

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu yang Relevan

2.1.1 Pengaruh Orientasi Arah Serat Terhadap Kekuatan Tarik dan Kekuatan Kelenturan Composite Berpenguat Serat Carbon Dengan Matrik Epoxy

Kurniawan Robiansyah dan Mochammad Arif Irfa'i dalam penelitiannya yang berjudul "*Pengaruh Orientasi Arah Serat Terhadap Kekuatan Tarik dan Kekuatan Kelenturan Composite Berpenguat Serat Carbon Dengan Matrik Epoxy*" pada tahun 2021. Penelitian ini dilakukan untuk menganalisa pengaruh orientasi serat karbon terhadap kekuatan mekanik komposit. Penelitian ini dilatarbelakangi oleh fakta bahwa selain faktor fraksi volume, orientasi arah serat juga berperan penting dalam menentukan sifat mekanik komposit. Material yang digunakan berupa serat karbon sebagai penguat dan epoxy sebagai matrik, dengan fraksi volume 40% serat karbon dan 60% epoxy. Variabel bebas pada penelitian ini adalah orientasi arah serat, yaitu 0° , 90° , 45° , $0^\circ-90^\circ-0^\circ$, dan $90^\circ-0^\circ-90^\circ$, sedangkan variabel terikat berupa kekuatan tarik dan kekuatan Kelenturan. Pengujian dilakukan secara eksperimental dengan standar ASTM D638 untuk uji tarik dan ASTM D790 untuk uji Kelenturan, menggunakan spesimen yang dibuat dengan metode vakum.



Gambar 2.1 (a) Spesimen uji tarik dan (b) spesimen uji Kelenturan

(Sumber:Robiansyah & Irfa'i, (2021))

Hasil penelitian menunjukkan bahwa orientasi serat berpengaruh signifikan terhadap kekuatan tarik dan Kelenturan komposit. Nilai kekuatan tarik tertinggi diperoleh pada orientasi serat 0° dengan rata-rata 78,25 MPa, sedangkan nilai terendah terdapat pada orientasi 90° dengan rata-rata 7,39 MPa. Pada pengujian Kelenturan, orientasi serat 0° menghasilkan kekuatan rata-rata tertinggi sebesar 602,08 MPa, sementara nilai terendah terdapat pada orientasi 90° dengan rata-rata 79,22 MPa. Mekanisme kegagalan yang diamati pada uji tarik maupun uji Kelenturan menunjukkan adanya fenomena *fiber pull out* serta *delaminasi*, di mana serat karbon terlepas dari matriks akibat ketidakmampuan matriks *epoxy* menahan gaya beban.

Tabel 2.1 Data Hasil Uji Tarik Penelitian Robiansyah
(Sumber: Robiansyah & Irfa'i, (2021))

No	Spesimen Uji		Beban Maksimum (N)	Kekuatan Tarik (MPa)
	Arah Orientasi Serat	Spesimen		
1	0°	1	7800	82,11
		2	7600	80,00
		3	6900	72,63
		X	7433,3	78,25
2	90°	1	676	7,12
		2	720	7,58
		3	710	7,47
		X	702	7,39
3	45°	1	4300	45,26
		2	4250	44,74
		3	3900	41,05
		X	4150	43,68
4	$0^\circ, 90^\circ, 0^\circ$	1	6500	68,42
		2	6350	66,84
		3	6380	67,16
		X	6410	67,47
5	$90^\circ, 0^\circ, 90^\circ$	1	780	8,21
		2	810	8,53
		3	800	8,42
		X	796,7	8,39

Tabel 2.2 Data Hasil Pengujian Kelenturan
(Sumber: Robiansyah & Irfa'i, (2021))

No	Spesimen Uji		Beban Maksimum (N)	Kekuatan Tarik (MPa)
	Arah Orientasi Serat	Spesimen		
1	0°	1	1700	602,08
		2	1650	584,38
		3	1810	641,04
		X	1720	609,17
2	90°	1	213	75,44
		2	228	80,75
		3	230	81,46
		X	213	75,44
3	45°	1	325	115,1
		2	300	106,25
		3	315	111,56
		X	313,3	110,97
4	0°, 90°, 0°	1	1530	541,88
		2	1580	559,58
		3	1650	584,38
		X	1586,7	561,94
5	90°, 0°, 90°	1	680	240,83
		2	640	226,67
		3	800	283,33
		X	706,7	250,28

Berdasarkan hasil tersebut, penelitian ini menyimpulkan bahwa orientasi serat karbon secara signifikan memengaruhi sifat mekanik komposit berpenguat serat karbon dengan matriks *epoxy*. Orientasi serat sejajar dengan arah beban (0°) terbukti memberikan kekuatan tarik dan Kelenturan yang paling optimal. Implikasi penelitian ini menunjukkan pentingnya penentuan orientasi serat dalam proses desain dan manufaktur material komposit, khususnya untuk aplikasi yang membutuhkan kekuatan mekanik tinggi seperti komponen prosthesia maupun struktur ringan di bidang transportasi.

2.1.2 Eksperimen Uji Kelenturan pada Komposit Resin Polyester dan Epoxy Serat Jerami Padi dengan Proses Hand Lay Up

Chaerul Gautama R., Muhammad Fa'iz Alfatih, dan Sabri Alimi dalam penelitiannya yang berjudul *"Eksperimen Uji Kelenturan pada Komposit Resin Polyester dan Epoxy Serat Jerami Padi dengan Proses Hand Lay Up"* pada tahun 2022 melakukan kajian untuk menganalisis pengaruh jenis resin dan panjang serat jerami padi terhadap kekuatan mekanik komposit. Penelitian ini dilatarbelakangi oleh potensi pemanfaatan limbah jerami padi sebagai serat penguat alami yang ramah lingkungan, ringan, murah, serta mudah didapat, namun masih jarang digunakan secara optimal. Dalam penelitian ini, matriks yang digunakan adalah resin epoxy dan resin *Polyester*, sementara filler berupa serat jerami padi dengan variasi panjang serat 15 mm dan 25 mm. Proses fabrikasi dilakukan menggunakan metode *hand lay-up* dengan fraksi volume serat sebesar 20%, kemudian dilakukan pengujian kekuatan Kelenturan menggunakan metode *three point bending* sesuai standar ASTM D790.



Gambar 2.2 Spesimen pengujian *Kelenturan*
(Sumber: Gautama et al., (2022))

Hasil pengujian menunjukkan bahwa jenis resin dan panjang serat berpengaruh signifikan terhadap kelenturan komposit. Pada komposit dengan resin *Polyester*, kekuatan

kelenturan tertinggi diperoleh pada panjang serat 15 mm dengan nilai rata-rata 32,04 MPa, sedangkan pada panjang serat 25 mm nilainya menurun menjadi 16,185 MPa. Sementara itu, pada komposit berbasis resin *epoxy*, nilai kekuatan kelenturan rata-rata pada serat 15 mm adalah 12,261 MPa dan pada serat 25 mm sebesar 9,959 MPa. Dari sisi modulus elastisitas, komposit *epoxy* dengan panjang serat 25 mm menunjukkan nilai paling tinggi sebesar 8148,5 MPa, sedangkan komposit *polyester* dengan serat 15 mm mencapai 1173,74 MPa. Hasil pengamatan struktur patahan memperlihatkan adanya ikatan yang kurang baik antara serat dan matriks, ditandai dengan fenomena *fiber pull out* dan terbentuknya *void* yang berpotensi menurunkan kekuatan material.



Gambar 2.3 Hasil Patahan Uji Kelenturan
(Sumber: Gautama et al., (2022))

Tabel 2.3 Data Hasil Pengujian Kekuatan Kelenturan Material Komposit
(Sumber: Gautama et al., (2022))

Material Komposit	Vf (%)	Harga rata-rata			
		Epoxy		Polyester	
		σ_b (MPa)	E_b (MPa)	σ_b (MPa)	E_b (MPa)
Serat 15 mm	20	12,261	1846,68	32,04	1173,74
Serat 25 mm	20	9,959	8148,5	16,185	668,198

Berdasarkan hasil tersebut, penelitian ini menyimpulkan bahwa penggunaan resin *polyester* menghasilkan kekuatan kelenturan lebih tinggi dibandingkan resin *epoxy*, terutama pada variasi panjang serat 15 mm. Sebaliknya, resin *epoxy* memberikan modulus elastisitas yang lebih tinggi dibandingkan *polyester* pada serat dengan panjang 25 mm. Implikasi dari

penelitian ini menunjukkan bahwa pemilihan kombinasi jenis resin dan ukuran serat sangat menentukan performa mekanik komposit berbasis serat alam, sehingga dapat menjadi alternatif material ramah lingkungan untuk aplikasi teknik.

