

Studi Perbandingan Perilaku Balok Beton Tulangan Baja Konvensional dan Balok Beton Tulangan Glass Fiber Reinforced Polymer

Kharisma Dwi Ramadhani^{1*}, Annisa Rahma Sabrina¹, M. Vicky Restu Bachtiar¹, Aviv Setiawan¹, Endah Kanti Pangestuti¹, Nurti Kusuma Anggraini¹

¹*Universitas Negeri Semarang, Semarang, Indonesia*

ramadhanikharisma7@gmail.com¹

Received: 24/12/2025 | Revised: 09/01/2026 | Accepted: 21/01/2026

Copyright©2026 by authors. Authors agree that this article remains permanently open access under the terms of the Creative Commons

Abstrak

Beton bertulang umumnya menggunakan tulangan baja konvensional yang memiliki kuat tarik dan duktilitas yang baik, namun rentan terhadap korosi serta memiliki bobot yang relatif besar. Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) merupakan material alternatif tulangan yang memiliki kuat tarik tinggi, ringan, dan tahan terhadap korosi. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan perilaku lentur balok beton bertulang menggunakan tulangan baja konvensional dan tulangan GFRP ditinjau dari kapasitas lentur maksimum, hubungan beban–lendutan, serta pola retakan yang terjadi. Penelitian dilakukan secara eksperimental di laboratorium dengan metode *two point loading*. Benda uji berupa balok beton berukuran $150 \times 150 \times 600$ mm dengan variasi jenis tulangan (baja dan GFRP) serta diameter tulangan lentur 6 mm dan 8 mm. Hasil pengujian menunjukkan bahwa balok beton bertulangan GFRP memiliki kapasitas beban lentur maksimum yang lebih tinggi dibandingkan balok bertulangan baja konvensional, dengan peningkatan sebesar 44,53% pada diameter 6 mm dan 15,65% pada diameter 8 mm. Selain itu, balok bertulangan GFRP menunjukkan lendutan yang lebih besar, menandakan fleksibilitas yang lebih tinggi. Pola retakan pada balok bertulangan GFRP lebih banyak dan menyebar, dengan kecenderungan keruntuhan geser, sedangkan balok bertulangan baja menunjukkan pola retak lentur yang lebih terkontrol. Berdasarkan hasil penelitian, tulangan GFRP berpotensi digunakan sebagai alternatif tulangan baja, khususnya pada struktur yang membutuhkan ketahanan korosi dan rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi, dengan tetap mempertimbangkan aspek keruntuhan geser dalam perencanaannya

Kata kunci: *Beton Bertulang, GFRP, Kuat Lentur, Lendutan, Pola Retak*

Abstract

Reinforced concrete commonly uses conventional steel reinforcement due to its good tensile strength and ductility. However, steel reinforcement is susceptible to

corrosion and has a relatively high self-weight. Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) has emerged as an alternative reinforcement material with high tensile strength, low weight, and excellent corrosion resistance. This study aims to compare the flexural behavior of reinforced concrete beams using GFRP reinforcement and conventional steel reinforcement in terms of maximum flexural capacity, load-deflection behavior, and crack patterns. The research was conducted experimentally through laboratory testing using the two-point loading method. The test specimens were concrete beams measuring 150 × 150 × 600 mm, reinforced with either steel or GFRP bars with diameters of 6 mm and 8 mm. The results indicate that GFRP-reinforced beams exhibit higher maximum flexural capacity than steel-reinforced beams, with increases of 44.53% for 6 mm diameter bars and 15.65% for 8 mm diameter bars. In addition, GFRP-reinforced beams show greater deflection, indicating higher flexibility compared to steel-reinforced beams. Crack pattern observations reveal that GFRP-reinforced beams develop more numerous and widely distributed cracks and tend to experience shear failure, whereas steel-reinforced beams display more controlled flexural cracking. These findings suggest that GFRP reinforcement has significant potential as an alternative to conventional steel reinforcement, particularly for structures requiring high corrosion resistance and a high strength-to-weight ratio, while careful consideration of shear failure is necessary in design.

Keywords: Reinforced Concrete, GFRP, Flexural Strength, Deflection, Crack Pattern.

Pendahuluan

Latar Belakang

Beton bertulang merupakan sistem struktur yang paling luas digunakan dalam konstruksi karena keunggulannya dalam menahan beban tekan serta kemudahan dalam proses fabrikasi dan pelaksanaan. Meskipun demikian, beton memiliki keterbatasan fundamental berupa kemampuan menahan gaya tarik yang relatif rendah, yaitu hanya sekitar 9–15% dari kuat tekannya (Kosakoy et al., 2017). Untuk mengatasi kelemahan tersebut, beton dikombinasikan dengan tulangan sehingga membentuk beton bertulang, dimana tulangan berfungsi menahan gaya tarik yang tidak mampu dipikul oleh beton (Asroni, 2017). Hingga saat ini, baja tulangan konvensional masih menjadi material yang paling umum digunakan karena memiliki kuat tarik tinggi dan sifat daktilitas yang baik.

Adanya inovasi perkuatan komposit dari serat yang dicampur dengan resin polimer menjadikannya sebagai material alternatif pada keterbatasan tulangan baja. *Glass Fiber Reinforced Polymer* (GFRP) adalah salah satu *batch* dari FRP yang menggunakan serat kaca berkekuatan tinggi dan memiliki ketahanan korosi sangat baik serta bobot yang lebih ringan dibandingkan baja (Kuria, n.d.). Perbedaan karakteristik mekanik antara tulangan baja dan GFRP, seperti kuat tarik, modulus elastisitas, dan sifat daktilitas, berpengaruh langsung terhadap perilaku lentur balok beton, khususnya dalam hal kapasitas lentur, pola retakan, dan mekanisme keruntuhan.

Berbagai penelitian terdahulu telah mengkaji penggunaan *Glass Fiber Reinforced Polymer* (GFRP) pada balok beton, baik sebagai tulangan internal maupun sebagai perkuatan eksternal. (Elbawab et al., 2025) melaporkan bahwa balok beton bertulangan GFRP mampu menghasilkan kapasitas lentur yang setara bahkan lebih tinggi dibandingkan balok bertulangan baja konvensional, menunjukkan potensi signifikan GFRP sebagai material alternatif. (Putra, 2024) menemukan bahwa penggunaan GFRP sebagai perkuatan eksternal secara signifikan meningkatkan kapasitas lentur balok beton. Namun demikian, (Mohammed & Salih, 2025) menunjukkan bahwa balok bertulangan GFRP cenderung mengalami deformasi yang lebih besar dan perilaku keruntuhan yang lebih getas akibat rendahnya modulus elastisitas GFRP, sehingga aspek layanan menjadi faktor penting dalam perencanaannya. Selanjutnya, (Abdelkarim et al., 2019) menegaskan bahwa rasio dan konfigurasi tulangan GFRP berpengaruh signifikan terhadap kekakuan, lebar retak, serta kapasitas momen ultimit balok beton, dan bahwa pendekatan desain berbasis standar internasional mampu memprediksi kapasitas lentur secara cukup akurat.

