

Balok Kayu Sengon Laut dengan Perkuatan CFRP pada Serat Tarik dan Tekan Ditinjau terhadap Pembebanan Lentur

Aditya Purnama*, Danang Hadi Nugroho

Universitas Tulungagung, Kabupaten Tulungagung 66233, Indonesia

ARTICLE INFO

Kata Kunci:

Kayu Sengon Laut, CFRP, Tegangan Lentur, Lendutan, Analisis Numerik.

***Correspondence email:**

adityapurnama@unita.ac.id

Submitted: 23 Desember 2025

Revised: 03 Januari 2026

Accepted: 17 Januari 2026

Published: 03 Februari 2026

ABSTRAK

Peningkatan kebutuhan hunian yang ekonomis dan ramah lingkungan mendorong pemanfaatan material lokal seperti kayu sengon laut (*Falcataria moluccana*) sebagai elemen struktural bangunan. Kayu sengon laut memiliki pertumbuhan cepat dan relatif tahan terhadap hama, namun kekuatan lenturnya tergolong rendah. Untuk meningkatkan kinerjanya, penelitian ini menganalisis pengaruh penggunaan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) sebagai material perkuatan pada balok kayu sengon laut terhadap pembebanan lentur. Penelitian ini diawali dengan pengujian tarik material kayu sengon laut, CFRP, dan *epoxy resin* di laboratorium untuk memperoleh nilai kuat tarik, *elongation*, serta modulus elastisitas. Data hasil uji kemudian digunakan sebagai input *material properties* dalam analisis numerik menggunakan program Midas Gen 2019. Analisis dilakukan pada dua model balok, yaitu balok tanpa perkuatan dan balok dengan perkuatan CFRP pada sisi tarik dan tekan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa balok kayu sengon laut dengan perkuatan CFRP memiliki peningkatan kapasitas lentur dan kekakuan yang signifikan dibandingkan balok tanpa perkuatan. Tegangan maksimum berkurang, lendutan menurun, serta distribusi tegangan menjadi lebih merata. Lapisan CFRP membantu menahan gaya tarik dan tekan sehingga memperlambat munculnya retak dan meningkatkan daya dukung struktur secara keseluruhan. Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa penggunaan CFRP efektif dalam meningkatkan kekuatan lentur dan mengurangi lendutan pada balok kayu sengon laut. Dengan karakteristiknya yang ringan, kuat, dan mudah diaplikasikan, CFRP berpotensi menjadi solusi inovatif untuk memperkuat material kayu sengon laut dalam pembangunan hunian yang ekonomis dan berkelanjutan.

ABSTRACT

Keywords:

Sengon Laut Wood, CFRP, Flexural Stress, Deflection, Numerical Analysis.

*The increasing demand for economical and environmentally friendly housing has driven the use of local materials such as sengon laut (*Falcataria moluccana*) as structural elements in buildings. Sengon laut is a fast-growing and relatively pest-resistant species, but its flexural strength is relatively low. To improve its performance, this study analyzed the effect of using Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) as a reinforcing material in sengon laut beams under flexural loading. The study began with laboratory tensile testing of sengon laut, CFRP, and epoxy resin to obtain tensile strength, elongation, and modulus of elasticity. The test data were then used as input for material properties in a numerical analysis using the Midas Gen 2019 program. The analysis was conducted on two beam models: an unreinforced beam and a beam with CFRP reinforcement in both tension and compression. Simulation results showed that the sengon laut beam with CFRP reinforcement had significantly increased flexural capacity and stiffness compared to the unreinforced beam. Maximum stress was reduced, deflection was reduced, and stress distribution was more even. The CFRP layer helps resist tensile and compressive forces, thereby slowing crack formation and increasing the overall load-bearing capacity of the structure. These results conclude that the use of CFRP is effective in increasing flexural strength and reducing deflection in sengon laut wood beams. With its lightweight, strong, and easy-to-apply characteristics, CFRP has the potential to be an innovative solution for reinforcing sengon laut wood in economically and sustainably constructed residential buildings.*

PENDAHULUAN

Pertumbuhan jumlah penduduk yang semakin pesat menimbulkan kebutuhan rumah tinggal yang juga meningkat. Kondisi ini menuntut tersedianya bangunan hunian dengan biaya terjangkau, terlebih di tengah situasi perekonomian yang tidak stabil. Salah satu alternatif material konstruksi yang murah, ringan, dan mudah diperoleh adalah kayu. Namun, pemanfaatan kayu sebagai bahan konstruksi memerlukan inovasi agar dapat memenuhi tuntutan kekuatan dan keawetan struktur (Awaludin *et al.*, 2025).

Kayu sengon laut (*Falcataria moluccana*) menjadi salah satu pilihan material yang potensial karena ketersediaannya yang melimpah di Indonesia. Sengon laut dikenal memiliki pertumbuhan yang sangat cepat, dapat dipanen dalam usia 5–7 tahun sehingga mendukung keberlanjutan suplai bahan baku konstruksi (Yosafat Aji Pranata, Anang Kristianto and Novi, 2024). Hal ini menjadikan sengon sebagai salah satu jenis kayu cepat tumbuh yang berperan penting dalam memenuhi kebutuhan kayu struktural dalam waktu singkat.

Selain pertumbuhannya yang cepat, kayu sengon laut memiliki keunggulan lain yaitu relatif tahan terhadap serangan hama tertentu, khususnya rayap kayu kering yang dalam istilah lokal dikenal sebagai hama nonol. Faktor ini menambah nilai lebih sengon laut sebagai bahan konstruksi karena dapat mengurangi biaya pemeliharaan dan perawatan jangka panjang. Dengan demikian, sengon laut berpotensi menjadi bahan bangunan ramah lingkungan, ekonomis, dan berdaya saing tinggi.

Meski demikian, kayu sengon laut memiliki kelemahan pada kekuatan mekanisnya, terutama dalam menahan beban lentur. Untuk itu, berbagai metode perkuatan diperlukan. Salah satu teknologi yang saat ini berkembang adalah penggunaan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP). Material CFRP dikenal memiliki rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi, tahan korosi, serta efektif meningkatkan kapasitas lentur kayu maupun beton (Awaludin *et al.*, 2025).

Kajian lokal menunjukkan bahwa penerapan CFRP maupun teknik laminasi pada kayu sengon laut dapat meningkatkan sifat mekanisnya, termasuk kapasitas lentur (Yosafat Aji Pranata, Anang Kristianto and Novi, 2024). Hal ini sejalan dengan tren global di mana berbagai penelitian terhadap kayu cepat tumbuh seperti eucalyptus dan poplar juga menunjukkan keberhasilan penggunaan CFRP sebagai perkuatan struktural. Misalnya, penelitian di Brasil menunjukkan bahwa balok glulam eucalyptus yang diperkuat dengan CFRP mengalami peningkatan kekakuan dan kekuatan lentur secara signifikan (De Jesus, Pinto and Morais, 2012). Demikian pula, penelitian di Eropa pada kayu poplar menemukan bahwa penambahan CFRP mampu memperbaiki sifat mekanis kayu cepat tumbuh sehingga dapat digunakan untuk elemen struktural berukuran besar (Fiorelli and Dias, 2011).

Selain itu, penelitian pada material lain seperti beton bertulang, penggunaan CFRP dalam perkuatan beton dapat meningkatkan sifat mekanik beton, yaitu kuat tekan, tarik belah, tarik lentur, dan kuat geser, yang menunjukkan potensi besar untuk memperbaiki kinerja struktur beton (Ashad *et al.*, 2024).

