

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Analisa variasi fraksi volume *filler* terhadap sifat mekanik komposit laminat matriks *polyester* berpenguat serat sisal telah diteliti oleh Bahtiar dkk. (2014) dengan variasi fraksi volume *filler* yang digunakan adalah 40%, 50%, dan 60%. Proses pembuatan komposit dilakukan dengan metode *hand lay up*. Perbandingan volume yang digunakan pada penelitian ini yaitu variasi volume *filler* 40%, 50%, dan 60%. Pencampuran resin dan katalis pada wadah dan kemudian penuangan campuran resin dan katalis ke cetakan yang telah diberi serat, kemudian menunggu sampai komposit mengeras selama 24 jam. Hasil pengujian menunjukkan bahwa komposit dengan fraksi volume *filler* 50% memperoleh nilai kekuatan bending maksimum sebesar 3,72 MPa, kemudian pada variasi 40% diperoleh nilai maksimum sebesar 3,12 MPa, dan pada variasi 60% diperoleh nilai sebesar 2,92 MPa.

Surata dkk. (2016) melakukan penelitian tentang studi sifat mekanis komposit *epoxy* berpenguat serat sisal orientasi acak yang dicetak dengan teknik *hand-lay up*, dengan variasi fraksi volume serat sisal 15%, 20%, dan 25%. Serat hasil ekstraksi dipotong dengan ukuran panjang 3 cm, direndam dengan larutan alkali 5% NaOH selama 2 jam. Komposit dibuat dengan teknik *press hand lay up*, dengan variasi fraksi volume serat 15%, 20%, dan 25% yang disusun secara acak. Kekuatan lentur terendah diperoleh pada fraksi volume 15% yaitu sebesar 45,27 MPa sedangkan hasil kekuatan lentur maksimum diperoleh fraksi volume 25% yaitu sebesar 88,48 MPa.

Khanam dkk. (2010) melakukan penelitian tentang Serat sisal/karbon berpenguat komposit hibrid: tarik, lentur, dan ketahanan bahan kimia menggunakan matriks *polyester* dengan variasi sifat mekanik. Variasi rasio berat serat sisal/karbon adalah (100:0, 75:25, 50:50, 25:75, 0:100) dengan UT dan ST 18% NaOH. Alkalisasi serat sisal dalam larutan NaOH 18% selama 30 menit, kemudian serat dipotong dengan ukuran 2 cm. Kekuatan lentur tertinggi

diperoleh komposit dengan variasi rasio berat 0:100 sisal/karbon UT dan ST yang sama, yaitu 176,53 MPa sedangkan modulus lentur terendah diperoleh komposit dengan rasio berat 100:0 sisal/karbon, yaitu UT 3,79 Gpa dan ST 5,32 Gpa.

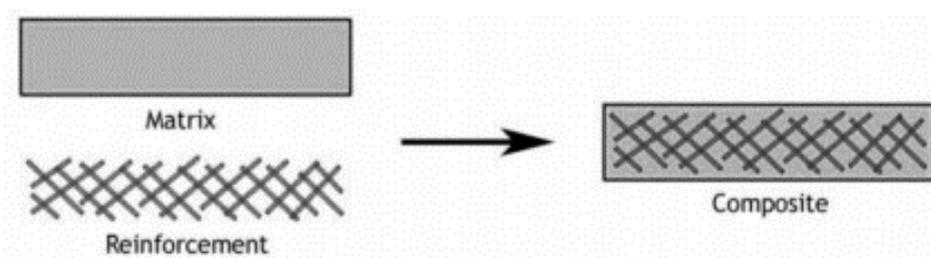
Investigasi sifat mekanik komposit PMMA diperkuat dengan berbagai bubuk alami yang diteliti oleh Salih dkk. (2018). Dalam penelitian ini, terdapat dua kelompok sampel komposit PMMA nano dibuat dengan menggunakan metode *hand lay-up*. Sampel-sampel ini terdiri dari poli metil metakrilat (PMMA) resin sebagai bahan matriks, diperkuat oleh dua bubuk alami berbeda yaitu bubuk kulit delima (PPP) dan bubuk biji kurma ajwa (SPDA) dengan rasio fraksi berat yang dipilih (0, 0,4, 0,8, 1,2 dan 1,6 wt%). Nilai tertinggi dari kekuatan lentur dan modulus lentur adalah 114 MPa dan 5,124 GPa masing-masing, untuk spesimen bio komposit diperkuat dengan bubuk kulit buah delima, sedangkan untuk spesimen bio komposit diperkuat dengan bubuk biji kurma Ajwa 105 Mpa dan 4,187 GPa.