2.1.3 Pengaruh Ukuran terhadap Kekerasan Komposit Paduan Sampah Plastik dan Cangkang Sawit

Lelawati dan Aan Safentry dalam penelitiannya yang berjudul *“Pengaruh Ukuran terhadap Kekerasan Komposit Paduan Sampah Plastik dan Cangkang Sawit”* pada tahun 2021 melakukan eksperimen untuk mengetahui pengaruh ukuran partikel cangkang sawit terhadap kekerasan komposit berbasis limbah plastik. Penelitian ini dilatarbelakangi oleh tingginya volume sampah plastik di Indonesia yang mencapai 5,4 juta ton per tahun serta melimpahnya limbah cangkang sawit sebagai hasil samping industri kelapa sawit. Keduanya dipandang potensial sebagai bahan baku komposit ramah lingkungan yang dapat dimanfaatkan kembali. Dalam penelitian ini, komposit dibuat dengan perbandingan komposisi 60% cangkang sawit dan 40% sampah plastik, dengan dua variasi ukuran partikel cangkang sawit yaitu 1 mm dan 2 mm. Proses pembuatan spesimen dilakukan dengan cara pencampuran plastik yang dilelehkan bersama serbuk cangkang sawit, kemudian dicetak dan diuji kekerasannya menggunakan metode *Rockwell hardness test* (skala HRC) pada lima titik pengukuran.



Gambar 2.4 Spesimen 40% sampah plastik 60% cangkang sawit 1 mm
(Sumber: Lelawati, (2021))

Hasil pengujian menunjukkan bahwa ukuran partikel

cangkang sawit berpengaruh terhadap nilai kekerasan komposit. Spesimen dengan ukuran partikel 1 mm menghasilkan nilai kekerasan rata-rata sebesar 71,2 HRC, sedangkan spesimen dengan ukuran partikel 2 mm menunjukkan nilai rata-rata lebih tinggi yaitu 73,5 HRC. Temuan ini mengindikasikan bahwa semakin besar ukuran partikel cangkang sawit, maka komposit yang terbentuk cenderung memiliki kekerasan lebih tinggi.

Tabel 2.4 Hasil Pengujian spesimen 40% sampah plastik 60% cangkang sawit 1 mm
(Sumber: Lelawati, (2021))

No	Nilai uji kekerasan
1	69 HRC
2	69 HRC
3	74 HRC
4	69 HRC
5	75 HRC
Rata-rata	71,2 HRC

Tabel 2.5 Hasil Pengujian spesimen 40% sampah plastik 60% cangkang sawit 2 mm
(Sumber: Lelawati, (2021))

No	Nilai uji kekerasan
1	75 HRC
2	62,5 HRC
3	80 HRC
4	78 HRC
5	72 HRC
Rata-rata	73,5 HRC

Berdasarkan hasil tersebut, penelitian ini menyimpulkan bahwa kombinasi limbah plastik dan cangkang sawit dapat menghasilkan material komposit dengan kekerasan yang cukup baik, sehingga berpotensi digunakan untuk aplikasi teknik sederhana. Selain itu, pemanfaatan limbah plastik dan limbah sawit dalam bentuk komposit juga memberikan nilai tambah dari sisi keberlanjutan lingkungan, karena dapat mengurangi ketergantungan pada material sintetis sekaligus mendukung upaya daur ulang limbah.

2.1.4 Effect of Vacuum Bag Pressure on the Flexural Properties of GFRP Composite Laminates

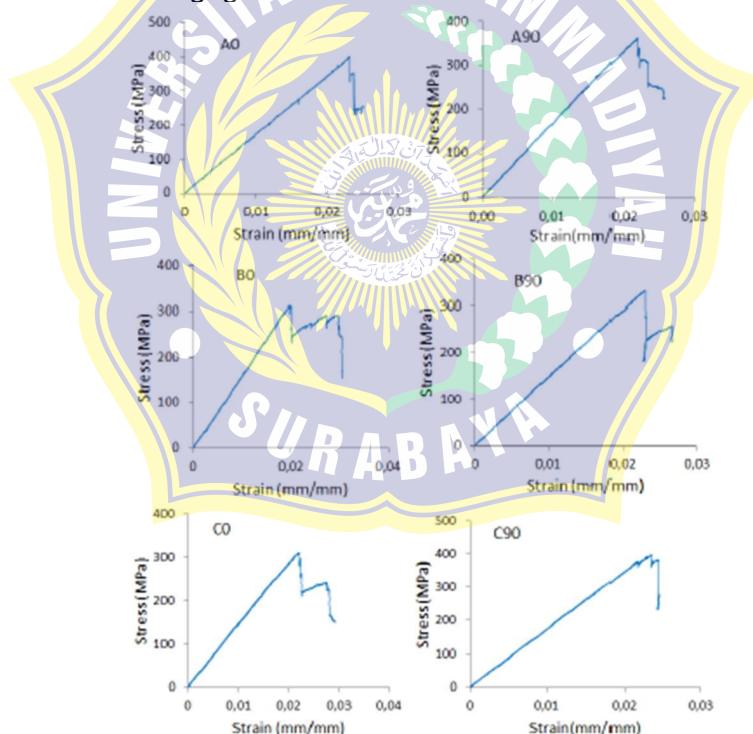
F. Alizadeh, L. S. Sutherland, dan C. Guedes Soares dalam penelitiannya yang berjudul “Effect of Vacuum Bag Pressure on the Flexural Properties of GFRP Composite Laminates” (2017) melakukan kajian mengenai pengaruh tingkat tekanan *vacuum bagging* terhadap fraksi volume serat dan sifat mekanik lentur pada material komposit *glass fiber reinforced plastic* (GFRP). Penelitian ini didorong oleh peran material komposit dalam industri maritim yang banyak digunakan untuk konstruksi kapal dan struktur laut, di mana sifat mekanik terhadap beban lentur sangat penting untuk menjamin kinerja struktural. Variabel utama penelitian ini adalah perbedaan tingkat vakum pada proses *vacuum bagging*, yaitu 0,2 bar (rendah), 0,6 bar (normal), dan 0,9 bar (maksimum praktis). Material yang digunakan berupa serat kaca dengan matriks resin poliester ortoftalat, disusun dalam konfigurasi *chopped strand mat* (CSM) dan *woven roving* (WR). Spesimen dibuat dalam bentuk pelat komposit berukuran 900 × 1100 mm, kemudian dipotong untuk dilakukan uji pembakaran (*burn-off test*) sesuai standar ASTM D2584 guna menentukan fraksi volume serat, serta uji lentur *three point bending* sesuai ASTM D790.



Gambar 2.5 (a) Spesimen uji bakar dan (b) spesimen uji kelenturan
(Sumber: Alizadeh et al., (2017))

Hasil pengujian menunjukkan bahwa variasi tingkat tekanan vakum tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap

fraksi volume serat maupun sifat lentur komposit. Nilai fraksi volume serat rata-rata yang diperoleh pada ketiga variasi vakum relatif sama, berkisar antara 0,417–0,425. Demikian pula, nilai modulus elastisitas lentur (E) yang diperoleh dari pengujian berada pada kisaran 14,5–17,2 GPa, tanpa menunjukkan korelasi jelas dengan variasi tekanan vakum. Fenomena kerusakan yang diamati adalah terjadinya delaminasi pada lapisan atas yang disertai bunyi retakan awal, kemudian menjalar hingga menyebabkan kegagalan total berupa patah tarik pada lapisan bawah. Menariknya, meskipun delaminasi terjadi pada tahap awal, sifat kekakuan lentur material tetap menunjukkan respon linier yang konsisten hingga mendekati kegagalan.