Dengan demikian, penelitian mengenai balok kayu sengon laut dengan perkuatan CFRP pada serat tarik dan tekan ditinjau terhadap pembebanan lentur tidak hanya relevan bagi kebutuhan lokal di Indonesia dalam menghadirkan material bangunan yang murah dan berkelanjutan, tetapi juga selaras dengan upaya internasional dalam mengoptimalkan pemanfaatan kayu cepat tumbuh melalui teknologi material maju.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh penggunaan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) terhadap peningkatan kapasitas lentur balok kayu sengon laut (*Albizia falcataria*), serta untuk membandingkan perilaku struktural antara balok kayu sengon laut yang diperkuat CFRP dengan balok yang tidak menggunakan perkuatan. Melalui analisis ini diharapkan dapat diperoleh pemahaman yang lebih mendalam mengenai kontribusi CFRP dalam meningkatkan kekuatan, kekakuan, serta ketahanan struktur kayu terhadap beban lentur.

Manfaat dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata bagi pengembangan ilmu pengetahuan di bidang rekayasa struktur, khususnya dalam pemanfaatan kayu yang memiliki pertumbuhan cepat seperti sengon laut sebagai material alternatif konstruksi. Penelitian ini juga menambah kajian akademik mengenai efektivitas material komposit CFRP sebagai teknologi perkuatan struktural pada kayu. Selain itu, hasil penelitian ini dapat menjadi rujukan bagi penelitian selanjutnya yang berfokus pada peningkatan performa kayu cepat tumbuh melalui penguatan dengan material modern. Secara praktis, penelitian ini menawarkan alternatif solusi material konstruksi yang ekonomis, ramah lingkungan, dan mudah diperoleh, sehingga berpotensi mendukung penyediaan hunian terjangkau di tengah kondisi ekonomi yang sulit. Tidak hanya itu, penelitian ini juga memberikan gambaran teknis bagi praktisi konstruksi mengenai penerapan kayu sengon laut yang diperkuat CFRP pada elemen struktural bangunan. Lebih jauh, penelitian ini mendukung kebijakan pembangunan berkelanjutan melalui optimalisasi pemanfaatan sumber daya kayu cepat tumbuh yang memiliki nilai tambah setelah diperkuat dengan teknologi material komposit modern.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental dan analisis numerik. Eksperimen dilakukan untuk memperoleh sifat mekanis dasar material kayu sengon laut dan CFRP. Analisis numerik dilakukan menggunakan perangkat lunak Midas Gen 2019 untuk mengevaluasi perilaku balok kayu sengon laut dengan dan tanpa perkuatan CFRP terhadap beban lentur.

Penelitian ini diawali dengan studi literatur yang bertujuan untuk memahami karakteristik mekanis kayu sengon laut dari berbagai penelitian terdahulu, menelaah metode perkuatan struktur kayu menggunakan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP), dan mempelajari prosedur analisis numerik menggunakan perangkat lunak Midas Gen 2019. Langkah selanjutnya adalah persiapan material yang meliputi kayu sengon laut (*Falcataria moluccana*) yang dipotong sesuai ukuran standar uji tarik, material CFRP berupa lembaran atau plat yang juga dibuatkan spesimen uji tarik, serta epoxy resin yang berfungsi sebagai matriks dan perekat antara kayu dan CFRP. Setelah semua material siap,

dilakukan pengujian sifat mekanis untuk menentukan parameter dasar yang diperlukan dalam analisis numerik. Pengujian pada kayu sengon laut meliputi uji kuat tarik sejajar serat dan uji modulus elastisitas. Untuk CFRP, dilakukan uji kuat tarik dan pengukuran modulus elastisitas, sedangkan epoxy resin diuji kuat tariknya dan nilai modulus elastisitasnya. Seluruh hasil uji ini kemudian digunakan sebagai input utama dalam pemodelan numerik.

Penelitian ini menggunakan analisis numerik sebagai metode utama untuk menganalisis perilaku lentur balok kayu sengon laut dengan dan tanpa perkuatan CFRP. Analisis numerik memberikan fleksibilitas yang tinggi dalam memodelkan kondisi pembebanan dan konfigurasi perkuatan yang kompleks tanpa harus membuat spesimen fisik dalam jumlah banyak, dan analisis numerik mampu memberikan visualisasi perilaku struktur secara detail, seperti distribusi tegangan, deformasi, serta pola kerusakan potensial yang sulit diamati secara langsung pada pengujian fisik. Hal ini membantu peneliti memahami mekanisme kerja CFRP dalam memperkuat balok kayu, termasuk bagaimana tegangan berpindah dari kayu ke lapisan CFRP saat menerima beban lentur. Selain itu pengujian eksperimental membutuhkan sumber daya yang cukup besar, baik dari segi biaya, waktu, maupun fasilitas laboratorium. Proses pembuatan balok uji, pemasangan perkuatan CFRP, serta kalibrasi alat uji lentur skala penuh memerlukan peralatan khusus seperti mesin uji universal kapasitas besar dan sistem pengukuran lendutan presisi tinggi, yang tidak selalu tersedia di setiap laboratorium.

Analisis numerik dapat menjadi dasar awal (preliminary study) yang berguna untuk memprediksi perilaku struktur secara lebih luas, sehingga pengujian eksperimental di masa depan dapat dilakukan dengan desain yang lebih efisien dan terarah. Tahap berikutnya adalah analisis numerik menggunakan Midas Gen 2019. Pada tahap ini, dibuat dua model balok, yaitu balok kayu sengon laut tanpa perkuatan dan balok dengan perkuatan CFRP pada sisi tariknya. Data sifat mekanis hasil pengujian dimasukkan ke dalam program untuk memodelkan perilaku struktural yang lebih akurat. Pembebanan diberikan dalam bentuk beban lentur dengan dua titik beban di tengah bentang, sedangkan kondisi tumpuan dimodelkan sebagai tumpuan sederhana (sendi-rol). Selanjutnya dilakukan simulasi numerik untuk masing-masing model guna memperoleh nilai tegangan, lendutan, dan kapasitas lentur. Tahap akhir dari alur penelitian ini adalah analisis data, yaitu membandingkan kinerja kedua model balok dan menyajikan grafik hubungan beban-lendutan untuk melihat pengaruh perkuatan CFRP secara lebih jelas.

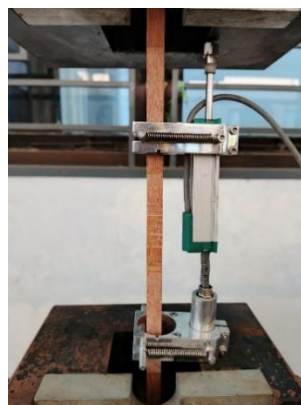
Hasil utama dari penelitian ini meliputi nilai kuat lentur balok kayu sengon laut tanpa perkuatan sebagai acuan dasar perilaku material. Selain itu, diperoleh pula nilai kuat lentur balok kayu sengon laut yang telah diberi perkuatan CFRP sehingga dapat dilihat peningkatan kapasitas lenturnya. Analisis numerik berbasis MIDAS GEN 2019 menjadi bagian penting dalam validasi performa struktural kedua model balok tersebut. Dari seluruh hasil penelitian, dihasilkan rekomendasi terkait potensi penggunaan kayu sengon laut yang diperkuat CFRP sebagai material alternatif untuk aplikasi struktural, terutama pada konstruksi yang memerlukan elemen ringan, ekonomis, dan memiliki kekuatan yang memadai.

