

TUGAS AKHIR

**PERILAKU LENTUR BALOK BETON BERTULANG
GFRP BAR**

***FLEXURAL BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE
BEAMS USING GFRP BAR***

**DIO ATHAGASHI RUDY
D011 17 1307**



**PROGRAM SARJANA
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
2021**

LEMBAR PENGESAHAN

LEMBAR PENGESAHAN (TUGAS AKHIR)

PERILAKU LENTUR BALOK BETON BERTULANG GFRP BAR

Disusun dan diajukan oleh:

DIO ATHAGASHI RUDY

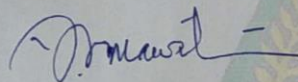
D011 17 1307

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 19 Mei 2021 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

menyetujui,

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,



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

Dr. Eng. Fakhruddin, ST, M.Eng
NIP. 198702282019031005

Ketua Program Studi,



Prof. Dr. H. M. Wibardi Tjaronge, ST, M.Eng
NIP. 196405292002121002

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Dio Athagashi Rudy
NIM : D011 17 1307
Program Studi : Teknik Sipil
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul:

Perilaku Lentur Balok Beton Bertulang GFRP Bar

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

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

Makassar, 27 Mei 2021

Yang menyatakan,



(Dio Athagashi Rudy)

KATA PENGANTAR

Puji dan Syukur kita panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa, atas berkat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “**PERILAKU LENTUR BALOK BETON BERTULANG GFRP BAR**” yang merupakan salah satu syarat yang diajukan untuk menyelesaikan studi pada Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa banyak kendala yang dihadapi dalam penyusunan tugas akhir ini, namun berkat bantuan dari berbagai pihak, maka tugas akhir ini dapat terselesaikan. Oleh karena itu, dengan segala ketulusan, penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada :

1. **Bapak Dr. Ir. H. Muhammad Arsyad Thaha, MT.**, selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
2. **Bapak Prof. Dr. H. M Wihardi Tjaronge ST., M.Eng.**, selaku Ketua Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
3. **Dr. Eng. Hj. Rita Irmawaty, ST., MT.**, selaku dosen pembimbing I yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan dan pengarahan mulai dari awal penelitian hingga selesainya penulisan ini.
4. **Dr. Eng. Fakhruddin, ST, M. Eng.**, selaku dosen pembimbing II yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan dan pengarahan mulai dari awal penelitian hingga selesainya penulisan ini.

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

Yang teristimewa penulis persembahkan kepada:

1. Kedua orang tua yang tercinta, yaitu ayahanda **Rudy** dan ibunda **Rossy** atas doa, kasih sayang, dan segala dukungan selama ini, baik spritual maupun material, serta seluruh keluarga besar atas sumbangsih dan dorongan yang telah diberikan.
2. Bapak **Kusnadi**, yang telah memberikan kesempatan untuk ikut dalam tim penelitian beliau, serta telah banyak memberikan bantuan baik berupa masukan, saran, serta menyediakan segala keperluan dalam penelitian ini.
3. Rekan-rekan di **Laboratorium Riset Perkuatan Struktur**, yang senantiasa memberikan semangat dan dorongan dalam penyelesaian tugas akhir ini.
4. Saudara-saudari **PLASTIS** yang senantiasa memberikan warna yang sangat begitu indah, dukungan yang tiada henti, semangat dan dorongan dalam penyelesaian tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa setiap karya buatan manusia tidak akan pernah luput dari kekurangan, oleh karena itu penulis mengharapkan

kepada pembaca kiranya dapat memberi sumbangan pemikiran demi kesempurnaan dan pembaharuan tugas akhir ini.

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

Gowa, Maret 2021

Penulis

DAFTAR ISI

Sampul.....	i
Halaman pengesahan	ii
PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN.....	xiii
ABSTRAK	xv
ABSTRACT	xvi
BAB I	1
PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	3
C. Tujuan Penelitian	4
D. Batasan Masalah	4
E. Manfaat Penelitian	4
F. Ruang Lingkup Penelitian.....	5
G. Sistematika Penulisan.....	5

BAB II	7
TINJAUAN PUSTAKA	7
A. Kuat Lentur Balok Beton Bertulang	7
1. Momen nominal balok bertulang baja.....	8
2. Momen nominal balok beton bertulang FRP	9
3. Kekakuan balok.....	12
4. Tipe Keruntuhan Balok Beton Bertulang	16
B. Kuat Geser Balok Beton Bertulang	18
C. Penelitian Terdahulu.....	21
BAB III	21
METODOLOGI	26
A. Lokasi dan Waktu Penelitian	26
B. Rancangan Penelitian	27
1. Uji Karakteristik Mekanis Material	28
2. Studi Analisis Kapasitas Balok	31
3. Pengujian Kapasitas Balok.....	35
BAB IV.....	40
HASIL DAN PEMBAHASAN.....	40
A. Karakteristik Mekanik Material	40