Gambar 2.6 Diagram Hasil Pengujian Kelenturan
(Sumber: Alizadeh et al., (2017))

Tabel 2.6 Hasil Pengujian Kelenturan
(Sumber: Alizadeh et al., (2017))

Property	A0	B0	C0
E (GPa)	16,5	17,1	14,5
CV	0,07	0,07	0,03
First Audible Crack (MPa)	322	297	244
CV	0,14	0,07	0,06
Maximum Stress (MPa)	353	364	280
CV	0,11	0,15	0,12
Property	A0	B0	C0
E (GPa)	15,8	14,7	17,2
CV	0,06	0,07	0,09
First Audible Crack (MPa)	314	301	321
CV	0,13	0,11	0,09
Maximum Stress (MPa)	343	318	372
CV	0,07	0,09	0,12

Penelitian ini menyimpulkan bahwa tingkat tekanan vakum dalam rentang 0,2–0,9 bar pada proses *vacuum bagging* tidak berpengaruh signifikan terhadap fraksi serat maupun sifat lentur panel komposit GFRP berskala kecil. Faktor variasi operator (laminator) dalam proses fabrikasi diduga memiliki pengaruh yang lebih dominan terhadap hasil uji dibandingkan perbedaan tekanan vakum. Penelitian lanjutan disarankan untuk menguji panel dengan ukuran lebih besar serta menginvestigasi secara sistematis pengaruh variasi operator terhadap sifat mekanik material komposit. Temuan ini memiliki implikasi penting bagi industri maritim, khususnya dalam proses manufaktur struktur komposit kapal yang mengandalkan metode *vacuum bagging*.

2.1.5 The Influence of Ply Stacking Sequence on Mechanical Properties of Carbon/Epoxy Composite Laminates

Ogunleye, R. O., Rusnakova, S., Zaludek, M., & Emebu, S. dalam penelitiannya yang berjudul “*The Influence of Ply Stacking Sequence on Mechanical Properties of Carbon/Epoxy Composite Laminates*” pada tahun 2022 melakukan kajian untuk mengetahui pengaruh urutan penumpukan (*ply stacking*

sequence) terhadap sifat mekanik dari laminat komposit karbon/epoksi. Tujuan utama dari penelitian ini adalah mengevaluasi bagaimana variasi konfigurasi susunan lapisan serat dapat memengaruhi kekuatan tarik, kelenturan, serta ketangguhan impak dari material komposit.

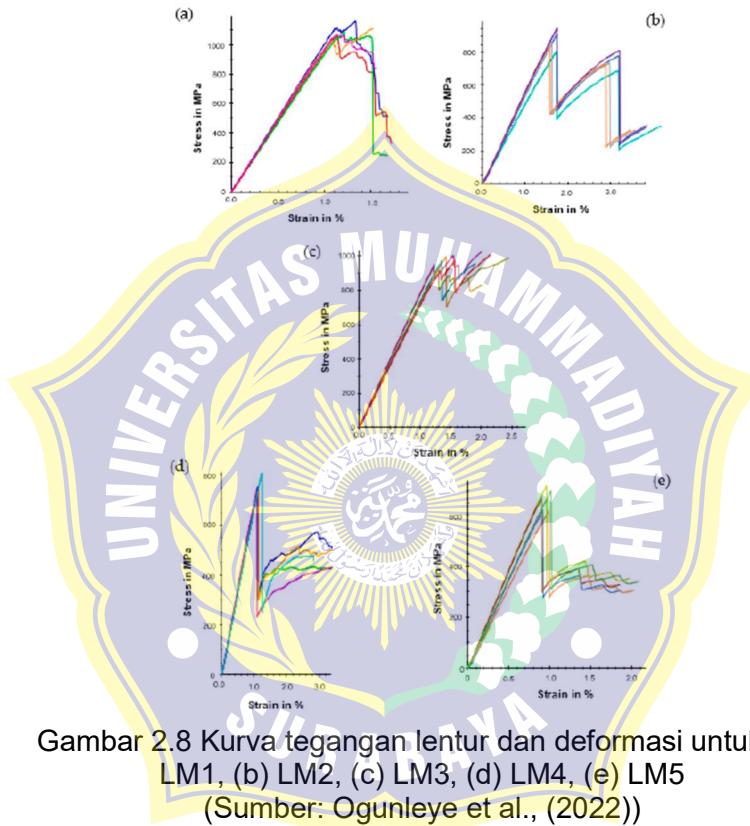
Sebelum dilakukan pengujian, peneliti menyiapkan spesimen komposit dengan metode *hand lay-up* yang kemudian dikonsolidasikan menggunakan teknik *vacuum bagging*. Variasi susunan ply yang digunakan antara lain orientasi serat $[0^\circ]_8$, $[0^\circ/90^\circ]_4$, $[\pm 45^\circ]_4$, serta kombinasi hibrid $[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]$. Spesimen uji kemudian dipotong sesuai standar pengujian mekanik internasional untuk uji tarik (ASTM D3039), uji lentur tiga titik (ASTM D790), dan uji impak (ASTM D256).



Gambar 2.7 Proses pembuatan autoclaf laminasi CFRP
(Sumber: Ogunleye et al., (2022))

Hasil penelitian menunjukkan bahwa urutan susunan ply memberikan pengaruh signifikan terhadap perilaku mekanik komposit. Laminat dengan orientasi serat searah $[0^\circ]_8$ memiliki kekuatan tarik tertinggi, namun ketangguhan impaknya relatif rendah. Sebaliknya, laminat dengan orientasi $[\pm 45^\circ]_4$ menunjukkan ketahanan impak yang lebih baik meskipun

kekuatan tariknya menurun. Konfigurasi hibrid $[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]$ menghasilkan sifat mekanik yang lebih seimbang, dengan peningkatan modulus elastisitas, kelenturan, serta energi serap impak.



Gambar 2.8 Kurva tegangan lentur dan deformasi untuk (a) LM1, (b) LM2, (c) LM3, (d) LM4, (e) LM5
(Sumber: Ogunleye et al., (2022))

Tabel 2.7 Rata-Rata Hasil Pengujian Kelenturan dan Tarik CFRP dengan urutan laminasi yang berbeda
 (Sumber: Ogunleye et al., (2022))

Sample	Flexural		Tensile	
	σ_f (MPa)	E_f (GPa)	σ_f (MPa)	E_f (GPa)
LM1	1100 (37,6)	98,4 (3,07)	1220 (54,4)	115 (3,32)
LM2	847 (131)	46,7 (0,93)	859 (37,7)	62,9 (0,86)
LM3	999 (22,3)	74,5 (3,2)	808 (43,1)	65,4 (1)
LM4	754 (32,7)	67 (1,98)	374 (15)	42,7 (1,22)
LM5	674 (43,8)	65,4 (3,05)	362 (24,5)	44,1 (1,05)

Berdasarkan hasil analisis, peneliti menyimpulkan bahwa pemilihan *ply stacking sequence* yang tepat sangat menentukan performa komposit karbon/epoksi. Orientasi searah serat optimal untuk aplikasi yang memerlukan kekuatan tarik tinggi, sedangkan kombinasi orientasi berlapis lebih sesuai untuk aplikasi yang membutuhkan ketangguhan dan distribusi beban multi-arah.

2.2 Pengertian Komposit

Komposit adalah bahan struktural yang terdiri dari dua atau lebih unsur yang digabungkan pada tingkat makroskopik dan tidak dapat larut satu sama lain. Satu bagian disebut penguat dan bagian lain menjadi perekat yang disebut matriks. Bahan fase penguat dapat berupa serat, partikel atau serpihan. Bahan fase matriks umumnya kontinu, berbentuk jel. Contoh dari komposit adalah kayu, dimana matriks lignin diperkuat dengan serat selulosa dan tulang dimana pelat garam tulang yang dibuat dari ion kalsium dan fosfat memperkuat kolagen lunak(Widodo & Iswanto, 2022).

(Mota Soares et al., 1999) Material komposit merupakan gabungan dari dua atau lebih material yang dirancang untuk menghasilkan sifat unggul yang tidak dimiliki oleh material tunggal. Salah satu jenis yang banyak digunakan adalah komposit berpenguat serat, di mana serat berfungsi sebagai elemen utama penahan beban sementara matriks berperan sebagai pengikat, media transfer beban, serta pelindung serat

dari pengaruh lingkungan. Berdasarkan bentuk dan susunannya, komposit dapat dibedakan menjadi komposit serat, komposit partikel, dan komposit laminasi. Komposit laminasi tersusun atas beberapa lapisan (*lamina*) yang dapat diatur dengan orientasi serat tertentu, misalnya 0° , 45° , atau 90° , sehingga memungkinkan perancang memperoleh kekakuan dan kekuatan sesuai kebutuhan struktural. Meskipun demikian, komposit laminasi juga memiliki kelemahan seperti potensi *delaminasi* akibat perbedaan sifat antar lapisan serta kemungkinan timbulnya cacat manufaktur seperti rongga antarlapisan, kerusakan serat, atau variasi ketebalan. Oleh sebab itu, pemahaman mengenai struktur, orientasi, dan sifat mekanik komposit sangat penting dalam proses analisis maupun desain agar dapat menghasilkan material yang ringan, kuat, dan andal untuk aplikasi teknik.



