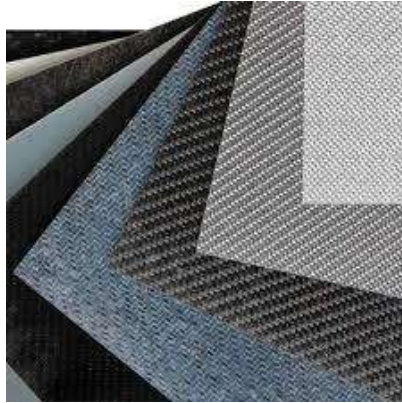


BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan teori

2.1.1 Material Komposit



Gambar 2. 1 Material Komposit
(Sumber: KDM Fabrication, 2026)

Material komposit Adalah suatu material yang terbentuk dari kombinasi dua atau lebih bahan berbeda yang digabungkan secara makroskopis untuk menghasilkan material baru dengan sifat yang lebih unggul dibandingkan material penyusunnya secara individual. Komposit didefinisikan sebagai material yang tersusun atas dua fase atau lebih, yaitu fase penguat (*Reinforcement*) dan fase pengikat (*Matrix*), yang bekerja sama menghasilkan sifat-sifat yang tidak dapat dicapai oleh satu bahan saja (Ngo, 2020). Fase *matrix* berperan melindungi serat dari kerusakan mekanik, mendistribusikan tegangan secara merata, serta memberikan ketahanan terhadap lingkungan eksternal (Hasan et al., 2021).

Komposit dapat diklasifikasikan berdasarkan jenis penguatnya menjadi komposit partikel, komposit serat, dan komposit laminat. Di antara ketiganya, komposit serat diperkuat polimer (*Fiber Reinforced Polymer/FRP*) memiliki sifat mekanik yang paling unggul. FRP saat ini menjadi pilihan utama di industri *aerospace*, otomotif, dan konstruksi karena rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi serta ketahanan korosi yang sangat baik (Maisha I Alam et al., 2022).

Keunggulan material komposit dibandingkan material konvensional antara lain mencakup rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi, kemampuan meredam getaran, ketahanan korosi, serta fleksibilitas dalam desain. Perkembangan komposit berbasis serat alam telah membuka peluang baru untuk aplikasi berkelanjutan yang ramah lingkungan sekaligus ekonomis (Kamarudin et al., 2022).

2.1.2 Komposit Serat (*Fiber Reinforced Polymer*)



Gambar 2. 2 Komposit Serat
(Sumber: As'ad, 2025)

Fiber Reinforced Polymer (FRP) merupakan jenis komposit yang menggunakan serat sebagai elemen penguat yang ditanam di dalam matriks polimer. Sifat mekanik FRP dapat direkayasa sesuai kebutuhan dengan cara mengatur orientasi serat, fraksi volume serat, dan jenis serat yang digunakan. FRP menunjukkan peningkatan signifikan dalam kekuatan tarik, modulus elastisitas, dan ketahanan impak dibandingkan material logam konvensional (mahboubizadeh et al., 2024).

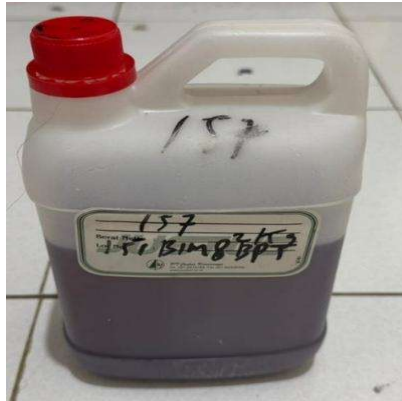
Komposit hibrida merupakan pengembangan dari FRP dimana dua atau lebih jenis serat berbeda dikombinasikan dalam satu matriks untuk mendapatkan sinergi sifat mekanik. Komposit hibrida menunjukkan bahwa efek hibrida mampu meningkatkan regangan kegagalan pertama serta kekuatan impak melebihi prediksi linear dari aturan campuran (Mohanraj et al., 2025).

Serat aramid (Kevlar) merupakan serat sintesis *polimer poliamid aromatic* yang dikenal memiliki kekuatan tarik sangat tinggi, modulus elastisitas yang baik, serta ketahanan terhadap benturan dan abrasi yang kuat. Komposit hibrida karbon-aramid menghasilkan peningkatan kekuatan lentur residual secara signifikan, dimana lapisan serat aramid terluar terbukti mampu melindungi serat bagian dalam dari kegagalan akibat beban lentur (Heitkamp et al., 2022).

