

Optimasi Keandalan Beton Bertulang-GFRP Berdasarkan ACI PRC-440.2-23

Aoron Honestyo¹, Ryan Maulana², Ifan Darmawan³, Ezra Andreas Saputra⁴

^{1,2,3,4} Universitas Esa Unggul, Indonesia

Corresponding Author: ✉ aoron.honestyo@esaunggul.ac.id

ABSTRACT

Penelitian ini membahas penentuan jumlah lapisan GFRP yang paling optimal untuk memperkuat balok beton bertulang terhadap lentur dengan mempertimbangkan keandalan dan biaya siklus hidup. Analisis dilakukan dengan mengacu pada batas regangan efektif dalam ACI PRC-440.2-23. Pendekatan desain yang hanya menggunakan nilai deterministik dapat kurang menggambarkan pengaruh ketidakpastian material, keterbatasan regangan akibat debonding, dan dampak biaya ketika terjadi kegagalan. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan simulasi Monte Carlo sebanyak 10.000 sampel untuk setiap variasi balok dan jumlah lapisan GFRP. Lima parameter yang dibuat sebagai variabel acak adalah kuat tekan beton, kuat leleh baja, kuat tarik GFRP, modulus elastisitas GFRP, dan regangan ultimit GFRP. Penelitian dilakukan pada tiga ukuran balok dengan empat variasi jumlah lapisan GFRP. Perhitungan dilakukan dengan mempertimbangkan kompatibilitas regangan, tegangan pada tulangan baja, kemungkinan terjadinya rupture pada GFRP, serta batas regangan efektif akibat debonding. Hasil analisis menunjukkan bahwa penambahan jumlah lapisan GFRP memang meningkatkan kapasitas lentur rata-rata balok, tetapi peningkatannya semakin kecil ketika jumlah lapisan bertambah karena adanya batas regangan efektif. Probabilitas kegagalan juga turun cukup signifikan, dari sekitar 4,17-77,10% pada perkuatan satu lapis menjadi sekitar 0,03% atau lebih rendah pada konfigurasi yang dipilih sebagai kondisi optimal. Dari sisi biaya siklus hidup, penggunaan dua lapis GFRP menjadi pilihan yang paling optimal untuk balok kecil dan sedang, sedangkan balok berukuran besar membutuhkan tiga lapis. Hasil ini menunjukkan bahwa pertimbangan keandalan dan biaya secara bersamaan dapat membantu mendapatkan desain perkuatan GFRP yang lebih aman dan ekonomis.

Kata Kunci

Analisis Keandalan, Batas Regangan Efektif, Optimasi Biaya Siklus Hidup, Perkuatan GFRP, Simulasi Monte Carlo.

PENDAHULUAN

Kekurangan kapasitas lentur pada balok beton bertulang (RC) merupakan salah satu masalah yang sering ditemui pada bangunan dan infrastruktur yang sudah berusia maupun yang mengalami rehabilitasi. Kondisi ini dapat disebabkan oleh peningkatan beban, perubahan fungsi bangunan, kesalahan dalam perencanaan atau pelaksanaan, penurunan kualitas material, korosi tulangan, maupun kerusakan yang terjadi selama masa layan. Perkuatan diperlukan ketika kapasitas lentur balok yang ada tidak lagi mampu memenuhi

beban yang bekerja. Jika kondisi ini dibiarkan, keamanan dan fungsi balok maupun komponen struktur di sekitarnya dapat terganggu. Salah satu solusi yang dapat digunakan adalah perkuatan eksternal, karena pekerjaan perkuatan dapat dilakukan pada elemen yang sudah ada tanpa perlu membongkar atau menggantinya. Penggunaan *fiber-reinforced polymer* (FRP) yang direkatkan pada permukaan beton (*externally bonded FRP*) menjadi salah satu pilihan yang cukup menarik untuk perkuatan struktur. FRP memiliki kapasitas tarik yang tinggi, berat sendiri yang rendah, tahan terhadap korosi, dan relatif mudah dipasang dibandingkan metode konvensional seperti *steel jacketing* atau pembesaran penampang (Hollaway & Leeming, 1999; Bakis et al., 2002; Teng et al., 2002; ACI Committee 440, 2023).