Gambar 2.9 Laminasi yang terbuat dari lamina dengan orientasi serat yang berbeda.

(Sumber: Mota Soares et al., (1999))

Advance Composite atau komposit dengan teknologi tinggi adalah bahan komposit yang secara tradisional digunakan dalam industri kedirgantaraan. Komposit ini memiliki penguatan kinerja tinggi dari diameter tipis dalam bahan matriks seperti

epoksi dan aluminium. Contohnya adalah grafit/epoksi, kevlar/epoksi, dan komposit boron/aluminium. Bahan-bahan ini sekarang telah mulai diaplikasikan secara luas dalam industri komersial (Widodo & Iswanto, 2022).

2.3 Penguat (*Reinforcement*)

Komposit terdiri dari dua material pokok, yaitu penguat (*reinforcement*) dan matriks (resin). Penguat (*reinforcement*) adalah bahan pada komposit yang berfungsi sebagai penopang utama kekuatan komposit, sedangkan matriks berfungsi untuk mengikat penguat (*reinforcement*) agar tetap pada tempatnya. Beban yang diterima oleh komposit hampir seluruhnya diterima oleh *reinforcement* ini, sehingga tinggi rendahnya kekuatan dari komposit bergantung pada bahan yang digunakan sebagai *reinforcement*. Oleh karena itu bahan *reinforcement* harus mempunyai tegangan tarik dan modulus elastisitas yang lebih tinggi daripada matriks penyusun komposit (Gautama et al., 2022).

Penguatan komposit dapat menggunakan serat, serpih atau serbuk/partikel. Masing-masing penguat ini memperkuat komposit dengan karakteristik mekanik yang berbeda, sesuai dengan aplikasi yang dibutuhkan. Berbagai jenis serat telah digunakan untuk memperkuat komposit matriks polimer. Yang paling umum adalah serat karbon, serat kaca, serat aramid dan serat boron. Pada tahun 1961, ketika serat karbon mulai dikembangkan sebagai penguat komposit, perkembangan serat karbon untuk *reinforcement* semakin luas. Demikian juga semakin banyak usaha untuk meningkatkan mutu resin sebagai matriksnya (Widodo & Iswanto, 2022).

Secara garis besar terdapat 3 macam jenis komposit berdasarkan penguat yang digunakannya, yaitu:

1. *Fibrous Composites* (Komposit Serat), merupakan jenis komposit yang hanya terdiri dari satu lapisan yang menggunakan penguat berupa serat (fiber). Serat (fiber) yang digunakan bisa berupa *glass fibers*, *carbon fibers*, *aramid fibers* dan sebagainya.

2. *Laminated Composites* (Komposit Laminat), merupakan jenis komposit yang terdiri dari dua lapis atau lebih yang digabung menjadi satu dan setiap lapisnya memiliki karakteristik sifat tersendiri.
3. *Particulate Composite* (Komposit Partikel), merupakan komposit yang menggunakan partikel atau serbuk sebagai penguatnya dan terdistribusi secara merata dalam matriksnya (Widodo & Iswanto, 2022).

Tabel 2.8 Karakteristik Kinerja Serat
 (Sumber: Ability Composites, (n.d.))

Characteristic	Performance		
	Carbon	Fiberglass	Aramid (Kevlar)
Cost	Highest	Lowest	
Electrical Resistivity	Poor	Best	
Electrical Conductivity	Best		
Thermal Conductivity	Best	Poor	
Dampening	Good		Best
Compressive Strength			Poor
Machineability	Best	Good	Poor
Toughness			Best
High Temp Strength	Best		Poor
Thermal Expansion	Near Zero	Positive	Negative
Fatigue Resistance	Best		
Impact Strength	Poor		
Environmental Stability	Best	Good	Poor

2.4 Matriks (Resin)

Matriks adalah fasa dalam material komposit yang mempunyai bagian atau fraksi volume terbesar (dominan), biasanya terbuat dari resin. Matriks mempunyai fungsi untuk mentransfer tegangan ke serat, membentuk ikatan koheren, permukaan matriks/serat, melindungi serat, memisahkan serat, melepas ikatan dan tetap stabil setelah proses manufaktur (Tjahjanti, 2018).

Matriks pada struktur komposit berasal dari bahan polimer atau logam. Syarat utama matriks yang digunakan pada komposit yaitu matriks harus bisa meneruskan beban,

sehingga serat harus bisa melekat pada matriks serta kompatibel antara serat dan matriks. Secara umum matriks adalah bahan yang diperkuat serat, matriks bersifat cair dengan viskositas yang rendah kemudian akan mengeras setelah terjadinya proses polimerisasi.

Berdasarkan matriks yang digunakan pada material komposit dapat dikelompokkan menjadi dua, yaitu:

1. *Metal Matriks Composite (MMC)*

Yaitu material komposit dengan matriks yang berasal dari logam. MMC mulai dikembangkan sejak tahun 1996. Pada mulanya yang diteliti adalah *Continous Filamen* MMC yang digunakan dalam industri penerbangan. MMC dengan matriks logam aluminum (Al) disebut dengan *Aluminum Metal Matrix Composite* (AMMC). AMMC yang dibuat dengan cara pengecoran disebut *Aluminum Metal Matrix Composite Cast Composite* (AMMCC). Kelebihan MMC adalah transfer tegangan dan regangan yang baik, tahan terhadap temperatur tinggi, tidak menyerap kelembaban, tidak mudah terbakar dan kekuatan tekan dan geser yang baik (Tjahjanti, 2018).



Gambar 2.10 (a) Silinder blok dari MMC dengan matriks aluminum, (b) *Drum brake* dari material komposit dengan matriks aluminum dan penguat silikon karbida.

(Sumber: Tjahjanti, (2018))

2. *Ceramic Matriks Composite (CMC)*

Yaitu material komposit dengan matriks yang berasal dari bahan keramik. CMC merupakan material dua fasa dengan satu fasa berfungsi sebagai penguat dan satu fasa sebagai

matriks dimana matriksnya terbuat dari bahan keramik. Penguat yang umum digunakan pada CMC adalah oksida, carbida dan nitrida. Salah satu proses pembuatan dari CMC yaitu dengan proses *DIMOX*, yaitu proses pembentukan komposit dengan reaksi oksidasi leburan logam untuk pertumbuhan matriks keramik di sekeliling daerah *filler*. Keuntungan dari CMC adalah dimensinya stabil bahkan lebih stabil daripada logam, sangat tangguh bahkan hampir sama dengan ketangguhan besi cor, mempunyai karakteristik permukaan yang tahan aus, unsur kimianya stabil pada temperatur tinggi, tahan pada temperatur tinggi dan kekuatan serta ketangguhannya tinggi, juga tahan terhadap korosi (UMSIDA, 2018).



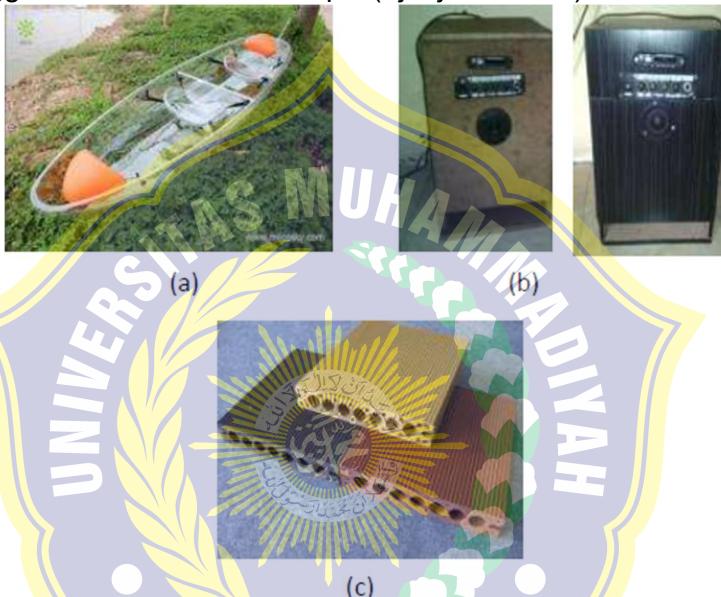
Gambar 2.11 (a) *Shaft Sleeves* untuk bantalan geser keramik pompa dengan matriks keramik dan penguat silikon karbida, (b) Ventilator untuk gas panas dengan matriks keramik dan penguat serat alumina.