Peralatan dan Benda Uji Penelitian

Mesin uji tarik digunakan sebagai peralatan utama dalam pengujian sifat mekanis material, termasuk kayu sengon laut, CFRP, dan *epoxy resin*. Mesin yang digunakan memiliki kapasitas 500 kN dan dilengkapi dengan *extensometer* berkemampuan stroke maksimum 50 mm, sehingga mampu merekam perubahan regangan secara akurat selama proses pembebanan. Peralatan ini berada di Laboratorium Teknik Sipil Universitas Tulungagung dan berfungsi memastikan proses uji tarik berlangsung sesuai standar. Selain itu, *extensometer* digunakan untuk mengukur regangan yang terjadi pada benda uji selama pembebanan tarik berlangsung. Alat ini ditempatkan langsung pada spesimen sehingga data deformasi yang dihasilkan lebih presisi, terutama pada tahap awal peregangan material. Mesin uji tarik yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 1. Sedangkan alat *extensometer* dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 1. Mesin Uji Tarik



Gambar 2. Extensometer

Spesimen uji yang digunakan dalam penelitian ini disiapkan berdasarkan standar pengujian masing-masing material, dimana masing-masing material dibuatkan 3 spesimen uji (S1, S2, S3). Kayu sengon laut diuji berdasarkan SNI 03-3399-1994 untuk pengujian tarik kayu. Material CFRP diuji sesuai dengan standar ASTM D3039/D3039M yang digunakan secara internasional untuk penentuan kuat tarik dan modulus elastisitas material komposit berbasis serat. Sementara itu, *epoxy resin* diuji sesuai ASTM D638-02a yang digunakan untuk pengujian tarik material polimer. Spesimen kayu sengon laut dapat dilihat pada Gambar 3. Spesimen CFRP dapat dilihat pada Gambar 4. Spesimen *epoxy resin* dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 3. Spesimen Kayu Sengon Laut

Sumber: Data Olahan (2025)



Gambar 4. Spesimen CFRP

Sumber: Data Olahan (2025)

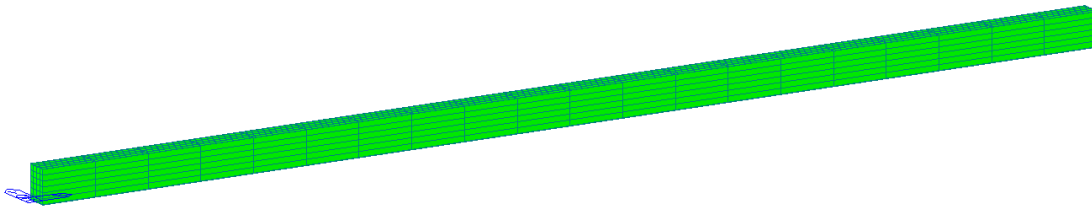


Gambar 5. Spesimen *Epoxy Resin*

Sumber: Data Olahan (2025)

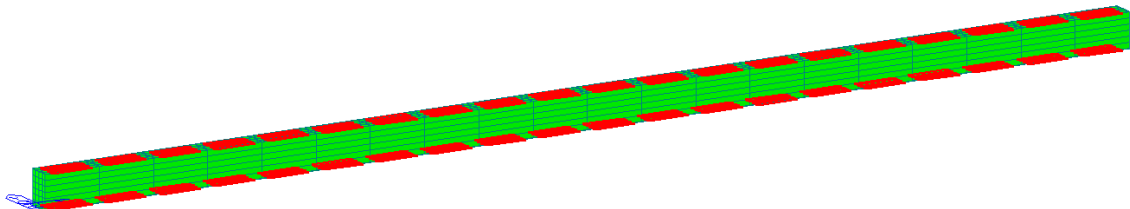
Analisis Numerik

Proses analisis numerik balok kayu sengon laut dilakukan dengan bantuan perangkat lunak Midas Gen 2019 yang digunakan untuk membandingkan respons struktur antara balok tanpa perkuatan dan balok yang diberi perkuatan CFRP. Model balok dirancang dengan ukuran lebar 8 cm, tinggi 12 cm, dan panjang 400 cm. Pada varian balok yang diperkuat, dipasang lapisan CFRP setebal 2 mm di bagian atas dan bawah sepanjang bentang balok, sehingga material komposit tersebut dapat meningkatkan kapasitas lentur struktur. CFRP sebagai perkuatan diasumsikan dapat melekat dengan baik pada kayu karena rekatan menggunakan *epoxy resin* yang sangat kuat. Kedua model balok, baik yang tidak diperkuat maupun yang diberi perkuatan, dibangun dengan bentuk geometri dan konfigurasi pemodelan yang sama agar hasil perbandingan memiliki tingkat ketelitian yang tinggi. Gambar 6 memperlihatkan model balok kayu sengon laut tanpa perkuatan CFRP, sedangkan Gambar 7 menunjukkan model balok yang telah diperkuat menggunakan CFRP.



Gambar 6. Pemodelan Balok Kayu Sengon Laut Tanpa Perkuatan CFRP

Sumber: Data Olahan (2025)



Gambar 7. Pemodelan Balok Kayu Sengon Laut Menggunakan Perkuatan CFRP

Sumber: Data Olahan (2025)

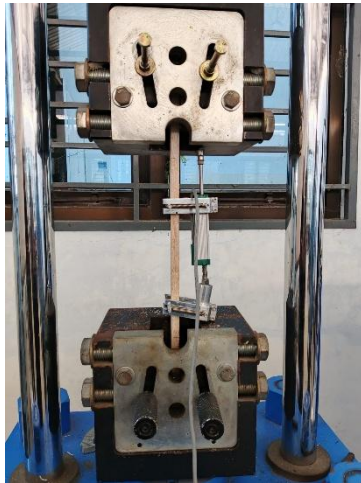
Pembebanan pada masing-masing model dilakukan dengan beban terpusat yang ditempatkan pada dua titik di tengah bentang. Total beban yang digunakan adalah 450 kg, kemudian dibagi menjadi dua titik pembebanan yang selanjutnya dibagi lagi ke dalam lima titik elemen hingga setiap titik finite element menerima beban 45 kg. Penetapan pola beban yang sama antara kedua model bertujuan untuk memastikan bahwa perbedaan respon struktur benar-benar disebabkan oleh adanya perkuatan CFRP, bukan akibat variasi pembebanan.

Untuk kondisi tumpuan, kedua model balok menggunakan asumsi tumpuan sendi-rol. Konfigurasi tumpuan ini dipilih karena umum digunakan dalam analisis struktur balok dan mampu menggambarkan kondisi dasar pembebanan lentur. Pengaturan tumpuan dibuat identik pada kedua model agar perbandingan perilaku masing-masing balok dapat dilakukan secara objektif. Dengan demikian, seluruh proses pemodelan mulai dari geometri, pembebanan, hingga kondisi tumpuan dirancang secara konsisten sehingga hasil analisis numerik dapat memberikan gambaran yang jelas mengenai pengaruh perkuatan CFRP terhadap respons lentur balok kayu sengon laut.

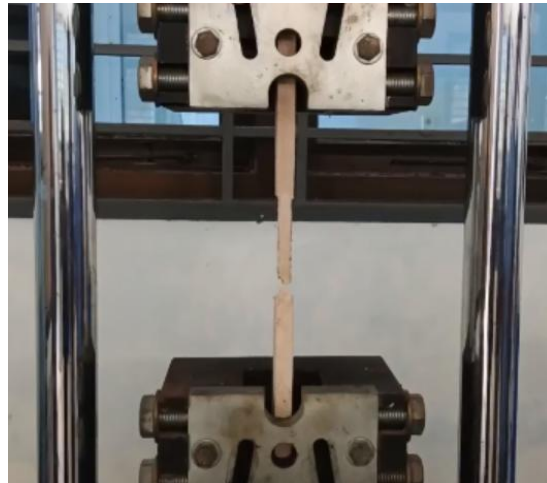
HASIL

Hasil Pengujian Tarik Spesimen Kayu Sengon Laut

Pengujian spesimen kayu sengon laut dilakukan dengan menggunakan mesin uji tarik seperti terlihat pada Gambar 8 dan ketika spesimen mengalami putus pada mesin uji tarik dapat dilihat pada Gambar 9.



