

Penilaian Kinerja Struktural dan Penguatan CFRP pada Pelat yang Mengalami Degradasi

Yudha Andika Pratama¹, Renita Husna^{*2}

^{1,*2}Program Studi Teknik Sipil, Universitas Cahaya Surya, Kediri, Indonesia
Email: ¹yudha.andika26.ya@gmail.com, ^{*2}renitahusna@gmail.com,

Abstrak—Penelitian ini dilakukan untuk mengkaji degradasi mutu beton pada elemen pelat lantai gedung *book store* serta merumuskan strategi perkuatan yang efektif guna memulihkan kapasitas dan kinerja struktur. Tahapan penelitian meliputi evaluasi mutu beton eksisting, analisis kapasitas lentur pelat terhadap momen desain, identifikasi defisit kapasitas struktur, serta perencanaan perkuatan menggunakan metode Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) berdasarkan ACI 440.2R-17. Hasil investigasi menunjukkan bahwa kuat tekan beton aktual hanya mencapai 17,1 MPa berdasarkan *hammer test* dan 16,7 MPa berdasarkan *core drill*, atau sekitar 67–68% dari mutu rencana, sehingga tidak memenuhi batas minimum yang dipersyaratkan dalam PBI 1971. Penurunan mutu beton tersebut berdampak langsung terhadap kapasitas lentur struktur, dimana kapasitas momen eksisting sebesar 20,40 kNm/m masih lebih rendah dibandingkan kebutuhan momen rencana sebesar 30,50 kNm/m, sehingga terjadi defisit kapasitas sekitar 33%. Kondisi ini mengindikasikan bahwa pelat lantai tidak lagi memenuhi kriteria keamanan terhadap pembebanan rencana. Analisis perkuatan menunjukkan bahwa penggunaan satu lapis CFRP belum mampu memberikan peningkatan kapasitas lentur yang memadai akibat keterbatasan regangan efektif dan potensi kegagalan *debonding*. Sebaliknya, konfigurasi dua lapis CFRP terbukti mampu meningkatkan kapasitas lentur secara signifikan tanpa menambah dimensi penampang serta memenuhi persyaratan keamanan, kekakuan, dan keandalan untuk menjamin keberlanjutan fungsi bangunan secara aman.

Kata Kunci—Mutu Beton, Pelat Lantai, CFRP, Kapasitas Lentur, Perkuatan.

I. PENDAHULUAN

PENGEMBANGAN fasilitas akademik pada kawasan kampus terpadu diarahkan untuk meningkatkan kualitas layanan pendidikan, termasuk pembangunan gedung *book store* sebagai pusat penyediaan literatur. Struktur dirancang menggunakan beton bertulang dengan mutu rencana $f'c$ 25 MPa guna memenuhi persyaratan kekuatan dan fungsi bangunan, maka kuat tekan beton menjadi parameter utama dalam menentukan kapasitas dan kekakuan elemen struktur. Hasil evaluasi lapangan menunjukkan bahwa kuat tekan beton aktual lebih rendah dari nilai desain berdasarkan pengujian *hammer test* dan verifikasi laboratorium. Kondisi ini berdampak pada penurunan kapasitas lentur pelat lantai,

peningkatan risiko retak, serta potensi lendutan berlebih. Berdasarkan [1], Apabila kapasitas struktur lebih kecil dari beban terfaktor sesuai dalam [2], maka elemen tidak lagi memenuhi kriteria kekuatan (*strength*), keselamatan (*safety*), kenyamanan (*serviceability*), dan umur rencana bangunan (*durability*).

Meskipun studi sebelumnya telah membahas evaluasi mutu beton dan metode perkuatan, integrasi antara data pengujian lapangan dengan analisis kapasitas struktural secara kuantitatif masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan pendekatan terintegrasi untuk menilai tingkat keamanan pelat lantai berdasarkan mutu beton aktual serta merumuskan kebutuhan perkuatan secara rasional. Pendekatan ini diharapkan dapat memberikan dasar teknis yang lebih akurat dalam pengambilan keputusan perbaikan struktur.

