 6 kali lebih besar dari volume baja. Evolusi korosi yang berkelanjutan pada struktur beton bertulang akan menyebabkan hilangnya daya lekat antara beton dan tulangan baja, hilangnya keuletan baja, dan pengurangan luas penampang tulangan baja, yang dapat mempengaruhi stabilitas struktur (Zabihi-Samani et al., 2018). Oleh karena itu, dampak korosi pada struktur beton bertulang menyebabkan gaya ekspansi di sekitar bagian logam, yang jika melebihi kekuatan tarik beton, awalnya akan menyebabkan retak dan kemudian *spalling* pada penutup beton (X. Zhang et al., 2021).

Hal ini dapat terjadi karena korosi pada besi beton dapat menyebabkan penurunan luas penampang dan kekuatan tulangan, sehingga dapat mengancam keamanan dan keselamatan struktur beton bertulang. Untuk itu perlu dilakukan tindakan pencegahan dalam rangka menghindari kerusakan struktural pada balok beton bertulang tersebut. Tindakan pencegahan tersebut dapat meliputi perbaikan atau penggantian beton yang telah mengalami *spalling* menggunakan system *grouting*. Berdasarkan penelitian sebelumnya yang dikemukakan Chaudhry (2007), *grouting* menjadi salah satu teknik efektif dalam meningkatkan kuat tekan dan modulus elastisitas dari material beton. Selain itu, teknik ini juga mampu mengurangi deformasi maksimum saat terjadi gempa.

Di tahun 2010, Jumaat et al. melakukan penelitian yang menggunakan dua jenis bahan perbaikan, yaitu Sika Microcrete 2000 dan Sika MonoTop R40. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kinerja balok beton bertulang yang diperbaiki menggunakan bahan perbaikan tersebut memiliki pengaruh yang baik dan dapat diaplikasikan pada balok beton bertulang yang mengalami kerusakan. Tahun 2014, Ju et al., menemukan bahwa penggunaan *grouting* kimia hidrofilik menggunakan silanol (HCGS) mampu meningkatkan kinerja material yang digunakan untuk



memperkuat bangunan dan struktur bangunan lama. Beberapa tahun kemudian, Ozyildirim & Moruza, (2016) melakukan studi yang menguji tiga bahan *grouting*; grout yang tidak menyusut, engineered cementitious composite (ECC) dengan serat alkohol polivinil, dan ultra-high-performance concrete (UHPC) dengan serat baja. Mereka melihat kinerja tersebut pada dua jembatan dan berhasil menemukan bahwa ECC memiliki kinerja terbaik, tidak mengalami kebocoran dalam periode pengamatan 3 bulan dan dapat berfungsi dengan baik di kedua jembatan setelah satu tahun pengamatan.

Zhang et al., pada tahun 2019 menunjukkan bahwa bahan *grouting* baru memiliki proporsi bahan terbaik dan ketahanan terhadap permeabilitas. Setelah itu, hasil penelitian dari Cheng et al. (2020) memberikan pengertian bahwa kepadatan *grouting* pada balok prategang memiliki pengaruh pada kinerja mekanik struktur tersebut. Meskipun efek kepadatan *grouting* pada tahap awal retakan pada balok terbilang kecil, efek tersebut menjadi lebih jelas setelah balok retak. Pada tahun 2021, S. Zhang et al., mengembangkan metode perkuatan *grouting* baru untuk memperkuat retakan geser pada PCHSB (Prestressed Concrete Hollow Slab Beam) yang telah digunakan selama 20 tahun pada jembatan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa metode Perkuatan *grouting* baru dengan UHPC (*Ultra-High Performance Concrete*) pada ujung balok dapat meningkatkan sifat mekanik balok secara efektif. Akhirnya, pada penelitian yang dilakukan Kim et al., (2021) terbukti penggunaan material *grouting* dapat membantu meningkatkan kapasitas daya dukung geser secara efektif dan menghambat perkembangan retakan miring. Dalam penelitian ini, elemen struktural beton yang rusak diperkuat menggunakan *textile reinforced concrete* (TRC) dengan metode instalasi on-site. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode instalasi yang diusulkan efektif untuk memperkuat beton yang rusak tersebut. Setelah dimensi balok telah kembali seperti awal akibat dari perlakuan *grouting* pada area *spalling* maka perlu tindak lanjut dengan perkuatan struktur menggunakan FRP (**Gambar 9**).