Kajian eksperimental tentang penggunaan tulangan GFRP berbentuk tulangan (*GFRP bar*) pada balok beton di Indonesia masih terbatas. Sebagian besar penelitian nasional masih berfokus pada tulangan baja konvensional atau aplikasi FRP sebagai perkuatan eksternal, sehingga data perilaku lentur dan pola retak balok beton bertulangan GFRP bar dalam konteks kondisi material dan praktik konstruksi di Indonesia belum memadai. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk membandingkan perilaku lentur balok beton yang menggunakan tulangan GFRP dan tulangan baja konvensional dengan diameter 6 mm dan 8 mm, ditinjau dari kapasitas lentur serta pola retakan yang terjadi, sebagai evaluasi potensi tulangan GFRP sebagai alternatif pengganti tulangan baja pada balok beton bertulang. Penelitian ini juga diharapkan mampu memberikan gambaran mengenai karakteristik perilaku struktural balok beton bertulangan GFRP.

Rumusan Masalah

Berdasarkan penjelasan yang telah diuraikan, didapat rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana perbandingan kapasitas maksimum lentur balok beton bertulangan GFRP dan balok beton bertulangan baja konvensional?
2. Bagaimana lendutan yang terjadi pada balok beton dengan penggunaan tulangan GFRP dibandingkan dengan tulangan baja konvensional?
3. Bagaimana perbedaan pola retakan pada balok beton yang menggunakan tulangan GFRP dibandingkan dengan balok beton bertulangan baja konvensional?

Tujuan Penelitian

Berikut tujuan dari penelitian yang dilakukan:

1. Menganalisis perbandingan kapasitas maksimum lentur antara balok beton bertulangan GFRP dan balok beton bertulangan baja konvensional.
2. Menganalisis lendutan yang terjadi pada balok beton dengan penggunaan tulangan GFRP dibandingkan dengan balok beton bertulangan baja konvensional.
3. Mengkaji perbedaan pola retakan pada balok beton yang menggunakan tulangan GFRP dan balok beton bertulangan baja konvensional.

Tinjauan Pustaka

Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)

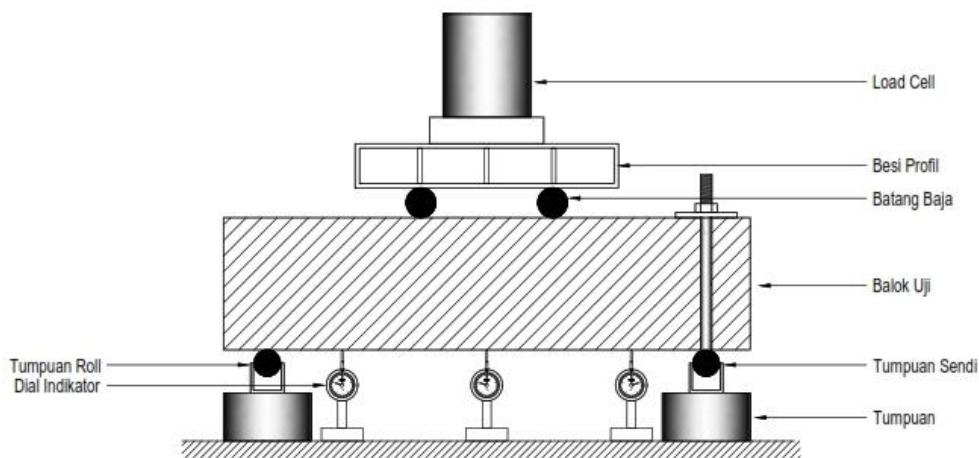
Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) merupakan material komposit tulangan yang tersusun dari serat kaca berkekuatan tinggi yang direkatkan dengan resin polimer. Proses pembuatannya dilakukan melalui penarikan serat kaca yang kemudian dibentuk menjadi batang berprofil ulir untuk meningkatkan lekatan dengan beton. Dengan orientasi dan komposisi serat yang tepat, GFRP dapat memiliki kekakuan yang sebanding dengan baja, namun dengan densitas yang lebih rendah serta biaya yang relatif lebih ekonomis (Kuria, n.d.). Keunggulan utama GFRP terletak pada ketahanannya terhadap korosi, klorida, dan lingkungan agresif, sehingga menjadikannya alternatif yang potensial untuk menggantikan tulangan baja pada struktur beton yang terpapar kondisi ekstrem, seperti jembatan, bangunan pesisir, dan struktur bawah tanah. Oleh karena itu, meskipun penerapan GFRP memerlukan pendekatan desain yang berbeda, khususnya dalam pengendalian kinerja layanan, material ini memiliki prospek yang signifikan dalam meningkatkan durabilitas dan umur layan struktur beton.

Dari sisi sifat mekanik, tulangan GFRP memiliki kuat tarik yang tinggi, umumnya berkisar antara 500–1000 MPa, namun dengan modulus elastisitas yang lebih rendah dibandingkan baja, yaitu sekitar 35–60 GPa (Teng et al., 2002). Perilaku mekanik GFRP bersifat linier elastis hingga runtuh tanpa mengalami deformasi plastis, sehingga tidak memiliki fase leleh seperti tulangan baja. Karakteristik ini menyebabkan elemen beton bertulangan GFRP cenderung menunjukkan lendutan yang lebih besar dan lebar retak yang lebih dominan pada kondisi layanan, serta mekanisme keruntuhan yang relatif getas (Pilakoutas et al., 2002).

Kuat Lentur

Kuat lentur beton adalah kemampuan balok beton yang diletakan pada dua perletakan untuk menahan gaya dengan arah tegak lurus sumbu benda uji, yang diberikan padanya, sampai benda uji patah dan dinyatakan dalam Mega Pascal (MPa) gaya tiap satuan luas (SNI 03-4431-1997). Kuat lentur adalah kemampuan elemen struktur, seperti balok beton bertulang, untuk menahan momen lentur hingga mencapai batas ultimit sebelum terjadi keruntuhan. Pada balok beton bertulang, beton menahan gaya tekan sedangkan tulangan menahan gaya tarik akibat lentur, sehingga kombinasi ini memberikan kapasitas lentur yang lebih baik dibanding beton tanpa tulangan. Nilai kuat lentur sering digunakan untuk menilai respons struktural balok terhadap beban lentur dan menunjukkan hubungan antara beban, lendutan, serta pola retakan yang terjadi selama pengujian.

