



PERKUATAN ELEMEN BALOK BETON BERTULANG MENGUNAKAN MATERIAL CFRP : STUDI KASUS GEDUNG BANK

Yanisfa Septiarsilia^{*1}, Anditya Hendra Pratama², Jaka Propika³, Indra Komara⁴, Heri Istiono⁵, Ahmad Hernadi⁶

^{1,2,3,4,5} Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya

⁶Program Studi Teknik Sipil, FT UBT, Tarakan

e-mail: ^{*1}yanisfa.septi@itats.ac.id, ²anditya267@gmail.com, ³jakapropika@itats.ac.id,
⁴indrakomara@itats.ac.id, ⁵heri_istiono@itats.ac.id, ⁶ahernjineering@gmail.com

ABSTRACT: The addition of floors and changes in building function can modify the load distribution and affect the capacity of structural elements, making it necessary to evaluate the existing structure to ensure that it can safely accommodate the new loading conditions. If the capacity is insufficient, strengthening is required, one method being the use of Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP). This study includes the collection of existing structural data, structural modeling using analysis software, and the application of loads based on actual building conditions. The modeling results are used to assess the beam's capacity under the additional loads, and if it does not meet the required strength, a strengthening system using CFRP is designed. In this research, an analysis was carried out on beam component B1 As 2-3 with a span length of 4.8 meters, considering an additional dead load from screed of 27.32 kN and an additional live load of 31.93 kN due to the functional change from office space to corridor. These added loads resulted in a new ultimate moment of 642.26 kNm, while the beam's nominal moment capacity was only 530.29 kNm, indicating a required strengthening of at least 111.97 kNm. The analysis determined that three layers of CFRP were required, and with the CFRP installation, the new nominal moment capacity increased to 766 kNm, providing a total strength improvement of 44%.

Keywords: Structural Strengthening, Beam Element, CFRP, Material, Reinforced Concrete.

ABSTRAK: Penambahan lantai dan perubahan fungsi bangunan dapat mengubah distribusi beban dan kapasitas elemen struktur, sehingga diperlukan evaluasi untuk memastikan kemampuan struktur eksisting menahan beban baru. Bila kapasitas tidak mencukupi, perkuatan diperlukan, salah satunya menggunakan Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP). Penelitian ini mencakup pengumpulan data eksisting, pemodelan struktur dengan bantuan perangkat lunak analisis struktur, serta penerapan pembebanan sesuai kondisi aktual. Hasil pemodelan digunakan untuk menilai kapasitas balok terhadap beban tambahan, dan jika tidak memenuhi syarat kekuatan, dirancang sistem perkuatan dengan CFRP. Pada penelitian ini dilakukan analisa komponen struktur balok B1 As 2-3 dengan panjang bentang 4.8 meter dengan penambahan beban mati akibat screed sebesar 27.32 kN dan beban hidup akibat perubahan fungsi ruang kantor menjadi koridor sebesar 31.93 kN. Dari penambahan beban tersebut didapatkan momen ultimate yang baru yaitu sebesar 642.26 kNm. Sedangkan momen nominal balok tersebut hanya sebesar 530.29 kNm, sehingga dibutuhkan perkuatan setidaknya sebesar 111.97 kNm. Dari hasil analisa didapatkan jumlah layer CFRP yang dibutuhkan yaitu sebanyak 3 layer, dengan penambahan CFRP didapatkan momen nominal yang baru yaitu sebesar 766 kNm. Dengan begitu didapatkan penambahan perkuatan sebesar 44%.

Kata kunci: Perkuatan Struktur, Elemen Balok, CFRP, Material, Beton Bertulang.

1. PENDAHULUAN

Penambahan lantai dan perubahan fungsi bangunan merupakan isu penting dalam bidang rekayasa struktur, karena keduanya dapat mengubah distribusi beban, perilaku dinamis, serta kapasitas keseluruhan elemen struktur. Oleh karena itu, bangunan eksisting harus dievaluasi dan dianalisis untuk menentukan kemampuannya dalam menahan beban baru yang diterapkan. Tantangan lain muncul dari pembaruan peraturan bangunan secara berkala, yang mengharuskan struktur eksisting yang dirancang berdasarkan regulasi lama untuk ditinjau kembali (Sandjaya et al., 2024)(Alabdulhady et al., 2022). Jika kapasitas struktur dinilai tidak mencukupi, maka diperlukan tindakan perkuatan untuk menjamin keselamatan dan stabilitas bangunan (Andreasnata et al., 2022)(Jamal et al., 2015)(Hartono, 2012). Perkuatan struktur juga bertujuan untuk memulihkan atau meningkatkan kapasitas elemen struktur agar mampu menahan beban rencana yang ditetapkan secara aman serta memenuhi umur layan yang diharapkan (Rozak et al., 2022)(Harahap et al., 2024).