Gambar 9. Penggunaan FRP sebagai perkuatan pada girder jembatan

Sumber: <https://www.codot.gov>

Dalam dua dekade terakhir, penggunaan *Fiber Reinforced Polymer* (FRP) pada dalam rehabilitasi struktur beton yang mengalami kerusakan akibat korosi tulangan baja telah meningkat penggunaannya. Salah satunya adalah penggunaan laminasi *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) yang terbukti mampu meningkatkan kinerja struktural beton terkorosi, seperti yang ditunjukkan oleh Sherwood & Soudki, (2000) . Metode perkuatan lainnya termasuk penerapan Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP), yang menurut Oh & Sim, (2004) dapat semakin meningkatkan beban ultimate balok bila sistem pengikatan yang efektif diterapkan pada ujung pelat, seperti pengikatan U-wrap. Studi tentang kekuatan lentur spesimen balok yang diperkuat GFRP setelah terpapar lingkungan yang berbeda oleh Almusallam, (2006) mengungkapkan bahwa kondisi lingkungan tidak mempengaruhi kekuatan lentur tersebut. Penelitian oleh (Masoud & Soudki, (2006) dan Tigeli et al., (2012) juga mengonfirmasi keefektifan CFRP dalam memperbaiki kerusakan korosi pada balok beton bertulang. Menariknya, penggunaan material CFRP memberikan peningkatan kapasitas beban yang lebih besar dibandingkan dengan GFRP atau material hibrida, dengan konfigurasi Perkuatan hibrida



menggunakan kombinasi CFRP dan GFRP menghasilkan peningkatan 138% dalam kapasitas beban (Attari et al., 2012).

Xie & Hu, (2013) membandingkan tiga metode perbaikan yang berbeda menggunakan lembaran CFRP, seperti metode langsung perekatan CFRP, metode perekatan CFRP setelah mengganti beton yang rusak, dan metode modifikasi yang dikembangkan berdasarkan perbaikan substrat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode modifikasi lebih sesuai untuk balok yang mengalami kerusakan lebih parah, sedangkan metode perekatan langsung CFRP lebih cocok untuk kerusakan ringan. Pada penelitian yang dilakukan Sultan & Djamaluddin, (2017) menggunakan GFRP untuk perkuatan balok beton yang telah direndam dalam air laut, terungkap bahwa lingkungan laut dan durasi rendaman mempengaruhi penurunan kapasitas lentur balok beton. Selain itu, panjang ikatan antara lembaran GFRP dan beton memiliki pengaruh signifikan terhadap kapasitas momen balok beton bertulang yang diperkuat GFRP (Djamaluddin et al., 2015). Studi eksperimental tentang efek beban kelelahan juga menunjukkan peningkatan kapasitas lentur balok beton bertulang yang diperkuat GFRP (Tata et al., 2018).

Mohammad Ranjbar et al., (2017) melakukan penelitian untuk memperbaiki balok beton bertulang yang rusak akibat korosi dengan menggunakan lembaran CFRP sebagai perkuatan. Hasil penelitian mereka menunjukkan bahwa penggunaan lembaran CFRP dalam Perkuatan balok beton bertulang yang rusak akibat korosi dapat meningkatkan kapasitas beban balok. Selain itu, konfigurasi Perkuatan yang berbeda-beda dengan menggunakan lembaran CFRP memberikan peningkatan kapasitas beban yang berbeda pula. Metode Perkuatan dengan lembaran CFRP yang membentuk pola U-shape terbukti memberikan kapasitas beban balok yang lebih baik dibandingkan dengan metode Perkuatan dengan lembaran CFRP yang hanya ditempatkan pada bagian bawah balok. Dalam penelitian yang dilakukan oleh Djamiluddin & Irmawaty, (2017), mereka menguji pengaruh paparan air laut terhadap kapasitas momen ultimate balok beton yang diperkuat dengan lembaran FRP. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa kapasitas momen ultimate balok beton yang diperkuat dengan lembaran FRP akan menurun seiring dengan meningkatnya paparan air laut. Namun, faktor keamanan struktur masih tetap tinggi



meskipun terjadi penurunan kapasitas. Selain itu, penelitian ini juga berhasil mengembangkan model matematika yang dapat memprediksi kapasitas momen ultimate balok beton yang diperkuat dengan lembaran FRP setelah terpapar air laut dalam jangka waktu yang lama.