(Sumber: Tjahjanti, (2018))

3. *Polymer Matriks Composite* (PMC)

Yaitu material komposit dengan matriks yang berbahan dasar polimer. Polimer merupakan matriks yang paling umum digunakan pada material komposit. Karena memiliki sifat yang lebih tahan terhadap korosi dan lebih ringan. Matriks polimer terbagi menjadi dua yaitu termoset dan termoplastik. Perbedaannya polimer termoset tidak dapat didaur ulang sedangkan termoplastik dapat didaur ulang sehingga lebih banyak digunakan belakangan ini. Jenis-jenis termoplastik yang biasa digunakan adalah *polypropylene* (PP), *polystyrene*

(PS), *polyethylene* (PE) dan lainnya. Material komposit PMC memiliki keunggulan antara lain biaya pembuatan lebih rendah, dapat dibuat dengan produksi massal, ketangguhan baik, tahan simpan, siklus pabrikasi dapat dipersingkat, kemampuan mengikuti bentuk, lebih ringan, *specific stiffness* dan *strength* tinggi, serta bersifat anisotropik (Tjahjanti, 2018).



Gambar 2.12 (a) Kayaks/cano dengan matriks *polymer* (PE) dan penguat *fiber glass*, (b) *box speaker* dari papan partikel komposit dengan matriks resin poliester dikombinasikan dengan katalis dan limbah media tanam jamur, dan (c) *wood polymer composite* dengan matriks kayu dan polimer dengan penguat *fiber glass*.

(Sumber: Tjahjanti, (2018))

2.4.1 Resin Polimer

Polimer merupakan bahan yang sangat berguna dalam dunia *engineering*, khususnya dalam industri konstruksi. Polimer sebagai bahan bangunan dapat digunakan sendiri atau dikombinasikan dengan bahan lain untuk membentuk

komposit, seperti perekat, pelapis, cat dan kaca. Aplikasi struktural yang membutuhkan kekuatan dan kekakuan memerlukan peningkatan sifat mekanik polimer untuk memenuhi persyaratan (Widodo & Iswanto, 2022).

2.4.2 Resin Epoksi

Resin epoksi adalah resin yang paling umum digunakan. Resin ini merupakan cairan organik dengan berat molekul rendah yang mengandung gugus epoksida. Epoksida memiliki tiga anggota dalam cincinnya: satu oksigen dan dua atom karbon. Reaksi epiklorohidrin dengan fenol atau amina aromatik membuat sebagian besar epoksi. Meskipun epoksi lebih mahal daripada matriks polimer lainnya, epoksi adalah matriks PMC (*polymer matrices composites*) yang paling populer. Lebih dari dua pertiga matriks polimer yang digunakan dalam aplikasi luar angkasa berbasis epoksi.

Adapun kelebihan resin epoksi, diantaranya:

1. Kekuatan tinggi;
2. Viskositas rendah dan laju aliran rendah, yang memungkinkan pembasahan serat yang baik dan mencegah *misalignment* serat selama pemrosesan;
3. Volatilitas rendah selama pengeringan;
4. Tingkat penyusutan rendah, yang mengurangi kecenderungan mendapatkan kekuatan geser besar, tegangan ikatan antara epoksi dan penguatnya; dan
5. Tersedia dalam lebih dari 20 tingkat untuk memenuhi persyaratan properti dan pemrosesan tertentu.

2.4.3 Resin Poliester

Resin poliester merupakan matriks dari komposit yang termasuk ke dalam jenis resin termoset. Pada polimer termoset resin cair diubah menjadi padatan yang keras dan getas yang terbentuk oleh ikatan silang kimiawi membentuk rantai polimer yang kuat. Resin termoset tidak mencair karena pemanasan. Resin poliester merupakan resin yang paling banyak digunakan dalam berbagai aplikasi yang menggunakan resin termoset,

baik secara terpisah maupun dalam bentuk material komposit.

Resin poliester seperti yang dijelaskan memiliki banyak kelebihan sekaligus beberapa kekurangan, dalam aplikasi komposit resin poliester dalam hal ini adalah poliester tak jenuh, biasanya ditambahkan penguat berupa serat. Serat yang digunakan sebagai penguat adalah berupa serat gelas, serat alam, serat karbon dan berbagai serat lainnya (Widodo & Iswanto, 2022). Resin poliester memiliki beberapa keunggulan utama, seperti biaya produksi yang relatif rendah, kemampuan pengerasan yang cepat dan daya tahan yang baik terhadap air dan kelembaban. Namun, resin poliester juga memiliki kelemahan seperti ketahanan yang kurang optimal terhadap bahan kimia agresif dan suhu tinggi jika dibandingkan dengan resin epoksi.

2.5 Hardener

Hardener merupakan bahan yang memungkinkan terjadinya proses pengerasan, khususnya pengerasan resin. Hardener terdiri dari dua bahan yaitu katalis dan promotor. Katalis dan akselerator menghasilkan panas yang efeknya diperlukan untuk mempercepat proses pengeringan agar bahan menjadi stabil. Namun, jika panasnya terlalu tinggi justru dapat merusak ikatan antar molekul dan juga merusak kain (lapisan). Katalis adalah bahan yang mempercepat terbentuknya ikatan rangkap molekul polimer, maka akan terjadi ikatan antar molekul. Sebagai alternatif, katalis dapat digunakan untuk mengontrol pembentukan zat peniup, sehingga tidak mengembang secara berlebihan atau mengeras terlalu cepat yang dapat menyebabkan penghambatan pembentukan gelembung bayangan (Widodo & Iswanto, 2022).

Oleh karena itu pemberian katalis dibatasi kurang lebih dalam rentang 1%-2% dari berat resin. Karena dalam proses pembuatan komposit akan menyebabkan komposit menempel pada cetakan sehingga diperlukan bahan yang digunakan sebagai pelapis guna memudahkan pelepasan material komposit dengan cetakan. Bahan yang sering digunakan

adalah *release agent* atau zat pelapis yang memiliki fungsi untuk mencegah menempelnya komposit pada cetakan saat proses pelepasan. Pelapisan ini dilakukan pada cetakan sebelum proses pembuatan komposit dilakukan (Gautama et al., 2022).

2.6 Serat

Serat komposit merupakan material yang tersusun dari dua atau lebih komponen yang mempunyai sifat fisik dan kimia berbeda, namun jika digabungkan akan membentuk material baru dengan sifat yang lebih baik. Bahan ini umumnya terdiri dari serat sebagai bahan penguat dan matriks sebagai bahan pengikat. Berdasarkan komposisi serat yang digunakan sebagai bahan penguat komposit terdiri dari beberapa macam, sebagai contoh diantaranya serat karbon, serat kaca dan serat alami.

2.6.1 Serat Karbon

Serat karbon adalah jenis bahan non logam baru, yang memiliki karakteristik sangat kuat bahkan lebih kuat dari baja. Serat karbon sejenis dengan serat polikristalin dengan grafit yang tidak mengkristal dan tersusun di sepanjang aksial serat. Serat karbon menjadi salah satu bahan penguat komposit yang populer namun cukup mahal karena memiliki sifat yang sangat kuat. Berdasarkan sifat mekaniknya, serat karbon diklasifikasikan menjadi 4 kategori, yaitu tipe kekuatan tinggi (HT), tipe kekuatan ultra tinggi (UHT), tipe modulus tinggi (HM) dan tipe modulus ultra tinggi (UHM).

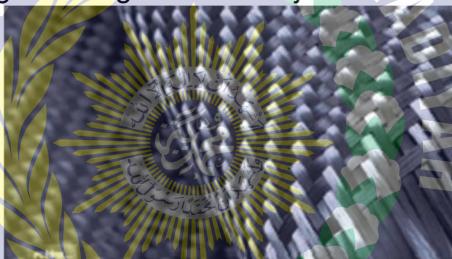
Tabel 2.9 Karakteristik kategori serat karbon.

