



EVALUASI KINERJA ENERGI SERAP BALOK JEMBATAN KOMPOSIT KAYU LAMINASI-BETON BERLAPIS CFRP PADA BEBAN STATIS

Rachmat Hakiki

Politeknik Negeri Sriwijaya, Palembang, Indonesia
Surel: rachmat.haiki@polsri.ac.id

ARTIKEL INFO

Kata Kunci:

energi serap, balok jembatan, komposit kayu laminasi-beton, CFRP, beban statis.

Keywords:

energy absorption, bridge beam, glulam-concrete composite, CFRP, static loa

ABSTRACT

This study aims to analyse the ability of a glulam-concrete composite bridge beam coated with carbon fibre-reinforced polymer (CFRP) to absorb energy under static loading conditions. The glulam-concrete composite structure was chosen due to the combination of concrete's compressive strength and laminated wood's flexibility, which provides optimal performance in bridge applications. CFRP is used to enhance the beam's resistance to deformation and damage caused by the applied load. The test was conducted by gradually applying static loads to beams coated with 1 Layer, 2 Layers, and 3 Layers of CFRP, as well as to beams without CFRP for comparison. The absorbed energy was calculated by measuring the area under the load-deflection curve, which indicates the amount of energy that the beam can absorb before reaching failure. The results showed that CFRP reinforcement increased the stiffness and strength of the beam but decreased the energy absorption capacity. The beam without CFRP has the highest absorption energy (5773.27 Joules). In comparison, the beam with three CFRP layers has the lowest absorption energy (451.59 Joules), indicating the tendency of brittle and shear failure in laminated beams. Therefore, the number of CFRP layers should be optimised to balance the increase in strength and ductility, thereby preventing sudden failure in structural applications.

DOI: 10.58499/jatan.v42i1.1380

diterima: 10 April 2025 ; direvisi: 27 Mei 2025;

disetujui: 02 Juni 2025

PENDAHULUAN

Dalam dunia teknik sipil, penggunaan material komposit telah berkembang pesat sebagai solusi untuk meningkatkan efisiensi dan ketahanan struktur bangunan. Struktur komposit merupakan gabungan dua atau lebih material dengan sifat mekanik berbeda yang bekerja sebagai satu kesatuan untuk menahan beban eksternal (Yoresta & Sidiq, 2016). Salah satu kombinasi yang populer adalah kayu-beton, yang mengintegrasikan kekuatan beton dalam menahan gaya tekan dan keunggulan kayu dalam menahan gaya tarik. Dengan integrasi yang tepat, balok kayu-beton dapat memberikan performa struktural yang lebih baik dibandingkan dengan penggunaan material secara terpisah.

Kayu sudah lama digunakan sebagai material konstruksi utama karena sifatnya yang ringan, mudah diolah, dan memiliki nilai estetika tinggi. Namun, jika dibandingkan dengan baja dan beton, kayu memiliki kelemahan seperti rentan terhadap kelembaban, api, serta kapasitas serap energi yang rendah saat menerima beban dinamis atau ekstrem (Vahedian *et al.* 2019). Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, inovasi dalam bentuk balok kayu laminasi tersambung atau glulam dikembangkan untuk meningkatkan stabilitas dimensi

dan ketahanan kayu terhadap perubahan lingkungan (Rezeki & Rachma, 2023).

Ketersediaan kayu berkualitas semakin terbatas sehingga teknologi kayu laminasi menjadi solusi efektif untuk mengolah kayu kelas rendah menjadi balok rekayasa yang kuat secara struktural. Penguatan balok glulam dengan *carbon fibre-reinforced polymer* (CFRP) dapat meningkatkan kekuatan lentur, kapasitas ultimate, kekakuan, dan kapasitas geser balok (Aryadi *et al.* 2023). Selain itu, dengan meningkatnya kebutuhan struktur yang kuat dan tahan lama, penggunaan *fibre-reinforced polymer* (FRP) dalam sistem komposit kayu-beton semakin populer. FRP memiliki bobot ringan, tahan korosi, dan kekuatan tarik tinggi sehingga penguatannya pada balok glulam dapat meningkatkan kapasitas beban, mengurangi deformasi, dan memperbaiki perilaku struktural pada pembebanan berulang atau ekstrem (Prachasaree, 2013).

Pada aplikasi infrastruktur seperti jembatan, struktur komposit kayu-beton menawarkan berbagai keuntungan. Kayu mudah diperoleh, mudah difabrikasi, dan memiliki rasio kekuatan terhadap berat tinggi, sedangkan beton memberikan ketahanan terhadap gaya tekan. Kombinasi ini menciptakan struktur yang efisien dan ramah lingkungan dibandingkan beton bertulang konvensional. Gelagar beton T konvensional memiliki kelemahan berupa berat



yang besar dan kesulitan pemasangan pada medan ekstrem sehingga alternatif penggunaan material FRP dianggap sangat potensial. Dalam konteks ini, pengembangan gelagar TAUFIQ-girder berbasis FRP menjadi solusi inovatif untuk struktur primer (Rochman dkk. 2013).