Serat nanas (*Pineapple Leaf Fiber/PALF*) merupakan serat alam dengan kandungan selulosa tinggi (70-82%) yang memberikan kekuatan tarik dan modulus elastisitas yang kompetitif. PALF memiliki keunggulan berupa kandungan selulosa tinggi, biaya rendah, ramah lingkungan, dan kekuatan serat yang baik, sehingga menjadikannya kandidat yang sangat potensial sebagai penguat dalam komposit polimer (Sethupathi et al., 2024).

Penggunaan serat aramid dan serat nanas dalam komposit hibrida memberikan sinergi antara kekuatan tinggi serat sintesis dan keunggulan serat alam. Kekuatan tarik serat alam dalam komposit berbasis resin bervariasi dari 12 MPa (abaka) Hingga 1627 MPa (nanas), dimana serat nanas memiliki kekuatan spesifik tertinggi diantara serat alam yang umum digunakan (Mahmud et al., 2025).

2.1.3 Resin

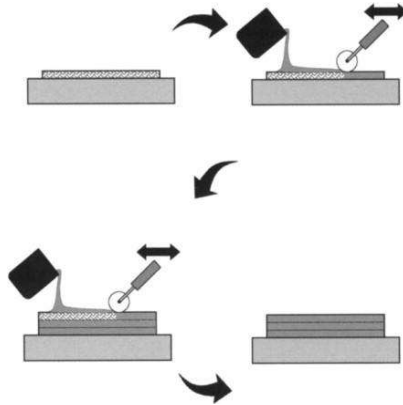


Gambar 2. 3 Resin
(Sumber: Penulis, 2026)

Resin Adalah jenis polimer thermoset yang paling banyak digunakan sebagai matriks dalam komposit serat. Resin mengandung gugus epoksida dalam struktur molekulnya dan dapat dipolimerisasi dengan penambahan hardener. Resin memiliki adhesi yang sangat baik terhadap berbagai substrat, shrinkage rendah, serta ketahanan kimia dan termal yang baik dibandingkan resin thermoset lainnya (Birajdar & Vyavahare, 2023).

Keunggulan resin dalam aplikasi komposit meliputi viskositas rendah yang memudahkan pembasahan serat, adhesi interfasial yang kuat, serta shrinkage rendah yang meminimalkan tegangan sisa. Based composites dominan digunakan di industri aerospace, otomotif, dan kelautan karena kombinasi sifat mekanik, termal, dan kimia yang unggul.

2.1.4 Metode *Hand lay-up*

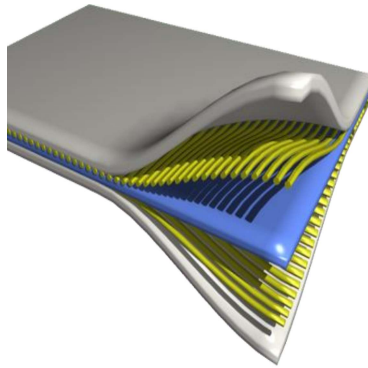


Gambar 2. 4 Metode *Hand Lay-Up*
(Sumber: F C Campbell, 2004)

Metode *Hand lay-up* merupakan teknik fabrikasi komposit yang paling sederhana dan paling banyak diterapkan dalam penelitian komposit serat alam. Dalam proses ini, lapisan serat diletakkan secara manual ke dalam cetakan, kemudian resin cair dioleskan menggunakan kuas atau rol untuk membasahi serat secara menyeluruh, lapisan demi lapisan. Metode ini tidak memerlukan peralatan yang kompleks, memiliki biaya produksi yang rendah, dan cocok untuk pembuatan komponen berukuran besar dengan geometri yang kompleks (Mazumdar, 2002). Komposit hibrida Glass-FRP dengan serat alam menggunakan metode *Hand lay-up* dan membuktikan bahwa teknik ini mampu menghasilkan komposit dengan kekuatan Tarik hingga 71,29 MPa dan kekuatan lentur 67,73 MPa tergantung pada jenis dan susunan serat yang digunakan (Pawar et al., 2024).

Kelemahan utama metode *hand lay-up* dibandingkan metode *vacuum infusion* atau *autoclave* adalah fraksi volume serat yang relatif lebih rendah (30-50%) dan konsistensi kualitas yang bergantung pada keahlian operator, tetapi metode ini tetap menjadi metode fabrikasi yang relevan untuk komposit hibrida serat alam karena fleksibilitasnya yang tinggi dan biaya yang terjangkau, khususnya dalam konteks penelitian dan pengembangan material baru (Fong et al., 2025).

