

PERKUATAN GESEN BALOK BETON BERTULANG MENGGUNAKAN GFRP (STUDI KASUS: GOR BAROMBONG MAKASSAR)

*Muhammad Fathur Aditya¹, Ayu Saraswati²

^{1,2}Fakultas Teknik, Universitas Sulawesi Tenggara, Kota Kendari

^{*}Email: muhammadfathuraditya@un-sultra.ac.id

Received: 7 November 2025 ; Revised: 24 November 2025 ; Accepted: 1 Desember 2025

ABSTRACT

Shear failure is recognized as a brittle and sudden collapse mode, making it a critical issue that necessitates effective strengthening solutions for reinforced concrete beam structures. The main objective of this study is to evaluate the effectiveness and feasibility of Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) composite as external reinforcement to address the shear strength deficit in reinforced concrete beams. The case study focuses on the West Tribune beams of GOR Barombong Makassar, which experienced shear failure due to a combination of low material quality, exposure to an aggressive marine environment, and increased capacity demands resulting from the seismic standard update from SRPM to SRPMK. The research methodology utilized analytical calculations based on the ACI 440.2R-08 guidelines. Analysis results indicate that the existing shear strength of the beams is 424.23 kN, while the required additional strength varies from 21.57 kN to 53.93 kN to meet the design shear strength. Six GFRP U-Wrap strengthening configurations were analyzed, demonstrating the capability to provide additional shear strength ranging from 26.68 kN to 55.31 kN. The application of a specific GFRP configuration at the beam supports successfully increased the total shear capacity by 6.3% to 13.0%, proving that GFRP is an effective and efficient shear strengthening solution, and is superior due to its non-corrosive properties, making it suitable for aggressive environments.

Keyword: Shear Strengthening, GFRP, Reinforced Concrete Beams, GOR Barombong Makassar

ABSTRAK

Kegagalan geser dikenal sebagai mode keruntuhan yang getas dan mendadak, menjadikannya masalah penting yang memerlukan solusi perkuatan efektif pada struktur balok beton bertulang. Tujuan utama penelitian ini adalah mengevaluasi efektivitas dan kelayakan material komposit *Glass Fiber Reinforced Polymer* (GFRP) sebagai perkuatan eksternal untuk mengatasi defisit kekuatan geser pada balok beton bertulang. Studi kasus dilakukan pada balok Tribun Barat GOR Barombong Makassar, yang mengalami kegagalan geser karena kombinasi mutu material rendah, paparan lingkungan laut agresif, dan peningkatan tuntutan kapasitas akibat pembaruan standar seismik dari SRPM to SRPMK. Metode penelitian menggunakan analisis perhitungan berdasarkan pedoman ACI 440.2R-08. Hasil analisis menunjukkan kekuatan geser eksisting balok adalah 424.23 kN, sementara kebutuhan kekuatan tambahan bervariasi dari 21.57 kN hingga 53.93 kN untuk memenuhi kekuatan geser desain. Enam konfigurasi perkuatan GFRP *U-Wrap* dianalisis, yang menunjukkan kemampuan memberikan kekuatan geser tambahan antara 26.68 kN hingga 55.31 kN. Penerapan konfigurasi GFRP spesifik pada tumpuan balok berhasil meningkatkan kekuatan geser total sebesar 6.3% hingga 13.0%, membuktikan bahwa GFRP merupakan solusi perkuatan geser yang efektif dan efisien, serta unggul karena sifatnya yang non-korosif sehingga tepat untuk lingkungan agresif.

Kata kunci: Perkuatan Geser, GFRP, Balok Beton Bertulang, GOR Barombong Makassar

1. PENDAHULUAN

Kegagalan struktur merupakan salah satu permasalahan yang sering dijumpai pada bangunan beton bertulang, baik akibat kesalahan desain, mutu material yang rendah, pelaksanaan yang kurang baik, maupun peningkatan beban kerja akibat perubahan fungsi bangunan. Kegagalan tersebut dapat berupa retak berlebih, kehilangan kekakuan, penurunan kapasitas lentur, maupun kegagalan akibat gaya geser [1], [2], [3], [4], [5]. Dari berbagai jenis kerusakan tersebut, kegagalan geser pada balok beton bertulang merupakan salah satu bentuk kegagalan yang paling berbahaya karena terjadi secara tiba-tiba tanpa peringatan awal yang jelas. Retak diagonal yang berkembang cepat dapat menyebabkan terlepasnya sebagian penampang beton dan pada akhirnya menurunkan kemampuan struktur menahan beban, sehingga berpotensi menyebabkan keruntuhan lokal maupun total. Oleh sebab itu, peningkatan kekuatan geser melalui metode perkuatan menjadi langkah penting dalam rehabilitasi struktur beton bertulang.

Berbagai metode telah dikembangkan untuk memperkuat elemen beton yang mengalami kerusakan, seperti penambahan pelat baja eksternal, steel plate bonding, concrete jacketing, maupun penggunaan material komposit. Di antara berbagai metode tersebut, *Fiber Reinforced Polymer* (FRP) menjadi solusi yang banyak digunakan dalam dua dekade terakhir karena menawarkan sejumlah keunggulan dibanding metode konvensional. FRP merupakan material komposit berbasis serat dengan kekuatan tarik tinggi, ringan, tahan terhadap korosi, serta mudah diaplikasikan pada permukaan beton tanpa menambah dimensi penampang [6], [7]. Jenis FRP yang umum digunakan dalam bidang rekayasa struktur antara lain *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP), *Aramid Fiber*

Reinforced Polymer (AFRP), dan *Glass Fiber Reinforced Polymer* (GFRP). Dari ketiga jenis tersebut, GFRP sering menjadi pilihan karena kinerjanya baik, dan memiliki kompatibilitas yang tinggi dengan permukaan beton. GFRP relatif mudah diaplikasikan pada struktur eksisting tanpa memerlukan intervensi struktural besar dan tidak menyebabkan gangguan fungsi bangunan secara signifikan. Selain itu, metode ini dinilai lebih efisien secara biaya dibandingkan metode rehabilitasi konvensional seperti *steel jacketing* atau *concrete encasement*, terutama pada proyek yang menuntut waktu pelaksanaan yang cepat dan akses kerja terbatas [8], [9], [10].