Meskipun memiliki keunggulan, struktur komposit kayu-beton masih menghadapi keterbatasan, khususnya dalam disipasi energi dan kinerja mekanis saat kegagalan. Kayu yang getas dalam lentur rentan mengalami keruntuhan mendadak, sementara sifat kembang susutnya membatasi dimensi elemen struktural berskala besar. Untuk mengatasi hal ini, pendekatan seperti pemanfaatan kayu dalam kondisi tekan sejajar maupun tegak lurus serat serta desain sambungan yang memungkinkan deformasi sebelum kegagalan utama dikembangkan.

Penggunaan FRP sebagai bahan penguat semakin luas karena memiliki rasio kekuatan terhadap berat tinggi, ketahanan korosi, daya tahan, dan performa kelelahan yang unggul. Metode pemasangan FRP terbagi menjadi *externally-bonded* FRP (EBF) dan *near surface mounted* (NSM) FRP. Metode NSM menawarkan keuntungan berupa pemasangan yang terlindungi dari kerusakan dan tampilan estetika yang lebih baik (Lu *et al.* 2015). Dalam balok kayu-beton, CFRP sebagai penguat tambahan memberikan solusi efektif berkat kekuatan tarik tinggi dan ketahanan terhadap degradasi lingkungan (Mujiman *et al.* 2020).

Penelitian menunjukkan bahwa penguatan lentur balok glulam dengan pelat CFRP dapat meningkatkan performa mekanik, di mana jarak pelat CFRP dari pusat penampang berpengaruh signifikan (Glišović, Stevanović and Todorović, 2016).

Hakiki dan Mujiman (2020) melaporkan bahwa penambahan lembaran CFRP pada zona tarik balok komposit glulam-beton dapat meningkatkan kekuatan, kekakuan, dan daktilitas, terutama dengan penggunaan 1-2 lembar CFRP. Namun, penggunaan tiga lembar justru menurunkan kekakuan sehingga kurang efektif. Fossetti *et al.* (2015) juga menyatakan bahwa penguatan balok kayu glulam dengan FRP *cords* dapat memperbaiki perilaku lentur secara signifikan, meningkatkan kekuatan dan kekakuan struktur.

Penggunaan *energy-absorbing connections* (EAC) pada sambungan struktur glulam terbukti meningkatkan disipasi energi dan daktilitas, terutama pada pembebanan dinamis ekstrem seperti ledakan, dengan peningkatan energi disipasi mencapai 570% dibandingkan balok tanpa EAC (Rubé & Doudak, 2024). Selain itu, panjang ikatan efektif antara FRP dan beton merupakan faktor penting dalam mentransfer gaya antar material. Gaya pada lembaran FRP disalurkan ke beton melalui tegangan geser pada perekat di sekitar area beban, yang dikenal sebagai

panjang ikatan efektif. Peningkatan panjang ikatan efektif tidak hanya meningkatkan kapasitas beban, tetapi juga mengurangi risiko pelepasan (**debonding**) pada antarmuka beton-FRP. Pengaruh jenis perekat terhadap kekuatan ikatan dan panjang ikatan efektif telah dibuktikan secara eksperimental (Diab and Farghal, 2014).

Kemampuan struktur balok komposit menyerap energi merupakan indikator kunci untuk menilai daktilitas dan ketahanannya terhadap beban ekstrem. Ambil contoh balok komposit kayu-beton: mereka menunjukkan kapasitas penyerapan energi yang besar berkat sinergi antara sifat daktil kayu dan kekakuan beton, yang membantu pemerataan distribusi tegangan di bawah beban (Gereke *et al.* 2018). Oleh karena itu, studi ini akan meneliti bagaimana penambahan lapisan CFRP akan memengaruhi kapasitas penyerapan energi yang sudah ada pada balok komposit kayu laminasi-beton ini.

Untuk meningkatkan kemampuan struktur menyerap energi dan menjadi lebih daktil, *fibre-reinforced polymer* (FRP) kini menjadi bahan penelitian utama. Studi telah menunjukkan bahwa *carbon fibre-reinforced polymer* (CFRP), khususnya pada balok beton bertulang, dapat secara signifikan memperkuat lentur dan meningkatkan penyerapan energi dengan mengontrol penyebaran retakan serta menunda kerusakan (Ali dan Jumaat, 2016). Oleh karena itu, penelitian ini akan menguji bagaimana lapisan CFRP yang diterapkan pada balok jembatan komposit kayu laminasi-beton dapat meningkatkan penyerapan energi di bawah beban statis.