Jie Xu dkk. (2009) melakukan penelitian tentang Fabrikasi dan sifat mekanik dari komposit berpenguat serat sisal yang digunakan untuk aplikasi gigi. Sembilan kelompok uji (5 spesimen untuk setiap kelompok) dengan variasi konsentrasi berat yaitu 2,5, 5,0, 7,5, 10,0%. Kemudian serat yang dipotong dimasukkan ke dalam oven pada suhu 115°C selama 2 jam. Serat sisal ditreatment dengan γ -Aminopropyltriethoxysilane yang dicampurkan kedalam larutan, yang berisi cairan silan dengan perbandingan massa 5% 7,8. Setelah 24 jam serat sisal diangkat dari larutan silane dan dicuci dengan aseton murni hingga bersih. Kemudian serat sisal masukan kedalam oven pada suhu 80° C selama 2 jam. Setelah dikeringkan serat sisal dipotong dengan panjang 2 mm. Hasil menunjukkan bahwa serat sisal bermatriks PMMA dengan ST pada konsentrasi serat 10% mendapat nilai kekuatan lentur tertinggi yaitu sekitar 55 Mpa dan modulus lentur terendah diperoleh serat sisal ST pada konsentrasi serat 2,5% yaitu sebesar 2,2 GPa.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Komposit

Komposit adalah suatu material baru hasil rekayasa yang terdiri dari sedikitnya dua bahan dengan sifat fisik maupun kimia pada skala makroskopik yang berbeda, masing-masing sebagai pengikat (*matriks*) dan penguat (*filler*). Pembuatan komposit bertujuan untuk memperoleh sifat mekanis atau sifat spesifik tertentu, mempermudah *design* yang sulit pada manufaktur, dan menghemat biaya. Dengan adanya perbedaan dari bahan penyusunnya, maka perlu penambahan *wetting agent* supaya antar bahan tersebut dapat berikatan kuat. (Nayiroh, 2010). Penyusunan *matriks* dan *filler* pada pembuatan komposit dapat dilihat pada Gambar 2.1



Gambar 2. 1 Penyusunan Komposit (Onny, 2017)

2.2.2 Faktor-faktor yang Memengaruhi Kualitas Komposit

1. Faktor Serat

Serat mempunyai pengaruh sangat besar bagi komposit karena menjadi penopang kekuatan dari suatu komposit. Beberapa faktor yang memengaruhi kekuatan pada serat yaitu panjang serat, orientasi serat, dan jenis serat.

2. Faktor Matriks

Jenis matriks sangat memengaruhi kualitas suatu komposit, karena memiliki fungsi utama mentransfer tegangan ke serat dan membentuk ikatan koheren permukaan dengan serat.

3. Faktor Ikatan

Faktor ikatan antara matriks dengan *filler* sangat menentukan kualitas suatu komposit. Adanya *void* pada komposit menyebabkan ikatan antar muka kurang baik sehingga sifat mekanis menurun.

