



PENERAPAN KOMPOSIT HIBRIDA SERAT KARBON–SERAT KACA PADA RANGKA KENDARAAN HEMAT ENERGI

Faisal Arif Nurgesang^{a*}, Mohammad Joang Firdaus^a

^aProgram Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia, Jl. Kaliurang KM 14.4, Sleman, Yogyakarta, 55584, Indonesia

*Corresponding authors at: faisal.arif.nurgesang@uii.ac.id (F.A. Nurgesang) Tel.: +62812-1015-6008

INFO ARTIKEL

Riwayat artikel:

Diajukan pada 01 Maret 2026

Direvisi pada 21 Juli 2026

Disetujui pada 23 Juli 2026

Tersedia daring pada 30 Juli 2026

Kata kunci:

Komposit, rangka, *hollow tube*, *Gatotkaca Unisi*

Keywords:

Composite, frame, *hollow tube*, *Gatotkaca Unisi*

ABSTRAK

Rangka kendaraan hemat energi membutuhkan material dengan massa jenis rendah dan kekuatan mekanik yang memadai untuk mendukung efisiensi penggunaan energi. Penelitian ini bertujuan mengembangkan profil *hollow tube* berbahan komposit hibrida serat karbon–serat kaca, mengevaluasi pengaruh kombinasi lapisan serat terhadap massa jenis dan kekuatan lentur, serta menilai kelayakannya sebagai alternatif aluminium 6063-T5 pada rangka kendaraan hemat energi. Spesimen dibuat menggunakan metode *vacuum infusion* dengan tiga konfigurasi lapisan, yaitu 0CF3GF, 1CF2GF, dan 2CF1GF. Setiap konfigurasi terdiri atas tiga lapisan penguat dan diuji menggunakan metode *three-point bending*. Massa jenis spesimen dihitung berdasarkan hasil pengukuran massa dan volume, sedangkan distribusi tegangan rangka dievaluasi melalui simulasi elemen hingga dengan pembebanan statis sebesar 100 kg. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan jumlah lapisan serat karbon meningkatkan kekuatan lentur dan menurunkan massa jenis komposit. Konfigurasi 2CF1GF memberikan kinerja terbaik dengan tegangan luluh lentur sebesar 31,13 MPa, tegangan lentur maksimum 38,61 MPa, dan massa jenis 2,14 g/cm³ atau 20,7% lebih rendah daripada aluminium 6063-T5. Simulasi rangka menghasilkan tegangan rata-rata sebesar 18,30 MPa, tegangan maksimum 85,14 MPa, dan defleksi maksimum 1,31 mm. Berdasarkan hasil tersebut, komposit 2CF1GF memenuhi kebutuhan kekuatan pada bagian rangka dengan tegangan kerja hingga 18,30 MPa, tetapi belum sesuai untuk area kritis tanpa penambahan lapisan atau optimasi orientasi serat. Komposit hibrida 2CF1GF berpotensi diterapkan melalui pendekatan pemilihan material berbasis zona untuk mengurangi massa rangka kendaraan hemat energi.

ABSTRACT

Energy-efficient vehicle frames require materials with low density and adequate mechanical strength to improve energy-use efficiency. This study aimed to develop carbon–glass fiber hybrid composite hollow-tube profiles, evaluate the effects of different fiber-layer combinations on density and flexural strength, and assess their feasibility as an alternative to 6063-T5 aluminum in energy-efficient vehicle frames. The specimens were manufactured using the vacuum infusion method with three stacking configurations: 0CF3GF, 1CF2GF, and 2CF1GF. Each configuration consisted of three reinforcing layers and was evaluated using a three-point bending test. Specimen density was determined from the measured mass and volume, while the stress distribution within the frame was evaluated using finite element simulation under a static load of 100 kg. The results demonstrated that increasing the number of carbon-fiber layers improved flexural strength and reduced composite density. The 2CF1GF configuration exhibited the best performance, with a flexural yield stress of 31.13 MPa, a maximum flexural stress of 38.61 MPa, and a density of 2.14 g/cm³, which was 20.7 % lower than that of 6063-T5 aluminum. The frame simulation produced an average stress of 18.30 MPa, a maximum stress of 85.14 MPa, and a maximum deflection of 1.31 mm. These results indicate that the 2CF1GF composite satisfies the strength requirement for frame sections subjected to working stresses of up to 18.30 MPa but is not suitable for critical regions without additional layers or fiber-orientation optimization. Therefore, the 2CF1GF hybrid composite has potential for application through a zone-based material-selection strategy to reduce the mass of energy-efficient vehicle frames.

1. PENGANTAR

Kontes Mobil Hemat Energi (KMHE) merupakan salah satu kegiatan akademik yang mendorong pengembangan kendaraan dengan konsumsi energi serendah mungkin. Pencapaian efisiensi tersebut dipengaruhi oleh berbagai aspek desain, termasuk sistem penggerak, aerodinamika, hambatan gelinding, dan massa kendaraan. Di antara aspek tersebut, pengurangan massa menjadi salah satu strategi penting karena berpengaruh langsung terhadap kebutuhan energi selama kendaraan beroperasi. Oleh karena itu, setiap komponen kendaraan, termasuk rangka, perlu dirancang agar memiliki massa rendah tanpa mengurangi kekuatan dan keamanan struktur.