Dalam penelitian oleh Yang et al., (2021), mereka menguji efektivitas penggunaan lembaran FRP yang diperkuat dengan jaket U untuk memperkuat balok dengan tulangan yang telah mengalami korosi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa jaket U CFRP efektif dalam menekan delaminasi lapisan beton dan meningkatkan utilitas lembaran CFRP. Sedangkan Ali et al., (2021) menunjukkan bahwa penggunaan lembaran CFRP dan GFRP dapat meningkatkan kapasitas lentur balok secara signifikan. Dalam penelitian tersebut, kapasitas lentur maksimum balok meningkat antara 14,8% hingga 26,6% dengan penggunaan lembaran CFRP, dan antara 7,2% hingga 11,8% dengan penggunaan lembaran GFRP. Teknik Perkuatan ini juga efektif dalam memperbaiki balok yang telah rusak. Selain itu, penelitian tersebut juga menemukan ketebalan optimal Perkuatan pada daerah momen lentur positif dan negatif serta variasi regangan pada momen lentur positif dan negatif.

Idris et al., (2019) menunjukkan bahwa penggunaan GFRP dalam Perkuatan balok beton bertulang dapat meningkatkan kapasitas beban lentur dan kekuatan geser balok, serta mencegah keruntuhan yang rapuh. Namun, penelitian yang dilakukan oleh Machmud et al. (2019) menunjukkan bahwa penggunaan CFRP secara signifikan lebih efektif dalam meningkatkan kapasitas beban balok beton bertulang yang mengalami yield pada tulangnya dibandingkan dengan penggunaan GFRP. Penelitian tersebut juga menemukan bahwa penambahan lebar strap tidak terlalu efektif dalam meningkatkan kapasitas beban, dan mode kegagalan yang terjadi pada semua spesimen adalah debonding failure dengan pola retak lentur.

Askar et al., (2022). Penggunaan FRP dalam meningkatkan kualitas beton bertulang diakui sebagai teknik yang mengoptimalkan kekuatan bahan, mengurangi risiko kerusakan, dan mengurangi dampak lingkungan negatif. Komposit perekat eksternal yang diperkuat dengan serat polimer semakin populer dalam sektor



konstruksi untuk memperbaiki struktur yang telah mengalami kerusakan. Selain itu, penggunaan FRP juga membawa manfaat seperti pengurangan penggunaan energi dan emisi karbon dalam proses produksi serta mengurangi biaya awal bahan yang signifikan (Solahuddin & Yahaya, 2023). Nadhim Hassan et al., (2022) melakukan perbaikan balok menggunakan lembaran CFRP dan pelat baja, dan hasil penelitian menunjukkan bahwa perbaikan dengan lembaran CFRP dapat meningkatkan beban ultimate balok hingga 154,0% - 179,5% kali lipat dari beban pada balok asli. Lebih lanjut, perbaikan dengan lembaran CFRP juga memiliki efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan perbaikan dengan pelat baja. Perkuatan dan rehabilitasi struktur beton bertulang menggunakan komposit serat polimer diperkuat (FRP) dianggap sebagai salah satu teknik yang paling menjanjikan dalam beberapa dekade terakhir.

