

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Komposit

Material komposit merupakan hasil rekayasa material yang terbentuk dari penggabungan dua atau lebih bahan penyusun yang memiliki sifat fisik dan mekanik berbeda untuk menghasilkan material baru dengan karakteristik yang lebih unggul. Komposit umumnya tersusun atas dua komponen utama, yaitu penguat (*reinforcement*) dan matriks (*matrix*). Penguat berfungsi memberikan kekuatan, kekakuan, dan ketahanan terhadap beban, sedangkan matriks berfungsi mengikat serat serta melindungi penguat dari pengaruh lingkungan seperti kelembapan, korosi, dan oksidasi (Beliu, 2016; Gunawan, 2023). Menurut Al Rosyid (2023), kombinasi kedua komponen tersebut mampu menghasilkan material dengan rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi (*high strength-to-weight ratio*), menjadikannya ideal untuk aplikasi yang membutuhkan kekuatan struktural tinggi namun tetap ringan.

Dalam perkembangannya, material komposit banyak digunakan dalam berbagai bidang seperti otomotif, kedirgantaraan, kelautan, dan konstruksi. Hal ini disebabkan oleh sifat-sifat unggulnya seperti ketahanan terhadap korosi, densitas rendah, dan kemampuan menahan beban dinamis (Arisudana & Raharjo, 2018; Wulandari, 2023). Pada sektor kedirgantaraan, penggunaan komposit mampu menurunkan bobot pesawat hingga

20–30%, yang secara signifikan meningkatkan efisiensi bahan bakar (Muralidhara et al., 2020). Selain itu, dalam industri otomotif, penggunaan komposit berperan penting dalam meningkatkan kekuatan struktural bodi kendaraan sekaligus mengurangi emisi karbon akibat penghematan energi (Ogunleye et al., 2022; Ziansyah et al., 2024).

Dalam pemilihan material untuk struktur pesawat terbang, massa jenis dan rasio kekuatan terhadap berat (*strength-to-weight ratio*) merupakan parameter yang sangat menentukan. Material logam seperti baja dan aluminium memang memiliki kekuatan tarik tinggi, namun massa jenisnya relatif besar—baja sekitar  $7,85 \text{ g/cm}^3$ , sedangkan aluminium  $2,70 \text{ g/cm}^3$  (Callister & Rethwisch, 2020). Massa jenis yang tinggi menyebabkan peningkatan berat struktur sehingga menurunkan efisiensi bahan bakar pesawat. Sebaliknya, komposit serat karbon memiliki massa jenis jauh lebih rendah, yaitu sekitar  $1,55\text{--}1,80 \text{ g/cm}^3$ , namun mampu mencapai kekuatan tarik hingga  $600\text{--}3.500 \text{ MPa}$  (Mallick, 2007). Hal ini menghasilkan *specific strength* dan *specific modulus* yang lebih tinggi dibandingkan logam konvensional. Keunggulan ini menjadikan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) sangat efektif untuk aplikasi aerostruktur yang membutuhkan kekuatan tinggi tetapi tetap ringan.

Selain efisiensi berat, komposit serat karbon memiliki ketahanan korosi yang sangat baik, stabilitas dimensi, serta performa *fatigue* yang lebih unggul dibandingkan aluminium dan

baja (Agarwal & Broutman, 2018). Keunggulan tambahan dari material komposit adalah kemampuannya untuk direkayasa melalui pengaturan orientasi serat dan jumlah lapisan, sehingga sifat mekanik dapat disesuaikan dengan kebutuhan struktur pesawat (Gibson, 2016). Penggunaan komposit serat karbon pada pesawat modern seperti Boeing 787 dan Airbus A350 mencapai lebih dari 50% dari total struktur primernya, terutama pada *wing box*, *fuselage*, *tail section*, dan *control surfaces* (Airbus, 2015; Boeing Commercial Airplanes, 2019). Hal ini menunjukkan bahwa komposit serat karbon telah terbukti memberikan performa struktural yang lebih unggul dibandingkan logam tradisional.

Jenis komposit yang umum digunakan dalam bidang teknik mesin adalah komposit serat (*fiber-reinforced composite*), di mana serat berfungsi sebagai elemen utama penahan beban. Serat dapat disusun secara searah atau anyaman untuk menghasilkan komposit laminasi dengan orientasi serat tertentu (Levy, 2019; Rahmatulloh, 2020). Orientasi serat  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ , dan  $90^\circ$  memberikan sifat mekanik berbeda —  $0^\circ$  unggul dalam menahan beban tarik, sedangkan  $\pm 45^\circ$  memiliki ketangguhan impak lebih baik (Saifullah et al., 2021; Sari et al., 2020). Dalam penelitian ini, komposit serat karbon-epoxy dipilih karena kombinasi kekuatan tinggi, bobot ringan, serta kestabilannya terhadap suhu tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh jumlah lapisan terhadap sifat mekanik menggunakan metode *vacuum bagging*, yang diketahui

dapat menghasilkan struktur laminasi lebih homogen dan bebas cacat.



Gambar 2. 1 Susunan Komposit  
(Sumber : piran.com)

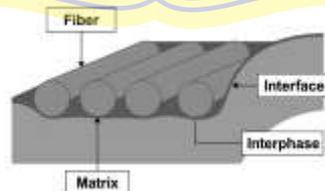
## 2.2 Penguat (*reinforcement*)

Penguat atau *reinforcement* merupakan komponen utama dalam material komposit yang bertanggung jawab terhadap kekuatan dan kekakuan struktural. Menurut Gunawan (2023), penguat menahan sebagian besar beban mekanik, sementara matriks berfungsi mentransfer gaya dan menjaga posisi serat agar tetap stabil. Jenis penguat yang umum digunakan antara lain serat panjang (*continuous fiber*), serat pendek (*discontinuous fiber*), dan partikel. Pemilihan bentuk dan orientasi serat sangat mempengaruhi kekuatan tarik, modulus elastisitas, dan ketangguhan impak material (Levy, 2019; Rahmatulloh, 2020). Serat yang terdistribusi merata dalam matriks akan menghasilkan ikatan antarmuka yang kuat, sehingga meningkatkan ketahanan terhadap retak dan delaminasi (Saifullah et al., 2021).

Dalam industri modern, serat karbon menjadi penguat yang paling populer karena memiliki rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi dan ketahanan yang baik terhadap suhu ekstrem. Wulandari

(2023) menemukan bahwa orientasi serat  $0^\circ/90^\circ$  menghasilkan kekuatan tarik maksimum, sedangkan orientasi  $\pm 45^\circ$  memberikan ketangguhan impak lebih baik. Hasil serupa juga dilaporkan oleh Ogunleye et al., (2022), yang menunjukkan bahwa variasi arah serat dan jumlah lapisan secara signifikan mempengaruhi perilaku mekanik komposit. Selain itu, serat karbon memiliki densitas rendah ( $\sim 1,7 \text{ g/cm}^3$ ) dan stabilitas dimensi tinggi, menjadikannya material yang ideal untuk aplikasi di bidang kedirgantaraan, otomotif, dan kelautan (Muralidhara et al., 2020).