Rangka kendaraan yang menjadi objek penelitian saat ini menggunakan aluminium 6063-T5 dengan massa sekitar 7 kg. Aluminium 6063-T5 memiliki massa jenis sekitar 2,70 g/cm³ dan banyak digunakan pada struktur ringan karena memiliki kemampuan fabrikasi serta ketahanan korosi yang baik. Namun, peningkatan kinerja kendaraan hemat energi memerlukan material dengan rasio kekuatan terhadap massa yang lebih tinggi. Dalam hal ini, komposit polimer berpenguat serat memiliki potensi untuk digunakan sebagai material alternatif karena menggabungkan massa jenis yang rendah dengan sifat mekanik yang dapat disesuaikan melalui pemilihan jenis serat, jumlah lapisan, dan orientasi penguat.

Serat karbon dan serat kaca merupakan dua jenis penguat yang banyak digunakan dalam pembuatan material komposit. Serat karbon memiliki kekuatan tarik dan modulus elastisitas yang tinggi serta massa jenis yang relatif rendah sehingga menghasilkan rasio kekuatan terhadap massa yang baik (Castanie dkk., 2020; Fajarudin & Widodo, 2021; Negoro dkk., 2023). Meskipun demikian, biaya serat karbon relatif lebih tinggi dibandingkan serat kaca. Sebaliknya, serat kaca memiliki harga yang lebih terjangkau dan kemampuan deformasi yang lebih baik, tetapi kekuatan spesifiknya lebih rendah daripada serat karbon (Phiri dkk., 2024; Yurii, 2024; Yusuf dkk., 2024). Dengan demikian, kombinasi kedua jenis serat dalam bentuk komposit hibrida dapat menjadi pendekatan untuk memperoleh keseimbangan antara kekuatan mekanik, massa, dan biaya produksi. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa hibridisasi serat karbon dan serat kaca dapat meningkatkan kinerja mekanik sekaligus mengurangi ketergantungan terhadap penggunaan serat karbon secara penuh (Al Azzawi dkk., 2024; Wibowo dkk., 2023).

Selain jenis dan komposisi serat, metode manufaktur juga berpengaruh terhadap kualitas produk komposit. Salah satu metode yang dapat digunakan untuk menghasilkan profil komposit berbentuk *hollow tube* adalah *vacuum infusion*. Pada metode ini, susunan serat ditempatkan pada cetakan dan ditutup menggunakan kantong vakum, kemudian resin dialirkan ke dalam susunan serat akibat perbedaan tekanan. Proses tersebut dapat membantu mengurangi udara yang terperangkap, kelebihan resin, dan ketidakmerataan distribusi matriks (Azissyukhron & Hidayat, 2020; Jaya dkk., 2020). Dibandingkan metode *hand lay-up*, proses *vacuum infusion* juga berpotensi menghasilkan distribusi resin dan ikatan antarlapisan yang lebih baik (Suryono dkk., 2020). Oleh karena itu, metode ini sesuai untuk pengembangan profil *hollow tube* yang memerlukan massa rendah, ketebalan relatif seragam, dan kualitas permukaan yang baik.

Penerapan komposit pada komponen berongga telah dikembangkan dalam berbagai bidang, termasuk pipa dan struktur ringan. Priyanto dkk. (2025) mengevaluasi karakteristik lentur profil *hollow* berbahan komposit, sedangkan Wirama dkk. (2022) mengkaji kekuatan lentur pipa komposit berbasis serat alam dan resin epoksi. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa profil komposit berongga memiliki potensi untuk digunakan pada struktur yang mengalami pembebanan lentur. Namun, penerapannya sebagai material rangka kendaraan hemat energi masih memerlukan evaluasi lebih lanjut, khususnya terkait kemampuan menahan tegangan kerja dan potensi kegagalan pada area struktural yang menerima beban tinggi.

Meskipun penelitian mengenai komposit serat karbon dan serat kaca telah banyak dilakukan, kajian terhadap komposit hibrida dalam bentuk profil *hollow tube* untuk rangka kendaraan hemat energi masih terbatas. Penelitian terdahulu umumnya membahas sifat tarik, impak, atau lentur pada spesimen pelat, sedangkan hubungan antara kombinasi lapisan serat, massa jenis, kekuatan lentur, dan distribusi tegangan pada rangka belum banyak dievaluasi secara terpadu. Selain itu, perbandingan langsung antara komposit hibrida dan aluminium 6063-T5 sebagai material rangka eksisting masih perlu dilakukan untuk menentukan batas penerapan komposit pada bagian-bagian struktur dengan tingkat tegangan yang berbeda.

Kebaruan penelitian ini terletak pada pengembangan profil *hollow tube* berbahan komposit hibrida serat karbon–serat kaca menggunakan metode *vacuum infusion*, disertai evaluasi terhadap massa jenis, kekuatan lentur, dan kelayakan penerapannya berdasarkan distribusi tegangan pada rangka kendaraan. Tiga konfigurasi lapisan, yaitu 0CF3GF, 1CF2GF, dan 2CF1GF, dibandingkan untuk mengetahui pengaruh peningkatan jumlah lapisan serat karbon terhadap sifat mekanik dan massa jenis komposit. Hasil pengujian selanjutnya dibandingkan dengan aluminium 6063-T5 serta tegangan yang diperoleh dari simulasi pembebanan statis pada rangka.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk: (1) membuat profil *hollow tube* komposit hibrida serat karbon–serat kaca menggunakan metode *vacuum infusion*; (2) mengevaluasi pengaruh variasi kombinasi lapisan terhadap massa jenis dan kekuatan lentur; serta (3) membandingkan kinerja komposit dengan aluminium 6063-T5 dan menilai kelayakan penerapannya pada bagian rangka berdasarkan tingkat tegangan kerja. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi dasar dalam pemilihan material ringan serta pengembangan strategi penggunaan material berbasis zona pada rangka kendaraan hemat energi.