Penelitian ini melakukan evaluasi kinerja energi serap balok jembatan komposit kayu laminasi-beton yang diperkuat CFRP di bawah pembebanan statis. Evaluasi bertujuan untuk memahami bagaimana CFRP meningkatkan kapasitas serap energi balok, serta menganalisis pola keruntuhan pada variasi jumlah lapisan CFRP. Dengan pemahaman ini, desain jembatan yang lebih efisien dan tahan lama dapat dikembangkan, sekaligus meminimalkan kerusakan akibat beban. Walaupun masih bersifat laboratorium, penerapan CFRP pada struktur jembatan berbasis material lokal seperti kayu sangat mendesak. Kebutuhan akan infrastruktur ringan, cepat bangun, dan ramah lingkungan di wilayah dengan akses terbatas menjadi alasan utama. Studi Vahedian *et al.* (2019) dan Prachasaree (2013) menunjukkan bahwa penguatan CFRP mampu meningkatkan ketahanan struktur terhadap beban berulang dan ekstrem, sangat relevan dengan kondisi beban jembatan di lapangan.

HIPOTESIS

Penelitian ini mengajukan dua hipotesis utama terkait dengan kinerja energi serap pada balok jembatan komposit kayu laminasi-beton berlapis carbon fibre-reinforced polymer (CFRP). Hipotesis pertama adalah bahwa penguatan balok jembatan komposit dengan lapisan CFRP akan meningkatkan kapasitas energi serap balok tersebut dibandingkan dengan balok tanpa penguatan CFRP. Diharapkan bahwa lapisan CFRP dapat memperbaiki daya serap energi balok, memperlambat pembentukan retak, dan meningkatkan ketahanan struktur terhadap beban statis. Hipotesis kedua menyatakan bahwa penambahan jumlah lapisan CFRP pada balok komposit kayu laminasi-beton akan semakin meningkatkan kinerja energi serap dan memperkuat balok dalam menghadapi pembebanan, dengan dua lapisan CFRP menunjukkan kinerja yang lebih baik dibandingkan satu lapisan. Dengan hipotesis ini, penelitian bertujuan untuk menguji sejauh mana pengaruh CFRP terhadap peningkatan kinerja balok jembatan komposit serta pola keruntuhan yang terjadi di bawah beban statis.

METODOLOGI

Spesifikasi Material

Material utama yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari kayu laminasi, beton, dan carbon fibre-reinforced polymer (CFRP). Kayu laminasi menggunakan jenis kayu Kamper dan CFRP digunakan dalam bentuk lembaran dengan spesifikasi teknis kuat tarik nominal sebesar 3800 MPa, modulus elastisitas sebesar 230 GPa, dan ketebalan per lembar sebesar 0,17 mm.

Benda Uji

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental untuk mengevaluasi energi serap balok jembatan komposit kayu laminasi-beton yang diperkuat dengan *carbon fibre-reinforced polymer* (CFRP) di bawah beban statis. Spesimen terdiri atas tiga kelompok, yaitu balok tanpa penguatan CFRP (kontrol), balok dengan satu lapisan CFRP, balok dengan dua lapisan CFRP dan balok dengan tiga lapisan CFRP. Setiap spesimen memiliki panjang 2500 mm dengan penampang kayu laminasi 100 mm × 180 mm dan lapisan beton setebal 75 mm.

Tabel 1. Kode dan Jumlah Balok Komposit

No	Kode Benda Uji	Jenis Benda Uji	Jumlah (Buah)
1	BN	Tanpa Perkuatan CFRP	1
2	BFRP1	Perkuatan CFRP 1 (satu) Lapis	1
3	BFRP2	Perkuatan CFRP 2 (dua) Lapis	1
4	BFRP3	Perkuatan CFRP 3 (tiga) Lapis	1



Gambar 1. Benda Uji Balok Komposit

Pengujian Lentur Statis

Pengujian dilakukan menggunakan mesin *Universal Testing Machine* (UTM) dengan konfigurasi pembebanan dua titik (*two-point loading*) di

laboratorium struktur jembatan Pusjatan. Data yang diukur meliputi beban maksimum, defleksi maksimum, dan pola keruntuhan.



Gambar 2. Set up Balok Uji

Pembebanan dilakukan menggunakan metode displacement controlled dengan cara meningkatkan perpindahan secara bertahap (*incremental*) pada balok uji hingga terjadi keruntuhan lentur. Dalam penelitian ini, perpindahan bertahap (*incremental stroke*) yang diterapkan adalah sebesar 0,05 mm. Nilai *incremental stroke* tersebut diterapkan secara konsisten untuk setiap jenis pembebanan pada semua balok uji. Hasil pengujian disajikan dalam bentuk kurva yang menggambarkan hubungan antara beban (load) dan perpindahan (displacement).