1. Karakteristik mekanis beton	40
2. Karakteristik mekanis tulangan	41
B. Hubungan Beban-Lendutan	44
C. Hubungan Beban-Regangan	49
1. Hubungan beban-regangan beton	49
1. Hubungan beban-regangan tulangan.....	52
D. Kapasitas Lentur	54
E. Kekakuan Balok	57
F. Pola Retak dan Mode Kegagalan.....	60
BAB V	65
PENUTUP.....	65
A. Kesimpulan	65
B. Saran.....	66
DAFTAR PUSTAKA.....	67
LAMPIRAN.....	72

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 . Pola keruntuhan balok beton bertulang (Nawi 1998).	18
Gambar 4 . Jeis-jenis tulangan FRP.....	21
Gambar 5 . Setting Pengujian PO dan DT.....	23
Gambar 6 . Benda uji.....	24
Gambar 7 . Sistem pengakuran ARs pada FRP.....	25
Gambar 8 . Pengujian pull-out.....	25
Gambar 9 . Bagan alir penelitian.....	27
Gambar 10 . Tulangan tarik	28
Gambar 11 . Tulangan geser	29
Gambar 12 . Material beton	29
Gambar 13 . <i>Universal Testing Machine</i> (UTM).....	30
Gambar 14 . Sampel pengujian karakteristik mekanis beton	31
Gambar 15 . Dimensi balok uji.....	32
Gambar 16 . Dimensi dan penulangan balok BK	33
Gambar 17 . Dimensi dan penulangan balok BFS	34
Gambar 18 . Penyiapan material tulangan balok uji.....	36
Gambar 19 . Bekisting	37

Gambar 20 . Curing balok beton bertulang dan sampel uji beton	38
Gambar 21 . Set-up pengujian balok	39
Gambar 22 . Pengujian karakteristik mekanis beton	40
Gambar 23 . Pengujian tarik tulangan baja	42
Gambar 24 . Hubungan beban-lendutan balok BK	46
Gambar 25 . Hubungan beban-lendutan balok BFS	48
Gambar 26 . Hubungan beban-regangan beton balok BK	50
Gambar 27 . Hubungan beban-regangan beton balok BFS	51
Gambar 28 . Hubungan beban-regangan tulangan balok BK	52
Gambar 29 . Hubungan beban-regangan tulangan balok BFS	53
Gambar 30 . Perbandingan beban ultimit balok BK dengan balok BFS ...	56
Gambar 31 . Luas penampang transformasi balok BK, BFS paska retak	57
Gambar 32 . Perbandingan kekakuan balok BK dan BFS	59
Gambar 33 . Perkembangan retak balok BK	61
Gambar 34 . Pola retak balok BK	62
Gambar 35 . Perkembangan retak balok BFS	63
Gambar 36 . Pola retak balok BFS	64

DAFTAR TABEL

Nomor	Halaman
Tabel 1 . Variasi dan jumlah sampel balok beton bertulang.....	27
Tabel 2 . Beban teoritis	30
Tabel 3 . Nilai mekanis beton.....	36
Tabel 4 . Tegangan leleh, tegangan putus dan modulus elastisitas baja tulangan.....	37
Tabel 5 . Karakteristik mekanis tulangan <i>GFRP bar</i> diameter 13 mm	38
Tabel 6 . Beban retak awal	44
Tabel 7 . Beban leleh	45
Tabel 8 . Beban ultimit	45
Tabel 9 . Rasio momen eksperimental dengan teoritis balok BK.....	55
Tabel 10 . Rasio momen eksperimental dengan teoritis balok BFS	55
Tabel 11 . Kekakuan balok teoritis paska retak	58
Tabel 12 . Kekakuan, beban ultimit dan lendutan ultimit balok BK.....	59
Tabel 13 . Kekakuan balok BFS.....	59

DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN

Lambang/singkatan	Arti dan keterangan
Δ	= lendutan/perpindahan (mm)
β_l	= factor reduksi kuat tekan beton
ε_{cu}	= regangan ultimit beton
ρ_f	= rasio tulangan FRP
ρ_{fb}	= rasio tulangan seimbang dari tulangan FRP
ε_{fu}	= regangan runtuh disain tulangan FRP
M_a	= momen maksimum pada level lendutan yang dihitung (Nmm)
a	= jarak bentang geser (mm) (Persamaan 22)
A_f	= luas tulangan FRP (mm ²)
b	= lebar penampang (mm)
b_w	= lebar badan balok (mm)
c	= kedalaman penampang tak retak terhadap sumbu netral (mm)
d	= tinggi efektif penampang (mm)
E_c	= modulus elastisitas beton (MPa)
E_f	= modulus elastisitas tulangan FRP (MPa)
f'_c	= kuat tekan beton (MPa)
f_f	= tegangan dalam tulangan FRP (MPa)
f_{fu}	= kuat tarik ultimit disain tulangan FRP (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
L	=	panjang bentang (mm)
M	=	momen dari beban merata (Nmm)
M_{cr}	=	momen retak (Nm)
M_n	=	momen nominal penampang (Nmm)
n_f	=	rasio modulus elastisitas FRP dengan beton
P	=	beban terpusat (N)
s	=	jarak spasi tulangan memanjang (mm)
V_c	=	kontribusi beton menahan geser (N)
β_d	=	koefisien reduksi dalam perhitungan lendutan
ρ_f	=	rasio tulangan terpasang balok beton bertulang FRP
ρ_{fb}	=	rasio tulangan seimbang balok beton bertulang FRP