2. METODE

Pada penelitian ini, spesimen dibuat dalam 3 variasi yang dibedakan berdasarkan jumlah kombinasi lapisan *carbon fiber* dan *glass fiber* yang digunakan, setiap spesimen terdiri dari 3 lapis dari total kombinasi *carbon fiber* dan *glass fiber* dengan variasi 0:3, 1:2, dan 2:1. Kriteria desain pada produk ini yaitu: (1) spesimen diharapkan minim kecacatan seperti permukaan yang berlubang, tidak rata, penyebaran resin yang terdistribusi dan tidak ada kebocoran saat proses vakum, (2) spesimen diharapkan memiliki berat lebih ringan dibanding material rangka sebelumnya, dan (3) kekuatan spesimen dapat menahan beban yang bekerja pada rangka kendaraan Gatotkaca Unisi. Desain eksperimen pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1: Desain eksperimen

Kode Spesimen	Carbon Fiber (Lapis)	Glass Fiber (Lapis)
0CF3GF	0	3
1CF2GF	1	2
2CF1GF	2	1

Bahan yang digunakan untuk membuat komposit profil *hollow tube* adalah *carbon fiber* tipe *twill* 200 GSM dan *glass fiber* tipe *woven* 200 GSM. Pembuatan spesimen komposit profil *hollow tube* dilakukan dengan menempelkan lapisan *carbon fiber* dan *glass fiber* sesuai dengan variasi kombinasi yang telah ditentukan pada pipa baja sebagai cetakan kemudian dilanjutkan proses penyebaran resin dengan metode *vacuum infusion*. Resin yang digunakan menggunakan jenis resin epoksi dengan komposisi 1:1 antara resin dan *hardener*,

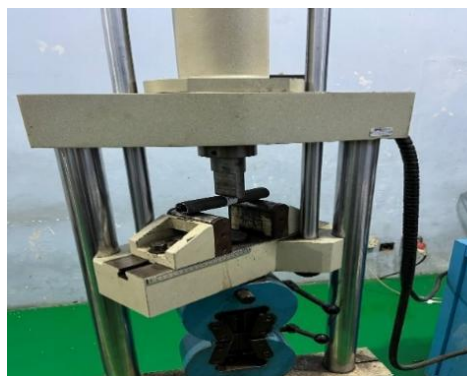
Setiap spesimen menggunakan total resin dan *hardener* sebanyak 50 gram. Tekanan yang digunakan untuk proses *vacuum* adalah sebesar -1 Bar selama 15 menit. Setiap variasi, dibuat sebanyak tiga spesimen yang dibuat bersamaan untuk digunakan sebagai spesimen uji. Untuk meminimalisir gelembung udara setelah proses pencampuran resin dan *hardener*, dilakukan proses *vacuum chamber* selama 15 menit. Spesimen berhasil dibuat dengan ukuran rata-rata spesimen uji 35,4 mm untuk diameter luar, dengan tebal 1,31 mm dan panjang 200 mm, pada masing-masing variasi. Spesimen ini dilakukan pengujian *bending* untuk mengetahui besar tegangan *bending* yang digunakan dalam penentuan variasi terbaik. Proses pembuatan spesimen komposit profil *hollow tube* dan hasilnya ditunjukkan pada Gambar 1 berikut.



Gambar 1: (a) Proses pembuatan spesimen komposit profil *hollow tube* dan (b) Hasil produk komposit

Pada Gambar 1(a) merupakan proses pembuatan spesimen produk komposit profil *hollow tube* yang dibuat menggunakan metode *vacuum infusion*. Dari proses tersebut, dihasilkan spesimen komposit yang minim kecacatan sehingga kriteria untuk pembuatan spesimen telah terpenuhi. Pengujian *bending* dilakukan untuk mendapat nilai tegangan *bending* dan juga mengetahui kekuatan *bending*. Pengujian *bending* dipilih sebagai pendekatan fenomena pembebanan yang terjadi pada rangka kendaraan. Pada penelitian ini, dilakukan pengujian *three-point bending* untuk mengetahui kekuatan lentur (*flexural stiffness*) komposit. Pengujian dilakukan dengan cara spesimen tersebut diletakkan pada 2 tumpuan dengan jarak tumpuan 150 mm dan diberikan tekanan diantara kedua tumpuan tersebut dengan kecepatan 1 mm/menit menggunakan *Universal Testing Machine* (TNM 20 MD) seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Jarak antar tumpuan pada pengujian ini disesuaikan dengan standar pengujian *bending* untuk material komposit berbentuk tabung, dengan mempertimbangkan rasio panjang terhadap diameter spesimen agar menghasilkan kondisi pembebanan lentur yang representatif. Data yang direkam selama pengujian mencakup gaya (F) dan defleksi (δ), yang selanjutnya digunakan untuk menghitung tegangan *bending* untuk penampang tabung berlubang. Perhitungan tegangan *bending* dilakukan menggunakan formula $\sigma = M \cdot c / I$, di mana M adalah momen lentur, c adalah jarak dari sumbu netral ke titik terluar, dan I adalah momen inersia penampang.

