

DISERTASI

**STUDI APLIKASI LEMBARAN FRP *HYBRID* SEBAGAI
PERKUATAN LENTUR BALOK BETON BERTULANG**

***(Study on Application of Hybrid FRP Sheet as Flexural
Strengthening of Reinforced Concrete Beams)***

**J A S M A N
D013171016**



**PROGRAM STUDI S3 ILMU TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2023**

LEMBAR PENGESAHAN

**STUDI APLIKASI LEMBARAN FRP *HYBRID* SEBAGAI
PERKUATAN LENTUR BALOK BETON BERTULANG**

***STUDY ON APPLICATION OF HYBRID FRP SHEET AS
FLEXURAL STRENGTHENING OF REINFORCED
CONCRETE BEAMS***

Disusun dan Diajukan oleh

J A S M A N
NIM. D013171016

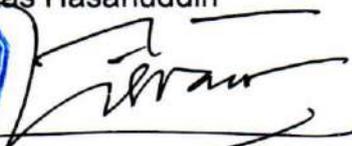
Telah dipertahankan di depan Panitia Ujian Disertasi
Pada tanggal 12 Januari 2023
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui
Komisi Penasehat

Prof. Dr. Eng. H. Rudy Djamaluddin, ST.,M.Eng
Promotor


Dr. Eng. Ir. Hj. Rita Irmawaty, ST., MT
Co-Promotor


Dr. Eng. A. Arwin Amiruddin, ST.,MT
Co-Promotor


Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin
Prof. Dr. Eng. Ir. M. Isran Ramli, ST., MT., IPM


Ketua Program Studi
S3 Teknik Sipil
Dr. Eng. Ir. Hj. Rita Irmawaty, ST.,MT

PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : J a s m a n
Nomor Induk : D013171016
Program Studi : S-3 Teknik Sipil

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa disertasi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambilan tulisan, atau pemikiran orang lain. Apabila dikemudian hari terbukti dan dapat dibuktikan bahwa sebagian atau seluruh isi disertasi ini hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 12 Januari 2023

Yang Menyatakan,



J a s m a n

PRAKATA

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah *Subhanahu wa Ta'ala* atas limpahan rahmat dan berkah Nya dengan selesainya disertasi ini. Serta salam dan shalawat penulis ucapkan kepada junjungan Nabi Muhammad *Shallallahu 'Alaihi wa Sallam*.

Tulisan ini merupakan disertasi yang menjadi bagian dari proses penyelesaian studi doktoral di Universitas Hasanuddin Fakultas Teknik. Penulis menyadari sepenuhnya bahwa banyak kendala yang dihadapi dalam penyusunan disertasi ini, namun masih memiliki banyak kekurangan sehingga masukan dan kritikan diharapkan dapat memperbaiki dan meningkatkan mutunya. Oleh karena itu, dengan segala ketulusan, penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada :

1. **Prof. Dr. Eng. H. Rudy Djamaluddin, ST.M.Eng.**, sebagai Ketua Komisi Penasehat (Promotor), dan **Dr. Eng. Hj. Rita Irmawaty, ST., M.T. Dr. Eng. A. Arwin Amiruddin, ST.MT.**, sebagai Anggota Komisi Penasehat (Ko- promotor) atas bantuan dan bimbingan yang telah diberikan mulai dari pengembangan minat terhadap permasalahan penelitian sampai penyelesaian penulisan disertasi ini.
2. **Prof. Dr. Ing. Herman Parung, M.Eng., Prof. Dr. M. Wihardi Tjaronge, ST. M.Eng., Dr. Ir. H. Rusdi Usman Latif, MT., dan Dr. Eng. Fakhruddin, S.T., M.Eng.**, sebagai Komisi Penilai yang telah membantu memberikan masukan dan saran guna kesempurnaan disertasi ini.

3. **Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, S.T., M.T.**, selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
4. **Prof. Dr. Ir. H. M. Wihardi Tjaronge S.T., M.Eng.**, selaku Ketua Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
5. **Dr. Eng. Hj. Rita Irmawaty, ST., M.T.**, selaku Ketua program Studi S3 Teknik Sipil Universitas Hasanuddin dan seluruh dosen dan staf di lingkungan S3 Teknik Sipil.
6. **Dr. Eng. Ir. Andi Arwin Amiruddin, S.T., M.T.**, selaku Kepala Laboratorium Struktur dan Bahan Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin dan **Hasanuddin S.T.**, sebagai Laboran yang telah memberikan izin atas segala fasilitas yang digunakan.
7. **Dr.Eng. Fakhrudin, S.T., M.Eng.**, dan teman-teman mahasiswa S3 Teknik Sipil angkatan 2017, angkatan 2020 serta teman-teman mahasiswa S2, dan S1 di ruang Laboratorium Riset Rekayasa dan Perkuatan Struktur UNHAS yang telah membantu dalam proses penyelesaian disertasi ini.
8. **Sultan S.T, M.T., Yohannes S.T., M.T., mahasiswa S3, adinda Joey S.T, dan Sugira S.T**, mahasiswa S2 sebagai rekan tesis, adinda **Andi Fitri Ramadhani, Yuqni Maulidya, Farhan dan Imran Aiman** mahasiswa S1 selaku rekan tugas akhir yang senantiasa yang memberi bantuan dan masukan, semangat dan doa dalam menyelesaikan disertasi ini.

9. **Nadia, Ica, Wana, Yuyun, Ipa, Upe, Yusriah, Asihana, Melani, Fiqih, Radix, Charlie dan Fikri** serta teman asisten laboratorium yang tidak disebutkan namanya sebagai asisten laboratorium yang senantiasa banyak memberikan bantuan dan dukungan dalam penyelesaian pengujian di laboratorium.
10. Ungkapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada ayahanda tercinta **H. Muhammad Yusuf** atas doa dan dorongan semangat menuntut ilmu yang ditanamkan sejak kecil dan kepada Istriku **Nurhaedah, S.Pt., M.Si.** serta anak-anakku atas doa, dukungan, motivasi, pengertian, kesabaran dan pengorbanan yang luar biasa selama menempuh pendidikan Doktoral S3

Makassar, Januari 2023

J a s m a n

ABSTRAK

Jasman. *Studi Aplikasi Lembaran FRP Hybrid Sebagai Perkuatan Lentur Balok Beton Bertulang* (dibimbing oleh Rudy Djamaluddin, Rita Irmawaty, A. Arwin Amiruddin)

Kerusakan struktur beton bertulang dapat terjadi akibat umur struktur, perubahan pembebanan dan bencana alam. Kebanyakan struktur yang rusak akan langsung dibongkar tanpa mempertimbangkan kemungkinan perbaikan ataupun perkuatan. Untuk meningkatkan kemampuan dan mengembalikan kekuatan struktur beton bertulang yaitu menggunakan sistem perkuatan FRP (*fiber reinforced polymer*). Perkuatan struktur dengan GFRP (*glass fiber reinforced polymer*) dan CFRP (*carbon fiber reinforced polymer*) merupakan salah satu metode perkuatan struktur yang populer saat ini. Hal ini karena mudah dalam pelaksanaan, ringan, tidak merubah geometrik struktur dan kuat tarik yang tinggi. Namun perkuatan dengan metode tersebut memiliki ciri pada kegagalan yang getas karena sifat mekanik materialnya. Maka dari itu, perlu dilakukan inovasi untuk menjadikan material tersebut lebih daktail. Salah satu yang dapat dilakukan adalah dengan membuat lembaran FRP *hybrid* (GFRP dan CFRP). Penggabungan keduanya sebagai perkuatan diharapkan agar elemen struktur lebih daktail dan kapasitas lentur meningkat. Metode yang digunakan adalah dengan mengurangi persentase volume CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) terhadap GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*). Penelitian ini bertujuan: 1) menganalisis propertis material lembaran FRP *hybrid* (GFRP dan CFRP); 2) menemukan rasio persentase perbandingan penggunaan lembaran FRP *hybrid* (GFRP dan CFRP) yang efektif; 3) menganalisis kapasitas lentur balok beton bertulang dengan perkuatan lembaran FRP *hybrid* (GFRP dan CFRP).

Tahapan penelitian ada dua yaitu tahap pertama pengujian tarik property mekanis FRP *hybrid* (GFRP dan CFRP) dengan variasi benda uji berupa persentase lebar CFRP terhadap GFRP berturut-turut adalah 35% (GC35), 40% (GC40), 45% (GC45), 50% (GC50), 55% (GC55), dan 60% (GC60). Pabrikasi benda uji berupa penggabungan antara GFRP dan CFRP diikat dengan resin epoksi sesuai dengan standar ASTM D 3039. Tahap kedua pengujian lentur balok beton bertulang dengan benda uji balok ukuran 150 mm x 200 mm x 3300 mm sebanyak 9 buah yang terdiri dari balok kontrol (BN) 3 buah, balok yang diperkuat lembaran FRP *hybrid* (BGC) 3 buah dan balok yang diperkuat lembaran FRP *hybrid* dengan *uwrap* (BGC Uwrap) 3 buah. Lembaran FRP *hybrid* yang digunakan sebagai perkuatan balok adalah GC40 dengan persentase GFRP 100% dan CFRP 40% terhadap lebar balok. Proses pengujian dilakukan dengan menggunakan alat *Universal Testing Machine* (UTM).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa karakteristik lembaran FRP *hybrid*, semakin kecil persentase serat karbon pada lembaran FRP *hybrid*, maka tegangan tarik ultimit dan modulus elastisitas akan menurun, namun

keuletan atau daktilitas semakin meningkat. Daktilitas dari FRP *hybrid* dipengaruhi oleh sifat serat kaca memiliki regangan ultimit yang besar dari pada serat karbon. Variasi lembaran FRP *hybrid* yang paling efektif adalah GC40 dengan persentase GFRP 100% dan CFRP 40%. Penggunaan lembaran FRP *hybrid* (GFRP dan CFRP) dan FRP *hybrid* (GFRP dan CFRP) *Uwrap* sebagai perkuatan mampu meningkatkan kapasitas beban Balok BGC sebesar 56,18 % pada balok BGC *uwrap* sebesar 60,09 % dibandingkan dengan balok normal. Mode kegagalan balok BN mengalami kegagalan *under-reinforced* sedangkan balok BGC dan balok BGC *uwrap* mengalami kegagalan *debonding*.

Kata kunci : FRP *hybrid*; GFRP; CFRP; kapasitas lentur; balok beton bertulang

ABSTRACT

Jasman. *Study on Application of Hybrid FRP Sheet as Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Beams* (Supervised by Rudy Djamaluddin, Rita Irmawaty, A. Arwin Amiruddin)

Damage to reinforced concrete structures can occur due to the age of the structure, changes in loading and natural disasters. Most damaged structures will be directly demolished without considering the possibility of repair or strengthening. To improve the ability and restore the strength of reinforced concrete structures, namely using FRP strengthening systems. Strengthening structures with GFRP and CFRP is one of the most popular structural strengthening methods today. This is because implement, lightweight, does not change the geometric structure and high tensile strength. However, reinforcement with these methods is characterized by brittle failure due to the mechanical properties of the material. Therefore, it is necessary to innovate to make the material more ductile. One thing that can be done is to make *hybrid* FRP sheets (GFRP and CFRP). Combining the two as reinforcement is expected to make the structural elements more ductile and increase flexural capacity. The method used is to reduce the volume percentage of CFRP to GFRP. This research aims to: 1) analyze the material properties of *hybrid* FRP sheets (GFRP and CFRP); 2) find the effective percentage ratio of the use of *hybrid* FRP sheets (GFRP and CFRP); 3) analyze the flexural capacity of reinforced concrete beams with *hybrid* FRP sheet reinforcement (GFRP and CFRP).

There are two stages of research, namely the first stage of mechanical property tensile testing of *hybrid* FRP (GFRP and CFRP) with a variation of test specimens in the form of the percentage of CFRP width to GFRP successively 35% (GC35), 40% (GC40), 45% (GC45), 50% (GC50), 55% (GC55), and 60% (GC60). Test specimens were fabricated by combining GFRP and CFRP bonded with epoxy resin in accordance with ASTM D 3039 standard. The second stage of flexural testing of reinforced concrete beams with beam specimens measuring 150 mm x 200 mm x 3300 mm as many as 9 pieces consisting of control beams (BN) 3 pieces, beams reinforced with FRP *Hybrid* sheets (BGC) 3 pieces and beams reinforced with FRP *Hybrid* sheets with Uwrap (BGC Uwrap) 3 pieces. The *hybrid* FRP sheet used as beam reinforcement is GC40 with a percentage of 100% GFRP and 40% CFRP to the beam width. The testing process is carried out using a Universal Testing Machine (UTM) tool.

The results showed that the characteristics of *hybrid* FRP sheets, the smaller the percentage of carbon fiber in *hybrid* FRP sheets, the ultimate tensile stress and elastic modulus will decrease, but the ductility or ductility will increase. The ductility of *hybrid* FRP is influenced by the nature of glass fiber which has a large ultimate strain than carbon fiber. The most effective *hybrid* FRP sheet variation is GC40 with a percentage of 100% GFRP and

40% CFRP. The use of FRP *Hybrid* (GFRP and CFRP) and FRP *Hybrid* (GFRP and CFRP) Uwrap sheets as reinforcement can increase the load capacity of BGC beams by 56.18% and BGC Uwrap beams by 60.09% compared to normal beams. The failure mode of BN beams experienced under-reinforced failure while BGC beams and BGC Uwrap beams experienced debonding failure.