(Sumber: Widodo & Iswanto, (2022))

Properti	UHM	HM	UHT	HT
Modulus young/gpa	>400	300-400	200-350	200-250
Tensile Strength	>1,70	>1,70	>2,76	2,0-2,75
Carbon content/%	99,8	99	96,25	94,5

Komposit karbon menggunakan serat karbon dalam

matriks karbon. Komposit ini digunakan pada lingkungan bersuhu tinggi mencapai 6.000°F atau setara dengan 3.315°C , 20 kali lebih kuat serta 30% lebih ringan dibandingkan dengan serat grafit. Penguatan matriks karbon memberikan keuntungan seperti kemampuan untuk menahan suhu tinggi, kemuluran rendah pada suhu tinggi, kepadatan rendah, kekuatan tarik dan tekan yang baik, ketahanan lelah yang tinggi, konduktivitas termal yang tinggi dan koefisien yang tinggi. Sedangkan untuk kelemahannya, yaitu biaya tinggi, kekuatan geser rendah dan kerentanan terhadap oksidasi pada suhu tinggi. Komposit karbon telah digunakan pada beberapa material dalam dunia penerbangan, seperti pada moncong hidung pesawat (*nose*) dan rem pesawat yang berasal dari komposit karbon memiliki ketahanan dua hingga empat kali lipat dibandingkan dengan bahan baja.



● Gambar 2.13 Serat Karbon
(Sumber: Widodo & Iswanto, (2022))

2.6.2 Serat Kaca

Serat kaca biasanya dibuat dari campuran cair pasir kuarsa, batu kapur, dolomit dan parafin, serta fraksi tertentu dari soda dan asam borat. Serat ini berupa lembaran benang dari kaca cair dan ditarik menjadi serat lembut dan tipis. Serat kaca ini kemudian digunakan sebagai bahan penguat komposit, dengan mencampurkan resin pada serat. Serat ini memiliki sifat penyerapan yang baik sehingga bisa menyatu dengan sempurna dengan matriks penguat, yang pada umumnya menggunakan matriks resin. Serat kaca yang kecil kemudian dipintal menjadi benang halus namun ulet, dan dapat dianyam

menjadi kain atau dimixer secara acak menjadi bentuk lembaran, seperti lembaran benang yang digabungkan menjadi satu membentuk lembaran baru (*chopped strand mat*) atau potongan kecil (*chopped strand*), dan bisa juga dalam bentuk benang memanjang (*woven roving*).



Gambar 2.14 (a) *Woven roving fiberglass* dan (b) *woven roving chopped strand mat*

(Sumber: Widodo & Iswanto, (2022))

Material serat kaca merupakan jenis bahan fiber komposit yang ringan dan memiliki keunggulan sifat yang kuat, memiliki stabilitas kimia yang baik, nilai ketahanan panas yang baik, insulasi listrik (*isolator*) dan regangan tarik rendah. Bahan serat kaca banyak dipakai luas dalam berbagai aplikasi industri teknologi tinggi hingga pada bahan perlengkapan rumah tangga, mulai dari pesawat, badan mobil baik interior maupun eksterior, badan perahu, perlengkapan kolam renang, atap, papan selancar, tong sampah dan lain sebagainya.

2.6.3 Serat Alami

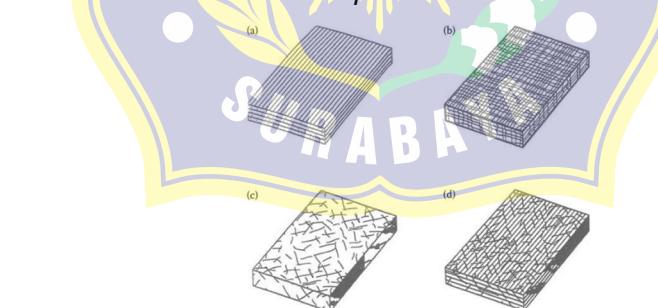
Serat alami berasal dari lignoselulosa, yang memiliki sifat sangat terpolarisasi gugus hidroksil. Serat ini menunjukkan sifat yang berlawan dengan termoplastik, yaitu hidrofobik yang tidak diinginkan dan membatasi potensi serat alami. Serat alami digunakan sebagai alternatif dari bahan-bahan sintetis yang berasal dari bahan bakar fosil dan terbatas. Serat ini memiliki sifat yang melekat, seperti biodegradabilitas, keterbaruan dan ketersediaannya yang melimpah jika dibandingkan dengan serat sintetis. Serat alami bisa banyak ditemukan di lingkungan

sekitar, seperti serat kapas, serat daun nanas, serat abaca (jenis pisang yang tidak dimanfaatkan buahnya), serat rosella, serat rami, serat bambu, dan lain sebagainya.

2.7 Orientasi Serat

Dalam proses pembuatan komposit terdapat banyak cara untuk menyusun serat, dimana orientasi serat dipilih berdasarkan jenis serat yang akan digunakan. Orientasi serat pada komposit dapat dibagi menjadi beberapa kelompok, diantaranya:

- a. *Continuous Fiber Composite*, merupakan jenis orientasi yang paling sering digunakan dalam menyusun serat. Tersusun dari serat lurus yang membentuk lamina di antara matriksnya.
- b. *Woven Fiber Composite*, merupakan jenis susunan serat yang mengikat antar lapisan.
- c. *Discontinuous Fiber Composite*, merupakan jenis yang mempunyai susunan serat yang pendek sehingga manufakturnya yang lebih mudah.
- d. *Composite Hybrid Fiber*, merupakan jenis susunan dengan perpaduan antara tipe *continuous fiber composite* dan *discontinuous fiber composite*.



Gambar 2.15 (a) *Continuous Fiber Composite*, (b) *Woven Fiber Composite*, (c) *Discontinuous Fiber Composite*, (d) *Hybrid Composite*.

(Sumber: Gibson, (2016))

2.8 Metode Pembuatan Komposit

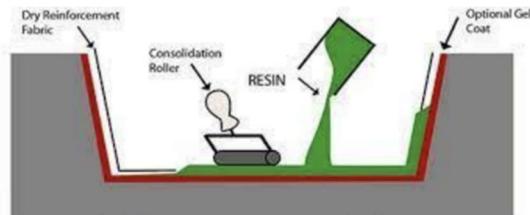
Proses pembuatan komposit sangat beraneka ragam dari yang paling sederhana sampai dengan yang paling kompleks. Ada berbagai macam proses yang dapat digunakan dalam pembuatan komposit, diantaranya *Hand Lay-Up*, *Spray-Up* dan *Vacuum Bagging* (Gautama et al., 2022).

2.8.1 *Hand Lay-Up*

Hand Lay-Up merupakan metode yang paling mudah dan murah namun lambat dan membutuhkan tenaga kerja yang berpengalaman dan mahir. Prosesnya dilakukan dengan tangan dan peralatan yang sederhana yakni *roller* dan kuas saja. Bahan yang digunakan serat kaca sebagai tulangan dan *polyester resin* sebagai matriksnya. Kebanyakan produk yang dihasilkan adalah badan *boat*, sampan, tangki air dan sebagainya (Widodo & Iswanto, 2022).

Proses *Hand Lay-Up* merupakan metode paling sederhana dalam proses fabrikasi komposit dengan sistem terbuka. Proses ini dilakukan dengan menuangkan resin secara manual ke dalam serat yang berbentuk anyaman, rajutan atau kain, lalu meratakannya dan memberikan tekanan menggunakan rol atau kuas. Langkah ini diulang hingga ketebalan yang diinginkan tercapai. Dalam metode ini, resin bersentuhan langsung dengan udara, dan proses pencetakan biasanya dilakukan pada suhu ruangan. Adapun kelebihan metode *hand lay-up* meliputi:

- a. Prosesnya mudah dilakukan.
- b. Cocok untuk pembuatan komponen berukuran besar.
- c. Efektif untuk produksi dengan volume rendah.