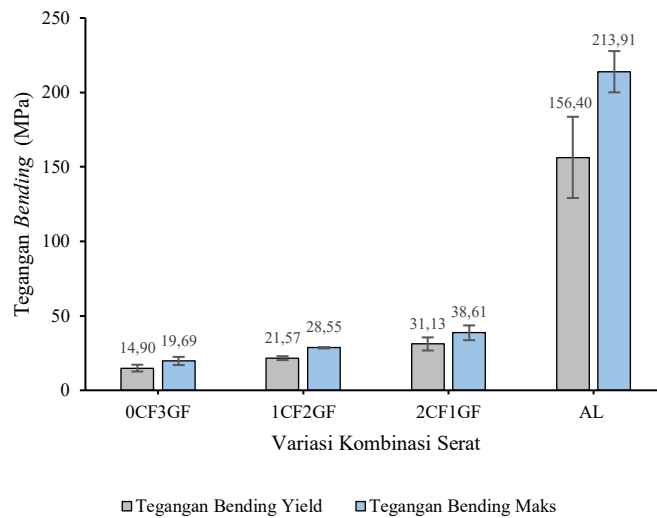
Setelah pengujian mekanik, pengukuran massa jenis juga dilakukan untuk setiap variasi spesimen. Massa spesimen diukur menggunakan timbangan digital dengan ketelitian 0,01 gram. Volume spesimen dihitung secara geometris berdasarkan dimensi yang terukur menggunakan jangka sorong digital dengan ketelitian 0,01 mm. Data dimensi yang diukur meliputi diameter luar, diameter dalam (dihitung dari tebal dinding), dan panjang spesimen. Massa jenis kemudian diperoleh dari perbandingan massa terhadap volume spesimen. Selain itu, untuk mengetahui distribusi tegangan yang terjadi pada rangka kendaraan Gatotkaca Unisi, dilakukan pula simulasi numerik menggunakan metode elemen hingga (*finite element analysis*) menggunakan perangkat lunak *Solidworks* 2024 dengan jenis elemen *tetrahedral* dan ukuran *mesh* standar. Simulasi dilakukan dengan memberikan beban statis sebesar 100 kg yang merepresentasikan beban pengemudi dan komponen kendaraan. Kondisi batas pada simulasi ini ditetapkan pada titik-titik sambungan rangka yang berhubungan dengan suspensi dan sistem kemudi. Hasil simulasi kemudian digunakan sebagai acuan dalam mengevaluasi kecukupan kekuatan material komposit yang dikembangkan untuk menggantikan aluminium 6063 T5 pada berbagai area rangka kendaraan.



Gambar 2: Proses pengujian produk komposit menggunakan metode *three-point bending*

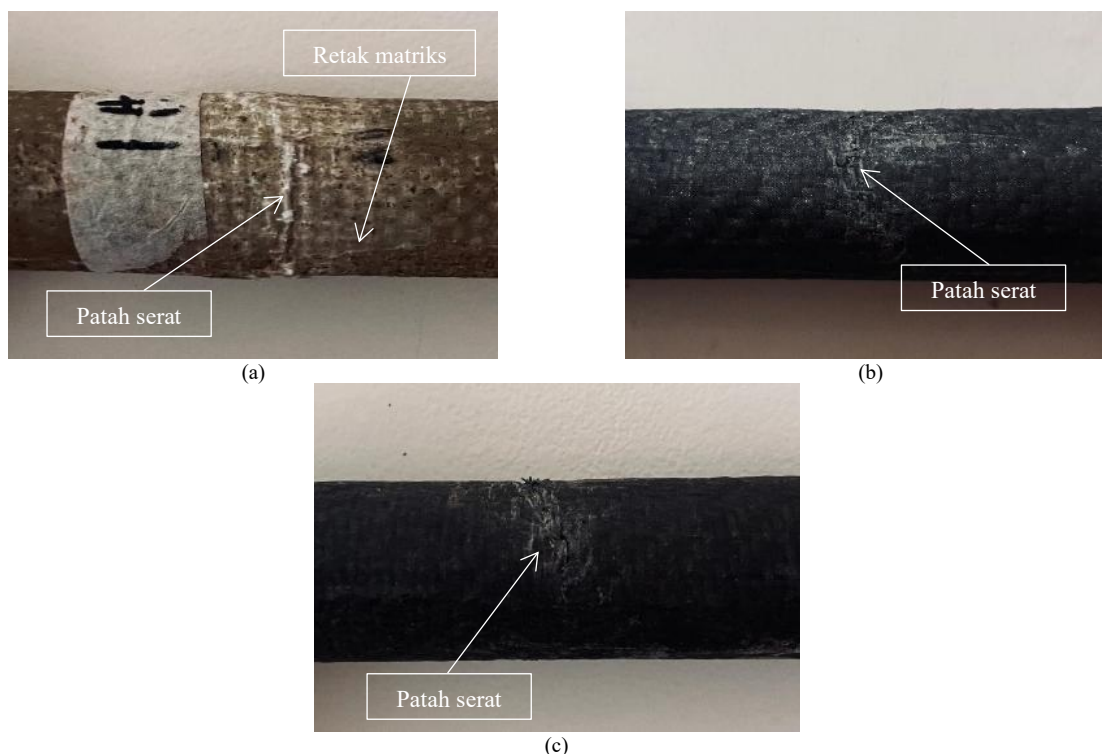
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan, diperoleh data nilai tegangan *bending yield* dan tegangan bending maksimal pada spesimen komposit dengan variasi kombinasi *carbon fiber* dan *glass fiber* profil *hollow tube* dapat dilihat pada Gambar 3. Dalam grafik ini, tersaji pula hasil pengujian pada material yang saat ini digunakan yaitu aluminium 6063 T5.



