

**PERILAKU LENTUR BALOK BETON BERTULANG GFRP
BAR TANPA SELIMUT BETON PADA DAERAH TARIK
DENGAN GFRP SHEET SEBAGAI TULANGAN GESER**

**(FLEXURAL BEHAVIOR OF GFRP BAR REINFORCED
CONCRETE BEAM WITHOUT CONCRETE COVER AT THE
TENSION ZONE WITH GFRP SHEET AS SHEAR
REINFORCEMENT)**

**KUSNADI
P0800316403**



**SEKOLAH PASCA SARJANA
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2021**

PENGAJUAN DESERTASI

**PERILAKU LENTUR BALOK BETON BERTULANG *GFRP*
BAR TANPA SELIMUT BETON PADA DAERAH TARIK
DENGAN *GFRP SHEET* SEBAGAI TULANGAN GESER**

Disertasi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Doktor

Program Studi

Ilmu Teknik Sipil

Disusun dan diajukan oleh

KUSNADI

Kepada

**SEKOLAH PASCA SARJANA
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR 2021**

LEMBAR PENGESAHAN

PERILAKU LENTUR BALOK BETON BERTULANG GFRP BAR TANPA SELIMUT BETON PADA DAERAH TARIK DENGAN GFRP SHEET SEBAGAI TULANGAN GESEN

Disusun dan diajukan oleh

KUSNADI
P0800316403

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Doktor Program Studi Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 1 Februari 2021
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Promotor

Prof. Dr. Eng. H. Rudy Djiamaluddin, ST., M.Eng

NIP: 19701108 199412 1001

Co Promotor,

Ir. H. Achmad Bakri Muhiddin, Msc., Ph.D

NIP: 19600730 198603 1 003

Co Promotor,

Dr. Eng. Hj. Rita Irmawaty, ST., MT

NIP: 19720619 200012 001

Ketua Program Studi
S3 Teknik Sipil

Prof. Ir. Sakti Adji A., MS., M.Eng.Sc., Ph.D

NIP: 19640422 199303 1 001

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin



Prof. Dr. Ir. H. M. Arsyad Thaha, MT

NIP: 19601231 198609 1 001

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Kusnadi
NIM : P0800316403
Program studi : Ilmu Teknik Sipil
Jenjang S3

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul "Perilaku Lentur Balok Beton Bertulang GFRP Bar Tanpa Selimut Beton Pada Daerah Tarik Dengan GFRP Sheet Sebagai Tulangan Geser"

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa Disertasi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Apabila di kemudian hari terbukti atau dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan Disertasi ini hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, Maret 2021

Yang menyatakan



Kusnadi

PRAKATA

Puji syukur kami panjatkan kepada Allah SWT dan salawat atas Rasulullah Muhammad SAW atas anugerah kesehatan fisik dan spiritual sebagai modal besar untuk menyelesaikan tulisan ini.

Tulisan ini merupakan disertasi yang menjadi bagian dari proses penyelesaian studi doktoral di Universitas Hasanuddin. Tulisan ini telah diselesaikan, namun masih memiliki banyak kekurangan sehingga masukan dan kritikan diharapkan dapat memperbaiki dan meningkatkan mutunya.

Ucapan terima kasih kepada **Prof. Dr.Eng. H. Rudy Djamaluddin, ST., M. Eng, Ir. H. Achmad Bakri Muhiddin, Msc., Ph.D** dan **Dr. Eng. Hj. Rita Irmawaty, ST., MT** yang telah membimbing kami merampungkan disertasi ini.

Ucapan terima kasih kepada tim penguji **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. A. Arwin Amiruddin ST., MT.** yang telah memberikan saran dan masukan untuk kesempurnaan disertasi ini.

Ucapan terima kasih kami kepada Rektor Universitas Hasanuddin **Prof. Dr. Dwia Aries Tina Palubuhu, MA.**, Direktur Pasca Sarjana Universitas Hasanuddin **Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa, MSc.**, Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin **Prof. Dr. H. M. Arsyad Thaha, MSc.**, Ketua program Studi S3 Teknik Sipil Universitas Hasanuddin **Prof. Ir.**

Sakti Adji Adisasmita, MS., M.Eng Sc., Ph.D. dan seluruh dosen dan staf di lingkungan S3 Teknik Sipil.

Terima kasih juga kami sampaikan kepada rekan mahasiswa S1 terkhusus **Taka** dan **Fahri**, mahasiswa S2 terkhusus **Saddam Husein** dan rekan mahasiswa S3 angkatan 2016 yang telah membantu kami dalam penyelesaian studi doktoral.

Akhir kata terkhusus untuk ibunda tercinta **H. Rahmatiah SPd.** atas doa dan dorongan semangat menuntut ilmu yang ditanamkan sejak kecil dan kepada Istriku **Elly Amelya, AMd. Kep.** dan anak-anakku yang telah sabar mendampingi dalam studi, saya ucapkan banyak terima kasih.

Makassar, Maret 2021

Kusnadi

ABSTRAK

KUSNADI. Perilaku Lentur Balok Beton Bertulang *GFRP Bar* Tanpa Selimut Beton Pada Daerah Tarik Dengan *GFRP Sheet* Sebagai Tulangan Geser (dibimbing oleh **Rudy Djamaruddin, Achmad Bakri Muhiddin, Rita Irmawaty**)

Struktur beton bertulang rawan terhadap kerusakan akibat korosi pada baja tulangan. Untuk meningkatkan keawetan dan kapasitas lentur balok, maka tulangan baja digantikan dengan *GFRP bar* sebagai tulangan tarik dan sengkang baja digantikan dengan *GFRP sheet* sebagai tulangan geser dimana selimut beton dihilangkan untuk menambah tinggi efektif penampang.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kapasitas lentur, kekakuan dan daktilitas balok beton bertulang *GFRP bar* tanpa selimut beton yang menggunakan *GFRP sheet* sebagai tulangan geser (BFTS) dibandingkan dengan balok beton bertulangan baja (BK) dan balok bertulang GFRP bar (BFS) konvensional. Pengujian dilakukan dengan empat titik pembebahan lentur. Pembebahan diberikan secara statis monotonik dengan kecepatan 0.03 mm/detik sampai benda uji gagal.

Kapasitas beban lentur balok BFTS lebih besar 52.9% dibandingkan dengan balok BK dan lebih besar 13.4 % dibandingkan dengan balok BFS. Meskipun penggunaan tulangan *GFRP bar* mengurangi kekakuan balok, namun kekakuan balok beton *GFRP bar* tanpa selimut beton yang menggunakan *GFRP sheet* sebagai tulangan geser lebih besar 10.6% dibandingkan dengan kekakuan balok beton *GFRP bar* konvensional. Daktilitas balok beton bertulang *GFRP bar* tanpa selimut yang menggunakan *GFRP sheet* sebagai tulangan geser lebih kecil dibandingkan dengan balok beton bertulang konvensional sebagai akibat rendahnya kapasitas geser penampang.

Kata kunci: perilaku lentur, balok beton bertulang tanpa selimut, *GFRP bar, GFRP sheet*

ABSTRACT

KUSNADI. Flexural Behavior of *GFRP bars* Reinforced Concrete Beam With *GFRP sheets* as Shear Reinforcement (supervised by **Rudy Djamaluddin, Achmad Bakri Muhiddin, Rita Irmawaty**)

Reinforced concrete structures are vulnerable to damage by steel reinforcement corrosion . To increase the durability and flexural capacity of the concrete beam, the steel rebars are replaced with GFRP bar as a tensile reinforcement and the steel stirrups are replaced with GFRP sheet as shear reinforcement where concrete cover is removed to increase the effective depth of section.

This study aims to evaluate the flexural capacity, stiffness and ductility of the GFRP bar reinforced concrete beams using GFRP sheet as shear reinforcement (BFTS) compare with conventional steel reinforced concrete beam (BK) and conventional GFRP bar reinforced concrete beam (BFS). Flexural test was performed with four-point loading. The loading was static-monotonic until the beams rupture with a constant ramp actuator speed of 0.03 mm/sec.

The flexural load capacity of BFTS beams higher by 52.9% than BK beam and 13.4% higher than BFS beams. Although the utilization of GFRP bar reduces beam stiffness, GFRP bar reinforced concrete beam without concrete cover that using GFRP sheet as shear reinforcement has higher stiffness by 10.6% compared to conventional GFRP bar reinforced concrete beam. The ductility of GFRP bar reinforced concrete beam without concrete cover at the tension side with GFRP sheet as shear reinforcement is smaller than conventional reinforced concrete beam as a result of the low cross-sectional shear capacity.

Keywords: Flexural behavior, Reinforced concrete beams without cover, *GFRP bar, GFRP sheet*

DAFTAR ISI

PENGAJUAN DESERTASI.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI.....	iv
PRAKATA.....	v
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR TABEL.....	xvii
DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN.....	xix
BAB I PENDAHULUAN.....	1
A. Latar Belakang.....	1
B. Rumusan Masalah.....	6
C. Tujuan Penelitian.....	7
D. Batasan Masalah.....	7
E. Manfaat Penelitian.....	8
F. Ruang Lingkup Penelitian.....	8
G. Sistematika Penulisan.....	9
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	11

A. Karakteristik Lentur Balok Beton Bertulang <i>FRP Bar</i>	11
1. Karakteristik Mekanik Material Tulangan FRP.....	13
2. Mode Keruntuhan Balok Beton Bertulang FRP.....	14
3. Tipe Keruntuhan Balok Beton Bertulang.....	16
4. Momen Retak Awal.....	18
5. Momen Nominal.....	19
6. Daya Layan.....	22
7. Rekatan Tulangan-Beton.....	27
8. Kurvatur, Daktilitas dan <i>Deformability</i>	29
9. Pengaruh selimut beton.....	33
B. Kuat Geser Balok Beton Menggunakan <i>GFRP sheet U-Wrap</i>	33
1. Kontribusi Geser Beton Yang Ditulangi Dengan Tulangan FRP.....	34
2. Kontribusi Geser Lembaran FRP.....	35
C. Kerangka Pikir Penelitian.....	38
BAB III METODOLOGI.....	40
A. Lokasi dan Waktu Penelitian.....	40
B. Rancangan Penelitian.....	41
1. Uji Karakteristik Mekanis Material.....	42
2. Studi Analisis Kapasitas Balok.....	47