Al-Mashghary (2021) mengusulkan teknik perbaikan baru dengan menggunakan batang CFRP dan baut jangkar untuk menyempurnakan kinerja mekanis balok beton bertulang yang terkorosi dan untuk mengatasi mode kegagalan umum yang terkait dengannya penggunaan teknik perkuatan klasik. Teknik ini dikembangkan dengan menambatkan batang CFRP ke bagian tegangan balok beton bertulang menggunakan dua pelat baja dan baut jangkar, serta dilapisi pelapis beton bagian bawah balok beton. Untuk tujuan ini, pekerjaan eksperimental dan simulasi analitis dilakukan untuk menguji empat balok yang ditumpu secara sederhana dalam keadaan lentur. Kesimpulannya, hasil eksperimen dan analitis mengungkapkan efisiensi komposit yang diusulkan teknik perkuatan, dimana kapasitas beban ultimit dan defleksi maksimum balok perkuatan masing-masing meningkat menjadi 32% dan 52%. Pengembangan teknik Perkuatan menggunakan FRP dalam perbaikan dan rehabilitasi struktur beton bertulang juga memberikan kontribusi signifikan terhadap kekuatan dan usia panjang struktur tersebut. Dengan pemahaman yang baik tentang kondisi *spalling* dan potensi kegagalan yang mungkin terjadi, kita dapat mengambil langkah-langkah yang tepat untuk memperbaiki dan memperkuat balok beton bertulang yang mengalami *spalling*, sehingga struktur bangunan tetap aman dan dapat berfungsi dengan baik. Kerangka konseptual penelitian diuraikan seperti pada **Gambar 10**.



Gambar 10. Kerangka konseptual penelitian



2.2 Hipotesis Penelitian

Hipotesis pertama yang dapat dijelaskan adalah bahwa mortar *grouting* secara efektif dapat memperbaiki kerusakan fisik seperti selimut beton yang terkelupas pada sisi tarik balok beton bertulang. *Grouting* akan mengisi rongga-rongga yang terbentuk akibat *spalling* dan meningkatkan integritas struktural balok. Hal ini didasarkan pada pengamatan bahwa *grouting* memiliki kemampuan untuk menyusup ke dalam rongga-rongga kecil dan mengisi ruang pori di dalam beton. Penggunaan *grouting* diharapkan dapat mengembalikan kekuatan dan kestabilan balok yang rusak akibat *spalling*. Berikutnya adalah bahwa *grouting* memiliki keterbatasan dalam memperbaiki kapasitas lentur balok secara optimal akibat beton lemah terhadap gaya tarik. Oleh sebab itu, dilakukan penambahan lembaran GFRP pada sisi bawah balok dengan tujuan untuk meningkatkan kapasitas lentur pasca *grouting*.

Hipotesis kedua adalah bahwa berdasarkan hasil penelitian sebelumnya dengan perkuatan dengan mortar *grouting* dan lembaran GFRP, sambungan pada beton lama dengan mortar *grouting (cold joint)* tidak terjadi interaksi yang baik akibat kurangnya treatment yang dilakukan mengakibatkan terjadinya kegagalan pada sambungan tersebut sebelum balok mencapai kapasitas ultimitnya ataupun GFRP belum mencapai kondisi regangan ultimit. Perlakuan dengan memberikan kekasaran dan pemberian sika-bond sebelum pengecoran mortar *grouting* belum memberikan ikatan yang baik antara sambungan *cold-joint longitudinal*.

Hipotesis ketiga dijelaskan bahwa upaya meningkatkan kuat geser atau lekatan pada sambungan *cold-joint* dapat diupayakan dengan memberikan perkuatan geser salah satunya menggunakan angkur *dynabolt* yang dengan mudah diaplikasikan dan diterapkan dilapangan. Pemberian angkur *dynabolt* ini diharapkan akan memberikan sumbangan geser yang cukup untuk mencegah delaminasi atau lepasnya mortar *grouting* dari lekatan dengan beton lama sehingga perkuatan dengan GFRP dapat mencapai kapasitas ultimit sebelum balok mengalami keruntuhan.

Hipotesis keempat diketahui bahwa penggunaan GFRP akan mempengaruhi regangan pada masing-masing material penyusun balok. Lembaran GFRP



diperkirakan dapat mengurangi regangan lentur pada tulangan dengan mengambil alih sebagian tegangan tarik, sementara regangan beton dan GFRP diasumsikan akan meningkat seiring peningkatan beban lentur pada balok. Hal ini menggambarkan peran GFRP dalam memodifikasi respons material penyusun balok terhadap gaya lentur sehingga diharapkan penggunaan GFRP dapat meningkatkan kemampuan dan kapasitas lentur balok beton bertulang yang telah mengalami kerusakan akibat *spalling*.