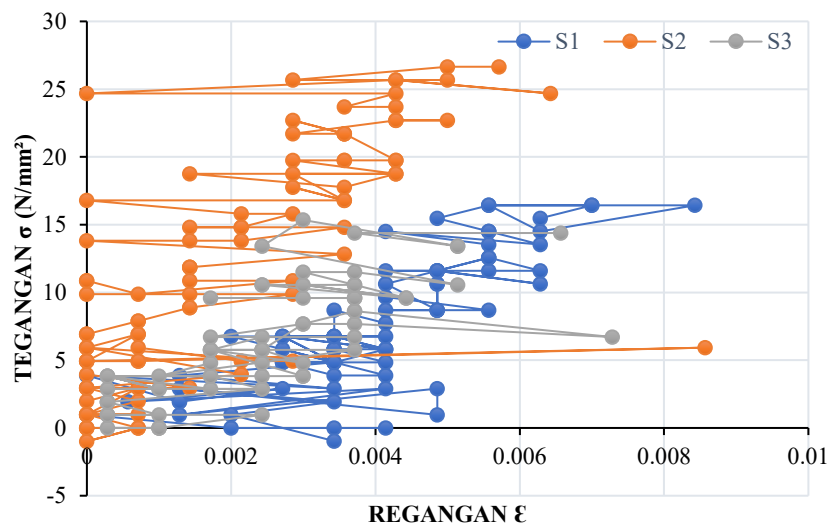
Gambar 8. Pemasangan Spesimen Kayu Sengon Laut pada Mesin Uji Tarik



Gambar 9. Spesimen Kayu Sengon Laut Mengalami Putus

Sumber: Data Olahan (2025)

Putusnya spesimen kayu sengon laut setelah dilakukan uji tarik dikarenakan kegagalan geser antar serat dan lepas serat, hal ini dikarenakan arah serat kayu tidak lurus sempurna. Data hasil dari pengujian tarik spesimen kayu sengon laut yang diperoleh dapat dilihat pada Gambar 10. Berdasarkan kurva tegangan-regangan tersebut diperoleh bahwa tegangan *ultimate* (f_u) rata-rata diperoleh sebesar 19 MPa dengan regangan *ultimate* (ϵ_u) rata-rata sebesar 0.0045 dan modulus elastisitas rata-rata kayu sengon laut 4464 MPa.



Gambar 10. Kurva Tegangan-Regangan Hasil Uji Tarik Spesimen Kayu Sengon Laut

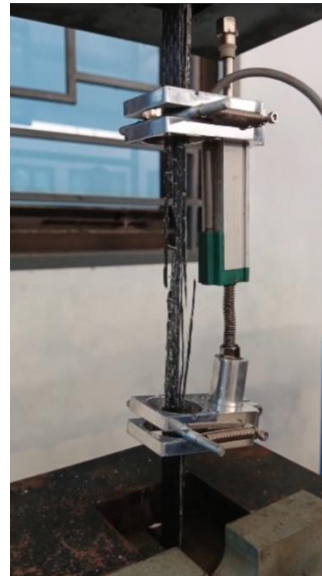
Sumber: Data Olahan (2025)

Hasil Pengujian Tarik Spesimen *Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)*

Pengujian spesimen CFRP dilakukan dengan menggunakan mesin uji tarik seperti terlihat pada **Gambar 11**. Gambar setelah benda uji dilakukan uji tarik dan putus dapat dilihat pada **Gambar 12**. Spesimen CFRP dibuat dari *Carbon Fiber* yang terdiri dari satu lapis serat *unidirectional* [0°] yang dicampur dengan *epoxy resin*.



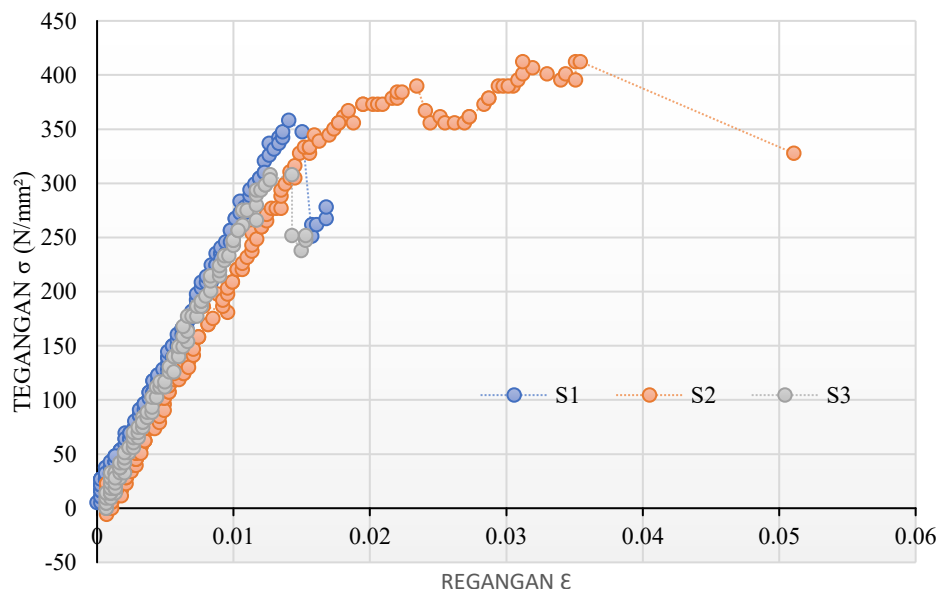
Gambar 11. Pemasangan Spesimen CFRP pada Mesin Uji Tarik



Gambar 12. Spesimen CFRP Mengalami Putus

Sumber: Data Olahan (2025)

Putusnya spesimen CFRP setelah dilakukan uji tarik dikarenakan kegagalan putus serat, hal ini dikarenakan *carbon fiber* sudah tidak mampu menahan gaya tarik. Data hasil dari pengujian tarik spesimen CFRP yang diperoleh dapat dilihat pada **Gambar 13**. Berdasarkan kurva tegangan-regangan tersebut diperoleh bahwa tegangan *ultimate* (f_u) rata-rata diperoleh sebesar 359 MPa dengan regangan *ultimate* (ϵ_u) sebesar 0.019 dan modulus elastisitas rata-rata CFRP 26820 MPa.



Gambar 13. Kurva Tegangan-Regangan Hasil Uji Tarik Spesimen CFRP

Sumber: Data Olahan (2025)

Hasil Pengujian Tarik Spesimen *Epoxy Resin*

Pengujian spesimen *Epoxy Resin* dilakukan dengan menggunakan mesin uji tarik seperti terlihat pada **Gambar 14**. Gambar setelah benda uji dilakukan uji tarik dan putus dapat dilihat pada **Gambar 15**.



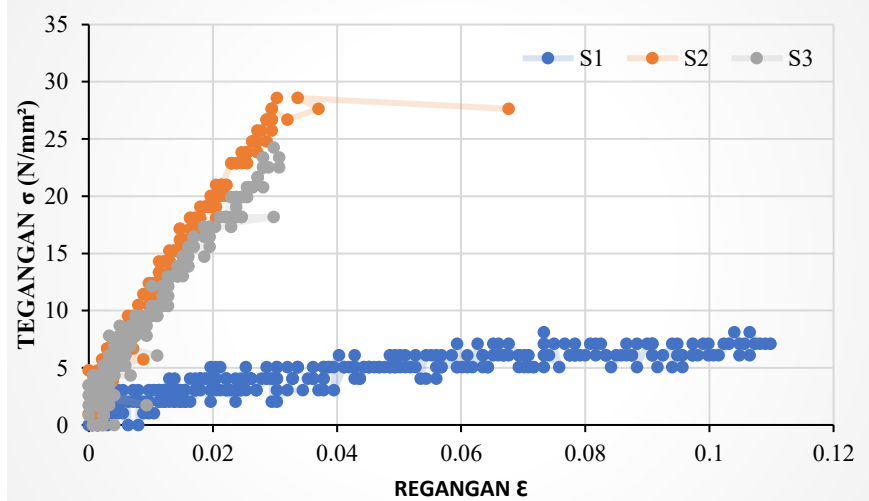
Gambar 14. Pemasangan Spesimen *Epoxy Resin* pada Mesin Uji Tarik



Gambar 15. Spesimen *Epoxy Resin* Mengalami Putus

Sumber: Data Olahan (2025)

Putusnya spesimen CFRP setelah dilakukan uji tarik dikarenakan kegagalan putus serat, hal ini dikarenakan *carbon fiber* sudah tidak mampu menahan gaya tarik. Data hasil dari pengujian tarik spesimen *Epoxy Resin* yang diperoleh dapat dilihat pada **Gambar 16**. Berdasarkan kurva tegangan-regangan tersebut diperoleh bahwa tegangan *ultimate* (f_u) rata-rata diperoleh sebesar 26 MPa dengan regangan *ultimate* (ϵ_u) rata-rata sebesar 0.0301 modulus elastisitas rata-rata *Epoxy Resin* 878 MPa. Berdasarkan hasil pengujian dari tiga spesimen terdapat satu spesimen yang hasilnya tidak dapat digunakan, yaitu spesimen satu. Hal ini dikarenakan terjadi kesalahan dalam pembuatan spesimen, sehingga hasilnya sangat jauh berbeda dari dua spesimen lainnya.