Pada penelitian ini pengujian kuat lentur menggunakan metode *two point loading* dengan skema sesuai SNI 4431:2011 sebagai berikut:



Gambar 1 Skema Pengujian Lentur Two Point Loading

Pengujian benda uji dengan metode *two point loading*, di mana dua beban terpusat diberikan secara simetris pada balok dengan jarak tertentu dari tumpuan. Metode ini menghasilkan sebuah zona momen lentur hampir konstan di antara kedua titik pembebanan, yang memungkinkan terjadinya retakan lentur dominan tanpa pengaruh geser yang kuat di tengah bentang.

Rancangan Penelitian

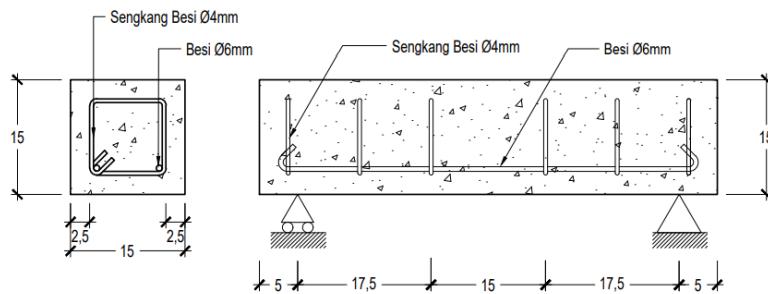
Penelitian ini terdiri dari dua jenis sampel balok, sampel balok dengan tulangan GFRP (kode BV) dan balok dengan tulangan baja konvensional (Kode BK). Sampel juga terdiri atas sampel silinder sebagai kontrol mutu beton. Setiap balok beton menggunakan dua batang tulangan lentur sebagai tulangan utama pada daerah tarik. Selain itu, dipasang enam buah sengkang dari baja tulangan berdiameter 4 mm dengan jarak antar sengkang 100 mm. Konfigurasi tulangan ini dibuat seragam pada seluruh benda uji untuk memastikan perbedaan perilaku lentur yang terjadi dipengaruhi oleh jenis tulangan utama yang digunakan. Beton yang digunakan dalam penelitian ini direncanakan memiliki mutu tekan sebesar $f'_c = 18,67$ MPa. Nilai kuat tekan aktual diperoleh melalui hasil pengujian silinder beton, yang selanjutnya digunakan sebagai parameter pendukung dalam analisis perilaku lentur balok beton bertulang.

Tabel 1 Sampel Penelitian

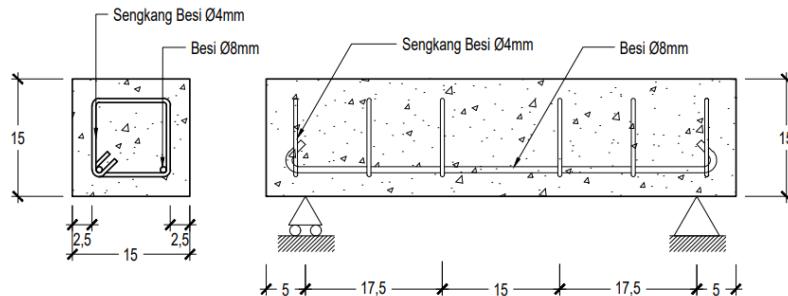
Kode	Dimensi	Jenis tulangan	Diameter tulangan lentur	Diameter tulangan geser	Jumlah sampel
BK6	150 x 150 x 600	Baja	6 mm	4 mm	3
BK8	150 x 150 x 600	Baja	8 mm	4 mm	3
BV6	150 x 150 x 600	GFRP	6 mm	4 mm	3
BV8	150 x 150 x 600	GFRP	8 mm	4 mm	3

Benda uji tulangan baja dibuat dengan menggunakan kait karena baja bersifat daktail sehingga dapat dibengkokkan, serta kait berfungsi meningkatkan daya lekat dan penyaluran gaya antara tulangan dan beton. Sebaliknya, benda uji tulangan GFRP dibuat tanpa kait karena GFRP

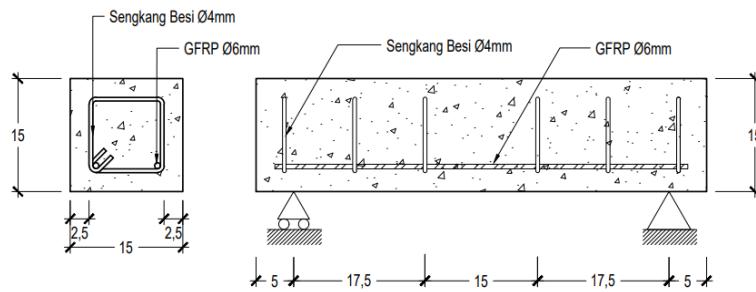
bersifat getas dan pembengkokan dapat merusak serat serta menurunkan kapasitas tariknya, sehingga mekanisme penyaluran gaya lebih mengandalkan lekatan dan tekstur permukaan tulangan. Perbedaan ini mencerminkan karakteristik material dan praktik aplikasi yang umum digunakan di lapangan.



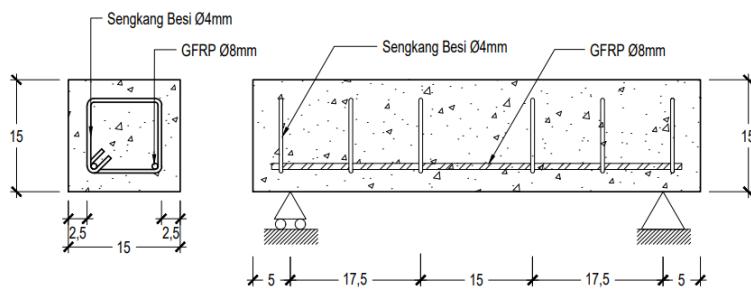
Gambar 2 Detail Balok Kontrol Diameter 6 mm



Gambar 3 Detail Balok Kontrol Diameter 8 mm



Gambar 4 Detail Balok Variasi Diameter 6 mm



Gambar 5 Detail Balok Variasi Diameter 8 mm

Metodologi Penelitian

Lokasi dan Waktu Penelitian

Seluruh kegiatan penelitian berlokasi di Laboratorium Struktur dan Bahan, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang. Penelitian ini dimulai dari bulan Agustus 2025 hingga Desember 2025.