Di antara berbagai jenis material FRP, *glass fiber-reinforced polymer* (GFRP) cukup menarik untuk aplikasi perkuatan yang mempertimbangkan efisiensi biaya. Berbagai penelitian eksperimental dan analitis menunjukkan bahwa pelat atau lembaran FRP yang direkatkan pada permukaan beton dapat meningkatkan kapasitas lentur balok beton bertulang, termasuk penggunaan GFRP maupun sistem FRP hibrida (Saadatmanesh & Ehsani, 1991; Chajes et al., 1994; Norris et al., 1997; Attari et al., 2012). Penggunaan FRP yang direkatkan secara eksternal juga telah banyak dikaji, termasuk sejak penelitian awal yang menggunakan pendekatan berbasis keandalan pada elemen beton bertulang yang diperkuat dengan laminasi FRP. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa sistem perkuatan dapat memberikan peningkatan kapasitas lentur yang cukup berarti ketika ketidakpastian material dan kapasitas tahanan turut diperhitungkan (Plevris et al., 1995).

Desain perkuatan FRP yang direkatkan pada permukaan beton tidak cukup hanya didasarkan pada kuat tarik nominal material FRP. Dalam ACI PRC-440.2-23, perkuatan lentur menggunakan FRP eksternal dipandang sebagai sistem yang sangat dipengaruhi oleh kondisi ikatan antara FRP dan beton. Oleh karena itu, desain perlu mempertimbangkan beberapa kemungkinan mode keruntuhan, seperti beton mengalami hancur sebelum tulangan baja mencapai leleh, tulangan baja mengalami leleh yang kemudian diikuti oleh rupture pada FRP, serta tulangan baja mengalami leleh yang kemudian diikuti oleh debonding FRP (ACI Committee 440, 2023).

Debonding menjadi hal yang penting untuk diperhatikan karena cukup sering terjadi pada balok beton bertulang yang diperkuat dengan FRP eksternal. Kondisi ini dapat berupa *plate-end debonding*, *intermediate crack-induced debonding*, maupun *local bond-slip* pada bidang kontak antara FRP dan beton (Smith & Teng, 2002; Teng et al., 2003; Lu et al., 2005).

Selain batas regangan, ketidakpastian material juga berpengaruh terhadap keandalan balok beton bertulang yang diperkuat dengan GFRP. Kapasitas lentur balok setelah diperkuat dipengaruhi oleh beberapa sifat material, antara lain kuat tekan beton, kuat leleh baja, kuat tarik GFRP, modulus elastisitas GFRP, dan regangan ultimit GFRP. Untuk beton dan baja, model statistik tahanan telah banyak digunakan dalam pengembangan peraturan maupun desain berbasis keandalan (Nowak & Szerszen, 2003). Pada sistem FRP, variasi sifat material juga perlu diperhatikan karena karakteristik laminasi dapat berbeda tergantung pada jenis serat, resin yang digunakan, kondisi pemasangan, serta data produk yang menjadi acuan (Atadero et al., 2005). Beberapa penelitian mengenai elemen beton bertulang yang diperkuat dengan FRP juga menunjukkan bahwa desain secara deterministik dapat menghasilkan tingkat keamanan yang berbeda ketika geometri, variasi material, dan mode keruntuhan yang mengendalikan berubah (Okeil et al., 2002; Ribeiro & Diniz, 2013). Simulasi Monte Carlo dapat digunakan untuk memasukkan ketidakpastian material secara langsung ke dalam perhitungan kapasitas lentur. Dalam analisis keandalan struktur, metode ini cukup sering digunakan ketika penyelesaian secara matematis atau *closed-form* sulit diperoleh (Melchers & Beck, 2018). Beberapa penelitian mengenai keandalan balok beton bertulang yang diperkuat dengan FRP terhadap lentur menunjukkan bahwa ketidakpastian material dan mekanisme keruntuhan, seperti beton mengalami hancur, FRP mengalami *rupture*, *intermediate crack-induced debonding*, dan *end debonding*, dapat memberikan pengaruh yang cukup besar terhadap tingkat keandalan struktur (Huang et al., 2019).

Berdasarkan kesenjangan penelitian tersebut, penelitian ini mengembangkan kerangka optimasi keandalan dan biaya siklus hidup berbasis simulasi Monte Carlo untuk balok beton bertulang yang diperkuat dengan GFRP dengan mengacu pada batas regangan efektif ACI PRC-440.2-23. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kapasitas lentur secara probabilistik pada balok yang diperkuat GFRP.