2.1.5 Laminasi Komposit



Gambar 2. 5 Laminasi Komposit
(Sumber: Cahyadi A, 2023)

Laminasi komposit merupakan susunan beberapa lapisan (*Laminae*) material komposit yang ditumpuk dan diikat Bersama oleh matriks. Setiap lamina dapat memiliki orientasi serat yang berbeda, sehingga sifat mekanik laminat dapat direkayasa untuk memenuhi persyaratan beban multiarah. Teori laminat klasik (*Classical Lamination Theory/CLT*) digunakan untuk memprediksi perilaku mekanik komposit laminat berdasarkan sifat masing-masing lamina dan susunan tumpukan (*Stacking Sequence*) (Daniel & Ishai, 2006).

Pengaruh susunan laminasi (*Stacking Sequence*) terhadap sifat mekanik komposit hibrida telah dibuktikan secara eksperimental. Pada komposit hibrida basalt/ramie menggunakan *hand lay-up* menunjukkan bahwa konfigurasi selang-seling BRBRBRB, menghasilkan kekuatan lentur tertinggi sebesar 115 MPa, membuktikan bahwa urutan tumpukan serat sangat berpengaruh terhadap distribusi tegangan dan kekuatan keseluruhan komposit (Ramesh et al., 2023).

Penelitian mengenai komposit hibrida menggunakan serat nanas mengkonfirmasi pengaruh susunan laminasi terhadap sifat lentur. Pada komposit hibrida *cotton-belnded jute* dan serat nanas menemukan bahwa konfigurasi laminasi yang menempatkan lapisan serat nanas di posisi terluar meningkatkan modulus lentur hingga 78.57% dibandingkan konfigurasi yang menempatkan serat nanas di bagian tengah. Posisi lapisan serat yang lebih kaku pada bagian terluar laminat secara teoritis dan eksperimental terbukti mengoptimalkan kekuatan bending (Baigh et al., 2023).

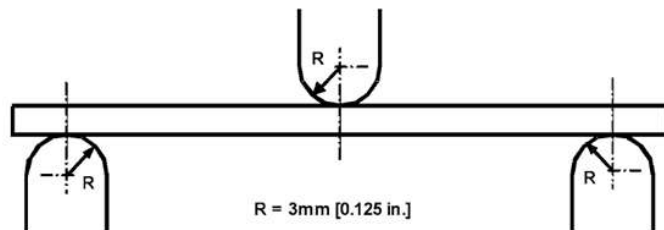
2.1.6 Bending Testing

Pengujian bending atau uji lentur (*Flexural Test*) merupakan salah satu metode pengujian mekanik yang paling penting untuk mengkarakterisasi material komposit serat. Uji bending bertujuan untuk menentukan kekuatan lentur, kekakuan lentur, dan perilaku beban defleksi dari material komposit. Standar yang digunakan dalam penelitian ini Adalah ISO 14125:1998 (*Fibre-Reinforced Plastic Composites — Determination of Flexural Properties*), yang diterbitkan oleh *International Committee D30 on Composites*.

Pemilihan ISO 14125:1998 sebagai standar pengujian pada penelitian ini didasarkan pada beberapa pertimbangan teknis. Pertama, standar ini menggunakan rasio *span-to-thickness* (L/h) sebesar 16:1 yang ditetapkan untuk komposit *Class II*, yaitu komposit diperkuat *mat*, *woven fabric*, dan format campuran. Rasio ini dirancang untuk meminimalkan pengaruh tegangan geser antarlaminat (*interlaminar shear*) yang sering terjadi pada komposit FRP, sehingga kegagalan yang terukur merupakan kegagalan akibat tegangan lentur pada permukaan terluar spesimen. Kedua, ISO 14125:1998 memuat ketentuan dimensi spesimen yang dapat disesuaikan melalui Annex A apabila dimensi *preferred* tidak dapat dipenuhi akibat keterbatasan peralatan, dengan syarat rasio L/h tetap dipertahankan.

ISO 14125:1998 mencakup dua prosedur pengujian yang dapat dipilih sesuai kebutuhan, yaitu:

1. *Three-Point Bending* (tiga titik): Sistem pembebanan tiga titik dengan beban diterapkan tepat di tengah bentang (*center loading*). Pada prosedur ini, tegangan lentur aksial maksimum terkonsentrasi tepat di bawah titik pembebanan (*loading nose*). Prosedur ini lebih sederhana dan paling umum digunakan dalam penelitian komposit skala laboratorium.

