

Perbandingan Analisis Struktur Dan Sifat Mekanik Material Komposit Dari *Weave Carbon Fiber & Chopped Carbon Fiber*

Khoirul Fajril Jamil¹, Sovian Aritonang²

^{1,2)} Program Studi Fisika, Universitas Pertahanan Republik Indonesia, Sentul, Bogor, 16810.

Email: khoirularil.ka@gmail.com, soviaan.aritonang@idu.ac.id

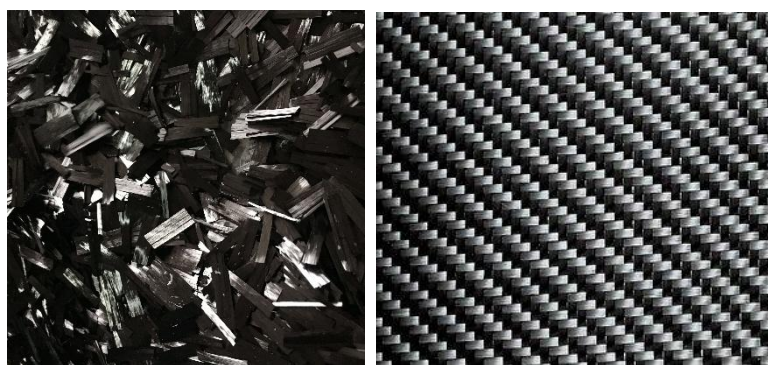
ABSTRACT

In this paper, the structure and mechanical properties of Weave carbon fiber and Chopped carbon fiber are compared. Both of these carbon fibers are used as composite materials for defence equipment and automotive materials applications. Weave carbon fiber is a regular woven carbon fiber structure, which provides high tensile strength and elasticity, making it suitable for applications that require structural stability and balance, as well as resistance to deformation. On the other hand, Chopped carbon fiber is short fibers entangled in the matrix and distributed randomly, so that it has a better level of impact resistance but lower tensile strength. 2D manufacturing involves tensile testing, flexural testing, impact testing, and hardness measurements. Strain 2D Weave carbon fiber has a strength of up to 500 MPa and an elastic modulus of up to 25 GPa, making it suitable for applications that require high mechanical strength. Fiber fraction test Chopped carbon fiber shows the highest fiber fraction impact resistance of 1668 J/m at 8% fiber fraction but decreases at high fiber fraction. Weave carbon fiber has small deflection and good load resistance compared to Chopped carbon fiber. This journal can provide insight into the selection of the right material for industries that require high-strength but also lightweight materials. As planned, the selection of such materials is largely determined by the specific application desired.

Kata Kunci: Carbon Fiber, Weave carbon fiber, Chopped carbon fiber, Composite Material

PENDAHULUAN

Serat yang digunakan. Karena komposit terdiri dari serat dan matriks yang sama pada dasarnya, perbedaan teknik penataan dan orientasi serat jelas akan mempengaruhi sifat mekanik lainnya, termasuk kekuatan tarik, kekakuan, ketahanan benturan, [7]. Sebagai contoh, *weave carbon fiber* memiliki serat dengan serat reguler 2D, 3D, atau 5D, yang memberikan karakteristik mekanik yang berbeda bergantung pada orientasi serat dan beban serat beasiswa diterapkan.



Gambar 1. Material *Chopped Carbon* [23] dan *Weave Carbons* [22]

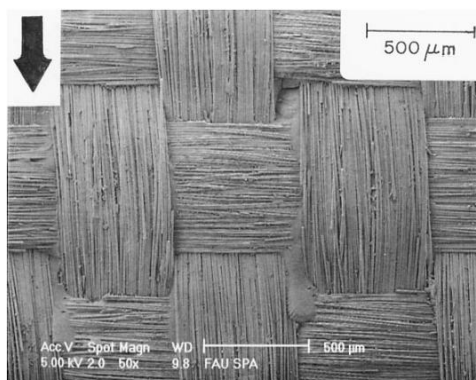
Selain struktur serat, faktor lain yang mempengaruhi sifat komposit meliputi jenis matriks yang digunakan, rasio fraksi volume serat terhadap matriks, serta proses manufaktur yang diterapkan. Teknik produksi seperti resin transfer molding (RTM), *vacuum-assisted resin infusion* (VARI), atau *autoclave curing* dapat menghasilkan komposit dengan tingkat kepadatan serat yang lebih tinggi dan kualitas ikatan yang lebih baik antara matriks dan serat, sehingga meningkatkan performa mekaniknya.

Dengan keunggulan dalam rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi, ketahanan terhadap korosi, serta fleksibilitas dalam desain, material komposit semakin banyak digunakan dalam berbagai industri, termasuk dirgantara, otomotif, perkapalan, olahraga, hingga pertahanan dan militer. Aplikasi ini menunjukkan bahwa pemahaman yang mendalam tentang interaksi antara serat dan matriks, serta pengaruh struktur anyaman serat, sangat penting dalam mengoptimalkan performa material komposit untuk penggunaan spesifik.

Serat karbon adalah serat yang terdiri dari sedikitnya 92 wt.% karbon. Serat karbon merupakan serat pendek atau kontinu, struktur kristalnya bisa kristal reguler, amorf, atau sebagian, dan bentuk kristalnya biasanya struktur kristal grafit, yaitu, atom karbon hibridisasi sp^2 , tersusun dua dimensi, terletak dalam struktur sarang lebah pada bidang x-y. Atom karbon dalam satu lapisan terikat oleh (1) ikatan kovalen yang disediakan oleh tumpang tindih orbital hibridisasi sp^2 , dan (2) ikatan logam yang disediakan oleh orbit delokalisasi p_z , yaitu, elektrolit. Orbit delokalisasi menjadikan grafit konduktor listrik dan konduktor termal yang baik pada bidang x-y. Ikatan antarlapisan adalah ikatan *van der Waals*, dan karena itu lapisan karbon dapat dengan mudah meluncur terhadap satu sama lain; grafit adalah isolator listrik dan isolator termal dalam arah tegak lurus terhadap lapisan. Karena perbedaan dalam kekuatan ikatan pada dalam bidang dan antarbidang, grafit adalah elastomer: terhadap bidang, grafit menunjukkan modulus elastisitas yang tinggi, dan tegak lurus terhadap bidang, modulus elastisitasnya rendah. Oleh karena itu, grafit adalah bahan anisotropik sangat yang [3].