Salah satu kasus nyata yang memerlukan perkuatan struktur adalah GOR Barombong Makassar. Hasil audit fisik menunjukkan bahwa beberapa elemen struktur mengalami penurunan kapasitas akibat mutu beton yang rendah, adanya rongga beton (*honeycomb*), serta korosi tulangan akibat paparan lingkungan laut yang bersifat agresif. Desain awal struktur stadion menggunakan Sistem Rangka Pemikul Momen Menengah (SRPMMM) sesuai SNI 1726:2002, padahal berdasarkan pembaruan SNI 1726:2012, struktur stadion seharusnya memenuhi kriteria Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) yang menuntut kekuatan geser dan daktilitas lebih tinggi. Kondisi ini menyebabkan sejumlah balok, khususnya pada bagian tribun barat, mengalami kegagalan geser dan tidak lagi memenuhi kapasitas rencana [11]. Untuk mengembalikan kemampuan struktur dalam menahan beban, digunakan *Glass Fiber Reinforced Polymer* (GFRP) sebagai material perkuatan eksternal pada elemen balok. Penggunaan GFRP dipilih karena sifatnya yang ringan, tahan terhadap korosi, serta mampu meningkatkan kekuatan geser tanpa perlu menambah penampang atau memperberat struktur, sehingga sesuai dengan kondisi lapangan yang terbatas dan lingkungan yang korosif.

Berbagai penelitian sebelumnya menunjukkan efektivitas GFRP dalam meningkatkan kekuatan geser elemen balok beton bertulang. [12] melaporkan bahwa balok dengan tulangan dan sengkang GFRP mengalami peningkatan kekuatan geser sekitar 44% dibanding prediksi ACI, walaupun tetap lebih rendah daripada balok baja karena terbatasnya dowel action dan modulus elastisitas GFRP. [10] membuktikan melalui pengujian di laboratorium bahwa balok yang diperkuat GFRP pada konfigurasi sudut 45° mampu meningkatkan kekuatan geser sebesar 2–2,5% dari balok kontrol, serta menghasilkan pola retak diagonal yang lebih sempit dan mode kegagalan yang lebih terkendali. Sementara itu, [13] melalui simulasi dan validasi numerik menegaskan bahwa pemasangan GFRP dengan konfigurasi U-Wrap atau orientasi 45° menunjukkan kenaikan signifikan terhadap kekuatan geser, walaupun belum setinggi CFRP, dan dapat mengubah mode kegagalan dari kegagalan geser getas menjadi lebih daktail. Secara umum, berbagai penelitian di atas menyimpulkan bahwa pemakaian GFRP sebagai material perkuatan eksternal dan internal mampu memberikan peningkatan kekuatan geser balok beton bertulang, terutama jika dipasang pada konfigurasi, jumlah lapis, serta orientasi serat yang optimal.

Namun demikian, sebagian besar kajian tersebut dilakukan pada elemen skala laboratorium dengan kondisi material ideal dan belum mempertimbangkan variabel kerusakan yang umum ditemukan pada struktur eksisting. Kajian lain lebih banyak berfokus pada perilaku elemen uji bersifat *controlled environment* dan belum membahas secara mendalam penerapan GFRP sebagai strategi rehabilitasi pada infrastruktur nyata yang telah mengalami deteriorasi, korosi, penurunan mutu material, serta peningkatan kebutuhan kapasitas akibat revisi regulasi seismik. Kebaruan penelitian ini terletak pada penyusunan model evaluasi kekuatan geser balok eksisting yang dikaitkan secara langsung dengan perubahan standar desain seismik dan kondisi deteriorasi lapangan, serta penentuan konfigurasi GFRP yang paling efektif berdasarkan kebutuhan tambahan kekuatan geser pada struktur nyata.

Penelitian ini secara khusus membahas analisis perkuatan balok beton bertulang yang mengalami kegagalan geser menggunakan GFRP, dengan studi kasus GOR Barombong Makassar. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengevaluasi efektivitas penggunaan GFRP dalam meningkatkan kekuatan geser elemen balok beton bertulang serta menilai kelayakan metode ini sebagai solusi perkuatan struktur pada bangunan gedung. Diharapkan hasil penelitian ini dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan metode rehabilitasi struktur beton yang efisien, ekonomis, dan tahan terhadap kondisi lingkungan yang agresif.

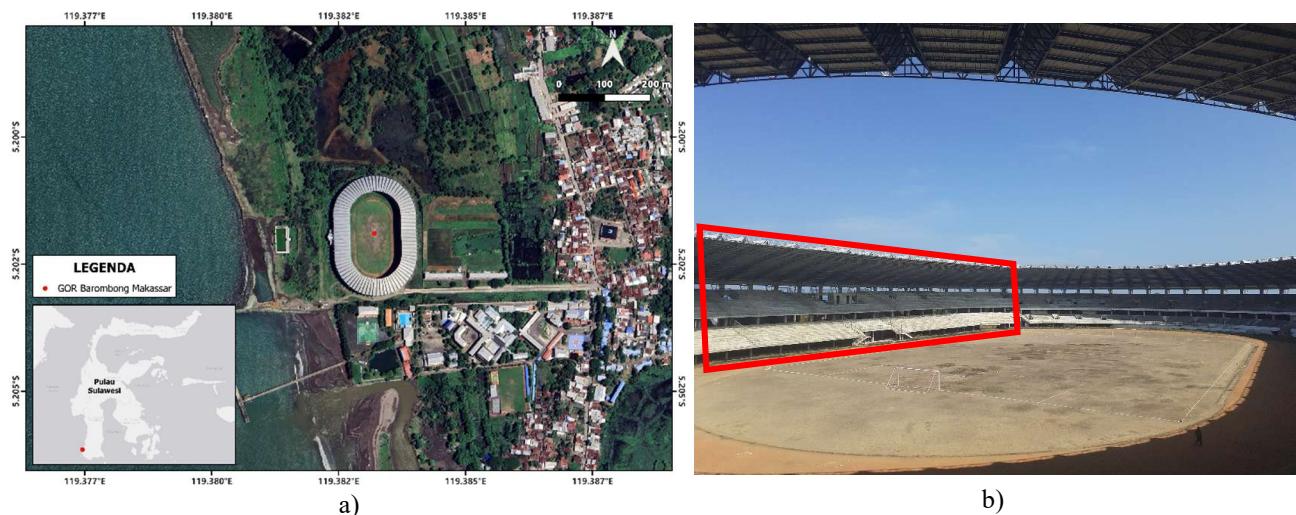
2. METODE

Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian berada pada GOR Barombong Makassar, Sulawesi Selatan. Struktur GOR secara garis besar dikelompokkan atas empat bagian yaitu Tribun Barat, Tribun Timur, Tribun Utara dan Tribun Selatan. Pada penelitian ini, akan dibahas perkuatan struktur hanya pada bagian Tribun Barat dikarenakan banyak ditemukan kegagalan struktur. Tribun Barat berbentuk lurus ditambah dengan sedikit lengkungan pada kedua ujung sisi. Lokasi dan bentuk Tribun Barat Gor Barombong Makassar dapat dilihat pada Gambar 1.