II. METODOLOGI

A. Pengumpulan Data Penelitian

1) Data Primer

Data primer dalam penelitian ini adalah dengan cara wawancara oleh pihak yang terkait dalam proyek pembangunan Gedung *Book Store* dan Badan Pengelola Aset (BPA) Universitas Islam Indonesia. Dari hasil wawancara berbagai sumber/instalasi terkait didapatkan data-data sebagai berikut:

TABLE I
DATA PERENCANAAN PROYEK *BOOK STORE*

No.	Data Proyek	Keterangan
1	Nama Proyek	Pembangunan <i>Book Store</i> UII
2	Pemilik Proyek	Universitas Islam Indonesia
3	Mutu Beton	$f'c = 25$ MPa
4	Hasil Lab	Hasil Pengujian Beton, <i>Hammer Test</i> , dan <i>Core Drill</i>
5	Tulangan	$f_y = 400$ MPa, untuk Tulangan Ulir, $f_y = 240$ MPa, untuk Tulangan Polos

2) Data Sekunder

Data sekunder yang diperoleh adalah dokumentasi kerusakan yang berupa keretakan-keretakan pada struktur balok, pelat lantai, dan data-data *master-plan* gedung yang mencakup denah dan detail penulangan struktur bangunan, serta dokumen *as built drawing* di Gedung *Book Store* Universitas Islam Indonesia.

B. Tahapan Analisis

Tahapan analisis dilakukan sebagai berikut:

- 1) Menghitung kapasitas lentur awal tanpa perkuatan
Tahap awal dilakukan dengan menghitung kapasitas lentur eksisting pelat beton bertulang sebelum diberi CFRP:

- a) Menentukan Data Penampang
Parameter yang digunakan menyesuaikan data perkuatan struktur pelat.
- b) Menentukan Kedalaman Pelat Tekan Beton
Kedalaman pelat tekan dihitung menggunakan keseimbangan gaya:

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f'_c b} \quad (1)$$

- c) Menghitung Kapasitas Momen Eksisting
Momen nominal tanpa perkuatan:

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

- d) Menghitung Momen Rencana

$$M_{Ren} = \left(\frac{f'_c actual}{f'_c design} \right) M_n \quad (3)$$

- 2) Mengevaluasi kebutuhan momen terhadap momen rencana
Kekurangan momen (ΔM)

$$\Delta M = M_{target} - M_n \quad (4)$$

- 3) Menambahkan CFRP secara bertahap (1 layer, 2 layer)
Perkuatan dilakukan secara bertahap untuk mengetahui pengaruh jumlah lapisan CFRP terhadap kapasitas lentur.

- a) Menentukan Properti Material CFRP
Parameter yang digunakan menyesuaikan spesifikasi jenis material CFRP yang akan digunakan.
- b) Menentukan Luas CFRP
Luas CFRP (A_f)

$$A_f = B_f \times T_f \quad (5)$$

- c) Menentukan Regangan Efektif CFRP
Menurut ACI 440.2R-17, regangan efektif CFRP dibatasi oleh regangan *debonding*:

$$\varepsilon_{fe} \approx 0.004, ACI440 \quad (6)$$

- d) Menentukan Tegangan Efektif CFRP
Tegangan CFRP:

$$f_{fe} = E_f \times \varepsilon_{fe} \quad (7)$$

- 4) Menghitung kontribusi CFRP terhadap kapasitas lentur
Kontribusi CFRP dihitung berdasarkan gaya tarik tambahan yang bekerja.

- a) Menghitung Gaya Tarik CFRP

$$T_f = A_f \times f_{fe} \quad (8)$$

- b) Menentukan Keseimbangan Gaya Internal
Gaya tekan beton harus seimbang dengan gaya tarik baja dan CFRP:

$$D_f = h - \frac{t_f}{2} \quad (9)$$

- c) Menghitung Kontribusi Momen dengan CFRP

$$M_f = A_f \times f_{fe} \times \left(d_f - \frac{a}{2} \right) \quad (10)$$

- d) Menghitung Kapasitas Momen dan jumlah CFRP
Kapasitas momen total

$$M_{total} = M_n + M_f \quad (11)$$

- 5) Menentukan jumlah layer CFRP optimum
Jumlah CFRP

$$n = \frac{\Delta M}{M_f} \quad (12)$$

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Faktor Penyebab Kerusakan Bangunan Gedung

Kerusakan bangunan merupakan fenomena inheren yang berkembang sepanjang siklus hidup struktur akibat interaksi kompleks antara faktor desain, kualitas material, pelaksanaan konstruksi, dan pengaruh lingkungan termasuk bencana alam seperti gempa bumi atau banjir [3]. Studi terdahulu menunjukkan bahwa degradasi kinerja struktur tidak hanya dipengaruhi oleh usia layanan, tetapi juga oleh variabilitas kondisi tanah, beban lingkungan, serta ketidaksesuaian antara asumsi desain dan kondisi aktual di lapangan Pribadi. Dalam konteks ini, inspeksi dan evaluasi teknis menjadi instrumen penting untuk mengidentifikasi deviasi kinerja serta memastikan bahwa struktur tetap memenuhi kriteria keselamatan dan kinerja layanan sesuai standar yang berlaku.