Keywords: FRP *hybrid*; GFRP; CFRP; flexural capacity; *Reinforced Concrete (RC)* beams

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL.....	I
LEMBAR PENGESAHAN	II
PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI	III
PRAKATA.....	IV
ABSTRAK.....	VII
ABSTRACT	IX
DAFTAR ISI.....	XI
DAFTAR GAMBAR.....	XV
DAFTAR TABEL.....	XIX
DAFTAR NOTASI.....	XXI
BAB I PENDAHULUAN.....	1
A. Latar Belakang.....	1
B. Rumusan Masalah	7
C. Tujuan Penelitian	8
D. Manfaat Penelitian	8
E. Ruang Lingkup Penelitian	8
F. Sistematika Penulisan	9
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	11
A. Karakteristik Material.....	11
1. Fiber Reinforced Polymer (FRP)	11
2. Perilaku Perkuatan Balok Beton Bertulang.....	20

B.	Penelitian terdahulu	41
C.	Kerangka Pikir Penelitian	50
BAB III METODE PENELITIAN.....		51
A.	Rancangan Penelitian	51
B.	Waktu dan Lokasi Penelitian	52
C.	Bahan dan Alat Penelitian.....	52
1.	Alat ukur regangan tulangan baja	53
2.	Alat ukur regangan beton.....	53
3.	Alat ukur regangan FRP.....	53
4.	Alat ukur lendutan	53
5.	Alat uji pembebanan	54
6.	Bahan yang digunakan adalah sebagai berikut.....	55
D.	Jenis Penelitian.....	55
1.	Pengujian Material Baja	56
2.	Pengujian Properti Mekanik GFRP, CFRP dan FRP <i>Hybrid</i>	56
3.	Pembuatan Benda Uji Balok Beton Bertulang dan Silinder.....	59
4.	Pengujian Lentur Balok Beton Bertulang.....	59
E.	Desain Penelitian	61
F.	Tahapan Penelitian	70
G.	Perhitungan Analitik	74
H.	Analisis Data	95
I.	Kebaruan Penelitian	95
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....		96

A.	Sifat-Sifat Bahan	96
1.	Pengujian Tarik Baja Tulangan	96
2.	Pengujian Sifat Mekanis Beton	97
B.	Karakteristik Properti Lembaran FRP	99
2.	Pengujian Kuat Tarik FRP	101
2.	Mode Kegagalan FRP <i>Hybrid</i>	105
C.	Karakteristik Balok Beton Bertulang	108
1.	Kapasitas Lentur Balok Beton Bertulang.....	108
2.	Hubungan Beban dan Lendutan	112
3.	Hubungan Beban dan Regangan Baja	116
4.	Hubungan Beban dan Regangan Beton	121
5.	Hubungan Beban dan Regangan FRP	126
D.	Distribusi Regangan Balok.....	130
E.	Kapasitas Perkuatan FRP.....	132
1.	Distribusi Regangan FRP	132
2.	Kapasitas Rekatan Balok Perkuatan FRP.....	135
F.	Pola Retak dan Mode Kegagalan	138
1.	Pola Retak.	138
2.	Mode Kegagalan Balok FRP <i>Hybrid</i>	140
G.	Kebaharuan / Novelty.....	145
BAB V PENUTUP		147
A.	Kesimpulan	147
B.	Saran	149

DAFTAR PUSTAKA.....151

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1. Kurva tegangan-regangan uji kuasi-statis dari GFRP, CFRP dan komposit <i>hybrid</i> (K Naresh Dkk, 2018)	5
Gambar 2. <i>Fiber</i> tipe lembaran	13
Gambar 3. CFRP (<i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i>)	15
Gambar 4. GFRP (<i>Glass Fiber Reinforced Polymer</i>)	16
Gambar 5. <i>Epoxy resin</i>	17
Gambar 6. Kurva tegangan - regangan	21
Gambar 7. Distribusi tegangan pada balok	22
Gambar 8. Penampang balok tulangan rangkap	24
Gambar 9. Blok tegangan balok FRP	30
Gambar 10. Model analisis regangan FRP	33
Gambar 11. Putusnya FRP dan hancurnya beton pada sisi tekan	36
Gambar 12. (a) <i>Cover debonding</i> . (b) <i>FRP debonding</i> from laminate end. (c) <i>CDC</i> (critical dagonal crack) <i>debonding</i> . (d) <i>debonding</i> from flexural crack atau <i>IC</i> (intermediate crack) <i>debonding</i> .	37
Gambar 13. Kerangka pikir penelitian	50
Gambar 14. Prosedur penelitian	51
Gambar 15. <i>Strain gauge</i> dan perekat	53
Gambar 16. Linear variable displacement transducer (LVDT)	54
Gambar 17. <i>Data logger</i> TDS-530	55
Gambar 18. Benda uji properti FRP (ASTM D 3039)	57
Gambar 19. Set up benda uji properti FRP	58
Gambar 20. Desain <i>set-up</i> benda uji	60
Gambar 21. <i>Set up</i> benda uji di laboratorium	60

Gambar 22. Desain beban dan balok	61
Gambar 23. Desain benda uji balok normal tanpa perkuatan.....	62
Gambar 24. Desain benda uji balok dengan perkuatan lembaran FRP <i>hybrid</i> (GFRP dan CFRP) tanpa <i>Uwrap</i> GFRP.....	63
Gambar 25. Desain benda uji balok dengan perkuatan FRP <i>hybrid</i> (GFRP dan CFRP) dengan <i>Uwrap</i> GFRP	63
Gambar 26. Penempatan <i>strain gauge</i> (SG) baja pada tulangan benda uji balok beton	65
Gambar 27. Titik pemasangan <i>strain gauge</i> beton pada benda uji balok beton.....	67
Gambar 28. Penempatan <i>strain gauge</i> (SG) FRP pada benda uji balok beton.....	69
Gambar 29. Pabrikasi benda uji balok beton	71
Gambar 30. Perawatan beton.....	71
Gambar 31. Proses pemasangan lapisan FRP <i>hybrid</i> (GFRP dan CFRP).....	74
Gambar 32. Balok diatas dua tumpuan sederhana	78
Gambar 33. Penampang balok BN	78
Gambar 34. Detail penulangan balok normal BN	81
Gambar 35. Tahap beton tanpa retak	82
Gambar 36. Tahap tegangan elastis pada balok	84
Gambar 37. Momen ultimit M_n balok BN	85
Gambar 38. Diagram tegangan-regangan baja dan FRP <i>hybrid</i>	90
Gambar 39. Luas penampang transformasi	93
Gambar 40. Pengujian kuat tarik tulangan baja	97
Gambar 41. Pengujian karakteristik beton	98
Gambar 42. Hubungan beban – regangan analisis awal FRP <i>hybrid</i> ...	100

Gambar 43. Proses pengujian lembaran FRP Hybrid (GFRP dan CFRP).....	101
Gambar 44. Hubungan tegangan-regangan (CFRP – GFRP - FRP hybrid).....	102
Gambar 45. Hubungan tegangan-regangan FRP hybrid (GFRP dan CFRP).....	103
Gambar 46. Mode kegagalan GC35	106
Gambar 47. Mode kegagalan GC40	106
Gambar 48. Mode Kegagalan GC45.....	107
Gambar 49. Beban maksimum rata-rata seluruh benda uji	110
Gambar 50. Beban maksimum rata-rata seluruh benda uji	111
Gambar 51. Hubungan beban - lendutan benda uji BN.....	113
Gambar 52. Hubungan beban - lendutan benda uji BGC.....	113
Gambar 53. Hubungan beban - lendutan benda uji BGC Uwrap.....	114
Gambar 54. Hubungan beban - lendutan ketiga benda uji	114
Gambar 55. Hubungan beban – regangan baja benda uji BN.....	117
Gambar 56. Hubungan beban – regangan baja benda uji BGC	118
Gambar 57. Hubungan beban – regangan baja benda uji BGC Uwrap.....	119
Gambar 58. Hubungan beban – regangan baja ketiga benda uji	120
Gambar 59. Hubungan beban – regangan beton benda uji BN.....	122
Gambar 60. Hubungan beban – regangan beton benda uji BGC	123
Gambar 61. Hubungan beban – regangan beton benda uji BGC Uwrap.....	124
Gambar 62. Hubungan beban – regangan beton ketiga benda uji BGC.....	125
Gambar 63. Hubungan beban - regangan FRP hybrid pada benda uji BGC.....	127

Gambar 64. Hubungan beban dan regangan FRP <i>hybrid</i> pada benda uji BGC <i>Uwrap</i>	128
Gambar 65. Hubungan beban - regangan FRP <i>hybrid</i> pada kedua benda uji.....	129
Gambar 66. Distribusi regangan balok BN.....	130
Gambar 67. Distribusi regangan balok BGC	130
Gambar 68. Distribusi regangan balok BGC <i>Uwrap</i>	131
Gambar 69. Distribusi regangan FRP <i>hybrid</i> pada balok BGC.....	133
Gambar 70. Distribusi regangan FRP <i>hybrid</i> pada balok BGC <i>Uwrap</i> .	134
Gambar 71. Pola retak beton BN.....	139
Gambar 72. Pola retak beton BGC	139
Gambar 73. Pola retak beton BGC <i>Uwrap</i>	140
Gambar 74. Mode kegagalan balok BGC	141
Gambar 75. Pengukuran lebar retak benda uji BGC	142
Gambar 76. Mode kegagalan balok BGC <i>Uwrap</i>	143
Gambar 77. Pengukuran lebar retak benda uji BGC <i>Uwrap</i>	144

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1. Karakteristik CFRP (<i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i>).....	15
Tabel 2. Karakteristik GFRP (<i>Glass Fiber Reinforced Polymer</i>) type SHE-51A.....	16
Tabel 3. Karakteristik material <i>resin epoxy</i>	18
Tabel 4. Judul dan Peneliti, Publikasi, Tujuan, Metode dan Hasil Penelitian	43
Tabel 5. Benda uji properti dengan variasi GFRP, CFRP dan FRP <i>hybrid</i> (GFRP dan GFRP).....	57
Tabel 6. Variasi benda uji balok beton bertulang.....	64
Tabel 7. Kode <i>strain gauge</i> pada beton	66
Tabel 8. Kode <i>strain gauge</i> pada beton	67
Tabel 9. Kode <i>strain gauge</i> pada FRP	70
Tabel 10. Perhitungan analisis awal FRP <i>hybrid</i>	76
Tabel 11. Ukuran blok tegangan oleh baja dan FRP <i>hybrid</i>	90
Tabel 12. Regangan oleh baja dan FRP <i>hybrid</i>	91
Tabel 13. Tegangan oleh baja dan FRP <i>hybrid</i>	91
Tabel 14. Lengan momen oleh baja dan FRP <i>hybrid</i>	91
Tabel 15. Persentase momen oleh baja dan FRP <i>hybrid</i>	92
Tabel 16. Lendutan teoritis pada balok	94
Tabel 17. Hasil pengujian tarik baja tulangan.....	96
Tabel 18. Hasil pengujian kuat tekan beton	97
Tabel 19. Hasil pengujian kuat tarik belah beton.....	98
Tabel 20. Hasil pengujian kuat lentur balok beton.....	98
Tabel 21. Tegangan, regangan dan modulus elastisitas benda uji GFRP, CFRP dan FRP <i>hybrid</i>	102

Tabel 22.	Kapasitas beban dan momen seluruh benda uji.....	109
Tabel 23.	Persentase peningkatan kapasitas beban balok perkuatan terhadap balok normal (BN)	110
Tabel 24.	Persentase peningkatan kapasitas beban balok perkuatan terhadap balok normal (BN)	111
Tabel 25.	Hubungan beban lendutan pada semua variasi benda uji ...	115
Tabel 26.	Regangan baja ketiga benda uji	120
Tabel 27.	Regangan beton pada semua balok.....	125
Tabel 28.	Regangan FRP pada semua benda uji	129
Tabel 29.	Kapasitas rekatan FRP dan tegangan rekatan FRP untuk semua benda uji.....	137
Tabel 30.	Mode kegagalan balok FRP <i>hybrid</i> dan FRP <i>hybrid</i> dengan <i>Uwrap</i> setiap variasi.....	145

DAFTAR NOTASI

Kuat Tekan Beton

- A : Luas penampang yang menerima beban
 f_c' : Kuat tekan beton
P : Beban Maksimum

Kuat Tarik Beton

- f_{ct} : Kuat tarik belah, (Mpa)
L : Panjang benda uji
D : Diameter benda uji
 E_c : Modulus elastisitas beton
 F_r : Modulus keruntuhan
I : Momen Inersia

Beton Bertulang Normal

- a : Blok tekan
 A_s : Luas tulangan tarik
 A_s' : Luas tulangan tekan
b : Lebar penampang
d : Tinggi efektif balok
h : Tinggi balok
 d' : Selimut beton
c : Jarak tepi luar atas terhadap garis netral
 ϵ_y : Regangan leleh baja

- f_y : Tegangan leleh baja
- M_n : Momen nominal balok
- C_c : Gaya tekan akibat beton
- C_s : Gaya tekan akibat tulangan baja
- ϵ_u : Regangan maksimum
- E_s : Modulus elastis baja
- ϕ_y : Sudut kelengkungan pada saat tulangan leleh
- ϕ_u : Sudut kelengkungan pada saat momen maksimum
- W_m : Lebar retak rata-rata
- ϵ_{cf} : Regangan tarik
- S_m : Spasi rata-rata retakan
- B_h : perbandingan lebar retak pada penampang tak bertulang terhadap lebar retak penampang bertulang, mulai dari lubang retak ke garis netral. SKSNI menetapkan nilai $\beta_h = 1,2$
- f_s : tegangan pada tulangan, diambil sebesar $f_s = 0,6 f_y$
- d_c : jarak antara titik berat tulangan utama sampai ke serat tarik terluar
- A : penampang potongan tarik efektif yang berada disekeliling tulangan, dimana letak dari tulangan sentris terhadap penampang tersebut.
- S_n : jumlah batang tulangan perlebar balok (b)

Balok Beton Bertulang dengan FRP

- t_f : Tebal lapisan FRP
- f_{fu} : Kekuatan tarik ultimit
- ϵ_{fu} : Regangan tarik ultimit
- E_f : Modulus elastis
- n : Jumlah lapisan FRP
- A_f : Luasan FRP
- n_f : Angka ekuivalen FRP
- I_{gt} : *Inertia gross* FRP
- K_m : Koefisien lekatan FRP
- ϵ_{cu} : Regangan ultimit beton
- ϵ_{fe} : Tegangan efektif FRP
- ϵ_s : Tegangan baja
- f_s : Level tegangan baja
- f_{fe} : Level tegangan FRP
- M_{ns} : Momen nominal akibat baja
- M_{nf} : Momen nominal FRP
- \emptyset : faktor reduksi
- AFRP : *Aramid fiber reinforced polymer*
- CFRP : *Carbon fiber reinforced polymer*
- FRP : *Fiber reinforced polymer*
- GFRP : *Galass fiber reinforced polymer*
- IC : *Intermediate crack*

LVDT : *Linear variable displacement transducer*

Mu : Momen ultimit, (Nmm)

SG : *Strain gauge*

UTM : *Universal testing machine*

σ : Tegangan, (MPa)

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Perkembangan ilmu pengetahuan terhadap analisis, desain konstruksi beton bertulang menghasilkan sistem struktur yang sangat luas. Penelitian dan eksperimental adalah sebuah pendekatan penyederhanaan yang diperlukan untuk memahami perilaku struktural dasar elemen-elemen beton bertulang. Perbaikan struktur pada umumnya bertujuan untuk mengembalikan atau meningkatkan kekuatan elemen struktur agar mampu menahan beban sesuai dengan beban rencana. Umumnya, struktur perlu perkuatan apabila terjadi perubahan fungsi sehingga perlu tambahan faktor keamanan pada saat perencanaan. Elemen-elemen strukturnya dirancang sesuai tata cara yang telah ditetapkan.