3. Pengujian Kapasitas Balok.....	52
C. Definisi Operasional.....	61
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	62
A. Karakteristik Mekanik Material.....	62
1. Karakteristik mekanis beton.....	62
2. Karakteristik mekanis tulangan.....	63
3. Kuat lekat tulangan GFRP bar dalam beton.....	66
B. Hubungan Beban-Lendutan.....	67
C. Hubungan Beban-Regangan.....	75
1. Hubungan beban-regangan beton.....	75
2. Hubungan beban-regangan tulangan.....	79
3. Distribusi regangan tulangan manganjang.....	84
4. Distribusi regangan penampang.....	89
D. Kapasitas lentur.....	94
1. Beban retak awal.....	94
2. Beban ultimit.....	98
3. Evaluasi kapasitas momen balok beton bertulang GFRP bar.....	103
E. Kekakuan.....	109
F. Deformability.....	114

G. Pola Retak dan Mode Kegagalan.....	118
H. Temuan Empirik.....	126
BAB V PENUTUP.....	127
A. Kesimpulan.....	127
B. Saran.....	127
DAFTAR PUSTAKA.....	129
LAMPIRAN.....	136

DAFTAR GAMBAR

Nomor	Halaman
Gambar 1 . Kerusakan struktur beton akibat korosi tulangan baja.....	1
Gambar 2 . Pasar penggunaan proteksi struktur beton bertulang dari korosi.....	2
Gambar 3 . Diagram tegangan dan regangan balok beton bertulang menurut Whitney.....	4
Gambar 4 . Distribusi regangan dan tegangan balok beton bertulang FRP (ACI 440.1R-06 2003).....	12
Gambar 5 . Pola keruntuhan balok beton bertulang (Nawi 1998).....	18
Gambar 6 . Acuan penentuan nilai indeks deformabilitas	32
Gambar 7 . Kerangka pikir penelitian.....	39
Gambar 8 . Bagan alir penelitian.....	42
Gambar 9 . Tulangan GFRP.....	43
Gambar 10 . Tulangan baja.....	43
Gambar 11 . Material beton.....	44
Gambar 12 . Universal Testing Machine (UTM).....	45
Gambar 13 . Sampel pengujian karakteristik mekanis beton.....	46
Gambar 14 . Setup pengujian pull-out.....	47
Gambar 15 . Dimensi balok uji.....	48
Gambar 16 . Dimensi dan penulangan balok BK.....	49
Gambar 17 . Dimensi dan penulangan balok BFS.....	50
Gambar 18 . Dimensi dan penulangan balok BFTS.....	51

Gambar 19 . Penyiapan material tulangan balok uji.....	53
Gambar 20 . Komponen pemasangan strain gauge pada tulangan baja dan GFRP bar.....	54
Gambar 21 . Jumlah dan posisi strain gauge pada tulangan tarik.....	55
Gambar 22 . Bekisting.....	57
Gambar 23 . Curing balok beton bertulang dan sampel uji properties beton.....	58
Gambar 24 . Jenis dan posisi strain gauge beton.....	59
Gambar 25 . Set-up pengujian balok.....	60
Gambar 26 . Pengujian karakteristik mekanis beton.....	62
Gambar 27 . Pengujian tarik tulangan baja.....	64
Gambar 28 . Hubungan tegangan lekat-slip.....	66
Gambar 29 . Hubungan beban-lendutan balok BK.....	68
Gambar 30 . Hubungan beban-lendutan balok BK kondisi beban retak awal.....	68
Gambar 31 . Beban dan lendutan balok BK kondisi leleh.....	69
Gambar 32 . Hubungan beban-lendutan balok BFS.....	71
Gambar 33 . Beban-lendutan balok BFS kondisi retak awal.....	72
Gambar 34 . Beban-lendutan balok BFS kondisi ultimit.....	72
Gambar 35 . Hubungan beban-lendutan balok BFTS.....	73
Gambar 36 . Beban-lendutan balok BFTS kondisi retak awal.....	74
Gambar 37 . Beban ultimit balok BFTS.....	74
Gambar 38 . Hubungan beban-regangan beton balok BK.....	76

Gambar 39 . Hubungan beban-regangan beton balok BFS.....	77
Gambar 40 . Hubungan beban-regangan beton balok BFTS.....	78
Gambar 41 . Hubungan beban-regangan beton balok BK, BFS dan BFTS.....	79
Gambar 42 . Hubungan beban-regangan tulangan balok BK.....	80
Gambar 43 . Hubungan beban-regangan tulangan balok BFS.....	81
Gambar 44 . Hubungan beban-regangan tulangan balok BFTS.....	82
Gambar 45 . Hubungan beban-regangan tulangan balok BK, BFS dan BFTS pada tengah bentang.....	83
Gambar 46 . Distribusi regangan tulangan memanjang balok BK.....	84
Gambar 47 . Distribusi regangan tulangan memanjang balok BFS.....	85
Gambar 48 . Distribusi regangan tulangan memanjang balok BFTS.....	86
Gambar 49 . Distribusi regangan beton dan tulangan balok BK pada penampang tengah bentang.....	90
Gambar 50 . Distribusi regangan beton dan tulangan balok BFS pada penampang tengah bentang.....	91
Gambar 51 . Distribusi regangan beton dan tulangan balok BFTS pada penampang tengah bentang.....	92
Gambar 52 . Beban retak awal balok BK.....	94
Gambar 53 . Beban retak awal balok BFS.....	95
Gambar 54 . Beban retak pertama balok BFTS.....	96
Gambar 55 . Perbandingan beban ultimit balok BK, BFS, BFTS.....	100
Gambar 56 . Model tegangan-regangan balok bertulang FRP.....	103

Gambar 57 . Perbandingan kekakuan balok BK, BFS dan BFTS.....	109
Gambar 58 . Luas penampang transformasi balok BK, BFS dan BFTS paska retak.....	111
Gambar 59 . Hubungan beban-lendutan eksperimental dan teoritis balok BK, BFS dan BFTS.....	113
Gambar 60 . Hubungan momen-kurvatur balok BK.....	115
Gambar 61 . Hubungan momen-kurvatur balok BFS.....	116
Gambar 62 . Hubungan momen–kurvatur balok BFTS.....	116
Gambar 63 . Perkembangan retak balok BK.....	119
Gambar 64 . Pola retak balok BK.....	120
Gambar 65 . Perkembangan retak balok BFS.....	121
Gambar 66 . Pola retak balok BFS.....	122
Gambar 67 . Perkembangan retak balok BFTS.....	123
Gambar 68 . Pola retak balok BFTS.....	124
Gambar 69 . Pola keruntuhan balok BFTS.....	125

DAFTAR TABEL

Nomor	Halaman
Tabel 1 . Variasi dan jumlah sampel balok beton bertulang.....	48
Tabel 2 . Kapasitas beban teoritis.....	52
Tabel 3 . Jumlah strain gauge pada balok BK.....	55
Tabel 4 . Jumlah strain gauge pada balok BFS.....	55
Tabel 5 . Jumlah strain gauge pada balok BFTS.....	56
Tabel 6 . Nilai mekanis beton.....	63
Tabel 7. Tegangan leleh, tegangan putus dan modulus elastisitas baja tulangan.....	64
Tabel 8 . Karakteristik mekanis tulangan GFRP bar diameter 13 mm.....	65
Tabel 9 . Karakteristik mekanis GFRP sheet tipe SEH51.....	65
Tabel 10 . Rasio regangan ultimit dengan regangan putus tulangan.....	88
Tabel 11 . Beban retak awal.....	97
Tabel 12 . Kekakuan, beban ultimit dan lendutan ultimit balok BK.....	98
Tabel 13 . Beban, lendutan dan kekakuan balok BFS.....	99
Tabel 14 . Beban, lendutan dan kekakuan balok BFTS.....	99
Tabel 15 . Beban ultimit prediksi dan eksperimental balok uji.....	102
Tabel 16 . Momen, regangan beton dan regangan tulangan ulimit balok BFS.....	105
Tabel 17 . Momen, regangan beton dan regangan tulangan ulimit balok BFTS.....	105

Tabel 18 . Rasio momen dan tegangan eksperimental dengan teoritis..	107
Tabel 19 . Rasio momen dan tegangan eksperimental dengan teoritis dengan faktor koreksi tegangan (ϕ_f).....	108
Tabel 20 . Inersia retak, Inersia efektif dan kekakuan balok secara teoritis.....	112
Tabel 21 . Lendutan tengah bentang dan kekakuan balok uji.....	112
Tabel 22 . Indeks deformability.....	117

DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN

Lambang/singkatan	Arti dan keterangan
Δ	= lendutan/perpindahan (mm)
β_l	= faktor reduksi kuat tekan beton
ε_{fu}^*	= regangan runtuh garansi tulangan FRP dari pabrik
$\varphi_{0.001}$	= kurvatur pada kondisi regangan beton 0.001 (radian/mm)
ε_{cu}	= regangan ultimit beton
d_c	= tebal selimut yang dihitung dari sisi tarik ke as tulangan terdekat (mm)
ρ_f	= rasio tulangan FRP
ρ_{fb}	= rasio tulangan seimbang dari tulangan FRP
ε_{fu}	= regangan runtuh disain tulangan FRP
h	= tinggi penampang (mm)
φ_m	= kurvatur pada nilai momen tertentu dalam (radian/mm)
M_a	= momen maksimum pada level lendutan yang dihitung (Nmm)
φ_u	= kurvatur ultimit (rad/mm)
φ_y	= kurvatur kondisi leleh (radian/mm)
a	= jarak bentang geser (mm) (Persamaan 23)

a	= tinggi blok tekan equivalen (mm)
A_f	= luas tulangan FRP (mm^2)
A_{fv}	= luas tulangan geser dari FRP sheet (mm^2)
b	= lebar penampang (mm)
b_w	= lebar badan balok (mm)
c	= kedalaman penampang tak retak terhadap sumbu netral (mm)
C_E	= faktor reduksi lingkungan
d	= tinggi efektif penampang (mm)
d_b	= diameter tulangan FRP (mm)
d_{fv}	= tinggi efektif tulangan geser FRP sheet (mm)
E_c	= modulus elastisitas beton (MPa)
E_f	= modulus elastisitas tulangan FRP (MPa)
f_{ju}^*	= kuat tarik ultimit garansi tulangan FRP dari pabrik (MPa)
f_c'	= kuat tekan beton (MPa)
f_f	= tegangan dalam tulangan FRP (MPa)
f_{bt}	= kuat tarik disain bengkokan tulangan FRP (MPa)
f_{fe}	= tegangan dalam FRP sheet (MPa)
f_{fu}	= kuat tarik ultimit disain tulangan FRP (MPa)
f_r	= modulus keruntuhan beton (MPa)

f_y	= tegangan leleh tulangan baja (MPa)
I_{cr}	= inersia penampang retak (mm^4)
I_e	= inersia penampang efektif (mm^4)
I_g	= inersia penampang bruto (mm^4)
K	= kekakuan (N/mm)
k	= rasio kedalaman sumbu netral terhadap kedalaman tulangan
k_1	= faktor modifikasi kekuatan beton yang dipakai untuk menghitung K_V
k_2	= faktor modifikasi skema laminasi untuk menghitung K_V
k_b	= koefisien derajat kelekatan tulangan dengan beton, (ACI 440.1R-06 2003) mengasumsikan sebesar 1.4
K_V	= koefisien reduksi ikatan laminasi FRP sheet
L	= panjang bentang (mm)
L_e	= panjang lekatan aktif laminasi FRP sheet (mm)
M	= momen dari beban merata (Nmm)
M_{cr}	= momen retak (Nm)
M_n	= momen nominal penampang (Nmm)
n	= jumlah lapis FRP sheet
n_f	= rasio modulus elastisitas FRP dengan beton