Keuntungan dari serat karbon yaitu biaya lebih rendah, berat jenis rendah dari serat kaca, kekuatan tarik dan tekan yang tinggi, untuk kerugiannya yaitu ketahanan benturan yang rendah dan konduktivitas yang tinggi, sehingga menyebabkan konslet di mesin listrik bila tidak dilindungi [9].

Weave carbon fiber



Gambar 2. SEM dari Weave carbon fiber [3].

Weave carbon fiber merupakan salah satu jenis komposit serat karbon yang memiliki pola anyaman khas pada strukturnya. Pola anyaman ini tidak hanya berperan dalam aspek estetika, tetapi juga secara signifikan memengaruhi sifat mekanik dan performa material secara keseluruhan. Variasi dalam sudut, arah serat, serta teknik penumpukan lapisan akan sangat menentukan karakteristik akhir dari material, termasuk kekuatan tarik, kekakuan, serta daya tahan terhadap berbagai jenis pembebanan [12].

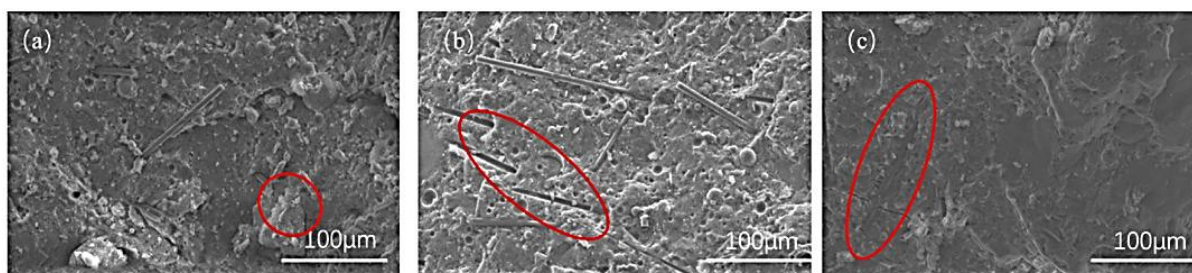
Keunggulan utama dari pola anyaman pada *Weave carbon fiber* adalah kemampuannya dalam memberikan fleksibilitas yang lebih baik dibandingkan serat karbon unidirectional. Struktur anyaman memungkinkan material untuk menyesuaikan diri dengan bentuk kompleks tanpa mengorbankan kekuatan mekaniknya. Selain itu, pola ini juga meningkatkan ketahanan terhadap tegangan dan distribusi beban yang lebih merata, sehingga mengurangi kemungkinan terjadinya konsentrasi tegangan yang dapat menyebabkan kegagalan struktural [7].

Dapat dilihat bahwa penggunaan *woven fabrics* dalam industri komposit memiliki fitur yang menarik. *Woven fabrics* ini memungkinkan diproduksinya dengan teknik manufaktur yang lebih efisien dan berbiaya rendah. Metode produksi yang baru dikembangkan memungkinkan pengurangan jumlah komponen dan kebutuhan alat cetak yang lebih sedikit, serta biaya lay-up

yang lebih rendah. Secara khusus, dalam pembuatan komposit berbasis *Weave carbon fiber*, telah dikembangkan metode Resin *Infusion Molding Process* untuk memproduksi produk tersebut. Proses pencetakan infus resin ini merupakan metode untuk mencetak komposit. Teknik ini memungkinkan resin untuk meresap lebih merata pada serat karbon dan menghasilkan komposit yang lebih homogen dengan kemampuan dan kekuatan lebih tinggi. Selain itu, metode ini menghasilkan jumlah cacat produksi antara lain voids dan delaminasi, cacat produksi yang menjadi kendala dalam metode konvensional.

Dengan adanya kemajuan dalam teknik produksi dan keunggulan struktural yang dimiliki, *Weave carbon fiber* semakin banyak digunakan dalam berbagai aplikasi industri, mulai dari otomotif, dirgantara, hingga peralatan olahraga. Kombinasi antara kekuatan tinggi, bobot yang ringan, serta efisiensi produksi menjadikannya pilihan unggul untuk pengembangan material komposit masa depan.

Chopped carbon fiber



Gambar 3. *Chopped carbon fiber* SEM [10].

Chopped carbon fiber, atau serat karbon cincang, terdiri dari serat-serat pendek yang terdistribusi secara acak dalam matriks, menciptakan material yang berbeda dalam sifat mekaniknya dibandingkan *weave carbon fiber* [8]. Struktur serat yang acak ini memberikan kekuatan tarik yang lebih rendah karena ketidakteraturan dan kurangnya orientasi serat yang spesifik; matriks epoksi sulit mendistribusikan beban secara merata melalui serat cincang yang lebih pendek. Kekuatan tarik material komposit dengan serat karbon cincang cenderung berkurang dibandingkan material berbasis serat panjang atau tenun, karena serat pendek sulit mempertahankan ikatan yang kuat di dalam matriks di bawah tegangan tinggi. Namun, *Chopped carbon fiber* memiliki ketahanan yang baik terhadap benturan, karena distribusi acak serat pendek memungkinkan material ini untuk menyerap energi impact lebih efektif [10].

METODE PENELITIAN

Dalam hal ini, metode penelitian ini merupakan pendekatan komprehensif karena berdasarkan analisis mendalam kepada dua jurnal referensi utama yang digunakan untuk membahas karakteristik pose, yaitu *weave carbon fiber*, dan *chopped carbon fiber*. Oleh karena itu, langkah pertama yang diambil melibatkan identifikasi dua jurnal, yaitu jurnal satu yang terkait dengan *weave carbon fiber* dan jurnal lain yang mencirikan *chopped carbon fiber*. Tujuan utama dari metode penelitian ini adalah memberikan pemahaman perbedaan sifat-sifat mekanik dari kedua serat karbon tersebut. Jumlah item ini termasuk, tetapi tidak terbatas pada, sifat-sifat mekanik tarik ligament sebenarnya, pushoff pita tulang bio string sebenarnya, penyerapan impact, dan sifat-sifat Vickers. Dengan pengetahuan tentang perbedaan karakteristik tersebut, peneliti berharap dapat memastikan penerapan serat karbon yang tepat.