Meskipun studi literatur menunjukkan bahwa beban dinamis atau siklik dapat memberikan gambaran yang lebih komprehensif terhadap kapasitas energi serap, penelitian ini menggunakan metode pembebanan statis sebagai pendekatan awal. Hal ini disebabkan oleh uji statis lebih terkendali dan dapat memberikan data dasar yang akurat mengenai hubungan beban-lendutan, yang selanjutnya digunakan untuk menghitung kapasitas energi serap berdasarkan luas area di bawah kurva. Pendekatan ini juga banyak digunakan dalam studi pendahuluan sebelum dilakukan pengujian siklik yang lebih kompleks. Penelitian ini merupakan kajian awal yang fokus pada evaluasi perilaku lentur dan energi serap dalam kondisi beban statis.

Metode Analisis

Penelitian ini dilakukan dengan pendekatan eksperimental dan numerik. Pengujian laboratorium dilakukan pada balok komposit kayu laminasi-beton dengan dan tanpa lapisan CFRP. Pembebanan statis diberikan secara bertahap hingga mencapai kegagalan

struktur. Parameter yang diamati meliputi kapasitas energi serap, pola retak, dan deformasi. Analisis numerik dilakukan menggunakan perangkat lunak elemen hingga untuk memvalidasi hasil eksperimen.

Metode perhitungan energi serap menggunakan metode trapezoidal, yang secara matematis dihitung dengan persamaan berikut:

$$E = \sum \frac{1}{2} (P_i + P_{i+1})(\delta_{i+1} - \delta_i) \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan:

- E : energi serap (Joule atau kNm)
- P_i : beban pada titik ke-i
- δ_i : lendutan pada titik ke-i

Perhitungan ini dilakukan dengan mengambil data dari hasil uji beban-defleksi dan menghitung luas area di bawah kurva secara numerik. Hasil pengujian dibandingkan untuk mengevaluasi efektivitas lapisan CFRP dalam meningkatkan kapasitas energi serap dan memperbaiki pola keruntuhan balok komposit.