Sifat Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perilaku lentur balok beton bertulang dengan menggunakan tulangan baja dan tulangan GFRP. Fokus utama penelitian adalah kapasitas maksimum lentur, lendutan, serta perbedaan pola retakan. Melalui penelitian ini diharapkan dapat diperoleh gambaran kinerja struktural balok beton bertulang dengan tulangan GFRP sebagai alternatif pengganti tulangan baja konvensional.

Pendekatan penelitian yang digunakan adalah pendekatan eksperimental murni (*true experimental*) melalui pengujian laboratorium. Pendekatan ini bersifat kuantitatif, karena data yang dihasilkan berupa nilai numerik, seperti beban maksimum, lendutan, dan kuat lentur balok, yang selanjutnya dianalisis untuk membandingkan kinerja tulangan baja dengan tulangan GFRP. Hal ini sejalan dengan penjelasan bahwa penelitian eksperimen bertujuan menilai pengaruh suatu perlakuan yang tidak terjadi secara alami. (Soegiyono, 2017)

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh dari hasil pengujian laboratorium yang meliputi uji material dan uji lentur balok beton bertulang. Sementara itu, data sekunder diperoleh dari standar yang berlaku seperti SNI, serta dari literatur dan hasil penelitian terdahulu yang relevan dengan topik penelitian.

Teknik Pengumpulan Data

Pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan melalui pengujian eksperimental di laboratorium dan observasi visual terkontrol terhadap benda uji balok beton bertulang. Data yang diperoleh terdiri atas data kuantitatif dan data kualitatif, dengan uraian sebagai berikut:

1. Pengujian Laboratorium (Data Kuantitatif)

Pengujian laboratorium dilakukan pada balok beton bertulang dengan variasi jenis tulangan, yaitu tulangan baja dan tulangan GFRP. Pengujian lentur dilaksanakan menggunakan mesin uji *Universal Testing Machine* (UTM) dengan metode pembebanan dua titik (*two-point loading*).

Selama proses pembebanan, dicatat besarnya beban yang bekerja pada setiap tahap pembebanan serta lendutan balok yang terjadi pada titik tengah bentang. Lendutan diukur menggunakan *dial gauge* atau *Linear Variable Differential Transformer* (LVDT) yang dipasang pada bagian bawah balok. Pencatatan data dilakukan secara berkala pada setiap kenaikan beban untuk memperoleh hubungan beban-lendutan dan menentukan kapasitas maksimum lentur balok beton bertulang akibat penggunaan jenis tulangan yang berbeda.

2. Observasi Visual Pola Retak (Data Kualitatif)

Observasi dilakukan secara langsung selama proses pembebanan untuk memperoleh data kualitatif berupa pola retak balok beton bertulang. Pengamatan difokuskan pada kemunculan retak awal, arah, dan jenis retak, serta perkembangan dan penyebaran retak seiring dengan

bertambahnya beban hingga balok mengalami keruntuhan. Seluruh hasil observasi didokumentasikan dalam bentuk foto dan sketsa pola retak untuk mendukung analisis perilaku lentur balok beton bertulang dengan tulangan baja dan tulangan GFRP.

Metode Analisis Data

Metode analisis data dalam penelitian ini didasarkan pada hasil pengujian lentur balok beton bertulang yang dilakukan di laboratorium. Analisis dilakukan untuk membandingkan perilaku lentur balok beton bertulang yang menggunakan tulangan baja konvensional dan tulangan GFRP berdasarkan respons struktur yang terjadi selama proses pembebahan.

Parameter yang dianalisis meliputi beban maksimum dan lendutan balok selama pembebahan. Data hasil pengujian dianalisis untuk mengetahui respons balok terhadap beban lentur dan selanjutnya disajikan dalam bentuk grafik hubungan beban-lendutan. Grafik tersebut digunakan untuk menunjukkan perbedaan karakteristik perilaku lentur balok akibat penggunaan jenis tulangan yang berbeda.

Selain itu, hasil pengamatan terhadap pola retak dan kondisi keruntuhan balok dianalisis untuk memahami perubahan perilaku struktur selama proses pembebahan hingga mencapai kondisi runtuh. Analisis pola retak meliputi lokasi awal retak, arah retak, serta perkembangan dan penyebaran retak seiring bertambahnya beban. Hasil analisis ini digunakan sebagai pendukung dalam menjelaskan perbedaan perilaku lentur balok beton bertulang dengan tulangan baja dan tulangan GFRP.

Data sifat mekanik tulangan yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari hasil pengujian oleh PT. Kuria, sebagaimana disajikan pada Tabel. 1, dan digunakan sebagai data pendukung dalam analisis dan pembahasan hasil pengujian balok beton bertulang.

Tabel 2 Hasil pengujian tulangan GFRP

Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)				
Dimeter	<i>Yield load</i>	<i>Tensile Load</i>	<i>Yield Strength</i>	<i>Tensile Strength</i>
(mm)	(N)	(N)	(N/mm ²)	(N/mm ²)
06	-	29476	-	1043
08	-	70631	-	1405
10	-	88695	-	1114

Baja Tulangan				
06	96	12421	339,90	439
08	20584	28458	409,50	566

(Sumber: PT. Kuria)

Hasil dan Pembahasan

Penelitian ini bertujuan untuk menghitung kapasitas beban maksimum kuat lentur, perbandingan lendutan, dan pengamatan pola retak pada balok kontrol (tulangan baja) dan balok variasi (tulangan GFRP).

Kuat Lentur

Kuat lentur merupakan kapasitas balok beton bertulang untuk menahan momen lentur sebelum mengalami kegagalan. Berdasarkan pengujian laboratorium, data aktual menunjukkan perbedaan kapasitas lentur antara balok bertulang baja konvensional dan GFRP ditunjukkan pada Tabel 3 dan Tabel 4.