Data uji mekanik, seperti hasil uji tarik, uji lentur, uji impact, dan uji kekerasan, dikumpulkan dari setiap jurnal sebagai dasar untuk melakukan perbandingan. Data-data tersebut kemudian dianalisis lebih lanjut untuk menelaah struktur mikro dan karakteristik mekanik masing-masing serat karbon. Analisis ini bertujuan untuk mengidentifikasi perbedaan dalam performa material berdasarkan hasil uji yang dilaporkan dalam jurnal-jurnal terkait. Selain itu, penelitian ini juga

mencakup evaluasi terhadap faktor-faktor yang memengaruhi sifat mekanik serat karbon, seperti orientasi serat, densitas, dan metode pengolahan material.

Selanjutnya, dilakukan analisis data secara terpisah untuk kedua jenis serat karbon, yaitu *weave carbon fiber* dan *chopped carbon fiber*. Analisis ini mencakup perbandingan rata-rata hasil uji mekanik, seperti kekuatan tarik maksimum, modulus elastisitas, ketahanan impak, dan nilai kekerasan. Selain itu, karakteristik struktur serat, seperti pola anyaman pada *weave carbon fiber* dan distribusi serat pada *chopped carbon fiber*, juga dibandingkan untuk memahami pengaruhnya terhadap sifat mekanik material. Dengan pendekatan ini, penelitian ini dapat membandingkan secara detail kekuatan, kekakuan, ketahanan benturan, dan kekerasan dari kedua jenis serat karbon tersebut.

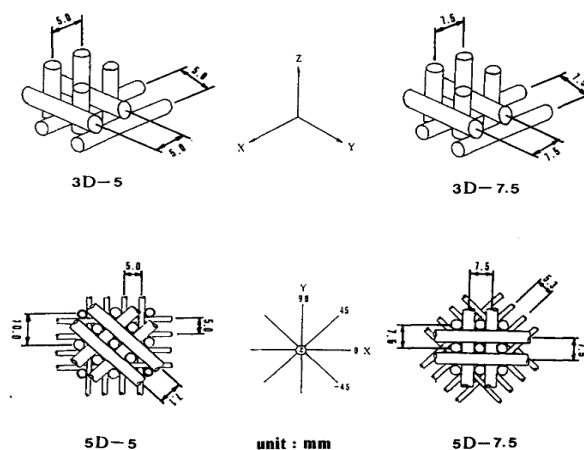
Hasil analisis data kemudian digunakan untuk menyusun kesimpulan yang komprehensif mengenai perbedaan sifat mekanik antara *weave carbon fiber* dan *chopped carbon fiber*. Berdasarkan temuan tersebut, penelitian ini juga memberikan rekomendasi mengenai aplikasi yang paling cocok untuk masing-masing jenis serat karbon. Misalnya, *weave carbon fiber* yang memiliki kekuatan dan kekakuan tinggi mungkin lebih cocok digunakan dalam industri alutsista (alat utama sistem pertahanan) dan aerospace, di mana material dengan performa mekanik tinggi dan ringan sangat dibutuhkan. Sementara itu, *chopped carbon fiber*, yang memiliki karakteristik lebih fleksibel dan mudah diproses, mungkin lebih sesuai untuk aplikasi dalam industri otomotif atau komponen-komponen yang memerlukan ketahanan impak yang baik.

Metode komprehensif yang digunakan dalam penelitian ini memungkinkan evaluasi mendalam terhadap performa dan potensi masing-masing serat karbon dalam aplikasi yang menuntut spesifikasi mekanik tinggi. Selain itu, penelitian ini juga membuka peluang untuk pengembangan lebih lanjut, seperti eksplorasi terhadap kombinasi kedua jenis serat karbon atau modifikasi proses manufaktur untuk meningkatkan sifat mekanik material. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memberikan pemahaman yang lebih baik mengenai karakteristik *weave carbon fiber* dan *chopped carbon fiber*, tetapi juga memberikan kontribusi dalam pengembangan material komposit yang lebih efisien dan efektif untuk berbagai kebutuhan industri.

Selain itu, penelitian ini juga mempertimbangkan aspek-aspek lain yang dapat memengaruhi performa serat karbon, seperti pengaruh lingkungan (misalnya, paparan suhu tinggi atau kelembaban), ketahanan terhadap korosi, dan biaya produksi. Hal ini penting untuk memastikan bahwa rekomendasi yang diberikan tidak hanya berdasarkan pada performa mekanik semata, tetapi juga mempertimbangkan faktor-faktor praktis yang dapat memengaruhi keputusan dalam pemilihan material. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi yang berguna bagi para insinyur, peneliti, dan praktisi industri yang terlibat dalam pengembangan dan aplikasi material komposit berbasis serat karbon.

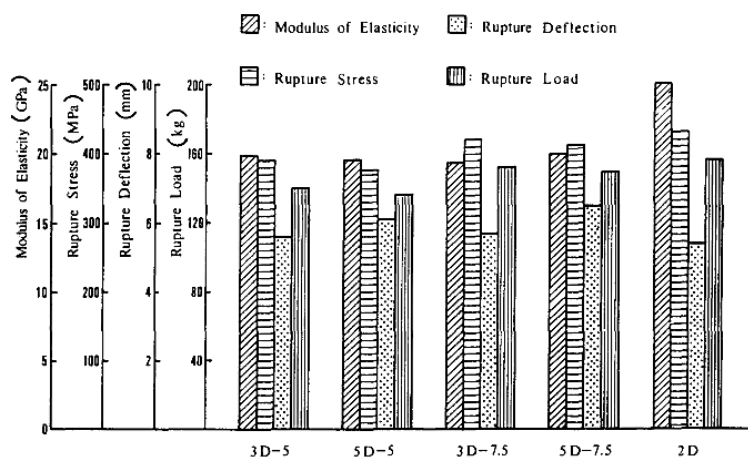
HASIL DAN PEMBAHASAN

Weave carbon fiber



Gambar 4. Struktur Geometri dari Fabrikasi 3D dan 5D [1].