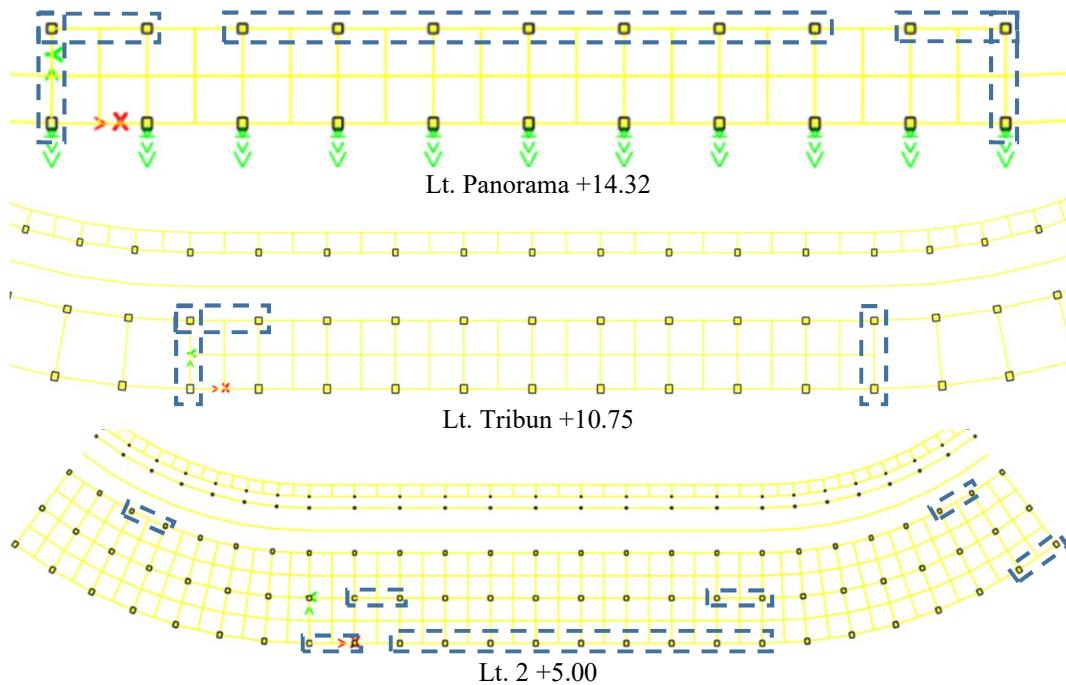
Data yang digunakan

Obyek yang menjadi fokus analisis adalah balok utama pada struktur Tribun Barat GOR Barombong Makassar yang berfungsi menahan beban lantai tribun. Mutu beton eksisting diperoleh berdasarkan hasil uji *core drill* yang dilakukan di lapangan. Nilai kuat tekan rata-rata beton (f'_c) adalah 25.61 MPa. Baja tulangan yang digunakan pada struktur terdiri atas dua jenis, yaitu tulangan ulir BJTS40 dan tulangan polos BJTP24. Tulangan ulir BJTS40 memiliki tegangan leleh (f_y) sebesar 400 MPa dan tegangan tarik (f_u) sebesar 500 MPa, digunakan sebagai tulangan longitudinal utama maupun tulangan geser. Sementara itu, tulangan polos BJTP24 digunakan untuk elemen-elemen sekunder dengan tegangan leleh (f_y) sebesar 240 MPa dan tegangan tarik putus (f_u) sebesar 360 MPa. Data ini digunakan dalam perhitungan kekuatan geser eksisting (kontribusi beton dan tulangan geser) sebelum perkuatan dilakukan.



Gambar 1. a) Lokasi penelitian; b) Tribun barat

Berdasarkan Laporan Assesmen Stadion Barombong, terdapat 26 balok yang mengalami kegagalan geser. Balok tersebut memiliki dimensi penampang selebar 40 cm dan tinggi 80 cm. Lokasi balok yang mengalami kegagalan geser ditunjukkan pada Gambar 2. Luas tulangan geser terpasang ($A_{v\ eks}$) pada elemen balok eksisting yang mengalami kegagalan geser adalah 2.36 mm²/mm sedangkan kebutuhan luas tulangan geser balok ($A_{v\ des}$) adalah 2.48 mm²/mm sampai 2.66 mm²/mm (lihat Tabel 1). Nilai luas tulangan eksisting digunakan untuk menghitung kekuatan geser balok eksisting sedangkan kebutuhan luas tulangan geser digunakan untuk menghitung kekuatan geser desain balok.



Gambar 2. Lokasi balok yang mengalami kegagalan geser

Material perkuatan yang digunakan adalah GFRP tipe Tyfo® SEH-51A yang direkatkan pada permukaan beton menggunakan resin epoksi. Berdasarkan data teknis pabrikan, GFRP ini memiliki kuat tarik ultimit dalam arah utama serat sebesar 460 MPa, dengan regangan ultimit sebesar 0.02 dan modulus elastisitas sebesar 20900 N/mm². Dalam arah tegak lurus terhadap orientasi utama serat (90°), kuat tarik ultimit material adalah 20.7 MPa. Tebal satu lapis GFRP adalah 1.3 mm, yang menjadi acuan dalam menentukan kebutuhan jumlah lapisan perkuatan. Nilai-nilai karakteristik tersebut digunakan untuk menghitung kontribusi gaya geser tambahan yang dapat diberikan oleh GFRP terhadap elemen balok yang diperkuat.