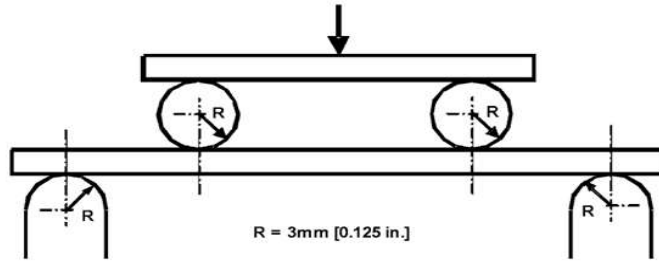


Three-Point Loading Configuration with Fixed Supports and Loading Nose

Gambar 2. 6 Pengujian *three-point bending*

(Sumber: ASTM D7264, 2007)

2. *Four-point Bending* (empat titik): Sistem pembebanan empat titik dengan dua titik yang diletakkan simetris terhadap dua tumpuan, dengan jarak antar titik beban sebesar $\frac{1}{2}$ dari jarak tumpuan, keunggulan prosedur ini adalah tegangan lentur aksial maksimum terdistribusi secara merata (*uniform*) di antara kedua titik pembebanan, bukan terkonsentrasi di satu titik, sehingga menghasilkan kondisi tegangan yang lebih representatif untuk evaluasi material. Prosedur ini lebih direkomendasikan apabila peneliti ingin memperoleh distribusi tegangan yang lebih homogen sepanjang zona tengah spesimen.



Four-Point Loading Configuration with Fixed Supports and Rolling Loading Noses

Gambar 2. 7 Pengujian *four-point bending*
(Sumber: ASTM D7264, 2007)

Tabel 2. 1 Ketentuan Standar ISO 14125:1998 (Sumber ISO 14125, 1998)

Parameter	Nilai standar	Keterangan
Tebal spesimen (h)	2 - 4 mm	Standar utama
Lebar Spesimen (b)	15 mm	Standar utama
Rasio span/tebal (L/h)	16:1	Standar utama
Panjang tumpuan (L)	$16 \leq \frac{L}{h} \leq 32$	Standar utama
Panjang total spesimen	16	Lebih Panjang 20% dari span
Jumlah spesimen	4 spesimen	Per variasi uji
Metode Pengujian	1 mm/menit	<i>Three-Point Bending</i>

Perhitungan sifat lentur berdasarkan ISO 14125:1998 menggunakan persamaan berikut. Untuk metode *Three-Point Bending*, kekuatan lentur (σ) dihitung dengan:

$$\sigma_f M = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (1)$$

Dimana:

P = Beban maksimum (N)

L = Jarak tumpuan (mm)

B = lebar spesimen (mm)

H = tebal spesimen (mm)

Modulus lentur (E_f) untuk metode *Three-Point Bending* dihitung dari:

$$E_f = \frac{\sigma_{f''} - \sigma_{f'}}{\varepsilon_{f''} - \varepsilon_{f'}} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (2)$$

Dimana:

E_f = Modulus lentur / chord modulus (MPa)

$\sigma_{f''}$ dan $\sigma_{f'}$ = Tegangan lentur pada regangan $\varepsilon_{f''} = 0,0025$ dan $\varepsilon_{f'} = 0,0005$; $\Delta\varepsilon = 0,002$

Untuk metode *Four-point Bending*, kekuatan lentur dihitung dengan:

$$\sigma_{fM} = \frac{3FL}{4bh^2} \quad (3)$$

Sementara modulus lentur metode *Four-point Bending* dihitung dengan:

$$E_f = \frac{\sigma_{f''} - \sigma_{f'}}{\varepsilon_{f''} - \varepsilon_{f'}} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (4)$$

Perbedaan koefisien pada persamaan metode *Three-Point Bending* ($3FL/2bh^2$) dan metode *Four-point Bending* ($3FL/4bh^2$) mencerminkan perbedaan distribusi momen lentur. Pada metode *Three-Point Bending* tegangan maksimum terkonsentrasi di bawah titik beban, sedangkan pada *Four-point Bending* tegangan maksimum terdistribusi merata antara dua titik pembebanan. Perbedaan ini secara umum menghasilkan nilai kekuatan lentur yang sedikit berbeda antara dua prosedur tersebut, sehingga prosedur yang sama harus digunakan konsisten untuk seluruh spesimen dalam satu penelitian.