Di antara berbagai faktor penyebab, kegagalan material pada tahap pelaksanaan konstruksi merupakan salah satu determinan utama yang secara langsung mempengaruhi performa struktural. Ketidaktepatan proporsi campuran, kualitas agregat yang tidak memenuhi spesifikasi, serta prosedur pengecoran dan curing yang tidak terkontrol dapat menghasilkan beton dengan kuat tekan rendah dan mikrostruktur yang tidak homogen. Kondisi ini meningkatkan porositas, mempercepat penetrasi zat agresif, serta memicu korosi tulangan, yang pada akhirnya menyebabkan retak, *spalling*, dan degradasi progresif elemen struktur [4]. Kerusakan yang terakumulasi ini berpotensi menurunkan kapasitas beban secara signifikan dan meningkatkan kerentanan terhadap beban ekstrem, termasuk beban seismik [5].

Lebih lanjut, kualitas pelaksanaan yang tidak konsisten, keterbatasan kompetensi tenaga kerja, serta lemahnya implementasi *quality control* dan *quality assurance* memperbesar kemungkinan terjadinya cacat konstruksi. Faktor eksternal selama pelaksanaan, seperti fluktuasi suhu dan paparan lingkungan, turut memengaruhi proses hidrasi dan pembentukan kekuatan beton. Pengujian berkala dilakukan untuk memantau mutu beton dan memastikan

kesesuaian desain campuran [6]. Selain itu, perubahan fungsi atau konfigurasi bangunan tanpa evaluasi struktural yang memadai dapat mengubah distribusi beban secara signifikan, sehingga mempercepat penurunan kinerja dan mengurangi margin keamanan struktur.

Meskipun berbagai penelitian telah mengkaji penyebab kerusakan dan metode perkuatan, sebagian besar masih terfokus pada pendekatan eksperimental atau simulatif yang belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi actual dan kinerja bangunan beton bertulang [7]. Integrasi antara data pengujian *in-situ* dengan analisis kapasitas struktural berbasis kondisi nyata masih relatif terbatas, khususnya dalam mengkuantifikasi hubungan antara penurunan mutu material dan defisit kapasitas elemen struktur. Kesenjangan ini menjadi krusial, mengingat keputusan perbaikan atau perkuatan sangat bergantung pada akurasi evaluasi kondisi eksisting.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini mengusulkan pendekatan evaluasi terintegrasi yang mengombinasikan hasil pengujian lapangan dengan analisis kapasitas lentur untuk menilai tingkat keamanan pelat lantai secara kuantitatif. Kebaruan penelitian ini terletak pada formulasi hubungan langsung antara mutu beton aktual, defisit kapasitas struktural, serta kebutuhan perkuatan berbasis kondisi eksisting. Pendekatan ini diharapkan tidak hanya memberikan pemahaman yang lebih representatif terhadap perilaku struktur aktual, tetapi juga menghasilkan rekomendasi teknis yang aplikatif dalam pemulihan kinerja struktur, khususnya melalui penerapan metode perkuatan yang efisien dan minim intervensi terhadap dimensi penampang.

B. Identifikasi Mutu Beton Dari Laboratorium

Kuat tekan beton merupakan parameter utama yang merepresentasikan kapasitas material dalam menahan tegangan tekan hingga kondisi runtuh. Penurunan nilai ini mengindikasikan bahwa kapasitas aktual tidak lagi memenuhi mutu rencana, yang dapat diidentifikasi melalui indikasi visual, hasil pengujian, serta perubahan respons struktural [8]. Evaluasi mutu beton *in-situ* umumnya diawali dengan *hammer test* sebagai indikator kekerasan permukaan, namun metode ini tidak sepenuhnya merepresentasikan kuat tekan aktual sehingga tidak dapat dijadikan satu-satunya acuan [9]. Oleh karena itu, diperlukan pengujian destruktif melalui *core drill* untuk memperoleh nilai kuat tekan yang lebih representatif. Metode *core drill* sangat efektif diterapkan pada area kritis struktur, seperti kolom, balok, dan pelat, terutama pada lokasi yang dicurigai mengalami penurunan kualitas akibat faktor pelaksanaan, usia, maupun paparan lingkungan [10]. Hasil uji tekan inti kemudian dianalisis dan divalidasi, termasuk melalui identifikasi *outlier* berdasarkan ASTM E178-16, guna memastikan reliabilitas data [11]. Kombinasi pendekatan ini memungkinkan evaluasi mutu beton eksisting dilakukan secara lebih akurat dan komprehensif. Adapun hasil pengujian yang telah dilakukan di laboratorium disajikan pada Tabel II.