Pada penelitian ini, digunakan serat karbon anyaman (*carbon fiber twill* 3K 200 gsm) sebagai penguat utama. Serat jenis ini memiliki keunggulan pada kemampuan adaptasi terhadap bentuk cetakan, ikatan antar-serat yang kuat, dan ketahanan terhadap delaminasi. Struktur anyamannya juga mendukung pemerataan beban selama proses laminasi. Dengan metode *vacuum bagging*, penyusunan laminasi serat dapat dilakukan secara seragam dan bebas dari gelembung udara, menghasilkan komposit yang homogen dan memiliki kualitas mekanik tinggi (Levy, 2019; Ziansyah et al., 2024).



Gambar 2. 2 Struktur Penguat pada Material Komposit  
(Sumber: Olahan Peneliti.)

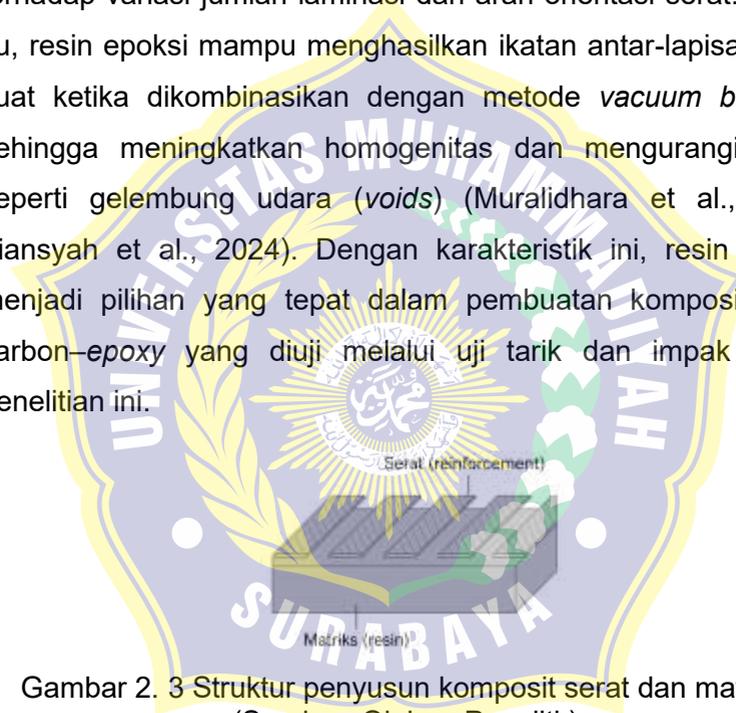
### 2.3 Matrik (resin)

Matriks merupakan komponen penting dalam material komposit yang berfungsi mengikat serat agar tetap berada pada posisinya, melindungi serat dari pengaruh lingkungan, dan menyalurkan beban antar serat selama proses deformasi (Gunawan, 2023; Saifullah et al., 2021). Matriks juga berperan dalam menentukan sifat mekanik akhir komposit, karena sifat adhesi antara matriks dan serat sangat mempengaruhi kekuatan tarik serta ketangguhan impact. Menurut Beliu (2016), matriks harus memiliki sifat mampu alir (*flowable*), mampu membasahi serat dengan baik, serta tahan terhadap degradasi termal. Beberapa jenis matriks yang umum digunakan pada komposit berbasis polimer antara lain epoksi, poliester, dan vinil ester, masing-masing memiliki keunggulan dan keterbatasan tersendiri dalam hal kekuatan, ketahanan panas, dan biaya produksi.

Secara umum, pemilihan jenis resin bergantung pada tujuan aplikasi dan metode pembuatannya. Resin epoksi banyak digunakan untuk produk komposit berperforma tinggi karena memiliki adhesi kuat, penyusutan rendah saat *curing*, dan ketahanan kimia yang baik (Wulandari, 2023). Sedangkan resin poliester lebih sering digunakan untuk aplikasi skala industri karena harganya relatif murah dan mudah diproses, meskipun sifat mekaniknya lebih rendah dibanding epoksi (Rahmatulloh, 2020). Di sisi lain, resin vinil ester merupakan hasil pengembangan dari resin epoksi yang memiliki ketahanan korosi

tinggi, menjadikannya pilihan ideal untuk aplikasi maritim dan kimia (Levy, 2019).

Dalam penelitian ini, jenis matriks yang digunakan adalah resin epoksi dengan bahan pengeras (*hardener*) berbasis amina. Pemilihan resin ini dilakukan karena sifat mekaniknya paling stabil terhadap variasi jumlah laminasi dan arah orientasi serat. Selain itu, resin epoksi mampu menghasilkan ikatan antar-lapisan yang kuat ketika dikombinasikan dengan metode *vacuum bagging*, sehingga meningkatkan homogenitas dan mengurangi cacat seperti gelembung udara (*voids*) (Muralidhara et al., 2020; Ziansyah et al., 2024). Dengan karakteristik ini, resin epoksi menjadi pilihan yang tepat dalam pembuatan komposit serat karbon–epoxy yang diuji melalui uji tarik dan dampak dalam penelitian ini.



Gambar 2. 3 Struktur penyusun komposit serat dan matriks (Sumber: Olahan Peneliti.)

### 2.3.1 Resin Epoksi

Resin epoksi merupakan salah satu jenis resin termoset yang paling banyak digunakan pada material komposit berperforma tinggi karena memiliki sifat adhesi yang sangat baik, kekuatan mekanik tinggi, serta ketahanan terhadap bahan

kimia dan panas (Gunawan, 2023). Resin ini dihasilkan melalui reaksi antara *epichlorohydrin* dan *bisphenol-A*, membentuk struktur molekul yang stabil dengan ikatan silang (*crosslinking*) yang kuat ketika bereaksi dengan pengeras (*hardener*) berbasis amina (Levy, 2019). Ikatan silang ini berperan penting dalam meningkatkan kekakuan, kekuatan tarik, dan ketahanan terhadap deformasi plastis. Dibandingkan resin poliester dan vinil ester, epoksi memiliki penyusutan rendah saat proses *curing*, sehingga menghasilkan permukaan akhir yang lebih halus dan minim cacat (*voids*) (Saifullah et al., 2021).

Selain itu, resin epoksi menunjukkan stabilitas termal dan dimensional yang sangat baik, menjadikannya pilihan utama dalam aplikasi struktural seperti komponen pesawat terbang, otomotif, serta struktur maritim (Muralidhara et al., 2020). Dalam penelitian komposit serat karbon, penggunaan resin epoksi terbukti meningkatkan kekuatan tarik dan ketangguhan impak secara signifikan, karena resin ini mampu menyebarkan tegangan secara merata di sepanjang serat karbon dan memperkuat ikatan antar lapisan laminasi (Wulandari, 2023). Oleh karena itu, dalam penelitian ini resin epoksi dipilih sebagai matriks utama, karena sifat mekaniknya yang paling sesuai untuk menahan beban tarik dan benturan, sekaligus kompatibel dengan metode fabrikasi *vacuum bagging* yang digunakan.



Gambar 2. 4 Resin Epoksi  
(sumber : Amazon.com)

### 2.3.2 Resin Poliester

Resin poliester merupakan jenis resin termoset yang umum digunakan dalam pembuatan material komposit karena kemudahan proses produksinya dan harganya yang relatif lebih ekonomis dibandingkan resin epoksi (Rahmatulloh, 2020). Resin ini tersusun dari hasil reaksi kondensasi antara asam dikarboksilat dan glikol, membentuk struktur rantai panjang yang dapat mengeras melalui proses polimerisasi dengan penambahan katalis seperti *methyl ethyl ketone peroxide* (MEKP) (Gunawan, 2023). Salah satu keunggulan resin poliester adalah kemampuan pembentukannya yang cepat serta sifatnya yang kompatibel dengan berbagai jenis serat, seperti serat kaca dan serat alami. Selain itu, resin ini juga mudah diaplikasikan pada proses *hand lay-up* maupun *spray-up*, sehingga banyak digunakan untuk pembuatan komponen kapal, tangki, serta panel industri berskala besar (Wulandari, 2023).