ABSTRAK

Struktur beton bertulang pada lingkungan laut pada umumnya mengalami kerusakan akibat korosi pada tulangan baja. Korosi mengurangi luas penampang tulangan dan menjadi penyebab menurunnya kemampuan layan struktur. 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*).

Pada penelitian ini digunakan 2 varian balok uji dengan kode nama balok BK dan balok BFS, masing-masing 3 buah. Balok BK merupakan balok beton konvensional yang menggunakan tulangan baja 3D13 sebagai tulangan tarik, sengkang baja $\phi 8-100$ sebagai tulangan geser disertai selimut beton dengan tebal 30 mm. Sedangkan, Balok BFS merupakan balok yang menggunakan tulangan *GFRP bar* 3D13 sebagai tulangan tarik, sengkang baja $\phi 8-100$ sebagai tulangan geser juga disertai selimut beton dengan tebal 30 mm. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kapasitas lentur, kekakuan dan pola retak balok beton bertulang *GFRP bar* (BFS) dibandingkan dengan balok beton bertulangan baja konvensional (BK). Pengujian dilakukan dengan dua titik pembebanan lentur. Pembebanan diberikan secara statis monotonik dengan kecepatan 0.03 mm/detik sampai benda uji gagal.

Hasil penelitian menunjukkan kapasitas lentur balok beton bertulang *GFRP bar* meningkat 39.5% dari balok beton bertulang baja pada rasio tulangan lentur dan geser yang sama. Kekakuan balok beton bertulang *GFRP bar* menurun 68.5% dibandingkan balok beton bertulang baja pada rasio tulangan lentur dan geser yang sama. balok beton bertulang baja didominasi oleh retak lentur, sedangkan balok beton bertulang *GRP bar* didominasi oleh retak miring yang dimulai pada fase tengah pembebanan.

ABSTRACT

In general, reinforced concrete structures in marine environments are damaged due to corrosion of steel reinforcement. Corrosion reduces the cross-sectional area of the reinforcement and causes a decrease in the serviceability of the structure. The use of corrosion-resistant reinforcement in reinforced concrete structural elements can maintain the design life of the building and reduce maintenance costs during the service life. One of the materials developed as reinforcement in reinforced concrete structures is FRP (Fiber Reinforced Polymer) material.

In this study, 2 variants of the test beam were used with the code name BK beam and BFS beam, 3 pieces each. BK beam is a conventional concrete beam that uses 3D13 steel reinforcement as tensile reinforcement, steel crossbar f8-100 as shear reinforcement accompanied by a concrete blanket with a thickness of 30 mm. Meanwhile, BFS beam is a beam that uses GFRP bar 3D13 as tensile reinforcement, steel bar f8-100 as shear reinforcement is also accompanied by a concrete blanket with a thickness of 30 mm. This study aims to evaluate the flexural capacity, stiffness and crack pattern of GFRP bar (BFS) reinforced concrete blocks compared to conventional steel reinforced concrete (BK) beams. The test is carried out with two flexible loading points. The loading was applied monotonically at a rate of 0.03 mm / sec until the specimen failed.

The results showed that the flexural capacity of GFRP bar reinforced concrete beams increased 39.5% from steel reinforced concrete beams at the same ratio of flexural and shear reinforcement. The stiffness of GFRP bar reinforced concrete beam decreased 68.5% compared to steel reinforced concrete beam at the same ratio of bending and shear reinforcement. Steel reinforced concrete beams are dominated by flexural cracks, while GRP bar reinforced concrete beams dominated by oblique cracks starting in the middle phase of loading.

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 at al., 2007) dan ketahanan geser (L. Wang et al. 2015) penampang beton bertulang .