Pemilihan bahan dan metode *grouting* yang tepat sangat penting dalam menguji hipotesis-hipotesis tersebut. *Grouting* yang tepat diharapkan mampu mengisi ruang kosong akibat *spalling* dan memperbaiki dimensi balok yang rusak tanpa mengubahnya secara signifikan. Oleh karena itu, pemilihan bahan dan metode *grouting* yang tepat akan menjadi faktor penting dalam mencapai efektivitas perbaikan dan perkuatan. Selain itu dianggap penting, untuk mengevaluasi perilaku lentur dan interaksi antar material penyusun balok, pengukuran regangan pada baja, beton, dan GFRP. Data regangan ini dapat membantu dalam memahami respons material terhadap beban lentur dan sejauh mana perkuatan GFRP dapat mempengaruhi distribusi regangan dalam balok. Diharapkan hasil pengukuran ini dapat memberikan informasi yang berguna dalam menguji hipotesis-hipotesis yang telah diajukan dan meningkatkan pemahaman tentang efektivitas perbaikan dan perkuatan struktur beton bertulang. Dalam riset ini dilakukan pengujian lentur dengan beban titik di tengah bentang balok. Eksperimen ini dianggap mampu mensimulasikan momen lentur maksimum yang terjadi pada balok. Dalam proses pengujian, pola retak lentur diharapkan akan teramati mulai dari daerah momen maksimum dan merambat ke arah sumbu netral balok. Lebar retak lentur pada balok yang diperkuat dengan GFRP diprediksi akan lebih kecil dibandingkan dengan balok tanpa GFRP, mengingat peran GFRP akan cukup signifikan dalam mencegah dan memperlambat perambatan retak.

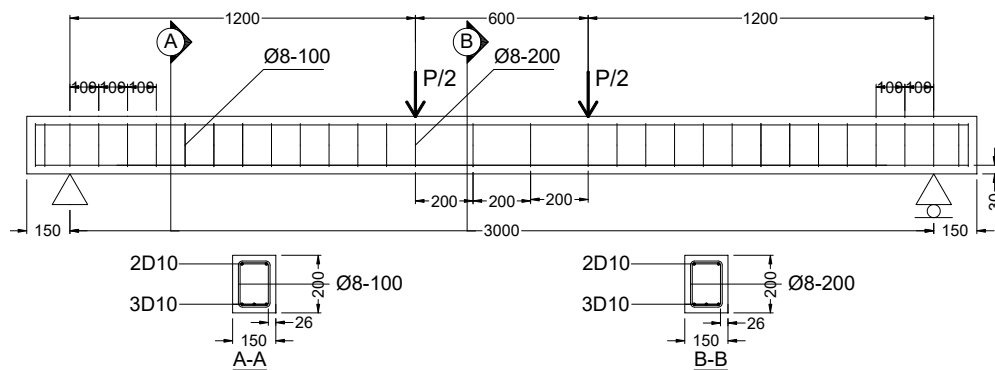
Penelitian ini bersifat eksperimental dengan melakukan serangkaian pengujian di laboratorium dan kajian pustaka tentang perbaikan balok pasca *spalling* menggunakan *grouting* dengan perkuatan GFRP sebagai perkuatan lentur balok beton bertulang serta penambahan angkur *dynabolt* pada sambungan *cold-*



joint. Penelitian ini dimulai dengan persiapan, pencampuran, pengujian karakteristik properti, uji balok beton, dan pengolahan data. Obyek utama penelitian adalah struktur balok beton bertulang normal yang diasumsikan mengalami *spalling* sehingga dilakukan perbaikan dengan *grouting* dan perkuatan menggunakan GFRP serta angkur *dynabolt*. Kegiatan penelitian akan dilakukan tiga tahap, yaitu 1) pengujian properti material balok beton, 2) perhitungan analitis dan 3) pengujian kapasitas balok beton.