Gambar 16. Kurva Tegangan-Regangan Hasil Uji Tarik Spesimen *Epoxy Resin*

Sumber: Data Olahan (2025)

Pembahasan

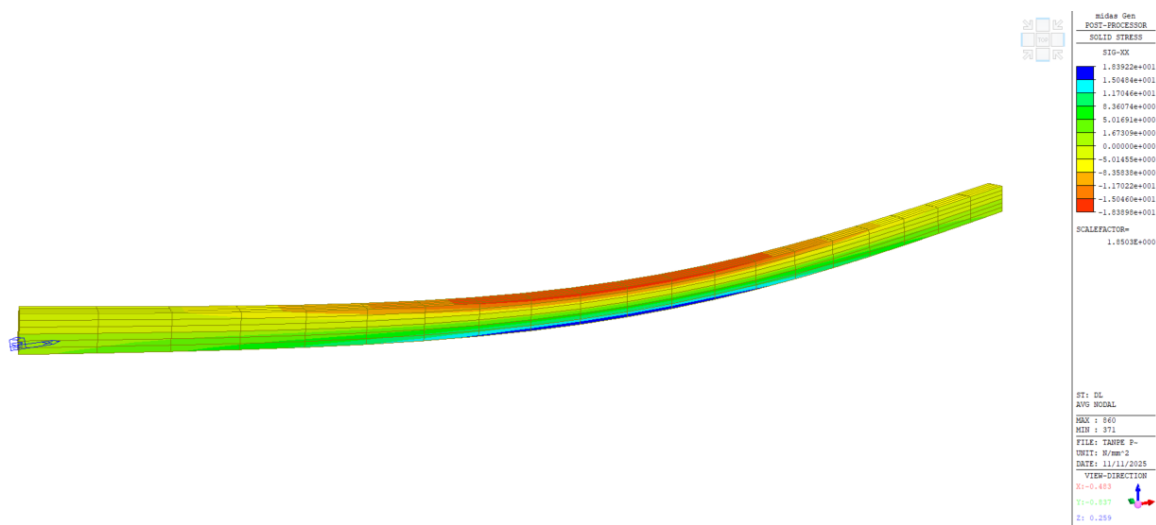
Analisis Tegangan Lentur

Analisis tegangan lentur yang dilakukan pada penelitian ini membandingkan antara balok kayu sengon laut tanpa perkuatan CFRP dan balok kayu sengon laut dengan menggunakan perkuatan CFRP. Analisis tegangan lentur dilakukan untuk mengetahui kemampuan balok kayu sengon laut dalam menahan beban lentur baik tanpa perkuatan maupun setelah diperkuat menggunakan *Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)*. Pada balok tanpa perkuatan, distribusi tegangan lentur cenderung terpusat di bagian serat terluar dimana bawah penampang yang mengalami tarik sedangkan bagian atas mengalami tekan. Karena kayu sengon laut memiliki kekuatan tarik yang relatif rendah dibanding kekuatan tekannya, retak awal biasanya terjadi di zona tarik bawah saat beban mendekati batas elastis.

Ketika lapisan CFRP ditempelkan pada sisi terluar pada daerah tarik dan tekan pada balok, material komposit tersebut berfungsi sebagai elemen penahan gaya tarik dan gaya tekan tambahan. Sifat CFRP yang memiliki kekuatan

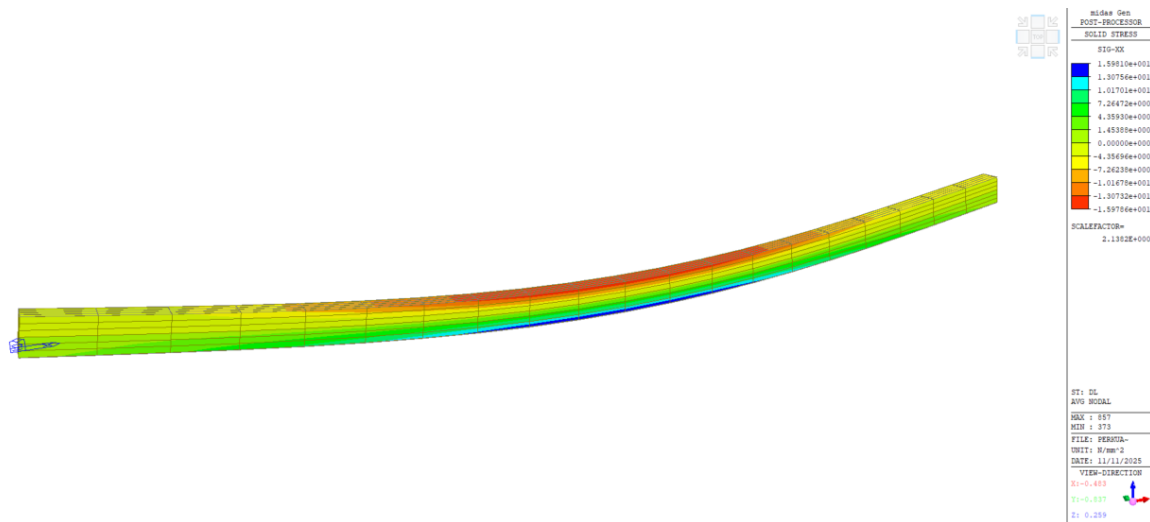
tarik sangat tinggi dan modulus elastisitas besar menyebabkan sebagian gaya tarik dan gaya tekan yang sebelumnya ditahan oleh kayu kini dialihkan ke lapisan CFRP. Akibatnya, distribusi tegangan pada penampang menjadi lebih merata dan tegangan maksimum pada serat atas dan bawah kayu berkurang secara signifikan.

Berdasarkan hasil analisis numerik menggunakan perangkat lunak Midas Gen 2019, balok kayu sengon laut tanpa perkuatan CFRP menunjukkan nilai tegangan lentur maksimum sebesar 18.39 MPa, seperti terlihat pada Gambar 17. Sementara itu, pada balok kayu sengon laut yang diperkuat dengan CFRP, hasil analisis yang ditampilkan pada Gambar 18 menunjukkan bahwa tegangan lentur pada kayu sengon laut menurun menjadi 15.98 MPa. Adapun nilai tegangan lentur maksimum pada lapisan CFRP dapat dilihat pada Gambar 19, yaitu sebesar 115.15 MPa, yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan tegangan lentur yang terjadi pada kayu sengon laut. Kondisi ini menunjukkan bahwa setelah penambahan CFRP, distribusi tegangan beralih—tegangan tertinggi kini terjadi pada lapisan CFRP, sedangkan tegangan pada kayu berkurang. Dengan demikian, pemasangan CFRP terbukti mampu meningkatkan kapasitas lentur, menurunkan risiko keretakan awal, serta memperpanjang umur layan struktur balok kayu sengon laut.