Tabel 3 Hasil Pengujian Balok Diameter 6 mm

Benda Uji	BK6	BV6
Sampel 1	30,96 kN	51,26 kN
Sampel 2	30,59 kN	51,65 kN
Sampel 3	34,27 kN	69,85 kN
Rata-rata	31,94 kN	57,58 kN
Peningkatan beban maksimum		44,53%

Pada diameter 6 mm, rata-rata beban maksimum balok BV6 sebesar 57,58 kN, lebih tinggi dibandingkan BK6 sebesar 31,94 kN, dengan peningkatan mencapai 44,53%. Peningkatan yang signifikan ini mengindikasikan bahwa pada diameter kecil, tulangan GFRP memberikan kontribusi kekuatan yang jauh lebih besar, kemungkinan disebabkan oleh kekuatan tarik GFRP yang tinggi serta rasio tulangan efektif terhadap penampang balok. Sementara itu, pada diameter 8 mm, rata-rata beban maksimum balok BV8 sebesar 60,37 kN, sedangkan BK8 sebesar 52,23 kN, dengan peningkatan hanya 15,65%. Peningkatan beban maksimum pada balok diameter 8 mm sebagai berikut:

Tabel 4 Hasil Pengujian Balok Diameter 8 mm

Benda Uji	BK8	BV8
Sampel 1	53,64 kN	60,03 kN
Sampel 2	50,65 kN	60,67 kN
Sampel 2	52,40 kN	60,40 kN
Rata-rata	52,23 kN	60,37 kN
Peningkatan beban maksimum		15,65%

Hubungan Beban-Lendutan

Beban-lendutan adalah perilaku deformasi pada balok terhadap beban. Berdasarkan data yang disajikan dalam kedua percobaan, perhitungan dan analisis dimulai dengan munculnya *first crack* secara bersamaan pada beton lalu disusul dengan pengujian kinerja pada tiap tulangan yang diberikan sehingga tulangan baja dan GFRP mengambil alih sebagian besar gaya tarik.

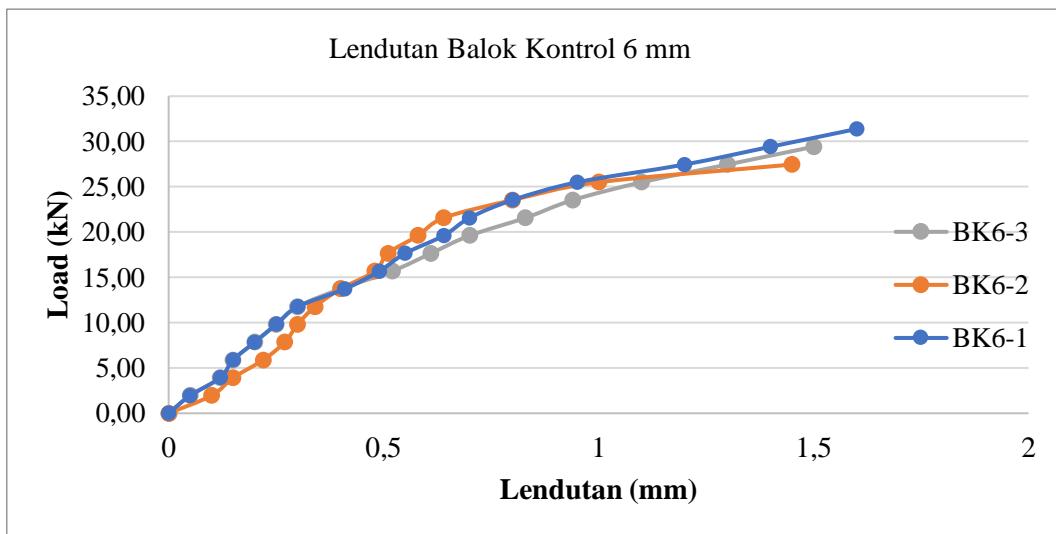
Berdasarkan pengujian laboratorium, data aktual menunjukkan perbedaan hubungan beban-lendutan antara balok bertulang baja konvensional dan GFRP sebagai berikut:

Hubungan beban-lendutan balok dengan tulangan diameter 6 mm:

Tabel 5 Lendutan Maksimal Diameter 6 mm

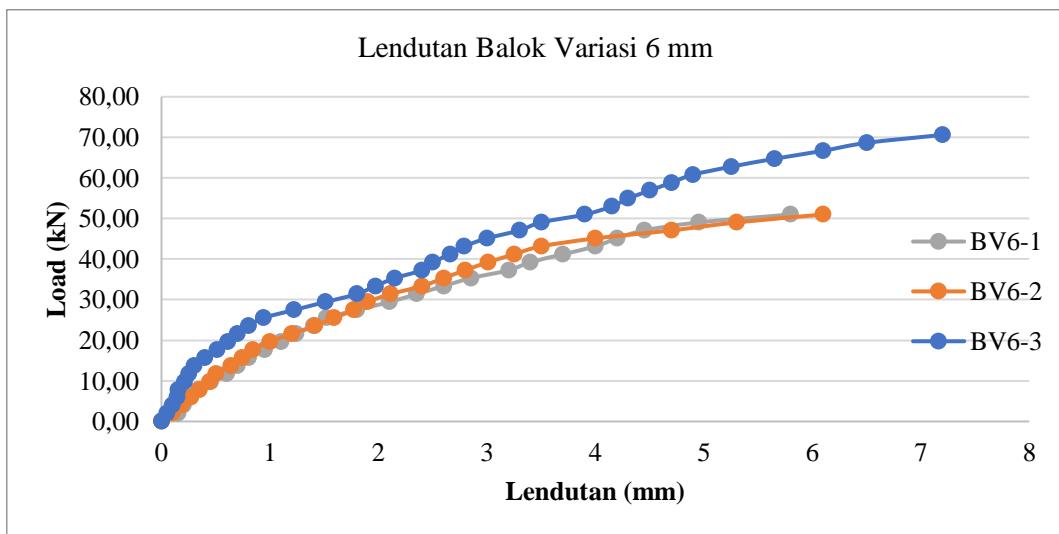
Benda Uji	BK6	BV6
Sampel 1	1,8 mm	5,8 mm
Sampel 2	1,45 mm	6,1 mm
Sampel 3	1,6 mm	7,2 mm
Rata-rata lendutan	1.6 mm	6,3 mm

Berdasarkan hasil pengujian, balok BV6 dengan tulangan GFRP menunjukkan lendutan rata-rata 6,3 mm, jauh lebih besar dibanding balok BK6 bertulang baja konvensional yang hanya 1,6 mm. Hal ini menunjukkan bahwa balok BV6 lebih fleksibel dan mampu mengalami deformasi lebih besar sebelum mencapai kegagalan, akibat sifat GFRP yang linier-elastis dengan kekuatan tarik tinggi, berbeda dengan baja yang meskipun daktail, lendutannya lebih terbatas pada diameter kecil. Perbedaan ini mengindikasikan bahwa penggunaan GFRP meningkatkan kapasitas lentur dan respons deformasi balok.