2.3 Desain penelitian

Dimensi dan tulangan balok dianalisis dengan metode kekuatan batas (*Ultimate Strength Design*) yang merupakan pendekatan yang umum digunakan dalam perancangan struktur. Metode ini mempertimbangkan kekuatan maksimum material dan mengestimasi beban maksimum yang dapat ditahan oleh balok sebelum terjadi kegagalan struktural. Untuk memvalidasi hasil analisis secara teoritis, dilakukan pengujian balok menggunakan instrumen standar umum pengujian balok. Pengujian ini mencakup pemuatan beban secara bertahap pada titik-titik tertentu pada balok, pemantauan deformasi dan tegangan, serta pencatatan data yang akurat.

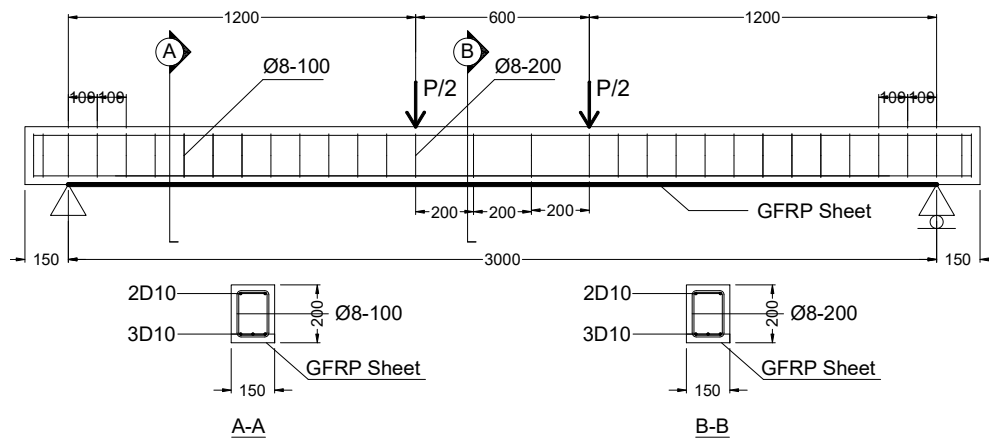


Gambar 11. Desain benda uji balok normal tanpa perkuatan (BK)

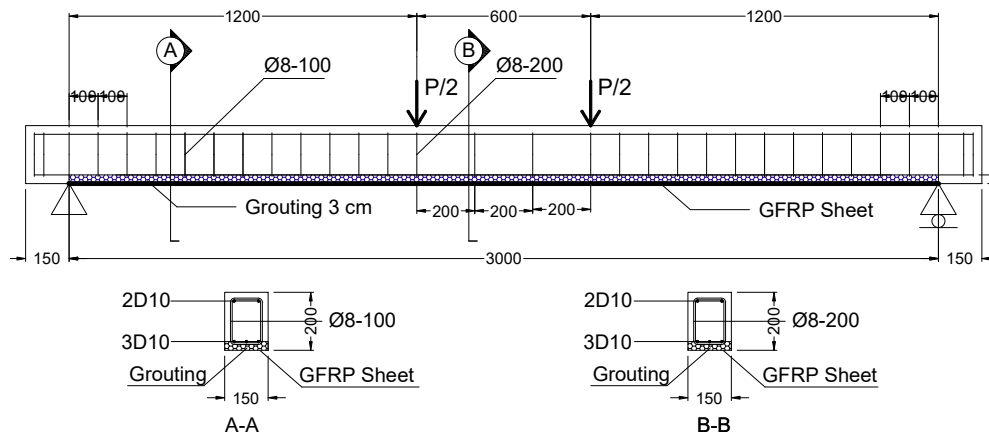
Penggabungan metode analitis dan pengujian fisik memberikan landasan yang kuat untuk merancang balok yang aman dan andal. Metode kekuatan batas memberikan pendekatan teoritis yang kuat untuk merancang struktur, sedangkan