Tabel 1. Luas tulangan geser eksisting dan luas tulangan geser desain

Kode	$A_{v\ eks}$ (mm ² /mm)	$A_{v\ des}$ (mm ² /mm)	Lokasi
B2	2.36	2.59	Lt. Panorama
B5	2.36	2.52	Lt. Panorama
B45	2.36	2.52	Lt. Panorama
B54	2.36	2.56	Lt. Panorama
B105	2.36	2.58	Lt. Panorama
B1265	2.36	2.59	Lt. Panorama
B1268	2.36	2.52	Lt. Panorama
B1287	2.36	2.52	Lt. Panorama
B1296	2.36	2.56	Lt. Panorama
B1367	2.36	2.58	Lt. Panorama
B2	2.36	2.48	Lt. Tribun
B5	2.36	2.51	Lt. Tribun
B1265	2.36	2.51	Lt. Tribun
B7	2.36	2.49	Lt. 2
B36	2.36	2.65	Lt. 2
B47	2.36	2.49	Lt. 2
B56	2.36	2.49	Lt. 2
B59	2.36	2.51	Lt. 2
B107	2.36	2.49	Lt. 2
B1268	2.36	2.66	Lt. 2
B1270	2.36	2.48	Lt. 2
B1280	2.36	2.49	Lt. 2
B1289	2.36	2.49	Lt. 2
B1298	2.36	2.49	Lt. 2
B1304	2.36	2.48	Lt. 2
B1317	2.36	2.55	Lt. 2
B1368	2.36	2.49	Lt. 2

Kebutuhan Gaya Geser Tambahan

Langkah pertama dalam analisis adalah menentukan kekuatan geser balok eksisting ($V_{s \text{ eksisting}}$) dari elemen balok berdasarkan konfigurasi tulangan terpasang. $V_{s \text{ eksisting}}$ dapat dihitung dengan Persamaan (1).

$$V_{s \text{ eksisting}} = \frac{A_{v \text{ eks}} f_y d}{s} \quad (1)$$

dimana $A_{v \text{ eks}}$ = luas tulangan geser eksisting, f_y = tegangan leleh tulangan geser, d = tinggi balok, dan s = jarak antar tulangan geser.

Selanjutnya kekuatan geser balok desain ($V_{s \text{ desain}}$) dapat dihitung dengan Persamaan (2).

$$V_{s \text{ desain}} = \frac{A_{v \text{ des}} f_y d}{s} \quad (2)$$

dimana $A_{v \text{ des}}$ = luas tulangan geser desain.

Apabila diperoleh hasil bahwa $V_{s \text{ desain}} > V_{s \text{ eksisting}}$, maka selisih antara kekuatan geser desain dan kekuatan geser eksisting merupakan kebutuhan gaya geser tambahan yang harus dipikul oleh GFRP.

Perkuatan Struktur dengan GFRP

Perhitungan kebutuhan perkuatan GFRP dilakukan berdasarkan pedoman ACI 440.2R-08. Kekuatan geser FRP (V_f) dapat dihitung sesuai dengan Persamaan (3) berikut.

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} (\sin\alpha + \cos\alpha) d_{fv}}{s_f} \quad (3)$$

dimana A_{fv} = luas perkuatan geser FRP, f_{fe} = tegangan efektif FRP, α = kemiringan pemasangan FRP, d_{fv} = tinggi efektif FRP, dan s_f = jarak komposit pusat ke pusat. Luas perkuatan geser FRP dapat dihitung dengan Persamaan (4) berikut.

$$A_{fv} = 2n t_f w_f \quad (4)$$

dimana n = jumlah lapis FRP, t_f = ketebalan FRP, dan w_f = lebar FRP.

Tegangan efektif FRP f_{fe} ditentukan dari regangan yang terjadi pada kondisi batas geser, yaitu:

$$f_{fe} = \epsilon_{fe} E_f \quad (5)$$

dimana ϵ_{fe} = regangan efektif FRP, dan E_f = modulus elastisitas FRP. Dalam pengaplikasiannya, regangan efektif dibatasi nilai berikut:

- Untuk FRP direkatkan pada empat sisi:

$$\epsilon_{fe} = 0,004 \leq 0,75 \epsilon_{fu} \quad (6)$$

- Untuk FRP direkatkan pada tiga sisi:

$$\epsilon \epsilon_{fe} = \kappa_v \epsilon_{fu} \leq 0,004 \epsilon_{fu} \quad (7)$$

dimana ϵ_{fu} = regangan ultimit, dan κ_v = faktor reduksi untuk lekatan geser. Pada penelitian ini digunakan FRP yang dilekatkan pada tiga sisi. Nilai κ_v dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$\kappa_v = \left(\frac{k_1 k_2 L_e}{11900 \epsilon_{fu}} \right) \leq 0,75 \quad (8)$$

$$L_e = \frac{23300}{(n t_f E_f)^{0.58}} \quad (9)$$

$$k_1 = \left(\frac{f'_c}{27} \right)^{2/3} \quad (10)$$

$$k_2 = \left(\frac{d_f - L_e}{d_{fv}} \right) \text{ untuk } U\text{-wrap} \quad (11)$$

$$k_2 = \left(\frac{d_f - 2L_e}{d_{fv}} \right) \text{ untuk dua sisi} \quad (12)$$

dimana L_e = panjang ikatan aktif, k_1 = faktor koefisien reduksi ikatan, k_2 = faktor koefisien reduksi ikatan, dan f'_c = kuat tekan beton eksisting. Pada penelitian ini FRP dilekatkan balok balok sehingga membentuk *U-wrap*.

Berdasarkan ACI 440.2R-08, spesifikasi material yang dilaporkan oleh produsen GFRP seperti kekuatan tarik, biasanya tidak mempertimbangkan kondisi lingkungan. Penggunaan jangka panjang dapat mengurangi sifat tarik,

creeps-rupture, dan ketahanan GFRP sehingga spesifikasi material yang digunakan dalam perhitungan desain harus dikurangi faktor reduksi yang nilainya dipengaruhi oleh kondisi lingkungan. Nilai faktor reduksi lingkungan berdasarkan ACI 440.2R-08 dapat dilihat pada Tabel 1. Pada penelitian ini digunakan GFRP dengan kondisi eksterior jenis *glass* sehingga nilai C_e yang digunakan dalam analisis adalah 0.65.