Telah muncul inovasi perkuatan baru dalam perencanaan struktur bangunan yang lebih berkualitas untuk keperluan peningkatan kapasitas dalam memikul beban yaitu dengan penambahan lapisan FRP (Fiber Reinforced Polymer) seperti serat gelas atau GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer), serat carbon atau CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) dan serat aramid atau AFRP (Aramid Fiber Reinforced Polymer). Material FRP (Fiber Reinforced Polymer) merupakan material yang tahan terhadap korosi, mempunyai kekuatan yang tinggi, daktilitas sangat baik, mempunyai tingkat rasio antara kekuatan dan berat yang ringan, tidak

mengganggu kondisi operasional pada lokasi pekerjaan, biaya pemasangan dan pemeliharaan yang murah.

Kerusakan struktur beton bertulang dapat saja terjadi akibat umur struktur dan atau akibat perubahan pembebanan ataupun akibat bencana alam. Kebanyakan struktur yang rusak akan langsung dibongkar tanpa mempertimbangkan kemungkinan perbaikan ataupun perkuatan. Pemanfaatan material FRP pada struktur bangunan berguna untuk meningkatkan kemampuan dan mengembalikan kekuatan struktur beton bertulang. Penggunaan sistem FRP yang terpasang secara eksternal merupakan perkuatan yang efektif untuk merehabilitasi dan memperkuat elemen struktur yang telah rusak.

Aplikasi material komposit FRP telah banyak digunakan di berbagai bidang karena mempunyai keuntungan yang lebih baik dibanding bahan konvensional. Dari pemanfaatan GFRP pada beberapa jenis struktur, ternyata memberikan hasil yang cukup efektif dalam membantu kemampuan kinerja struktur yang ada. Beberapa penelitian terdahulu tentang penggunaan GFRP pada balok lentur diantaranya: Alami, F(2010) menyatakan bahwa perkuatan struktur balok beton bertulang dengan menggunakan FRP sebagai tulangan eksternal pada benda uji balok beton bertulang dengan perkuatan lentur GFRP terjadi peningkatan beban sampai dengan 75,13% dan peningkatan lendutan maksimum. Selanjutnya Djamiluddin. R dan Hino. S (2011) meneliti perkuatan dengan menggunakan lembaran GFRP pada balok beton bertulang yang telah

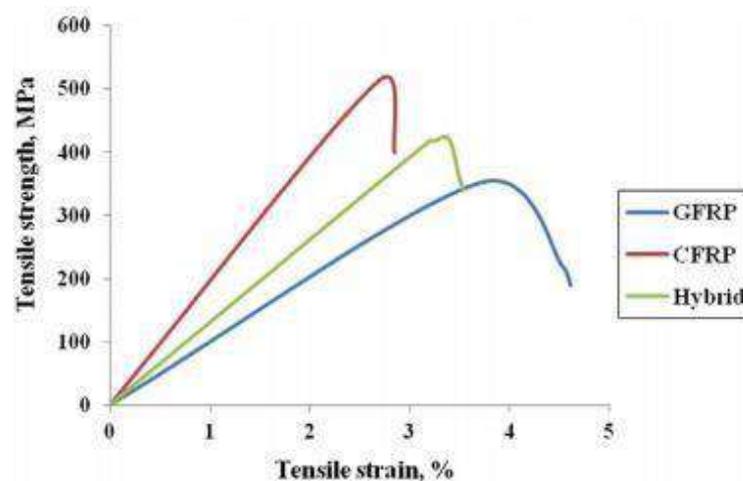
terbebani hingga tulangan meleleh memiliki kapasitas lentur yang lebih tinggi dari balok aslinya. Djameluddin. R dan Akkas. A.M. (2014) meneliti balok beton bertulang diperkuat dengan lembaran GFRP dengan parameter lebar sabuk GFRP, hasil penelitian menunjukkan bahwa balok yang diperkuat dengan sabuk GFRP terjadi peningkatan kapasitas lentur maksimum. Perkuatan balok beton bertulang menggunakan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) dalam bentuk NSM strip dan lembaran sebagai tulangan memanjang mampu meningkatkan kapasitas momen lentur dan penggunaan tulangan geser dari lembaran CFRP dalam bentuk U-wrap meningkatkan daktilitas balok (Rasheed, Harrison, Peterman, & Alkhrdaji, 2010). Sistem perkuatan yang berbeda pada awalnya dirancang untuk menghasilkan kekuatan lentur yang setara dimana beton hancur pada regangan tekan ultimate 0.003.

Fiber glass atau GFRP dan fiber carbon atau CFRP adalah material yang keduanya memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing. GFRP merupakan fiber yang paling banyak digunakan saat ini karena harganya yang relatif murah dan mudah ditemukan di pasaran. Sedangkan CFRP memiliki kekuatan yang lebih baik, mempunyai modulus elastic (kekakuan) yang cukup tinggi dan lebih banyak digunakan untuk memperkuat dan memperbaiki struktur. Kelemahan GFRP adalah berat jenisnya yang lebih tinggi, kekerasan yang tinggi dan ketahanan lelah yang relatif rendah. Sedangkan CFRP harganya yang relative lebih mahal.

Meskipun serat gelas (GFRP) memiliki modulus elastisitas dan kekuatan tarik yang lebih rendah daripada serat karbon, tetapi memiliki depormasi (regangan) yang tinggi, sifat tahan benturan yang baik, dan tahan pecah mengubahnya menjadi bahan yang baik untuk perkuatan, baik sendiri-sendiri maupun dalam kombinasi dengan serat karbon. Komposit *hybrid* memiliki kekuatan dan modulus yang lebih tinggi, regangan kegagalan yang lebih tinggi daripada komposit serat gelas dan komposit serat karbon. Keuntungan menggunakan komposit *hybrid* adalah untuk mengurangi sifat komposit GFRP dan CFRP yang kurang diinginkan.

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

matriks pada pembebanan kuasi-statis dan terjadi *debonding* pada serat-matriks, retak matriks dan kerusakan matriks pada pembebanan dinamis. Kurva tegangan-regangan uji kuasi-statis dari GFRP, CFRP dan komposit *hybrid* ditunjukkan pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Kurva tegangan-regangan uji kuasi-statis dari GFRP, CFRP dan komposit *hybrid* (K Naresh Dkk, 2018)

N. Attari, dkk (2012), melakukan kajian penggunaan tulangan lentur balok beton bertulang dengan lembaran CFRP, GFRP dan FRP *hybrid* dengan benda uji sebanyak tujuh balok diuji pada pembebanan berulang menggunakan alat uji lentur *four poin load* untuk menganalisis kegagalannya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan material komposit serat gelas - serat karbon lapis ganda untuk memperkuat balok beton bertulang sangat efisien. Peningkatan kapasitas kekuatan sebesar 114% diperoleh untuk benda uji balok yang diperkuat dibandingkan dengan balok beton normal. Peningkatan ini tidak disertai dengan hilangnya keuletan yang secara tiba tiba. Sebaliknya, deformasi yang cukup besar

dari konfigurasi penguatan *hybrid* diamati dengan rasio daktilitas energi 0,9 dalam kaitannya dengan balok normal. Konfigurasi penguatan jangkar-U meningkatkan kekuatan lentur dan berkontribusi pada redistribusi gaya internal melalui deformasi yang lebih besar pada balok normal. Konfigurasi ini memberikan hasil terbaik, keefektifan biaya dari lembaran FRP gelas-karbon lapis ganda sebagai konfigurasi penguatan untuk struktur beton bertulang.

Rami A. dkk (2014), melakukan penelitian tentang perilaku lentur balok beton bertulang menggunakan sistem FRP *hybrid* (GFRP/CFRP) diikat secara eksternal. Untuk mendapatkan sifat mekanis dari lembaran FRP *hybrid*, dilakukan pengujian properti. Pengujian balok terdiri dari balok normal dan empat balok diperkuat dengan lembaran GFRP, CFRP dan FRP *hybrid*, untuk mempelajari efektivitas lentur, respon beban-defleksi, regangan tertentu dan mode kegagalan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa terjadi peningkatan kapasitas beban pada balok yang diperkuat berkisar antara 30% - 98% dari balok normal, tergantung pada kombinasi lembaran GFRP/ CFRP. Daktilitas pada beban kegagalan balok dengan perkuatan GFRP dan FRP *hybrid* lebih tinggi dibandingkan dengan CFRP. Daya dukung beban dari spesimen yang diuji kemudian diprediksi dengan pedoman ACI 440.2R-8. Hasil yang diprediksi dan diukur sesuai yaitu sekitar 5% untuk balok normal, balok dengan perkuatan satu lapisan sekitar 13% dan untuk balok dengan perkuatan dua atau lebih lapis *hybrid* sekitar 17%.

Studi kajian dan penelitian yang akan dilakukan adalah dengan membuat minimal dua benda uji untuk masing-masing variasi benda uji yaitu balok normal, balok dengan perkuatan FRP *hybrid* (GFRP - CFRP) dua lapis tanpa dengan sabuk, balok dengan perkuatan FRP *hybrid* (GFRP - CFRP) dua lapis dengan lebar sabuk 150 mm, oleh karena perkuatan balok beton dengan menggunakan *Galass Fiber Reinforced Polymer* (GFRP) dan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) sudah banyak dilakukan sehingga mendorong kami mencoba mengangkat permasalahan perkuatan FRP *hybrid* sampai putus.

Berdasarkan uraian diatas, maka dalam penelitian ini hanya difokuskan pada penelitian tentang bagaimana mengaplikasikan lembaran FRP sebagai perkuatan lentur balok beton bertulang dengan pemakaian serat gelas (GFRP) dan serat carbon (CFRP) dalam bentuk lapisan FRP *hybrid* (GFRP dan CFRP). Sehingga judul penelitian adalah. **“Studi Aplikasi Lembaran FRP *Hybrid* sebagai Perkuatan Lentur Balok Beton Bertulang”**

B. Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang diatas maka dapat dirumuskan beberapa masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana properti material FRP *hybrid* (GFRP dan CFRP)?
2. Bagaimana perbandingan penggunaan lembaran FRP *hybrid* (GFRP dan CFRP)?

3. Bagaimana perilaku lentur balok beton bertulang dengan perkuatan lembaran FRP *hybrid* (GFRP dan CFRP)?

C. Tujuan Penelitian

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

1. Menganalisis propertis material lembaran FRP *hybrid* (GFRP dan CFRP)
2. Menemukan rasio persentase penggunaan lembaran FRP *hybrid* (GFRP dan CFRP) yang efektif
3. Menganalisis kapasitas lentur balok beton bertulang dengan perkuatan lembaran FRP *hybrid* (GFRP dan CFRP).

D. Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat dalam perkuatan elemen struktur dengan mendapatkan komposisi optimal penggabungan material GFRP dan CFRP dalam bentuk lembaran FRP *hybrid* sehingga memiliki sifat material yang baru sesuai dengan tegangan-regangan dari GFRP, CFRP dan komposit *hybrid*.

E. Ruang Lingkup Penelitian

Untuk mencapai maksud dan tujuan penelitian diatas, maka ruang lingkup penelitian dibatasi sebagai berikut:

1. Mutu beton yang digunakan dalam penelitian ini adalah mutu beton normal $f'c = 20$ MPa.

2. Sampel balok beton dengan dimensi 150 mm x 200 mm x 3300 mm untuk pengujian lentur. Disain balok mengacu pada standar ASTM - C293-68, ACI-440-1R-06 dan ACI-440-2R-08.
3. Perkuatan lentur menggunakan lembaran FRP *hybrid* dari (GFRP dan CFRP) yang disain sesuai dengan standar ASTM D-3039.
4. Pengujian yang dilakukan berupa pengujian lentur dengan beban statik.

F. Sistematika Penulisan

Berikut adalah uraian singkat tentang bab-bab yang dibahas dalam artikel ini:

BAB I PENDAHULUAN

Bagian ini menjelaskan latar belakang penelitian ini, diikuti dengan rumusan masalah, tujuan penelitian, kekuatan penelitian dan ruang lingkup/batasan bekerja problem.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bagian ini secara sistematis memaparkan teori, gagasan dan hasil penelitian terdahulu yang memiliki arti penting bagi penelitian ini. Bagian ini memberikan kerangka dasar untuk konsep dan teori yang digunakan dalam memecahkan masalah.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bagian ini menjelaskan metodologi penelitian, perencanaan dan prosedur penelitian, waktu dan tempat penelitian, bahan dan alat yang digunakan dalam metode analisis penelitian, dan diagram alir penelitian.