TABLE II
HASIL PENGUJIAN MUTU BETON (SUMBER: BPA UII, 2015)

No.	Sampel	Umur Sampel (hari)	Kuat Tekan Beton Rata-rata (MPa)
1	Mutu rencana (f'_c)	28	25,0
2	Hasil lab uji silinder Pelat Lantai 1 (f'_c)	35	20,5
3	Hasil lab uji silinder Pelat Lantai 2 (f'_c)	35	20,6
4	<i>Hammer test</i> Pelat Lantai 1 (f'_c)	60	17,1
5	<i>Hammer test</i> Pelat Lantai 2 (f'_c)	60	14,0
6	<i>Core drill</i> Pelat Lantai 1 (f'_c)	60	16,7
7	<i>Core drill</i> Pelat Lantai 2 (f'_c)	60	16,7

C. Analisis Mutu Beton Pada Pelat Lantai

Berdasarkan hasil kajian [2] dan [12], maka ditetapkan kategori tingkat kekritisitas mutu beton yang akan digunakan untuk identifikasi mutu beton berdasarkan pengujian kekuatan tekan beton (f'_c). Kuat tekan beton menentukan kualitas suatu struktur, Semakin tinggi kekuatan struktur yang diinginkan, maka semakin tinggi pula mutu beton yang dihasilkan [13]. Karakteristik dan Kategori Tingkat Kekritisitas Mutu Beton dapat dilihat dibawah ini:

TABLE III
KARAKTERISTIK DAN KATEGORI TINGKAT KEKRITISITAS MUTU BETON (PBI-1971)

Indeks Kondisi	Deskripsi	Kriteria dan Tindakan	Rentang
1	Memenuhi	Tidak ada kerusakan. Tidak perlu tindakan, tetapi perlu dilakukan pemeliharaan rutin.	$f'_c \geq 100\%$
2	Kritis	Terdapat kerusakan tingkat ringan. Perlu tindakan perbaikan dalam lingkup pemeliharaan rutin.	$80\% \leq f'_c < 100\%$
3	Sangat Kritis	Terdapat kerusakan tingkat sedang. Perlu segera dilakukan tindakan pengujian lebih lanjut.	$f'_c < 80\%$

Berdasarkan hasil kajian pada [12], analisis telah dilakukan seperti yang disajikan pada Tabel IV. Mengacu pada Tabel IV, apabila dibandingkan dengan persyaratan dalam PBI 1971, yang mensyaratkan kuat tekan beton minimal sebesar 80% dari mutu rencana, maka seluruh hasil pengujian baik *hammer test* maupun *core drill* pada kedua pelat dinyatakan tidak memenuhi syarat (tidak lolos). Hal ini menunjukkan bahwa mutu beton eksisting di lapangan belum mencapai standar minimum yang dipersyaratkan untuk menjamin keamanan struktur. Beberapa faktor yang dapat menyebabkan rendahnya mutu beton tersebut antara lain:

TABLE IV
HASIL ANALISIS MUTU BETON BERDASARKAN PERATURAN PBI

Parameter	Mutu Rencana (f'_c)	Hammer Test (f'_c)	Core Drill (f'_c)	Perbandingan Hammer-Core (%)	Evaluasi PBI 80%
Pelat Lantai 1	25	17,1	16,7	68,3	Tidak lolos
Pelat Lantai 2	25	14,0	16,7	67,0	Tidak lolos

- 1) Kualitas material yang tidak sesuai standar, seperti agregat, semen, atau air yang digunakan.
- 2) Kesalahan dalam perencanaan campuran beton (*mix design*) sehingga tidak mencapai kuat tekan yang ditargetkan.
- 3) Pelaksanaan pengecoran yang kurang baik, seperti proses pemadatan (vibrasi) yang tidak optimal.
- 4) Proses *curing* (perawatan beton) yang tidak memadai, sehingga hidrasi semen tidak berlangsung sempurna.
- 5) Variasi kualitas pelaksanaan di lapangan, termasuk kemungkinan segregasi atau *honeycomb* pada beton.

D. Analisis Metode Perbaikan Akibat Penurunan Mutu Beton

Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) merupakan material komposit berbasis serat karbon dengan kandungan karbon tinggi (>90%) yang dikenal memiliki kuat tarik tinggi dan berat jenis rendah [14]. Dalam aplikasi perkuatan struktur, CFRP terbukti efektif meningkatkan kapasitas lentur sekaligus menghambat perkembangan retak pada zona tarik elemen beton bertulang [15]. Dibandingkan metode konvensional, pemilihan CFRP didasarkan pada efisiensi pelaksanaan, kemudahan aplikasi, serta kesesuaiannya dengan kondisi struktur eksisting [16].