METODE PENELITIAN

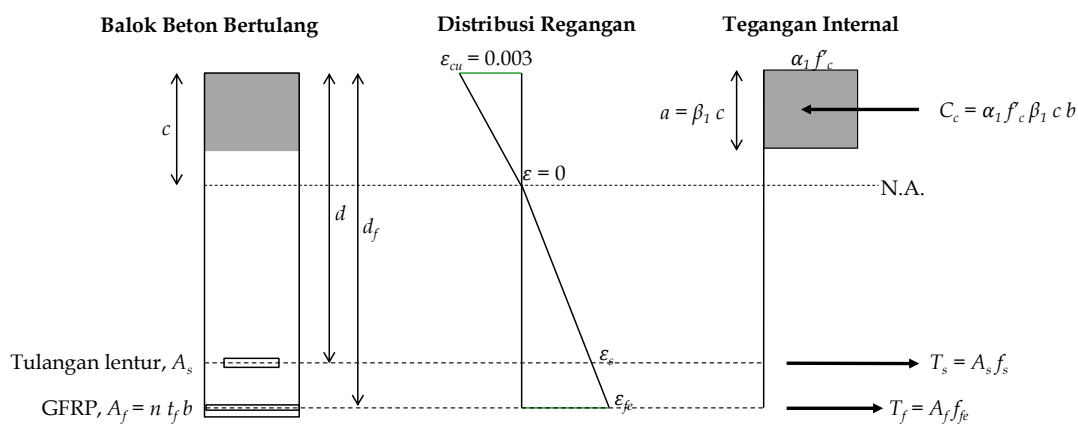
Model Kapasitas Lentur

Dalam penelitian ini, kapasitas lentur balok beton bertulang yang diperkuat dengan GFRP dihitung berdasarkan prinsip kompatibilitas regangan dan keseimbangan gaya dalam (ACI Committee 440, 2023). Model kompatibilitas regangan, blok tegangan ekuivalen beton, serta resultan gaya dalam yang digunakan dalam analisis ditunjukkan pada Gambar 1.

Kuat tarik desain dan regangan rupture desain laminasi GFRP diperoleh dengan menerapkan faktor reduksi lingkungan (*environmental reduction factor*), C_E , terhadap masing-masing sifat material nominal, seperti ditunjukkan pada Persamaan (1) dan (2). di mana f_{fu}^* dan ε_{fu}^* masing-masing menunjukkan kuat tarik nominal dan regangan putus ultimit material GFRP, sedangkan f_{fu} dan ε_{fu} merupakan nilai desain setelah mempertimbangkan faktor reduksi akibat kondisi lingkungan.

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^*$$

$$\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^*$$



Gambar 1.

Kompatibilitas Regangan Dan Distribusi Gaya Dalam Pada Balok Beton Bertulang Yang Diperkuat GFRP BERDASARKAN BATAS REGANGAN EFEKTIF ACI PRC-440.2-23 (ACI Committee 440, 2023)

$$\varepsilon_{f,comp} = \varepsilon_{cu} \left(\frac{d_f - c}{c} \right)$$

di mana $\varepsilon_{cu} = 0.003$, d_f adalah jarak dari serat tekan terluar ke titik berat laminasi GFRP, dan c adalah kedalaman sumbu netral. Karena FRP yang direkatkan secara eksternal merupakan sistem perkuatan yang sangat bergantung pada ikatan antara FRP dan beton, regangan efektif FRP dibatasi oleh regangan putus desain serta batas regangan yang dikendalikan oleh kegagalan debonding. Oleh karena itu, regangan efektif FRP ditentukan seperti ditunjukkan pada Persamaan (4).

$$\varepsilon_{fe} = \min(\varepsilon_{f,comp}, \varepsilon_{fu}, \varepsilon_{fd})$$

di mana ε_{fd} adalah batas regangan efektif yang dikendalikan oleh debonding sebagaimana ditetapkan dalam ACI PRC-440.2-23. Formulasi ini

memungkinkan model untuk memperhitungkan berkurangnya efektivitas FRP ketika debonding terjadi sebelum FRP mencapai regangan putusnya. Tegangan GFRP yang bersesuaian dihitung dengan mengasumsikan perilaku elastis linier, seperti ditunjukkan pada Persamaan (5) dan (6).

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe}$$

dengan ketentuan:

$$f_{fe} \leq f_{fu}$$

di mana E_f adalah modulus elastisitas laminasi GFRP. Untuk n lapis GFRP, luas total GFRP dinyatakan seperti pada Persamaan (7).

$$A_f \leq nt_f b$$

di mana t_f adalah tebal satu lapis GFRP dan b adalah lebar balok. Berbeda dengan model lentur sederhana yang mengasumsikan tulangan baja internal telah mengalami leleh, formulasi ini menentukan tegangan baja berdasarkan kompatibilitas regangan. Regangan tarik, ε_s , pada tulangan baja dinyatakan seperti pada Persamaan (8).