Weave carbon fiber, atau serat karbon tenun, memiliki struktur serat panjang yang teranyam secara teratur, yang memungkinkan material ini memiliki kekuatan tarik dan lentur yang tinggi. Struktur anyaman pada *weave carbon fiber* memberikan stabilitas struktural karena orientasi serat yang searah dan teratur, yang mengoptimalkan kemampuan material untuk menahan beban pada arah tertentu [13]. Material berbasis anyaman serat karbon tiga dimensi (3D) atau lima dimensi (5D) menunjukkan kekuatan tarik yang lebih baik dibandingkan material serat karbon dua dimensi (2D) karena adanya interaksi antar lapisan yang kuat serta peningkatan daya tahan terhadap retakan antar lapisan [1].



Gambar 5. Diagram Karakteristik Struktur Geometri *Weave carbon fiber* [1].

Weave carbon fiber memiliki keunggulan dalam hal kekuatan dan stabilitas struktural, menjadikannya pilihan yang ideal untuk berbagai aplikasi yang membutuhkan ketahanan tinggi terhadap tegangan dan beban mekanik yang ekstrem. Material ini banyak digunakan dalam komponen struktural pesawat terbang, kendaraan bermotor, serta aplikasi industri lainnya yang memerlukan kombinasi antara kekuatan, ringan, dan daya tahan terhadap kelelahan material.

Pola anyaman pada *weave carbon fiber* tidak hanya meningkatkan ketahanan terhadap gaya tarik, tetapi juga memberikan ketahanan yang lebih baik terhadap gaya lentur. Struktur anyaman ini membantu mendistribusikan tegangan secara merata di seluruh material, sehingga meminimalkan risiko deformasi saat menerima beban berulang atau terus menerus. Dengan adanya konfigurasi serat yang saling mengikat satu sama lain, material ini mampu mempertahankan bentuk dan integritas strukturalnya dalam jangka waktu yang lebih lama dibandingkan dengan jenis serat lainnya [15].

Selain itu, kepadatan anyaman dalam *weave carbon fiber* terbukti lebih berpengaruh terhadap kekuatan lentur dibandingkan dengan orientasi arah struktur serat itu sendiri. Hal ini dikarenakan kegagalan lentur pada material ini umumnya dimulai pada ikatan benang di lapisan permukaan, bukan secara seragam di seluruh serat seperti yang terjadi pada uji tarik. Dengan kata lain, semakin rapat pola anyaman, semakin kuat pula material dalam menahan gaya lentur, sehingga mengurangi kemungkinan retak atau kerusakan akibat pembebanan mekanik yang berulang [1].

Dengan karakteristik tersebut, *weave carbon fiber* menjadi solusi unggul dalam pengembangan material komposit untuk berbagai aplikasi teknik yang membutuhkan kombinasi optimal antara kekuatan mekanik, daya tahan terhadap kelelahan, serta efisiensi berat.

Chopped carbon fiber

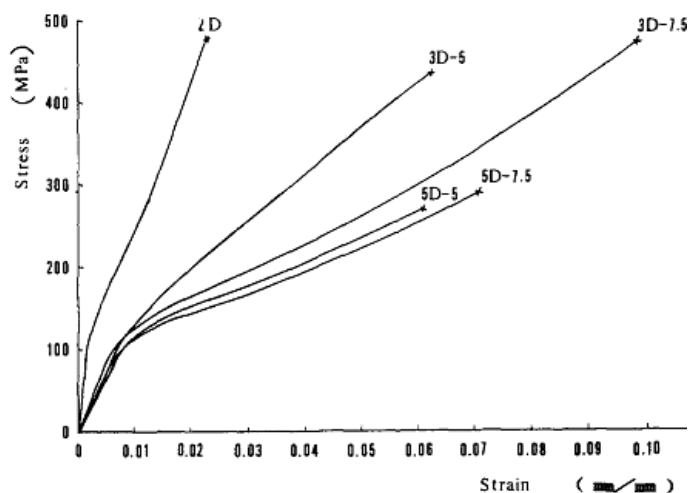
Analisis kurva tegangan-regangan menunjukkan bahwa kekuatan putus pada material komposit memiliki urutan $2D > 3D > 5D$, dengan komposit 2D dan 3D menunjukkan kekuatan putus sekitar 1,6 kali lebih besar dibandingkan dengan 5D. Hal ini disebabkan oleh perbedaan dalam konfigurasi serat, di mana komposit 5D memiliki kandungan serat aksial yang lebih rendah dan proporsi serat dengan orientasi $+45^\circ$ yang lebih besar. Kandungan serat aksial yang lebih tinggi pada komposit 2D dan 3D memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan kekuatan tarik material, menjadikannya lebih tahan terhadap tegangan sebelum mengalami kegagalan.

Dalam hal regangan putus, urutannya adalah tipe 7,5 mm > tipe 5 mm > 2D, di mana komposit 2D menunjukkan regangan putus yang lebih rendah dibandingkan dengan varian lainnya. Hal ini dapat dijelaskan oleh struktur anyaman 2D, yang memiliki ikatan benang yang lebih kuat, sehingga menghambat deformasi material sebelum mencapai batas kegagalan. Sebaliknya, komposit 3D dan 5D menunjukkan pola kerusakan bertahap dengan regangan yang lebih tinggi, yang mengindikasikan kemampuan mereka dalam menyerap deformasi lebih besar sebelum terjadi kegagalan total.

Ketika dibandingkan pada defleksi tertentu (0,02 mm/mm), tegangan yang dialami oleh material 2D tercatat dua hingga tiga kali lebih besar dibandingkan dengan 3D dan 5D. Hal ini sekali lagi dikaitkan dengan kandungan serat aksial yang lebih tinggi dalam komposit 2D, yang memungkinkan material menahan tegangan lebih besar sebelum mengalami deformasi yang signifikan. Sementara itu, dalam analisis lendutan pada tegangan tertentu (250 MPa), urutan regangan dari yang tertinggi ke yang terendah adalah 5D-7,5 > 5D-5 > 3D-7,5 > 3D-5 > 2D. Struktur 5D, yang memiliki proporsi serat dengan orientasi +45° yang lebih dominan, menunjukkan regangan dan elastisitas tertinggi. Hal ini disebabkan oleh distribusi beban yang lebih baik, yang memungkinkan material menahan gaya eksternal dengan deformasi yang lebih besar sebelum mencapai batas elastisitasnya.