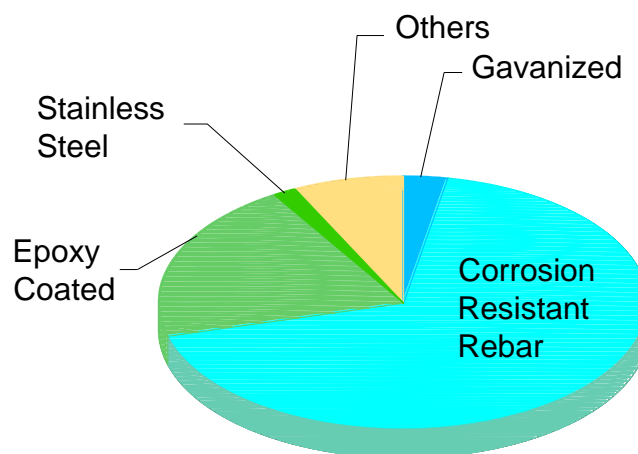
a. Kerusakan beton akibat korosi tulangan geser



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 survey 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).

Berdasarkan latar belakang yang telah dikemukakan, maka dilakukan penelitian dengan judul “PERILAKU LENTUR BALOK BETON BERTULANG GFRP BAR”.

B. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang terkait, maka dapat dirumuskan beberapa rumusan masalah yaitu :

1. Bagaimana kapasitas lentur balok beton bertulang yang menggunakan *GFRP bar*.
2. Bagaimana kekakuan balok beton bertulang *GFRP bar*.
3. Bagaimana pola retak dan keruntuhan beton bertulang *GFRP bar*.

C. Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah, maka tujuan penelitian penelitian ini adalah:

1. Menganalisis kapasitas lentur balok beton bertulang *GFRP bar*.
2. Menganalisis kekakuan balok beton bertulang *GFRP bar*.
3. Menganalisis pola retak dan keruntuhan balok beton bertulang *GFRP bar*.

D. Batasan Masalah

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

1. Pengujian ini menggunakan dua tipe balok beton bertulang yaitu balok beton normal yang menggunakan tulangan baja (BK), balok beton normal menggunakan tulangan *GFRP bar* (BFS).
2. Jumlah tulangan Tarik sebanyak 3D13 untuk kedua tipe balok.
3. Mutu beton disamakan untuk semua balok uji dengan mutu beton desain 25 Mpa.
4. Penelitian ini difokuskan pada perilaku lentur balok terhadap beban statik monotonik.

E. Manfaat Penelitian

Berdasarkan tujuan yang ingin dicapai, maka manfaat yang diharapkan dalam penelitian ini adalah terciptanya inovasi sistim

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 $\varnothing 8$
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 agar penelitian selanjutnya dapat terlaksana dengan lebih baik dan aman.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Kuat Lentur Balok Beton Bertulang

Mode kegagalan struktur pada beton bertulang terdiri dari kegagalan tarik (*under-reinforced*) dan kegagalan tekan (*over-reinforced*). Kegagalan tarik pada beton bertulang baja ditandai dengan terjadinya leleh pada tulangan tarik sebelum hancurnya beton pada sisi tekan, sementara pada balok beton bertulang FRP bar ditandai dengan putusya tulangan FRP. Kegagalan tekan pada balok bertulang baja ditandai dengan hancurnya beton pada sisi tekan sebelum tulangan tarik mencapai leleh dan pada balok beton bertulang FRP juga ditandai dengan hancurnya beton pada sisi tekan sebelum tulangan tarik putus. Sebagian besar pedoman disain elemen struktur lentur yang menggunakan tulangan FRP bar yang diungkapkan oleh Bywalski (Bywalski et al, 2016) mengizinkan terjadinya dua mode kegagalan ini, namun mode kegagalan tekan lebih disukai dibandingkan dengan mode kegagalan tarik karena karakteristik plastis beton yang dapat melebihi kondisi batas bisa menjadi pertanda kegagalan dan kegagalannya kurang cepat dibandingkan dengan kegagalan akibat putusya tulangan FRP bar.

Kegagalan regangan seimbang pada balok beton bertulang baja diartikan sebagai regangan dalam beton (ϵ_c) mencapai nilai ultimit (ϵ_{cu}) dan regangan dalam tulangan (ϵ_s) mencapai regangan leleh (ϵ_y). Pada balok

beton bertulang FRP, kegagalan regangan seimbang diartikan sebagai regangan dalam beton (ϵ_c) dan regangan dalam tulangan FRP (ϵ_{frp}) secara bersamaan mencapai nilai ultimit ($\epsilon_c = \epsilon_{cu}$, dan $\epsilon_{frp} = \epsilon_{frpu}$).

1. Momen nominal balok bertulang baja

Balok beton bertulang baja dengan rasio tulangan lebih kecil tulangan seimbangnya didisain sebagai balok dengan keruntuhan tarik. Rasio tulangan seimbang balok beton bertulang baja didapatkan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\rho_b = \beta_1 \frac{0.85 f_c'}{f_y} \frac{600}{600 + f_y} \quad (1)$$

Persamaan 1 diturunkan berdasarkan regangan ultimit beton (ϵ_{cu}) 0.003 dan modulus elastisitas tulangan baja sebesar 200000 MPa.