BAB IV TEMUAN DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini diuraikan hasil pengujian percobaan, data yang diperoleh dianalisis dan dibahas.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bagian ini menjelaskan tentang kesimpulan yang ditarik berdasarkan hasil pembahasan pada bab sebelumnya dan memberikan saran untuk penelitian selanjutnya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Karakteristik Material

1. Fiber Reinforced Polymer (FRP)

FRP adalah material komposit yang digunakan dalam teknik sipil. FRP terdiri dari beberapa bahan seperti karbon, kaca, Kevlar dan bahan alami lainnya seperti goni. Produk FRP berbahan dasar kaca lebih dikenal dengan sebutan glass fiber reinforced polymer (GFRP). GFRP terbuat dari kaca cair yang dipanaskan hingga sekitar 2.300°F dan berputar dengan kecepatan 200 mph melalui bushing platinum rhodium yang dibuat sebagai polimer yang diperkuat serat karbon (CFRP).

Material komposit memiliki beberapa keunggulan seperti kekuatan yang tinggi, bobot yang ringan dan daya tahan yang tinggi. Selain itu, FRP juga merupakan bahan yang tidak korosif, dibandingkan dengan baja untuk gaya magnet netral, FRP memiliki kekuatan tarik yang lebih tinggi, modulus elastisitas rendah dan tegangan tarik elastis. Perkembangan penggunaan penerangan dalam teknik sipil terdiri dari dua bagian, yang pertama untuk renovasi dan perbaikan struktur, dan yang kedua untuk pembuatan struktur baru dengan menggunakan FRP maupun dengan komposit beton. Menurut Hartono dan Santosa, 2003 terdapat beberapa keuntungan menggunakan FRP sebagai bahan perkuatan struktur :

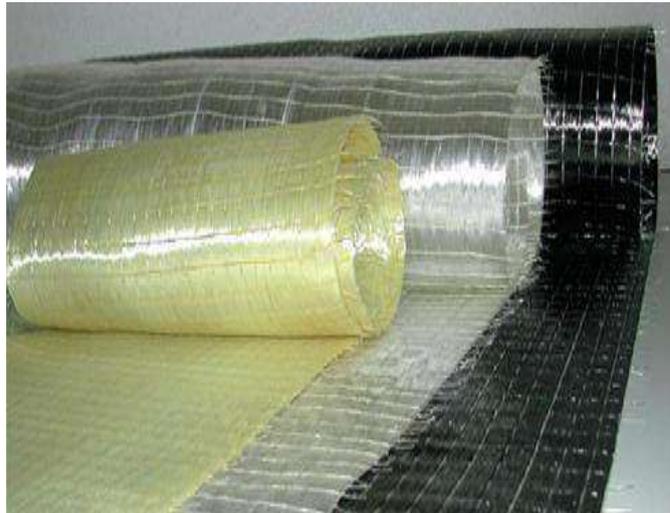
- Kekuatan tarik tinggi ($\pm 7 - 10$ kali lebih tinggi dari U39)
- Sangat ringan (densitas: 1, - 2, gr/cm², 4 - 6 kali lebih ringan dari baja)

- Pengerjaan sangat mudah dan cepat
- Tidak membutuhkan area kerja yang luas
- Tidak membutuhkan sambungan, meskipun batang yang direkatkan cukup panjang
- Tidak akan berkarat

Namun perlu diperhatikan kelemahan penggunaan bahan ini, antara lain kurang tahan terhadap suhu tinggi. Pada suhu sekitar 70 °C, bahan perekat resin epoksi berubah dari keadaan keras menjadi lunak, dan bersifat plastis sehingga daya rekatnya menjadi lebih lemah. Selain itu, bahan FRP ini juga tidak tahan terhadap radiasi ultraviolet. Maka untuk mengatasi kelemahan tersebut perlu dibuat proteksi misalnya cover atau penutup dengan mortar. FRP terdiri dari tiga jenis berbasis serat, yaitu glassfiber reinforced polymer (GFRP), aramid fiber reinforced polymer (AFRP) dan carbon fiber reinforced polymer (CFRP).

1.1. Sistem Perkuatan dengan FRP

FRP adalah bahan yang terbuat dari bahan sintetik berserat seperti kaca, aramid dan karbon yang disatukan oleh bahan matriks seperti epoksi atau poliester. Keuntungan menggunakan FRP adalah kemudahan pemasangan, kekuatan tarik tinggi, ringan dan tahan korosi. Bahan FRP terdiri dari serat dan matriks, di mana serat memberikan kekuatan dan kekakuan sementara matriks memegang serat bersama-sama, melindungi serat dari abrasi dan korosi dan juga transfer tekanan ke serat.



Gambar 2. *Fiber* tipe lembaran

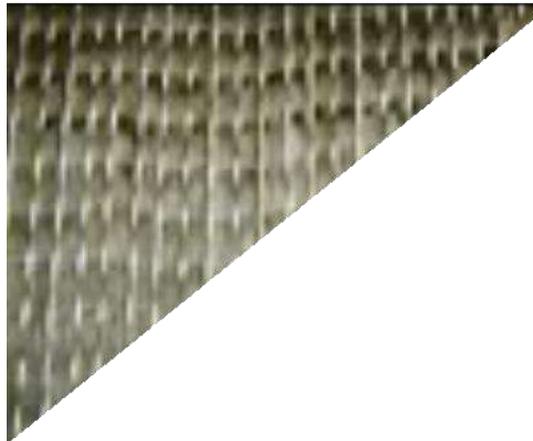
Seperti ditunjukkan pada **Gambar2** material GFRP ini merupakan material yang paling banyak digunakan saat ini karena memiliki sifat daktilitas yang tinggi, harganya yang lebih murah dan lebih mudah didapatkan di pasaran sedangkan material CFRP memiliki kekuatan yang lebih baik, mempunyai modulus elastic (kekakuan) yang cukup tinggi dan lebih banyak digunakan untuk memperkuat dan memperbaiki struktur. Sifat –sifat mekanis yang dimiliki kedua material FRP ini dapat dikombinasi dengan matriks *epoxy* menjadi satu lapisan *hybrid* dapat dianggap sebagai solusi alternatif dalam memperkuat dan memperbaiki elemen struktur beton bertulang untuk penghematan biaya (ekonomis), dengan pemakaian volume lembaran GFRP lebih besar dari pada lembar CFRP. Atas dasar hal tersebut maka digunakan lapisan *hybrid* dalam penelitian ini .

Lembaran GFRP dan lembaran CFRP adalah tipe lembaran yang mudah dilekatkan pada permukaan struktur diperkuat dengan perekat berupa *epoxy*. Biasanya proses penempelan sangat berperan penting

terhadap struktur dengan perkuatan lapisan *hybrid* disebabkan karena seringnya dijumpai permasalahan *debonding* yang terjadi pada struktur tersebut.

1.2. Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)

Serat Karbon atau CFRP digunakan dalam konstruksi struktur bangunan yang dapat diperbaiki. Teknik penguatan seperti itu dapat dibuat efektif sehingga tidak berkarat seperti pelat baja eksterior. Fungsi perkuatan pada sistem komposit CFRP adalah untuk meningkatkan kekuatan atau meningkatkan lentur, geser, aksial dan daktilitas atau berbagai kombinasinya. Daya tahan CFRP yang tinggi lebih disukai untuk digunakan di lingkungan korosif di mana baja mudah berkarat. Penggunaan CFRP lebih populer karena banyak keuntungan yang dapat dicapai, seperti berat unit yang rendah, mudah diterapkan dan ditangani, biaya pemasangan dan perawatan yang rendah. Rendah kerugian utama menggunakan CFRP sebagai sistem perkuatan adalah biaya material yang relatif lebih tinggi. (Meier, 1997). CFRP dalam bentuk lembaran, pelat atau batang dapat dipasang pada permukaan balok atau pelat yang ditarik sebagai tulangan lentur. Sebagai tulangan geser balok, lembaran CFRP dapat direkatkan pada sisi balok. Untuk penggunaan di kolom, lembaran atau penutup CFRP dapat ditempatkan di luar kolom untuk meningkatkan fleksibilitas dan kekuatan (Mayman, 2013). Adapun lembaran CFRP (www.fyfeco.com, Maret 2014) diperlihatkan pada **Gambar 3**.



Gambar 3. CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*)

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

Keadaan Lepas		Keadaan Komposit	
Sifat Material	Nilai Test	Sifat Material	Nilai Test
Tegangan Tarik	4,0 Gpa	Tegangan Tarik ultimate 90° dari arah utama fiber	25,8 GPa
Modulus Tarik	230,0 Gpa	Modulus Tarik	95,8 GPa
Regangan maks	1,7 %	Regangan	1,0 %
Kerapatan	1,74 g/cm ²	Tegangan tarik Ultimate	986 MPa
Tebal Fiber	0,36 mm	Tebal Komposit	1,0 mm

Sumber : *Fyfo.Co.LLC*

1.3. GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*)

Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) adalah serat polimer yang terbuat dari matriks plastik yang diperkuat dengan serat kaca halus. GFRP merupakan salah satu jenis perkuatan yang memiliki kekuatan yang sangat besar dan merupakan material yang ringan. Meskipun sifat kekuatannya agak lebih rendah dari serat karbon dan kurang kaku, bahannya umumnya kurang rapuh dan bahan bakunya jauh lebih murah. Karakteristik kekuatan

dan beratnya yang besar juga sangat disukai dibandingkan dengan logam dan dapat dengan mudah dibentuk.

GFRP sering digunakan untuk memperkuat balok, kolom dan bangunan lainnya. Selain untuk penguat GFRP juga dapat digunakan pada kondisi indoor maupun outdoor, karena GFRP merupakan material yang tahan terhadap segala cuaca, tahan terhadap air asin seperti air laut, dll. (Jenova, 2013). Adapun lembaran GFRP (www.fyfeco.com, Maret 2014) diperlihatkan pada **Gambar 4**.



Gambar 4. GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*)

Tabel 2. Karakteristik GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*) type SHE-51A

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	26,1 Gpa
Regangan maks	4,50%	Regangan	2,20%
Kerapatan	2,55 g/cm ²		
Berat per luasan	915 g/m ²		
Tebal Fiber	0,36 mm	Tebal Komposit	1,3 mm

Sumber : *Fyfo.Co.LLC*,

1.4. *Epoxy Resin*

Resin epoksi adalah larutan yang digunakan untuk merekatkan serat pada beton atau benda yang ingin diperkuat. Campuran resin epoksi terdiri dari padat dan cairan yang larut satu sama lain. Campuran dengan resin epoksi lainnya dapat digunakan untuk mencapai kinerja tertentu dan sifat yang diinginkan. Resin epoksi yang paling umum digunakan adalah bisphenol A diglycidyl ether. Resin epoksi dikeringkan dengan menambahkan pengeras anhidrida atau amina. Setiap pengeras memberi produk jadi sebagai solusi yang berbeda dan sifat yang diinginkan. Laju pengeringan dapat diatur dengan memilih pengeras atau katalis yang tepat sesuai dengan kebutuhan.



Gambar 5. *Epoxy resin*

Beberapa keunggulan resin epoksi adalah:

- sifat mekanik yang berbeda memungkinkan pilihan yang lebih banyak
- tidak menguap selama proses pengeringan
- penyusutan rendah selama proses pengeringan
- ketahanan kimia yang baik

- memiliki sifat adhesi yang baik dengan berbagai jenis pengisi, serat dan substrat lainnya

Kelemahan resin epoksi adalah harga yang relatif tinggi dan proses pengeringan yang relatif lama.

Tabel 3. Karakteristik material *resin epoxy*

Waktu Pengeringan : 72 Jam (Suhu Ruang 60°c)		
Sifat Material	Metode Astm	Nilai Test
Kekuatan Tarik	ASTM D-638	72.4 MPa
Modulus Tarik	-	3.18 GPa
Persen Regangan	ASTM D-638	5%
Kekuatan Lentur	ASTM D-790	123.4 MPa
Modulus Lentur	ASTM D-790	3.12 GPa

FRP direkatkan pada permukaan elemen struktur secara kimiawi dengan perekat. Perekatan secara kimiawi sangat praktis karena tidak menyebabkan terjadinya konsentrasi tegangan, lebih mudah dilaksanakan dibandingkan dengan perekat mekanis dan tidak menyebabkan kerusakan pada material dasar atau material kompositnya. Perekat yang paling cocok digunakan pada material komposit adalah perekat yang mempunyai bahan dasar *epoxy resin*. Perekat ini dibuat dari campuran 2 komponen. Komponen utamanya adalah cairan organik yang diisikan kedalam kelompok *epoxy*. Permukaan yang akan dilekatkan harus dipersiapkan untuk mendapatkan lekatan yang efektif. Permukaan harus bersih dan kering, bebas dari oksida, oli, minyak dan debu. Lem yang digunakan dalam penelitian ini juga dari Fyfe Co. produk yang disebut tyfo S, komponen A

dan komponen B seperti terlihat pada Gambar 5. Proses pencampuran komponen A dan komponen B menggunakan perbandingan 2:1.