P	=	beban terpusat (N)
r_b	=	jari-jari lengkung bengkokan (mm)
s	=	jarak spasi tulangan memanjang (mm)
s_f	=	jarak FRP sheet (mm)
t_f	=	tebal FRP sheet (mm)
V_c	=	kontribusi beton menahan geser (N)
V_f	=	kuat geser dari FRP sheet (N)
w	=	lebar retak maksimum (mm)
w_f	=	lebar FRP sheet (mm)
E_{fe}	=	modulus elastisitas FRP sheet (MPa)
E_s	=	modulus elastisitas tulangan baja (Mpa)
M_u	=	momen ultimit (Nm)
$M_{0.001}$	=	momen pada saat regangan beton 0.001 (Nm)
β	=	rasio jarak garis netral ke muka sisi tarik dengan garis netral ke as tulangan tarik
β_l	=	faktor reduksi kuat tekan beton
β_d	=	koefisien reduksi dalam perhitungan lendutan
ε_c	=	regangan beton
ε_{fe}	=	regangan efektif FRP sheet
ε_{fu}	=	regangan ultimit FRP sheet
μ_M	=	indeks deformability

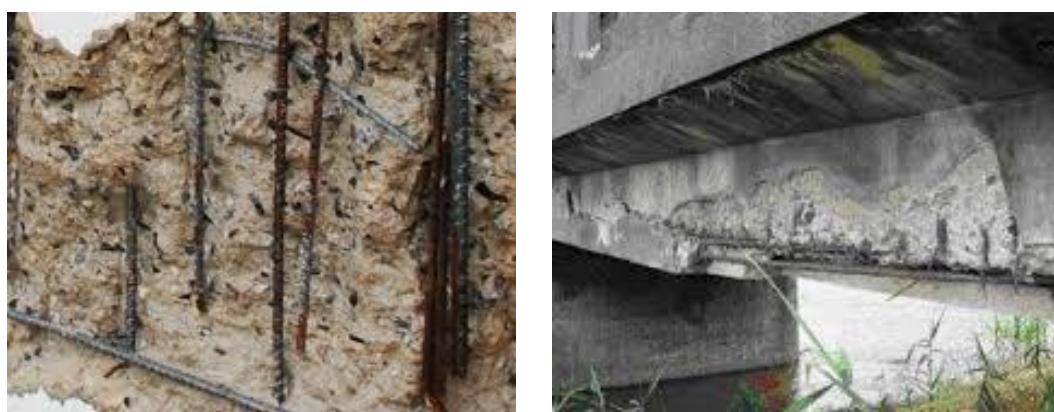
μ_φ	=	daktilitas kurvatur
ρ_f	=	rasio tulangan terpasang balok beton bertulang FRP
ρ_{fb}	=	rasio tulangan seimbang balok beton bertulang FRP

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

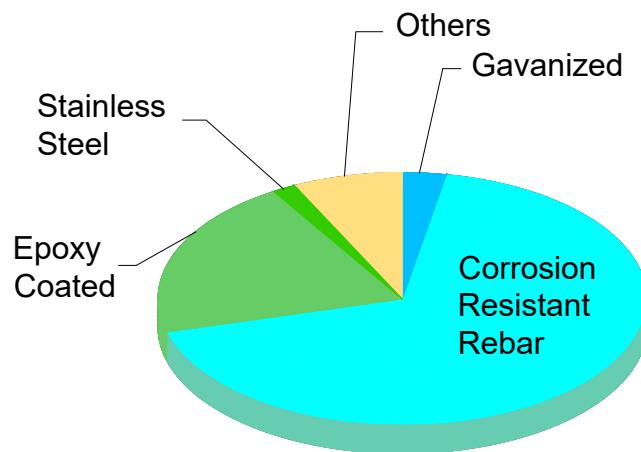
Struktur beton bertulang pada lingkungan laut pada umumnya mengalami kerusakan akibat korosi pada tulangan baja. Kerusakan beton seperti yang terlihat pada **Gambar 1** disebabkan oleh korosi tulangan baja. Korosi mengurangi luas penampang tulangan dan menjadi penyebab menurunnya kemampuan layan struktur. Disamping mengurangi luas penampang tulangan, korosi juga dapat menyebabkan retakan dan pemisahan selimut beton (*spalling*) (Balafas and Burgoyne 2010). Korosi tulangan baja mengurangi ketahanan lentur (Torres-Acosta et al., 2007) dan ketahanan geser (L. Wang et al. 2015) penampang beton bertulang .



- a. Kerusakan beton akibat korosi tulangan geser
- b. Kerusakan beton akibat korosi tulangan memanjang

Gambar 1. Kerusakan struktur beton akibat korosi tulangan baja

Korosi pada tulangan baja menurunkan keawetan (*durability*) struktur beton bertulang. Beberapa cara telah diterapkan untuk meningkatkan keawetan struktur beton bertulang dengan mengatasi masalah korosi pada tulangan seperti penggunaan *catodic protection*, *epoxy coating*, galvanisasi, serta penggunaan tulangan tahan korosi. Data yang dipublikasikan berdasarkan hasil survei tahun 2010 sampai tahun 2011 menunjukkan bahwa penggunaan tulangan tahan korosi mendominasi pasar untuk mengatasi masalah korosi pada struktur beton bertulang seperti yang terlihat pada **Gambar 2** (Sathyamoorthy.S 2011).

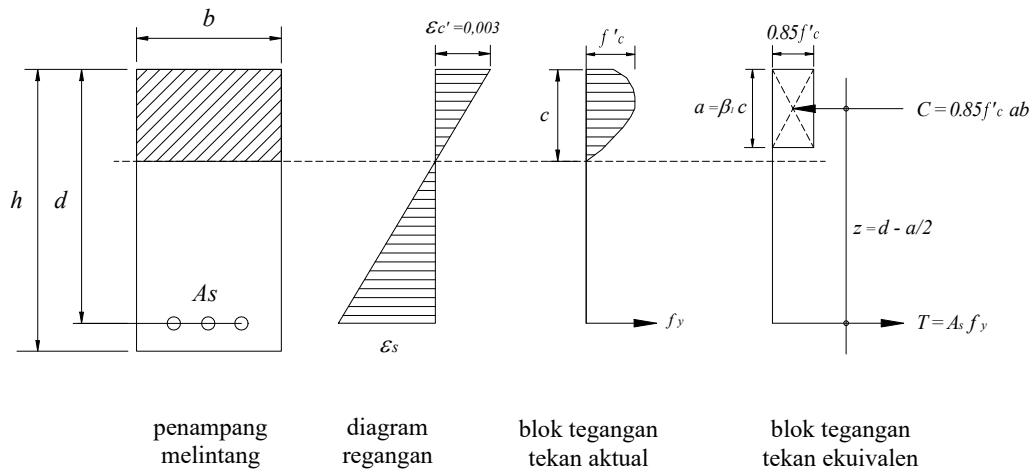


Gambar 2. Pasar penggunaan proteksi struktur beton bertulang dari korosi

Penggunaan tulangan tahan korosi pada elemen struktur beton bertulang dapat mempertahankan umur rencana bangunan dan mengurangi biaya perawatan selama masa layan. Salah satu material yang dikembangkan sebagai tulangan pada struktur beton bertulang adalah material FRP (*Fiber Reinforced Polymer*). *GFRP bar (Glass Fiber Reinforced Polymer)* merupakan tulangan dari bahan FRP dengan bahan

dasar dari serat gelas. *GFRP bar* memiliki potensi sebagai tulangan internal pada elemen struktur yang berada pada lingkungan yang agresif. Menurut (Benmokrane et al., 1995), biaya beton bertulang *GFRP bar* bisa lebih rendah dari beton bertulang baja apabila dalam perhitungan turut melibatkan biaya pemeliharaan dan umur pakai. Sifat tahan korosi dan kuat tarik yang tinggi dibandingkan dengan tulangan baja, *GFRP bar* dapat dijadikan sebagai alternatif tulangan pondasi (Jabbar and Farid 2018). Selain tahan korosi dan kuat tarik yang tinggi, *GFRP bar* juga tidak terpengaruh magnet, memiliki ketahanan fatik yang baik, ringan, rendah daya hantar panas dan listriknya (ACI 440.1R-03 2003).

Penampang beton bertulang yang menahan momen lentur, tegangan tekan ditahan oleh beton sementara tegangan tarik yang ditahan oleh tulangan. Selain kuat tekan beton dan kuat tarik tulangan, besarnya momen lentur nominal penampang ditentukan oleh besarnya lengan momen. Lengan momen penampang beton bertulang dihitung berdasarkan jarak dari as tulangan tarik ke pusat blok tekan ekuivalen seperti yang terlihat pada **Gambar 3**. Semakin besar lengan momen penampang, semakin besar pula momen nominal yang dihasilkan. Lengan momen terbesar pada suatu penampang beton bertulang dicapai ketika tulangan tarik ditempatkan sedekat mungkin dengan serat tarik terluar sehingga pada kondisi ini, penampang beton bertulang menjadi penampang beton tanpa selimut.