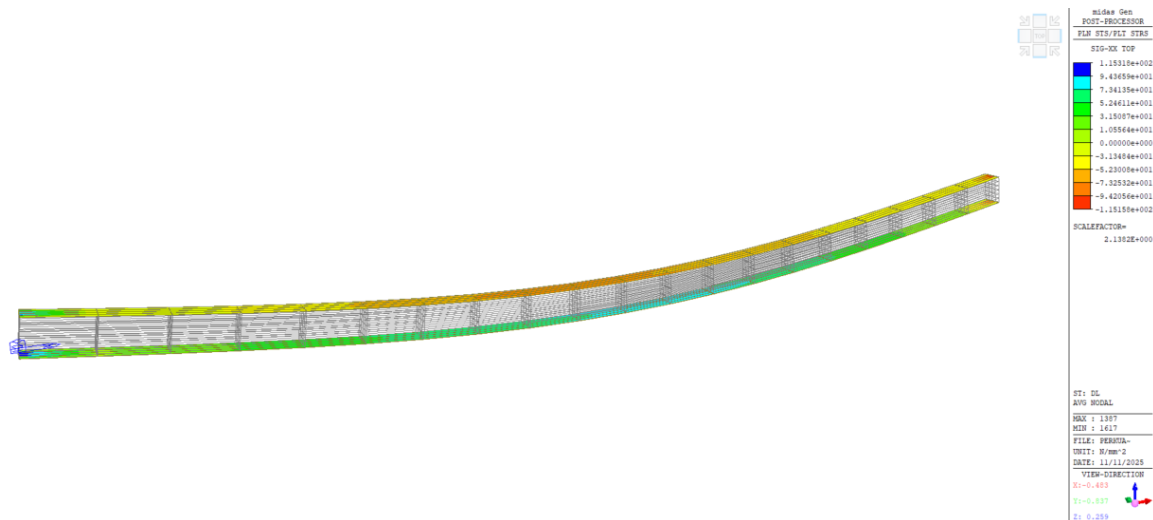
Gambar 17. Tegangan Lentur Balok Kayu Sengon Laut tanpa Perkuatan CFRP

Sumber: Data Olahan (2025)



Gambar 18. Tegangan Lentur Balok Kayu Sengon Laut dengan Perkuatan CFRP

Sumber: Data Olahan (2025)

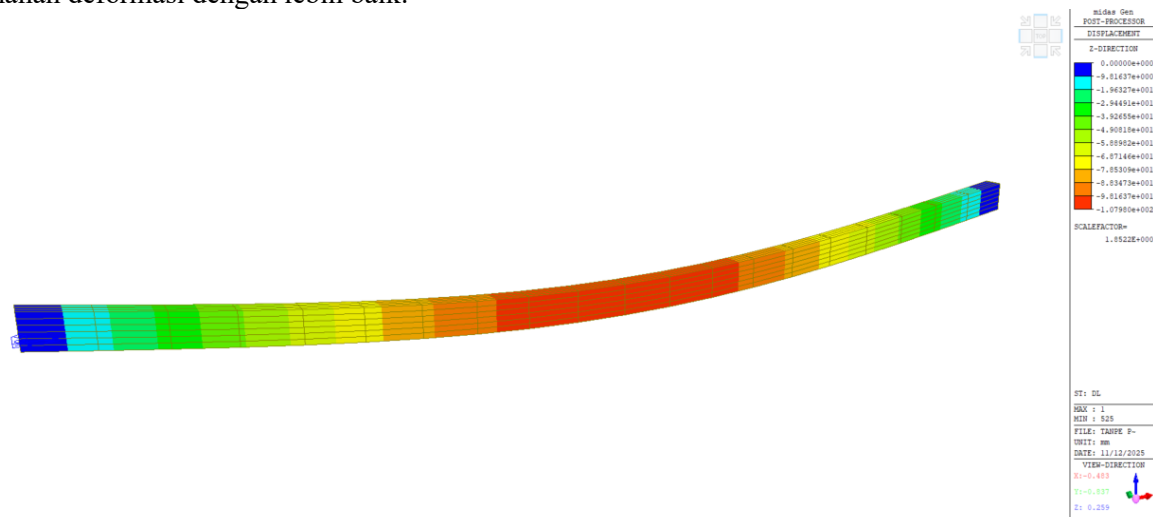


Gambar 19. Tegangan Lentur pada Perkuatan CFRP

Sumber: Data Olahan (2025)

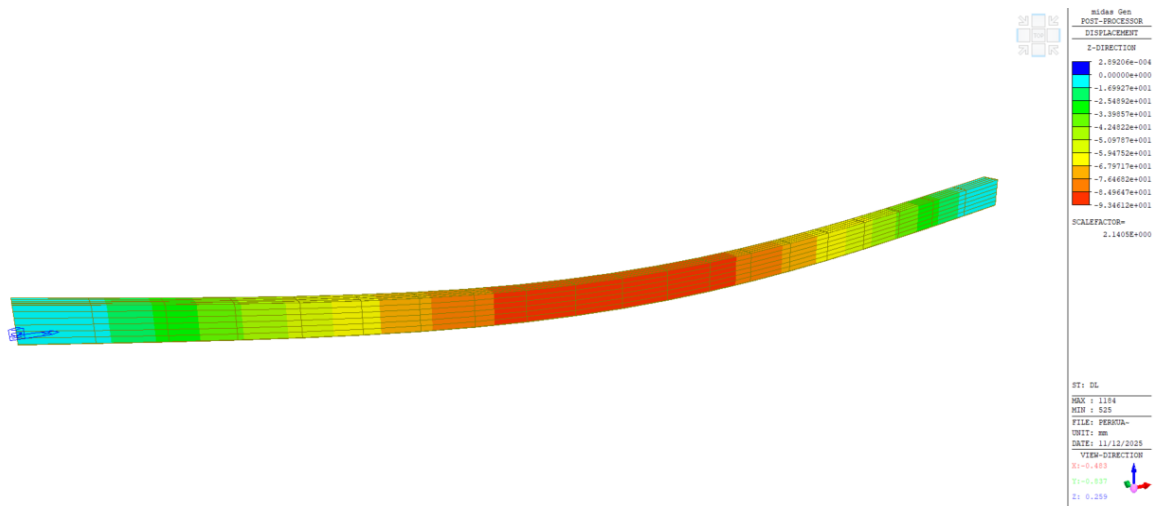
Analisis Lentutan

Analisis lentutan dalam penelitian ini dilakukan dengan tujuan membandingkan perilaku deformasi vertikal antara balok kayu sengon laut tanpa perkuatan CFRP dan balok kayu sengon laut yang diperkuat CFRP. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui besarnya perubahan bentuk (lentutan) yang terjadi pada balok saat menerima beban lentur. Berdasarkan hasil analisis menggunakan perangkat lunak Midas Gen 2019, diperoleh bahwa pada balok tanpa perkuatan CFRP, lentutan maksimum yang terjadi di tengah bentang adalah 108 mm, seperti ditunjukkan pada Gambar 20. Sementara itu, hasil analisis untuk balok dengan perkuatan CFRP yang ditampilkan pada Gambar 21 menunjukkan bahwa lentutan maksimum di tengah bentang berkurang menjadi 93.46 mm. Hasil ini mengindikasikan bahwa penggunaan CFRP mampu mengurangi besarnya lentutan yang terjadi, sehingga struktur balok menjadi lebih kaku dan mampu menahan deformasi dengan lebih baik.