Gambar 2.16 Proses *Hand Lay-Up*
(Sumber: Widodo & Iswanto, (2022))

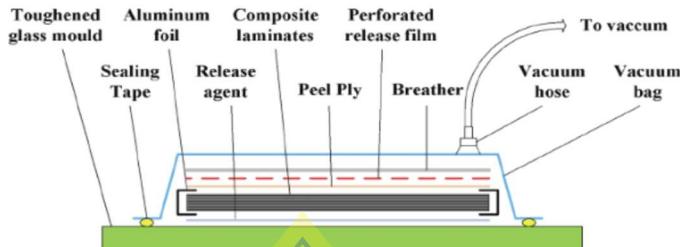
2.8.2 *Spray-Up*

Metode ini dilakukan secara serentak dengan serat yang tidak beraturan, biasanya serat kaca dan resin ke atas permukaan cetakan menggunakan alat penyemprot (*spray gun*) dengan tekanan yang sesuai. *Roller* juga dipergunakan untuk meratakan dan mengeluarkan udara yang terperangkap (Widodo & Iswanto, (2022)).

2.8.3 *Vacuum Bagging*

Vacuum bagging adalah suatu metode pembuatan komposit yang menggunakan tekanan vakum untuk mengompresi dan mengeliminasi udara dari susunan material komposit selama proses pengerasan. Teknik ini dilakukan dengan menempatkan tumpukan serat yang telah diresapi resin pada cetakan, kemudian menutupinya dengan lembaran plastik kedap udara (*vacuum bag*) yang disegel secara rapat. Udara di dalam sistem kemudian disedot menggunakan pompa vakum, sehingga tercipta tekanan seragam yang mendorong lapisan-lapisan material agar menyatu secara optimal.

Proses ini bertujuan untuk meningkatkan kualitas mekanis, kepadatan dan homogenitas dari produk komposit yang dihasilkan, sekaligus meminimalkan cacat seperti adanya gelembung udara atau distribusi resin yang tidak merata. *Vacuum bagging* sering digunakan dalam pembuatan struktur berbahan serat karbon, serat kaca dan bahan komposit lainnya di berbagai industri seperti dunia penerbangan, otomotif, kelautan maupun olahraga.



Gambar 2.17 *Vacuum Bagging*
 (Sumber: Ismail et al., (2019))

Proses pembuatan komposit secara konvensional dengan menggunakan metode *spray up* ataupun *hand lay-up* memang lebih mudah dilakukan, tetapi hasil dari metode tersebut cenderung berpotensi mengalami cacat seperti rongga dikarenakan udara yang terperangkap pada saat proses pembuatan komposit. Sedangkan pada metode *vacuum bagging* ini memiliki beberapa kelebihan, diantaranya dapat menghasilkan komposit yang berkualitas tinggi, memberikan tekanan atmosfer yang seragam pada bagian atas resin komposit basah pada saat masih proses pembuatan komposit di dalam kantung (*bag*). Tetapi metode ini juga memiliki beberapa kelemahan, salah satunya pada saat proses vakum. Ketika resin dituangkan pada bagian atas laminasi dan ditarik oleh *pump* (vakum) menggunakan selang menuju *vacuum trap*, apabila proses terlalu lama maka resin akan cepat mengeras sebelum mengalir menyeluruh ke dalam cetakan. Maka dari itu pada metode ini, durasi waktu perlakuan tahapan menjadi sangat penting.

2.9 Pengujian Material

Untuk mengetahui sifat material harus dilakukan pengujian atau evaluasi dengan tujuan untuk mendapatkan material yang sesuai dengan klasifikasinya. Pengujian pada material secara umum dapat dibagi menjadi 2 bagian, yaitu:

a. Pengujian merusak (*Destructive Test*)

Pengujian jenis ini bersifat merusak benda kerja, sehingga dalam pengujian ini diperlukan spesimen uji. Spesimen uji adalah duplikat dari benda kerja yang berasal dari bahan yang sama.

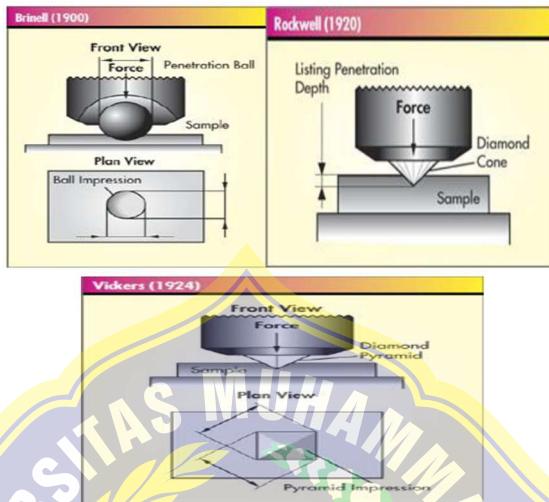
b. Pengujian tidak merusak (*Non Destructive Test*)

Pengujian ini tidak merusak benda kerja, jadi tidak dibutuhkan spesimen uji dan dapat diuji secara langsung pada benda kerja. Hal ini dilakukan dengan tujuan untuk melihat cacat permukaan maupun di bawah permukaan suatu benda kerja (Gibson, (2016)).

Pengujian merusak digunakan untuk mengetahui sifat mekanik dari material, dimana pengujianya dengan pemberian beban mekanik hingga spesimen mengalami perubahan bentuk atau deformasi plastis (merusak bentuk spesimen dari bentuk awal). Pada penelitian ini menggunakan dua macam pengujian pada jenis pengujian merusak (*destructive test*), yaitu uji kekerasan *Vickers* dan uji lentur (kelenturan).

2.9.1 Uji Kekerasan *Vickers*

Pengujian kekerasan adalah salah satu pengujian yang digunakan untuk dapat mengetahui sifat mekanik sebuah material yang tergolong pada jenis pengujian merusak. Kekerasan (*Hardness*) merupakan salah satu sifat mekanik dari suatu material. Pengujian jenis ini yang paling banyak dipakai adalah dengan menekankan penekan tertentu pada benda uji dengan beban tertentu dan dengan mengukur ukuran bekas penekanan yang terbentuk di atasnya. Dalam dunia teknik, umumnya terdapat 4 macam metode pengujian kekerasan, yaitu *Brinnel*, *Rockwell*, *Vickers* dan *Micro Hardness* (tetapi jenis ini sangat jarang digunakan dan jarang dikenal) (Gibson, (2016)).



Gambar 2.18 Metode pengujian kekerasan
(Sumber: Gibson, (2016))

Pada penelitian ini akan menggunakan metode pengujian kekerasan *hardness vickers*. Uji kekerasan *vickers* menggunakan penumbuk berbentuk piramida intan seperti pada gambar 2.10 yang dasarnya berbentuk bujur sangkar. Besarnya sudut antara permukaan piramida yang saling berhadapan adalah 136° . Karena bentuk penumbuknya piramida intan, maka pengujian ini sering dinamakan uji kekerasan piramida intan (ASTM International, (2017)). Angka kekerasan *vickers* yang disebut juga *Vickers Hardness Number* (VHN) didefinisikan sebagai beban dibagi dengan luas permukaan lekukan hasil penumbukan. Dengan persamaan sebagai berikut:

$$VHN = \frac{2P \sin\left(\frac{\phi}{2}\right)}{L^2} = \frac{1.854 P}{L^2} \quad (2.1)$$

Keterangan: P = Beban yang diterapkan (kgf)

L = Panjang diagonal rata-rata (mm)

ϕ = Sudut antara permukaan intan yang berlawanan = 136°

Adapun apabila diperlukan konversi nilai hasil uji kekerasan dapat menggunakan tabel konversi yang merujuk pada Tabel Konversi ASTM E140 di bawah ini:

Tabel 2.10 Tabel Konversi Nilai Uji Kekerasan

ASTM E 140

TABLE 1 Approximate Hardness Conversion Numbers for Non-Austenitic Steels (Rockwell C Hardness Range)^{a, b}