Gambar 3. Diagram tegangan dan regangan balok beton bertulang menurut Whitney

Berdasarkan diagram tegangan dan regangan penampang beton bertulang menurut Whitney seperti yang terlihat pada **Gambar 3** dimana beton pada sisi tarik dianggap tidak memiliki peranan terhadap kapasitas lentur penampang, maka selimut beton pada sisi tarik dapat dihilangkan. Bahkan, pada balok beton bertulang dengan tulangan luar dimana beton pada sisi tarik dihilangkan, kapasitas lenturnya masih dapat mencapai 86% dari kapasitas lentur balok normal (Djamaluddin 2013). Penempatan tulangan pada serat terluar yang menggunakan plat baja tanpa pengaruh selimut beton terbukti meningkatkan kapasitas lentur dan mengurangi lendutan (Saba et al., 2016). Penggunaan tulangan luar juga terlihat pada teknologi perkuatan struktur yang menggunakan material FRP.

Metode perkuatan struktur beton yang menggunakan material FRP saat ini terdiri dari metode perkuatan luar yang menggunakan *FRP Sheet* dan metode NSM (*Near Surface Mounted*) yang menggunakan *FRP bar*

atau FRP *strip*. Pada metode perkuatan luar dengan FRP sheet, FRP sheet langsung direkatkan pada permukaan beton menggunakan *resin* sementara pada metode NSM, *FRP Bar* atau *FRP Strip* direkatkan pada beton melalui alur yang telah disiapkan pada permukaan beton menggunakan *resin* atau mortar. Penggunaan bahan FRP sheet dalam perbaikan ataupun perkuatan struktur tidak membutuhkan energi yang besar seperti bahan-bahan konvensional. Perkuatan struktur yang menggunakan material FRP sebagai perkuatan luar dalam bentuk tulangan (*bar*) atau lembaran (*sheet*) juga meningkatkan kapasitas lentur maupun geser (Baggio et al., 2014); (Osman et al., 2016); (Seo et al., 2016); (Shaw and Andrawes 2017). Kombinasi metode NSM yang menggunakan FRP *Bar* sebagai tulangan lentur dan *U-Wrap* dari FRP *Sheet* sebagai perkuatan geser meningkatkan kapasitas lentur balok (Chennareddy and Taha 2017).

Dengan memanfaatkan kelebihan tulangan *GFRP bar* dan kemudahan penggunaan *GFRP sheet*, maka dibuat inovasi struktur beton bertulang yang tahan terhadap lingkungan yang agresif dengan mengganti seluruh tulangan baja pada struktur beton bertulang. Tulangan memanjang sebagai tulangan lentur menggunakan *GFRP bar* dan tulangan transversal sebagai tulangan geser menggunakan *GFRP sheet*. Tulangan memanjang ditempatkan pada serat terluar tarik sehingga tinggi efektif penampang dapat dimaksimalkan dan memudahkan pelaksanaan pekerjaan. Pelaksanaan pekerjaan pengecoran beton dengan metode ini

sangat mudah dimana tulangan GFRP hanya diletakkan di atas bekisting kemudian dicor tanpa perakitan tulangan dan pemasangan tahu beton (*spacer*). Penahan geser pada balok selanjutnya diberikan setelah beton mengeras dengan metode *U-Wrap GFRP sheet* sesuai kapasitas geser yang dibutuhkan.

GFRP bar dan GFRP sheet merupakan material yang tidak memiliki plastisitas sebagaimana halnya tulangan baja, modulus elastisitas rendah dan tidak tahan panas. Penggunaan GFRP bar dan GFRP sheet sebagai tulangan utama pada balok beton bertulang perlu dikaji sebelum diaplikasikan. Kajian tentang kapasitas lentur, kekakuan dan daktilitas perlu dilakukan untuk memastikan balok bertulang GFRP bar dengan GFRP sheet sebagai tulangan geser memenuhi syarat sebagai balok struktural.

Berdasarkan model yang dibuat sebagai sebuah inovasi dalam konstruksi beton bertulang maka diadakan penelitian tentang **“Perilaku Lentur Balok Beton Bertulang GFRP bar dengan GFRP sheet Sebagai Tulangan Geser”**.

B. Rumusan Masalah

1. Bagaimana kapasitas lentur, kekakuan dan daktilitas balok beton bertulang *GFRP bar* tanpa selimut beton pada daerah tarik dengan *GFRP sheet* sebagai tulangan geser.

2. Bagaimana pola retak dan pola keruntuhan balok beton bertulang GFRP bar tanpa selimut beton pada daerah tarik dengan GFRP sheet sebagai tulangan geser.

C. Tujuan Penelitian

1. Mengevaluasi kapasitas lentur, kekakuan dan daktilitas balok beton bertulang *GFRP bar* tanpa selimut beton pada daerah tarik dengan *GFRP sheet* sebagai tulangan geser.
2. Menganalisis pola retak dan kegagalan balok beton bertulang *GFRP bar* tanpa selimut pada daerah tarik dengan *GFRP sheet* sebagai tulangan geser.

D. Batasan Masalah

Berdasarkan rumusan masalah yang telah diuraikan, maka penelitian ini dibatasi terhadap hal-hal berikut:

1. Pengujian ini menggunakan tiga tipe balok beton bertulang yaitu balok beton normal yang menggunakan tulangan baja (BK), balok beton normal menggunakan tulangan *GFRP bar* (BFS) dan balok beton tanpa selimut menggunakan tulangan *GFRP bar* sebagai tulangan tarik dan *GFRP sheet* sebagai tulangan geser (BFTS). Jumlah tulangan tarik dan mutu beton disamakan untuk semua balok uji.

2. Dari ketiga tipe benda uji, hal utama yang diteliti adalah perilaku lentur balok terhadap beban statik monotonik.
3. Kapasitas geser tidak diteliti dalam pengujian ini. Pemberian tulangan geser hanya untuk memastikan keruntuhan yang terjadi adalah keruntuhan lentur pada balok.

E. Manfaat Penelitian

Berdasarkan tujuan yang ingin dicapai, maka manfaat yang diharapkan dalam penelitian ini adalah terciptanya inovasi sistem penulangan beton bertulang yang lebih maksimal dalam memikul beban lentur dan memiliki ketahanan yang tinggi terhadap lingkungan yang korosif.

F. Ruang Lingkup Penelitian

1. Sampel balok beton bertulang (*GFRP bar* dan baja) untuk pengujian lentur statik monotonik memiliki dimensi panjang 3300 mm, lebar 150 mm dan tinggi 250 mm.
2. Mutu beton yang digunakan dalam penelitian ini adalah mutu beton normal f'_c .25 MPa.
3. Tulangan yang dipakai pada balok bertulang untuk pengujian lentur static monotonik yaitu:
 - Tulangan tarik : baja D13, *GFRP bar* D13
 - Tulangan geser: baja \varnothing 8, *GFRP sheet* tebal 1.3 mm

4. Disain balok bertulang GFRP bar mengacu pada standar ACI-440-1R-06 dan ACI-440-2R-08. Disain balok bertulang baja mengacu pada standar ACI-318-99.

G. Sistematika Penulisan

Agar tulisan ini lebih terarah, maka sistematika penulisan disertasi ini akan diurutkan sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Dalam bagian ini diuraikan mengenai hal-hal yang melatarbelakangi penelitian ini dilanjutkan dengan rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat penelitian dan ruang lingkup penelitian.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bagian ini diuraikan secara sistematis tentang teori, pemikiran dan hasil penelitian terdahulu yang ada hubungannya dengan penelitian ini. Bagian ini memberikan kerangka dasar mengenai konsep, teori yang akan digunakan untuk pemecahan masalah.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bagian ini menjelaskan metodologi penelitian, rancangan dan prosedur penelitian, waktu dan lokasi penelitian, bahan dan alat yang digunakan dalam penelitian metode analisis serta bagan alir penelitian.

BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menguraikan hasil uji eksperimental, data yang diperoleh dianalisis dan diberi pembahasan.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bagian ini memaparkan kesimpulan yang dicapai berdasarkan hasil pembahasan pada bab sebelumnya serta membuat saran-saran yang diperlukan untuk penelitian selanjutnya.

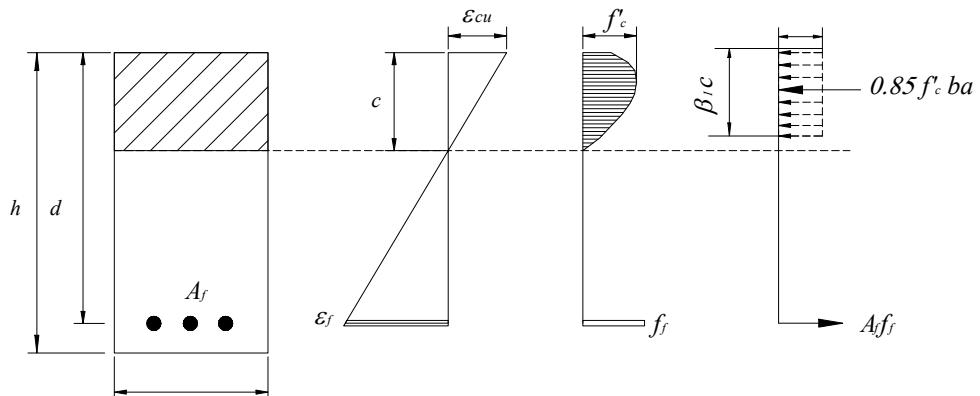
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

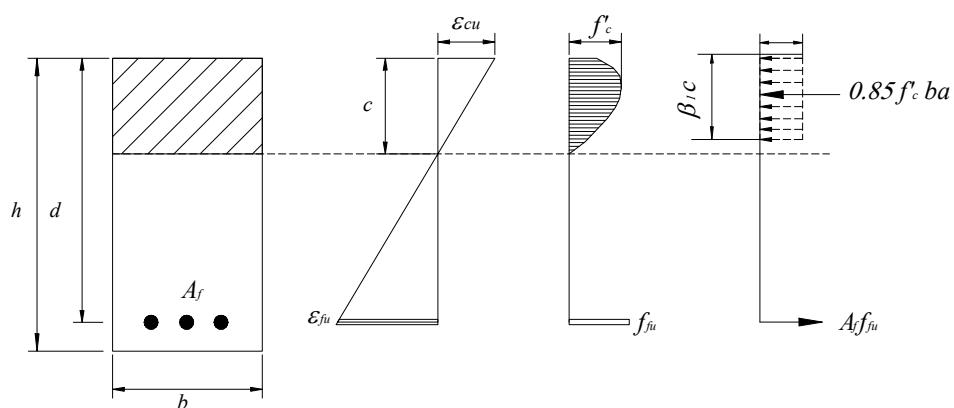
A. Karakteristik Lentur Balok Beton Bertulang *FRP Bar*

Sebagian besar pedoman disain elemen struktur lentur yang menggunakan tulangan FRP bar yang diungkapkan oleh Bywalski (Bywalski et al, 2016) mengizinkan terjadinya dua mode kegalalan struktur yaitu kegagalan getas dengan hancurnya beton pada sisi tekan dan kegagalan tarik dengan putusnya tulangan FRP. Mode kegagalan beton pada sisi tekan lebih disukai dibandingkan dengan mode kegagalan tarik karena karakteristik plastis beton yang dapat melebihi kondisi batas bisa menjadi pertanda kegagalan dan kegalannya kurang cepat dibandingkan dengan kegagalan akibat putusnya tulangan FRP bar.