Tabel 2. Faktor reduksi akibat pengaruh lingkungan

Kondisi Paparan	Jenis FRP	Faktor Reduksi Lingkungan (C_e)
Interior	Carbon	0.95
	Glass	0.75
	Aramid	0.85
	Carbon	0.85
Eksterior	Glass	0.65
	Aramid	0.75
	Carbon	0.85
Lingkungan agresif yang mengandung zat kimia	Glass	0.50
	Aramid	0.70

Sumber: ACI 440.2R-08, 2008

Kuat tarik ultimit (f_{fu}) yang digunakan sebagai dasar perencanaan dan analisis adalah sama dengan tegangan ultimit dari pabrik (f_{fu}^*) yang dikalikan dengan faktor reduksi lingkungan ditunjukkan pada Persamaan (13).

$$f_{fu} = C_e f_{fu}^* \quad (13)$$

Demikian pula dengan nilai regangan ultimit (ε_{fu}) dimana regangan ultimit dari pabrik (ε_{fu}^*) yang dikalikan dengan faktor reduksi lingkungan ditunjukkan pada Persamaan (14).

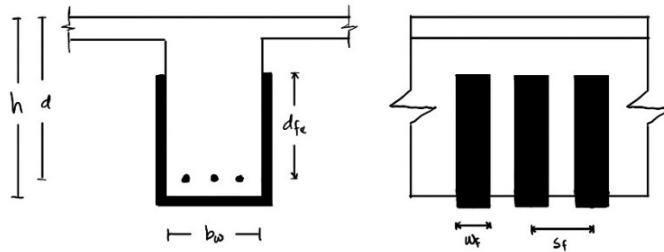
$$\varepsilon_{fu} = C_e \varepsilon_{fu}^* \quad (14)$$

Meskipun metode analisis yang digunakan mengacu pada pedoman ACI 440.2R-08 dan dianggap memadai dalam mengevaluasi kekuatan geser tambahan akibat perkuatan GFRP, pendekatan ini memiliki sejumlah keterbatasan. Analisis dilakukan dengan asumsi kondisi *perfect bonding* antara GFRP dan permukaan beton, sehingga belum mempertimbangkan variasi kualitas lekatan akibat kondisi lapangan seperti kelembapan beton, kontaminasi permukaan, atau ketidak sempurnaan proses pemasangan, yang pada praktiknya berpotensi menurunkan efektivitas transfer tegangan. Efek jangka panjang seperti *creep-rupture* dan perubahan sifat mekanis akibat paparan lingkungan laut [15], *fatigue degradation* [16], serta potensi *debonding* prematur [17] dapat terjadi tetapi tidak dimodelkan. Dengan demikian, hasil analitis pada penelitian ini merepresentasikan kondisi ideal perkuatan, sehingga validasi lebih lanjut melalui uji eksperimental atau evaluasi numerik berbasis elemen hingga diperlukan untuk memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai performa perkuatan GFRP pada kondisi nyata.

Konfigurasi GFRP

GFRP dipasang secara eksternal dengan konfigurasi *U-Wrap* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Lembaran GFRP dipasang melingkupi sisi samping dan bagian bawah balok. Untuk mengevaluasi pengaruh variasi lebar lembaran (w_f), jumlah lapisan (n), dan jarak antarlembar (s_f) terhadap peningkatan kekuatan geser, dilakukan enam kombinasi konfigurasi GFRP seperti ditunjukkan pada Tabel 2.

Pemilihan konfigurasi GFRP pada penelitian ini tidak hanya didasarkan pada peningkatan kekuatan geser, tetapi juga mempertimbangkan efisiensi material, kemudahan pelaksanaan di lapangan, dan keberlanjutan dalam lingkungan korosif. Pengujian dengan GFRP-strip pada balok beton ringan meningkatkan performa geser secara signifikan, namun efektivitasnya sangat dipengaruhi oleh konfigurasi serat dan metode pemasangan [18]. Dengan dasar tersebut, konfigurasi berupa strip dengan variasi lebar (5 cm, 10 cm, 15 cm) dan jumlah lapis (1–2 lapis) dipilih untuk mengevaluasi rasio luas efektif serat terhadap kontribusi kekuatan geser berdasarkan pedoman American Concrete Institute (ACI 440.2R-08). Konfigurasi strip yang lebih sempit dipilih karena kemudahan pelaksanaan pada balok eksisting dengan akses kerja terbatas dan permukaan beton yang tidak ideal.



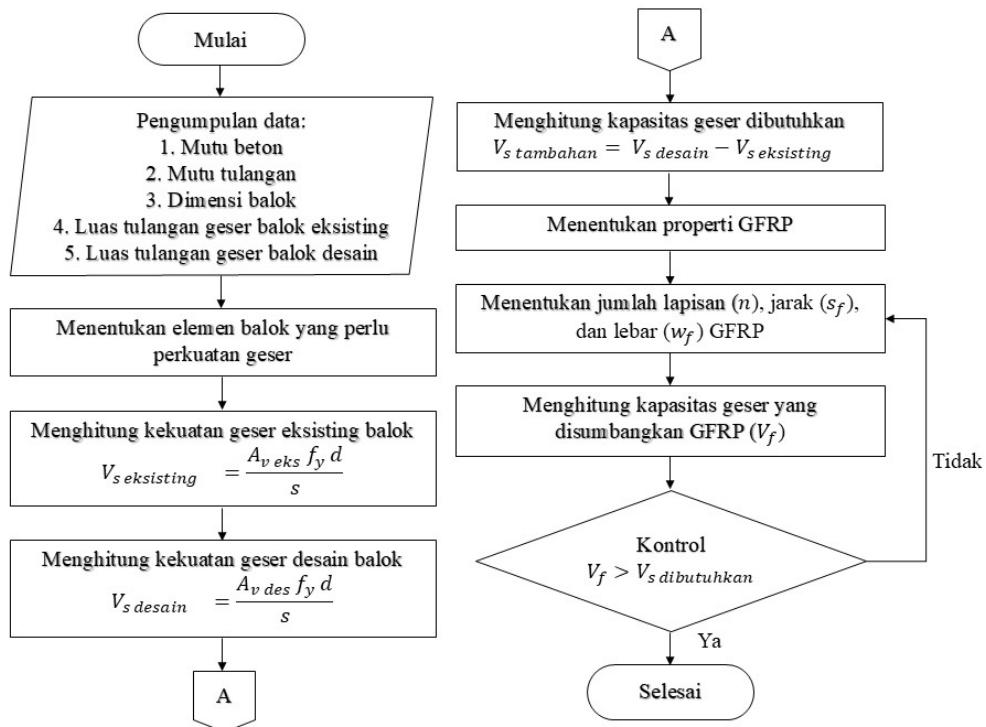
Gambar 2. Bentuk pemasangan GFRP

Tabel 3. Kombinasi konfigurasi GFRP

No.	Lebar GFRP (w_f)	Jumlah Lapisan (n)	Jarak Antar GFRP (s_f)
1	5 cm	1 lapis	10 cm
2	5 cm	2 lapis	10 cm
3	10 cm	1 lapis	15 cm
4	10 cm	2 lapis	15 cm
5	15 cm	1 lapis	20 cm
6	15 cm	2 lapis	20 cm