Di sisi lain, komposit 3D menunjukkan regangan yang lebih tinggi dibandingkan dengan 2D, karena sifat deformasi bertahap yang dimilikinya. Hal ini mengindikasikan bahwa meskipun komposit 2D lebih unggul dalam menahan tegangan tinggi, komposit 3D dan 5D lebih mampu beradaptasi dengan deformasi berulang sebelum mengalami kegagalan, menjadikannya lebih cocok untuk aplikasi yang membutuhkan fleksibilitas struktural dan ketahanan terhadap beban dinamis [1].

Secara keseluruhan, analisis ini menegaskan bahwa pemilihan konfigurasi anyaman dan struktur serat sangat berpengaruh terhadap sifat mekanik komposit, dengan 2D unggul dalam kekuatan tarik dan tegangan putus, sementara 3D dan 5D lebih fleksibel dan mampu menahan deformasi lebih besar, menjadikannya lebih sesuai untuk aplikasi yang memerlukan ketahanan terhadap pembebanan siklik dan gaya dinamis.



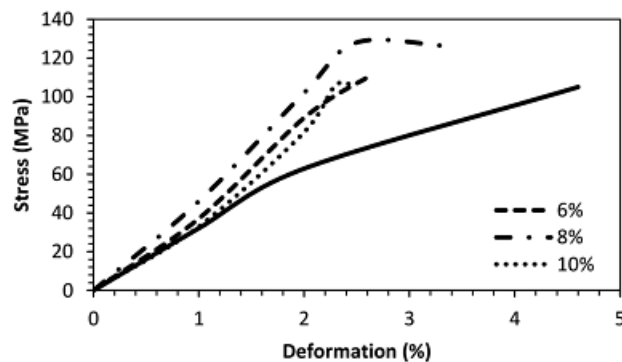
Gambar 6. Kurva tegangan/regangan berbagai CFRP struktural dalam ketegangan [1].

Epoksi sering digunakan sebagai matriks dalam komposit serat karbon karena memiliki sifat mekanik yang unggul, seperti kekakuan yang tinggi, penyusutan yang rendah selama proses pengerasan, serta stabilitas kimiawi yang baik setelah mengalami polimerisasi penuh. Selain itu, epoksi juga memiliki daya rekat yang kuat terhadap serat karbon, sehingga mampu mendistribusikan beban secara merata dan meningkatkan performa keseluruhan material komposit.

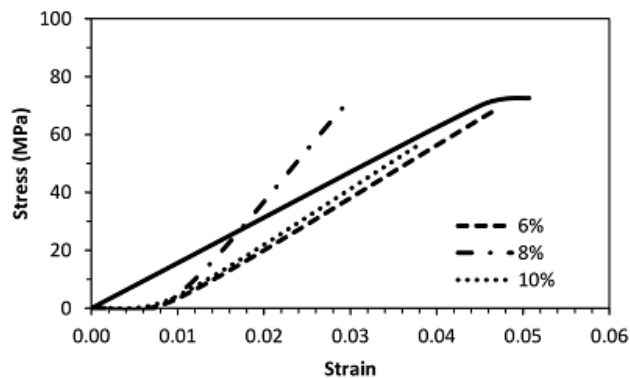
Dalam komposit berbasis *chopped carbon fiber*, fraksi berat serat memainkan peran krusial dalam menentukan sifat mekaniknya. Penelitian telah menunjukkan bahwa peningkatan fraksi serat cincang hingga 8% dapat memberikan peningkatan yang signifikan dalam kekuatan lentur serta

ketahanan terhadap dampak. Hal ini terjadi karena adanya distribusi serat yang optimal di dalam matriks epoksi, memungkinkan transfer tegangan yang lebih efektif dan meningkatkan daya tahan material terhadap beban mekanik.

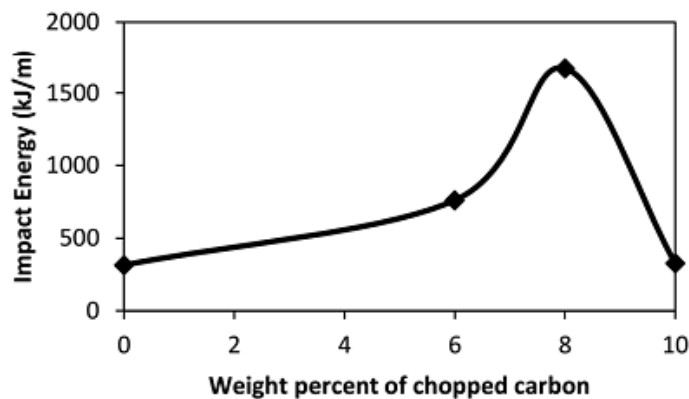
Namun, penambahan serat yang berlebihan, seperti pada fraksi 10%, justru dapat menurunkan kekuatan tarik komposit secara drastis. Hal ini disebabkan oleh lemahnya interaksi antara serat karbon yang pendek dengan matriks epoksi, yang menyebabkan terbentuknya zona-zona lemah dalam struktur material. Akibatnya, ketika komposit dikenai tegangan tarik, serat-serat yang tidak tertanam dengan baik dalam matriks lebih mudah terlepas, mengurangi kemampuan material dalam menahan beban[2]. Oleh karena itu, pemilihan fraksi serat yang tepat menjadi faktor penting dalam optimalisasi sifat mekanik komposit berbasis *chopped carbon fiber*, agar tetap mempertahankan keseimbangan antara kekuatan tarik, lentur, serta ketahanan impaknya.