2.2.3 Klasifikasi Material Komposit

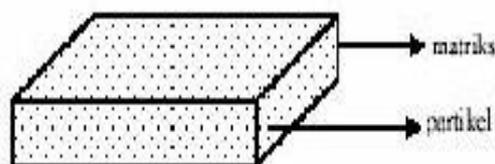
Menurut Nayiroh (2010) komposit berdasarkan bahan matriksnya dibagi menjadi 3 yaitu:

1. Komposit Matriks Keramik/*Ceramic Matrix Composite* (CMC)
CMC merupakan komposit yang menggunakan bahan keramik sebagai matriksnya. Komposit jenis ini bersifat keras.
2. Komposit Matriks Logam/*Metal Matrix Composite* (MMC)
MMC merupakan komposit yang menggunakan bahan logam sebagai matriksnya. Komposit jenis ini bersifat kuat.
3. Komposit Matriks Polimer/*Polymer Matrix Composite* (PMC)
PMC merupakan komposit yang menggunakan bahan polimer sebagai matriksnya. Komposit jenis ini bersifat kuat.

Menurut Gibson (2012) komposit berdasarkan material penyusunnya diklasifikasikan menjadi tiga jenis yaitu komposit partikel (*particulates composites*), komposit lamina (*laminates composites*), dan komposit serat (*fibrous composites*).

1. Komposit Partikel (*Particulates Composite*)

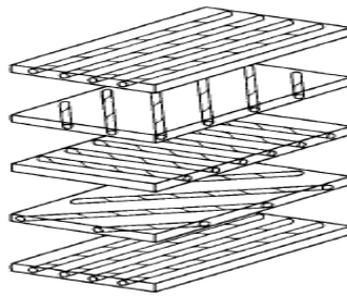
Komposit partikel tersusun dari satu atau lebih jenis partikel yang terikat dengan matriks. Partikel bisa berasal dari bahan logam atau non logam. Komposit partikel bisa dilihat pada Gambar 2.2



Gambar 2. 2 Komposit Partikel (Jones, 1999)

2. Komposit Lamina (*Laminate Composite*)

Komposit lamina adalah komposit yang penyusunan antara matriks dengan bahan pengisinya tersusun secara berlapis-lapis. Pada komposit jenis ini matriks berbentuk lembaran laminat.. Komposit lamina dapat dilihat pada Gambar 2.3



Gambar 2. 3 Komposit Lamina (Jones, 1999)

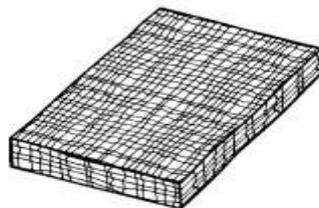
3. Komposit Serat (*Fibrous Composite*)

Komposit serat adalah komposit yang tersusun dari serat sebagai penguat dan terikat dengan matriks. Penguat komposit jenis ini bisa berasal dari serat alam maupun serat sintetis.

Berdasarkan orientasi seratnya, komposit serat diklasifikasikan menjadi empat yaitu komposit serat anyam (*woven fiber composite*), komposit serat panjang kontinyu (*continuous fiber composite*), komposit serat gabungan (*hybrid composite*), dan serat pendek acak (*discontinuous fiber composite*).

a. Komposit Serat Anyam (*Woven Fiber Composite*)

Komposit serat anyam merupakan komposit yang tersusun dari serat yang sudah dianyam. Komposit jenis ini dapat kita lihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2. 4 Komposit Serat Anyam (Gibson, 2012)

b. Komposit Serat Panjang Kontinyu (*Continuous Fiber Composite*)

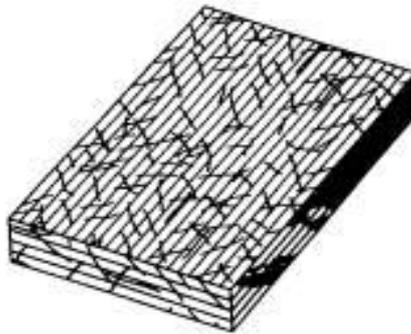
Komposit serat Panjang kontinyu tersusun dari serat yang berukuran panjang dan disusun secara teratur, seperti terlihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2. 5 Komposit Serat Panjang Kontinyu (Gibson, 2012)

c. Komposit Serat Gabungan (*Hybrid Composite*)