Sebagai bagian dari teknologi Fiber Reinforced Polymer (FRP), CFRP menawarkan keunggulan berupa kekuatan tinggi, ringan, tahan korosi, serta memiliki durabilitas yang baik [17]. Pemasangan pada sisi bawah pelat (*soft-fit*) memungkinkan material ini bekerja optimal dalam menahan gaya tarik dan meningkatkan kapasitas momen lentur, sekaligus meningkatkan kekakuan dan mengurangi lendutan. Metode ini termasuk *externally bonded reinforcement* yang tidak memerlukan pembongkaran besar, sehingga tidak menambah dimensi penampang maupun beban struktur secara signifikan [18].

Dengan mempertimbangkan efektivitas terhadap peningkatan kapasitas lentur, kemudahan konstruksi, serta ketahanan jangka panjang, CFRP dipandang sebagai solusi perkuatan yang efisien untuk mengatasi penurunan mutu beton pada struktur eksisting. Perencanaan kebutuhan perkuatan selanjutnya mengacu pada pedoman [19]

guna memastikan peningkatan kapasitas yang memenuhi kriteria keamanan sehingga diperlukannya analisis dengan variasi tebal dan lebar yang lebih bervariasi agar mendapatkan hasil yang lebih baik [20]. Adapun hasil analisis kebutuhan CFRP sebagai berikut:

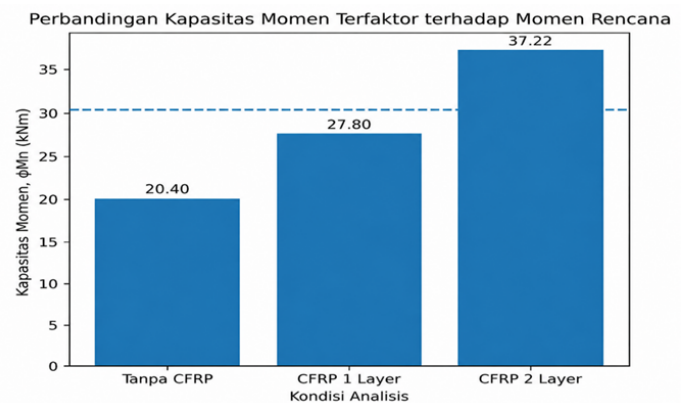
TABLE V
DATA STRUKTUR PELAT LANTAI

No.	Langkah Analisis	Hasil Analisis	Satuan
1	Area Analisis	Pelat Lantai A1	-
2	Mutu Aktual (f'_c)	16,7	MPa
3	Mutu Rencana (f'_c)	25	MPa
4	Tebal Pelat (h)	130	mm
5	Selimit Beton	20	mm
6	Kuat Leleh Tulangan (f_y)	400	MPa
7	Bentangan Pelat (L)	4055	mm
8	Diameter Tulangan	10	mm
9	Jarak Tulangan	150	mm

TABLE VI
SPESIFIKASI MATERIAL SHANGHAI HORSE HM-30 CFRP

No.	Spesifikasi Material	Carbon FRP (CFRP)	Satuan
1	Tebal Bahan (T_f)	0,167	mm
2	Lebar Bahan (B_f)	500	mm
3	Kuat Tarik (f_{fu})	5800	MPa
4	Modulus Elastisitas (E_f)	255530	MPa

Setelah dilakukan perhitungan kapasitas momen penampang, langkah selanjutnya adalah melakukan koreksi dan verifikasi hasil analisis untuk memastikan bahwa perhitungan yang diperoleh sudah layak, konsisten, dan memenuhi ketentuan perencanaan.



Gambar 1. Grafik Perbandingan Kapasitas Momen Terhadap Jumlah Penggunaan CFRP

Hasil analisis menunjukkan bahwa kapasitas lentur penampang eksisting belum memenuhi momen rencana ($\phi M_n = 27,80 \text{ kNm} < M_{target} = 30,50 \text{ kNm}$), sehingga diperlukan perkuatan sesuai ketentuan ACI 318 dan SNI 2847. Penambahan 1 *layer* CFRP tidak memberikan peningkatan yang berarti, yang mengindikasikan bahwa kontribusi FRP masih dibatasi oleh regangan efektif dan