HASIL DAN ANALISIS

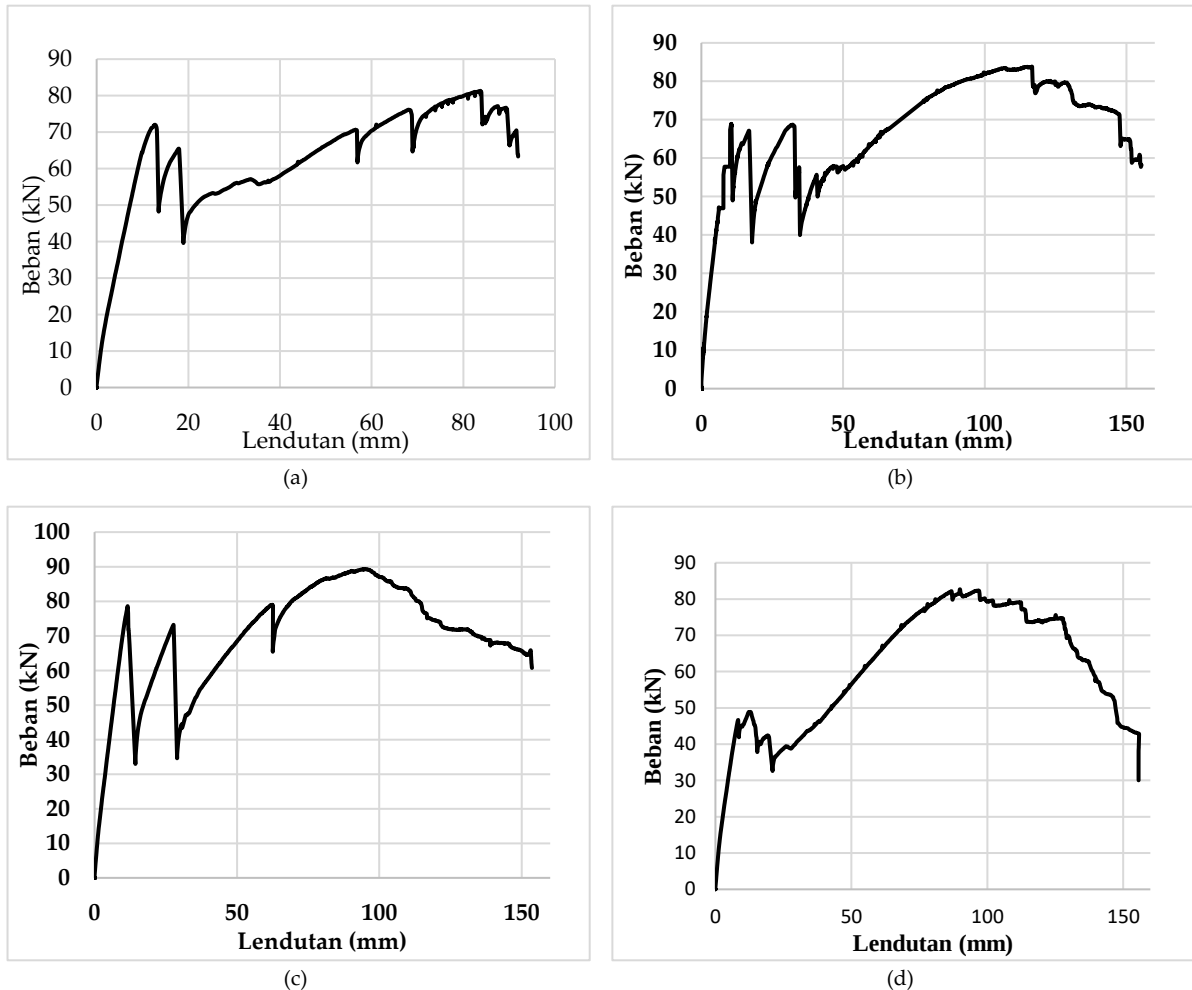
Hasil Pengujian Benda Uji Pendahuluan

Data yang disajikan dalam subbab ini meliputi data sifat fisik dan mekanik kayu dan kuat tekan beton. Dari hasil pengujian pendahuluan pada kayu akan digunakan dalam menentukan mutu kelas kayu, proses pembuatan balok uji untuk menentukan kadar air dalam proses pengempaan yang disyaratkan serta digunakan untuk membandingkan hasil kuat lentur, kuat geser kayu serta perekat laminasi secara teoretis dan eksperimental.

Tabel 2. Hasil pengujian pendahuluan

Pengujian	Hasil	Satuan
Berat jenis	0,69	gr/cm ³
Kerapatan	0,78	gr/cm ³
Kadar air	11,63	%
Kuat lentur	181,53	MPa
Kuat tarik sejajar serat	106,57	MPa
Kuat tekan sejajar serat	14,16	MPa
Kuat tekan tegak lurus kayu	13,03	MPa
Kuat geser sejajar serat	6,15	MPa
Kekerasan radial	7,12	MPa
Kekerasan tangensial	7,30	MPa
Kekerasan longitudinal	8,26	MPa
Kuat geser perekat	4,92	MPa
Kuat tekan beton rata-rata	22	MPa

Hasil Pengujian Lentur Balok Komposit



Gambar 3. Benda uji BN (a)Tanpa perkuatan CFRP, (b)Perkuatan CFRP 1 lapis, (c)Perkuatan CFRP 2 lapis, (d)Perkuatan CFRP 3 lapis

Analisis Energi Serap Balok Komposit

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, diperoleh data nilai energi serap untuk

masing-masing benda uji sebagai berikut:

Tabel 3. Hasil analisis energi serap balok	
Kode Benda Uji	Energi Serap (Joule)
BN	5773,27
BFRP1	1692,92
BFRP2	1843,12
BFRP3	451,58

PEMBAHASAN

Nilai energi serap tertinggi dicatat pada specimen BN sebesar 5773,27 Joule (tabel 3). Hal ini menunjukkan bahwa tanpa adanya perkuatan eksternal, balok cenderung menunjukkan deformasi plastis yang besar sebelum mencapai kegagalan. Meskipun energi yang diserap tinggi dapat dikaitkan dengan perilaku daktil yang baik, di sisi lain, nilai ini

juga mengindikasikan bahwa struktur tersebut belum mengalami peningkatan kekakuan yang mungkin diperlukan dalam aplikasi struktural yang lebih kritis.

Pemasangan satu lapis CFRP secara signifikan mengubah mekanisme deformasi balok. Nilai energi serap menurun secara drastis menjadi 1692,92 Joule (tabel 3). Penurunan energi ini mengindikasikan bahwa penambahan satu lapis CFRP meningkatkan kekakuan

dan kekuatan struktural, tetapi juga mengurangi kapasitas balok untuk mengalami deformasi plastis dalam jumlah besar. Meskipun CFRP cenderung meningkatkan kekakuan struktural, data grafik hasil uji menunjukkan bahwa tidak terdapat peningkatan signifikan dalam kapasitas beban maksimum, yang hanya berada pada rentang 80–90 kN untuk seluruh variasi benda uji. Hal ini menegaskan bahwa penguatan dengan CFRP lebih berpengaruh terhadap perubahan mekanisme deformasi daripada peningkatan kekuatan beban puncak.