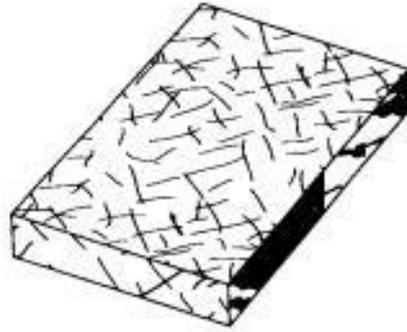
Komposit *hybrid* tersusun dari dua atau lebih jenis serat untuk meningkatkan sifat mekanis komposit dan menutupi kekurangan sifat kedua serat tersebut. Komposit jenis ini dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2. 6 Komposit Serat Gabungan (Gibson, 2012)

d. Komposit Serat Pendek Acak (*Discontinuous Fiber Composite*)

Komposit serat pendek acak tersusun dari serat berukuran pendek dan tersebar secara acak, seperti yang terlihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2. 7 Komposit Serat Pendek Acak (Gibson, 2012)

2.2.4 Matriks

Matriks adalah fasa dengan fraksi volume terbesar (dominan) pada komposit. Fungsi matriks ialah mentransfer tegangan ke serat, melindungi serat, membentuk ikatan koheren permukaan dengan serat, dan stabil setelah proses manufaktur. Matriks bisa dari bahan polimer, logam ataupun keramik. Matriks yang sering digunakan dalam pembuatan komposit untuk produk komersil, industri, dan transportasi adalah polimer. Ada dua jenis bahan polimer yang digunakan pada material komposit yaitu termoplastik dan termoset (Gibson, 2012).

1. Termoplastik

Termoplastik merupakan polimer yang dapat dilunakkan berulang kali dengan menggunakan panas, dan akan mengeras ketika didinginkan. Termoplastik memiliki sifat *reversible* yaitu dapat kembali pada sifat aslinya (Nayiroh, 2010). Contoh polimer termoplastik adalah *polyvinylchlorida* (PVC), *polypropylene* (PP), *polyethylene* (PE), dan lain-lain.

2. Termoset

Termoset berbeda dengan termoplastik, polimer ini tidak dapat didaur ulang karena molekul-molekulnya telah membentuk ikatan silang (*cross linking*). Termoset bersifat *irreversible*, apabila telah dikeraskan tidak dapat dilunakkan kembali. Contoh polimer termoset

adalah *polyester*, *epoxy*, *vinylester*, dan lain-lain. Pada tabel 2.1 disajikan sifat mekanis polimer jenis termoset.

Tabel 2. 1 Sifat Mekanis Polimer Termoset (Holbery, 2006)

Properties	Polyester Resin	Vinylester Resin	Epoxy
Densitas (g/cc)	1.2 - 1.5	1.2 – 1.4	1.1 – 1.4
Modulus Elastisitas (GPa)	2 - 4.5	3.1 – 3.8	3 – 6
Kekuatan Tarik (MPa)	40 – 90	69 – 83	35 – 100
Properties	Polyester Resin	Vinylester Resin	Epoxy
Kekuatan Tekan (MPa)	90 – 250	100	100 – 200
Elongasi (%)	2	4 – 7	1 – 6
Penyusutan (%)	4 – 8		1 – 2
Water Absorbtion (24 h @ 20°C)	0.1 – 0.3	0.1	0.1 – 0.4
Impak Izod (J/cm)	0.15 – 3.2	2.5	0.3

a. *Epoxy*

Epoxy merupakan suatu jenis polimer termoset bermassa jenis 1,2 gr/cm³ dengan sifat adhesi yang baik, memiliki sifat mekanis tinggi, dan mudah dalam pembentukannya (Faruk dkk, 2012). Aplikasi dari *epoxy* resin sangat luas sebagai perekat dan pelapis. *Epoxy* memiliki sifat tahan korosi yang cukup tinggi dengan stabilitas termal dan isolator listrik yang baik. *Epoxy* merupakan kopolimer yang terbentuk dari dua bahan kimia yaitu resin dan *hardener*. Meskipun cenderung getas, *epoxy* dapat dicampur dengan bahan lain untuk mendapatkan sifat mekanis yang diinginkan. *Epoxy* merupakan resin dengan sifat *viscous* atau kental, sehingga perlu penambahan aseton untuk menjadikannya lebih cair agar mempermudah penyerapan pada serat (Sudarisman, 2019).