Berbagai metode perkuatan telah diterapkan untuk memperbaiki dan meningkatkan kekuatan struktur beton bertulang. Pendekatan tersebut meliputi peningkatan kapasitas struktur terhadap gaya geser dan lentur melalui metode External Bonding Reinforcement (EBR) dan Near-Surface Mounting (NSM) dengan menggunakan material Fiber-Reinforced Polymer (FRP) (Saputra & Ahyar, 2023)(Hosen et al., 2024). Secara umum, material perkuatan FRP dikategorikan menjadi tiga jenis, yaitu Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP), Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP), dan Aramid Fiber Reinforced Polymer (AFRP) (Aulia et al., 2021). Di antara ketiganya, CFRP paling banyak dipilih karena memiliki keunggulan yang lebih baik, termasuk kekuatan yang sangat tinggi, bobot yang ringan, kemudahan dalam aplikasi dan penanganan, serta biaya pemasangan dan pemeliharaan yang relatif rendah (Keshava & Wijaya, 2023)(Alobaidi & Al-zuhairi, 2023). CFRP mengandung sedikitnya 90% karbon berdasarkan berat, umumnya menggunakan serat grafit yang terdiri dari lebih dari 95% karbon. Komposit serat karbon sangat sesuai untuk aplikasi struktural yang memerlukan kekuatan tinggi, kekakuan optimal, bobot ringan, serta ketahanan terhadap kelelahan yang sangat baik (Achmad et al., 2012).

CFRP merupakan material komposit yang terdiri dari serat resin polimer berkekuatan tinggi dengan kuat tarik sekitar 7 hingga 10 kali lebih besar dibandingkan baja konvensional. Material ini ringan, sangat tahan terhadap korosi, dan mudah dipasang, sehingga menjadi pilihan unggul untuk meningkatkan kapasitas lentur dan durabilitas struktur beton tanpa menambah beban yang berlebihan (Sari et al., 2022)(Noorhidana & Purwanto, 2012)(Zega, 2020)(Utami, 2019)(Hasan et al., 2020). Karena ketahanannya terhadap korosi dan bahan kimia, CFRP banyak digunakan untuk memperkuat dan memperbaiki struktur beton bertulang melalui teknik jacketing atau wrapping (Wei et al., 2021). CFRP umumnya diaplikasikan untuk perkuatan lentur dan geser balok dengan merekatkan lembaran CFRP pada permukaan beton menggunakan resin epoksi. Berdasarkan ACI 440.2R-02, sistem CFRP umumnya diaplikasikan dalam satu hingga tiga lapis (Sumargo et al., 2014). Perkuatan menggunakan CFRP telah terbukti mampu meningkatkan kapasitas lentur hingga 45% dan daktilitas kelengkungan hingga 265% (Tavio et al., 2009)(Jamal et al., 2006), yang juga dikonfirmasi oleh penelitian lainnya (Utami & Sutantiningrum, 2019), serta meningkatkan kekakuan struktur. Kapasitas lentur balok bertulang juga dipengaruhi oleh panjang lembaran CFRP yang digunakan, sebagaimana ditunjukkan dalam (Alsuhaibani, 2024)(Ahmed, 2023), yang secara konsisten memperlihatkan bahwa panjang lekatan antara CFRP dan beton secara langsung memengaruhi distribusi tegangan dan efektivitas perkuatan secara keseluruhan. Perkuatan lentur dan geser pada balok maupun pelat dapat dilakukan dengan memasang lembaran CFRP pada daerah tarik atau pada bagian badan (web) balok, baik secara vertikal maupun diagonal, sesuai dengan kebutuhan struktur. Pemasangan ini meningkatkan kapasitas lentur dan geser, yang dihitung berdasarkan keseimbangan gaya, keseimbangan momen, serta rumus empiris yang diperoleh dari penelitian eksperimental. Mekanisme perkuatan ini serupa dengan efek pengekanan (confinement) yang diberikan oleh tulangan transversal (Hasan et al., 2020).

Pada Gedung Bank B, terjadi perubahan fungsi ruang dari ruang kantor menjadi area koridor. Selain itu, pelat lantai mengalami penebalan sebesar 60 mm untuk memperbaiki dan meratakan permukaan lantai. Modifikasi tersebut meningkatkan beban pada elemen struktur, sehingga diperlukan analisis terhadap

balok eksisting untuk memastikan kemampuannya dalam menahan beban tambahan tersebut. Jika hasil analisis menunjukkan bahwa balok tidak mampu menahan beban yang bekerja, maka akan dilakukan perkuatan menggunakan material Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP).

Penelitian ini melakukan analisis struktur pada Gedung Bank untuk mengevaluasi kinerja elemen balok akibat perubahan kondisi pembebanan. Tahapan penelitian meliputi analisis ulang beban pada balok eksisting untuk memperoleh nilai terbaru momen lentur dan gaya geser berdasarkan kondisi aktual bangunan setelah penebalan pelat dan perubahan fungsi ruang. Hasil analisis tersebut kemudian digunakan sebagai dasar dalam perancangan perkuatan balok menggunakan material CFRP. Melalui analisis ini, penelitian bertujuan untuk mengetahui sejauh mana perkuatan CFRP dapat meningkatkan kapasitas lentur dan geser balok sehingga struktur dapat memenuhi standar kekuatan yang dipersyaratkan tanpa mengubah dimensi balok atau melakukan modifikasi struktur yang besar.

Metode yang digunakan dalam penelitian ini meliputi pengumpulan data eksisting, pemodelan struktur menggunakan perangkat lunak analisis struktur, serta penerapan beban sesuai dengan kondisi aktual bangunan. Data eksisting yang dikumpulkan mencakup dimensi elemen struktur, sifat material, serta konfigurasi pembebanan akibat perubahan fungsi ruang dan penebalan pelat lantai. Pemodelan struktur dilakukan untuk mengetahui kapasitas struktur eksisting, khususnya pada elemen balok, sehingga dapat dievaluasi apakah elemen tersebut masih mampu menahan beban baru yang diterapkan. Apabila hasil evaluasi menunjukkan bahwa kapasitas struktur tidak memenuhi kriteria kekuatan yang dipersyaratkan, maka dirancang sistem perkuatan menggunakan Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP). Tahap ini meliputi penentuan konfigurasi pemasangan, orientasi serat, serta jumlah lapisan CFRP yang diperlukan agar balok dapat mencapai kapasitas lentur dan geser yang disyaratkan sesuai dengan standar perencanaan yang berlaku. Diagram alir penelitian disajikan pada Gambar 1.