Namun demikian, resin poliester memiliki beberapa keterbatasan, terutama dalam hal kekuatan tarik, ketahanan

terhadap suhu tinggi, serta stabilitas dimensi saat mengalami beban mekanik berulang (Belieu, 2016). Sifat adhesinya terhadap serat relatif lebih rendah dibandingkan resin epoksi, yang dapat menyebabkan penurunan kekuatan antar-lapisan pada komposit laminasi. Selain itu, resin poliester memiliki tingkat penyusutan yang lebih tinggi selama proses *curing*, sehingga berpotensi menyebabkan cacat seperti retakan halus (*microcrack*) dan rongga (*voids*) pada hasil akhir (Levy, 2019). Meskipun begitu, resin poliester tetap menjadi pilihan populer pada aplikasi non-struktural yang tidak memerlukan kekuatan tinggi, seperti produk rumah tangga, panel dekoratif, dan komponen dengan tuntutan biaya rendah.



Gambar 2. 5 Resin Poliester  
(sumber : [swindoncompositesupplies.co.uk](http://swindoncompositesupplies.co.uk))

### 2.3.3 Resin Vinil Ester

Resin vinil ester merupakan hasil pengembangan dari resin epoksi dan poliester yang dirancang untuk menggabungkan keunggulan dari keduanya. Secara kimia, resin ini terbentuk melalui reaksi antara resin epoksi dan asam

akrilat atau metakrilat, menghasilkan material dengan rantai molekul panjang dan ikatan silang yang kuat setelah proses *curing* (Levy, 2019). Struktur ini memberikan kombinasi sifat mekanik yang baik seperti kekuatan tarik tinggi, ketahanan terhadap korosi, serta kemampuan menahan suhu tinggi hingga 150°C (Belieu, 2016). Dibandingkan resin poliester, vinil ester memiliki ketahanan kimia yang lebih baik terhadap pelarut organik dan air laut, sehingga sering diaplikasikan dalam industri kimia, kelautan, dan manufaktur tangki penyimpanan bahan kimia (Rahmatulloh, 2020).

Selain itu, resin vinil ester memiliki sifat viskositas yang lebih rendah dibandingkan resin epoksi, sehingga lebih mudah meresap ke dalam serat selama proses impregnasi (Muralidhara et al., 2020). Hal ini membuatnya cocok digunakan dalam metode fabrikasi seperti *vacuum infusion* dan *vacuum bagging* yang menuntut aliran resin seragam tanpa gelembung udara (*voids*). Namun, kekuatan adhesinya terhadap serat masih sedikit lebih rendah dibandingkan epoksi, sehingga penggunaannya lebih cocok untuk aplikasi semi-struktural yang menekankan pada ketahanan korosi dan umur pakai panjang (Ziansyah et al., 2024). Dalam konteks penelitian komposit modern, vinil ester menjadi alternatif potensial karena menawarkan keseimbangan antara performa mekanik tinggi dan efisiensi biaya produksi.



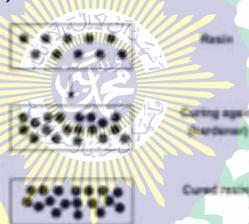
Gambar 2. 6 Vinil Ester  
(sumber : matex-frp.com)

#### 2.3.4 Katalis (*Hardener*)

Katalis atau *hardener* merupakan zat kimia yang berperan penting dalam proses polimerisasi resin, yaitu proses perubahan dari fase cair menjadi padat melalui reaksi kimia yang disebut *curing* (Levy, 2019). Fungsi utama *hardener* adalah mempercepat pembentukan ikatan silang (*crosslinking*) antar molekul resin, sehingga terbentuk struktur padat yang memiliki kekuatan mekanik tinggi dan stabilitas termal yang baik. Jenis *hardener* yang digunakan bergantung pada jenis resin; misalnya pada resin epoksi, *hardener* yang umum digunakan adalah amina (*amine hardener*) seperti *polyamine* atau *diethylenetriamine* (Gunawan, 2023). Rasio pencampuran resin dan *hardener* harus diperhatikan dengan cermat, karena ketidaktepatan perbandingan dapat menyebabkan resin gagal mengeras sempurna, menghasilkan cacat seperti delaminasi atau *voids*, serta menurunkan kekuatan tarik material (Saifullah et al., 2021).

Selain berfungsi dalam proses polimerisasi, *hardener* juga memengaruhi sifat akhir komposit seperti kekakuan,

keuletan, dan ketahanan panas. Menurut Muralidhara et al. (2020), semakin tinggi konsentrasi *hardener*, semakin cepat proses *curing*, namun jika berlebihan dapat membuat struktur komposit menjadi rapuh karena pembentukan ikatan silang yang terlalu padat. Dalam praktik pembuatan komposit serat karbon, perbandingan *hardener* umumnya berkisar antara 1–2% dari berat resin untuk mendapatkan hasil optimal (Wulandari, 2023). Sebelum resin dituangkan ke dalam cetakan, biasanya permukaan cetakan dilapisi *release agent* agar hasil komposit tidak menempel pada permukaan  *mold* dan mudah dilepaskan setelah proses pengerasan selesai (Ziansyah et al., 2024).



Gambar 2. 7 Proses Curing  
(Sumber: Olahan Peneliti.)

## 2.4 Serat

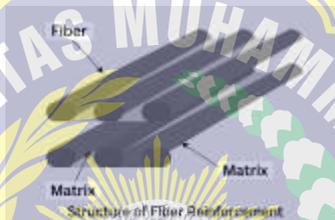
Serat merupakan komponen penguat utama dalam material komposit yang berfungsi menahan beban mekanik, terutama gaya tarik, serta meningkatkan kekakuan dan ketangguhan material (Al Rosyid, 2023). Sifat mekanik serat seperti kekuatan tarik, modulus elastisitas, dan ketahanan terhadap suhu tinggi sangat menentukan performa komposit secara keseluruhan (Gunawan,

2023). Dalam sistem komposit, serat bertugas untuk menanggung sebagian besar beban, sementara matriks berfungsi mendistribusikan tegangan antar serat agar deformasi dapat diminimalkan. Menurut Beliu (2016), serat yang digunakan sebagai penguat harus memiliki rasio panjang terhadap diameter yang tinggi, permukaan yang bersih, dan kompatibilitas kimia yang baik terhadap resin agar tercipta ikatan antar-fase yang kuat.

Terdapat berbagai jenis serat yang digunakan pada material komposit, mulai dari serat alami seperti serat bambu, rami, atau sisal, hingga serat sintetis seperti serat kaca, kevlar, dan karbon. Serat sintetis umumnya lebih disukai untuk aplikasi struktural karena memiliki kekuatan tinggi, densitas rendah, dan ketahanan termal yang baik (Rahmatulloh, 2020). Selain itu, serat sintetis dapat diproduksi dengan orientasi dan panjang yang seragam, sehingga mampu memberikan konsistensi pada sifat mekanik produk komposit (Muralidhara et al., 2020). Namun demikian, serat alami mulai dikembangkan sebagai alternatif ramah lingkungan karena dapat terurai secara hayati dan lebih ekonomis dibandingkan serat sintetis, meskipun sifat mekaniknya masih lebih rendah.