Grafik 1 Hubungan Beban-Lendutan Balok Kontrol Tulangan Diameter 6 mm

Grafik hubungan beban-lendutan balok kontrol dengan tulangan baja diameter 6 mm menunjukkan perilaku lentur yang relatif seragam pada seluruh benda uji. Pada tahap awal pembebanan, respons balok bersifat hampir linier, kemudian berubah menjadi nonlinier seiring terbentuknya retak lentur dan menurunnya kekakuan balok. Kapasitas beban maksimum yang relatif sebanding antar benda uji menunjukkan konsistensi perilaku lentur balok beton bertulangan baja.



Grafik 2 Hubungan Beban-Lendutan Balok Variasi Tulangan Diameter 6 mm

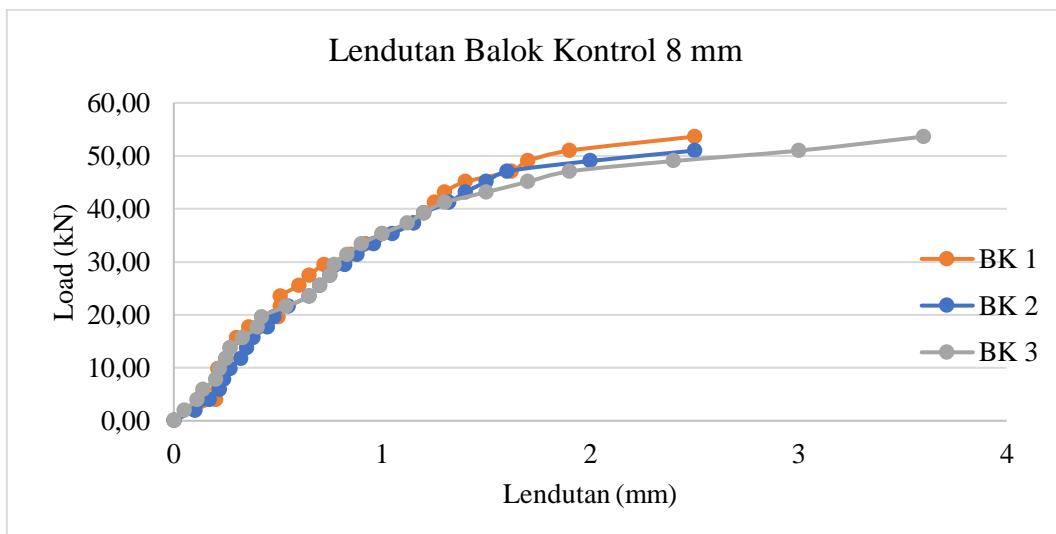
Sebaliknya, grafik hubungan beban-lendutan balok variasi dengan tulangan GFRP diameter 6 mm memperlihatkan lendutan yang lebih besar pada tingkat beban yang sama. Kurva beban-lendutan yang lebih landai mengindikasikan kekakuan lentur yang lebih rendah, namun dengan fleksibilitas yang lebih tinggi dibandingkan balok kontrol.

Hubungan beban-lendutan balok dengan tulangan diameter 8 mm:

Tabel 6 Lendutan Maksimal Diameter 8 mm

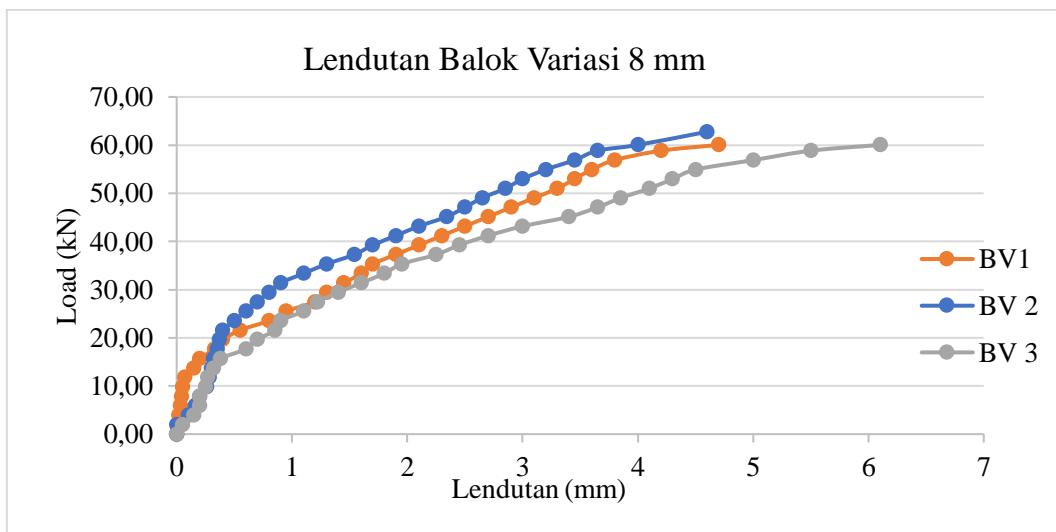
Benda Uji	BK8	BV8
Sampel 1	2,5 mm	4,7 mm
Sampel 2	2,5 mm	4,6 mm
Sampel 3	3,6 mm	6,1 mm
Rata-rata lendutan	2,86 mm	4,9 mm

Berdasarkan hasil pengujian, balok BV8 dengan tulangan GFRP memiliki lendutan rata-rata 4,9 mm, lebih besar dibanding balok BK8 bertulang baja konvensional yang rata-rata 2,86 mm. BV8 menunjukkan fleksibilitas lebih tinggi dibanding BK8, yang menandakan kemampuan deformasi lebih besar sebelum gagal. Hal ini disebabkan sifat linier-elastis GFRP yang memungkinkan balok menahan beban lebih lama sambil mengalami lendutan lebih besar, sedangkan balok bertulang baja menunjukkan peningkatan kekakuan relatif lebih tinggi seiring bertambahnya luas tulangan. Perbedaan ini juga mengindikasikan bahwa pada tulangan berdiameter lebih besar, kontribusi material baja terhadap kekakuan dan kekuatan balok meningkat, sehingga perbedaan performa antara baja dan GFRP menjadi lebih moderat dibanding diameter kecil.



Grafik 3 Hubungan Beban-Lendutan Balok Kontrol Tulangan Diameter 8 mm

Grafik hubungan beban–lendutan balok kontrol dengan tulangan baja diameter 8 mm menunjukkan perilaku lentur yang stabil dan konsisten pada seluruh benda uji. Respons awal balok bersifat hampir linier, kemudian bertransisi menjadi nonlinier seiring berkembangnya retak lentur. Lendutan yang relatif kecil hingga mendekati beban maksimum mengindikasikan kekakuan lentur yang tinggi, yang mencerminkan kontribusi efektif tulangan baja berdiameter lebih besar dalam meningkatkan kekakuan dan kapasitas balok.