Gambar 3: Nilai tegangan *bending* spesimen komposit dengan variasi kombinasi serat

Berdasarkan Gambar 3, peningkatan jumlah lapisan *carbon fiber* pada komposit cenderung meningkatkan tegangan *bending yield* dan tegangan lentur maksimum. Konfigurasi 2CF1GF menunjukkan kinerja terbaik dengan tegangan *bending yield* sebesar 31,13 MPa dan tegangan lentur maksimum sebesar 38,61 MPa, sedangkan konfigurasi 0CF3GF menghasilkan nilai terendah. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan proporsi *carbon fiber* memberikan kontribusi yang lebih besar terhadap kekuatan lentur komposit dibandingkan *glass fiber*. Hal ini berkaitan dengan modulus elastisitas dan kekuatan tarik *carbon fiber* yang lebih tinggi sehingga material mampu menahan beban lentur yang lebih besar sebelum mengalami kerusakan. Temuan ini sejalan dengan Rajak dkk. (2021) yang melaporkan bahwa peningkatan fraksi *carbon fiber* dapat meningkatkan kekuatan spesifik komposit. Al Azzawi dkk. (2024) juga menunjukkan bahwa komposit hibrida dengan proporsi *carbon fiber* yang lebih dominan memiliki kinerja mekanik yang lebih baik, khususnya pada pembebanan lentur, dibandingkan komposit yang didominasi *glass fiber*. Selain memengaruhi nilai kekuatan lentur, variasi komposisi serat juga menghasilkan karakteristik kegagalan yang berbeda. Modus kegagalan setiap spesimen setelah pengujian *three-point bending* ditunjukkan pada Gambar 4.