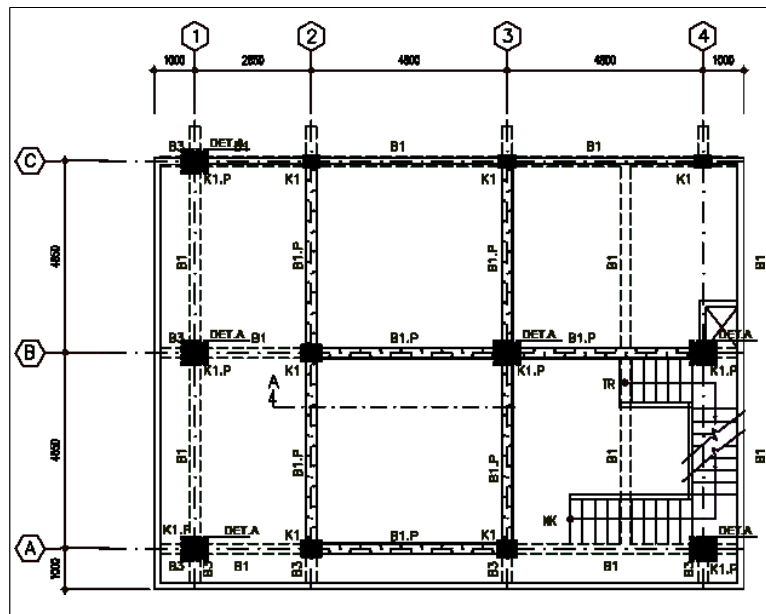
Gambar 1 Diagram Alir Penelitian

2.1 Data Bangunan

Fungsi Bangunan	: Perkantoran
Lokasi Bangunan	: Surabaya
Struktur Atap	: Dak Beton
Tinggi Bangunan	: 7 meter
Luas Bangunan	: 148.835 m ²
Jumlah Lantai	: 3 Lantai
Struktur	: Beton Bertulang
Sistem Struktur	: Sistem Rangka Pemikul Momen

Data Material	:
Mutu Beton, Kolom	: K250 = 20,7 Mpa
Mutu Beton, Balok/Plat	: K250 = 20,7 Mpa
Mutu baja tulangan lentur, f_y	: 400 Mpa
Mutu baja tulangan geser, f_y	: 400 Mpa

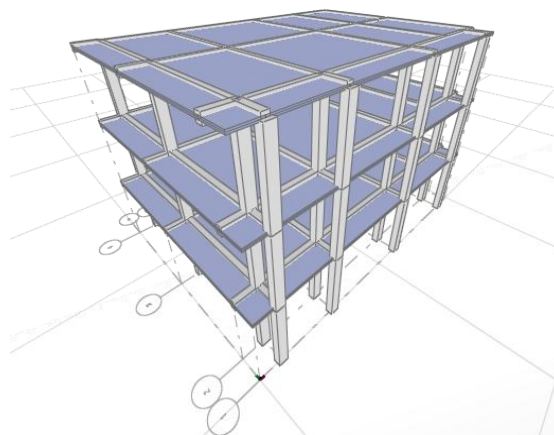
Perubahan fungsi pada gedung yang ditinjau terjadi pada lantai 2. Oleh karena itu, evaluasi struktur difokuskan pada elemen balok di lantai tersebut untuk mengetahui pengaruh perubahan fungsi terhadap kapasitas dan kinerja strukturnya. Denah gedung yang mengalami perubahan fungsi ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Denah Gedung Lantai 2

2.2 Pemodelan Struktur

Pemodelan struktur bangunan gedung, sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 3, disusun berdasarkan data eksisting yang mencakup dimensi elemen struktur, mutu material, serta konfigurasi sistem rangka. Model ini dibuat menggunakan perangkat lunak analisis struktur untuk memperoleh respons struktur terhadap beban gravitasi dan beban tambahan akibat perubahan fungsi ruang. Hasil pemodelan ini menjadi dasar dalam tahap analisis kapasitas dan perencanaan perkuatan menggunakan CFRP. Setelah proses pemodelan struktur selesai, tahap selanjutnya adalah penerapan pembebanan pada model.



Gambar 3 Pemodelan Struktur

2.3 Pembebanan

Setelah proses pemodelan struktur diselesaikan, tahap selanjutnya adalah penerapan pembebanan sesuai dengan kondisi rencana. Pembebanan tersebut kemudian dianalisis untuk memperoleh respons struktur secara menyeluruh. Berdasarkan hasil analisis, diperoleh nilai momen ultimit dan gaya geser ultimit pada setiap penampang elemen struktur. Rekapitulasi hasil perhitungan momen dan gaya geser pada balok lantai 2 disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1 Rekapitulasi pembebanan balok