Jika $\rho_b = A_{sb} / bd$, maka luas tulangan seimbang balok beton bertulang baja dapat ditulis dalam bentuk:

$$A_{sb} = \beta_1 \frac{f_c'}{f_y} \frac{510}{600 + f_y} bd \quad (2)$$

Ketika luas tulangan terpasang pada balok beton bertulang lebih kecil dari luas tulangan seimbang sesuai Persamaan 2, maka momen tahanan nominal penampang dihitung dengan Persamaan 3.

$$M_n = A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (3)$$

$$a = \frac{A_s \cdot f_y}{0.85 f_c' b}$$

dimana:

M_n	=	momen nominal penampang (Nmm)
A_s	=	Luas tulangan (mm^2)
f_y	=	tegangan leleh baja (MPa)
f'_c	=	kuat tekan beton (MPa)
b	=	lebar penampang (mm)
d	=	tinggi efektif penampang (mm)
β_1	=	faktor reduksi kuat tekan beton

2. Momen nominal balok beton bertulang FRP

Rasio tulangan seimbang balok beton bertulang FRP dihitung sesuai Persamaan 4 (ACI 440.1R-06 2003). Rasio tulangan yang terpasang pada balok beton bertulang FRP dihitung dengan Persamaan 5.

$$\rho_{fb} = 0,85 \frac{f'_c}{f_{fu}} \beta_1 \frac{E_f \varepsilon_{cu}}{E_f \varepsilon_{cu} + f_{fu}} \quad (4)$$

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

Dimana

ρ_{fb}	=	rasio tulangan seimbang balok beton bertulang FRP
ρ_f	=	rasio tulangan terpasang pada balok beton bertulang FRP
E_f	=	modulus elastisitas tulangan FRP (MPa)

f'_c	=	kuat tekan beton (MPa)
ε_{cu}	=	regangan ultimit beton
β_1	=	faktor reduksi kuat tekan beton
b	=	lebar penampang (mm)
d	=	tinggi efektif penampang (mm)

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. Momen nominal penampang dihitung dengan persamaan (ACI 440.1R-06 2003):

$$M_n = A_f f_f \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (6)$$

$$f_f = \left[\sqrt{\frac{(E_f \varepsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0.85 \beta_1 f'_c}{\rho_f} E_f \varepsilon_{cu}} - 0.5 E_f \varepsilon_{cu} \right] \leq f_{fu} \quad (7)$$

$$a = \frac{A_f f_f}{0.85 f'_c b} \quad (8)$$

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)
f_{fu}	=	kuat tarik ultimit disain FRP (MPa)

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 ekuivalen 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 9 dan Persamaan 10.

$$M_n = A_f f_{fu} \left(d - \frac{\beta_1 c_b}{2} \right) \quad (9)$$

$$c_b = \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu}} \right) d \quad (10)$$

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
β_1	=	faktor reduksi kuat tekan beton

3. Kekakuan balok

Salah satu kelemahan balok beton bertulang yang menggunakan tulangan FRP yaitu rendahnya kekakuan setelah mengalami retak. 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 11.

$$K = \frac{P}{\Delta} \quad (11)$$

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:

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \beta_d I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] I_{cr} \leq I_g \quad (12)$$

dimana:

I_e = inersia penampang efektif (mm⁴)

I_g = inersia penampang bruto (mm⁴)

I_{cr} = inersia penampang retak (mm⁴)

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 13.

$$I_{cr} = \frac{bd^3}{3}k^3 + n_f A_f d^2 (1-k)^2 \quad (13)$$

$$k = \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f \quad (14)$$

$$n_f = \frac{E_f}{E_c} \quad (15)$$

dimana:

- A_f = luas tulangan FRP (mm²)
- 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).

$$\beta_d = \frac{1}{5} \left(\frac{\rho_f}{\rho_{fb}} \right) \leq 1 \quad (16)$$

dimana:

ρ_f = rasio tulangan FRP

ρ_{fb} = rasio tulangan seimbang dari tulangan FRP

Selain nilai kekakuan, lendutan elemen struktur beton bertulang juga dipengaruhi oleh jenis tumpuan dan model pembebanan. Persamaan 17 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).

$$\Delta = \frac{5ML^2}{48E_c I_e} \quad (17)$$

dimana:

M = Momen dari beban merata (Nmm)

L = Panjang bentang (mm)

E_c = Modulus elastisitas beton (MPa)

I_e = Inersia penampang efektif (mm⁴)

Persamaan 18 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.

$$\Delta = \frac{PL}{24E_c I_e} (3L^2 - 4a^2) \quad (18)$$

dimana:

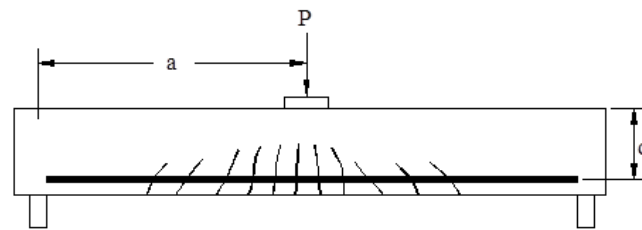
Δ	=	Lendutan (mm)
P	=	Beban terpusat (N)
L	=	Panjang bentang (mm)
E_c	=	Modulus elastisitas beton (MPa)
I_e	=	Inersia penampang efektif (mm ⁴)
a	=	Jarak bentang geser (mm)

4. Tipe Keruntuhan Balok Beton Bertulang

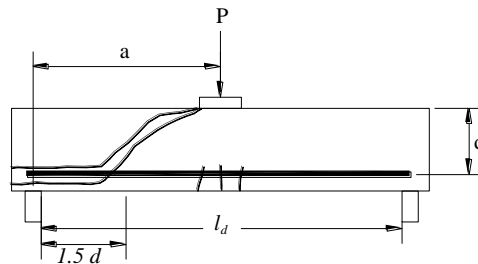
Tipe keruntuhan balok beton bertulang sangat tergantung pada kelangsingan balok. Kelangsingan balok dinyatakan dengan rasio a/d untuk beban terpusat, dimana a adalah panjang bentang geser (*shear span*) dan d adalah tinggi efektif penampang. Bentang geser ditentukan berdasarkan jarak antara titik pembebanan 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 3(a)**. Pada balok beton bertulang yang didisain *under-reinforced*, keruntuhan balok terjadi setelah tulangan tarik mengalami leleh.

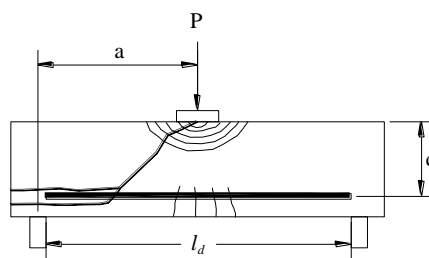
- b. Keruntuhan tarik diagonal (*diagonal tension failure*), yaitu keruntuhan yang terjadi pada balok beton betulang yang memiliki rasio bentang geser dengan tinggi efektif penampang (a/d) antara 2.5 – 5.5 seperti yang terlihat pada **Gambar 3(b)**. Retak miring muncul setelah terjadinya retakan lentur 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 3(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.



(a) Pola keruntuhan lentur



(b) Pola keruntuhan tarik diagonal



(c) Pola keruntuhan tekan geser

Gambar 3. Pola keruntuhan balok beton bertulang (Nawi 1998).

B. Kuat Geser Balok Beton Bertulang

Kekuatan geser nominal penampang beton bertulang adalah jumlah tahanan geser yang diberikan oleh beton dan tulangan geser. Pada balok beton yang menggunakan tulangan tarik FRP yang telah mengalami retak, kedalaman penampang tak retak lebih kecil dibandingkan dengan beton bertulang baja pada luas tulangan yang sama. Kecilnya kedalaman penampang tak retak balok beton bertulang FRP disebabkan oleh kekakuan aksial yang lebih rendah. 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 baja secara umum dapat dievaluasi menggunakan persamaan 27 (ACI 318-08).

$$V_c = \frac{1}{6} \sqrt{f'_c} b_w d \quad (19)$$

Kekuatan geser penampang beton bertulang yang menggunakan tulangan FRP dapat dievaluasi menggunakan persamaan 27 (ACI 440.1R-06 2003).

$$V_c = \frac{2}{5} \sqrt{f'_c} b_w c \quad (20)$$

dimana:

V_c = kontribusi beton menahan geser (N)

f'_c = kuat tekan beton (MPa)

b_w = lebar badan balok (mm)

d = tinggi efektif penampang balok (mm)

c = kedalaman penampang tak retak terhadap sumbu netral

(mm)

Kedalaman penampang tak retak terhadap sumbu netral ditentukan berdasarkan persamaan 28.

$$c = kd \quad (21)$$

dimana:

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

k = Rasio kedalaman sumbu netral terhadap kedalaman tulangan

d = Tinggi penampang efektif (mm)

Kontribusi tulangan geser yang menggunakan sengkang baja tegak dalam menahan gaya geser ditentukan berdasarkan persamaan:

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{s} \quad (22)$$

dimana:

V_s = kontribusi tulangan menahan geser (N)

A_v = luas tulangan geser (mm²)

f_y = tegangan leleh tulangan geser (MPa)

d = Tinggi efektif penampang (mm)

s = jarak tulangan sengkang (mm)