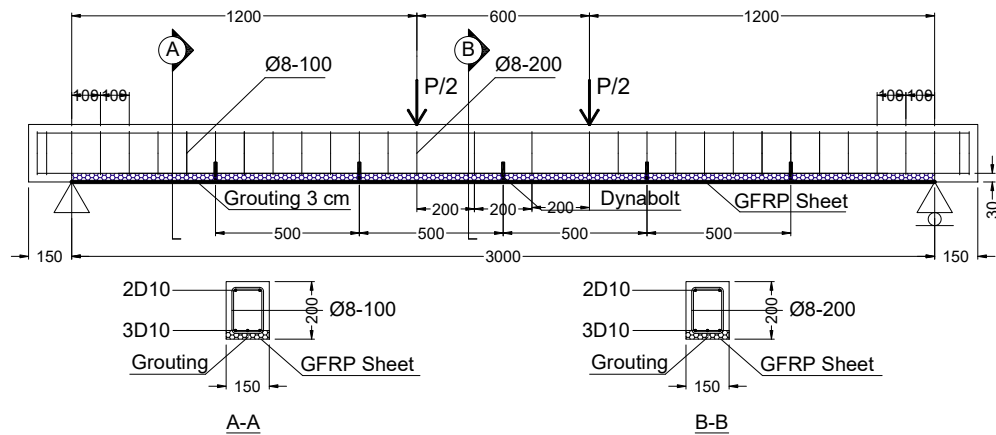
pengujian fisik membantu mengkonfirmasi ketepatan perhitungan analitis dan memvalidasi kinerja aktual dari struktur tersebut secara visual. Desain benda uji balok dengan ukuran 150 mm x 200 mm x 3300 mm seperti terlihat pada **Gambar 11** sampai dengan **Gambar 14** merupakan detail benda uji pada balok kontrol, balok dengan perkuatan GFRP, balok dengan perbaikan *grouting* dan perkuatan GFRP, dan balok dengan perbaikan *grouting*, pemasangan angkur *dynabolt* dan perkuatan GFRP pada sisi bawah dari tumpuan ke tumpuan. Keterangan kode identitas benda uji adalah sebagai berikut; B = Balok, K = Kontrol, N = Normal, S = *Strenghtening*, G = *Grouting*, DB = *Dynabolt* sebagai berikut



Gambar 12. Desain benda uji monolit dengan perkuatan GFRP (BNS)



Gambar 13. Desain benda uji dengan mortar *grouting* dan perkuatan GFRP (BGS)



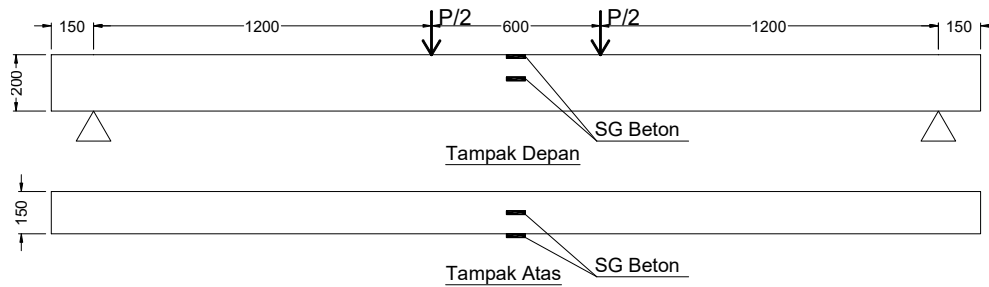
Gambar 14. Desain benda uji dengan angkur *dynabolt*, *grouting*, dan perkuatan GFRP (BGSDDB)

Adapun variasi benda uji balok beton bertulang yang digunakan adalah ditunjukkan pada **Tabel 1.** sebagai berikut:

Tabel 1. Variasi benda uji balok beton bertulang

Kode sampel	Perbaikan	Perkuatan dengan GFRP	Jumlah (buah)
BK	-	-	2
BNS	-	daerah lentur	2
BGS	Mortar <i>grouting</i>	daerah lentur	2
BGSDB	Mortar <i>grouting</i> dan angkur <i>dynabolt</i>	daerah lentur	2

Berikutnya adalah pemasangan *strain gauge* (SG) untuk mengukur regangan pada benda uji. Alat ini berbentuk kawat logam yang bersifat insulatif (isolasi) yang ditempel pada benda yang akan diukur regangannya yang berasal dari pembebanan. Untuk pengujian di laboratorium pemasangan SG dipasang pada baja, beton dan GFRP. Kode untuk pemasangan SG pada baja disebut dengan SG-baja, pada beton dengan SG-beton dan pada GFRP dengan SG-GFRP, untuk titik pemasangan *Strain gauge* (SG) dapat dilihat pada **Gambar 15** sampai dengan **Gambar 17.**