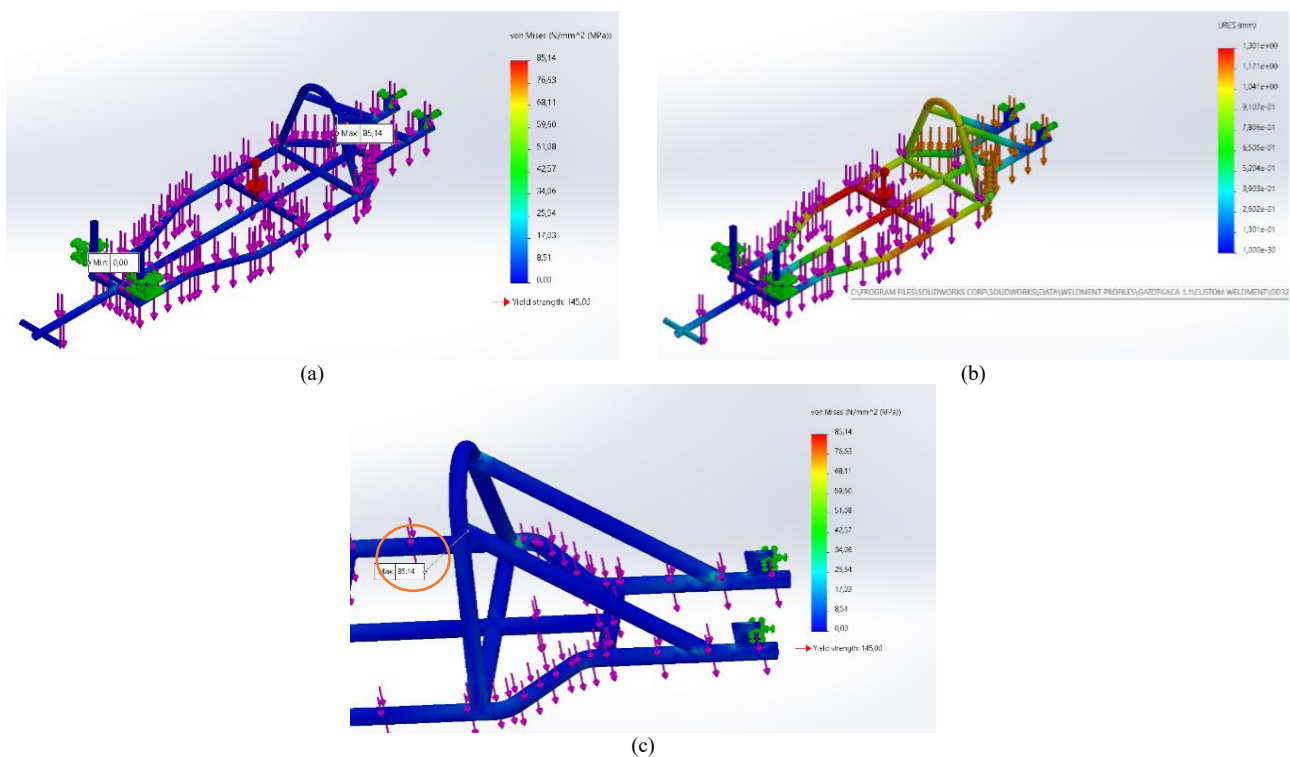


Gambar 4: Modus kegagalan pada spesimen (a) 0CF3GF, (b) 1CF2GF, dan (c) 2CF1GF

Berdasarkan Gambar 4, modulus kegagalan pada material komposit tidak hanya dipengaruhi oleh besarnya beban, tetapi juga oleh interaksi antara serat sebagai penguat dan matriks sebagai pengikat. Pada spesimen 0CF3GF (Gambar 4a), kegagalan didominasi oleh kombinasi patah serat (*fiber fracture*) dan retak matriks (*matrix cracking*). Kedua mekanisme tersebut umum terjadi pada komposit berlapis yang menerima pembebanan lentur. Patah serat terjadi ketika tegangan tarik pada sisi bawah spesimen melebihi kemampuan serat dalam menahan beban. Sementara itu, retak matriks muncul akibat ketidakmampuan matriks menahan tegangan tarik dan geser selama pembebanan. Retakan tersebut dapat berkembang menjadi jalur perambatan kerusakan dan mempercepat kegagalan spesimen secara keseluruhan.

Pada spesimen dengan proporsi *carbon fiber* yang lebih tinggi, yaitu 1CF2GF dan 2CF1GF, mekanisme patah serat terlihat lebih dominan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4b dan 4c. Kondisi ini berkaitan dengan karakteristik *carbon fiber* yang memiliki kekuatan dan kekakuan tinggi, tetapi cenderung lebih getas dibandingkan *glass fiber*. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa variasi komposisi serat memengaruhi karakteristik kegagalan komposit. Spesimen dengan kandungan *glass fiber* yang lebih tinggi cenderung mengalami deformasi lebih besar sebelum gagal, sedangkan spesimen dengan proporsi *carbon fiber* lebih tinggi menunjukkan kegagalan yang lebih cepat dan bersifat lebih getas.

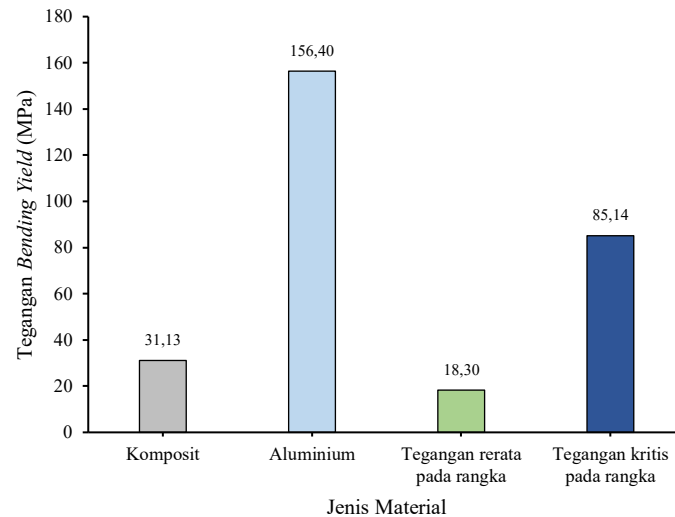
Meskipun demikian, kekuatan lentur komposit yang dihasilkan masih lebih rendah daripada aluminium 6063-T5. Aluminium 6063-T5 memiliki tegangan luluh sebesar 156,40 MPa, sedangkan konfigurasi komposit terbaik, yaitu 2CF1GF, menghasilkan tegangan luluh sebesar 31,13 MPa dan tegangan lentur maksimum sebesar 38,61 MPa. Hasil tersebut menunjukkan bahwa aluminium masih lebih unggul dari sisi kekuatan absolut. Namun, komposit memiliki keunggulan berupa massa jenis yang lebih rendah sehingga berpotensi memberikan rasio kekuatan terhadap massa yang lebih baik untuk bagian struktur dengan tingkat pembebanan tertentu. Oleh karena itu, simulasi pembebanan statis dilakukan untuk mengidentifikasi distribusi tegangan dan lokasi kritis pada rangka. Hasil simulasi tersebut ditunjukkan pada Gambar 5.



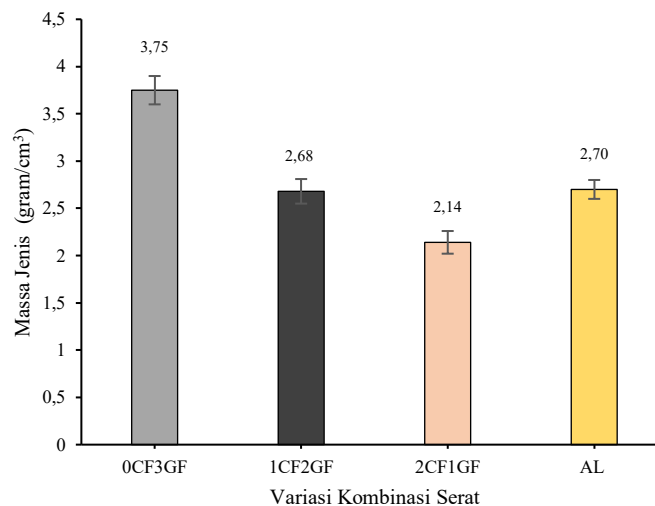
Gambar 5: Hasil analisis beban statis (a) tegangan pada rangka (b) defleksi pada rangka dan (c) titik kritis maksimum pada sambungan rangka

Berdasarkan hasil simulasi pembebanan statis, pemberian beban sebesar 100 kg pada rangka menghasilkan tegangan maksimum sebesar 85,14 MPa, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5a, dan defleksi maksimum sebesar 1,31 mm pada Gambar 5b. Berdasarkan model numerik yang digunakan, rangka masih mampu menahan pembebanan tersebut tanpa menunjukkan indikasi kegagalan struktural. Namun, konsentrasi tegangan tertinggi teridentifikasi pada daerah sambungan antara *roll bar* dan bagian belakang dudukan roda, seperti ditunjukkan pada Gambar 5c. Kondisi ini mengindikasikan bahwa area sambungan tersebut menerima transfer dan akumulasi beban yang lebih besar dibandingkan bagian rangka lainnya sehingga menjadi lokasi kritis yang perlu diperhatikan dalam perancangan dan pemilihan material.