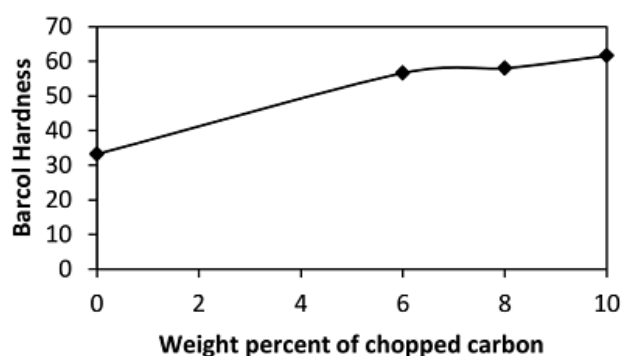
Gambar 7. Kurva Uji Tarik pada *Chopped carbon fiber*[2].



Gambar 8. Kurva Uji Pembengkokan pada *Chopped carbon fiber*[2].



Gambar 9. Kurva Uji Dampak pada *Chopped carbon fiber*[2].



Gambar 10. Kurva Uji Kekerasan pada *Chopped carbon fiber*[2].

Hasil pengujian mekanik menunjukkan bahwa penambahan *chopped carbon fiber* pada komposit berbasis epoksi tidak selalu memberikan peningkatan signifikan dalam kekuatan tarik, bahkan cenderung menurunkannya. Epoksi murni memiliki kekuatan tarik sebesar 73,5 MPa, namun ketika dicampur dengan serat karbon cincang, kekuatannya mengalami fluktuasi. Pada komposit dengan 6% serat karbon, kekuatan tarik turun menjadi 68,544 MPa, sementara pada 8% sedikit meningkat menjadi 70,761 MPa, sebelum akhirnya menurun drastis pada 10%, mencapai 57,04 MPa. Penurunan ini disebabkan oleh ketidakmampuan serat cincang untuk membentuk ikatan yang kuat dengan matriks epoksi, sehingga terjadi distribusi tegangan yang tidak merata dalam material. Menariknya, tingkat kerapuhan maksimum tercatat pada penguatan serat sebesar 8%, yang menunjukkan adanya batas optimal dalam penggunaan serat cincang sebelum menyebabkan degradasi sifat mekanik.

Pada pengujian lentur, tren yang berbeda diamati. Penambahan *chopped carbon fiber* justru memberikan peningkatan kekuatan hingga batas tertentu. Kekuatan lentur komposit dengan 6% serat karbon meningkat menjadi 114 MPa, kemudian mencapai puncaknya pada 8%, dengan nilai 128 MPa. Namun, ketika fraksi serat dinaikkan menjadi 10%, kekuatan lentur justru menurun ke 106 MPa. Penurunan ini disebabkan oleh ketidakmampuan epoksi untuk mengikat serat yang terlalu padat secara optimal, sehingga struktur menjadi lebih rentan terhadap retak dan delaminasi saat menerima beban lentur.

Hasil pengujian dampak menunjukkan peningkatan signifikan dalam ketahanan terhadap benturan dengan bertambahnya fraksi serat karbon hingga 8%. Pada komposit dengan 6% serat karbon, ketahanan dampak tercatat sebesar 760,734 J/m, dan terus meningkat hingga mencapai nilai tertinggi 1668 J/m pada 8% serat karbon. Namun, ketika fraksi serat bertambah menjadi 10%, ketahanan dampak mengalami penurunan drastis menjadi 326,156 J/m. Fenomena ini mengindikasikan bahwa pada konsentrasi serat yang terlalu tinggi, interaksi antar serat menjadi kurang efektif, sehingga energi benturan tidak dapat didistribusikan dengan baik dalam matriks epoksi.

Sebaliknya, pada uji kekerasan, material menunjukkan tren peningkatan yang konsisten seiring bertambahnya fraksi serat karbon. Kekerasan tertinggi tercatat pada komposit dengan 10% serat karbon, mencapai 61,6 Barcol, menunjukkan bahwa meskipun kekuatan tarik dan dampak menurun pada fraksi serat yang lebih tinggi, kekerasan permukaan material justru meningkat.

Selain performa mekaniknya, *chopped carbon fiber* juga memiliki keunggulan dari segi ekonomi dan kemudahan produksi. Berbeda dengan *weave carbon fiber*, yang memerlukan proses penenunan yang kompleks dan mahal, serat karbon cincang dapat langsung dicampur dengan matriks epoksi dan dicetak dalam berbagai bentuk dengan lebih cepat serta hemat biaya. Kemampuan produksi dalam skala besar dengan harga yang lebih rendah membuat *chopped carbon fiber* menjadi pilihan ideal untuk aplikasi massal, terutama dalam industri yang memerlukan material komposit dengan ketahanan benturan tinggi dan harga yang lebih kompetitif.

Namun, meskipun menawarkan keuntungan dari segi biaya dan kemudahan proses manufaktur, kelemahan utama *chopped carbon fiber* terletak pada kekuatan tarik dan kestabilan strukturalnya yang lebih rendah dibandingkan serat karbon berstruktur anyaman. Hal ini membatasi

penggunaannya dalam aplikasi yang memerlukan ketahanan tarik tinggi, seperti komponen struktural pesawat atau kendaraan performa tinggi. Oleh karena itu, *chopped carbon fiber* lebih cocok digunakan dalam aplikasi yang memprioritaskan ketahanan terhadap benturan, fleksibilitas desain, serta efisiensi biaya produksi, seperti pada industri otomotif, peralatan olahraga, dan perlindungan balistik[2].

Perbandingan

Stress

Hasil uji mengungkapkan bahwa *weave carbon fiber* memiliki kekuatan tarik yang lebih tinggi dibandingkan *chopped carbon fiber*. Struktur 2D *weave carbon fiber* mampu mencapai kekuatan tarik sekitar 500 MPa, menunjukkan performa yang sangat baik dalam menahan beban tarik. Namun, pada struktur 3D dan 5D, kekuatan tariknya mengalami penurunan, masing-masing menjadi sekitar 400 MPa dan 300 MPa[1]. Hal ini disebabkan oleh variasi ketebalan dan orientasi serat yang berbeda, yang memengaruhi distribusi beban secara tidak merata. Di sisi lain, *chopped carbon fiber* mencapai kekuatan tarik optimal pada fraksi berat serat 8%, dengan nilai sekitar 70 MPa, di mana interaksi antara serat dan matriks masih cukup baik. Namun, ketika fraksi serat ditingkatkan menjadi 10%, kekuatan tariknya turun signifikan menjadi 57 MPa akibat melemahnya ikatan antara serat pendek dan matriks epoksi, yang menyebabkan ketidakefektifan dalam menahan beban. Dengan demikian, *weave carbon fiber* tetap unggul dalam hal kekuatan tarik, sementara *chopped carbon fiber* memiliki batasan tertentu terkait fraksi serat untuk mempertahankan performa optimalnya[1].