C. Penelitian Terdahulu

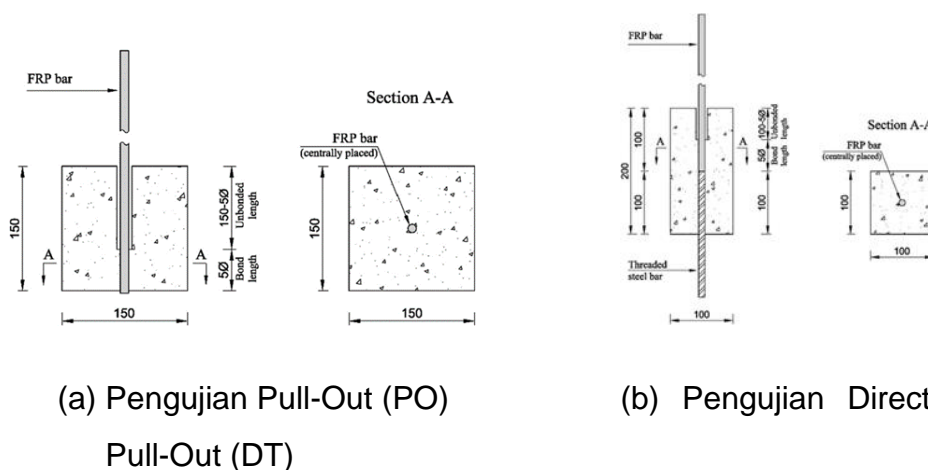
Bogachan Basaran dan Ilker Kalkan (2020) melakukan penelitian tentang FRP bar yang bertujuan untuk mendapatkan persamaan panjang penyaluran dan kekuatan ikatan untuk berbagai jenis tulangan frp yang tertanam dalam beton dan membandingkannya dengan persamaan-persamaan lainnya. Penelitian tersebut memiliki beberapa variasi yang dapat mempengaruhi lekatan tulangan dan beton, yaitu diameter tulangan, selimut beton, kuat tekan beton, modulus elastis tulangan dan tegangan Tarik tulangan. Jenis FRP bar yang digunakan adalah BFRP, CFRP dan GFRP. Adapun jenis permukaan tulangan terdiri atas bergaris, terbungkus, luka, dilapisi pasir halus, dilapisi pasir kasar dan dibungkus secara bersamaan dan dilapisi pasir kasar seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4**. Hasil penelitian ini menemukan persamaan untuk menghitung Panjang penyaluran dan kekuatan lekatan. Persamaan ini kemudian dibandingkan dengan hasil eksperimen dan persamaan-persamaan yang telah ada sebelumnya. Hasilnya adalah didapatkan bahwa hasil dari persamaan yang didapatkan dari penelitian ini lebih mendekati ke hasil secara experiment dibandingkan dengan persamaan-persamaan yang telah ditemukan terdahulu.



Gambar 4. Jenis-jenis tulangan FRP

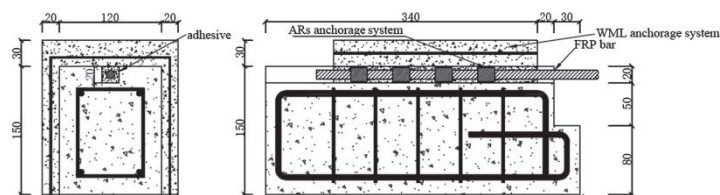
Sandor Solyom dan György L. Balázs (2020) melakukan penelitian tentang frp bar khususnya dalam hal kekuatan ikatan antar tulangan dan beton. Variabel yang dikhususkan adalah jenis-jenis permukaan frp bar. Berbagai macam batang FRP yang tersedia secara komersial dengan profil permukaan yang berbeda (total 13 konfigurasi permukaan yang berbeda) dilibatkan. Sebagai perbandingan, digunakan batang baja bergaris. Untuk menyelidiki apakah pengaruh karakteristik permukaan dalam interaksi dengan faktor lain, parameter lebih lanjut dimasukkan dalam studi seperti kuat tekan beton (35 dan 66 MPa), diameter batang (6 sampai 12 mm) dan jenis uji (tarik- keluar [PO] dan tarik langsung [DT] tegangan) seperti yang terlihat pada **Gambar 5**. Metode tes DT dikembangkan oleh penulis berdasarkan pengaturan tes serupa dari literatur. Permukaan akhir dari batang FRP yang diselidiki termasuk dilapisi pasir (SC), terbungkus heliks (HW), terbungkus heliks dan dilapisi pasir (HWSC), berlekuk (In) dan bergaris (Rb). Sebagian besar batangan yang diaplikasikan adalah Glass FRP (GFRP) dan Batangan Basalt FRP (BFRP). Perilaku ikatan tulangan dievaluasi oleh kekuatan ikatan, hubungan tegangan-slip ikatan, tegangan ikatan perwakilan dan mode kegagalan. Ditemukan bahwa kekuatan ikatan serta perilaku slip-tegangan ikatan dan mode kegagalan bervariasi tergantung pada karakteristik permukaan. Bahkan dalam kategori permukaan yang sama, perbedaan kekuatan ikatan dapat menjadi