1.5. FRP Hybrid (*hybrid fiber reinforced polymer*)

Pengembangan material komposit meningkatkan performanya berdasarkan penggabungan dua atau lebih serat dalam satu matriks polimerik, yang mengarah pada sistem material canggih yang disebut komposit *hybrid* dengan sifat material yang sangat beragam (Prabhakaran et al., 2012). Tantangan utama yang hanya dapat dipenuhi melalui pemahaman tentang hubungan antara arsitektur material dan respons mekanis. Efek *hybrid* positif atau negatif dari properti mekanik yang dipilih dari aturan perilaku komposit karbon / epoksi dan komposit gelas / karbon (Marom et al., 1978). Manders dan Bader (1981) melaporkan efek *hybrid* dan peningkatan regangan kegagalan hingga 50% untuk komposit serat gelas / serat karbon. Kegagalan regangan fase karbon meningkat karena proporsi relatif serat karbon menurun dan serat karbon terdispersi lebih halus. Yerramalli dan Waas (2003) telah mempertimbangkan komposit *hybrid* karbon / gelas dengan fraksi volume serat keseluruhan 30%. Kegagalan pemisahan dan pembengkokan dicatat saat memuat laminasi *hybrid* di bawah kecepatan pemuatan statis dan dinamis. Zhang et al. (2012) mempelajari perilaku mekanis komposit *hybrid* yang terbuat dari penguat karbon / gelas dan metode pemrosesan yang digunakan adalah 'hand lay-up' yang bukan merupakan praktik terbaik untuk mendapatkan laminasi berkualitas tinggi. Penambahan penguat keras seperti silikon

karbida, alumina dan titanium karbida meningkatkan kekerasan, kekuatan dan ketahanan aus komposit (Amar Patnaik et al., 2009; dan Chauhan et al., 2009). Pengenalan serat gelas ke dalam matriks polimer menghasilkan material komposit yang menghasilkan kombinasi menarik antara sifat fisik dan mekanik (Schwartz, 1984). Efektivitas perkuatan pada dasarnya bergantung pada adhesi antara matriks dan serat, sehingga ini merupakan faktor kunci dalam menentukan sifat akhir dari material komposit, terutama sifat mekaniknya (Yosoyima et al., 1984; Yosoyima et al., 1990; dan Pukzky et al., 1995).

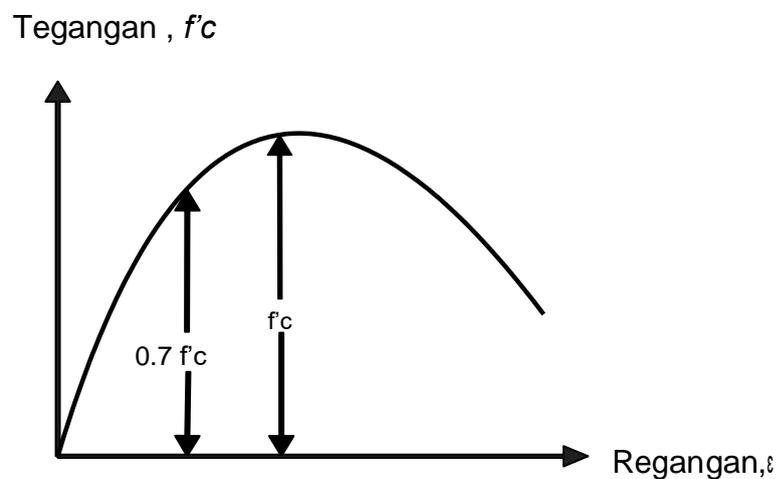
2. Perilaku Perkuatan Balok Beton Bertulang

Kuat tekan beton tergantung pada jenis campuran, waktu pengerasan dan mutu. Kuat tekan diperoleh dari hasil uji tekan laboratorium terhadap benda uji, baik silinder maupun kubus, pada umur beton 28 hari. Mengenai frekuensi pengujian, dianggap memuaskan jika: (1) rata-rata semua rangkaian dari tiga pengujian kekuatan berturut-turut sama dengan atau lebih besar dari kekuatan tekan yang disyaratkan. (2) uji kekuatan individu tidak dilakukan (rata-rata dua silinder di bawah kekuatan tekan yang dibutuhkan). Pada prinsipnya, kekuatan tekan desain tidak boleh menjadi kekuatan rata-rata silinder.

2.1. Kurva Tegangan-Regangan

Gambar 6 menunjukkan kurva tegangan-regangan tipikal yang diperoleh dari hasil pengujian menggunakan benda beton berbentuk silinder yang dibebani secara uniaksial selama beberapa menit. Bagian

utama kurva, hingga 40% dari gaya ultimit f_c , pada dasarnya dapat dianggap linier untuk semua aplikasi praktis. Setelah sekitar 70% regangan akhir, material kehilangan sebagian besar kekakuannya, yang meningkatkan diagram kelurusan kelengkungan. Pada saat beban ultimit retakan pada arah beban terlihat jelas pada kegagalan dan beton segera pecah setelahnya.



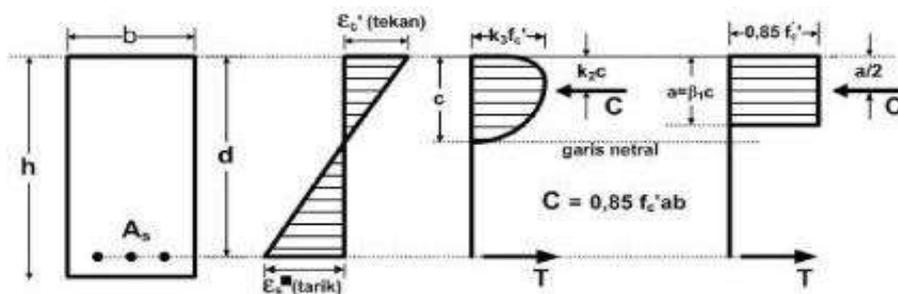
Gambar 6. Kurva tegangan - regangan

Gambar 6 menunjukkan kurva tegangan-regangan beton dengan kekuatan yang berbeda. Semakin rendah kekuatan beton, semakin tinggi regangan kegagalan. Panjang bagian awal yang relatif linier bertambah dengan bertambahnya kuat tekan beton. daktalias berkurang secara signifikan dengan meningkatnya kekuatan.

2.2. Kapasitas Lentur Balok Beton

Kuat lentur struktur sangat penting karena mempengaruhi kekuatan dan estetika struktur. Dengan memperkuat atau memperbaiki struktur, kekuatan lentur struktur meningkat. Hal ini karena kekuatan tarik telah ditambahkan

pada struktur, sehingga beban yang dipikul struktur lebih besar dan defleksi lebih kecil. Saat ini, banyak perbaikan telah dilakukan pada struktur bangunan. Hal ini disebabkan kondisi struktur bangunan yang tidak cukup kuat menahan beban yang dipikul oleh struktur tersebut. Kurangnya kekuatan struktur bangunan dapat disebabkan oleh mutu beton yang tidak direncanakan, peningkatan daya dukung struktur, kebakaran, gempa bumi, perubahan fungsi bangunan, umur struktur bangunan. Penguatan atau perkuatan dapat dilakukan dengan penambahan tulangan jaket, penambahan pelat baja, penambahan rangka, dan penambahan FRP (Fiber Enforcement Polymer). FRP sendiri ada beberapa jenis, antara lain CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) dan GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer). Penggunaan CFRP dan GFRP memiliki fungsi yang hampir sama dengan penggunaan pelat baja tipis sebagai perkuatan balok beton yaitu perkuatan bagian tarik balok beton.



Gambar 7. Distribusi tegangan pada balok

Gambar 7 menunjukkan bahwa C adalah resultan gaya tekan dalam, T adalah resultan semua gaya tekan di atas garis nol. Sedangkan T adalah resultan gaya dalam yang dihasilkan yang merupakan jumlah dari semua gaya dalam yang dihitung di bawah garis netral. Kedua gaya ini mempunyai

garis-garis sejajar yang besarnya sama tetapi bekerja berlawanan arah dan dipisahkan oleh jarak z membentuk sepasang momen tahanan dalam dimana nilai yang lebih besar disebut gaya lentur atau momen tahanan transversal. bagian dari anggota. Kopel tegangan antara C dan T juga bisa disebut keseimbangan gaya. Teori kekuatan batas memberikan kondisi bahwa baja tarik mencapai titik luluh ($f_s = f_y$) dan beton tekan mencapai keadaan regangan maksimum $\epsilon_c = 0,003$. Momen tahanan dalam menolak momen lentur aktual yang disebabkan oleh beban eksternal. Pada saat merencanakan dimensi balok, jumlah dan luas tulangan harus sedemikian rupa sehingga dapat menghasilkan momen tahanan yang sekurang-kurangnya sama dengan momen lentur maksimum akibat beban luar.

Balok terlentur, beban – beban yang bekerja pada suatu struktur menyebabkan adanya lentur dan deformasi pada elemen struktur tersebut. Beban – beban yang dimaksud bisa berupa beban grafitasi, beban kerja, beban susut, beban karena perubahan suhu, dll. Balok sebagai sistem dari sebuah struktur yang menahan lentur harus terjamin stabilitasnya, agar tegangan tarik dan tekan dapat ditahan oleh balok tersebut. Pada suatu gelagar bisa terjadi momen lentur positif dan momen lentur negatif. Saat suatu gelagar yang terkena beban menimbulkan momen positif, maka regangan tekan akan terjadi di bagian atas penampang, sedangkan regangan tarik akan terjadi di bagian bawah penampang. Tegangan – tegangan lentur merupakan hasil dari momen lentur luar. Tegangan ini akan mempengaruhi dimensi penampang balok. Proses desain yang mencakup

penentuan dan analisis penampang biasanya dimulai dengan persyaratan terhadap lentur. Setelah itu faktor -faktor lain seperti geser, defleksi, retak, dan panjang penyaluran tulangan sampai memenuhi syarat. (Nawy, 1990)

Rumus - rumus yang digunakan adalah sebagai berikut :

$$C = 0,85 \cdot f'c \cdot a \cdot b \dots\dots\dots (1)$$

$$Ts = As \cdot fys$$

$$Tf = Af \cdot fyf$$

$$C = T$$

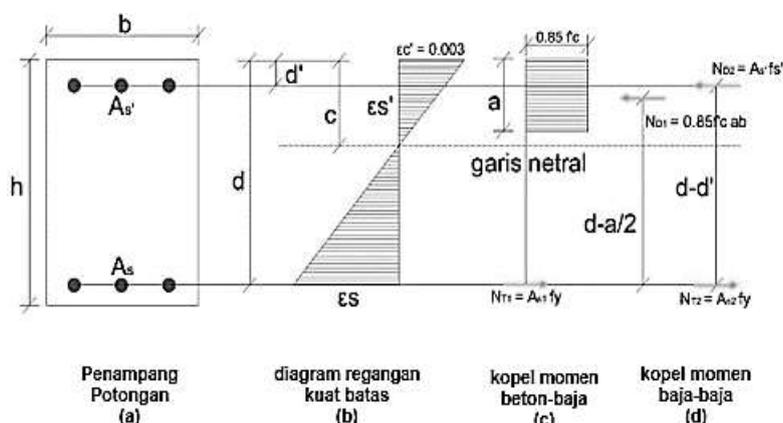
$$C = Ts + Tf$$

$$0,85 \cdot f'c \cdot a \cdot b = As \cdot fys + Ac \cdot fyf \dots\dots\dots (2)$$

dengan Ts adalah resultan gaya tarik dari baja dan Tf adalah resultan gaya tarik dari *CFRP* atau *GFRP*. Bertambahnya resultan gaya tarik sangat berpengaruh terhadap kekuatan lentur dari beton tersebut.

2.3. Kapasitas Lentur Balok Beton Bertulang.

Pada dasarnya balok beton bertulang dalam menahan gaya ditinjau dari dua sudut pandang yang berbeda.



Gambar 8. Penampang balok tulangan rangkap

Gaya yang dimaksud disini yaitu gaya tekan ND untuk beton dan tekan, gaya tekan total terbagi menjadi dua komponen ialah gaya tekan yang ditahan oleh beton ND1 dan gaya yang ditahan oleh tulangan tekan ND2. Sehingga untuk menganalisis momen tahan dalam dari balok diperhitungkan dua kopel momen dalam, yaitu kopel pasangan beton tekan dengan tulangan tarik dan pasangan tulangan baja tekan ditambah tulangan tarik sebagaimana dapat dilihat pada **Gambar 8**. Kuat momen total balok bertulang rangkap merupakan penjumlahan dari kedua kopel momen dalam.

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

$$M_{n2} = N T_2 \cdot Z_2 \dots \dots \dots (3)$$

Dengan asumsi bahwa tulangan tarik telah leleh terlebih dahulu maka dianggap $f_s = f_y$ sehingga persamaan 2 menjadi :

$$M_{n2} = A_s^2 \cdot f_y \cdot (d-d') \dots \dots \dots (4)$$

Keseimbangan gaya-gaya : $\Sigma(H) = 0$, sehingga $N D_2 = N T_2$, maka :

$$A_s' f_s' = A_s^2 f_y \dots \dots \dots (5)$$

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

$$A_s' f_y = A_s^2 f_y \dots \dots \dots (6)$$

Dimana : $A_s' = A_{s2}$

Maka setelah disubstitusikan dapat ditulis sebagai berikut :

$$M_n = A_s' \cdot f_y \cdot (d-d') \dots \dots \dots (7)$$

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

$$Mn1 = NT1.Z1 \dots\dots\dots (8)$$

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

$$Mn1 = As1 \cdot f_s \cdot (d - \frac{1}{2}a) \dots\dots\dots (9)$$

Karena : $AS = AS1 + AS2$, maka $AS1 = AS - AS2$ dan $AS2 = AS'$,

maka $AS1 = AS - AS'$

Setelah disubstitusikan maka persamaan dapat ditulis sebagai berikut :

$$Mn1 = (As - As')f_y (d - \frac{1}{2}a) \dots\dots\dots (10)$$

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

$$Mn = Mn1 + Mn2 = (As - As')f_y (d - \frac{1}{2}a) + As'f_y \cdot (d - d') \dots\dots\dots (11)$$

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

$$M_u = \phi M_n \dots\dots\dots (12)$$

Asumsi tersebut dengan mengacu pada anggapan dasar bahwa kedua penulangan baik tekan maupun tarik telah meleleh sebelum atau paling tidak pada saat regangan beton mencapai 0.003. Keadaan ini dapat dianalisa namun tergantung pada posisi garis netral penampang balok beton bertulang. Letak garis netral dapat ditentukan dengan terlebih dahulu menghitung tegangan beton tekan.