Grafik 4 Hubungan Beban-Lendutan Balok Variasi Tulangan Diameter 8 mm

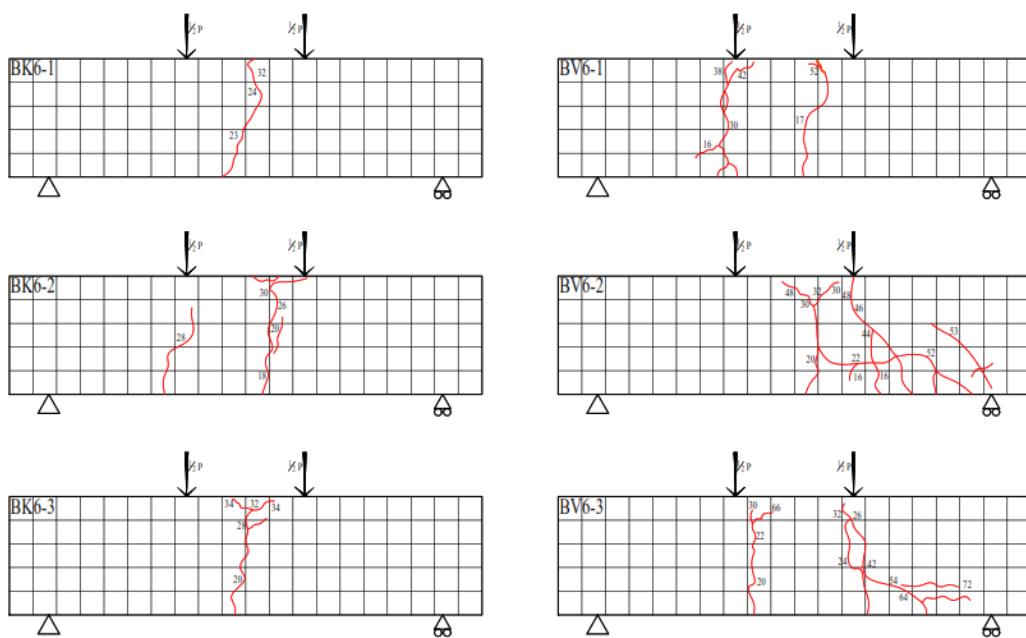
Sebaliknya, balok variasi dengan tulangan GFRP diameter 8 mm memperlihatkan kurva beban–lendutan yang lebih landai dengan lendutan yang lebih besar pada tingkat beban yang sama. Meskipun demikian, balok bertulangan GFRP tetap mampu menahan peningkatan beban secara bertahap hingga mencapai kapasitas maksimum, disertai deformasi yang lebih besar. Perilaku ini menegaskan bahwa peningkatan diameter tulangan GFRP meningkatkan kapasitas beban balok, namun karakteristik fleksibilitas tetap dominan akibat modulus elastisitas GFRP

yang lebih rendah dibandingkan baja, sehingga pengendalian kinerja layanan menjadi aspek krusial dalam aplikasinya.

Pola Retak

Pola retak adalah distribusi dan arah retak yang muncul pada balok beton bertulang saat mengalami pembebangan. Retak biasanya mulai muncul di zona tarik beton (serat bawah balok) saat tegangan tarik beton melebihi kuat tariknya.

Pola retak yang terjadi pada balok dengan diameter 6 mm:

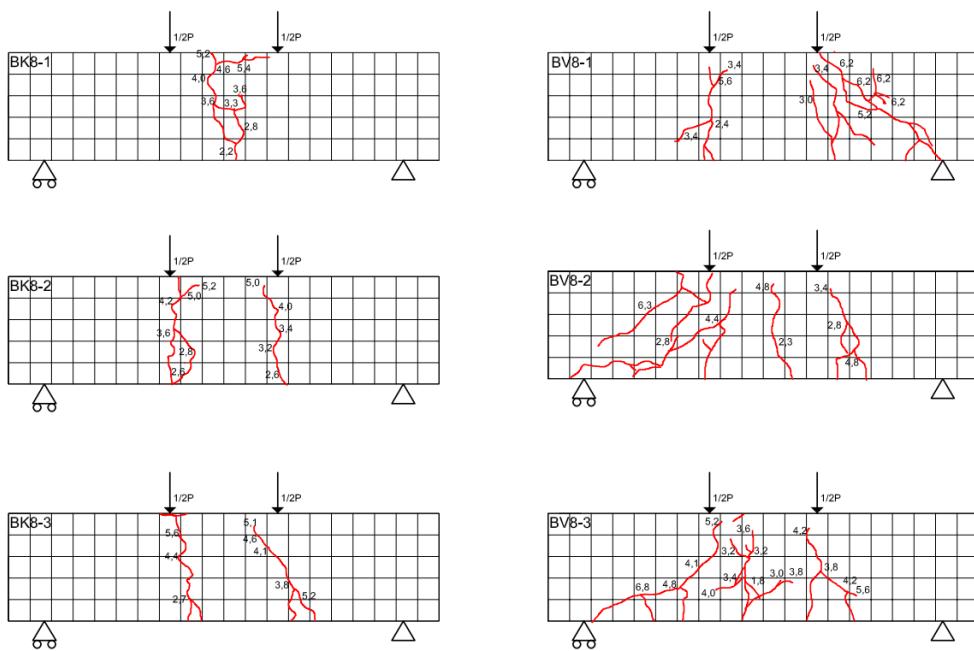


Gambar 2 Pola Retak Balok dengan Tulangan Diameter 6 mm

Balok bertulang GFRP (BV6) menunjukkan retak yang lebih banyak, bercabang, dan menyebar ke area tumpuan, menandakan deformasi yang lebih besar dan kapasitas lentur tinggi, namun dengan keruntuhan yang lebih getas. Sebaliknya, balok bertulang baja konvensional (BK6) cenderung mengalami retak tunggal di tengah bentang, relatif vertikal dan lokal, mencerminkan perilaku lebih kaku dengan duktilitas sedang. Perbedaan ini menegaskan bahwa penggunaan GFRP meningkatkan fleksibilitas dan kemampuan menahan beban, sementara baja konvensional memberikan kontrol retak lebih baik dan pola kegagalan yang lebih aman.