Tipe Balok	As	Panjang (mm)	Beban Mati 1 (kN)	Beban Hidup 1 (kN)	Beban Mati 2 (kN)	Beban Hidup 2 (kN)
B1	A 1-2	2850	65.83	22.743	77.43	36.29
B1	A 2-3	4800	110.87	38.304	130.41	61.13
B1	B 1-2	2850	81.62	31.806	97.84	97.84
B1	B 2-3	4800	137.46	53.568	164.78	85.49
B1	C 1-2	2850	53.92	15.903	62.03	25.38
B1	C 2-3	4800	90.81	26.784	104.47	42.74
B1	1 A-B	4650	89.91	27.063	103.72	43.19
B1	2 A-B	4650	117.13	42.687	138.90	68.12
B1	3 A-B	4650	136.08	53.568	163.40	85.49
B3	A-1	1000	18.75	5.82	21.71	9.29
B3	A-2	1000	24.60	9.18	29.28	14.65
B3	A-3	1000	28.67	11.52	34.55	18.38
B3	B-1	1000	28.05	11.16	33.74	17.81

Sumber: Penelitian (2025)

2.4 Evaluasi dan Perkuatan Struktur

Tahapan evaluasi struktur dilakukan dengan membandingkan gaya dalam maksimum hasil analisis dengan kapasitas penampang elemen struktur eksisting. Apabila kapasitas penampang lebih besar dari gaya dalam maksimum, maka elemen dianggap masih aman. Sebaliknya, jika kapasitas lebih kecil, elemen memerlukan perkuatan. Nilai perbandingan antara kapasitas dan gaya dalam disebut Safety Factor, yang harus lebih besar dari 1. Evaluasi kapasitas elemen struktur mencakup kapasitas lentur dan kapasitas geser balok, sesuai ketentuan ACI 440.2R-17. Setelah dilakukan evaluasi, dilakukan perhitungan perkuatan struktur meliputi perkuatan lentur dan perkuatan geser.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Karena objek yang ditinjau dalam penelitian ini adalah elemen balok, maka analisis yang dilakukan berfokus pada evaluasi momen lentur dan gaya geser yang terjadi pada balok di ruangan lantai 2 yang mengalami alih fungsi. Setelah mendapatkan nilai momen dan geser hasil analisis, selanjutnya dilakukan perhitungan kapasitas lentur dan kapasitas geser balok berdasarkan parameter material dan dimensi penampang yang digunakan. Tahap berikutnya adalah melakukan perbandingan antara kapasitas struktur balok dengan besarnya gaya dalam yang timbul akibat beban pada kondisi ruangan yang telah dialihfungsikan. Melalui proses evaluasi tersebut, dapat ditarik kesimpulan mengenai apakah balok masih memenuhi persyaratan kekuatan atau diperlukan tindakan perkuatan untuk memastikan kinerja struktural yang aman dan sesuai standar.

3.1 Kapasitas Lentur dan Geser Balok

Setelah proses pemodelan selesai dilakukan, tahap berikutnya adalah menjalankan analisis (running) untuk mengevaluasi kinerja struktur. Hasil analisis tersebut menghasilkan nilai momen ultimit dan gaya geser ultimit pada setiap penampang elemen struktur. Rekapitulasi hasil perhitungan momen dan gaya geser pada balok lantai 2 disajikan pada Tabel 2.

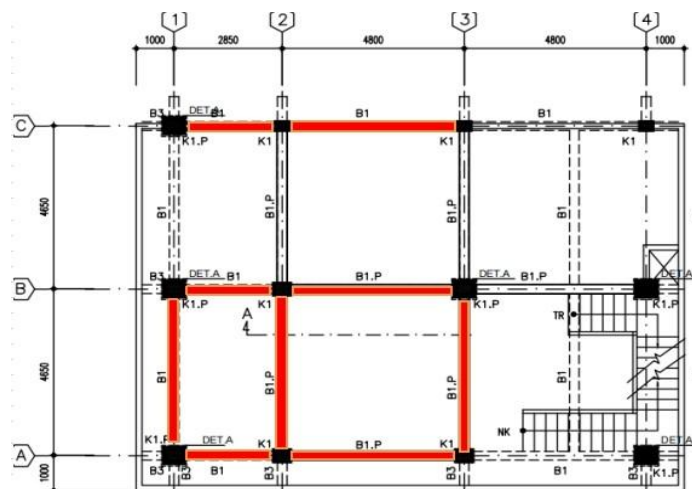
Tabel 2 Rekapitulasi Kapasitas Lentur dan Kapasitas Geser Balok

Tipe Balok	As	Panjang (mm)	Momen 1 (kN.m)	Geser 1 (kN)	Momen 2 (kN.m)	Geser 2 (kN)	ϕM_n (kN.m)	ϕV_n (kN.m)
B1	A 1-2	2850	78.10	57.69	102.20	75.49	80.54	63.46
B1	A 2-3	4800	373.12	97.17	488.24	127.15	390.72	92.58

Tipe Balok	As	Panjang (mm)	Momen 1 (kN.m)	Geser 1 (kN)	Momen 2 (kN.m)	Geser 2 (kN)	ϕM_n (kN.m)	ϕV_n (kN.m)
B1	B 1-2	2850	100.74	74.41	185.42	136.97	120.21	88.22
B1	B 2-3	4800	481.26	125.33	642.26	167.25	530.29	142.87
B1	C 1-2	2850	61.02	45.07	77.87	57.52	65.77	51.43
B1	C 2-3	4800	291.50	75.91	372.00	96.88	310.85	83.98
B1	1 A-B	4650	272.44	75.60	348.77	96.78	297.58	84.62
B1	2 A-B	4650	376.32	104.43	496.72	137.84	398.94	110.82
B1	3 A-B	4650	448.67	124.50	599.76	166.43	510.83	142.16
B3	A-1	1000	15.90	31.81	20.46	40.92	21.31	41.21
B3	A-2	1000	22.10	44.21	29.29	58.58	30.43	58.90
B3	A-3	1000	26.42	52.84	35.44	70.87	36.27	71.24
B3	B-1	1000	25.76	51.51	34.49	68.98	35.88	69.11