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{cu} \left(\frac{d-c}{c} \right)$$

di mana d adalah tinggi efektif tulangan baja. Tegangan baja yang bersesuaian dibatasi oleh kuat leleh baja, seperti ditunjukkan pada Persamaan (9).

$$f_s = \min(E_s, \varepsilon_s, f_y)$$

di mana E_s adalah modulus elastisitas baja dan f_y adalah kuat leleh baja. Verifikasi ini diperlukan karena tidak semua hasil simulasi stokastik menghasilkan kondisi leleh pada tulangan baja, terutama ketika sifat material divariasikan dalam simulasi Monte Carlo. Kedalaman sumbu netral dihitung secara iteratif hingga keseimbangan gaya horizontal pada penampang terpenuhi, seperti ditunjukkan pada Persamaan (10).

$$\alpha_1 f'_c \beta_1 c b = A_s f_s + A_f f_{fe}$$

Dalam persamaan ini, f'_c menyatakan kuat tekan beton, A_s adalah luas tulangan baja tarik, α_1 merupakan faktor intensitas blok tegangan beton, dan β_1 merupakan faktor kedalaman blok tegangan ekuivalen. Setelah kedalaman sumbu netral diperoleh, kapasitas lentur nominal balok yang diperkuat dengan GFRP dihitung menggunakan Persamaan (11) dan (12).

$$Mn = A_s f_s \left(d - \frac{a}{2} \right) + A_f f_{fe} \left(d_f - \frac{a}{2} \right)$$

$$a = \beta_1 c$$

Konfigurasi Balok, Variabel Acak, dan Parameter Statistik

Tiga penampang balok beton bertulang (RC) dengan tulangan tunggal berbentuk persegi panjang digunakan dalam studi parametrik. Ketiga penampang tersebut dipilih untuk mewakili balok berukuran kecil, sedang, dan besar yang umum dijumpai pada struktur beton bertulang. Setiap balok diasumsikan sebagai balok sederhana dengan tumpuan sendi-rol. Perkuatan GFRP dipasang pada sisi tarik balok dan membentang sepanjang lebar balok. Karakteristik utama masing-masing penampang disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1.

Data Penampang Balok Yang Digunakan Dalam Studi Parametrik

Balok	b (mm)	h (mm)	d (mm)	d_f (mm)	A_s (mm ²)
Kecil	150	300	225	300	226
Sedang	200	400	350	400	400
Besar	250	500	445	500	628

Dalam pemodelan balok, kuat tekan nominal beton, $f'_{c,n}$, ditetapkan sebesar 28 MPa, sedangkan kuat leleh nominal baja, $f_{y,n}$, ditetapkan sebesar 400 MPa. Ketidakpastian material diperhitungkan dengan menjadikan beberapa sifat material sebagai variabel acak. Dalam penelitian ini, variabel yang digunakan meliputi f'_c , f_y , f^*_{fu} , E_f , dan ε^*_{fu} . Variabel-variabel tersebut dipilih karena masing-masing parameter memengaruhi analisis kompatibilitas regangan, keseimbangan gaya internal, dan pada akhirnya kapasitas lentur nominal balok yang diperkuat. Parameter statistik yang digunakan dalam simulasi Monte Carlo disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2.

Parameter Statistik Dari Variabel Acak

Variabel	Rata-rata	CoV	Distribusi	Sumber
f'_c	$1.21 f'_{c,n}$	0.10	Normal	(Nowak & Szerszen, 2003)
f_y	$1.145 f_{y,n}$	0.07	Normal	(Nowak & Szerszen, 2003)
f^*_{fu}	600 MPa	0.10	Normal terpotong (diasumsikan)	(CSNRI, 2025)
E_f	26.1 GPa	0.08	Normal terpotong (diasumsikan)	(CSNRI, 2025)
ε^*_{fu}	0.021	0.12	Normal terpotong (diasumsikan)	(CSNRI, 2025)

Dimensi balok dan luas tulangan tidak diperlakukan sebagai variabel acak. Ketidakpastian material diperhitungkan dengan menjadikan beberapa sifat material sebagai variabel acak. Dalam penelitian ini, variabel yang digunakan meliputi f'_c , f_y , f_{fu}^* , E_f , dan ε_{fu}^* . Nilai rata-rata dan koefisien variasi yang tercantum pada Tabel 2 digunakan sebagai parameter input probabilistik dalam simulasi Monte Carlo. Nilai rata-rata kuat tekan beton dan kuat leleh baja diperoleh dengan menerapkan faktor bias terhadap kuat material nominal, sedangkan koefisien variasi dan jenis distribusinya diadopsi berdasarkan model statistik tahanan material beton bertulang yang dilaporkan oleh Nowak & Szerszen, 2003. Nilai rata-rata sifat GFRP dipilih sebagai nilai representatif untuk sistem perkuatan GFRP wet-layup komersial berdasarkan lembar data teknis LOCTITE Tyfo SEH-51A (CSNRI, 2025). Karena data statistik spesifik produk untuk sifat GFRP tidak tersedia, koefisien variasinya digunakan sebagai parameter variabilitas input, sedangkan distribusi normal terpotong diasumsikan untuk analisis keandalan parametrik dasar.