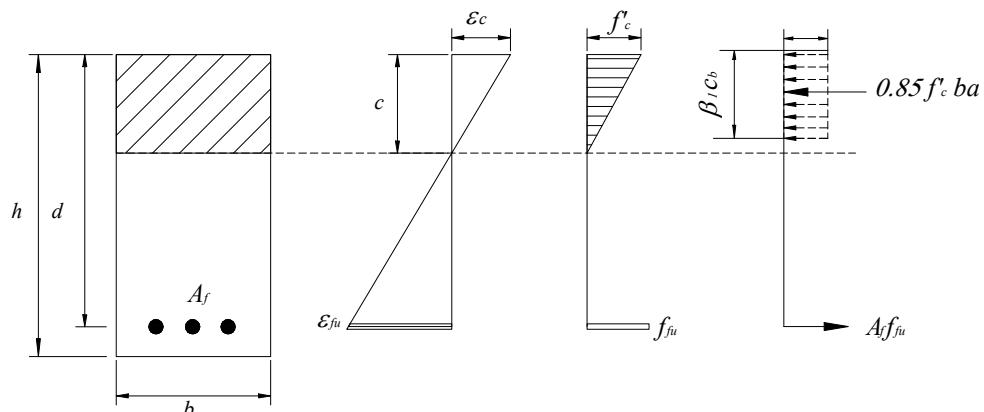
Kegagalan regangan seimbang diartikan sebagai regangan dalam beton (ε_c) dan regangan dalam tulangan FRP (ε_{frp}) secara bersamaan mencapai nilai ultimit ($\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}$, dan $\varepsilon_{frp} = \varepsilon_{frpu}$) seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4(b)**. Kondisi regangan ultimit pada beton bertulang FRP berbeda dengan beton bertulang konvensional yang menggunakan tulangan baja. Pada beton bertulang FRP tidak dijumpai adanya perilaku daktail dan keruntuhan terjadi secara tiba-tiba tanpa ada peringatan.



(a) Kegagalan tekan



(b) Kegagalan seimbang



(c) Kegagalan tarik

Gambar 4. Distribusi regangan dan tegangan balok beton bertulang FRP
(ACI 440.1R-06 2003)

Asumsi dasar yang digunakan dalam menentukan dimensi elemen struktur lentur :

- regangan tekan maksimum dalam beton berkisar antara $\varepsilon_{cu}=3\%$ dan $\varepsilon_{cu}=3,5\%$
- regangan dianggap linear (sesuai hipotesa Euler-Bernoulli)
- beton pada sisi tarik dibaikan
- hubungan tegangan dan regangan yang linear elastik terjadi pada tulangan FRP sampai runtuh
- terjadi ikatan yang sempurna antara beton dan tulangan FRP.

1. Karakteristik Mekanik Material Tulangan FRP

Karakteristik material tulangan FRP yang berasal dari pabrik seperti kuat tarik tergaransi belum termasuk didalamnya faktor pengaruh lingkungan jangka panjang. Pengaruh lingkungan jangka panjang dapat mengurangi kuat tarik dan daya tahan terhadap keruntuhan rangkak dan fatik tulangan FRP. **Persamaan 1, Persamaan 2, dan Persamaan 3** merupakan persamaan untuk menentukan kuat tarik ultimit disain, regangan ultimit disain dan kuat tarik ultimit disain pada bengkokan secara berturut-turut pada tulangan FRP menurut (ACI 440.1R-06 2003).

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* \quad (1)$$

dimana:

$$f_{fu} \quad = \quad \text{kuat tarik ultimit disain FRP (MPa)}$$

- C_E = faktor reduksi lingkungan
 f_{fu}^* = kuat tarik ultimit garansi FRP dari pabrik (MPa)

Regangan ultimit disain ditentukan sebagai berikut:

$$\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^* \quad (2)$$

dimana:

- ε_{fu} = regangan runtuh disain tulangan FRP
 ε_{fu}^* = regangan runtuh garansi tulangan FRP dari pabrik

Kuat tarik batang FRP pada bengkokan ditentukan berdasarkan persamaan:

$$f_{fbt} = \left(0.005 \cdot \frac{r_b}{d_b} + 0.3 \right) f_{fu} \leq f_{fu} \quad (3)$$

dimana:

- f_{fbt} = kuat tarik disain bengkokan tulangan FRP (MPa)
 r_b = jari-jari lengkung bengkokan (mm)
 d_b = diameter tulangan FRP (mm)

2. Mode Keruntuhan Balok Beton Bertulang FRP

Mode keruntuhan menentukan kapasitas lentur elemen struktur yang menggunakan tulangan FRP. Mode keruntuhan ini ditentukan berdasarkan perbandingan rasio tulangan dengan rasio tulangan

dalam kondisi seimbang. Rasio tulangan seimbang pada elemen struktur yang menggunakan tulangan FRP dapat dihitung menggunakan **Persamaan 4** (ACI 440.1R-06 2003).

$$\rho_{fb} = 0,85 \frac{f'_c}{f_{fu}} \beta_l \frac{E_f \varepsilon_{cu}}{E_f \varepsilon_{cu} + f_{fu}} \quad (4)$$

Dimana

- ρ_{fb} = rasio tulangan seimbang balok beton bertulang FRP
- E_f = modulus elastisitas tulangan FRP (MPa)
- f'_c = kuat tekan beton (MPa)
- ε_{cu} = regangan ultimit beton
- β_l = faktor reduksi kuat tekan beton

Rasio tulangan terpasang pada balok beton bertulang FRP dihitung dengan persamaan:

$$\rho_f = \frac{A_f}{bd} \quad (5)$$

dimana:

- ρ_f = rasio tulangan terpasang balok beton bertulang FRP
- A_f = luas tulangan FRP (mm^2)
- b = lebar penampang (mm)
- d = tinggi efektif penampang (mm)

Jika rasio tulangan FRP (ρ_f) lebih kecil dari rasio tulangan seimbang (ρ_{fb}) maka akan terjadi mode keruntuhan tarik dengan kegagalan pada tulangan FRP dan sebaliknya jika $\rho_f > \rho_{fb}$, maka akan terjadi mode keruntuhan akibat kegagalan beton.

3. Tipe Keruntuhan Balok Beton Bertulang

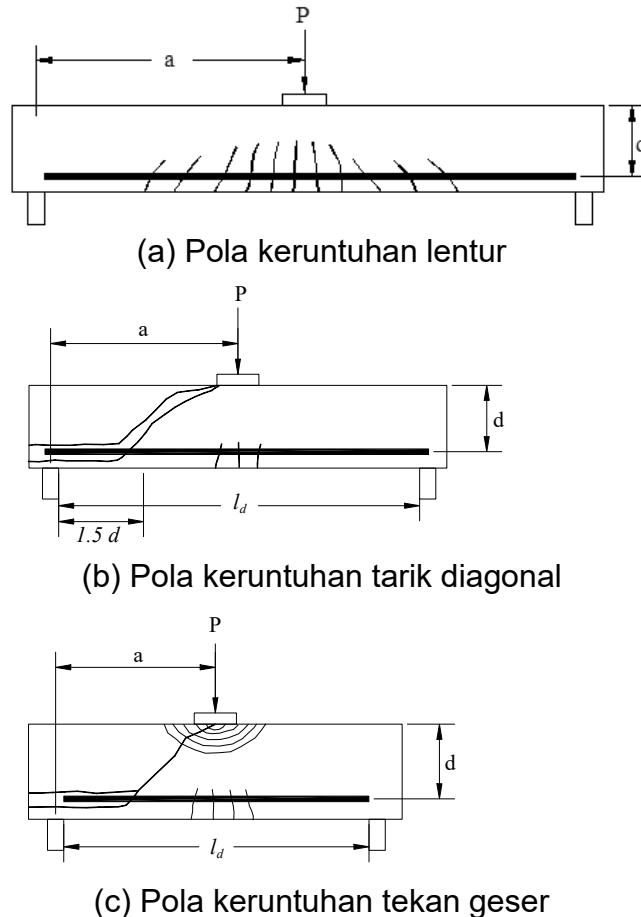
Tipe keruntuhan balok beton bertulang sangat tergantung pada kelangsungan balok. Kelangsungan balok dinyatakan dengan rasio a/d untuk beban terpusat, dimana a adalah panjang bentang geser (*shear span*) dan d adalah tinggi efektif penampang. Bentang geser ditentukan berdasarkan jarak antara titik pembebanan sebuah beban terpusat terhadap tumpuan. Menurut Nawi (Nawi 1998), keruntuhan balok beton bertulang dapat terjadi menurut salah satu dari tiga ragam keruntuhan ini:

- a. Keruntuhan lentur (*flexural failure*), yaitu keruntuhan yang terjadi pada balok beton bertulang yang memiliki rasio bentang geser dengan tinggi efektif penampang (a/d) lebih besar dari 5.5 seperti yang terlihat pada **Gambar 5(a)**. Pada balok beton bertulang yang didisain *under-reinforced*, keruntuhan balok terjadi setelah tulangan tarik mengalami leleh.
- b. Keruntuhan tarik diagonal (*diagonal tension failure*), yaitu keruntuhan yang terjadi pada balok beton bertulang yang memiliki rasio bentang geser dengan tinggi efektif penampang

(a/d) antara 2.5 – 5.5 seperti yang terlihat pada **Gambar 5(b)**.