Sumber: Penelitian (2025)

Berdasarkan Tabel 2, dapat disimpulkan bahwa balok B1 pada rentang as A1–A2 hingga as 3A–B memerlukan tindakan perkuatan. Hal ini disebabkan karena nilai kapasitas momen nominal terfaktor (ϕM_n) lebih kecil dibandingkan momen ultimit yang bekerja (M_u), begitu pula kapasitas geser terfaktor yang lebih rendah daripada gaya geser ultimit (V_u). Dengan demikian, balok B1 tidak memenuhi persyaratan kekuatan sesuai standar desain. Sebaliknya, balok B3 masih memiliki kapasitas struktur yang mencukupi, di mana nilai ϕM_n dan ϕV_n lebih besar daripada M_u dan V_u . Oleh karena itu, balok B3 dinyatakan aman dan tidak memerlukan perkuatan. Berikut denah lokasi balok yang memerlukan perkuatan terdapat pada Gambar 4.



Gambar 4 Denah balok yang memerlukan perkuatan

3.2 Perkuatan Struktur Balok Eksisting dengan CFRP

Pada proses perkuatan balok, digunakan material FRS-CS 300 sebagai sistem perkuatan komposit. Produk ini dipilih karena memiliki karakteristik mekanis yang sesuai untuk meningkatkan kapasitas lentur maupun geser pada elemen balok. Adapun spesifikasi teknis dari FRS-CS 300 adalah sebagai berikut:

Lebar	= 250 mm (Direncanakan)
Tebal, t_f	= 0.167 mm
Luasan CFRP, A_f	= 3.6 m ²
Tensile Strength, f_{tu}	= 3400 Mpa
E modulus, E_f	= 235000 Mpa
Regangan Max, ϵ_{fu}	= 0,017

Analisis Perkuatan CFRP

Taksir jumlah CFRP

Direncanakan menggunakan CFRP lebar 250 mm sejumlah 3 lembar.

Desain kuat tarik ultimate

Desain kuat tarik ultimate CFRP (f_{fu}) direduksi akibat pengaruh lingkungan

$$\begin{aligned} f_{fu} &= C \times f_{fu} \\ &= 0.95 \times 3400 \text{ MPa} \\ &= 3230 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Desain regangan putus

Desain Regangan Putus CFRP (ϵ_{fu}) direduksi akibat pengaruh lingkungan

$$\begin{aligned} \epsilon_{fu} &= C \times \epsilon_{fu} \\ &= 0.95 \times 0.017 \\ &= 0.0162 \end{aligned}$$

Desain regangan saat pemasangan CFRP

Pada saat pemasangan CFRP sebisa mungkin beban yang ada dihilangkan. Beban yang dapat dihilangkan adalah beban hidup. Sehingga beban mati struktur dan beban mati tambahann yang berpengaruh saat pemasangan CFRP.

$$\begin{aligned} E_c &= 4700 \times \sqrt{f'_c} \\ &= 4700 \times \sqrt{21} \\ &= 21538.1 \text{ MPa} \\ d_{\text{balok}} &= H_{\text{balok}} - \text{selimut beton} - \phi - \left(\frac{1}{2} \times d\right) \\ &= 450 \text{ mm} - 40 \text{ mm} - 10 \text{ mm} - \left(\frac{13 \text{ mm}}{2}\right) \\ &= 393.5 \text{ mm} \\ C &= 0.20 \times d_{\text{balok}} \\ &= 0.20 \times 393.5 \text{ mm} \\ &= 78.70 \text{ mm} \\ I_{cr} &= \frac{1}{3} \times b \times c^3 + \left(\frac{E_s}{E_c}\right) \times A_s \times (d-c)^2 + \left(\frac{E_f}{E_c}\right) \times A_f \times (h-c)^2 \\ &= \frac{1}{3} \times 250 \text{ mm} \times (78.7 \text{ mm})^3 + \left(\frac{200000 \text{ MPa}}{21538.1 \text{ MPa}}\right) \times 2009.6 \text{ mm}^2 \times \\ &\quad (343.5 \text{ mm} - 78.7 \text{ mm})^2 + \left(\frac{235000 \text{ MPa}}{21538.1 \text{ MPa}}\right) \times 3.600.000 \text{ mm}^2 \times (450 - 78,7 \text{ mm})^2 \\ &= 5416528755712,11 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

Momen akibat beban mati (DL)

$$\begin{aligned} M_{DL} &= 642.26 \text{ kN} \\ &= 642260000 \text{ Nmm} \\ \epsilon_{bi} &= M_{DL} \times \frac{(df - k \times d)}{(I_{cr} \times E_c)} \\ &= 642260000 \times \frac{(450 - 393.5 \times 0.339)}{(5416528755712,11 \times 21538.1)} \\ &= 0.000001743003 \end{aligned}$$

Desain Regangan saat Debonding

$$\begin{aligned} \epsilon_{fd} &= 0.41 \sqrt{\frac{f'_c}{n \times E_f \times t_f}} \leq 0.90 \epsilon_{fu} \\ &= 0.41 \sqrt{\frac{21}{3 \times 235000 \times 0.167}} \leq 0.90 \epsilon_{fu} \\ &= 0.0054757 < 0.014535 \end{aligned}$$