Prosedur Simulasi Monte Carlo dan Implementasi Komputasi

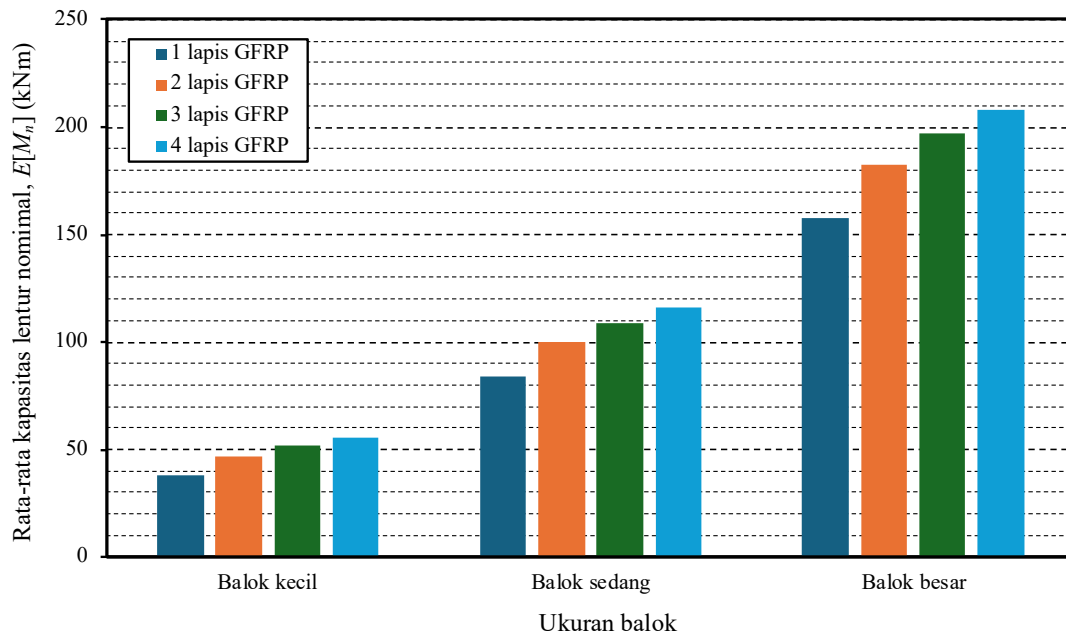
Untuk setiap ukuran balok dan konfigurasi jumlah lapisan GFRP, sebanyak $N = 10.000$ sampel acak dibangkitkan untuk variabel material yang telah ditentukan. Hasil simulasi meliputi nilai rata-rata kapasitas lentur nominal, $E[M_n]$ dan koefisien variasi kapasitas lentur, CoV_{Mn} .

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil simulasi Monte Carlo menunjukkan bahwa nilai rata-rata kapasitas lentur nominal meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah lapisan GFRP pada seluruh ukuran balok, seperti ditunjukkan pada Gambar 1 dan Tabel 3. Tabel 5 merangkum nilai rata-rata kapasitas lentur, koefisien variasi, dan rasio kapasitas terhadap balok tanpa perkuatan yang bersesuaian. Hasil tersebut menunjukkan bahwa perkuatan GFRP yang direkatkan secara eksternal dapat meningkatkan kapasitas lentur balok beton bertulang secara signifikan. Namun, peningkatan kapasitas tidak berbanding lurus dengan jumlah lapisan GFRP karena regangan efektif FRP dibatasi oleh batas regangan putus dan debonding yang ditetapkan berdasarkan ACI.

Pada balok kecil, nilai rata-rata kapasitas lentur nominal meningkat dari $M_{n,0} = 25,154$ kNm pada penampang tanpa perkuatan menjadi masing-masing 37.94; 46.68; 51.54; dan 55.43 kNm untuk satu hingga empat lapisan GFRP. Nilai tersebut setara dengan rasio kapasitas sekitar 1.51; 1.86; 2.05; dan 2.20. Dengan demikian, peningkatan relatif terbesar terjadi pada balok kecil, yang menunjukkan bahwa perkuatan GFRP yang direkatkan secara eksternal lebih efektif ketika rasio perkuatan relatif besar terhadap tulangan baja yang sudah

ada dan ukuran penampang. Pada balok sedang, nilai rata-rata kapasitas meningkat dari $M_{n,0} = 61.206$ kNm menjadi masing-masing 84.00; 99.79; 108.64; dan 115.73 kNm untuk satu hingga empat lapisan. Rasio kapasitas yang diperoleh berkisar antara 1.37 hingga 1.89. Sementara itu, pada balok besar, nilai rata-rata kapasitas meningkat dari $M_{n,0} = 122.247$ kNm menjadi 158.03; 182.81; 196.80; dan 208.04 kNm, dengan rasio kapasitas berkisar antara 1.29 hingga 1.70.