TABLE VII
ANALISIS KEBUTUHAN CFRP

No.	Parameter	Persamaan	Nilai	Satuan
1	Rasio kekurangan mutu beton	$\left(f'_{c\text{actual}}/f'_{c\text{design}}\right) \times 100\%$	33,0	%
2	Luas tulangan tarik (A_s)	$A_s = \frac{\pi}{4} \times d^2 \times \left(\frac{1000}{s}\right)$	523,3	mm ² /m
3	Kedalaman efektif (d)	$d = h - \text{selimut} - \frac{1}{2} \text{ diameter}$	105,0	mm
4	Kedalaman pelat tekan (a)	$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f'_c b}$	14,7	mm
5	Kapasitas momen eksisting (M_n)	$M_n = A_s f_y \left(d - \frac{a}{2}\right)$	20,4	kNm/m
6	Kapasitas momen rencana	$M_{R_{fn}} = \left(\frac{f'_{c\text{actual}}}{f'_{c\text{design}}}\right) \times M_n$	30,5	kNm/m
7	Kekurangan momen (ΔM)	$\Delta M = M_{\text{target}} - M_n$	10,1	kNm/m
8	Luas CFRP (A_f)	$A_f = B_f \times T_f$	83,5	mm ²
9	Regangan efektif CFRP (ε_{fe})	$\varepsilon_{fe} \approx 0.004$, ACI 440	0,004	-
10	Tegangan efektif CFRP (f_{fe})	$f_{fe} = E_f \times \varepsilon_{fe}$	1022,1	MPa
11	Gaya tarik CFRP (T_f)	$T_f = A_f \times f_{fe}$	85,3	kN
12	Posisi CFRP (d_f)	$D_f = h - \frac{t_f}{2}$	129,9	mm
13	Kontribusi momen CFRP (M_f)	$M_f = A_f \times f_{fe} \times \left(d_f - \frac{a}{2}\right)$	10,4	kNm/m
14	Rasio efektivitas (η)	$\eta = \frac{F_{fe}}{F_{fu}}$	0,18	MPa
15	Kapasitas momen total	$M_{\text{total}} = M_n + M_f$	30,8	kNm/m
16	Jumlah CFRP	$n = \frac{\Delta M}{M_f}$	1,0	layer

TABLE VIII
PARAMETER DAN HASIL PERHITUNGAN KAPASITAS MOMEN

No	Uraian	Simbol	Nilai	Satuan
1	Luas CFRP per strip	A_f	167	mm ²
2	Gaya tarik CFRP	T_f	170,69	kN
3	Kontribusi momen CFRP	M_f	20,92	kNm
4	Kapasitas momen beton (awal)	M_n	20,40	kNm
5	Total momen ($M_n + M_f$)	M_{tot}	41,35	kNm
6	Faktor reduksi kekuatan	ϕ	0,90	-
7	Kapasitas momen terfaktor	ϕM_n	37,22	kNm
8	Momen rencana	M_{target}	30,50	kNm

TABLE IX
EVALUASI KELAYAKAN DESAIN

No	Kondisi Analisis	ϕM_n (kNm)	M_{target} (kNm)	Status
1	Tanpa CFRP (awal)	20,40	30,50	Tidak memenuhi
2	CFRP 1 layer	27,80	30,50	Tidak memenuhi
3	CFRP 2 layer	37,22	30,50	Memenuhi (Aman)

antara jumlah *layer* dan kapasitas tidak selalu linier akibat keterbatasan perilaku lekatan FRP-beton. Penampang juga tetap berada dalam kondisi *tension-controlled*, sehingga perilaku daktail masih terjaga sesuai rekomendasi ACI 440.2R. Namun, potensi kegagalan seperti *debonding* dan *rupture* tetap perlu diperhatikan, yaitu kegagalan epoksi pada ikatan antarmuka material komposit FRP dengan betonnya [21]. Secara umum, hasil ini menegaskan bahwa efektivitas perkuatan CFRP tidak hanya dipengaruhi oleh jumlah *layer*, tetapi juga oleh kualitas lekatan serta batas regangan efektif material. Oleh karena itu, penggunaan 2 *layer* CFRP dapat dianggap sebagai konfigurasi minimum yang efektif dan telah memenuhi kriteria desain struktur.

IV. KESIMPULAN

Hasil evaluasi menunjukkan bahwa mutu beton eksisting pada pelat lantai mengalami degradasi yang signifikan, dengan nilai kuat tekan hasil *hammer test* sebesar 17,1 MPa dan *core drill* sebesar 16,7 MPa, atau sekitar 67-68% dari mutu rencana. Nilai tersebut berada di bawah batas minimum yang dipersyaratkan dalam PBI 1971, sehingga menyebabkan penurunan kapasitas lentur struktur. Analisis menunjukkan bahwa kapasitas momen eksisting sebesar 20,40 kNm/m masih lebih rendah dibandingkan kebutuhan momen rencana sebesar 30,50 kNm/m, sehingga terjadi defisit kapasitas sekitar 33%. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa pelat lantai berada dalam kondisi tidak aman terhadap pembebanan rencana dan memerlukan tindakan perkuatan untuk mengembalikan kinerja strukturalnya. Analisis kebutuhan perkuatan dilakukan menggunakan metode *externally bonded reinforcement* dengan material *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) mengacu pada ACI 440.2R-17. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa penggunaan satu *layer* CFRP belum mampu memberikan peningkatan kapasitas lentur yang memadai akibat keterbatasan regangan efektif CFRP serta potensi kegagalan *debonding* pada bidang lekatan antara beton dan FRP. Oleh karena itu, digunakan konfigurasi dua *layer* CFRP yang mampu meningkatkan kontribusi gaya tarik pada zona tarik pelat secara lebih optimal, sehingga kapasitas lentur struktur dapat melampaui kebutuhan momen rencana. Selain mampu mengompensasi defisit kapasitas akibat degradasi mutu beton, penerapan dua *layer* CFRP juga dinilai efisien karena tidak memerlukan penambahan dimensi penampang maupun peningkatan beban mati struktur secara signifikan. Dengan demikian, metode perkuatan menggunakan dua *layer* CFRP dinyatakan efektif dalam mengembalikan tingkat