Dalam pembuatan komposit serat karbon-*epoxy*, pemilihan jenis serat dan orientasinya sangat memengaruhi kekuatan tarik dan ketangguhan impak material (Saifullah et al., 2021). Serat karbon dipilih karena memiliki rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi, ketahanan terhadap korosi, serta kestabilan dimensi pada

suhu tinggi (Wulandari, 2023). Selain itu, orientasi serat yang berbeda (misalnya  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ , dan  $90^\circ$ ) memberikan karakteristik mekanik yang bervariasi; orientasi  $0^\circ$  umumnya memberikan kekuatan tarik maksimum, sedangkan orientasi  $\pm 45^\circ$  lebih unggul terhadap beban impak (Ziansyah et al., 2024). Dengan demikian, penggunaan serat karbon sebagai penguat pada penelitian ini diharapkan mampu menghasilkan komposit dengan kombinasi kekuatan dan ketangguhan yang optimal.



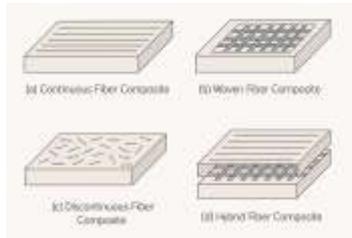
Gambar 2. 8 Struktur Serat dalam material komposit  
(Sumber: Olahan Peneliti.)

### 2.5.1 Susunan Serat

Susunan serat merupakan salah satu faktor utama yang menentukan kekuatan dan kekakuan material komposit. Menurut Beliu (2016), susunan serat pada komposit dibedakan menjadi beberapa jenis, yaitu *continuous fiber composite*, *woven fiber composite*, *discontinuous fiber composite*, dan *hybrid fiber composite*. Pada *continuous fiber composite*, serat disusun sejajar membentuk lamina yang memberikan kekuatan tinggi pada arah serat, sedangkan pada *woven fiber composite*, serat disusun saling silang membentuk anyaman yang mampu

menahan beban dari berbagai arah (Gunawan, 2023). Sementara itu, *discontinuous fiber composite* menggunakan serat-serat pendek yang tersebar acak dalam matriks sehingga mudah diproduksi, meskipun kekuatannya lebih rendah. Jenis terakhir, *hybrid fiber composite*, merupakan kombinasi dari dua atau lebih jenis serat dengan arah dan panjang yang bervariasi, untuk mendapatkan keseimbangan antara kekuatan, kekakuan, dan keuletan (Rahmatulloh, 2020).

Orientasi serat dalam suatu lapisan juga berpengaruh besar terhadap perilaku mekanik komposit. Serat yang disusun dengan orientasi  $0^\circ$  memberikan kekuatan maksimum terhadap gaya tarik, karena beban diteruskan sejajar dengan arah serat. Sebaliknya, orientasi  $90^\circ$  lebih efektif menahan beban tegak lurus arah serat, sedangkan orientasi  $\pm 45^\circ$  meningkatkan ketahanan terhadap geser dan impact (Saifullah et al. 2021). Menurut Wulandari (2023), kombinasi orientasi seperti  $[0^\circ/90^\circ]$  atau  $[\pm 45^\circ]$  pada komposit laminasi mampu menghasilkan kekuatan tarik dan impact yang lebih seimbang dibandingkan orientasi tunggal. Oleh karena itu, dalam penelitian ini digunakan variasi arah serat  $0^\circ/90^\circ$  dan  $45^\circ/45^\circ$  untuk mengetahui pengaruh orientasi terhadap sifat mekanik komposit serat karbon–epoxy dengan jumlah laminasi berbeda.



Gambar 2. 9 Jenis Susunan Serat  
(Sumber: Olahan Peneliti.)

#### 2.4.2 Jenis Serat

Secara umum, jenis serat yang digunakan dalam pembuatan material komposit dapat diklasifikasikan menjadi dua kelompok besar, yaitu serat alami dan serat sintetis (Belieu, 2016). Serat alami berasal dari tumbuhan atau hewan seperti serat rami, bambu, sisal, dan kelapa, yang memiliki keunggulan berupa ketersediaan melimpah, harga yang ekonomis, serta ramah lingkungan (Rahmatulloh, 2020). Namun, kelemahannya terletak pada variasi sifat mekanik yang tidak seragam, daya serap air yang tinggi, dan degradasi termal yang cepat. Sebaliknya, serat sintetis seperti serat kaca (*glass fiber*), kevlar, dan karbon (*carbon fiber*) diproduksi secara industri dengan sifat yang lebih konsisten, kekuatan tarik tinggi, densitas rendah, serta ketahanan terhadap suhu dan korosi yang baik (Gunawan, 2023). Karena sifatnya yang seragam dan mampu memberikan performa tinggi, serat sintetis lebih banyak digunakan dalam aplikasi struktural, terutama di bidang otomotif, kedirgantaraan, dan pertahanan (Wulandari, 2023).

Menurut Saifullah et al. (2021), pemilihan jenis serat dalam komposit harus disesuaikan dengan tujuan aplikasinya. Untuk komposit yang memerlukan kekuatan tarik dan kekakuan tinggi, serat karbon menjadi pilihan terbaik karena memiliki rasio kekuatan terhadap berat yang unggul dibandingkan jenis serat lainnya. Di sisi lain, serat kaca lebih cocok untuk aplikasi yang menuntut ketahanan terhadap korosi, sedangkan kevlar unggul dalam ketangguhan impak. Dalam penelitian ini digunakan serat karbon tipe *twill* 3K 200 gsm karena mampu memberikan keseimbangan antara kekakuan, kekuatan, dan fleksibilitas proses fabrikasi, serta kompatibel dengan metode *vacuum bagging* yang digunakan dalam pembuatan spesimen. Dengan demikian, serat sintetis, khususnya serat karbon, menjadi elemen penguat utama yang menentukan performa mekanik komposit serat karbon-epoxy.



Gambar 2. 10 Jenis-Jenis Serat  
(Sumber: Olahan Peneliti.)

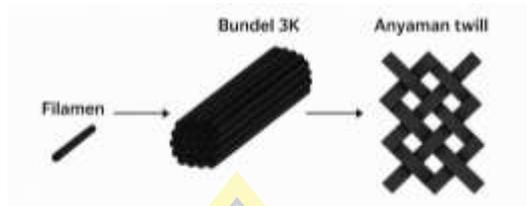
### 2.4.3 Serat Karbon

Serat karbon merupakan jenis serat sintetis berperforma tinggi yang dibuat melalui proses karbonisasi bahan baku

seperti *polyacrylonitrile* (PAN), *pitch*, atau rayon pada suhu tinggi antara 1000°C hingga 2000°C (Muralidhara et al., 2020). Proses ini mengubah struktur molekul menjadi kristal grafit yang tersusun sejajar di sepanjang sumbu serat, menghasilkan kekuatan tarik dan kekakuan yang sangat tinggi dengan densitas yang relatif rendah, sekitar 1,7–1,9 g/cm<sup>3</sup> (Gunawan, 2023). Serat karbon dikenal memiliki rasio kekuatan terhadap berat (*specific strength*) dan kekakuan terhadap berat (*specific modulus*) yang lebih besar dibandingkan baja maupun aluminium (Wulandari, 2023). Kombinasi sifat tersebut menjadikannya ideal untuk aplikasi yang memerlukan kekuatan tinggi namun bobot ringan, seperti struktur pesawat terbang, komponen otomotif, dan material pertahanan (Ziansyah et al., 2024).