Dengan dua lapis perkuatan, nilai energi serap sedikit meningkat menjadi 1843,12 Joule dibandingkan specimen BFRP1. Penambahan lapisan kedua ini menunjukkan bahwa terdapat sedikit peningkatan dalam kemampuan energi serap, kemungkinan karena peningkatan distribusi tegangan atau adanya perbaikan dalam mekanisme retak yang terkendali. Namun, nilai ini masih jauh lebih rendah dibandingkan specimen BN, yang mengindikasikan adanya *trade-off* antara peningkatan kekuatan dan kapasitas untuk menyerap energi.

Pemasangan tiga lapis CFRP menghasilkan nilai energi serap yang sangat rendah, yaitu 451,589 Joule (tabel 3). Nilai ini menunjukkan bahwa penggunaan tiga lapis perkuatan secara berlebihan menyebabkan struktur menjadi sangat kaku dan rentan mengalami kegagalan secara mendadak (*fragile failure*). Pengurangan energi serap yang ekstrem ini menunjukkan bahwa, meskipun kekuatan beban mungkin mengalami peningkatan, mekanisme deformasi plastis pada balok telah berkurang secara signifikan sehingga struktur tidak mampu menyerap energi secara optimal dalam kondisi beban kritis.

Data menunjukkan bahwa walaupun penggunaan CFRP (baik 1 lapis, 2 lapis, maupun 3 lapis) bertujuan untuk meningkatkan kekuatan beban struktural, hal ini juga mengorbankan kapasitas energi serap. Perubahan mekanisme deformasi yang terjadi mengindikasikan bahwa peningkatan kekakuan melalui perkuatan CFRP mengurangi kemampuan balok untuk mengalami deformasi plastis yang merupakan faktor kunci daktilitas. Keseimbangan antara peningkatan kekuatan dan kemampuan penyebaran retak harus dioptimalkan agar balok tidak hanya kuat tetapi juga aman terhadap kegagalan mendadak.

Hasil pengujian pada BFRP1 dan BFRP2 menunjukkan bahwa penambahan lapisan pertama dan kedua sudah memberikan peningkatan tertentu dalam mekanisme retak yang terkendali. Namun, penambahan lapisan ketiga (BFRP3) tampaknya menghasilkan efek yang kontra-produktif, yaitu sangat

menurunkan energi serap dan mengindikasikan perilaku gagal yang cenderung brittle. Oleh karena itu, dalam aplikasi desain jembatan komposit, pemilihan jumlah lapisan CFRP harus mempertimbangkan *trade-off* antara kekuatan tambahan dan pengurangan kapasitas penyerapan energi, dengan memperhatikan tujuan akhir peningkatan keselamatan dan ketangguhan struktur.

Berdasarkan hasil yang diperoleh, hipotesis pertama yang menyatakan bahwa CFRP dapat meningkatkan energi serap balok tidak terbukti, karena terjadi penurunan energi serap secara signifikan dibandingkan balok tanpa CFRP. Sementara itu, hipotesis kedua terbukti sebagian, di mana penggunaan dua lapis CFRP memberikan nilai energi serap yang lebih tinggi dibandingkan satu lapis terbukti secara relatif, karena energi serap BFRP2 (1843,12 J) lebih tinggi dibanding BFRP1 (1692,92 J) meskipun nilainya tetap jauh di bawah balok tanpa perkuatan.

Analisis Keruntuhan Balok

Kerusakan pada balok komposit kayu Kamper laminasi dengan pelat beton bertulang secara umum terjadi pada daerah lentur, sesuai dengan desain pengujian yang difokuskan pada wilayah sepertiga bentang, tepatnya di tengah panjang balok uji. Berdasarkan hasil pengujian lentur, mekanisme kegagalan yang diamati pada balok komposit dapat dikategorikan ke dalam dua jenis, yaitu:

Pertama, Ketika balok komposit kayu laminasi-pelat beton bertulang diberikan beban lentur, keruntuhan terjadi secara mendadak setelah serat-serat kayu mencapai tegangan tarik maksimum. Kerusakan yang diamati meliputi *crushing* (keruntuhan tekan) dan retak-retak kecil pada sayap beton di bagian bawah. Hal ini disebabkan oleh tegangan tekan yang dominan pada sisi atas balok komposit, di mana garis netral berada di bawah permukaan bawah beton atau di dalam material kayu. Kondisi ini menyebabkan beton mencapai tegangan tekan maksimum lebih cepat daripada kayu, sehingga regangan beton melampaui kapasitas dukungnya dan mengakibatkan keruntuhan mendadak yang ditandai dengan kehancuran beton (*crushing*) serta retak pada area tarik beton.