Digunakan $\epsilon_{fd} = 0,0054757$

Regangan Effektif CFRP (ϵ_{fe})

$$\begin{aligned} C &= 0.20 \times d_{\text{balok}} \\ &= 0.20 \times 393.5 \text{ mm} \\ &= 78.70 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d_f &= h_{\text{balok}} + \frac{\text{tebal CFRP}}{2} \\ &= 450 + 0.2505 \\ &= 450.25 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{fe} &= E_{cu} \times (d_f - c) / 2 - E_{bi} \\ &= 0.003 \times \left(\frac{450.25 - 78.7}{2} \right) - 0.000001743003 \\ &= 0.557173 > 0.0054757 \end{aligned}$$

Digunakan $\epsilon_{fe} = 0.00459781$

Tegangan efektif CFRP (f_{fe})

$$\begin{aligned} f_{fe} &= E_f \times \epsilon_{fe} \\ &= 235000 \times 0.00459781 \\ &= 1080.48 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Garis Netral Balok Setelah Ditambah CFRP akibat dari penambahan CFRP pada balok, menyebabkan terjadinya perubahan garis netral pada balok, sehingga kesetimbangan berubah menjadi :

$$C_c + C_{s'} = T_s + T_f$$

$$\text{Tulangan tarik} = 5D16$$

$$A_s \text{ Pasang} = 2009.6 \text{ mm}^2$$

$$\text{Tulangan tekan} = 5D16$$

$$A_{s'} \text{ pasang} = 2009.6 \text{ mm}^2$$

$$k_1 \cdot c_2 + k_2 \cdot c - k_3 = 0$$

dimana :

$$\begin{aligned} K_1 &= 0.85 \times f'_c \times b \times \beta_1 \\ &= 0.85 \times 21 \text{ N/mm}^2 \times 250 \text{ mm} \times 0.85 \\ &= 3793.123 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K_2 &= (600 \times A_{s'}) - (0.85 \times f'_c \times A_{s'}) - (A_s \times f_y) - (A_f \times f_{fe}) \\ &= (600 \times 2009.6 \text{ mm}^2) - (0.85 \times 21 \text{ N/mm}^2 \times 2009.6 \text{ mm}^2) - (2009.6 \text{ mm}^2 \times 400 \text{ N/mm}^2) - \\ &\quad (3600000 \text{ mm}^2 \times 1080.48 \text{ N/mm}^2) \\ &= 327168.64 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K_3 &= 600 \times A_{s'} \times d \\ &= 600 \times 2009.6 \text{ mm}^2 \times 393.5 \text{ mm} \\ &= 474466560 \end{aligned}$$

$$C = \frac{-K_2 \pm \sqrt{K_2^2 - K_1 \cdot K_3}}{2K_1}$$

$$C = 399.42 \text{ mm}$$

$$C = -313.116 \text{ mm}$$

Ambil nilai yang terbesar sehingga dipakai $c = 399.42 \text{ mm}$

Tinggi Balok Ekvivalen Setelah ditambah CFRP

$$\begin{aligned} a &= \beta_1 \times c \\ &= 0.85 \times 399.42 \text{ mm} \\ &= 339.5 \text{ mm} \end{aligned}$$

Cek kelelahan tulangan tekan

$$\begin{aligned} f &= \left(1 - \frac{d'}{d}\right) \times 600 \\ &= \left(1 - \frac{56.5}{393.5}\right) \times 600 \\ &= 513.85 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$f_y = 400 \text{ MPa}$$

$f_s' > f_y$, maka $f_s' = f_y = 400$ MPa

Cek rengangan Tarik

$$\begin{aligned}\varepsilon_s &= 0.003 \times \left(\frac{d-c}{c}\right) \\ &= 0.003 \times \left(\frac{393,5-399,42}{399,42}\right) \\ &= 0.00445\end{aligned}$$

$\varepsilon_s < 0.005$

Dipakai $\phi = 1$

Kapasitas momen pada daerah lapangan

$$\begin{aligned}M_{n1} &= A_s \times f_y \times \left(d - \frac{a}{2}\right) \\ &= 2009.6 \times 400 \times \left(393.5 - \frac{339.5}{2}\right) \\ &= 247159200 \text{ Nmm} \\ M_{n2} &= A_s \times (f_s - 0.85 f_c) \times (d - d') \\ &= 2009.6 \times (400 - 0.85 \times 21) \times (393.5 - 56.5) \\ &= 316335432 \text{ Nmm} \\ M_{n3} &= \Psi \times A_f \times f_{fe} \times \left(d_f - \frac{a}{2}\right) \\ &= 0.85 \times 3600 \times 1080.48 \times \left(450.25 - \frac{339.5}{2}\right) \\ &= 203408398 \text{ Nmm} \\ \phi M_n &= \phi (M_{n1} + M_{n2} + M_{n3}) \\ &= 1 (247159200 + 316335432 + 203408398) \\ &= 766073030 \text{ Nmm} \\ &= 766 \text{ kNm}\end{aligned}$$

Kontrol

$\phi M_n > M_u$

766 kNm > 642.26 kNm OK

Berdasarkan hasil analisis perhitungan, dilakukan evaluasi terhadap setiap balok yang memerlukan perkuatan. Rekapitulasi kebutuhan jumlah lapisan perkuatan CFRP pada balok-balok tersebut disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Rekapitulasi Kapasitas Lentur dan Kapasitas Geser Balok