Untuk mengevaluasi kelayakan penggunaan material komposit sebagai pengganti aluminium 6063-T5, nilai tegangan luluh lentur komposit dan aluminium dibandingkan dengan tegangan rata-rata serta tegangan maksimum yang terjadi pada rangka. Hasil perbandingan tersebut disajikan pada Gambar 6. Sementara itu, perbandingan massa jenis setiap variasi komposit dan aluminium 6063-T5 ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 6: Perbandingan tegangan material komposit, Aluminium dan tegangan pada rangka



Gambar 7: Massa jenis produk komposit

Berdasarkan perbandingan kekuatan material dan hasil simulasi, aluminium 6063-T5 masih mampu menahan tegangan maksimum pada area kritis rangka sebesar 85,14 MPa karena memiliki tegangan luluh lentur sebesar 156,40 MPa. Sementara itu, Gambar 7 menunjukkan bahwa massa jenis komposit menurun seiring dengan bertambahnya jumlah lapisan *carbon fiber*. Konfigurasi 2CF1GF menghasilkan massa jenis terendah, yaitu 2,14 g/cm³ atau sekitar 20,7% lebih rendah dibandingkan aluminium 6063-T5. Hasil tersebut menunjukkan bahwa komposit 2CF1GF berpotensi digunakan sebagai alternatif material rangka yang lebih ringan, khususnya pada bagian yang mengalami tegangan kerja rendah hingga 18,30 MPa.

Dari sisi implementasi, hasil penelitian ini mendukung penerapan pendekatan *zone-based material selection*, yaitu penggunaan material yang berbeda pada setiap bagian rangka berdasarkan distribusi tegangan yang terjadi. Pada area dengan tegangan kerja rendah hingga menengah, komposit 2CF1GF dapat dipertimbangkan sebagai pengganti aluminium 6063-T5 karena kekuatannya masih berada di atas tegangan rata-rata yang bekerja pada rangka. Namun, penerapannya tetap memerlukan evaluasi faktor keamanan, karakteristik sambungan, dan kondisi pembebanan aktual.

Pada area kritis dengan tegangan yang lebih tinggi, komposit 2CF1GF belum dapat digunakan secara langsung tanpa peningkatan kemampuan mekanik. Modifikasi dapat dilakukan melalui penambahan jumlah lapisan *carbon fiber*, optimasi orientasi serat, peningkatan kualitas ikatan antarlapisan, atau pengembangan struktur hibrida komposit–aluminium. Strategi tersebut diharapkan dapat mempertahankan keuntungan berupa massa yang lebih rendah sekaligus memenuhi kebutuhan kekuatan struktural rangka.

Hasil simulasi elemen hingga juga menunjukkan bahwa sambungan *roll bar* dengan bagian belakang dudukan roda merupakan area kritis yang memerlukan perhatian khusus dalam proses perancangan dan fabrikasi. Secara keseluruhan, komposit hibrida serat karbon–serat kaca memiliki potensi sebagai material alternatif untuk rangka kendaraan hemat energi apabila diterapkan berdasarkan tingkat pembebanan pada setiap zona struktur. Penelitian lanjutan masih diperlukan untuk meningkatkan kekuatan pada area kritis serta mengoptimalkan jumlah, susunan, dan orientasi lapisan serat agar diperoleh kinerja struktural yang lebih baik.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan profil *hollow tube* berbahan komposit hibrida serat karbon–serat kaca menggunakan metode *vacuum infusion* sebagai alternatif material ringan untuk rangka kendaraan hemat energi. Variasi susunan lapisan serat terbukti

memengaruhi massa jenis dan kekuatan lentur komposit. Konfigurasi dua lapis *carbon fiber* dan satu lapis *glass fiber* (2CF1GF) menunjukkan kinerja terbaik dengan tegangan luluh lentur sebesar 31,13 MPa, tegangan lentur maksimum sebesar 38,61 MPa, dan massa jenis 2,14 g/cm³ atau 20,7% lebih rendah dibandingkan aluminium 6063-T5. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan proporsi *carbon fiber* dapat meningkatkan kekuatan lentur sekaligus menurunkan massa jenis komposit.

Berdasarkan hasil simulasi pembebanan, komposit 2CF1GF berpotensi diterapkan pada bagian rangka dengan tegangan kerja rendah, terutama pada area dengan tegangan rata-rata hingga 18,30 MPa. Namun, material ini belum dapat menggantikan aluminium 6063-T5 secara menyeluruh karena tegangan maksimum pada area kritis rangka mencapai 85,14 MPa. Oleh karena itu, penerapan komposit perlu dilakukan menggunakan pendekatan pemilihan material berbasis zona, dengan mempertimbangkan distribusi tegangan pada setiap bagian rangka.