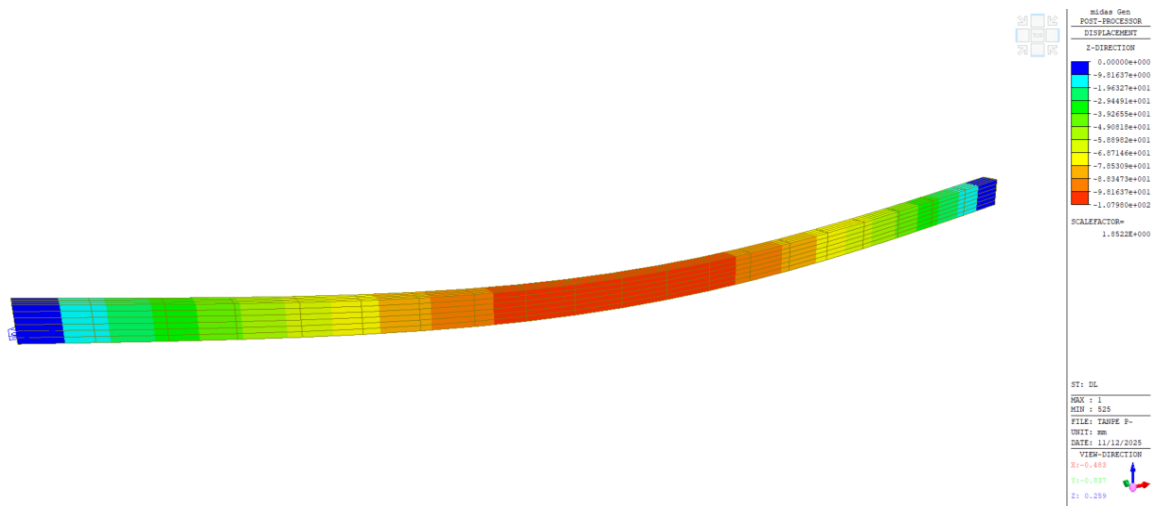


Gambar 20. Lentutan pada Balok Kayu Sengon Laut tanpa Perkuatan CFRP

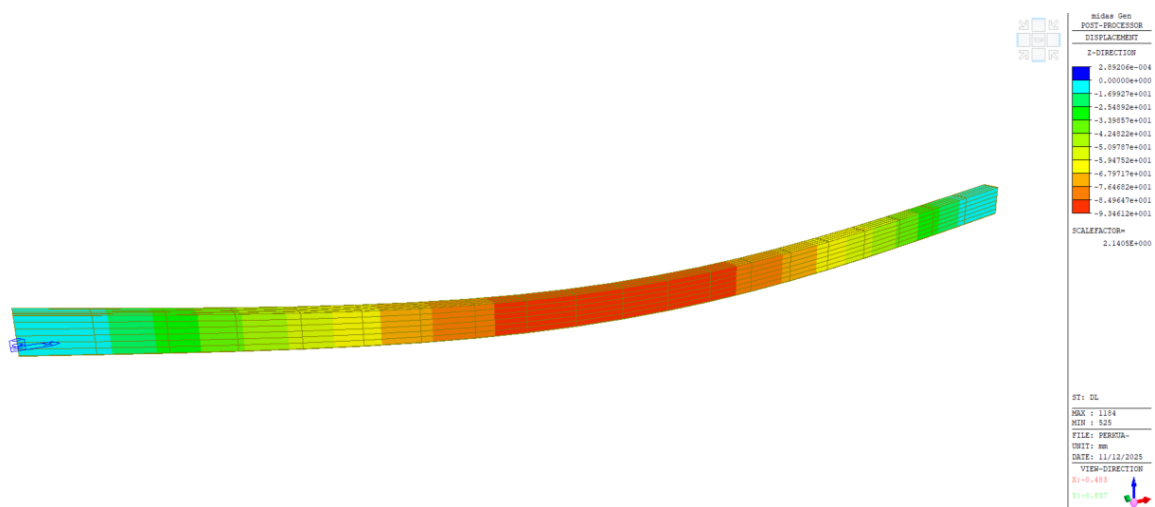
Sumber: Data Olahan (2025)



Gambar 21. Lendutan pada Balok Kayu Sengon Laut dengan Perkuatan CFRP dengan lebih baik.
Sumber: Data Olahan (2025)



Gambar 20. Lendutan pada Balok Kayu Sengon Laut tanpa Perkuatan CFRP
Sumber: Data Olahan (2025)



Gambar 21. Lendutan pada Balok Kayu Sengon Laut dengan Perkuatan CFRP
Sumber: Data Olahan (2025)

Hasil Analisis dan Pembahasan Balok Kayu Sengon Laut dengan dan tanpa Perkuatan CFRP disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Analisis dan Pembahasan Balok Kayu Sengon Laut dengan dan tanpa Perkuatan CFRP

| No | Aspek yang Dianalisis | Balok Kayu Sengon Laut Tanpa Perkuatan CFRP | Balok Kayu Sengon Laut dengan Perkuatan CFRP | Perbandingan / Hasil Analisis |
|----|---------------------------------------|--|---|--|
| 1 | Modulus Elastisitas (MOE) | 4.464 MPa (rendah) | Tetap, namun sistem komposit meningkatkan kekakuan efektif | MOE kayu rendah menyebabkan balok mudah melendut; CFRP membantu meningkatkan kekakuan sistem |
| 2 | Tegangan Lentur Maksimum pada Kayu | 18.39 MPa | 15.98 MPa | Tegangan pada kayu berkurang 13.11% setelah diperkuat CFRP |
| 3 | Tegangan Lentur pada Material CFRP | – | 115.15 MPa | Tegangan terbesar berpindah dari kayu ke lapisan CFRP → CFRP efektif menahan beban lentur |
| 4 | Kapasitas Lentur (Momen) | Kapasitas terbatas, mudah retak pada serat tarik bawah | Meningkat sebesar 13.11% dibanding tanpa perkuatan | CFRP meningkatkan kapasitas lentur total balok |
| 5 | Lendutan Maksimum di Tengah Bentang | 108 mm | 93.46 mm | Lendutan berkurang 13.46% → menunjukkan peningkatan kekakuan struktural |
| 6 | Distribusi Tegangan | Tegangan maksimum terjadi pada kayu bagian bawah (serat tarik) | Tegangan maksimum berpindah ke lapisan CFRP | CFRP bekerja efektif memikul beban tarik dan tekan |
| 7 | Performa Struktural Keseluruhan | Kurang kaku, mudah mengalami lendutan dan retak dini | Lebih kaku, kuat, dan tahan terhadap deformasi | Terjadi peningkatan performa struktural signifikan |
| 8 | Efisiensi Material dan Bobot Struktur | Tanpa perkuatan, kekuatan rendah | CFRP memperkuat tanpa menambah berat signifikan | Solusi perkuatan yang efisien dan ringan |
| 9 | Kesimpulan Umum | Kapasitas lentur terbatas akibat MOE rendah | Perkuatan CFRP meningkatkan kekakuan dan daya dukung lentur | CFRP efektif memperbaiki kelemahan mekanis kayu sengon laut |

Sumber: Data Olahan (2025)

SIMPULAN

Hasil analisis dan pembahasan menunjukkan kekuatan lentur balok kayu sengon laut tanpa perkuatan CFRP ini memiliki kemampuan menahan beban lentur yang terbatas. Hal ini disebabkan oleh nilai modulus elastisitas (MOE) kayu sengon laut yang relatif rendah yaitu sebesar 4464 MPa, sehingga balok mudah mengalami lendutan dan retak pada bagian serat tarik bawah saat menerima beban.

Penggunaan Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) terbukti dapat meningkatkan kapasitas lentur balok kayu sengon laut secara signifikan. Hal ini dapat dilihat dari menurunnya besarnya tegangan yang terjadi pada kayu sengon laut ketika diberi perkuatan CFRP, dari awalnya tanpa perkuatan nilai tegangan yang muncul 18.39 MPa dan setelah diberi perkuatan CFRP menurun menjadi 15.98 MPa. Sehingga terjadi peningkatan kapasitas lentur sebesar 13.11%. CFRP yang ditempatkan pada sisi tarik dan tekan bekerja efektif memberikan tambahan kekuatan dalam menahan gaya tarik dan tekan, sehingga mampu memperkuat penampang, mengurangi tegangan maksimum pada kayu, dan memperlambat terjadinya kerusakan awal.

Perbandingan antara balok kayu sengon laut tanpa dan dengan perkuatan CFRP menunjukkan adanya peningkatan performa struktural. Balok dengan perkuatan CFRP mengalami peningkatan kapasitas momen yaitu sebesar 13.11% dan lendutan maksimum yang lebih kecil dengan penurunan 13.46%. Dengan demikian, CFRP berperan penting dalam meningkatkan kekakuan dan daya dukung lentur kayu sengon laut tanpa menambah berat struktur secara signifikan.