Prosedur Penelitian

Untuk mempermudah proses penelitian, maka disusun langkah-langkah penelitian dalam bentuk bagan alir seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram alir penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Kebutuhan Kekuatan Geser Tambahan

Kebutuhan kekuatan geser tambahan diperoleh dengan mencari selisih antara kekuatan geser balok eksisting dengan menggunakan Persamaan (1) dan kekuatan geser balok desain dengan menggunakan Persamaan (2). Rekapitulasi hasil perhitungan kebutuhan kekuatan geser tambahan ditunjukkan pada Tabel 4.

Berdasarkan hasil perhitungan yang dirangkum pada Tabel 4, diketahui bahwa seluruh elemen balok memiliki kekuatan geser eksisting yang relatif sama, yaitu 424.23 kN. Nilai ini mencerminkan hasil evaluasi terhadap

kondisi aktual tulangan geser yang terpasang pada elemen balok Tribun Barat GOR Barombong. Sementara itu, kekuatan geser balok desain bervariasi antara 445.80 kN hingga 478.16 kN, tergantung pada posisi balok. Nilai V_s tambahan tiap elemen balok berkisar antara 21.57 kN hingga 53.93 kN. Nilai ini menggambarkan besarnya gaya geser tambahan yang harus disediakan oleh GFRP sebagai material perkuatan agar kapasitas total geser balok memenuhi syarat kekuatan sesuai desain.

Kekuatan Geser GFRP

Analisis kekuatan geser GFRP dilakukan untuk enam konfigurasi GFRP sebagaimana pada Tabel 3, yang merupakan variasi lebar GFRP (w_f), jumlah lapisan GFRP (n), dan jarak antar GFRP (s_f). Hasil perhitungan kekuatan geser GFRP (V_f) setiap kombinasi konfigurasi ditunjukkan pada Tabel 5.

Berdasarkan Tabel 5, terlihat bahwa peningkatan kekuatan geser yang diperoleh dari pemasangan GFRP sangat dipengaruhi oleh lebar GFRP, jumlah lapisan GFRP, dan jarak antar GFRP. Semakin besar lebar dan jumlah lapisan GFRP yang digunakan, maka kekuatan geser yang dihasilkan juga meningkat secara signifikan, sedangkan jarak antarlembar yang semakin lebar menyebabkan penurunan kontribusi geser karena distribusi tegangan yang tidak merata. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa konfigurasi 5 cm × 1 lapis ($s_f = 10$ cm) menghasilkan kekuatan geser sebesar 26.68 kN, sedangkan konfigurasi 5 cm × 2 lapis meningkat menjadi 36.87 kN, menandakan bahwa penambahan satu lapis GFRP memberikan tambahan kekuatan sekitar 38%. Selanjutnya, konfigurasi 10 cm × 1 lapis ($s_f = 15$ cm) menghasilkan kekuatan 35.57 kN, sedangkan 10 cm × 2 lapis meningkat hingga 49.16 kN. Kekuatan tertinggi diperoleh pada konfigurasi 15 cm × 2 lapis ($s_f = 20$ cm) dengan 55.31 kN, menunjukkan bahwa peningkatan luas serat efektif berbanding lurus dengan peningkatan kekuatan geser. Meskipun demikian, efisiensi per lapisan cenderung menurun karena keterbatasan regangan efektif serat bagian dalam akibat gesekan antarlapisan (interlaminar slip) [19]. Dengan demikian, hasil ini menunjukkan bahwa penambahan lebar dan jumlah lapisan GFRP efektif meningkatkan kekuatan geser balok beton bertulang, namun perlu mempertimbangkan keseimbangan antara efektivitas perkuatan, efisiensi material, dan kemudahan pelaksanaan di lapangan agar konfigurasi yang dipilih memberikan hasil optimal sesuai kebutuhan gaya geser tambahan pada masing-masing elemen balok.

Tabel 4. Rekapitulasi kebutuhan kekuatan geser tambahan

Kode	V_s eksisting (kN)	V_s desain (kN)	V_s tambahan (kN)
B2	424.23	465.58	41.26
B5	424.23	453.00	28.76
B45	424.23	453.00	28.76
B54	424.23	460.18	35.95
B105	424.23	463.78	39.55
B1265	424.23	465.58	41.34
B1268	424.23	453.00	28.76
B1287	424.23	453.00	28.76
B1296	424.23	460.18	35.95
B1367	424.23	463.78	39.55
B2	424.23	445.80	21.57
B5	424.23	451.20	26.96
B1265	424.23	451.20	26.96
B7	424.23	447.60	23.37
B36	424.23	476.36	52.13
B47	424.23	447.60	23.37
B56	424.23	447.60	23.37
B59	424.23	451.20	26.96
B107	424.23	447.60	23.37
B1268	424.23	478.16	53.93
B1270	424.23	445.80	53.93
B1280	424.23	447.60	23.37
B1289	424.23	447.60	23.37
B1298	424.23	447.60	23.37
B1304	424.23	445.80	21.57
B1317	424.23	458.39	34.15
B1368	424.23	447.60	23.37

Tabel 5. Rekapitulasi kebutuhan kekuatan geser tambahan

No.	Lebar GFRP (w_f)	Jumlah Lapisan (n)	Jarak Antar GFRP (s_f)	V_f (kN)
1	5 cm	1 lapis	10 cm	26.68
2	5 cm	2 lapis	10 cm	36.87
3	10 cm	1 lapis	15 cm	35.57
4	10 cm	2 lapis	15 cm	49.16
5	15 cm	1 lapis	20 cm	40.02
6	15 cm	2 lapis	20 cm	55.31