Tipe Balok	As	Panjang g (mm)	Jumlah CFRP (layer)	ϕM_n (kN.m)	M_u (kN.m)	ϕM_n (kN.m) Setelah perkuatan	%
B1	A 1-2	2850	1	80.54	102.20	159.11	98%
B1	A 2-3	4800	3	390.72	488.24	535.38	37%
B1	B 1-2	2850	1	120.21	185.42	210.42	75%
B1	B 2-3	4800	3	530.29	642.26	766.00	44%
B1	C 1-2	2850	1	65.77	77.87	127.33	94%
B1	C 2-3	4800	2	310.85	372.00	410.21	32%
B1	1 A-B	4650	2	297.58	348.77	398.78	34%
B1	2 A-B	4650	3	398.94	496.72	532.64	34%
B1	3 A-B	4650	2	510.83	599.76	620.00	21%

Sumber: Penelitian (2025)

Tabel hasil analisis menunjukkan bahwa perkuatan balok menggunakan CFRP secara konsisten meningkatkan kapasitas momen lentur pada seluruh balok, dengan efektivitas yang berbeda pada setiap kondisi. Balok dengan bentang lebih pendek (2850 mm) menunjukkan peningkatan terbesar, mencapai 70–98% meskipun hanya menggunakan satu layer CFRP, karena kebutuhan

momen awal yang lebih rendah. Sebaliknya, balok dengan bentang lebih panjang (4800–4650 mm) tetap mengalami peningkatan kapasitas namun dengan persentase lebih kecil, yaitu antara 21–44%, meskipun jumlah layer yang digunakan lebih banyak. Hal ini menunjukkan bahwa semakin panjang bentang dan semakin besar kebutuhan momen, efektivitas relatif CFRP cenderung menurun, namun tetap memberikan kontribusi yang signifikan terhadap peningkatan kekuatan balok.

3.3 Sketsa Pemasangan CFRP pada Balok

Berdasarkan hasil analisis perkuatan menggunakan CFRP, diperoleh bahwa perkuatan diperlukan pada seluruh bentang balok. Mengacu pada kebutuhan jumlah lapisan (layer) CFRP, dilakukan pengelompokan ke dalam tiga kategori perkuatan, yaitu:

Case A : kebutuhan perkuatan dengan 1 layer CFRP.

Case B : kebutuhan perkuatan dengan 2 layer CFRP.

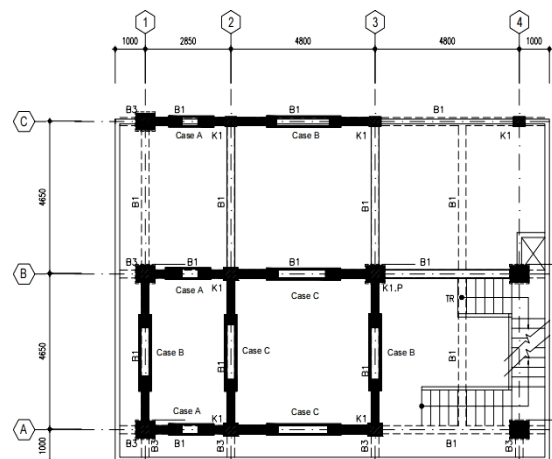
Case C : kebutuhan perkuatan dengan 3 layer CFRP.

Tabel 4 menyajikan rekapitulasi kebutuhan perkuatan CFRP pada masing-masing balok sesuai kategori tersebut. Denah sketsa pemasangan CFRP pada area tumpuan dan lapangan balok ditunjukkan pada Gambar 5 berikut.

Tabel 4 Rekapitulasi perkuatan CFRP

Case	Tipe Balok	As	Panjang (mm)	Jumlah CFRP (layer)
Case A	B1	A 1-2	2850	1
Case C	B1	A 2-3	4800	3
Case A	B1	B 1-2	2850	1
Case C	B1	B 2-3	4800	3
Case A	B1	C 1-2	2850	1
Case B	B1	C 2-3	4800	2
Case B	B1	1 A-B	4650	2
Case C	B1	2 A-B	4650	3
Case B	B1	3 A-B	4650	2

Sumber: Penelitian (2025)



Gambar 5 Denah Pemasangan Perkuatan CFRP

4. KESIMPULAN

Dari hasil pemeriksaan di lapangan serta analisa yang telah dilakukan, didapat beberapa hal yang bisa disimpulkan antara lain yaitu penambahan beban dan perubahan fungsi pada gedung Bank menyebabkan

beberapa komponen balok memerlukan adanya perkuatan diantaranya balok B1 pada As B2-3 yang menerima Momen Ultimate sebesar 642.26 kN.m sedangkan kapasitas struktur existingnya (ϕM_n) sebesar 530.29 kN.m. Geser ultimate yang terjadi sebesar 167.25 kN dan kapasitas geser existingnya sebesar 142.87 kN. Dengan penambahan material CFRP kapasitas momen balok existing menjadi 766 kN.m, atau terjadi peningkatan sebesar 235 kNm. Prosentase perkuatan dengan adanya penambahan CFRP adalah 44 %, dan kapasitas geser setelah perkuatan menjadi 176 kN atau terjadi peningkatan sebesar 33.56 kN. Dari hasil analisa terdapat beberapa komponen balok yang memerlukan perkuatan, kebutuhan perkuatan terbesar terdapat pada balok B1 As B2-3 yaitu dengan penambahan CFRP sebanyak 3 Layer, dan penambahan CFRP paling sedikit terdapat pada balok B1 As A1-2 yaitu sebanyak 1 Layer.