potensi *debonding*. Peningkatan kapasitas yang signifikan baru terjadi pada penggunaan 2 *layer* CFRP ($\phi M_n = 37,22$ kNm), yang telah melampaui momen rencana. Hal ini menunjukkan bahwa lapisan FRP mulai memberikan peningkatan kapasitas lentur secara signifikan setelah melewati ambang tertentu. Meskipun demikian, hubungan

keamanan, kekakuan, dan keandalan struktur, sehingga bangunan tetap dapat difungsikan secara aman dan berkelanjutan sesuai dengan persyaratan teknis yang berlaku.

Penelitian selanjutnya perlu mengadopsi pendekatan terintegrasi berbasis analisis eksperimental, numerik, dan probabilistik untuk meningkatkan akurasi prediksi kinerja struktur beton bertulang terdegradasi. Fokus kajian diarahkan pada mekanisme interaksi beton-CFRP, khususnya *bond-slip*, potensi *debonding*, dan respons non-linear akibat variasi lapisan. Studi komparatif dengan metode perkuatan lain juga diperlukan untuk menilai efektivitas teknis dan ekonomis. Selain itu, pengaruh lingkungan terhadap durabilitas CFRP perlu dievaluasi. Validasi melalui pemodelan elemen hingga dan pengujian skala penuh direkomendasikan guna memastikan reliabilitas dan generalisasi hasil.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. A. Suherman, B. Kudwadi, and B. N. Batubara, "Analisis Perkuatan Struktur Beton Menggunakan Metode *Concrete Jacketing* dan *Fiber Reinforced Polymer* (FRP)," *Matritiks Teknik Sipil*, vol. 13, 2025, doi: <https://doi.org/10.20961/mateksi.v13i1.101373>.
- [2] Badan Standardisasi Nasional, *Panduan Desain Sederhana untuk Bangunan Beton Bertulang (ACI 314R-16, MOD)*. Jakarta, Indonesia, 2020.
- [3] S. J. F. Sembiring, D. M. Sundara, and A. P. Abriantoro, "Efektivitas Perkuatan Struktur dengan Menggunakan Pelapisan FRP (*Fiber Reinforced Polymer*) dan Metode *Jacketing*: Studi Literatur," *Seminar Nasional Konsorsium Untag se-Indonesia*, pp. 79-88, 2024.
- [4] M. A. Uling, "Teknik Evaluasi Tak Merusak dan Metode Perbaikan pada Struktur Beton serta Metode Pelaksanaan Pekerjaan Struktur," 2018. [Online]. Available: <http://repository.polimdo.ac.id/2291/>
- [5] E. O. Zai and L. H. Purba, "The Behavior of Reinforced Concrete Beams with Various Carbon Fiber Retrofitting Methods in Enhancing Stiffness," *Inersia: Informasi dan Ekspose Hasil Riset Teknik Sipil dan Arsitektur*, vol. 21, no. 1, pp. 36-45, 2025, doi: <https://doi.org/10.21831/inersia.v21i1.78313>.
- [6] S. Syahrul and A. Amir, "Analisa Nilai Konversi Mutu Beton Pengujian Kekuatan Tekan dan *Hammer Test*," *Sebatik*, vol. 27, no. 2, pp. 472-479, 2023, doi: <https://doi.org/10.46984/sebatik.v27i2.2407>.
- [7] B. Kouddane, "Optimal Non-Destructive Evaluation of Concrete by Coupling NDT Methods," 2024.
- [8] B. Christopher, S. Wacono, and A. P. Mutu, "Quality Management pada Proyek Struktur Beton," pp. 482-488, 2024.
- [9] L. Kristanto, Sumargo, and M. Iqbal, "Analisis Kekuatan Struktur Pasca *Retrofitting* pada Kerusakan Struktur Balok Beton Bertulang," *Jurnal Teknik: Media Pengembangan Ilmu dan Aplikasi Teknik*, vol. 22, no. 1, pp. 53-64, 2023, doi: <https://doi.org/10.55893/jt.vol22no1.502>.