Gambar 1.
Perbandingan Hasil Kapasitas Lentur Balok Beton Bertulang Diperkuat GFRP

Kapasitas lentur tetap meningkat seiring dengan penambahan lapisan GFRP, tetapi peningkatannya semakin kecil pada jumlah lapisan yang lebih banyak. Kondisi ini terjadi karena kontribusi GFRP tidak hanya dibatasi oleh luas penampang tarik, tetapi juga oleh batas regangan efektif. Sebagai contoh, pada balok kecil, penambahan kapasitas dari satu menjadi dua lapisan sebesar 8.74 kNm. Namun, dari tiga menjadi empat lapisan, peningkatan kapasitas hanya sebesar 3.89 kNm. Pola yang sama juga terlihat pada balok sedang dan besar. Oleh karena itu, batas regangan efektif berdasarkan ACI perlu dipertimbangkan dalam mengevaluasi perkuatan GFRP yang direkatkan secara eksternal dengan beberapa lapisan.

Tabel 3.
Hasil Kapasitas Lentur Balok Beton Bertulang Diperkuat GFRP

Balok	Lapisan	$E[M_n]$ (kNm)	CoV_{Mn}	$E[M_n]/M_{n,0}$
Kecil	1	37.94	0.0600	1.51
Kecil	2	46.68	0.0503	1.86
Kecil	3	51.54	0.0491	2.05
Kecil	4	55.43	0.0497	2.20
Sedang	1	84.00	0.0594	1.37
Sedang	2	99.79	0.0506	1.63
Sedang	3	108.64	0.0489	1.78
Sedang	4	115.73	0.0488	1.89
Besar	1	158.03	0.0589	1.29
Besar	1	182.81	0.0515	1.50
Besar	1	196.80	0.0495	1.61
Besar	1	208.04	0.0489	1.70

Perbandingan ketiga ukuran balok juga memperlihatkan bahwa efektivitas relatif GFRP cenderung menurun dengan bertambahnya ukuran penampang. Pada konfigurasi empat lapisan, misalnya, rasio kapasitas mencapai sekitar 2,20 pada balok kecil, 1,89 pada balok sedang, dan 1,70 pada balok besar. Pola tersebut menunjukkan bahwa jumlah lapisan GFRP yang sama tidak menghasilkan peningkatan kapasitas relatif yang sama pada seluruh ukuran balok. Semakin besar kapasitas awal penampang, semakin besar pula kapasitas yang harus ditambahkan oleh GFRP untuk menghasilkan persentase peningkatan yang sama. Oleh karena itu, evaluasi efektivitas perkuatan sebaiknya tidak hanya didasarkan pada jumlah lapisan GFRP, tetapi juga mempertimbangkan dimensi penampang, jumlah tulangan longitudinal, serta kapasitas awal balok.

Meskipun kapasitas lentur terus meningkat dengan penambahan lapisan GFRP, peningkatan marginal kapasitas menunjukkan kecenderungan menurun. Pada balok kecil, misalnya, peningkatan kapasitas dari satu menjadi dua lapisan mencapai 8,74 kNm. Sebaliknya, peningkatan dari dua menjadi tiga lapisan hanya sebesar 4,86 kNm, sedangkan dari tiga menjadi empat lapisan hanya sebesar 3,89 kNm. Dengan demikian, setiap penambahan lapisan memberikan tambahan kapasitas yang semakin kecil. Fenomena serupa juga terlihat pada balok sedang dan besar. Kondisi ini menunjukkan bahwa hubungan antara jumlah lapisan GFRP dan kapasitas lentur bersifat nonlinier, sehingga penambahan material GFRP secara terus-menerus tidak menghasilkan peningkatan kapasitas yang sebanding.