DAFTAR PUSTAKA

- Ashad, H., Hartawan Nurdin, R.M.S., Nizar, M.C., Utina, T. And Syarif, M. (2024) "Sifat-Sifat Mekanik Beton Dengan Menggunakan Fiber Reinforced Polymer (FRP)," *Jurnal Talenta Sipil*, 7(2), Pp. 540–549. Available At: <https://doi.org/10.33087/Talentsipil.V7i2.538>.
- Awaludin, A. *Et Al.* (2025) "Flexural Properties Of Structural Size Glulam Beams Made From Indonesian Wood Species: Experimental Programs," *Journal Of The Korean Wood Science And Technology*, 53(3), Pp. 287–300. Available At: <https://doi.org/10.5658/WOOD.2025.53.3.287>.
- Azevedo, A.S. *Et Al.* (2023) "Fire Behaviour Of Reinforced Concrete Slab Strips Strengthened With Prestressed NSM-CFRP Laminates," *Engineering Structures*, 297. Available At: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116982>.
- Barour S And Zergua A (2019) "Finite Element Modeling Of Strengthened Beams Using CFRP," *J. Build. Mater. Struct.*, 6, Pp. 77–87. Available At: <https://doi.org/10.5281/Zenodo.3352308>.
- Burawska, I. (2015) *FRP Composites In Enhancement Of Timber Structures*.

- Carrillo, J., Calixto-Vargas, J. And Burgos, E.A. (2024) "Shear Behavior Of Concrete Panels Reinforced With GFRP Bars Under Cyclic Diagonal Tension Tests," *Engineering Structures*, 302. Available At: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.117340>.
- Dong, L. *Et Al.* (2024) "Rapid Design For Large-Scale Parallel CFRP Cable With Multi-Source Experimental Data," *Engineering Structures*, 305. Available At: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.117771>.
- Fiorelli, J. And Dias, A.A. (2011) "Glulam Beams Reinforced With FRP Externally-Bonded: Theoretical And Experimental Evaluation," *Materials And Structures/Materiaux Et Constructions*, 44(8), Pp. 1431–1440. Available At: <https://doi.org/10.1617/S11527-011-9708-Y>.
- Gong, S. *Et Al.* (2024) "Factors Affecting Flexural Properties Of RC Beams Strengthened With Gradually Prestressed NSM CFRP Strips," *Engineering Structures*, 306. Available At: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.117865>.
- Gong, W. *Et Al.* (2023) "Steel-Concrete Composite Beams Strengthened With NSM CFRP Systems At The Hogging-Moment Regions," *Engineering Structures*, 292. Available At: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116576>.
- Hao, Z.H. *Et Al.* (2024) "Durability Of FRP-To-Concrete Bonded Joints Subjected To 110 Months Accelerated Laboratory And Field Exposure," *Engineering Structures*, 305. Available At: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.117681>.
- Huang, S. *Et Al.* (2025) "Long-Term Durability Of Flax-Glass Hybrid FRP-Timber Composite Structures Subjected To Hygrothermal Environment: Experimental And Simulation," *Engineering Structures*, 342. Available At: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.120889>.
- Jedrzejko, M.J. *Et Al.* (2023) "Strengthening Of RC Beams In Shear With Novel Near-Surface Mounted (NSM) U-Shaped Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Composites," *Engineering Structures*, 292. Available At: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116479>.
- De Jesus, A.M.P., Pinto, J.M.T. And Morais, J.J.L. (2012) "Analysis Of Solid Wood Beams Strengthened With CFRP Laminates Of Distinct Lengths," *Construction And Building Materials*, 35, Pp. 817–828. Available At: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.124>.
- Jiang, L. *Et Al.* (2024) "Seismic Performance Of Various Types Of Cold-Formed Steel Composite Shear Walls With CFRP-Toughened Screw Connections," *Engineering Structures*, 314. Available At: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118411>.
- Jin, L. *Et Al.* (2024) "Impact Response Analysis And Prediction Of FRP-RC Beams With Varying Flexural Stiffness: Numerical Simulation And Modified Two-DOF Calculation," *Engineering Structures*, 301. Available At: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.117341>.
- Khodadadi, N. *Et Al.* (2024) "Fiber-Reinforced Polymer (FRP) In Concrete: A Comprehensive Survey," *Construction And Building Materials*. Elsevier Ltd. Available At: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136634>.
- Li, P. Da *Et Al.* (2024) "Nonuniformity In Stress Transfer Across FRP Width Of FRP-Concrete Interface," *Engineering Structures*, 312. Available At: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118236>.
- Li, S. And Hadigheh, S.A. (2025) "Experimental Analysis Of Timber-Concrete Composites With Innovative Frp Connectors," In *Proceedings From The 14th World Conference On Timber Engineering: Advancing Timber For The Future Built Environment, WCTE 2025*. World Conference On Timber Engineering (WCTE), Pp. 1589–1594. Available At: <https://doi.org/10.52202/080513-0193>.
- Liu, K. *Et Al.* (2024) "Assessment Of Damage Evolution Of Concrete Beams Strengthened With BFRP Sheets With Acoustic Emission And Unsupervised Machine Learning," *Engineering Structures*, 300. Available At: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.117228>.
- Liu, T.Q. *Et Al.* (2024) "Flexural Performance Of Curved-Pultruded GFRP Arch Beams Subjected To Varying Boundary Conditions," *Engineering Structures*, 308. Available At: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.117962>.
- Lu, Y. *Et Al.* (2024) "Insights Into Enhanced Shear Ductility And Toughness Of RC Beam With Fiber Reinforced Polymer-Rubber Support Composite (FRP-RSC) Strengthening System," *Engineering Structures*, 314. Available At: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118312>.
- Pan, M. And Wang, D. (2024) "Cyclic Axial Compression Stress-Strain Model For FRP-Confined Concrete-Encased Cross-Shaped Steel Columns," *Engineering Structures*, 298. Available At: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.117063>.
- Peng, F. *Et Al.* (2023) "Shear Behavior Of Two-Span Continuous Concrete Deep Beams Reinforced With GFRP Bars," *Engineering Structures*, 290. Available At: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116367>.
- Tian, S.Y. *Et Al.* (2023) "Axial Compressive Behavior Of A Novel Assembled Joint Connecting FCSRC Columns And RC Beams With Pre-Damage," *Engineering Structures*, 293. Available At: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116647>.

- Wang, D. *Et Al.* (2025) "Axial Compression Behavior Of FRP Confined Steel Reinforced UHPC Column," *Engineering Structures*, 328. Available At: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.119747>.
- Wang, Y. *Et Al.* (2024) "Bond Of Steel-FRP Composite Bar Embedded In FRP-Confined Concrete: Behavior, Mechanism, And Strength Model," *Engineering Structures*, 318. Available At: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118693>.
- Yosafat Aji Pranata, Anang Kristianto And Novi (2024) "Comparative Study Of Flexural Behavior Of Bolted-Laminated And Glue-Laminated Sengon Timber Beams (*Albizia Falcataria*)," 15.
- Yu, F. *Et Al.* (2024) "Influence Of Joint Forms On The Seismic Behavior Of Concrete-Filled PVC-CFRP Tubular Column-RC Beam Joints Connected With Core Steel Tubes," *Engineering Structures*, 303. Available At: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.117499>.
- Zhang, B. *Et Al.* (2023) "Seismic Performance Of Elliptical FRP-Concrete-Steel Tubular Columns Under Combined Axial Load And Reversed Lateral Load," *Engineering Structures*, 286. Available At: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116135>.
- Zhang, B. *Et Al.* (2024) "Seismic Behaviour Of FRP-Concrete-Steel Double-Tube Columns With Shear Studs: Experimental Study And Numerical Modelling," *Engineering Structures*, 302. Available At: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.117339>.