Dari hasil pengamatan visual, tidak ditemukan indikasi kerusakan signifikan pada elemen penghubung geser, seperti geseran (*slip*) atau pemisahan (*uplift*) antara kayu dan beton. Hal ini mengindikasikan bahwa elemen penghubung geser memiliki kekuatan dan kinerja yang memadai dalam membentuk aksi komposit. Fenomena ini diilustrasikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Pola Retak Pelat Beton Balok Komposit

Kedua, seluruh balok kayu gagal akibat lentur, yang kemudian disertai dengan kegagalan geser. Dari pengamatan pada saat pengujian kuat lentur keruntuhan geser pada balok laminasi kerusakan terjadi pada perekatan antarlaminasi. Balok laminasi mengalami kegagalan geser pada beban maksimum, pola kerusakan terjadi mulai dengan retak di daerah

pembebanan kemudian pada pembebanan berikutnya terjadi retak horizontal (*initial crack*) pada lapisan lamina, yang selanjutnya terjadi kegagalan geser pada garis perekat yang dimulai dari bagian tepi bentang ke tengah bentang. Jenis kerusakan ini diperlihatkan pada Gambar 5.



(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 5. Pola Retak dan Mode Keruntuhan (a)Balok Uji BN, (b)Balok Uji BFRP1, (c)Balok uji BFRP2 (d)Balok uji BFRP3

Akibat balok dibebani, timbul tegangan dan regangan di seluruh bagian balok. Momen lentur yang terjadi mengakibatkan bagian bawah balok mengalami gaya tarik dan bagian atas balok mengalami gaya tekan. Akibat adanya gaya tekan dan gaya tarik yang saling berlawanan pada garis perekat, pada beberapa bagian permukaan bidang rekat mengalami internal stress sehingga terjadi gelincir antarlaminasi ketika balok dibebani. Hal tersebut lebih disebabkan oleh adanya kekurangsempurnaan dalam proses perekatan pada

saat proses perekatan dalam pembuatan balok laminasi memengaruhi kualitas dari balok laminasi yang dihasilkan

Ketika tegangan geser pada kayu lebih besar dibandingkan dengan tegangan geser pada perekat, akan terjadi kegagalan geser pada garis perekat. Sebagaimana dari hasil pengujian pendahuluan diperoleh kapasitas geser sejajar serat kayu sebesar 6,15 MPa adapun kapasitas geser perekat 4,19 MPa. Kegagalan geser pada garis perekat (Gambar 6)

berdasarkan hasil analisis diperoleh tegangan geser yang terjadi sebesar 4,46 MPa dan pada kayu hanya mencapai tegangan geser 5,07 MPa jauh lebih besar dibandingkan dengan pengujian pendahuluan dengan demikian kayu belum mengalami gagal geser. Nilai tegangan geser sebesar 4,46 MPa diperoleh dari analisis berdasarkan hasil uji lentur dengan pendekatan

distribusi tegangan nominal pada area kritis menggunakan rumus $\tau = (V.Q)/(I.b)$ dengan V adalah gaya geser maksimum dari hasil uji, Q adalah statika momen dari bagian atas penampang terhadap sumbu netral, I momen inersia, dan b adalah lebar penampang perekat.



Gambar 6. Kerusakan Sepanjang Garis Perekat Balok Laminasi

Kerusakan geser balok kayu laminasi yang disebabkan oleh gelincir horizontal pada garis perekat antar lamina menyebabkan kekuatan balok kayu laminasi belum melampaui kekuatan bahan dasar kayu yang digunakan. Dengan demikian, kekuatan dan kekakuan balok kayu laminasi belum optimal dalam memikul beban maksimum.

Pengamatan visual menunjukkan tidak adanya pelepasan (*debonding*) pada lapisan CFRP, yang mengindikasikan bahwa panjang perlekatan CFRP terhadap permukaan beton telah melebihi panjang ikatan efektif. Berdasarkan pendekatan yang dikemukakan oleh Diab dan Farghal (2014), panjang ikatan efektif adalah jarak minimum yang diperlukan untuk mentransfer tegangan maksimum melalui perekat. Dalam penelitian ini, panjang perkuatan CFRP telah dirancang melebihi panjang efektif teoritis, sehingga transfer tegangan berlangsung optimal tanpa pelepasan ikatan.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Penelitian ini mengevaluasi pengaruh perkuatan CFRP terhadap energi serap balok komposit kayu laminasi-beton. Hasil menunjukkan bahwa meskipun CFRP meningkatkan kekakuan dan kekuatan balok, penggunaannya justru menurunkan kapasitas energi serap, terutama pada jumlah lapisan yang lebih banyak. Hal ini mengindikasikan bahwa peningkatan kekakuan berbanding terbalik dengan daktilitas, yang dapat berimplikasi pada potensi kegagalan getas. Oleh karena itu, pemilihan jumlah lapisan CFRP harus disesuaikan dengan kebutuhan struktural untuk memastikan keseimbangan antara

kekuatan dan kemampuan deformasi dalam menghadapi beban kerja.