DAFTAR PUSTAKA

- Achmad, K., Soehardjono, A., & Tavo. (2012). Penggunaan carbon fiber-reinforced polymer sebagai perkuatan kolom beton bertulang akibat beban siklik untuk meningkatkan daktilitas perpindahan struktur. *TEKNOLOGI DAN KEJURUAN*, 35(2), 183–190.
- Alabdulhady, M. Y., Ojaimi, M. F., & Chkheiw, A. H. (2022). The efficiency of CFRP strengthening and repair system on the flexural behavior of RC beams constructed with different concrete compressive strength. *Results in Engineering*, 16, 100763.
- Alsuhaibani, E. (2024). Optimization of carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) configuration for enhanced flexural performance in strengthened concrete beams. *Buildings*, 14(1), 1–19.
- Andreasnata, I. W. M., Sinarta, I. N., & Armaeni, N. K. (2022). Column structure strengthening with FRP (Fiber Reinforced Polymer) due to story addition. *Journal of Infrastructure Planning and Engineering (JIPE)*, 1(1), 38–45.
- Aulia, F., & Walujodjati, E. (2021). Pengaruh perkuatan beton menggunakan CFRP terhadap kuat tekan. *Jurnal Konstruksi*, 19(1), 128-136.
- Harahap, S., Putri, P. Y., Putra, R. R., & Andayono, T. (2024). Perkuatan struktur beton dengan metode FRP pada bangunan gedung. *INNOVATIVE: Journal Of Social Science Research*, 4, 9200–9214.
- Hartono. (2012). Structural strengthening using carbon fiber reinforced polymer. *Civil Engineering Dimension*, 14(3), 205–208. <https://doi.org/10.9744/CED.14.3.205-208>
- Hasan, M., Mahlil, & Mubarak, A. (2020). Desain perkuatan struktur bangunan gedung akibat perubahan fungsi dan umur bangunan menggunakan CFRP sheet. *Jurnal Teknik Sipil Universitas Syiah Kuala*, 9(1), 28–38.
- Hosen, A., et al. (2024). Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) for structural capacity enhancement of RC beams incorporating innovative side hybrid (SH) technique. *MDPI: Buildings*, 12, 1-19.
- Jamal, A. U., Bale, H. A., & Haqiqi, I. (2015). Perilaku lentur perbaikan balok beton bertulang dengan variasi lebar carbon fibre reinforced polymer. *Jurnal Teknisia*, 20(2), 154–162.

- Jamal, A. U., Rahmayanti, N., Bale, H. A., & Haqiqi, I. (2016). Pengaruh variasi lebar CFRP pada bagian tarik terhadap daktilitas kurvatur balok beton bertulang paska perbaikan. *Jurnal Teknisia*, 201–208.
- Keshava, B., & Wijaya, U. (2023). Studi mechanical properties material carbon fiber reinforced polymer produk lokal. *Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 6(3), 659–668.
- Noorhidana, V. A., & Purwanto, E. (2012). Daktilitas kolom yang diperkuat dengan CFRP. *Jurnal Teknik Sipil UBL*, 3(2), 367–377.
- Rozak, H. A. (2022). Evaluasi perkuatan struktur menggunakan carbon fiber reinforced polymer (CFRP) pada struktur beton bertulang proyek transformasi Gedung Sarinah Thamrin, Jakarta Pusat. *Jurnal Ismetek*, (2), 75–80.
- Sandjaya, A., et al. (2024). Analisis exterior beam-column joint beton bertulang dengan perkuatan CFRP menggunakan MIDAS FEA. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 7(3), 931-936.
- Saputra, R. B., & Ahyar, M. R. (2023). Sistem perkuatan struktur menggunakan carbon fiber reinforced polymer. *JURNAL ILMIAH SULTAN AGUNG*, 2(1), 850-863.
- Sari, D., Natalia, M., & Atmaja, J. (2022). Carbon fiber reinforced polymer sebagai bahan retrofit struktur rumah tinggal. *Jurnal ABDIMAS: Pengabdian dan Pengembangan Masyarakat*, 4(2), 92–96.
- Sumargo, Ruslan, U., & Ghulam, M. (2014). Kapasitas penggunaan carbon fiber reinforced polymer (CFRP) berlapis banyak terhadap perkuatan lentur struktur balok beton bertulang. *IRWNS*, 2, 126-133.
- Tavio, Purwono, R., & Rosyidah, A. (2009). Peningkatan daya dukung dan daktilitas balok beton bertulang dengan menggunakan perkuatan CFRP. *Dinamika Teknik Sipil*, 9(1), 9–18.
- Utami, S. R. L. (2019). Pengaruh carbon fiber reinforced polymer (CFRP) terhadap balok beton bertulang. *INERSIA*, 15(1), 23–42.
- Utami, S. R. L., & Sutantiningrum, K. H. (2019). Analisis perhitungan geser balok normal dengan geser balok perlakuan carbon fiber reinforced polymer (CFRP) terhadap balok beton bertulang. *Jurnal Kajian Teknik Sipil*, 4(1), 35–47.
- Wei, A., Al-Ameri, R., Koay, Y. C., & Tan, M. Y. J. (2021). Triple-functional carbon fibre reinforced polymer for strengthening and protecting reinforced concrete structures. *Composite Communications*, 24, 100648.
- Zega, A. (2020). Pemodelan dan analisis reinforced concrete kolom persegi panjang dengan komposit carbon fiber reinforced polymer. *Media Teknik Sipil*, 18(1), 17–24.