Pemilihan dan Pengaplikasi GFRP

Pemilihan kombinasi GFRP didasarkan pada hasil analisis kebutuhan kekuatan geser tambahan ($V_{s \text{ tambahan}}$) dari Tabel 4 dan kemampuan perkuatan GFRP (V_f) dari Tabel 5. Nilai $V_{s \text{ tambahan}}$ menunjukkan besarnya gaya geser yang harus ditambah agar kapasitas balok eksisting memenuhi syarat kekuatan desain, sedangkan V_f menunjukkan kekuatan geser yang dapat disumbangkan oleh masing-masing konfigurasi GFRP. Selain pertimbangan teknis, pemilihan kombinasi juga memperhatikan aspek biaya dan kemudahan pelaksanaan. Konfigurasi dengan lebar strip lebih kecil (5–10 cm) lebih mudah diaplikasikan pada lokasi dengan akses terbatas dan memiliki risiko *debonding* lebih rendah karena area pengeleman lebih mudah dikontrol. Sebaliknya, konfigurasi 15 cm × 2 lapis membutuhkan material dan waktu pemasangan lebih banyak, sehingga direkomendasikan hanya untuk balok dengan kebutuhan perkuatan sangat tinggi. Berdasarkan pertimbangan di atas, Tabel 6 menunjukkan rekomendasi kombinasi GFRP yang digunakan pada setiap balok sesuai dengan kebutuhan gaya geser tambahan dan efisiensi perkuatan yang diinginkan.

Tabel 6. Rekomendasi kombinasi perkuatan GFRP

Kode	Lebar GFRP (cm)	Jarak Antar GFRP (cm)	Jumlah Lapisan	$V_{s \text{ eksisting}}$ (kN)	V_f (kN)	Kekuatan Geser Total (kN)	Persentase Kenaikan (%)
B2	10	15	2	424.23	49,16	473,39	11,6
B5	10	15	1	424.23	35,57	459,8	8,4
B45	10	15	1	424.23	35,57	459,8	8,4
B54	15	20	1	424.23	40,02	464,25	9,4
B105	10	15	2	424.23	49,16	473,39	11,6
B1265	10	15	2	424.23	49,16	473,39	11,6
B1268	10	15	1	424.23	35,57	459,8	8,4
B1287	10	15	1	424.23	35,57	459,8	8,4
B1296	15	20	1	424.23	40,02	464,25	9,4
B1367	10	15	2	424.23	49,16	473,39	11,6
B2	5	10	1	424.23	26,68	450,91	6,3
B5	10	15	1	424.23	35,57	459,8	8,4
B1265	10	15	1	424.23	35,57	459,8	8,4
B7	10	15	1	424.23	35,57	459,8	8,4
B36	15	20	2	424.23	55,31	479,54	13,0
B47	10	15	1	424.23	35,57	459,8	8,4
B56	10	15	1	424.23	35,57	459,8	8,4
B59	10	15	1	424.23	35,57	459,8	8,4
B107	10	15	1	424.23	35,57	459,8	8,4
B1268	15	20	2	424.23	55,31	479,54	13,0
B1270	15	20	2	424.23	55,31	479,54	13,0
B1280	10	15	1	424.23	35,57	459,8	8,4
B1289	10	15	1	424.23	35,57	459,8	8,4
B1298	10	15	1	424.23	35,57	459,8	8,4
B1304	5	10	1	424.23	26,68	450,91	6,3
B1317	15	20	1	424.23	40,02	464,25	9,4
B1368	10	15	1	424.23	35,57	459,8	8,4

Berdasarkan Tabel 6, terlihat bahwa penerapan GFRP pada berbagai kombinasi lebar, jumlah lapisan, dan jarak antar GFRP memberikan peningkatan kekuatan geser balok beton bertulang antara 6,3% hingga 13,0% dibandingkan kondisi eksisting tanpa perkuatan. Peningkatan kekuatan geser ini sejalan dengan hasil pengujian laboratorium balok yang diperkuat GFRP yang diperoleh oleh [10]. Kenaikan ini menunjukkan bahwa konfigurasi GFRP yang dipilih mampu memberikan kontribusi yang signifikan terhadap peningkatan kekuatan geser balok.

Secara umum, persentase kenaikan kekuatan geser sebanding dengan luas efektif GFRP yang terpasang dan berbanding terbalik dengan jarak antarlembar. Konfigurasi dengan lebar sedang (10 cm) dan jarak antarlembar

rapat (15 cm) terbukti memberikan kinerja paling optimal, baik dari sisi peningkatan kekuatan geser maupun efisiensi penggunaan material. Hasil ini menguatkan kesimpulan bahwa penggunaan GFRP sebagai material perkuatan eksternal mampu meningkatkan kekuatan geser balok beton bertulang secara efektif tanpa perlu melakukan pembongkaran struktur, dengan kenaikan kekuatan yang cukup signifikan dan pelaksanaan yang relatif mudah serta ekonomis di lapangan.

Konfigurasi GFRP yang telah ditentukan pada Tabel 6 diterapkan secara spesifik pada daerah tumpuan balok, yang merupakan area paling kritis terhadap kegagalan geser. Perkuatan FRP pada zona tumpuan lebih efektif menahan retak diagonal dan meningkatkan daktilitas elemen dibandingkan pemasangan di tengah bentang [20]. Dengan konfigurasi dan lokasi pemasangan yang sesuai hasil analisis, metode perkuatan ini dapat diterapkan secara efektif pada balok-balok Tribun Barat GOR Barombong Makassar tanpa mengubah bentuk asli struktur dan dengan waktu pelaksanaan yang relatif singkat.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan, dapat disimpulkan bahwa balok-balok di Tribun Barat GOR Barombong Makassar mengalami kekurangan kekuatan geser, dengan kekuatan geser balok eksisting (V_s eksisting) teridentifikasi sebesar 424.23 kN, sehingga memerlukan kekuatan geser tambahan (V_s tambahan) antara 21.57 kN hingga 53.93 kN untuk memenuhi standar desain. Analisis terhadap enam kombinasi perkuatan GFRP Tipe Tyfo® SEH-51A dengan konfigurasi *U-Wrap* (berdasarkan ACI 440.2R-08 dan faktor reduksi $C_e = 0.65$) menunjukkan bahwa perkuatan ini mampu menyediakan kekuatan geser tambahan (V_f) yang memadai, berkisar antara 26.68 kN hingga 55.31 kN. Penerapan konfigurasi GFRP yang spesifik pada tumpuan balok terbukti efektif, berhasil meningkatkan kekuatan geser total balok antara 6.3% hingga 13.0% dari kondisi eksisting. Dengan demikian, GFRP merupakan solusi perkuatan eksternal yang efektif dan efisien untuk studi kasus GOR Barombong, mampu memenuhi defisit kekuatan akibat pembaruan standar desain (dari SRPMM ke SRPMK) sekaligus ideal untuk lingkungan laut yang agresif karena sifatnya yang non-korosif. Meskipun penelitian ini terbatas pada analisis perhitungan, disarankan untuk melakukan penelitian eksperimental atau uji laboratorium pada balok dengan konfigurasi yang sama guna memvalidasi hasil analitis dan mengamati secara langsung mekanisme kegagalan (seperti delaminasi atau debonding).