Retak miring muncul setelah terjadinya retakan lentur dan hilangnya lekatan tulangan dengan beton. Retak miring terjadi akibat tegangan utama (*principle stress*) dalam balok sebagai kuat tarik diagonal nominal lebih kecil dari tegangan utama akibat beban. Keruntuhan terjadi pada retak miring secara tiba-tiba tanpa peringatan. Keruntuhan berkarakteristik getas dan lendutan yang relatif kecil.

- c. Keruntuhan geser tekan (*shear compression failure*), yaitu keruntuhan yang terjadi pada balok yang memiliki rasio bentang geser dengan tinggi efektif penampang (a/d) antara 1.0 – 2.5 seperti yang terlihat pada **Gambar 5(c)**. Retak miring muncul setelah terjadinya retak lentur dan terjadinya kehilangan lekatan tulangan memanjang dengan beton. Kemiringan retak ini lebih curam dibandingkan dengan retak diagonal tarik. Keruntuhan balok terjadi pada retak miring yang diikuti dengan hancurnya beton pada sisi tekan.



Gambar 5. Pola keruntuhan balok beton bertulang (Nawi 1998).

4. Momen Retak Awal

Sebagaimana halnya dengan balok beton bertulang yang menggunakan tulangan baja, balok beton dengan tulangan *FRP Bar* juga mengalami retak pada saat nilai modulus keruntuhan beton (f_r') dicapai. Menurut (ACI Committee 318 2008), besarnya modulus keruntuhan beton dapat dihitung menurut **Persamaan (6)** sementara momen retak dihitung dengan **Persamaan (7)**.

$$f_r' = 0.62\sqrt{f_c'} \quad (6)$$

$$M_{cr} = \frac{2f_r I_g}{h} \quad (7)$$

$$I_g = \frac{1}{12}bh^2 \quad (8)$$

dimana

f_r = modulus keruntuhan beton (MPa)

M_{cr} = momen retak (Nm)

I_g = inersia penampang bruto (mm^4)

b = Lebar penampang (mm)

h = tinggi penampang (mm)

5. Momen Nominal

Ketika rasio tulangan yang ada lebih besar dari rasio tulangan seimbang ($\rho_f > \rho_{fb}$), maka momen nominal penampang beton bertulangan FRP dihitung berdasarkan kesetimbangan gaya dan regangan dalam penampang seperti yang terlihat pada **Gambar 4(a)**. Distribusi tegangan diperkirakan dengan asumsi sebagai blok tegangan segiempat. Momen nominal penampang dihitung dengan persamaan (ACI 440.1R-06 2003):

$$M_n = A_s f_f \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (9)$$

$$f_f = \left[\sqrt{\frac{(E_f \varepsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0.85 \beta_1 f'_c}{\rho_f} E_f \varepsilon_{cu}} - 0.5 E_f \varepsilon_{cu} \right] \leq f_{fu} \quad (10)$$

$$a = \frac{A_f f_f}{\beta_1 0.85 f'_c b} \quad (11)$$

$$\rho_f = \frac{A_f}{bd} \quad (12)$$

dimana:

M_n = momen nominal penampang (Nmm)

ρ_f = rasio tulangan FRP

f_f = tegangan dalam tulangan FRP (MPa)

f_{fu} = tegangan ultimit disain tulangan FRP (MPa)

f'_c = kuat tekan beton (MPa)

b = lebar penampang (mm)

d = tinggi efektif penampang (mm)

E_f = modulus elastisitas tulangan FRP (MPa)

ε_{cu} = regangan tekan ultimit beton

β_1 = faktor reduksi kuat tekan beton

A_f = luas tulangan FRP (mm^2)

Tegangan pada tulangan FRP dengan karakteristik linear elastik, harus lebih kecil dari tegangan tarik disain. Nilai kuat tarik tulangan FRP ($A_f f_f$) memegang peranan penting pada balok beton bertulang karena menentukan besarnya kapasitas lentur, lendutan dan lebar retak (El-Nemr et al, 2018).

Hal berbeda jika rasio tulangan yang ada lebih kecil dari rasio tulangan seimbang ($\rho_f < \rho_{fb}$), blok tegangan segiempat ekivalen tidak dapat diterapkan karena nilai regangan maksimum beton ($\varepsilon_c = 0.003$) tidak dapat dicapai. Analisis penampang beton tertekan menggabungkan dua variabel yang tidak diketahui yaitu regangan tekan beton dan tinggi penampang tertekan terhadap sumbu netral pada saat runtuh. Untuk memudahkan dalam analisis, (ACI 440.1R-06 2003) memberikan perhitungan yang telah disederhanakan untuk menghitung momen nominal penampang balok beton bertulang FRP dengan $\rho_f < \rho_{fb}$ seperti yang terlihat dalam

Persamaan (12) dan Persamaan (13).

$$M_n = A_f f_{fu} \left(d - \frac{\beta_1 c_b}{2} \right) \quad (13)$$

$$c_b = \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu}} \right) d \quad (14)$$

dimana:

M_n = momen nominal penampang (Nmm)

A_f = luas penampang tulangan FRP (mm^2)

f_{fu} = tegangan ultimit disain tulangan FRP (MPa)

d = tinggi efektif penampang (mm)

c_b = tinggi garis netral kondisi seimbang (mm)

ε_{cu} = regangan tekan ultimit beton

ε_{fu} = regangan runtuh disain tulangan FRP

$$\beta_I = \text{faktor reduksi kuat tekan beton}$$

6. Daya Layan

Salah satu kelemahan balok beton bertulang yang menggunakan tulangan FRP yaitu rendahnyakekakuan setelah mengalami retak. Rancangan elemen lentur yang menggunakan tulangan FRP harus memenuhi kriteria layan yang memuaskan dalam hal lendutan dan lebar retak (ACI 440.1R-06 2003). Daya layan dapat didefinisikan sebagai kinerja yang memuaskan pada kondisi beban layan yang terlihat dalam dua parameter :

- a. Retakan - Dengan alasan estetika maka lebar retak yang berlebihan tidak diperkenankan dan lainnya (misalnya, untuk kebocoran) yang dapat merusak atau memperburuk beton struktural. Lebar retakan maksimum untuk beton bertulangan FRP dapat dihitung berdasarkan formula yang diterima dalam (ACI Committee 318 2008). Formula ini dapat digunakan untuk tulangan baja atau FRP tergantung pada koefisien kualitas lekatan (k_b).

$$w = 2 \frac{f_f}{E_f} \beta k_b \sqrt{d_c^2 + \left(\frac{s}{2}\right)^2} \quad (15)$$

dimana:

$$w = \text{lebar retak maksimum (mm)}$$

$$f_f = \text{tegangan dalam tulangan FRP (MPa)}$$

- E_f = modulus elastisitas tulangan FRP (MPa)
 β = rasio jarak garis netral ke muka sisi tarik
 dengan garis netral ke as tulangan tarik
 d_c = tebal selimut yang dihitung dari sisi tarik ke
 as tulangan terdekat (mm)
 k_b = koefisien derajat kelekatan tulangan dengan
 beton, (ACI 440.1R-06 2003)
 mengasumsikan sebesar 1.4
 s = jarak spasi tulangan memanjang (mm)

b. Lendutan - Lendutan harus berada dalam batas yang dapat diterima akibat penggunaan struktur (misalnya, untuk mendukung elemen nonstruktural tanpa kerusakan). Lendutan elemen struktur terkait dengan kekakuan penampang. Kekakuan didefinisikan sebagai gaya yang diperlukan untuk memperoleh satu unit displacement (Priestley et al, 2008). Kekakuan dinyatakan dalam **Persamaan 16**.

$$K = \frac{P}{\Delta} \quad (16)$$

dimana:

- K = kekakuan (N/mm)
 P = gaya (N)
 Δ = lendutan/perpindahan (mm)

Kekakuan elemen struktur tergantung pada modulus elastisitas bahan dan inersia penampang. Pada elemen struktur beton bertulang, inersia penampang menggunakan inersia efektif untuk memprediksi besarnya lendutan. (ACI Committee 318 2008) mengadopsi formula modifikasi dari persamaan Branson untuk menghitung momen inersia efektif sebagai berikut:

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \beta_d I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] I_{cr} \leq I_g \quad (17)$$

dimana:

I_e = inersia penampang efektif (mm^4)

I_g = inersia penampang bruto (mm^4)

I_{cr} = inersia penampang retak (mm^4)

M_{cr} = momen retak (Nmm)

M_a = momen maksimum pada level lendutan yang dihitung (Nmm)

β_d = koefisien reduksi dalam perhitungan lendutan

Inersia penampang retak (I_{cr}) balok bertulang FRP dapat ditentukan dengan menggunakan analisis elastis sesuai

Persamaan 18.

$$I_{cr} = \frac{bd^3}{3}k^3 + n_f A_f d^2 (1-k)^2 \quad (18)$$

$$k = \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2 - \rho_f n_f} \quad (19)$$

$$n_f = \frac{E_f}{E_c} \quad (20)$$

dimana:

- A_f = luas tulangan FRP (mm^2)
- k = rasio kedalaman sumbu netral terhadap kedalaman tulangan
- n_f = rasio modulus elastisitas FRP dengan beton
- b = lebar penampang (mm)
- d = tinggi efektif penampang (mm)
- ρ_f = rasio tulangan tulangan FRP
- E_f = modulus elastisitas FRP (MPa)
- E_c = modulus elastisitas beton (MPa)

Nilai β_d didapatkan dari rasio tulangan FRP terhadap rasio tulangan seimbangnya (ACI 440.1R-06 2003).

$$\beta_d = \frac{1}{5} \left(\frac{\rho_f}{\rho_{fb}} \right) \leq 1 \quad (21)$$

dimana:

- ρ_f = rasio tulangan FRP

$$\rho_{fb} = \text{rasio tulangan seimbang dari tulangan FRP}$$

Selain nilai kekakuan, lendutan elemen struktur beton bertulang juga dipengaruhi oleh jenis tumpuan dan model pembebanan.