Elastisitas

Serat karbon tenun menonjol karena modulus elastisitasnya yang lebih tinggi daripada serat karbon cincang, karena struktur 2D-nya mencapai nilai modulus elastisitas hingga 25 GPa, yang sangat baik dalam hal ketahanan deformasi. Namun, nilai modulus elastisitas untuk struktur 3D dan 5D tidak menunjukkan perilaku yang sama dan masing-masing sekitar 20 GPa dan 15 GPa, yang menunjukkan bahwa kompleksitas struktur karbon memengaruhi kinerja material. Di sisi lain, serat karbon cincang menunjukkan modulus elastisitas tertinggi pada fraksi serat 8%, yaitu sekitar 10 GPa, di mana interaksi serat-matriks masih optimal. Namun, saat fraksi serat meningkat menjadi 10%, nilai itu mulai menurun karena ikatan serat-matriks yang lemah, dan tidak lagi efektif dalam menahan beban. Oleh karena itu, serat karbon tenun tetap unggul dalam hal elastisitas, sedangkan serat karbon cincang memiliki batas fraksi serat tertentu yang dapat memberikan kinerja optimal.

Defleksi

Secara umum, dalam hal defleksi, *weave carbon fiber* menunjukkan performa yang jauh lebih baik dengan defleksi yang relatif kecil daripada *chopped carbon fiber*. Seperti dapat dilihat dari hasil uji defleksi, struktur 2D dari *weave carbon fiber* hanya mengalami defleksi hingga sekitar 1 mm pada suatu beban, menunjukkan kualitas terbaik dalam memelihara bentuk dan stabilitas strukturalnya. Jika dibandingkan dengan struktur 3D dan 5D, defleksi yang terbentuk jauh lebih besar yaitu 4.3 mm dan 5-6 mm yang dilaporkan oleh Chou et al.. Peningkatan defleksi tersebut disebabkan oleh posisi serat yang berorientasi secara kompleks dan penurunan ketebalan yang memperkuat distribusi beban yang menyebabkan tidak meratanya distribusi tersebut. Di sisi lain, *chopped carbon fiber* memperlihatkan defleksi yang lebih moderat, yaitu 2 mm pada fraksi berat serat optimal 8% dimana interaksi antara serat dan matriks masih kuat. Namun, es defleksi signifikan hingga 3.5 mm terjadi ketika fraksi serat dinaikkan hingga 10% karena Ketidakmampuan ikatan antara serat pendek dan matriks tersebut. Oleh karena itu, *weave carbon fiber* jauh lebih baik dalam hal resistansi terhadap defleksi, sedangkan *chopped carbon fiber* mempunyai kekurangan dalam hal stabilitas secara umum di fraksi serat yang lebih tinggi.

Ketahanan Beban

Serat karbon tenun juga menunjukkan jumlah beban tinggi yang dapat dipertahankan jika dibandingkan dengan serat karbon cincang, terutama pada struktur 2D. Selama pengujian beban

tekukan, struktur 2D serat karbon tenun dapat menahan beban hingga 300 N sebelum rusak. Sementara itu, struktur 3D dan 5D memiliki kemampuan beban yang sedikit lebih rendah, dengan kapasitas masing-masing 250 N dan 200 N. Perbedaan ini disebabkan oleh konfigurasi tenunan serat 3D dan 5D yang secara struktural lebih kompleks, sehingga menghasilkan kemampuan penyerapan energi yang lebih baik tetapi kekuatan tekukan yang sedikit lebih rendah dibandingkan dengan struktur 2D yang lebih sederhana.

Di sisi lain, *chopped carbon fiber* menunjukkan keunggulan dalam ketahanan terhadap dampak, terutama pada fraksi serat 8%. Pada kondisi ini, ketahanan dampak mencapai 1668 J/m, menunjukkan bahwa material ini memiliki kemampuan menyerap energi tumbukan yang sangat baik. Namun, ketika fraksi serat meningkat menjadi 10%, terjadi penurunan drastis dalam ketahanan dampak hingga 326 J/m. Penurunan ini disebabkan oleh lemahnya ikatan antara serat karbon yang terpotong dengan matriks epoksi, sehingga mengurangi kemampuan material dalam menahan energi tumbukan. Hal ini menunjukkan bahwa fraksi serat yang optimal sangat berpengaruh terhadap performa mekanik dari *chopped carbon fiber*, dan peningkatan fraksi serat yang tidak tepat dapat mengakibatkan penurunan kekuatan material secara signifikan.

Tabel 1. Perbandingan *Weave carbon fiber* & *Chopped carbon fiber*

Aspek	<i>Weave carbon fiber</i>	<i>Chopped carbon fiber</i>
Stress (Tegangan)	2D: 500 Mpa; 3D: 400 Mpa; 5D: 300 Mpa[1].	Optimal pada 8%: 70 Mpa; turun pada 10%: 57 Mpa [2].
Elastisitas	2D: 25 Gpa; 3D: 20 Gpa; 5D: 15 Gpa[1].	Optimal pada 8%: 10 Gpa; turun pada 10%: 7.5 Gpa [2].
Defleksi	2D: 1 mm; 3D: 4.3 mm; 5D: 5-6 mm[1].	Optimal pada 8%: 2 mm; meningkat pada 10%: 3.5 mm[2].
Ketahanan Beban	2D: 300 N; 3D: 250 N; 5D: 200 N[1].	Optimal pada 8%: 1668 N; turun pada 10%: 326 N [2].