Selain memiliki kekuatan tarik yang tinggi, serat karbon juga menawarkan ketahanan termal, kimia, dan korosi yang sangat baik, membuatnya stabil terhadap perubahan suhu dan lingkungan ekstrem (Saifullah et al., 2021). Serat ini juga memiliki konduktivitas listrik dan panas yang baik, serta tidak mudah terdegradasi oleh pelarut organik maupun paparan sinar *ultraviolet* (Levy, 2019). Struktur permukaannya yang halus dapat dimodifikasi dengan *surface treatment* agar meningkatkan daya ikat dengan resin, sehingga terbentuk interaksi matriks–serat yang lebih kuat dan stabil. Dalam sistem komposit, distribusi serat karbon yang homogen dan arah

orientasinya berpengaruh besar terhadap distribusi beban, retakan, dan deformasi material.



Gambar 2. 11 Struktur Serat Karbon 3K dalam Bentuk Anyaman

(Sumber: Olahan Peneliti.)

Dalam industri komposit, serat karbon dikategorikan berdasarkan jumlah filamennya dalam satu bundel, yang dinyatakan dalam satuan “K” (*Kilo-filament*). Misalnya, serat 1K terdiri dari 1000 filamen, 3K dari 3000 filamen, 6K dari 6000 filamen, dan seterusnya. Pada penelitian ini digunakan serat karbon *twill* 3K 200 *gsm*, yang merupakan jenis anyaman dengan 3000 filamen per bundel dan berat 200 gram per meter persegi. Struktur anyaman (*twill weave*) memberikan keseimbangan antara kekakuan dan fleksibilitas, sehingga mudah diadaptasikan ke cetakan kompleks tanpa menimbulkan lipatan atau delaminasi (Belieu, 2016). Kombinasi antara serat karbon 3K dan resin epoksi melalui metode *vacuum bagging* diharapkan menghasilkan material komposit dengan homogenitas tinggi, kepadatan optimal, dan kekuatan mekanik yang unggul.

Tabel 2. 1 Sifat mekanik berbagai serat

Material	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Tensile Strength (Gpa)	Modulus Elastisitas (Gpa)	Ductility (%)	Melting Temperature (°C)
E-glass	2,55	3,4	72,4	4,7	<1725
S-glass	2,50	4,5	86,9	5,2	<1725
Karbon (High Strength)	1,50	5,7	280	2,0	3700
Karbon (High Modulus)	1,50	1,9	530	0,36	3700
Kevlar	1,44	4,5	120	3,8	500

Sumber : (Askeland, 1991)

## 2.5 Metode Pembuatan Komposit

Metode pembuatan komposit merupakan proses penggabungan antara fase penguat (serat) dan fase matriks (resin) untuk menghasilkan material baru dengan sifat mekanik yang lebih unggul dibandingkan komponen tunggalnya (Belieu, 2016). Proses ini bertujuan untuk menciptakan struktur yang homogen, kuat, serta memiliki distribusi tegangan yang merata antar lapisan. Menurut Gunawan (2023), keberhasilan pembuatan komposit sangat bergantung pada pemilihan metode fabrikasi, karena cara impregnasi resin terhadap serat memengaruhi kekuatan, kekakuan, dan tingkat cacat (*voids*) pada material akhir. Secara umum, metode pembuatan komposit dapat dilakukan secara manual seperti *hand lay-up*, maupun secara semi-modern dan tertutup seperti *vacuum infusion* dan *vacuum bagging*.

Pada metode *hand lay-up*, resin diaplikasikan secara manual pada lapisan serat di atas cetakan, sedangkan pada metode *vacuum infusion* dan *vacuum bagging*, proses impregnasi

resin dilakukan dengan bantuan tekanan negatif untuk mengeluarkan udara dari sistem, menghasilkan komposit dengan densitas dan homogenitas yang lebih tinggi (Levy, 2019). Menurut Muralidhara et al. (2020), penggunaan sistem vakum dapat meningkatkan rasio serat terhadap resin, mengurangi porositas, serta memperbaiki kualitas permukaan komposit. Selain itu, metode fabrikasi tertutup juga memungkinkan kontrol lebih baik terhadap ketebalan dan jumlah laminasi, yang menjadi variabel penting dalam penelitian ini.

Pemilihan metode fabrikasi yang tepat harus mempertimbangkan jenis serat, viskositas resin, kompleksitas bentuk cetakan, serta kebutuhan sifat mekanik dari komposit yang dihasilkan (Wulandari, 2023). Dalam konteks penelitian ini, digunakan metode *vacuum bagging* karena metode ini mampu menghasilkan komposit dengan kualitas tinggi, tingkat kekosongan rendah, serta ikatan antar lapisan yang kuat. Selain itu, *vacuum bagging* memungkinkan pengaturan tekanan secara seragam pada seluruh permukaan spesimen selama proses *curing*, sehingga struktur laminasi menjadi lebih padat dan konsisten. Dengan demikian, pemilihan metode ini diharapkan dapat memberikan hasil terbaik dalam pengujian sifat mekanik seperti kekuatan tarik dan ketangguhan impak pada komposit serat karbon-epoxy.

### **2.5.1 Hand Lay-up**

Metode *hand lay-up* merupakan teknik pembuatan

komposit paling sederhana yang dilakukan secara manual dengan meletakkan lapisan serat di atas cetakan dan mengoleskan resin secara bertahap (Gunawan, 2023). Setiap lapisan serat diresapi resin menggunakan kuas atau *roller*, kemudian diratakan untuk memastikan resin menyebar secara merata dan mengeluarkan udara yang terperangkap. Menurut Beliu (2016), metode ini sangat cocok digunakan untuk produksi skala kecil atau komponen dengan bentuk sederhana karena tidak memerlukan peralatan kompleks. Proses ini biasanya dilakukan pada suhu ruangan (*room temperature curing*), dan setelah seluruh lapisan selesai diaplikasikan, komposit dibiarkan mengeras selama periode waktu tertentu hingga resin mencapai kekuatan penuh.

Keunggulan metode ini adalah prosesnya mudah dilakukan, biaya rendah, dan fleksibel untuk berbagai jenis serat seperti serat kaca atau karbon (Wulandari, 2023). Namun, karena dilakukan secara manual, kualitas hasilnya sangat bergantung pada keterampilan operator. Kekurangan lainnya adalah kemungkinan munculnya gelembung udara (*voids*), ketidakhomogenan distribusi resin, serta ketebalan lapisan yang tidak seragam. Meskipun demikian, metode *hand lay-up* masih digunakan secara luas untuk pembuatan prototipe atau penelitian laboratorium, sebagai dasar pengembangan metode fabrikasi komposit yang lebih modern seperti *vacuum infusion* dan *vacuum bagging* (Muralidhara et al., 2020).



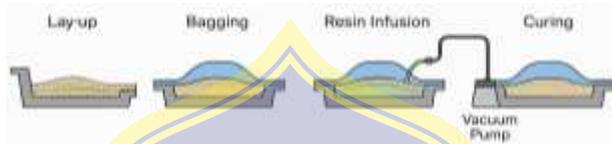
Gambar 2. 12 Proses *Hand Lay Up*  
(Sumber: Olahan Peneliti.)