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

$$A_s f_y = (0.85 f'_c)ab + A_s' f_s'$$

$$a = \frac{(A_s - A_s') f_y}{(0.85 f'_c) b} \text{ atau } a = \frac{A_s f_y - f_s' A_s'}{(0.85 f'_c) b} \dots\dots\dots (13)$$

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

2.4. Perilaku Kekuatan Geser

Berdasarkan SNI:2847:2013 pasal 11, desain penampang yang dikenai geser harus didasarkan pada:

$$\phi V_n > V_u \dots\dots\dots (14)$$

$$V_n = V_c + V_s \dots\dots\dots (15)$$

dengan :

$$V_c = \left(\frac{\sqrt{f'_c}}{6} \right) b_w d \dots\dots\dots (16)$$

Desain tulangan geser vertikal dihitung :

$$V_s = (V_u - \phi V_c) / \phi \dots\dots\dots (17)$$

Batas spasi untuk tulangan geser diberikan :

$$s = d/2 \leq 600 \text{ mm, jika } V_s \leq V_{c1} = 0,33 f'_c b_w d$$

$$s = d/4 \leq 300 \text{ mm, jika } V_{c1} \leq V_s \leq V_{c2} = 0,66 f'_c b_w d$$

dimana :

V_c = kuat geser beton

V_s = kuat geser tulangan geser

V_u = gaya geser oleh beban terfaktor

b_w = lebar penampang balok

- d = tinggi efektif penampang balok
 ϕ = faktor reduksi = 0.85
 n = jumlah tulangan geser
 A_v = luas tulangan geser
 s = jarak antara sengkang
 f'_c = kuat tekan beton
 f_y = kuat tarik baja

2.5. Perilaku Kapasitas Momen Balok Bertulang Normal

a. Momen retak pertama (M_{cr})

Pada kondisi retak pertama, momen retak (M_{cr}) terjadi pada saat serat tarik penampang balok mencapai modulus keruntuhan atau sama besar dengan kuat lentur balok $f_r = 2,59$ MPa.

$$M_{cr} = \frac{f_r I_g}{y_t} \dots\dots\dots (18)$$

b. Momen Leleh (M_y)

Momen leleh terjadi ketika gaya tarik leleh. Dalam mode ini, semua tegangan tarik dipikul oleh tulangan yang melekat pada sisi tarik. Tulangan tarik diasumsikan menggantikan luas beton ekuivalen (nA_s) atau luas transformasi. Penampang deformasi dihitung menggunakan metode balok homogen elastis. Nilai n adalah rasio E_s/E_c dari modulus elastisitas baja dan beton. Nilai c adalah jarak terkompresi bagian dari sumbu netral, yang dihitung dengan metode kuadrat. Nilai C dihitung menggunakan persamaan kuadrat sempurna sebagai berikut:

$$\frac{bc^2}{2} + n A_s c - n A_s d = 0 \dots\dots\dots (19)$$

Setelah letak sumbu netral c ditentukan, momen inersia dari penampang transformasi I_t dan momen leleh dihitung dengan persamaan lentur sebagai berikut :

$$I_t = \frac{bc^3}{3} + n A_s d - c^2 \dots\dots\dots(20)$$

momen leleh dihitung dengan persamaan :

$$f_s = n \frac{M (d-c)}{I_t} \dots\dots\dots(21)$$

dimana :

I_t = momen inersia transformasi

f_s = tegangan tarik baja

n = rasio modulus = E_s/E_c

b = lebar penampang balok

d = tinggi efektif penampang balok

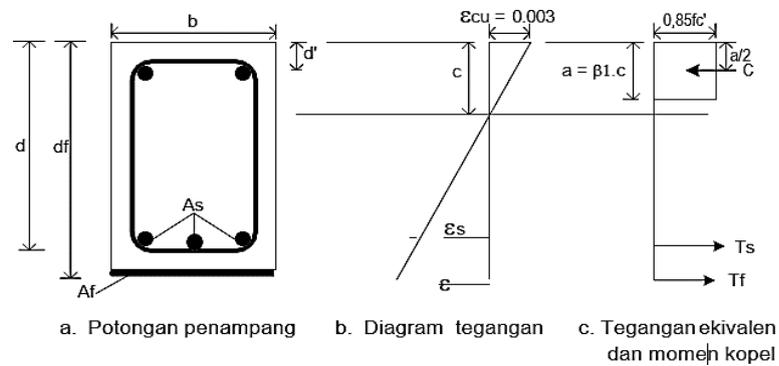
c. Momen Ultimit (M_n)

Momen saat ultimit terjadi ketika beton mencapai tegangan tekan maksimum. Perhitungan momen ultimit M_n dilakukan dengan pendekatan teori blok tegangan segiempat ekuivalen Whitney. Dengan asumsi tegangan tekan merata sebesar $0.85f_c$ terdistribusi merata pada daerah tekan ekuivalen yang dibatasi oleh tepi penampang suatu garis lurus yang sejajar sumbu netral sejarak $a = \beta_1.c$ dari serat beton yang mengalami regangan tekan ϵ_c maksimum.

2.6. Perilaku Kapasitas Lentur Balok Bertulang Perkuatan FRP

Perhitungan desain kuat lentur balok FRP mengacu pada standar ACI 440.2R-08. Tahapan perhitungan tersebut disajikan dalam rumus-

rumus berikut, yang mengacu pada **Gambar 9**.



Gambar 9. Blok tegangan balok FRP

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

$$\phi Mn \geq Mu \dots\dots\dots(22)$$

di mana :

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

Menentukan sifat FRP dengan perhitungan:

$$f_{fu} = C_E \times f_{fu}' \dots\dots\dots(23)$$

$$\epsilon_{fu} = C_E \times \epsilon_{fu}' \dots\dots\dots(24)$$

dimana:

- f_{fu} = kekuatan tarik utama
- f_{fu}^* = kekuatan tarik utama FRP oleh pabrikan

C_E = faktor lingkungan

ϵ_{fu}' = regangan FRP

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

$$k_m = \frac{1}{60 \epsilon_{fu}} \left(1 - \frac{n E_f T_f}{360.000} \right) \leq 0.90 \text{ untuk } n E_f T_f \leq 180.000 \quad (25)$$

di mana :

$$c = k_m d \quad (26)$$

$$I_{crack} = \frac{W_f C^3}{3} + n_s A_s (d-c)^2 + n_f A_f (d_f-c)^2 \quad (27)$$

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 (27)

$$\epsilon_{fe} = \epsilon_{cu} \left(\frac{h-c}{c} \right) - \epsilon_{bi} \leq k_m \epsilon_{fu} \quad (28)$$

di mana :

ϵ_{fe} = regangan yang terjadi pada FRP

ϵ_{cu} = regangan ultimit beton

h = tinggi balok

c = tinggi blok tegangan ekivalen

ϵ_{bi} = regangan beton

Nilai tegangan pada FRP dapat dihitung dengan persamaan (29)

$$f_{fe} = E_f \epsilon_{fe} \dots \dots \dots (29)$$

di mana :

f_{fe} = tegangan yang terjadi pada FRP

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

$$\mu = \frac{\epsilon_u}{\epsilon_v} \dots \dots \dots (30)$$

Dan persamaan daktilitas kelengkungan adalah perbandingan antara sudut kelengkungan (putaran sudut perunit panjang) maksimum dengan kelengkungan leleh dari suatu elemen struktur akibat momen lentur.

Persamaan matematik daktilitas kelengkungan sebagai berikut:

$$\mu = \frac{\varphi_u}{\varphi_v} \dots \dots \dots (31)$$

Nilai tegangan dan nilai regangan tulangan dapat dihitung. Setelah nilai tegangan dan regangan tulangan dan FRP diketahui, lokasi garis netral dapat diperiksa berdasarkan gaya dalam yang dihasilkan menggunakan Persamaan daktilitas perpindahan adalah perbandingan struktur maksimum terhadap perpindahan struktur pada saat leleh persamaan (28).

$$\mu = \frac{\delta_u}{\delta_v} \dots \dots \dots (32)$$

Nilai tegangan dan regangan, tulangan dan FRP

$$\epsilon_c = \epsilon_s + \epsilon_{fc} \left(\frac{c}{d-f-c} \right) \dots \dots \dots (33)$$

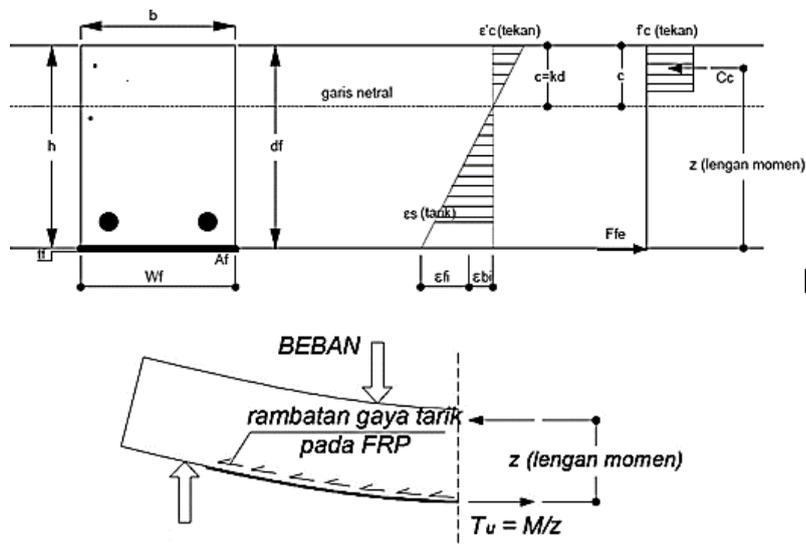
$$\epsilon_s = \epsilon_{fe} + \epsilon_{bi} \left(\frac{d-c}{h-c} \right) \dots \dots \dots (34)$$

$$f_s = E_s \epsilon_s \leq f_y \dots \dots \dots (35)$$

$$c = \frac{A_s f_c + A_f f_{fe}}{\gamma'_c \beta_1 b} \dots \dots \dots (36)$$

Kapasitas momen nominal perkuatan lentur dengan menggunakan FRP dapat dihitung dengan Persamaan (37). Untuk perkuatan lentur ACI committee 440.2R-08 merekomendasikan nilai faktor reduksi untuk FRP (ψ_f) sebesar 0,85.

$$M_n = A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \psi_f A_f f_{fe} \left(h - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \dots \dots \dots (37)$$



Gambar 10. Model analisis regangan FRP

Gambar 10. menunjukkan model analisis regangan FRP yang digunakan. Model analisis ini dapat dilihat sebagai referensi dalam desain balok dengan perkuatan FRP. Sebelumnya telah diuraikan persamaan-

persamaan yang digunakan dalam mendesain balok dengan perkuatan FRP, namun tentunya diperlukan suatu analisis terhadap hasil olahan data eksperimen sebagai kondisi nyata dari pengujian yang dilakukan.

Persamaan-persamaan di atas dimulai dari persamaan (33) hingga persamaan (37) hanya digunakan dalam membuat desain benda uji sebelum melakukan pengujian eksperimen yang sebenarnya. Selanjutnya setelah melakukan pengujian eksperimen maka data hasil eksperimen ini akan digunakan dalam persamaan-persamaan berikut untuk menghitung nilai kapasitas rekatan yang terjadi.

Untuk menghitung kapasitas rekatan FRP maka perlu dihitung terlebih dahulu nilai lengan momen z . Nilai lengan momen ini dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (38). Namun nilai c dalam persamaan (39) belum diketahui sehingga nilai c ini perlu dihitung terlebih dahulu.

Untuk memperoleh nilai c dalam persamaan (38) maka digunakan persamaan (39) di mana dalam persamaan ini digunakan nilai regangan hasil eksperimen. Adapun nilai regangan yang digunakan merupakan hasil eksperimen yang diperoleh yaitu berupa kondisi regangan beton ultimit dan regangan FRP ultimit untuk menghitung kapasitas rekatan ultimit yang terjadi.

$$z = \left(h - \frac{1}{2}c\right) \dots\dots\dots (38)$$

$$c = \frac{\epsilon_c h}{\epsilon_f + \epsilon_c} \dots\dots\dots (39)$$

di mana :

z = lengan momen

- h = tinggi balok
 c = tinggi blok tegangan ekivalen
 ϵ_c = regangan beton
 ϵ_f = regangan FRP

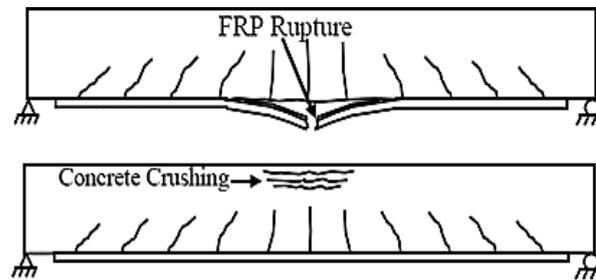
Kapasitas rekatan ultimit T_u dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (40). Nilai kapasitas rekatan ultimit T_u sendiri diperoleh dengan cara membagi nilai momen ultimit M_u dengan lengan momen z sesuai dengan prinsip kesetimbangan gaya. Dengan demikian maka dapat diperoleh nilai kapasitas rekatan ultimit GFRP dengan menggunakan data hasil eksperimen yang telah dilakukan.

$$T_u = \frac{M_u}{\left(\frac{h-c}{2}\right)} \dots\dots\dots (40)$$

2.7. Mode Kegagalan

Beberapa mode kegagalan yang biasa sering terjadi pada balok yang diperkuat dengan FRP antara lain :

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



Gambar 11. Putusnya FRP dan hancurnya beton pada sisi tekan

Gambar 11 menunjukkan mode kegagalan berurutan karena kegagalan lapisan FRP terjadi setelah tulangan meleleh dan beton tertekan pada sisi tekan. Keruntuhan beton pada sisi tekan terjadi sebelum pelepasan tulangan tarik, sehingga kondisi ini identik dengan over reinforced.