KESIMPULAN

Dari hasil analisis, *weave carbon fiber* menunjukkan keunggulan dalam hal kekuatan tarik dan elastisitas, menjadikannya pilihan ideal untuk aplikasi yang memerlukan stabilitas struktural tinggi. Di sisi lain, *chopped carbon fiber* memiliki kelebihan dalam ketahanan dampak, terutama pada fraksi berat serat optimal sebesar 8%, di mana performanya mencapai titik tertinggi. Namun, ketika fraksi serat ditingkatkan hingga 10%, kekuatannya justru menurun akibat interaksi yang lemah antara serat pendek dan matriks epoksi, yang menyebabkan ketidakefektifan dalam menahan beban. Dengan demikian, pemilihan jenis serat karbon harus disesuaikan dengan kebutuhan aplikasi, di mana *weave carbon fiber* lebih cocok untuk aplikasi yang membutuhkan kekuatan dan stabilitas, sementara *chopped carbon fiber* lebih efektif untuk aplikasi yang memprioritaskan ketahanan dampak pada fraksi serat yang tepat.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Chou, S., Chen, H. C., & Chen, H. E. (1992). Effect of weave structure on mechanical fracture behavior of three-dimensional carbon fiber fabric reinforced epoxy resin composites. *Composites science and technology*, 45(1), 23-35.
- [2] Ozsoy, N., Ozsoy, M., & Mimaroglu, A. (2016). Mechanical properties of *chopped carbon fiber* reinforced epoxy composites. *Acta Physica Polonica A*, 130(1), 297-299.
- [3] Chung, D. (2012). *Carbon Fiber Composites*. Elsevier.
- [4] Pujiati, R. (2017). Analisa Teknis Bahan Komposit dari Serat Alami Ampas Tebu untuk Bahan Alternatif Pembuatan Kulit Kapal. Tugas Akhir Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
- [5] Matthews & Rawlings. 1994. *Composite Materials Engineering and Science*. London : Woodhead Publishing
- [6] Anwar, B., Djuanda, & Samnur. (2019). Analisis sifat mekanik material chopped strand mat fiber composite perahu fiber berbahan dasar tripleks. *Prosiding Seminar Nasional LP2M*

- UNM: Peran Penelitian dalam Menunjang Percepatan Pembangunan Berkelanjutan di Indonesia, 329-332. ISBN: 978-623-7496-14-4.
- [7] Neumeister, J., Jansson, S., & Leckie, F. (1996). The effect of fiber architecture on the mechanical properties of carbon/carbon fiber composites. *Acta materialia*, 44(2), 573-585.
- [8] Campbell, F. C., 2010. *Structure Composite Material*. ASM International.
- [9] Gibson, R. F. 2012. *Principles Of Composite Material Mechanic*. Edisi Ketiga. Boca Raton: CRC Press.
- [10] Li, W. Q., Pei, C., Zhu, Y., & Zhu, J. H. (2021). Effect of *chopped carbon fiber* on interfacial behaviors of ICCP-SS system. *Construction and Building Materials*, 275, 122117.
- [11] Alif, N., Carlsson, L. A., & Boogh, L. (1998). The effect of weave pattern and crack propagation direction on mode I delamination resistance of woven glass and carbon composites. *Composites Part B: Engineering*, 29(5), 603-611.
- [12] Wibowo, A. S., Wulansari, A., & Rifdian, I. S. (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.
- [13] Rattan, R., & Bijwe, J. (2006). Carbon fabric reinforced polyetherimide composites: Influence of weave of fabric and processing parameters on performance properties and erosive wear. *Materials Science and Engineering: A*, 420(1-2), 342-350. doi:10.1016/j.msea.2006.01.090
- [14] Rattan, R., Bijwe, J., & Fahim, M. (2008). Optimization of weave of carbon fabric for best combination of strength and tribo-performance of polyetherimide composites in adhesive wear mode. *Wear*, 264(1-2), 96-105. doi:10.1016/j.wear.2007.02.001
- [15] Hosur, M. V., Adya, M., Alexander, J., Vaidya, U. K., Jeelani, S., & Mayer, A. (2003). Studies on impact damage resistance of affordable stitched woven carbon/epoxy composite laminates. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 22(10), 927-952.
- [16] Ozsoy, A., Ersoy, N., & Kucuk, H. (2016). Effect of *chopped carbon fiber* reinforcement on mechanical properties of epoxy composites. *Journal of Composite Materials*, 50(2), 155-167. <https://doi.org/10.1177/0021998315579712>
- [17] Santoso, B., & Wijaya, H. (2021). Pengaruh serat karbon terhadap sifat mekanik dan topografi pada komposit bermatriks polyester BQTN 157. *Jurnal Syntax Admiration*, 8(2), 112-125. <https://jurnalsyntaxadmiration.com/index.php/jurnal/article/view/271/425>
- [18] Rahman, T., & Syahputra, F. (2020). Perbandingan karakteristik serat karbon antara metode manual lay-up dan vacuum infusion dengan penggunaan fraksi berat serat 60%. *Proceedings of the National Conference on Advanced Materials*, 5, 45-58.
- [19] Setiawan, D., & Hidayat, M. (2019). Analisis kekuatan komposit berpenguat serat karbon dengan matriks Lycal 1011. *Jurnal Teknologi Material*, 14(3), 200-210. <https://pdfs.semanticscholar.org/ef31/f4499296671c8771c800fc62a31cd2722a33.pdf>
- [20] Pratama, R. (2020). *Analisa patahan komposit polyester berpenguat serat karbon dan wire mesh dengan variasi fraksi volume serat* [Undergraduate thesis, Institut Teknologi Nasional]. ITN Repository. <https://eprints.itn.ac.id/4091/1/COVER.pdf>
- [21] Suryanto, B. (2022). *Mekanika komposit dan bio-komposit*. Penerbit Universitas Indonesia. <https://www.researchgate.net/publication/375499529>
- [22] *The Complete Guide to Carbon Fiber Patterns*. (2025). Est Carbon. <https://estcarbon.com/blog/carbon-fiber-all-patterns-explained/>
- [23] Anisoprint Sarl & Anisoprint 3D Printing Technology Limited Company. (2024). *Carbon Fiber 3D Printing: chopped vs continuous fibers reinforcement*. <https://anisoprint.com/blog/carbon-fiber-3d-printing-chopped-and-continuous-fibers-reinforcement/>