Pola retak yang terjadi pada balok dengan diameter 8 mm:

Dari Gambar 4 retak balok yang diperlihatkan untuk BK8-1 sampai BK8-3 dan BV8-1 BK8 cenderung memiliki retak vertikal, sedikit, dan terpusat di titik beban, menandakan lentur murni. BV8 retaknya lebih banyak, bercabang, dan menyebar, menunjukkan kombinasi lentur dan geser. Dari percobaan 1 ke 3, retak pada kedua balok berkembang lebih panjang dan bercabang. Perbedaan ini kemungkinan disebabkan oleh variasi penguatan atau geometri balok, memperlihatkan bagaimana desain memengaruhi pola propagasi retak.



Gambar 3 Pola Retak Balok dengan Tulangan Diameter 8 mm

Berdasarkan Gambar 3 dan Gambar 4 yang disajikan pada tulangan diameter 6 & 8, pola keretakan adalah indikasi pertama terhadap balok apakah tingkat keparahannya perlu segera diperbaiki atau hanya perlu ditambal. Balok kontrol menunjukkan konsistensi pada keruntuhan lentur saat diberikannya beban bertahap hingga maksimal, sedangkan balok variasi menunjukkan keretakan luntur pada awalan hingga terjadinya keruntuhan geser pada beban yang lebih tinggi. Diketahui pada balok variasi belum mencapai beban maksimum untuk yang ditargetkan tapi yang terjadi adalah keruntuhan geser. Menjawab perumusan masalah terhadap perbedaan pola keretakan pada kedua percobaan, balok bertulang baja memberikan konsistensi untuk tingkat bahaya yang tidak tiba-tiba. Selain dari itu, pada balok variasi memberikan potensial GFRP yang seharusnya lebih tinggi, tetapi karena keruntuhan geser yang terjadi pengujian GFRP tidak bisa memaksimalkannya.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan sebagai berikut:

- Pengujian kuat lentur terhadap kedua variasi tulangan (baja konvensional dan GFRP), membuat hasil yang lebih positif terhadap GFRP. GFRP yang memberikan nilai maksimum kuat lentur yang lebih tinggi dibandingkan baja konvensional.
- Pengujian beban-lendutan bertujuan untuk mengetahui nilai maksimum sebelum terjadinya keruntuhan. Hal ini untuk memperoleh keamanan bila semata struktural akan terjadi defleksi karena beban yang diberikan. GFRP mengambil nilai yang lebih bagus karena lendutan maksimal yang dihasilkan sedikit lebih tinggi daripada baja konvensional.
- Pola keretakan yang dihasilkan oleh kedua variasi percobaan memberikan nilai awal yang konsisten terhadap keretakan lentur, tetapi GFRP melampuiinya hingga menyebabkan

keruntuhan geser. Dapat disimpulkan bahwa kekuatan GFRP dibatasi oleh keruntuhan geser sebelum mencapai kekuatan maksimumnya.

- d. Keterbatasan penelitian ini adalah jumlah benda uji yang digunakan masih terbatas dan jenis tulangan GFRP yang diteliti hanya berasal dari satu produsen. Selain itu, pengujian hanya difokuskan pada perilaku lentur balok, sehingga belum mempertimbangkan pengaruh variasi rasio tulangan, jarak sengkang, maupun pengujian beban jangka panjang. Oleh karena itu hasil penelitian ini hanya berlaku untuk kondisi pengujian laboratorium yang dilakukan.

Daftar Pustaka

- Abdelkarim, O. I., Ahmed, E. A., Mohamed, H. M., & Benmokrane, B. (2019). Flexural strength and serviceability evaluation of concrete beams reinforced with deformed GFRP bars. *Engineering Structures*, 186(December 2018), 282–296. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.02.024>
- Arsroni, A. (2017). *Teori dan Desain Balok Plat Beton Bertulang Berdasarkan SNI 2847-2013*. Muhammadiyah University Press.
- Elbawab, Y., Elbawab, Y., Zoughby, Z. El, & Elkadi, O. (2025). Flexural Testing of Steel- , GFRP- , BFRP- , and Hybrid Reinforced Beams. *MDPI (Multidisciplinary Digital Publishing Institute)*.
- Kosakoy, M. N. M., Wallah, S. E., & Pandaleke, R. (2017). *Perbandingan nilai kuat tarik langsung dan tidak langsung pada beton yang menggunakan fly ash*. 5(7), 383–392.
- Kuria. (n.d.). *Mengenal Kuria Bar, GFRP Rebar Inovasi Pengganti Besi Beton*.
- Mohammed, A. D., & Salih, O. A. (2025). *AN EXPERIMENTAL STUDY ON REINFORCED CONCRETE BEAMS WITH GFRP AND ORDINARY STEEL BARS ' FLEXURAL STRENGTH PROPERTIES*. 21(1), 282–298. <https://doi.org/10.2478/cee-2025-0022>
- Pilakoutas, K., Neoclouds, K., & Guadginini, M. (2002). Design Philosophy Issues of FRP RC Structures. *Journal of Composites for Construction*, 6, 154–161.
- Putra, M. Z. W. (2024). Dampak Buruk Overthinking Bagi Para Remaja. *Al-Wasathiyah: Journal of Islamic Studies*, 3(1), 29–38. <https://doi.org/10.56672/alwasathiyah.v3i1.147>
- Soegiyono. (2017). *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif dan R&D*.
- Sofwatillah. (2024). *TEHNIK ANALISIS DATA KUANTITATIF DAN KUALITATIF DALAM PENELITIAN ILMIAH*. 15(2), 79–91.
- Teng, J. G., Chen, J. F., Smith, S. ., & Lam, L. (2002). *FRP Strengthened RC Structures*.
- Badan Standarisasi Nasional. (2021). *SNI 8972:2021 : Metode Uji Komposit Serat Berpolimer Sebagai Penulangan Atau Perkuatan Struktur Beton Dan Masonri*.
- Kosakoy M. N. M., Wallah S. E., dan Pandaleke R. (2017). *Perbandingan Nilai Kuat Tarik Langsung dan Tidak Langsung Pada Beton Yang Menggunakan Fly Ash*. Jurnal Sipil Statik Vol. 5 No. 7 September 2017 (383-392). ISSN: 2337-6732. Fakultas Teknik Jurusan Sipil. Universitas Sam Ratulangi Manado.

Sofwatillah, Risnita, Jailani M. S., Saksitha D. A. (2024). *Tehnik Analisis Data Kuantitatif dan Kualitatif Dalam Penelitian Ilmiah*. Journal Genta Mulia Vol. 15 No. 2, 2024. Universitas Islam Negeri Sulthan Thaha Saifuddin Jambi.