2.2 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu bertujuan agar mendapatkan dan mengetahui perbandingan atau acuan pada penelitian saat ini, Selain itu agar menghindari kesamaan dengan penelitian yang lalu. Oleh sebab itu dalam kajian Pustaka ini peneliti mencantumkan hasil dari penelitian terdahulu sebagai berikut:

Penelitian yang dilakukan oleh Hashim et al. (2021) berjudul "*The Effect of Stacking Sequence and Ply Orientation on the Mechanical Properties of PALF/Carbon Hybrid Laminate Composites*" mengkaji komposit hibrida berbasis serat daun nanas (PALF) dan serat karbon dengan matriks epoxy bisphenol-A yang di fabrikasi menggunakan metode vacuum infusion. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konfigurasi laminasi dengan serat karbon pada lapisan terluar (CPPC) menghasilkan kekuatan lentur tertinggi sebesar 289,46 MPa dengan modulus lentur sebesar 4,82 GPa. Selain itu, kegagalan material selalu diawali pada lapisan PALF yang memiliki kekuatan lebih rendah dibandingkan serat karbon. Meskipun demikian, penelitian tersebut menggunakan serat karbon sebagai penguat sintesis dan belum mengkaji kombinasi serat aramid dengan PALF berbasis epoxy menggunakan variasi susunan laminasi melalui metode *hand lay-up*.

Hashim et al. (2023) dalam penelitian berjudul "*The Mechanical Properties of PALF/Carbon Hybrid Laminate Composites at Anti-Symmetric Ply Orientation*" meneliti pengaruh orientasi antisimetris pada komposit hibrida PALF dan karbon dengan matriks epoxy triethylene tetraamine menggunakan metode vacuum infusion. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konfigurasi antisimetris dengan karbon pada lapisan pertama dan PALF pada lapisan kedua menghasilkan kekuatan lentur tertinggi sebesar 235 MPa dan modulus lentur sebesar 4,6 GPa. Susunan lapisan terbukti memberikan pengaruh signifikan terhadap sifat lentur komposit. Namun demikian, penelitian ini masih menggunakan serat karbon, bukan serat aramid, serta memanfaatkan metode *vacuum infusion* yang relatif kompleks dibandingkan metode *hand lay-up* yang lebih sederhana dan ekonomis.

Bakhori et al. (2022) melalui penelitian berjudul "*Mechanical Properties of PALF/Kevlar-Reinforced Unsaturated Polyester Hybrid Composite Laminates*" menginvestigasi komposit hibrida berbasis PALF dan Kevlar dengan matriks unsaturated polyester yang di fabrikasi menggunakan metode *hand lay-up*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa komposit hibrida PALF/Kevlar mampu meningkatkan kekuatan tarik dan lentur secara signifikan dibandingkan komposit PALF murni. Observasi pasca-pengujian juga memperlihatkan bahwa adhesi antarmuka PALF dan matriks cukup baik meskipun masih ditemukan fenomena *fiber pull-out*. Keterbatasan penelitian ini terletak pada penggunaan matriks unsaturated polyester serta belum adanya kajian sistematis mengenai pengaruh variasi susunan laminasi terhadap kekuatan bending.

Penelitian yang dilakukan oleh Baigh et al. (2023) dengan judul "*A Comprehensive Study on the Effect of Hybridization and Stacking Sequence in Fabricating Cotton-Blended Jute and PALF Biocomposites*" mengevaluasi komposit hibrida berbasis PALF dan jute yang di fabrikasi menggunakan metode *hand lay-up*. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa konfigurasi laminasi alterneting (4P5J-1) menghasilkan kekuatan lentur tertinggi sebesar 44,36 MPa, sedangkan modulus lentur meningkat hingga 78,57% akibat perubahan susunan laminasi. Hasil tersebut membuktikan bahwa hibridisasi dan stacking sequence memiliki peran penting terhadap performa mekanik komposit. Akan tetapi, penelitian tersebut belum mengeksplorasi penggunaan serat aramid sebagai penguat sintetis berkekuatan tinggi dalam sistem komposit berbasis PALF.

Velumayil dan Palanivel (2022) dalam penelitian berjudul "*Hybridization Effect on Mechanical Properties of Basalt/Kevlar/Epoxy Composite Laminates*" mengkaji komposit hibrida berbasis Kevlar dan basalt dengan matriks epoxy melalui metode *hand lay-up*. Penelitian ini menggunakan tujuh lapisan dengan delapan variasi konfigurasi laminasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa komposit basalt/epoxy murni memiliki sifat mekanik tertinggi dibandingkan Kevlar/epoxy, sedangkan konfigurasi hibrida dengan basalt pada lapisan luar dan Kevlar di bagian dalam memberikan performa yang optimal. Meskipun demikian, penelitian ini tidak melibatkan serat alam sehingga belum mengeksplorasi potensi kombinasi antara serat aramid dan PALF sebagai alternatif material yang lebih berkelanjutan.

Halaman ini sengaja dikosongkan