Penurunan peningkatan marginal tersebut berkaitan dengan keterbatasan regangan efektif GFRP yang digunakan dalam analisis. Kontribusi GFRP terhadap kapasitas lentur tidak hanya ditentukan oleh luas penampang GFRP yang ditambahkan, tetapi juga oleh kemampuan lapisan tersebut untuk mencapai regangan efektif sebelum terjadi kegagalan yang mengontrol kapasitas. Dalam pendekatan ACI yang digunakan pada penelitian ini, regangan efektif GFRP dibatasi oleh kondisi yang berkaitan dengan debonding dan batas regangan putus material. Akibatnya, setelah jumlah lapisan tertentu ditambahkan, peningkatan luas GFRP tidak selalu dapat dikonversi menjadi peningkatan gaya tarik GFRP secara proporsional karena regangan efektif yang dapat dimanfaatkan tetap dibatasi.

Secara konseptual, kondisi tersebut dapat dijelaskan bahwa lapisan GFRP tambahan memang meningkatkan luas material yang tersedia untuk menahan gaya tarik, tetapi kontribusinya tetap bergantung pada tingkat regangan yang dapat dicapai oleh sistem perkuatan. Ketika batas regangan efektif mulai mengontrol respons penampang, kapasitas tambahan yang diperoleh dari setiap lapisan berikutnya menjadi semakin kecil. Hal ini menjelaskan mengapa kurva hubungan antara jumlah lapisan dan kapasitas lentur cenderung semakin landai pada jumlah lapisan yang lebih tinggi. Dengan demikian, peningkatan kapasitas tidak dapat diasumsikan bersifat linear hanya berdasarkan penambahan luas GFRP.

Hasil tersebut juga memberikan indikasi bahwa penambahan lapisan GFRP memiliki tingkat efisiensi yang berbeda pada setiap konfigurasi. Pada jumlah lapisan awal, GFRP memberikan kontribusi yang relatif besar terhadap peningkatan kapasitas karena tambahan material tarik masih dapat dimanfaatkan secara efektif. Namun, setelah jumlah lapisan bertambah, keterbatasan regangan efektif menyebabkan kontribusi tambahan setiap lapisan menjadi semakin rendah. Oleh karena itu, penggunaan GFRP dalam jumlah yang lebih banyak tidak selalu merupakan pilihan yang paling efisien apabila tujuan utama perkuatan adalah memperoleh peningkatan kapasitas dengan penggunaan material seminimal mungkin.

Dari sudut pandang desain, temuan ini menunjukkan pentingnya menentukan jumlah lapisan GFRP berdasarkan kebutuhan kapasitas dan mekanisme kegagalan yang mengontrol, bukan hanya berdasarkan target peningkatan luas perkuatan. Penambahan lapisan secara berlebihan berpotensi menghasilkan tambahan kapasitas yang relatif kecil dibandingkan tambahan material yang digunakan. Hal ini menjadi semakin penting ketika perkuatan dievaluasi dalam kerangka biaya siklus hidup, karena peningkatan jumlah lapisan akan meningkatkan biaya material dan instalasi, sementara manfaat

kapasitas tambahannya semakin menurun. Dengan demikian, hasil kapasitas lentur dari simulasi Monte Carlo ini menjadi dasar penting untuk menentukan konfigurasi GFRP yang optimal pada tahap analisis reliabilitas dan optimasi biaya siklus hidup.

Selain nilai rata-rata kapasitas, variasi hasil simulasi yang ditunjukkan melalui koefisien variasi juga penting untuk diperhatikan. Penggunaan simulasi Monte Carlo memungkinkan pengaruh ketidakpastian sifat material, seperti kuat tekan beton, kuat leleh baja, kuat tarik GFRP, modulus elastisitas GFRP, dan regangan putus GFRP, terhadap respons kapasitas lentur dapat diperhitungkan secara simultan. Oleh karena itu, nilai rata-rata yang diperoleh tidak hanya merepresentasikan satu kondisi deterministik, tetapi menggambarkan respons statistik dari berbagai kombinasi sifat material yang mungkin terjadi. Hal ini memberikan dasar yang lebih representatif untuk mengevaluasi keandalan struktur dibandingkan analisis yang hanya menggunakan nilai material nominal.