Penelitian selanjutnya perlu diarahkan pada peningkatan kekuatan komposit melalui optimasi jumlah dan orientasi lapisan serat, peningkatan kualitas ikatan antarlapisan, serta pengembangan struktur hibrida komposit–aluminium. Evaluasi terhadap pembebanan dinamis, kelelahan, karakteristik sambungan, dan mekanisme kegagalan menggunakan *Scanning Electron Microscopy* juga diperlukan. Selain itu, analisis proses manufaktur dan biaya produksi perlu dilakukan untuk menilai kelayakan penerapan komposit ini secara lebih luas pada rangka kendaraan hemat energi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih diucapkan kepada Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Indonesia atas segala dukungan yang diberikan dalam penelitian ini.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan bahwa data-data yang dipublikasikan pada naskah ini tidak terdapat konflik kepentingan terhadap pihak-pihak manapun.

DAFTAR PUSTAKA

- Al Azzawi, W., Kadhim, H., & Saad Jomah, A. J. (2024). Mechanical Properties Characterization of Glass/Carbon Fiber Hybrid Multilayer Composite under Environmental Aging Condition. *Diyala Journal of Engineering Sciences*, 17(1), 94–102.
- Alghamdi, S. S., John, S., Choudhury, N. R., & Dutta, N. K. (2021). Additive manufacturing of polymer materials: Progress, promise and challenges. *Polymers*, 13(5), 1–39.
- Azissyukhron, M., & Hidayat, S. (2020). Perbandingan Kekuatan Material Hasil Metode Hand Lay-up dan Metode Vacuum Bag Pada Material Sandwich Composite. *Prosiding Industrial Research Workshop and National Seminar*, 9, 1–5.
- Castanie, B., Bouvet, C., & Ginot, M. (2020). Review of composite sandwich structure in aeronautic applications. In *Composites Part C: Open Access* (Vol. 1). Elsevier B.V.
- Fajarudin, H., & Widodo, R. D. (2021). Kekuatan Tarik Material Fiber Carbon Dan Fiber Glass Berdasarkan Orientasi Serat Berbasis Matriks epoxy. *Jurnal Inovasi Mesin*, 3(1), 20–26.
- Gultom, A., Safriwardy, F., Rizki, M. N., & Masrullita, M. (2024). Effect of Volume Fraction Variation of Hybrid Composite Reinforced Bamboo Fiber and Fiber-Glass Using Polyyster Resin on Tensile Strength and Impact. *Electronic Journal of Education, Social Economics and Technology*, 5(1), 1–9.
- Jamil, K. F., & Aritonang, S. (2025). Perbandingan Analisis Struktur dan Sifat Mekanik Material Komposit dari Weave Carbon Fiber & Chopped Carbon Fiber. *Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi*, 8(2), 340–350.
- Jaya, K. I., Muzayadah, N. L., Nurtiasto, T. S., Fitriansyah, R., & Ramadhan, F. (2020). Masalah Infusion Resin pada Sandwich Composite Honeycomb Structure Menggunakan Metode VARI. *Seminar Nasional Ilmu Teknik dan Aplikasi Industri*, 3, 1–5.
- Negoro, D. A. K. R., Setiawan, F., & Putra, I. R. (2023). Analisis Kekuatan Tarik Material Komposit Serat Karbon. *Teknika STTKD: Jurnal Teknik, Elektronik, Engine*, 9(1), 159–167.
- Phiri, R., Mavinkere Rangappa, S., Siengchin, S., Oladijo, O. P., & Ozbakkaloglu, T. (2024). Advances in lightweight composite structures and manufacturing technologies: A comprehensive review. *Heliyon*, 10(21), e39661.
- Priyanto, K., Haniel, H., Palmiyanto, M. H., & Priyambodo, B. H. (2025). Flexural Characteristics of Roll-Wrapped Gfrp Composite Hollow Square Tube. *Jurnal Teknik Mesin*, 14(2), 117.
- Rajak, D. K., Wagh, P. H., & Linul, E. (2021). Manufacturing technologies of carbon/glass fiber-reinforced polymer composites and their properties: A review. *Polymers*, 13(21).
- Suryono, A. F., Faizal, A., & Hestiawan, H. (2020). Pengaruh Post Curing Treatment dan Perendaman Air Laut pada Komposit Hybrid Kevlar/Karbon. *Jurnal Rekayasa Mekanik*, 4(1), 13–17.
- Utomo, W. B., & Drastiawati, N. S. (2021). Pengaruh Variasi jenis core , temperatur curing dan post-curing karakteristik bending komposit sandwich serat karbon dengan metode vacuum infusion. *Jurnal Teknik Mesin*, 9(2), 45–54.

- Wibowo, Ajeng, & Rifdian. (2023). Pengaruh Variasi Arah Serat Dan Jumlah Layer Terhadap Uji Tarik Dan Impact Komposit Serat Karbon Fiber. *Approach : Jurnal Teknologi Penerbangan*, 7(1), 1–6.
- Wirama, I. W. P., Astika, I. M., & Ary Subagia, I. D. . (2022). Uji Kekuatan Bending Pipa Komposit Jute-Epoxy pada Perlakuan Rendaman Air Panas. *Jurnal Energi Dan Manufaktur*, 14(2), 72.
- Yurii, N. (2024). Mechanical Properties of Glass Fiber and Carbon Fiber Reinforced Composites. *International Journal of Advanced Research*, 12(10), 518–525.
- Yusuf, M., Salami, O., & Amusat, W. O. (2024). Advances in carbon-fiber reinforced polymers and composites for sustainable concrete structures. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 23(2), 2308–2330.