### 2.5.2 *Vacuum Infusion*

Metode vacuum infusion merupakan pengembangan dari *hand lay-up* dengan menambahkan sistem tekanan negatif untuk menarik resin ke dalam lapisan serat menggunakan pompa vakum (Levy, 2019). Dalam proses ini, serat kering disusun terlebih dahulu di atas cetakan, kemudian ditutup dengan lapisan plastik kedap udara. Setelah sistem divakumkan, resin dialirkan melalui pipa menuju area serat hingga seluruh lapisan terimpregnasi sempurna. Menurut Saifullah et al. (2021), penggunaan tekanan vakum memungkinkan resin mengisi rongga antarserat secara merata, mengurangi kemungkinan terbentuknya pori atau gelembung udara, serta meningkatkan kekuatan mekanik komposit.

Metode ini menawarkan beberapa keunggulan dibandingkan *hand lay-up*, seperti hasil permukaan yang lebih halus, rasio serat-resin yang lebih optimal, dan kontrol ketebalan laminasi yang lebih baik (Wulandari, 2023). Namun, kekurangannya terletak pada waktu produksi yang lebih lama dan kebutuhan peralatan khusus untuk menjaga tekanan

konstan selama proses berlangsung (Muralidhara et al., 2020). Oleh karena itu, metode vacuum infusion lebih cocok digunakan untuk produksi komponen struktural yang membutuhkan kualitas tinggi dengan tingkat presisi geometri yang baik, seperti pada industri otomotif dan dirgantara.



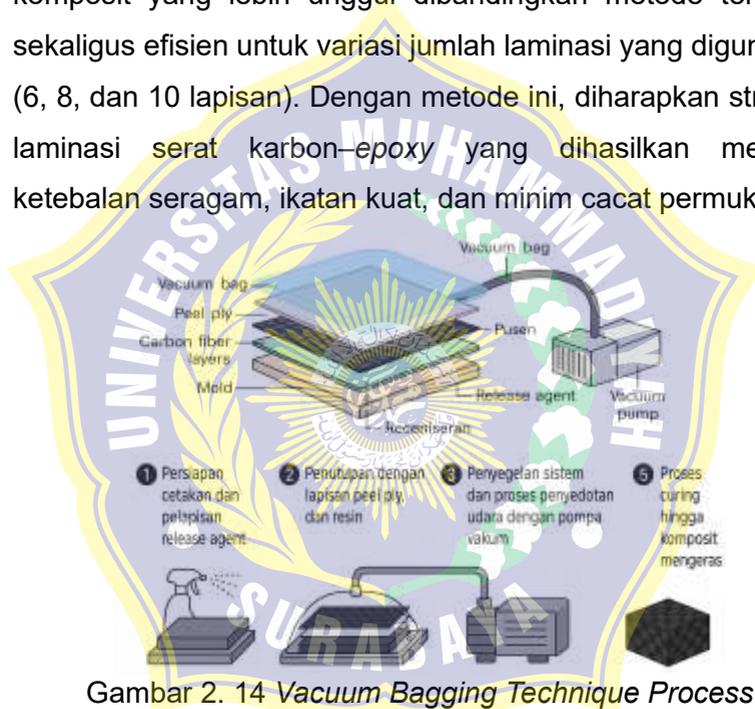
Gambar 2. 13 Proses *vacuum infusion* (Fathoni, 2019)

### 2.5.3 *Vacuum Bagging*

Metode *vacuum bagging* merupakan teknik fabrikasi komposit modern yang menggunakan tekanan vakum untuk mengompresi lapisan-lapisan serat dan resin selama proses pengerasan (*curing*) (Levy, 2019). Proses ini dimulai dengan penataan lapisan serat dan resin di atas cetakan, kemudian ditutup menggunakan *peel ply*, *breather cloth*, dan *vacuum bag film*. Udara di dalam sistem disedot menggunakan pompa vakum hingga tercapai tekanan negatif yang merata di seluruh permukaan. Tekanan ini menyebabkan lapisan-lapisan serat menempel rapat dan resin tersebar secara seragam di antara serat (Muralidhara et al., 2020).

Keunggulan utama metode *vacuum bagging* adalah kemampuannya menghasilkan komposit dengan densitas tinggi, kandungan *voids* rendah, serta homogenitas resin yang

baik (Saifullah et al., 2021). Selain itu, tekanan yang merata selama proses *curing* meningkatkan ikatan antar lapisan, sehingga kekuatan tarik dan ketangguhan impak komposit meningkat signifikan (Wulandari, 2023). Dalam penelitian ini, metode *vacuum bagging* dipilih karena memberikan kualitas komposit yang lebih unggul dibandingkan metode terbuka, sekaligus efisien untuk variasi jumlah laminasi yang digunakan (6, 8, dan 10 lapisan). Dengan metode ini, diharapkan struktur laminasi serat karbon-epoxy yang dihasilkan memiliki ketebalan seragam, ikatan kuat, dan minim cacat permukaan.

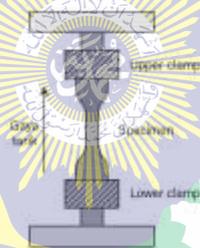


Gambar 2. 14 *Vacuum Bagging Technique Process* (Sumber: Olahan Peneliti.)

## 2.6 Pengujian Tarik

Pengujian tarik (*tensile test*) merupakan salah satu metode utama untuk menentukan sifat mekanik suatu material, khususnya dalam menilai kemampuan material menahan gaya tarik yang

bekerja sepanjang sumbu spesimen (Ramdhan, 2022). Uji ini dilakukan dengan menarik spesimen secara perlahan menggunakan mesin uji tarik (*Universal Testing Machine/UTM*) hingga material mengalami deformasi plastis dan akhirnya patah. Dari pengujian ini dapat diperoleh parameter penting seperti kekuatan tarik maksimum (*Ultimate Tensile Strength/UTS*), regangan (strain), modulus elastisitas (*Young's modulus*), dan persentase perpanjangan. Menurut Wibowo (2023), pengujian tarik berfungsi untuk mengetahui hubungan antara gaya tarik dan perubahan panjang material, yang selanjutnya dapat digunakan untuk menilai keuletan, kekakuan, dan daya tahan suatu material terhadap beban statis.



Gambar 2. 15 Skema Pengujian Tarik  
(Sumber: Olahan Peneliti.)

Hasil pengujian tarik ditampilkan dalam bentuk kurva tegangan–regangan, yang menggambarkan perilaku material mulai dari daerah elastis, plastis, hingga titik patah (Warung Sains Teknologi, 2024). Pada tahap elastis, hubungan antara tegangan dan regangan masih linear dan mengikuti hukum Hooke, di mana material akan kembali ke bentuk semula jika beban dihilangkan.