Persamaan 22 merupakan persamaan yang dapat digunakan untuk menghitung lendutan akibat momen dari beban merata pada balok beton bertulang di atas dua buah perletakan sederhana (ACI 440.1R-06 2003).

$$\Delta = \frac{5ML^2}{48E_c I_e} \quad (22)$$

Dimana:

$$M = \text{Momen dari beban merata (Nmm)}$$

$$L = \text{Panjang bentang (mm)}$$

$$E_c = \text{Modulus elastisitas beton (MPa)}$$

$$I_e = \text{Inersia penampang efektif (mm}^4\text{)}$$

Persamaan 23 merupakan persamaan yang digunakan untuk menghitung besarnya lendutan balok beton bertulang yang ditumpu sederhana akibat dua buah beban terpusat sebesar P dengan bentang geser sebesar a .

$$\Delta = \frac{PL}{24E_c I_e} (3L^2 - 4a^2) \quad (23)$$

dimana:

Δ	=	Lendutan (mm)
P	=	Beban terpusat (N)
L	=	Panjang bentang (mm)
E_c	=	Modulus elastisitas beton (MPa)
I_e	=	Inersia penampang efektif (mm^4)
a	=	Jarak bentang geser (mm)

7. Rekatan Tulangan-Beton

Beton bertulang merupakan bahan komposit dimana lekatan antara tulangan dengan beton merupakan aspek penting yang harus diperhatikan karena kekuatan lekatan ini menahan gaya-gaya yang dapat menyebabkan lepasnya tulangan dari beton. Menurut Nawy (Nawi 1998) kuat lekat antara baja tulangan dan beton yang membungkusnya dipengaruhi oleh faktor antara lain (1) Adhesi, merupakan ikatan kimiawi yang terbentuk pada seluruh bidang kontak antara beton dan tulangan akibat adanya proses reaksi pengerasan semen. (2) Friksi, merupakan tahanan geser terhadap gelinciran dan saling mengunci pada saat elemen penguat atau tulangan mengalami tegangan tarik. Mekanisme ini terbentuk karena adanya permukaan yang tidak beraturan pada bidang kontak antara beton dan tulangan. (3) Interlocking, mekanisme ini terbentuk karena adanya interaksi antara ulir atau tonjolan tulangan (*rib*) dengan matriks beton yang ada di sekitarnya, mekanisme ini sangat

bergantung pada kekuatan, dan kepadatan material beton, geometri dan diameter tulangan. (4) *Gripping*, efek memegang (*gripping*), akibat susut/pengeringan beton di sekeliling tulangan. (4) Efek kualitas beton, kualitas beton meliputi kuat tarik dan kuat tekan. Akibat desakan oleh tegangan radial, beton mengalami tegangan tarik keliling, jika tegangan tarik ijin beton terlampaui maka akan mengakibatkan retak belah. (5) Efek mekanisme penjangkaran ujung tulangan, efek penjangkaran dapat berupa panjang lewatan/tanam, bengkokan tulangan dan persilangan tulangan. (6) Diameter, bentuk dan jarak tulangan (kesemuanya) mempunyai pengaruh terhadap pertumbuhan retak radial. Diameter tulangan kecil memiliki ketahanan slip yang lebih baik dibandingkan dengan tulangan diameter besar. Sama halnya dengan tulangan berulir lebih ungu menahan slip dibandingkan dengan tulangan polos. (7) Selimut beton, selimut beton yang tidak mencukupi untuk mengakomodasi tegangan tarik keliling mengakibatkan retak belah yang selanjutnya mengakibatkan kehancuran belah.

Salah satu keuntungan penggunaan tulangan FRP pada struktur beton bertulang selain tahan korosi adalah rekatannya yang cukup baik dengan beton. Tulangan FRP dari material serat gelas memiliki lekatan yang cukup baik, setara dengan lekatan tulangan besi pada beton berdasarkan uji *pull-out* (Rolland et al. 2018). Penelitian yang serupa juga menunjukkan bahwa tulangan FRP dari material gelas

dan karbon juga memiliki lekatan yang sama baiknya dengan tulangan besi (Baena et al., 2009). Maranan (Maranan et al., 2015) juga meneliti kekuatan lekatan tulangan *GFRP bar* dalam beton geopolimer dimana hasilnya menunjukkan lekatan yang cukup baik.

8. Kurvatur, Daktilitas dan *Deformability*

Kurvatur merupakan kelengkungan yang terjadi pada balok akibat beban lentur. Kurvatur pada suatu elemen dapat diartikan sebagai rotasi pada elemen tersebut per panjang batang. Kurvatur pada beton bertulang dapat ditentukan berdasarkan regangan beton dan tinggi penampang beton tertekan (Park and Pauly 1974). Kurvatur balok beton bertulang FRP dapat dinyatakan dalam **Persamaan 24**

$$\varphi_m = \frac{\varepsilon_c}{c} \quad (24)$$

$$c = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_f} d \quad (25)$$

dimana:

φ_m = kurvatur pada nilai momen tertentu dalam (radian/mm)

c = tinggi zona tertekan dari penampang beton (mm)

d = tinggi efektif penampang (mm)

ε_c = regangan beton

ε_f = regangan dalam tulangan FRP

Daktilitas merupakan kemampuan struktur untuk tidak mengalami keruntuhan secara tiba-tiba (getas) dengan mengalami deformasi yang cukup besar pada saat beban maksimum tercapai sebelum struktur tersebut mengalami keruntuhan (Park and Pauly 1974).

Daktilitas pada balok beton bertulang merupakan ukuran besarnya penyerapan energi melalui deformasi plastis. (Thériault and Benmokrane 1998) menekankan tiga cara untuk mendapatkan faktor daktilitas pada balok beton bertulang baja yaitu berdasarkan lendutan, kurvatur atau rotasi melalui perbandingan nilai ultimit dan nilai leleh. Daktilitas kurvatur pada balok beton bertulang baja dapat ditentukan berdasarkan **Persamaan 26.**

$$\mu_\phi = \frac{\varphi_u}{\varphi_y} = \frac{\varepsilon_c}{f_y / E_s} \frac{d(1-k)}{a / \beta_1} \quad (26)$$

Dimana:

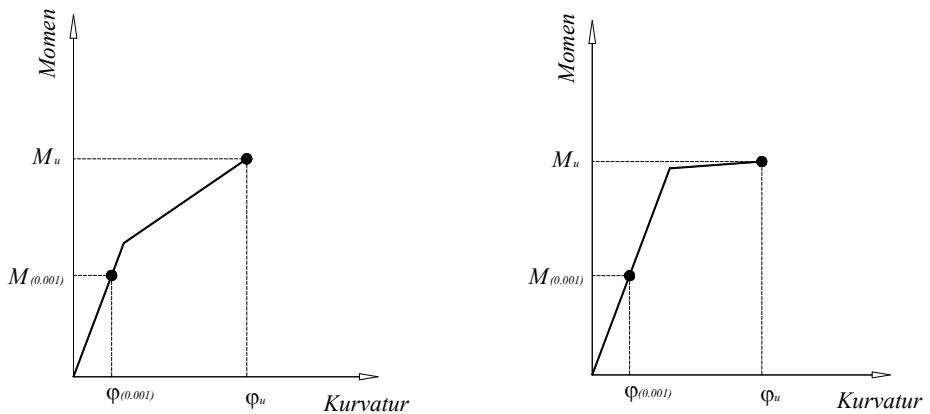
- μ_ϕ = daktilitas kurvatur
- φ_u = kurvatur ultimit (rad/mm)
- φ_y = kurvatur kondisi leleh (radian/mm)
- ε_c = regangan beton
- E_s = modulus elastisitas tulangan baja (Mpa)
- f_y = tegangan leleh tulangan baja (MPa)
- d = tinggi efektif penampang (mm)
- a = tinggi blok tekan equivalen (mm)

k = rasio kedalaman sumbu netral terhadap kedalaman tulangan

β_I = faktor reduksi kuat tekan beton

Untuk menjamin elemen struktur beton bertulang baja bersifat daktail, maka (SNI 2847 2013) mensyaratkan rasio tulangan maksimum harus lebih kecil dari 75% rasio tulangan seimbang atau rasio tulangan lebih kecil dari 0.025.

Deformability didefinisikan sebagai kemampuan untuk menyerap energi tanpa mengalami kerusakan yang parah. *Deformability* dapat diartikan sebagai kemampuan beton untuk berdeformasi sebelum mengalami kehancuran. (Cai at al., 2017) menyimpulkan bahwa terdapat dua metode untuk meningkatkan *deformability* elemen struktur beton bertulang FRP yaitu dengan menggunakan tulangan hybrid FRP-baja dan meningkatkan properti mekanik beton. *Deformability* dapat dievaluasi berdasarkan indeks *deformability* (Vijay at al., 1996). Indeks *deformability* dapat dianalisis berdasarkan pendekatan *deformation-based* (Jaeger at al., 1997). **Persamaan 27** merupakan persamaan indeks *deformability* berdasarkan pendekatan *deformation-based* dimana besarnya kurvatur dan momen yang digunakan dalam perhitungan mengacu pada **Gambar 6**.



(a) balok dengan tulangan elastis

(b) balok dengan tulangan elasto-plastis

Gambar 6. Acuan penentuan nilai indeks deformabilitas

$$\mu_M = \frac{\varphi_u}{\varphi_{0.001}} \frac{M_u}{M_{0.001}} \quad (27)$$

dimana:

μ_M = indeks deformability

φ_u = kurvatur ultimit (rad/mm)

$\varphi_{0.001}$ = kurvatur pada kondisi regangan beton 0.001
(radian/mm)

M_u = momen ultimit (Nmm)

$M_{0,001}$ = momen pada saat regangan beton 0.001 (Nmm)

Indeks deformability minimum untuk penampang balok beton segi empat sebesar empat dan enam untuk penampang balok T (CAN/CSA-S6-14, 2014).

9. Pengaruh selimut beton

Fungsi utama selimut beton pada struktur beton bertulang adalah untuk melindungi tulangan baja dari korosi dan suhu yang tinggi akibat kebakaran. Ketebalan selimut beton pada struktur beton bertulang tergantung pada lingkungan di sekitarnya. Semakin agresif lingkungan, maka semakin tebal selimut beton yang harus diberikan untuk melindungi tulangan.