- [10] Z. Citra, P. D. Wibowo, Y. Malinda, and A. Wibisono, "Evaluasi Mutu Beton dengan *Core Drill Test* Berdasarkan SNI 2847:2019 pada Struktur Kolom Bangunan Gedung Laboratorium," vol. 10, no. 2, pp. 603-609, 2023.
- [11] E. Pratama, "Pemeriksaan Mutu Beton Terpasang Menggunakan Pengujian Nondestruktif (NDT) dan Destruktif: Studi Kasus Bangunan Beton Bertulang Empat Lantai," 2022.
- [12] Direktorat Penyelidikan Masalah Bangunan, *Peraturan Beton Bertulang Indonesia 1971 (PBI-1971/NI-2)*. Jakarta, Indonesia, 1971.
- [13] S. Pebriyanto, A. Amiwarti, and S. Alzahri, "Pengaruh Penambahan Abu Ampas Tebu dan Bubur Kertas Koran terhadap Kuat Tekan Beton Mutu K-225," *RekaRacana: Jurnal Teknik Sipil*, vol. 7, no. 2, p. 67, 2021, doi: <https://doi.org/10.26760/rekaracana.v7i2.67>.
- [14] F. Aulia and E. Walujodjati, "Pengaruh Perkuatan Beton Menggunakan CFRP terhadap Kuat Tekan," 2021.
- [15] Julison and S. Sektianto, "Rasio Penambahan Biaya terhadap Peningkatan Kekuatan Beton pada Metode *Carbon Fiber Reinforced Polymer*," vol. 2, pp. 306-312, 2022.
- [16] P. Parmo, A. Hakim, Y. Yusrianti, and B. G. A. Wicaksono, "Strengthening of Reinforced Concrete Structure Using FRP and Concrete Jacketing Methods," *Media Komunikasi Teknik Sipil*, vol. 31, no. 1, pp. 149-159, 2025, doi: <https://doi.org/10.14710/mkts.v31i1.72695>.
- [17] M. Ginting, Y. Sibagariang, and D. S. Situmorang, "Perkuatan Struktur Bangunan Akibat Penurunan Mutu Beton dengan Metode *Concrete Jacketing* dan *Fiber Reinforced Polymer* (Studi Kasus)," *Jurnal Rekayasa Konstruksi Mekanika Sipil*, vol. 8, no. 1, p. 1, 2025.
- [18] A. Anwar, D. N. Islami, and M. R. Fan Putra, "Studi Komparatif Metode Perkuatan Struktur Beton Bertulang Berdasarkan Tinjauan Literatur, Pengujian Balok, dan Rehabilitasi Pascabencana," *Journal of Infrastructure Construction Technology*, vol. 2, no. 2, pp. 52-58, 2024, doi: <https://doi.org/10.56208/jictech.2.2.52-58>.
- [19] ACI Committee 440, *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures (ACI 440.2R-17)*. Farmington Hills, MI, USA: American Concrete Institute, 2017, doi: <https://doi.org/10.14359/51700867>.
- [20] D. V. Pratama and S. Leman, "Analisis Kapasitas Torsi Balok L Spandrel Beton Bertulang terhadap Variasi Lembaran Serat Karbon," *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, vol. 8, no. 3, pp. 793-806, 2025, doi: <https://doi.org/10.24912/jmts.v8i3.34112>.
- [21] D. G. Jati, J. Utomo, F. A. Tanudjaja, and H. A. Lie, "Efektivitas Angkur Epoksi terhadap Kekangan Eksternal Balok Beton Bertulang dengan Perkuatan CFRP," *Jurnal Teknik Sipil*, vol. 17, no. 2, pp. 103-111, 2023, doi: <https://doi.org/10.24002/jts.v17i2.7021>.

BIOGRAFI PENULIS

Yudha Andika Pratama merupakan dosen/peneliti di Universitas Cahaya Surya, Indonesia. Lulusan terakhir dari Universitas Islam Indonesia, Indonesia, Program Studi Teknik Sipil. Fokus penelitian meliputi Penilaian Kinerja Struktural dan Penguatan CFRP pada Pelat yang Mengalami Degradasi.

Renita Husna merupakan dosen/peneliti di Universitas Cahaya Surya, Indonesia. Lulusan terakhir dari Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Indonesia, Program Studi Teknik Sipil. Fokus penelitian meliputi Penilaian Kinerja Struktural dan Penguatan CFRP pada Pelat yang Mengalami Degradasi.