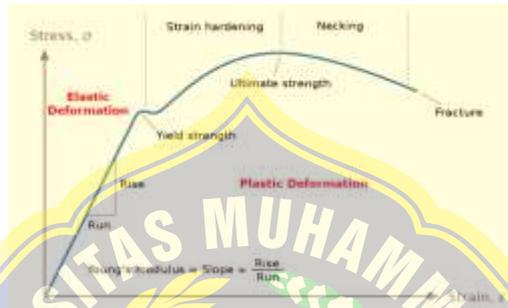
Namun, setelah melewati titik luluh (*yield point*), deformasi menjadi permanen. Tegangan maksimum yang dicapai sebelum material mulai melemah disebut *Ultimate Tensile Strength (UTS)*, sedangkan titik di mana material benar-benar patah disebut *Fracture Point* (Sari et al., 2020). Menurut Gunawan (2023), grafik tegangan–regangan memberikan gambaran menyeluruh tentang karakteristik mekanik suatu material, termasuk keuletan (*ductility*), kekakuan (*stiffness*), dan ketangguhan (*toughness*).



Gambar 2. 16 Skema spesimen dari awal pembebanan  
(Sumber: Olahan Peneliti.)

Dalam konteks penelitian ini, pengujian tarik digunakan untuk mengevaluasi pengaruh jumlah laminasi dan orientasi serat terhadap kekuatan tarik komposit serat karbon–epoxy. Komposit dengan orientasi serat  $0^{\circ}/90^{\circ}$  umumnya menunjukkan nilai kekuatan tarik yang lebih tinggi karena beban diteruskan sejajar dengan arah serat (Robiansyah & Irfa'i, 2021). Sebaliknya, orientasi  $\pm 45^{\circ}$  cenderung menghasilkan deformasi geser yang lebih besar, sehingga kekuatannya sedikit menurun. Selain itu, peningkatan jumlah lapisan (6, 8, dan 10 lapis) diharapkan meningkatkan kekuatan tarik secara signifikan akibat bertambahnya volume serat yang menanggung beban. Oleh

karena itu, hasil pengujian tarik pada penelitian ini akan memberikan data penting untuk menentukan konfigurasi laminasi yang paling optimal bagi kekuatan mekanik komposit serat karbon–epoxy.



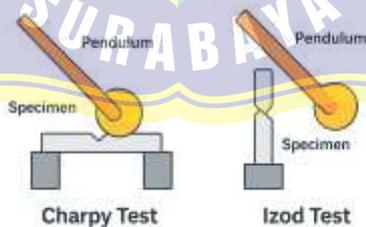
Gambar 2. 17 Analisis grafik uji Tarik  
(Sumber : Warung Sains Teknologi, 2024)

## 2.7 Pengujian Impact

Pengujian impact merupakan metode untuk mengetahui ketangguhan (*toughness*) suatu material, yaitu kemampuan material menyerap energi hingga patah akibat gaya kejut yang diberikan secara tiba-tiba (Ramdhan, 2022). Tidak seperti uji tarik yang dilakukan secara perlahan, uji impact menggunakan beban dengan kecepatan tinggi untuk meniru kondisi pembebanan dinamis di dunia nyata. Menurut Wibowo (2023), energi yang diserap oleh material selama pengujian mencerminkan seberapa besar kemampuan material menahan retakan dan deformasi plastis sebelum patah. Oleh karena itu, pengujian impact sering digunakan dalam analisis material untuk komponen yang berpotensi mengalami benturan, seperti pada bodi kendaraan,

struktur pesawat terbang, dan panel komposit.

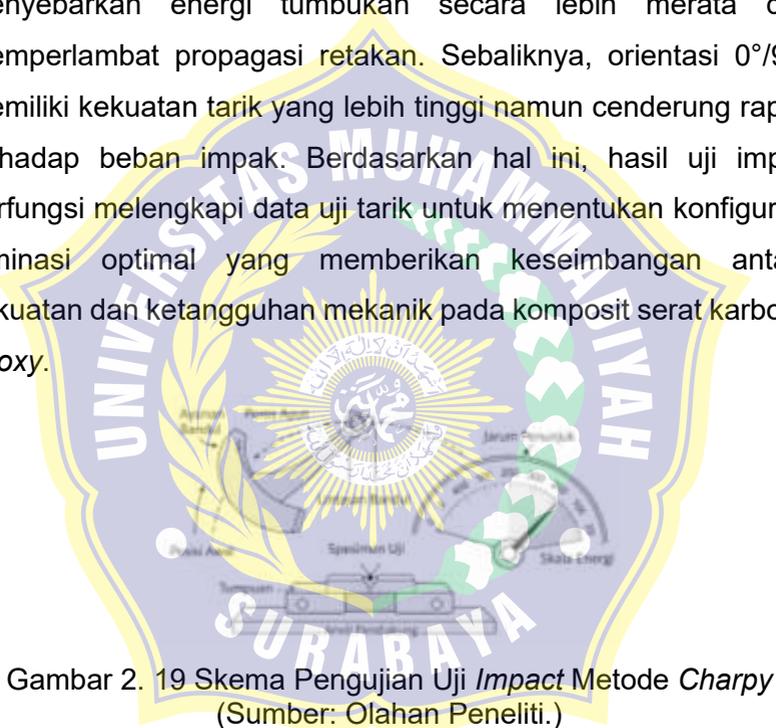
Terdapat dua metode utama dalam pengujian impact, yaitu metode *Charpy* dan metode *Izod*, yang berbeda pada posisi spesimen dan arah pembebanannya. Pada metode *Charpy*, spesimen diposisikan secara horizontal di atas dua penyangga, dengan takikan (*notch*) menghadap ke arah yang berlawanan dari titik tumbukan pendulum (Saifullah et al., 2021). Sedangkan pada metode *Izod*, spesimen diletakkan secara vertikal dengan takikan menghadap ke arah datangnya pendulum (Robiansyah & Irfa'i, 2021). Perbedaan ini menyebabkan metode *Charpy* lebih sensitif terhadap ketangguhan material secara keseluruhan, karena beban tersebar di dua titik tumpu, sementara metode *Izod* lebih cocok untuk menilai ketahanan lokal di area sekitar takikan. Menurut Sari et al. (2020), metode *Charpy* dianggap lebih akurat dan umum digunakan untuk material komposit karena dapat mengukur energi serap yang lebih representatif terhadap kondisi pembebanan aktual.



Gambar 2. 18 Metode Uji *Impact*  
(Sumber: Olahan Peneliti.)

Dalam penelitian ini, digunakan metode *Charpy* untuk

mengevaluasi pengaruh jumlah laminasi (6, 8, dan 10 lapisan) serta orientasi serat ( $0^\circ/90^\circ$  dan  $\pm 45^\circ$ ) terhadap ketangguhan impact komposit serat karbon–*epoxy*. Menurut Wulandari (2023), orientasi serat  $\pm 45^\circ$  memberikan ketahanan impact yang lebih baik dibandingkan  $0^\circ/90^\circ$ , karena serat yang tersusun diagonal dapat menyebarkan energi tumbukan secara lebih merata dan memperlambat propagasi retakan. Sebaliknya, orientasi  $0^\circ/90^\circ$  memiliki kekuatan tarik yang lebih tinggi namun cenderung rapuh terhadap beban impact. Berdasarkan hal ini, hasil uji impact berfungsi melengkapi data uji tarik untuk menentukan konfigurasi laminasi optimal yang memberikan keseimbangan antara kekuatan dan ketangguhan mekanik pada komposit serat karbon–*epoxy*.



Gambar 2. 19 Skema Pengujian Uji *Impact* Metode *Charpy*  
(Sumber: Olahan Peneliti.)