Ketebalan minimum selimut beton untuk tulangan baja dengan diameter lebih kecil atau sama dengan 16 mm sebesar 15 mm dan untuk tulangan dengan diameter lebih besar atau sama dengan 19 mm sebesar 20 mm (SNI 2847 2002). Peningkatan tebal selimut beton dapat meningkatkan kapasitas rekatan struktur baja dengan beton (X. Wang et al. 2019). Bertambahnya tebal selimut beton meningkatkan kapasitas slip tulangan GFRP bar ke beton (Veljkovic et al. 2017).

Berkurangnya tebal selimut beton menyebabkan berkurangnya rekatan tulangan dengan beton di sekelilingnya. Berkurangnya rekatan tulangan dengan beton menurunkan kapasitas lentur, kekakuan dan daktilitas balok beton bertulang (Mousa 2016).

B. Kuat Geser Balok Beton Menggunakan *GFRP sheet U-Wrap*

Kekuatan geser nominal penampang beton bertulang adalah jumlah tahanan geser yang diberikan oleh beton dan tulangan geser.

1. Kontribusi Geser Beton Yang Ditulangi Dengan Tulangan FRP

Penampang melintang dengan penulangan lentur menggunakan tulangan FRP setelah retak memiliki kedalaman yang lebih kecil ke sumbu netral karena kekakuan aksial yang lebih rendah dibandingkan dengan beton bertulang baja dengan luas tulangan memanjang yang sama. Daerah tertekan penampang berkurang, dan lebar retak lebih lebar. Akibatnya, ketahanan geser yang disediakan oleh ikatan antar agregat dan beton tertekan lebih kecil. Penelitian tentang kapasitas geser batang lentur tanpa tulangan geser menunjukkan bahwa kekuatan geser beton dipengaruhi oleh kekakuan tulangan lentur. Kontribusi tulangan memanjang FRP dengan istilah aksi dowel belum dapat ditentukan. Karena kekuatan dan kekakuan yang lebih rendah pada batang FRP dalam arah melintang, diasumsikan bahwa kontribusi aksi dowelnya lebih kecil dari pada tulangan baja dengan luas yang sama.

Kekuatan geser penampang beton bertulang yang menggunakan tulangan FRP dapat dievaluasi menggunakan **Persamaan 28** (ACI 440.1R-06 2003).

$$V_c = \frac{2}{5} \sqrt{f'_c} b_w c \quad (28)$$

dimana:

V_c = kontribusi beton menahan geser (N)

f'_c = kuat tekan beton (MPa)

b_w = lebar badan balok (mm)

c = kedalaman penampang tak retak terhadap sumbu netral (mm)

Kedalaman penampang tak retak terhadap sumbu netral ditentukan berdasarkan **Persamaan 29.**

$$c = kd \quad (29)$$

dimana:

c = kedalaman penampang tak retak terhadap sumbu netral (mm)

k = Rasio kedalaman sumbu netral terhadap kedalaman tulangan

d = Tinggi penampang efektif (mm)

2. Kontribusi Geser Lembaran FRP

Kontribusi sistem perkuatan dengan lembaran FRP terhadap kekuatan geser didasarkan pada orientasi serat dan asumsi pola retak (Khalifa et al., 1998). Kekuatan geser yang diberikan oleh penulangan dengan lembaran FRP dapat ditentukan dengan menghitung gaya yang dihasilkan dari tegangan tarik pada lembaran FRP di seluruh retakan. Menurut (ACI 440.2R-08 2008), sumbang geser dari lembaran FRP dapat dihitung berdasarkan persamaan berikut:

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} (\sin \alpha + \cos \alpha)}{s_f} \quad (30)$$

$$A_{fv} = 2nt_f w_f \quad (31)$$

$$f_{fe} = \varepsilon_{fe} E_{fe} \quad (32)$$

dimana:

V_f	=	kuat geser dari FRP sheet (N)
A_{fv}	=	luas tulangan geser dari FRP sheet (mm^2)
f_{fe}	=	tegangan dalam FRP sheet (MPa)
s_f	=	jarak FRP sheet (mm)
n	=	Jumlah lapis FRP sheet
t_f	=	tebal FRP sheet (mm)
w_f	=	lebar FRP sheet (mm)
ε_{fe}	=	regangan efektif FRP sheet
E_{fe}	=	modulus elastisitas FRP sheet (MPa)

Sistem FRP yang tidak menutup keseluruhan bagian penampang (membungkus dua dan tiga sisi) atau lapisan *U-Wrap* telah diamati proses delaminasinya dari beton sebelum hilangnya ikatan antar agregat penampang. Tegangan lekatan dianalisis untuk menentukan kegunaan sistem ini dan tingkat regangan efektif yang dapat dicapai. Menurut (ACI 440.2R-08 2008), untuk menghitung kekuatan geser

maka regangan efektif yang dihitung harus menggunakan koefisien reduksi ikatan κ_v sebagai berikut:

$$\varepsilon_{fe} = K_V \varepsilon_{fu} \leq 0.04 \quad (33)$$

$$K_V = \frac{k_1 k_2 L_e}{11900 \varepsilon_{fu}} \leq 0.75 \quad (34)$$

$$L_e = \frac{23300}{(n_f t_f E_{fe})^{0.58}} \quad (35)$$

dimana:

K_V = koefisien reduksi ikatan laminasi FRP sheet

L_e = panjang lekatan aktif laminasi FRP sheet (mm)

ε_{fu} = regangan ultimit FRP sheet

Koefisien reduksi lekatan bergantung pada dua faktor modifikasi, k_1 dan k_2 , yang memperhitungkan kekuatan beton dan jenis skema laminasi yang digunakan dihitung dengan persamaan

$$k_1 = \left(\frac{f_c'}{27} \right)^{2/3} \quad (36)$$

$$k_2 = \frac{d_{fv} - L_e}{d_{fv}} \quad (37)$$

dimana:

k_1 = faktor modifikasi kekuatan beton yang dipakai untuk menghitung K_V

k_2 = faktor modifikasi skema laminasi untuk

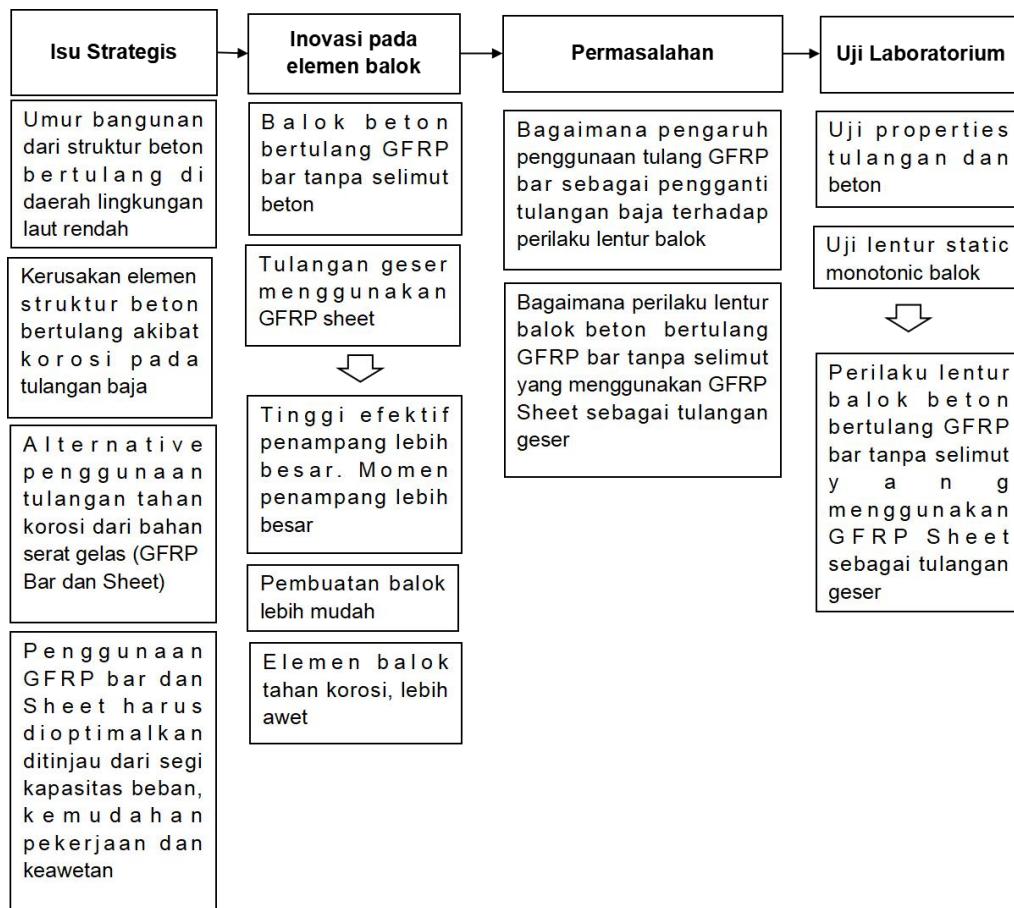
menghitung K_v

f'_c = kuat tekan beton (MPa)

d_{fv} = tinggi efektif tulangan geser FRP sheet (mm)

C. Kerangka Pikir Penelitian

Dalam upaya meningkatkan keawetan struktur bangunan dari beton bertulang, utamanya yang berada dalam lingkungan yang korosif maka peneliti membuat inovasi penggunaan material tahan korosi dari bahan *FRP* (*Fiber Reinforced Polymer*). Seluruh komponen beton bertulang menggunakan material *GFRP* (*Glass Fiber Reinforced Polymer*) yang memiliki ketahanan korosi yang lebih baik dibandingkan karbon atau aramik. Tulangan tarik menggunakan *GFRP bar* dan tulangan geser menggunakan *GFRP sheet* dalam bentuk *U-Wrap* yang direkatkan pada permukaan balok setelah beton mengeras menggunakan *epoxy resin*. Karakteristik tahan korosi menjadi alasan utama balok beton tidak menggunakan selimut beton disamping bertambahnya tinggi efektif penampang yang akan meningkatkan kapasitas beban. Penelitian ini mencoba mengungkapkan perilaku lentur balok beton bertulang tanpa selimut beton yang menggunakan *GFRP bar* sebagai tulangan tarik dan *GFRP sheet* sebagai tulangan geser dengan uji model balok beton bertulang di Laboratorium. Kerangka pikir penelitian ini dapat dilihat pada **Gambar 7**.



Gambar 7. Kerangka pikir penelitian