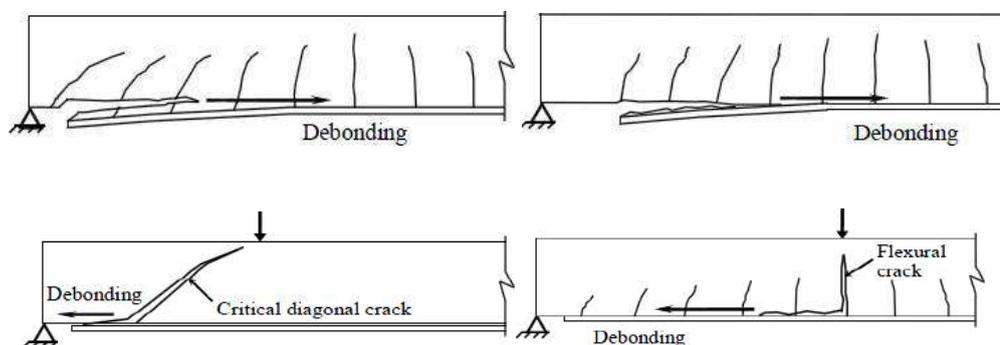
Selain itu, ada juga kondisi dimana tulangan tarik telah meleleh tetapi beton pada sisi tekan hancur tanpa FRP putus. Mode kegagalan berikutnya adalah mode kegagalan debonding. Mode kegagalan debonding ini adalah mode kegagalan yang paling umum untuk balok yang diperkuat FRP. Debonding adalah pemutusan ikatan antara beton dan FRP. Mode kegagalan debonding dapat dibagi menjadi empat jenis, yang dijelaskan lebih lanjut dalam subbagian debonding FRP.

2.8. Debonding FRP

Penguatan eksternal dengan lembaran FRP adalah metode penguatan yang efektif dan populer yang digunakan dalam konstruksi beton bertulang saat ini. Kinerja FRP ini biasanya ditentukan dan dipengaruhi oleh daya rekat antara FRP dengan beton. Hal ini ditunjukkan oleh banyaknya

kegagalan ikatan yang diamati pada struktur yang diperkuat FRP.

Masalah debonding antara FRP dan beton merupakan masalah kritis dan sangat penting dalam penggunaan bahan FRP dalam perbaikan dan perkuatan struktur. Daerah ikatan, dalam hal ini bidang antara FRP dan beton, biasanya merupakan titik terlemah dimana debonding paling banyak terjadi.



Gambar 12. (a) Cover *debonding*. (b) FRP *debonding* from laminate end. (c) CDC (critical diagonal crack) *debonding*. (d) *debonding* from flexural crack atau IC (intermediate crack) *debonding*

Hal ini disebabkan konsentrasi tegangan yang tinggi di daerah ketika gaya ditransfer dari beton ke FRP. Area kritis untuk debonding adalah di ujung lapisan FRP dan juga di sekitar retakan geser dan lentur. Kegagalan *debonding* dapat dibagi menjadi empat jenis, yaitu lepasnya penutup beton dari ujung lapisan FRP (*cover debonding*), lepasnya lapisan FRP tanpa pelepasan dari beton (*FRP debonding from laminate end*), terlepasnya FRP karena retak geser- lentur (*FRP debonding from flexure- shear crack*) dan pelepasan FRP dari retak lentur murni (*FRP debonding from flexural crack*).

Hal ini disebabkan adanya konsentrasi tegangan yang tinggi pada daerah tersebut saat terjadi transfer gaya dari beton ke FRP. Daerah kritis

terjadinya *debonding* terletak pada ujung lapisan FRP dan juga area sekitar adanya retak geser maupun lentur. Kegagalan akibat *debonding* dapat dibedakan atas empat jenis yaitu lepasnya selimut beton pada ujung lapisan FRP (*cover debonding*), lepasnya lapisan FRP tanpa ikut terlepasnya beton (*FRP debonding from laminate end*), lepasnya FRP akibat retak geser-lentur (*FRP debonding from flexure-shear crack*) dan lepasnya FRP akibat retak lentur murni (*FRP debonding from flexural crack*).

Gambar 12. (a) menunjukkan kegagalan Cover debonding. Fenomena cover debonding, juga dikenal sebagai *concrete cover separation*, disebabkan oleh rambatan retakan pada sisi tulangan tarik. Kegagalan ini diawali dengan munculnya retakan di sekitar ujung lapisan FRP. Retakan ini kemudian menyebar lebih jauh dan membentuk pola retakan yang hampir sejajar dengan area pemasangan tulangan, yang selanjutnya menyebabkan terlepasnya penutup beton.

Gambar 12. (b) menunjukkan kegagalan debonding karena pelepasan lapisan FRP tanpa terlepasnya selimut beton. Pada fenomena debonding FRP di ujung beton, kegagalan debonding dimulai dengan munculnya tegangan geser permukaan yang besar di ujung lapisan FRP. Pada kondisi ini, debonding dimulai pada ujung lapisan FRP kemudian menyebar ke tengah balok. Kegagalan ini biasanya karena lebar pemasangan lapisan FRP lebih kecil dari lebar penampang balok, bahan perekatnya kurang bagus, atau pengerjaan lapisan FRP tidak sempurna.

Gambar 12. (c) menunjukkan debonding akibat retak lentur geser.

Lepasnya FRP akibat retak geser-lentur (*FRP debonding from flexure-shear crack*) biasa disebut juga CDC (*Critical Diagonal Crack*) *debonding*. Jenis kegagalan *debonding* CDC ini terjadi pada balok di mana lapisan FRP ditempatkan di zona geser tinggi tetapi momen rendah, seperti di dekat penyangga balok sederhana. Tulangan geser yang disediakan pada lokasi ini terbatas dan tidak mampu memikul gaya geser yang dihasilkan, sehingga terjadi retak patahan geser yang besar dimana pola patahan geser yang dihasilkan lebih dominan dibandingkan dengan pola patahan lentur. Hal ini ditunjukkan dengan retakan yang cukup besar membentuk sudut mendekati 45° . Dengan bertambahnya lebar retak, tegangan permukaan yang besar berkembang antara beton dan lapisan FRP, yang merambat ke ujung lapisan FRP, yang didahului oleh retak lentur geser yang cukup besar. dan meluas hampir ke permukaan balok.

menunjukkan kegagalan *debonding* akibat retak geser-lentur. Lepasnya FRP akibat retak geser-lentur (*FRP debonding from flexure-shear crack*) biasa disebut juga CDC (*Critical Diagonal Crack*) *debonding*. Kegagalan CDC *debonding* semacam ini terjadi pada balok dengan penempatan lapisan FRP yang berada pada zona geser yang tinggi tetapi momennya rendah, misalnya pada lokasi dekat tumpuan balok sederhana. Pada lokasi tersebut tulangan geser yang diberikan hanya terbatas dan tidak mampu memikul gaya geser yang terjadi sehingga akan menyebabkan terjadinya retak geser-lentur yang besar di mana pola keruntuhan geser yang terjadi lebih dominan dibandingkan dengan pola

keruntuhan lentur. Hal ini ditunjukkan dengan retakan diagonal yang cukup besar membentuk sudut mendekati 45° . Seiring dengan peningkatan lebar retak yang terjadi maka tegangan permukaan yang tinggi akan terjadi antara beton dengan lapisan FRP dan merambat ke ujung lapisan FRP yang didahului dengan terjadinya rambatan retak geser-lentur yang cukup besar dan hampir mencapai permukaan balok.

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

Gambar 12. (d) menunjukkan kegagalan FRP (*debonding from flexural crack*). Fenomena ini dimulai ketika retak lentur terbentuk pada beton, dimana konsentrasi tegangan terjadi di daerah patahan. Tempat konsentrasi tegangan berada di tengah-tengah dimana zona momen maksimum berada. Tegangan tarik yang dihasilkan terkonsentrasi hanya pada sisi tengah dan belum menyebar ke ujung lapisan FRP. Tegangan tarik di daerah retak beton kemudian ditransfer ke lapisan FRP, sehingga tegangan permukaan lokal antara lapisan FRP dan beton meningkat dan terkonsentrasi di dalam dan sekitar daerah retak.

Dengan meningkatnya beban, tegangan permukaan lokal antara lapisan FRP dan beton juga meningkat. Setelah tegangan tersebut

mencapai nilai kritisnya, tegangan tersebut mulai menyebar ke ujung FRP yang lain dan menyebabkan ikatan antara beton terlepas, atau biasadisebut dengan debonding. Lepasnya lapisan FRP ini kemudian mulai menyebar dari bagian tengah hingga ujung lapisan FRP hingga akhirnya menyebabkan sebagian lapisan FRP terlepas pada sisi bentang balok. Peristiwa *debonding* seperti ini biasa disebut dengan FRP *debonding from flexural crack* atau juga dapat disebut IC (*intermediate crack*) *debonding*.

B. Penelitian terdahulu

Penelitian dan kajian tentang perkuatan balok beton dengan GFRP dan CFRP sebagai fungsi perbaikan dan perkuatan struktur beton telah banyak digunakan. Fikri Alami (2010) meneliti perkuatan lentur balok beton bertulang dengan glass fiber reinforced polymer (GFRP). ACI 440 (2008) mengasumsikan keruntuhan balok terjadi di bagian tengah balok, dalam uji keruntuhan terjadi di ujung tulangan GFRP. Mufti Amir Sultan, Herman Parung, M. Wihardi Tjaronge, dan Rudy Djamaluddin (2013) meneliti pengaruh lingkungan laut tropis terhadap karakteristik balok beton bertulang yang diperkuat dengan lembaran GFRP.. **Rudy Djamaluddin, Mufti Amir Sultan, Rita Irmawati, dan Hino Shinichi (2015)** meneliti tentang *Bond Characteristics of GFRP Sheet on Strengthened Concrete Beams due to Flexural Loading*. **Rudy Djamaluddin, Rita Irmawaty, dan Robby Kwandou (2015)** mengkaji kapasitas rekatan GFRP pada balok beton akibat perendaman dalam air laut. Penelitian ini memberikan informasi tentang perubahan kekuatan rekatan GFRP akibat paparan

lingkungan laut selama 1 bulan, 3 bulan dan 6 bulan. **Rudy Djamaluddin (2013)** mengkaji *Flexural Behaviour of External Reinforced Concrete Beams*. **N. Attari, dkk (2012)**, melakukan penelitian tentang kekuatan lentur balok beton bertulang menggunakan lembaran CFRP, GFRP dan FRP *hybrid* dengan benda uji sebanyak tujuh balok diuji pada pembebanan berulang. **Rami A. dkk (2014)**, melakukan studi tentang perilaku lentur balok beton bertulang menggunakan sistem *externally bonded hybrid FRP (GFRP/CFRP)*. Peningkatan kekuatan balok beton bertulang dengan FRP pada penelitian diatas membuka peluang bagi kita untuk meneliti berbagai macam fungsi FRP tergantung dari sudut pandang yang kita akan ambil salah satunya adalah, Studi aplikasi lembaran FRP *hybrid (GFRP dan CFRP)* sebagai perkuatan lentur balok beton bertulang .

Tabel 4. memperlihatkan skema dari penelitian sebelumnya yang menjadi bahan referensi pada penelitian ini.

Tabel 4. Judul dan Peneliti, Publikasi, Tujuan, Metode dan Hasil Penelitian

NO	JUDUL	PENULIS	PUBLIKASI/TAHUN	METODE	HASIL/TEMUAN
1	<i>Statistical analysis of the tensile strength of GFRP, CFRP and hybrid composites</i>	Naresh, K. Shankar, K. Velmurugan, R. Gupta, N. K.	<i>Thin-Walled Structures</i> , 2018	Komposit GFRP, CFRP, dan <i>hybrid</i> (GFRP/CFRP) dilakukan studi quasi-statik hingga laju regangan tinggi (542 s ⁻¹) untuk mendapatkan kekuatan tarik. Distribusi Weibull dua parameter digunakan untuk mengukur variabilitas kekuatan tarik laminasi lapis silang. Bahan serat yang digunakan yaitu glass fiber woven roving mat 610 gr/m ² dan serat karbon anyaman roving mat 450 gr/m ² dan resin epoksi sebagai bahan matriks, Dengan menggunakan teknik pencetakan kompresi GFRP (0 ° / 90 °), CFRP dan laminasi <i>hybrid</i> disiapkan. Untuk setiap laminasi, digunakan	Parameter Weibull diperoleh dengan menggunakan metode fit kurva linier. Dengan menggunakan parameter Weibull, kekuatan tarik teoritis dan nilai kepadatan probabilitas kumulatif ditentukan. Nilai ini cocok dengan nilai eksperimental. Hasil yang diperoleh dari penelitian ini menunjukkan bahwa terdapat pengaruh laju regangan yang signifikan terhadap kuat tarik (0 ° / 90 °) GFRP dan komposit <i>hybrid</i> sedangkan pengaruh laju regangan terhadap kuat Tarik komposit lapis silang serat karbon lebih kecil, untuk peningkatan laju regangan dari 8,3 × 10 ⁻³ menjadi 542 s ⁻¹ . Hasil micrographs SEM menunjukkan mekanisme kegagalan, yaitu retak mikro antar permukaan serat-matriks

				empat lapisan dan ketebalan setiap lapisan adalah 0,4 mm. Ketebalan, lebar dan panjang spesimen yang digunakan untuk uji quasi-static dan uji laju regangan tinggi masing-masing adalah 2 mm, 3 mm dan 10 mm.	dan retak mikro matriks pada pembebanan kuasi-statis dan <i>debonding</i> serat-matriks, retak matriks dan kerusakan matriks pada pembebanan dinamis
2	<i>Behavior of reinforced concrete beams strengthened with externally bonded hybrid Fiber Reinforced Polymer systems</i>	Rami A. Hawileh, Hayder A. Rasheed, Jamal A. Abdalla, and Adil K. Al-Tamimi	<i>Materials and Design</i> , 2014	Makalah ini menyelidiki secara eksperimental dan secara analitik kinerja balok RC yang diperkuat secara eksternal di daerah lentur dengan kombinasi yang berbeda dari lembaran CFRP dan GFRP. Tahapan pertama dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan sifat mekanik dari lembaran <i>hybrid</i> dengan melakukan uji kupon tarik berganda pada pengaturan yang berbeda dari lembaran	Peningkatan kapasitas beban pada balok yang diperkuat berkisar antara 30% sampai dengan 98% dari balok RC kontrol yang tidak diperkuat tergantung pada kombinasi lembaran Karbon / gelas. Daktilitas yang terjadi saat gagal untuk balok yang diperkuat dengan gelas dan lembaran <i>hybrid</i> lebih tinggi dibandingkan dengan lembaran karbon tunggal. Daktilitas pada kegagalan balok yang diperkuat dengan lembaran gelas tunggal adalah yang tertinggi di antara semua balok yang diperkuat.