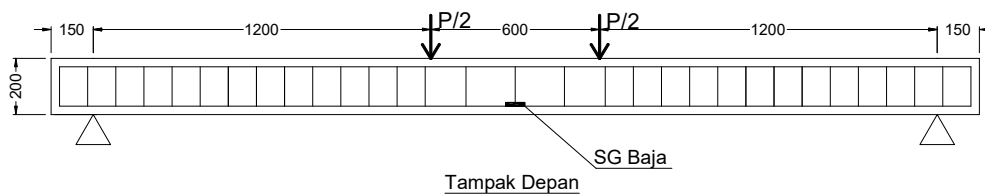
Gambar 15. Penempatan strain gauge (SG) beton pada beton benda uji balok

Keterangan kode *strain gauge* beton adalah sebagai berikut; SG = *Strain gauge*, beton = balok beton, sedangkan nomor 1, 2, dan seterusnya menunjukkan nomor *strain gauge*. Adapun keterangan *strain gauge* beton dapat dilihat pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Kode strain gauge pada beton

Kode	Keterangan
SG-beton 1	Dipasang pada sisi atas as balok beton
SG-beton 2	Dipasang pada sisi samping balok beton $\frac{1}{4} h$

Lokasi pemasangan *strain gauge* baja ditunjukkan pada **Gambar 16**



Gambar 16. Titik pemasangan strain gauge baja pada tulangan lentur

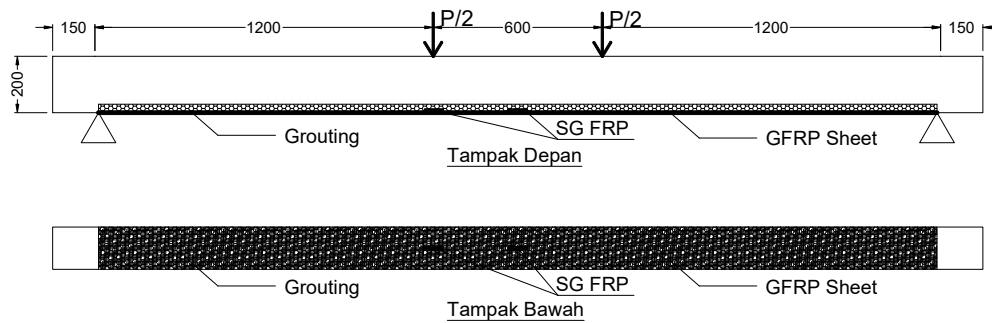
Keterangan kode *strain gauge* baja adalah sebagai berikut; SG = *Strain gauge*, Baja = tulangan baja, sedangkan nomor 1, 2, dan seterusnya menunjukkan nomor *strain gauge*. Adapun keterangan penempatan *strain gauge* baja dapat dilihat pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Kode *strain gauge* pada baja

Kode	Keterangan
SG-baja 1	Dipasang pada tulangan tarik pada as tengah bentang
SG-baja 2	Dipasang pada tulangan tarik sisi kanan tengah bentang



Lokasi pemasangan *straingauge* pada GFRP ditunjukkan pada **Gambar 17**.



Gambar 17. Titik pemasangan strain gauge FRP pada ketiga variasi benda uji balok

Keterangan kode *strain gauge* FRP adalah sebagai berikut; SG = *Strain gauge*, FRP = *Fiber Reinforced Polymer*, sedangkan nomor 1, 2, 3, dan seterusnya menunjukkan nomor *strain gauge*. Adapun keterangan *strain gauge* FRP dapat dilihat pada **Tabel 4**.

Tabel 4. Kode strain gauge pada FRP

Kode	Keterangan
SG-FRP 1	Dipasang pada sisi bawah as balok dipermukaan FRP
SG-FRP 2	Dipasang pada sisi bawah dengan jarak 300 mm dari as balok dipermukaan FRP (dibawah titik beban)