Saran

Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk menentukan jumlah lapisan CFRP yang optimal agar peningkatan kekuatan tidak mengorbankan daktilitas dan energi serap balok. Uji eksperimental tambahan dengan variasi lapisan yang lebih luas dapat membantu menemukan keseimbangan optimal. Untuk memberikan gambaran yang lebih komprehensif terhadap keefektifan CFRP, kajian lanjutan dengan metode pembebanan siklik atau dinamis sangat disarankan. Hal ini akan memperluas pemahaman mengenai kapasitas struktur dalam menghadapi beban berulang seperti yang terjadi pada jembatan sesungguhnya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada PT Fyfe Fibwrap Indonesia atas dukungan dan kontribusinya sebagai sponsor utama dalam penyediaan material CFRP untuk penelitian ini. Bantuan yang diberikan, baik dalam bentuk material maupun wawasan teknis terkait aplikasi CFRP, sangat berperan dalam kelancaran penelitian dan pencapaian hasil yang lebih optimal.

DAFTAR PUSTAKA

Ali, M. A., & Jumaat, M. Z. (2016). Flexural behaviour and energy absorption capacity of reinforced concrete beams strengthened with CFRP laminates. *Construction and Building Materials*, 124, 1033-1044.

- Aryadi, A., Sofyan, M., & Ampangallo, B. A. (2023, November). Konstruksi balok kayu dengan perkuatan CFRP. In *Prosiding Seminar Nasional Pemanfaatan Sains dan Teknologi Informasi* (Vol. 1, No. 1, pp. 103–108).
- Diab, H. M., & Farghal, O. A. (2014). Bond strength and effective bond length of FRP sheets/plates bonded to concrete considering the type of adhesive layer. *Composites Part B: Engineering*, 58, 618–624. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.11.045>
- Fossetti, M., Minafò, G., & Papia, M. (2015). Flexural behaviour of glulam timber beams reinforced with FRP cords. *Construction and Building Materials*, 95, 54–64. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.071>
- Gereke, T., Witter, J., & Schramm, M. (2018). Energy Absorption Capacity of Timber-Concrete Composite Beams. *Journal of Structural Engineering*, 144(1), 04017180.
- Glišović, I., Stevanović, B., & Todorović, M. (2016). Flexural reinforcement of glulam beams with CFRP plates. *Materials and Structures*, 49, 2841–2855. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0695-x>
- Hakiki, R., & Mujiman. (2020). Flexural behavior of glulam-concrete composite beams reinforced using CFRP sheets. In *International Seminar of Science and Applied Technology (ISSAT 2020)* (pp. 233–238). Atlantis Press. <https://doi.org/10.2991/assehr.k.201221.039>
- Mujiman, M., Igustiany, F., & Hakiki, R. (2020). Flexural strengthening of composite bridge glued laminated timber beams–concrete plate using CFRP layers. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 830(2), 022047. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/830/2/022047>
- Prachasaree, W., Limkatanyu, S., & Yai, H. (2013). Performance evaluation of FRP reinforced para wood glued laminated beams. *Wood Research*, 58(2), 251–264.
- Rezeki, P. M. S., & Rachma, I. N. (2023). Analisis geser pada balok komposit kayu Kamper laminasi baut perekat–beton bertulang dengan perkuatan CFRP. *Jurnal Konstruksi*, 21(2), 275–280.
- Rochman, T., Soehardjono, A., & Zacoeb, A. (2013). Sebuah solusi material baru di bidang jembatan, FRP Taufiq-Girder: Konsep dan perilaku. *Prokons: Jurnal Teknik Sipil*, 7(1), 73–82.
- Rubé, A., & Doudak, G. (2024). Enhancing energy dissipation in glued-laminated timber assemblies using boundary connections. *Structures*, 65, 106744. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106744>
- Vahedian, A., Shrestha, R., & Crews, K. (2019). Experimental and analytical investigation on CFRP strengthened glulam laminated timber beams: Full-scale experiments. *Composites Part B: Engineering*, 164, 377–389. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.11.116>
- Yoresta, F. S., & Sidiq, M. I. (2016). Pengaruh variasi bentuk kombinasi shear connector terhadap perilaku lentur balok komposit beton–kayu. *Jurnal Rekayasa Sipil (JRS-Unand)*, 12(2).
- Lu, W., Ling, Z., Geng, Q., Liu, W., Yang, H., & Yue, K. (2015). Study on flexural behaviour of glulam beams reinforced by Near Surface Mounted (NSM) CFRP laminates. *Construction and Building Materials*, 91, 23–31. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.121>