				<p><i>hybrid</i>. Kemudian, empat balok RC yang diperkuat dengan lembaran GFRP, CFRP dan FRP <i>hybrid</i> diuji di bawah tekukan empat titik. Respon beban-defleksi, pembacaan regangan di lokasi tertentu dan mode kegagalan terkait dari spesimen yang diuji dicatat. Hasilnya dibandingkan dengan balok kendali yang tidak diperkuat. Juga, model analitik dikembangkan untuk memprediksi respon beban-defleksi dan daya dukung beban balok dan hasilnya dibandingkan dengan nilai yang diukur secara eksperimental dan prediksi ACI 440.2R-08</p>	<p>Penggunaan sistem <i>hybrid</i> menggabungkan kekakuanyang lebih rendah dari lembaran GFRP dengan kekuatan tinggi lembaran CFRP untuk menghasilkan material, yang memberikan peningkatan kekuatan dan keuletan dalam perilaku balok seperti yang diamati pada balok BGC dan BGCG. Dari pembacaan regangan di FRP, sekitar 40% atau lebih kekuatan FRP telah digunakan. Secara khusus, 41,18%, 63,08%, dan 39,64% dari kapasitas laminasi BC, BGC, dan BGCG digunakan. Mode kegagalan untuk spesimen balok yang diuji menunjukkan karakteristik kegagalan lokal dan global yang berbeda termasuk penghancuran beton, retakan lentur, <i>debonding</i>, dan delaminasi.</p>
3	<i>Mechanical Properties of Carbon /</i>	Jagannatha,T. Harish, G.	<i>International Journal of Mechanical</i>	<p>Pada penelitian ini Komposit <i>hybrida</i> yang diperkuat serat karbon</p>	<p>Hasilnya : Kekerasan mikro komposit yang diperkuat serat karbon lebih tinggi dibandingkan</p>

	<i>Glass Fiber Reinforced Epoxy Hybrid Polymer;</i>		<i>Engineering and Robotics Research,</i> 2015	dan serat glass dibuat dengan metode kantong vakum. Komposit <i>hybrid</i> dibuat dengan memvariasikan 15%, 30%, 45% dan 60% dari serat glass dan serat karbon dgn 40% epoxy matriks .Proses tes proferti dengan standar ASTM. D638. benda uji memiliki dimensi panjang 60 mm, lebar 12 mm dan ketebalan 3 mm. dengan tiga benda uji yang sama untuk tes yang berbeda	dengan komposit lainnya. Sifat tarik telah dipelajari dan beban putus telah diukur. Komposit serat karbon lembaran secara signifikan meningkatkan kekuatan tarik akhir, kekuatan luluh dan beban puncak komposit. Daktilitas komposit yang diperkuat serat karbon lebih tinggi dibandingkan dengan komposit lainnya.
4	<i>Flexural strengthening of concrete beams using CFRP, GFRP and hybrid FRP sheets</i>	Attari, N. Amziane, S. Chemrouk, M.	<i>Construction and Building Materials,</i> 2012	Tujuan dari penelitian ini untuk menilai efisiensi teknik perkuatan FRP dari segi ekonomis, serat kaca secara umum dianggap lebih murah daripada serat karbon untuk perkuatan beton, Tujuan lain adalah untuk menguji tujuh balok . Semua balok memiliki dimensi yang sama dan tulangan lentur dan geser yang sama. Pengujian	Penggunaan material komposit Serat Gelas-Serat Karbon lapis ganda untuk memperkuat balok beton bertulang sangat efisien. Peningkatan kapasitas kekuatan sebesar 114% diperoleh untuk spesimen balok yang diperkuat dibandingkan dengan Balok normal. Peningkatan ini tidak disertai dengan hilangnya keuletan yang brutal. Sebaliknya, deformasi yang cukup besar dari konfigurasi penguatan <i>hybrida</i> diamati

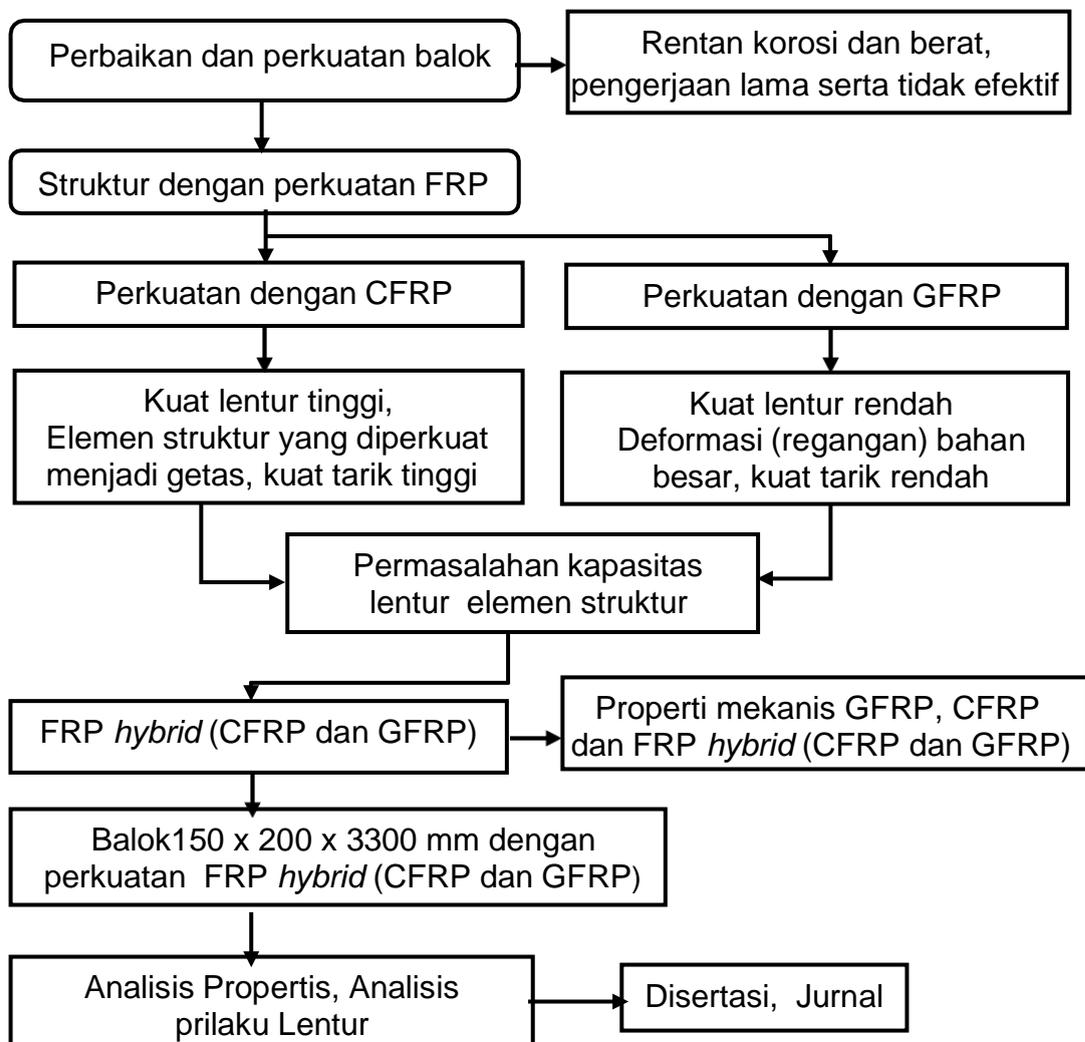
				<p>dibatasi dengan panjang 1500 mm, yang mengharuskan untuk membuat spesimen balok persegi panjang dengan tinggi 160 mm dan lebar 100 mm. Panjang keseluruhan benda uji adalah 1500 mm dengan panjang bentang 1300 mm. Serat yang digunakan untuk percobaan adalah:</p> <ul style="list-style-type: none"> - <i>Uwrap</i> dari serat karbon, searah. - <i>Uwrap</i> dari serat kaca, searah. - <i>Uwrap</i> dari serat <i>hybrid</i>, dua arah (Warp: 21% Carbon, 29% Glass; : 21% Carbon, 29% Glass). 	<p>dengan rasio daktilitas energi 0,9 dalam kaitannya dengan spesimen referensi. Konfigurasi penguatan jangkar-U meningkatkan kekuatan lentur dan berkontribusi pada redistribusi gaya internal melalui deformasi yang lebih besar pada spesimen balok. Dibandingkan dengan konfigurasi perkuatan lainnya, penggunaan material komposit penguat hanya dalam serat gelas atau sebagai komposit <i>hybrid</i> berlapis tunggal yang memiliki perpanjangan yang baik saat pecah ditemukan untuk meningkatkan keuletan.</p>
5	Pengaruh Lapisan <i>Hybrid</i> Serat Karbon Dan Serat Gelas Pada Kapasitas Lentur Balok	N. Dipu, Nur Layla	Digilib.Unhas.Ac.Id ,2013	<p>Penelitian menggunakan GFRP dan CFRP terhadap perlakuan lentur balok beton bertulang. penelitian ini direncanakan dua variasi yaitu Variasi I (BGC) yang terdiri dari 1 lapis</p>	<p>Hasil pengujian untuk balok beton bertulang yang telah diperkuat GFRP dan CFRP menunjukkan bahwa balok mampu menahan kapasitas beban hingga mencapai 175,19% untuk balok Variasi I dan 214,69% untuk balok</p>

	Beton Bertulang			GFRP penuh permukaan + 1 lapis CFRP dengan lebar 1/3 lebar balok, dan Variasi II (BGCG) yang terdiri dari 1 lapis GFRP penuh permukaan + 1 lapis CFRP dengan lebar 1/3 lebar balok + 1 lapis GFRP penuh permukaan, pengujian balok beton bertulang normal yang dibebani hingga mencapai tulangan leleh dan pengujian balok beton bertulang yang diperkuat dengan GFRP dan CFRP	Variasi II terhadap balok normal. Pola retak yang terjadi pada balok mengalami pola retak lentur dan pola retak geser. Mode kegagalan yang terjadi pada balok semuanya mengalami lepasnya lekatan antara FRP dan beton (<i>debonding failure</i>). Sedangkan untuk lapisan <i>hybrid</i> -nya tidak terjadi kerusakan antara GFRP dan CFRP. Lapisan <i>hybrid</i> mampu meningkatkan kapasitas momen lentur. Lapisan <i>hybrid</i> mampu meningkatkan kapasitas beban pada balok
6	<i>The Capacity Of Reinforced concrete Beams Post Rebars Yielded With FRP Sheet Strengthening</i>	Hidayat Mahmud, dkk	International Journal Of Civil Engineering and Technology 2019	Melakukan perkuatan menggunakan lembaran GFRP dan CFRP pada balok beton bertulang dengan dimensi 15 cm x20 cmx330 cm. Pada area kuat lentur diperkuat dengan variasi dalam lembaran GFRP dan CFRP. Sebelum diperkuat, balok beton	Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan CFRP di daerah Tarik secara signifikan meningkatkan kapasitas beban dibandingkan dengan GFRP, dan penambahan lebar sabuk efektif dalam meningkatkan kapasitas beban, selain itu pola retak pada semua specimen adalah pola retak fleksibel karena ditunjukkan oleh

				bertulang dibebani sampai mencapai batas hasil penguatan tarik	propagasi retakan kearah vertical dan daerah tarik ke sisi tekan
7	Kapasitas Penggunaan <i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i> (Cfrp) Berlapis Banyak Terhadap Perkuatan Lentur Struktur Balok Beton Bertulang	Sumargo Ruslan, Ujang R., Mirza Ghulam	Irwans, 2014	melakukan pengujian terhadap kapasitas penggunaan CFRP berlapis banyak terhadap balok beton bertulang. Pengujian dilakukan dengan pembebanan secara statis dan sub-scale terhadap 18 balok beton dengan ukuran 100 x 150 x 750 mm. Spesimen akan dibagi dalam 6 (enam) kategori yaitu balok normal tanpa lapisan CFRP dan balok dengan 1, 2, 3, 4 dan 5 lapis CFRP. Uji yang dilakukan adalah uji lentur.	Hasil penelitian menunjukkan penambahan jumlah lapis CFRP pada daerah lentur tidak mengakibatkan peningkatan daktilitas beton namun terdapat peningkatan kuat lentur dari beton normal yang dilapisi CFRP dari lapis ke-1 hingga lapis ke-3 dan penambahan kuat lentur tidak bersifat linier. Perkuatan lentur dengan CFRP mengakibatkan kerusakan bergeser ke wilayah geser sehingga perlu dipertimbangkan perkuatan pada wilayah geser. penambahan jumlah lapis CFRP harus diperhatikan mengenai keseimbangan antara kekuatan beton dengan jumlah lapis CFRP karena pada jumlah lapis ke-4 beton hancur terlebih dahulu sebelum CFRP mengalami kerusakan.

C. Kerangka Pikir Penelitian

Metode perkuatan struktur beton dengan lembaran FRP dapat membuat elemen struktur bersifat getas sehingga diperlukan modifikasi penggunaan lembaran FRP dengan menggabungkan karakteristik material pembentuknya, penggabungan antara lembaran GFRP dan lembaran CFRP ini disebut dengan lapisan FRP *hybrid*. **Gambar 13.** memperlihatkan skema dari kerangka pikir penelitian ini.



Gambar 13. Kerangka pikir penelitian