Rockwell C Hardness Number 150 kgf (HRC)	Vickers Hardness Number (HV)	Brinell Hardness Number ^c 10-mm Standard Ball, 3000-kgf (HBs)	Brinell Hardness Number ^c 10-mm Carbide Ball, 3000-kgf (HBW)	Knoop Hardness Number 500-kgf and Over (HK)	Rockwell Hardness Number A Scale, 60-kgf (HRA)	Rockwell Hardness Number D Scale, 100-kgf (HRD)	Rockwell Hardness Number 15-N Scale, 15-kgf (HR 15-N)	Rockwell Superficial Hardness Number 30-N Scale, 30-kgf (HR 30-N)	Scleroscope Hardness Number ^d 45-N Scale, 45-kgf (HR 45-N)	Rockwell C Hardness Number 150 kgf (HRC)		
68	940	...	...	920	85.6	76.9	93.2	84.4	75.4	97.3	68
67	900	...	...	895	85.0	76.1	92.9	83.6	74.2	95.0	67
66	865	...	...	870	84.5	75.4	92.5	82.8	73.3	92.7	66
65	832	...	(730)	846	83.9	74.5	92.3	81.9	72.0	90.6	65	
64	800	...	(722)	822	83.4	73.8	91.8	81.1	71.0	88.5	64	
63	772	...	(705)	799	82.8	73.0	91.4	80.1	69.9	86.5	63	
62	746	...	(688)	776	82.0	72.2	91.1	79.3	68.8	84.5	62	
61	720	...	(670)	754	81.8	71.5	90.7	78.4	67.7	82.6	61	
60	697	...	(654)	732	81.2	70.7	90.2	77.5	66.6	80.8	60	
59	674	...	634	710	80.7	69.9	89.8	76.6	65.5	79.0	59	
58	653	...	615	690	80.1	69.2	89.3	75.7	64.3	77.3	58	
57	633	...	595	670	79.6	68.5	88.9	74.8	63.2	75.6	57	
56	613	...	577	650	79.0	67.7	88.3	73.9	62.0	74.0	56	
55	595	...	560	630	78.5	66.9	87.9	73.0	60.9	72.4	55	
54	577	...	543	612	78.0	66.1	87.4	72.0	59.8	70.9	54	
53	560	...	525	594	77.4	65.4	86.9	71.2	58.6	69.4	53	
52	544	...	(500)	512	576	76.8	64.6	85.4	70.2	57.4	67.9	52
51	528	...	(487)	496	558	76.3	63.6	85.9	69.4	56.1	66.5	51
50	513	...	(475)	481	542	75.9	63.1	85.5	68.5	55.0	65.1	50
49	498	...	(454)	469	526	75.2	62.1	85.0	67.6	53.8	63.7	49
48	484	...	451	455	510	74.7	61.4	84.5	66.7	52.5	62.4	48
47	471	442	443	495	74.1	60.8	83.9	65.8	51.4	61.1	47	
46	458	432	432	490	73.6	60.0	83.5	64.8	50.3	59.8	46	
45	446	421	421	466	73.1	59.2	83.0	64.0	49.0	58.5	45	
44	434	409	409	452	72.5	58.5	82.5	63.1	47.8	57.3	44	
43	423	400	400	438	72.0	57.7	82.0	62.2	46.7	56.1	43	
42	412	390	390	426	71.5	56.9	81.5	61.3	45.5	54.9	42	
41	402	381	381	414	70.9	56.2	80.9	60.4	44.3	53.7	41	
40	392	371	371	402	70.4	55.4	80.4	59.5	43.1	52.6	40	
39	382	359	359	394	69.9	54.6	79.4	58.8	41.8	51.5	39	
38	372	353	353	380	69.3	53.8	79.4	57.7	40.8	50.4	38	
37	369	344	344	370	68.9	53.1	78.8	56.8	39.8	49.3	37	
36	354	336	336	360	68.4	52.3	78.3	55.9	38.4	48.2	36	
35	345	327	327	351	67.9	51.5	77.7	55.0	37.2	47.1	35	
34	338	319	319	342	67.4	50.8	77.2	54.2	36.1	46.1	34	
33	327	311	311	334	66.8	50.0	76.6	53.3	34.9	45.1	33	
32	318	301	301	326	66.3	49.2	76.1	52.1	33.7	44.1	32	
31	310	294	294	318	65.8	48.4	75.6	51.3	32.5	43.1	31	
30	302	286	286	311	65.3	47.7	75.0	50.4	31.3	42.2	30	
29	294	279	279	304	64.8	47.0	74.5	49.5	30.1	41.3	29	
28	286	271	271	297	64.3	46.1	73.9	48.6	28.9	40.4	28	
27	279	264	264	290	63.8	45.2	73.5	47.7	27.8	39.5	27	
26	272	256	256	284	63.3	44.6	72.6	46.8	26.7	38.7	26	
25	266	235	235	278	62.8	43.8	72.2	45.9	25.5	37.8	25	
24	260	237	237	272	62.3	43.1	71.6	45.0	24.3	37.0	24	
23	254	243	243	266	62.0	42.1	71.0	44.0	23.1	36.3	23	
22	248	237	237	261	61.5	41.6	70.5	43.2	22.0	35.6	22	
21	243	231	231	256	61.0	40.9	69.9	42.3	20.7	34.8	21	
20	238	226	226	251	60.5	40.1	69.4	41.5	19.6	34.2	20	

^a In the table headings, force refers to total test forces.

^b Approximate conversion equations converting determined hardness scale numbers to Rockwell C hardness numbers for non-austenitic steels. Refer to 1.11 before using conversion equations.

^c The Brinell hardness numbers in parentheses are outside the range recommended for Brinell hardness testing in 8.1 of Test Method E 10.

^d These Scleroscope hardness conversions are based on Vickers—Scleroscope hardness relationships developed from Vickers hardness data provided by the National Bureau of Standards for 13 steel reference blocks. Scleroscope hardness values obtained on these blocks by the Shore Instrument and Mfg. Co., Inc. the Roll Manufacturers Institute, and members of this institute, and also on hardness conversions previously published by the American Society for Metals and the Roll Manufacturers Institute.

Ataupun dapat juga menggunakan rumus manual yang biasa digunakan untuk mencari nilai konversi satuan kekerasan lainnya sebagai berikut:

Rumus HV → HRC

$$HRC = 0.0025 \times HV + 10 \quad (2.2)$$

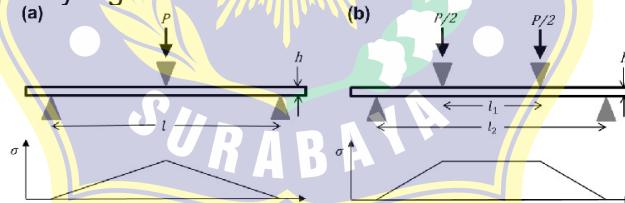
Rumus HV → HB

$$HB = 0.95 \times HV \quad (2.3)$$

2.9.2 Uji Kelenturan

Uji kelenturan merupakan salah satu pengujian mekanik suatu material dalam kategori *destructive test*. Pengujian ini digunakan untuk mengukur kelenturan (*flexural strength*) material komposit ketika diberikan suatu beban. Material komposit mempersyaratkan ketahanan salah satunya yaitu nilai kelenturan yang harus dapat memenuhi sebuah standar yang diperlukan.

Pengujian ini biasanya dilakukan dengan 2 jenis metode, yaitu metode *three-point bending* atau metode *four-point bending*. Dimana uji kelenturan akan memberikan pembebahan pada titik tengah suatu objek pengujian yang ditanam oleh dua penyangga pada sisi kiri dan kanan. Deformasi akan terjadi pada material yang diuji ketika terkena beban melebihi batas maksimal kemampuan suatu benda uji. Jenis dan pembebahan dapat menentukan kekuatan kelenturan yang diberikan.



Gambar 2.19 (a) *three-point bending* dan (b) *four-point bending*

(Sumber: Gautama et al., (2022))

Dalam pengukuran kelenturan sebuah benda uji dapat dihitung secara manual dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

Tegangan Kelenturan:

$$\sigma_b = \frac{3PL}{2bt^2} \quad (2.4)$$

Keterangan:

σ_b = Tegangan Kelenturan (MPa)

P = Beban (N)

L = Panjang jarak antara titik tumpuan: 96 mm

b = Lebar spesimen: 17 mm

t = Tebal spesimen (mm)

Modulus Elastisitas:

$$E_b = \frac{L^3 P}{4bt^3 \delta} \quad (2.5)$$

Keterangan:

E_b = Modulus elastisitas Kelenturan (MPa)

P = Beban (N)

L_0 = Panjang spesimen uji: 120 mm

b = Lebar spesimen: 17 mm

t = Tebal spesimen (mm)

δ = Defleksi (mm)



Gambar 2.20 Bentuk spesimen uji *Kelenturan* standar ASTM D790

(Sumber: ASTM International, (2017))