## 2.8 Penelitian Terdahulu

Penelitian yang dilakukan oleh Wibowo (2023) berjudul “*Pengaruh Variasi Arah Serat dan Jumlah Layer terhadap Uji Tarik dan Impact Komposit Serat Karbon Fiber*” mengkaji pengaruh konfigurasi serat terhadap sifat mekanik komposit. Hasil uji tarik

menunjukkan bahwa spesimen dengan dua lapisan dan orientasi serat  $0^\circ/45^\circ$  menghasilkan kekuatan tarik tertinggi sebesar  $51,51 \text{ N/mm}^2$ , sedangkan spesimen dengan tiga lapisan berorientasi  $0^\circ/45^\circ/90^\circ$  mengalami peningkatan hingga  $54,69 \text{ N/mm}^2$ . Pada pengujian impak, energi patah tertinggi diperoleh pada spesimen dua lapisan berorientasi  $0^\circ/90^\circ$  sebesar  $0,074 \text{ Joule/mm}^2$ , dan meningkat menjadi  $0,090 \text{ Joule/mm}^2$  untuk tiga lapisan dengan orientasi  $0^\circ/45^\circ/90^\circ$ . Temuan ini menunjukkan bahwa kombinasi arah serat dan peningkatan jumlah lapisan mampu meningkatkan daya tahan material terhadap beban tarik maupun beban kejut.

Tabel 2. 2 Hasil Uji Tarik

No	Standar Pembentukan Spesimen	Arah Serat	Tegangan Rata-Rata (Newton/mm <sup>2</sup> )
1	Dua Layer	$0^\circ, 45^\circ$	$51,51 \text{ N/mm}^2$
2	Dua Layer	$0^\circ, 90^\circ$	$51,33 \text{ N/mm}^2$
3	Dua Layer	$45^\circ, 90^\circ$	$51,45 \text{ N/mm}^2$
4	Tiga Layer	$0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$	$54,69 \text{ N/mm}^2$
5	Tiga Layer	$0^\circ, 90^\circ, 45^\circ$	$54,34 \text{ N/mm}^2$
6	Tiga Layer	$45^\circ, 0^\circ, 90^\circ$	$54,46 \text{ N/mm}^2$

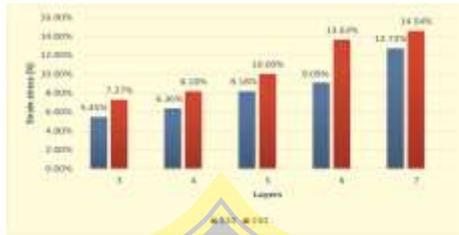
Tabel 2. 3 Hasil Uji Impact

No	Standar Pembentukan Spesimen	Arah Serat	Tegangan Patah (Joule)	Harga Keuletan (Joule/mm <sup>2</sup> )
1	Dua Layer	$0^\circ, 45^\circ$	5,773	0,072
2	Dua Layer	$0^\circ, 90^\circ$	5,978	0,074
3	Dua Layer	$45^\circ, 90^\circ$	5,562	0,069
4	Tiga Layer	$0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$	7,256	0,090
5	Tiga Layer	$0^\circ, 90^\circ, 45^\circ$	6,645	0,080
6	Tiga Layer	$45^\circ, 0^\circ, 90^\circ$	6,618	0,082

Sementara itu, Robiansyah & Irfa'i (2021) dalam penelitian berjudul "*Pengaruh Orientasi Arah Serat terhadap Kekuatan Tarik dan Kekuatan Bending Komposit Berpenguat Serat Karbon dengan Matrik Epoxy*" menemukan bahwa orientasi serat memiliki pengaruh besar terhadap kekuatan mekanik komposit. Kekuatan tarik tertinggi tercapai pada orientasi  $0^\circ$  sebesar 78,25 MPa, sedangkan nilai terendah diperoleh pada orientasi  $90^\circ$  sebesar 7,39 MPa. Hasil uji lentur (*bending*) juga memperlihatkan pola serupa, di mana orientasi  $0^\circ$  menghasilkan nilai 609,17 MPa, jauh lebih tinggi dibandingkan 79,22 MPa pada orientasi  $90^\circ$ . Hal ini menegaskan bahwa semakin sejajar arah serat dengan beban yang diterima, semakin besar kemampuan material dalam menahan gaya eksternal, terutama terhadap beban lentur dan tarik.

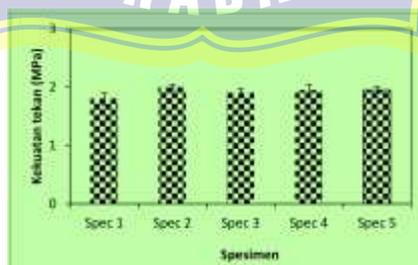
Penelitian yang dilakukan oleh Saifullah et al. (2021) meninjau pengaruh jumlah lapisan terhadap sifat mekanik komposit serat karbon menggunakan metode *vacuum infusion*. Penelitian ini menggunakan dua jenis serat, yaitu 220 gsm dan 240 gsm, dengan variasi jumlah lapisan antara tiga hingga tujuh lapis. Hasil uji lentur menunjukkan peningkatan kekuatan seiring bertambahnya jumlah lapisan, dengan nilai maksimum 50,87 MPa untuk serat 220 gsm dan 71,7 MPa untuk serat 240 gsm. Uji tarik menunjukkan pola serupa, dengan kekuatan maksimum masing-masing mencapai 225,5 MPa dan 244,55 MPa pada tujuh lapisan. Hasil ini menegaskan bahwa peningkatan jumlah lapisan

memperkuat komposit, sementara perbedaan gramasi serat turut memengaruhi kekakuan dan kekuatan material.



Gambar 2. 20 *The correlation of the layers and the strain-stress* (Sumber : Saifullah et al., 2021)

Selain itu, Ziansyah et al. (2024) meneliti “*Sifat Mekanik Panel Karbon Komposit Sandwich Menggunakan Metode Vacuum Bagging untuk Aplikasi Pesawat Udara Nirawak (PUNA) MALE*”. Pengujian tekan terhadap lima spesimen menggunakan *Universal Testing Machine (UTM)* menghasilkan nilai rata-rata kekuatan tekan 1,924 MPa dengan regangan 4,253%, jauh melebihi standar kekuatan minimum 0,127 MPa yang ditetapkan untuk panel pesawat PUNA MALE. Temuan ini menunjukkan bahwa panel *sandwich* berbahan serat karbon memiliki kekuatan mekanik yang layak digunakan dalam aplikasi struktural pesawat.



Gambar 2. 21 Kekuatan tekan komposit karbon *sandwich* (Sumber : Ziansyah et al., 2024)

Sementara itu, penelitian oleh (Sari et al., 2020) yang berjudul “*Analisis Kekuatan Tarik dan Bending Komposit Serat Karbon–Resin dengan Variasi Waktu Curing dan Suhu Penahanan 80°C*” menunjukkan bahwa lama waktu *curing* berpengaruh besar terhadap performa komposit. Perlakuan terbaik diperoleh pada waktu *curing* 1,5 jam dengan kekuatan tarik 629,799 MPa dan *yield stress* 479,44 MPa, sedangkan waktu *curing* 2 jam menyebabkan penurunan kekuatan menjadi 420,816 MPa akibat matriks yang terlalu kaku dan rapuh. Hasil ini menegaskan pentingnya pengaturan waktu dan suhu *curing* untuk memperoleh ikatan optimal antara serat karbon dan resin epoxy.