signifikan (misalnya, permukaan SC dengan kehalusan pasir yang berbeda). Ditemukan juga bahwa Kekuatan beton mempengaruhi kekuatan ikatan meskipun lebih tinggi dari batas yang disebutkan dalam literatur (sekitar 30 MPa). Selain itu, hasil kekuatan ikatan semua batang FRP secara konsisten lebih tinggi daripada batang baja. Nilai slip tertinggi untuk mencapai kekuatan ikatan diamati untuk batang HW FRP, sedangkan terendah untuk batang SC. Beberapa hasil yang didapatkan dari penelitian tersebut sangat berbeda dari yang dilaporkan sebelumnya di makalah lain berdasarkan pengujian batang serupa. Perbedaannya, dalam hal kekuatan ikatan, dapat dijelaskan dengan perubahan konfigurasi permukaan, peningkatan sifat material, dan proses fabrikasi. Akhirnya, pengaturan pengujian ditemukan mempengaruhi kekuatan ikatan yang dapat diukur.

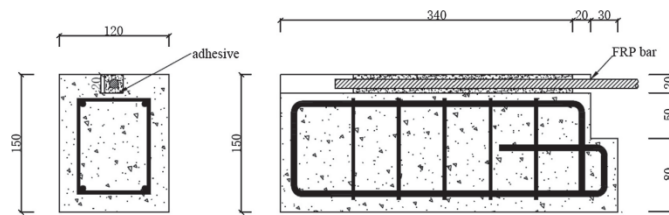


Gambar 5. Setting Pengujian PO dan DT

Wang dkk (2020) melakukan penelitian tentang peningkatan lekatan near-surface mounted (NSM) FRP bars menggunakan system pengankuran yang berbeda-beda. Benda uji berupa balok beton dengan panjang 370 mm dan memiliki potongan melintang 150 mm x 120 mm seperti yang ditunjukkan pada gambar di bawah. Variasi benda uji adalah balok dengan dengan system pengankuran pada FRP bar dan tanpa system pengankuran pada FRP bar. Sistem pengankuran pada FRP bar berupa anchorage system (ARs) yang buat dari baja aluminium seperti ditunjukkan pada **Gambar 7**. Metode pengujian yang dilakukan adalah pull-out test dengan setting ditunjukkan pada **Gambar 8**.

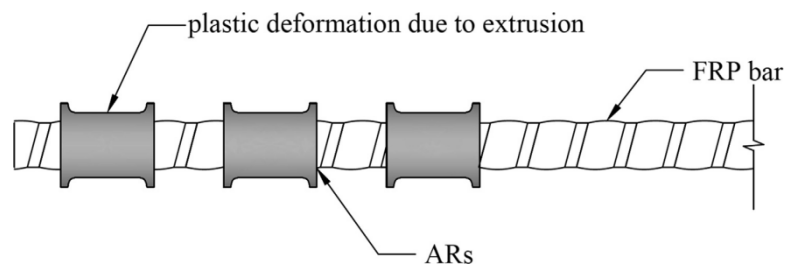


(a) Tampak samping dan tampak depan benda uji dengan system pengankuran pada FRP bar

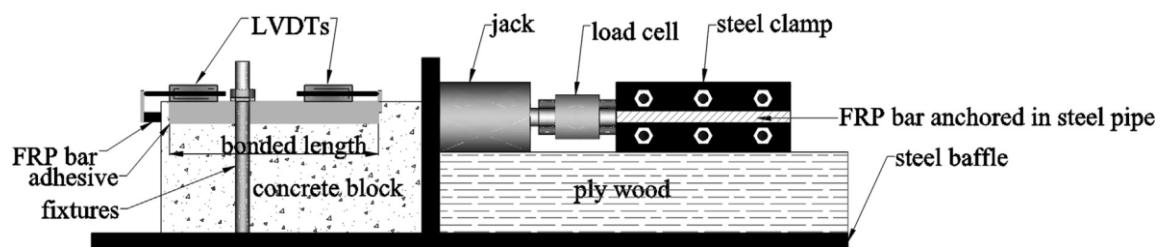


(b) Tampak samping dan tampak depan benda uji tanpa system pengangkutan pada FRP bar

Gambar 6. Benda uji



Gambar 7. Sistem pengakuran ARs pada FRP



Gambar 8. Pengujian pull-out

Hasil pengujian pull-out menunjukkan bahwa penggunaan ARs pada FRP bar dapat secara efektif meningkatkan lekatan FRP bar dengan beton. Persentasi peningkatan yang terjadi adalah hingga 40.7%. sementara itu, pola kegagalan yang terjadi pada benda uji dengan ARs hampir sama dengan benda uji tanpa ARs yaitu kegagalan debonding.