Secara keseluruhan, hasil simulasi menunjukkan tiga pola utama. Pertama, penambahan lapisan GFRP secara konsisten meningkatkan kapasitas lentur nominal pada seluruh ukuran balok. Kedua, peningkatan kapasitas relatif lebih besar pada balok kecil dibandingkan balok sedang dan besar, sedangkan peningkatan kapasitas secara absolut tetap signifikan pada balok yang lebih besar. Ketiga, peningkatan kapasitas marginal semakin kecil seiring dengan bertambahnya jumlah lapisan akibat keterbatasan regangan efektif GFRP. Oleh karena itu, efektivitas perkuatan GFRP tidak dapat dinilai hanya berdasarkan jumlah lapisan yang digunakan, tetapi harus mempertimbangkan interaksi antara kapasitas awal penampang, proporsi perkuatan, dan batas regangan efektif yang ditetapkan dalam ketentuan ACI.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa jumlah lapisan GFRP yang direkatkan secara eksternal yang optimum tidak sebaiknya ditentukan hanya berdasarkan peningkatan kapasitas lentur nominal. Meskipun penambahan lapisan GFRP meningkatkan kapasitas lentur pada seluruh ukuran balok, peningkatan kapasitas menjadi semakin kecil pada jumlah lapisan yang lebih banyak karena regangan efektif GFRP dikendalikan oleh batas regangan berbasis debonding dalam ACI PRC-440.2-23. Artinya, penambahan luas GFRP tidak selalu dapat dimanfaatkan secara penuh.

PENAKUAN

Penulis menyatakan bahwa penelitian ini tidak memperoleh pendanaan.

DAFTAR PUSTAKA

- ACI Committee 440. (2023). *ACI PRC-440.2-23: Design and construction of externally bonded fiber-reinforced polymer (FRP) systems for strengthening concrete structures – Guide*. American Concrete Institute.
- Atadero, R. A., Lee, L., & Karbhari, V. M. (2005). Consideration of material variability in reliability analysis of FRP strengthened bridge decks. *Composite Structures*, 70(4), 430–443.
- Attari, N., Amziane, S., & Chemrouk, M. (2012). Flexural strengthening of concrete beams using CFRP, GFRP and hybrid FRP sheets. *Construction and Building Materials*, 37, 746–757.
- Bakis, C. E., Bank, L. C., Brown, V. L., Cosenza, E., Davalos, J. F., Lesko, J. J., Machida, A., Rizkalla, S. H., & Triantafillou, T. C. (2002). Fiber-reinforced polymer composites for construction—State-of-the-art review. *Journal of Composites for Construction*, 6(2), 73–87.
- Chajes, M. J., Thomson, T. A., Januszka, T. F., & Finch, W. W. (1994). Flexural strengthening of concrete beams using externally bonded composite materials. *Construction and Building Materials*, 8(3), 191–201.
- CSNRI. (2025). *LOCTITE Tyfo SEH-51A composite: Technical data sheet*. CSNRI.
- Hollaway, L. C., & Leeming, M. B. (1999). *Strengthening of reinforced concrete structures: Using externally-bonded FRP composites in structural and civil engineering*. Woodhead Publishing.
- Huang, X., Sui, L., Xing, F., Zhou, Y., & Li, P. (2019). Reliability assessment for flexural FRP-strengthened reinforced concrete beams based on importance sampling. *Composite Structures*, 209, 998–1007.
- Lu, X. Z., Teng, J. G., Ye, L. P., & Jiang, J. J. (2005). Bond-slip models for FRP sheets/plates bonded to concrete. *Engineering Structures*, 27(6), 920–937.
- Melchers, R. E., & Beck, A. T. (2018). *Structural reliability analysis and prediction* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Norris, T., Saadatmanesh, H., & Ehsani, M. R. (1997). Shear and flexural strengthening of R/C beams with carbon fiber sheets. *Journal of Structural Engineering*, 123(7), 903–911.
- Nowak, A. S., & Szerszen, M. M. (2003). Calibration of design code for buildings (ACI 318): Part 1—Statistical models for resistance. *ACI Structural Journal*, 100(3), 377–382.
- Okeil, A. M., El-Tawil, S., & Shahawy, M. (2002). Flexural reliability of reinforced concrete bridge girders strengthened with carbon fiber-reinforced polymer laminates. *Journal of Bridge Engineering*, 7(5), 290–299.

- Plevris, N., Triantafillou, T. C., & Veneziano, D. (1995). Reliability of RC members strengthened with CFRP laminates. *Journal of Structural Engineering*, 121(7), 1037–1044.
- Ribeiro, S. E. C., & Diniz, S. M. C. (2013). Reliability-based design recommendations for FRP-reinforced concrete beams. *Engineering Structures*, 52, 273–283.
- Saadatmanesh, H., & Ehsani, M. R. (1991). RC beams strengthened with GFRP plates. I: Experimental study. *Journal of Structural Engineering*, 117(11), 3417–3433.
- Smith, S. T., & Teng, J. G. (2002). FRP-strengthened RC beams. I: Review of debonding strength models. *Engineering Structures*, 24(4), 385–395.
- Teng, J. G., Smith, S. T., Yao, J., & Chen, J. F. (2003). Intermediate crack-induced debonding in RC beams and slabs. *Construction and Building Materials*, 17(6–7), 447–462.