DAFTAR PUSTAKA

- [1] V. Kravchuk, P. Vegera, dan R. Khmil, “ANALYSIS OF THE IMPACT OF CROSS-SECTION DAMAGE ON THE STRENGTH AND DEFORMABILITY OF BENT REINFORCED CONCRETE ELEMENTS,” *Theory and Building Practice*, vol. 2024, hlm. 19–27, Nov 2024, doi: 10.23939/jtbp2024.02.019.
- [2] M. Slowik, “The analysis of failure in concrete and reinforced concrete beams with different reinforcement ratio,” *Archive of Applied Mechanics*, vol. 89, no. 5, hlm. 885–895, 2019, doi: 10.1007/s00419-018-1476-5.
- [3] G. Campione dan G. Giambanco, “Analysis of a Collapsed Long-Span Reinforced Concrete Roof in South Italy: Design Mistakes and Material Degradation,” *Journal of Performance of Constructed Facilities*, vol. 34, no. 2, hlm. 4020001, 2020, doi: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001409.
- [4] E. Işık dkk., “Seismic Performance and Failure Mechanisms of Reinforced Concrete Structures Subject to the Earthquakes in Türkiye,” *Sustainability*, vol. 16, no. 15, 2024, doi: 10.3390/su16156473.
- [5] L. N. Lowes, D. E. Lehman, dan Z. Whitman, “Investigation of failure mechanisms and development of design recommendations for flexural reinforced concrete walls,” *Eng Struct*, vol. 186, hlm. 323–335, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.122>.
- [6] H. Sezen, “Repair and Strengthening of Reinforced Concrete Beam-Column Joints with Fiber-Reinforced Polymer Composites,” *Journal of Composites for Construction*, vol. 16, no. 5, hlm. 499–506, 2012, doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000290.
- [7] G. Mai dkk., “Shear performance and capacity of FRP reinforced concrete beams: Comprehensive review and design evaluation,” *Advances in Structural Engineering*, vol. 27, no. 15, hlm. 2569–2591, 2024, doi: 10.1177/13694332241276058.
- [8] A. K. Panigrahi, K. C. Biswal, dan M. R. Barik, “Strengthening of shear deficient RC T-beams with externally bonded GFRP sheets,” *Constr Build Mater*, vol. 57, hlm. 81–91, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.076>.

- [9] S. Sreekumar Kavitha, L. Joseph, M. K. Madhavan, dan K. Jayanarayanan, "Comparative study of carbon and glass fiber reinforced polymer composites for the confinement of concrete columns," *Mater Today Proc*, vol. 103, hlm. 352–357, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.09.010>.
- [10] Y. X. Liew, N. Bakar, K. S. Lim, S. I. Doh, R. P. Jaya, dan S. C. Chin, "Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams using GFRP," *The Open Civil Engineering Journal*, vol. 16, no. 1, Des 2022, doi: 10.2174/18741495-v16-e221222-2022-53.
- [11] Center of Technology (CoT) Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, "Laporan Assesmen Stadion Barombong," Makassar, Des 2019.
- [12] S. Kpo, C. Kankam, C. Ababio, dan D. Tackie, "Investigation on the Shear Performance of Concrete Beams Reinforced With Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) Bars," *Asian Journal of Advanced Research and Reports*, vol. 19, hlm. 119–137, Nov 2025, doi: 10.9734/ajarr/2025/v19i4969.
- [13] S. Ninan dan V. Ajay, "Analysis of CFRP & GFRP Sheets for Enhancing Shear Strength in RC Beams," *International Journal of Engineering Research & Technology*, vol. 14, no. 05, Mei 2025, doi: 10.17577/IJERTV14IS050131.
- [14] ACI Committee 440, "ACI 440.2R-08 Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures," American Concrete Institute, 2008.
- [15] J. D. Ortiz, S. S. Khedmatgozar Dolati, P. Malla, A. Nanni, dan A. Mehrabi, "FRP-Reinforced/Strengthened Concrete: State-of-the-Art Review on Durability and Mechanical Effects," *Materials*, vol. 16, no. 5, 2023, doi: 10.3390/ma16051990.
- [16] X. Guo, Y. Wang, P. Huang, dan S. Shu, "Fatigue behavior of RC beams strengthened with FRP considering the influence of FRP-concrete interface," *Int J Fatigue*, vol. 143, hlm. 105977, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105977>.
- [17] X. Min, D. Yang, S. Song, dan X. Li, "Study on the Stress Threshold of Preventing Interfacial Fatigue Debonding in Concrete Beams Strengthened with Externally-Bonded FRP Laminates," *Buildings*, vol. 14, no. 2, 2024, doi: 10.3390/buildings14020430.
- [18] W. Nawaz dkk., "Shear strengthening performance of GFRP reinforced lightweight SCC beams: Experimental and analytical study," *Eng Struct*, vol. 278, hlm. 115545, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115545>.
- [19] D. Alandro, A. D. Nugraha, I. A. Maulana, A. D. Nugroho, W. Erlangga, dan M. A. Muflikhun, "Comprehensive assessment of hybrid GFRP-graphite filler using modified complex Arcan fixture: Experimental and simulation approach," *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 180, hlm. 108094, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2024.108094>.
- [20] Z. Hu, X. Zhou, M. Guo, X. Huang, dan B. Hu, "Enhancing the Performance of CFRP Shear-Strengthened RC Beams Using 'Ductile' Anchoring Devices," *Front Mater*, vol. Volume 7-2020, 2020, doi: 10.3389/fmats.2020.00292.