b. *Polyester*

Polyester juga termasuk dalam polimer termoset, resin ini banyak digunakan pada aplikasi konstruksi ringan dan harga relatif murah. *Polyester* memiliki karakteristik transparan, dapat diwarnai, tahan air, tahan cuaca dan bahan kimia. Kelebihan resin ini ialah mudah dikombinasikan dengan berbagai serat, kestabilan dimensional, dan dapat digunakan pada berbagai bentuk penguatan plastik. Penggunaan *polyester* pada umumnya perlu penambahan katalis untuk mempercepat pembentukannya, namun demikian resin ini memiliki viskositas yang rendah sehingga mudah dalam pencampuran saat pembuatan komposit.

- *Polyester 157 BQTN*

Polyester 157 BQTN secara umum diaplikasikan pada pembuatan kapal, sehingga resin ini sering disebut resin kapal. *Polyester 157* cocok untuk proses manufaktur dengan metode *hand lay up* dan *spray up molding*. Berikut adalah spesifikasi resin *polyester 157 BQTN*.

Tabel 2. 2 Spesifikasi Polyester 157 BQTN (PT. Justus Kimia Raya, 1996)

Item	Nilai	Catatan
Massa jenis	1,23 gr/cm	0-90°C
Kekerasan	40 Hv	Barcol/GYZJ 934-1
Suhu distorsi panas	70°C	
Penyerapan air	0,1888 %	24 jam
Suhu ruang	0,466 %	
Kekuatan <i>flexural</i>	9,4 Kgf/mm	
Modulus <i>Fleksural</i>	300 Kgf/mm	
Daya rentang	5,5 Kgf/mm	
Modulus rentang	300 Kgf/mm	
Elongasi	1,6 %	
Kekuatan tarik	65 MPa	

c. *Polymethyl Methacrylate (PMMA)*

Tabel 2. 3 Tabel Properties PMMA (Salih dkk., 2018)

Properti	nilai (max atau min)
Waktu kelarutan	max. 4 min
pengaturan waktu	max. 7 menit.
Brinell hardness	min. 120 Mpa.
lentur	min. 65,5 Mpa.
serap	max. 32 mg / mm ₃
Kelarutan	max. 8 mg / mm ₃
Resistensi terhadap dampak	min. 0,40 J / cm ₂

Polimetil metakrilat (PMMA) adalah jenis polimer yang berasal dari monomer metil metakrilat. Metil metakrilat merupakan monomer yang bersifat non-biodegradable. Proses pembentukan metil metakrilat menjadi PMMA, yang kini dikenal dengan polimerisasi, pertama kali ditemukan pada tahun 1877 oleh dua orang ahli kimia Jerman yaitu Fittig dan Paul. PMMA juga memiliki nama lain yaitu poli metil 2-metilpropenoat (nama IUPAC). Selain itu, nama dagang dari polimer ini dapat berupa Lucite, Perspex, Oroglas, Goldglas, Altuglas, atau Plexiglas. Polimer ini bersifat amorf dan merupakan material termoplastik yang bersifat keras, kaku, dan rapuh pada suhu ruang. Selain itu, PMMA juga merupakan material yang bersifat biocompatible karena aplikasinya yang luas namun non-biodegradable karena berasal dari monomer dengan sifat yang seperti itu. PMMA bersifat sedikit hidrofobik tetapi akan menjadi lebih hidrofilik setelah bereaksi dengan air. Hal ini diketahui dari berkurangnya sudut kontak dan histeresisnya. PMMA yang termasuk ke dalam golongan poliakrilat

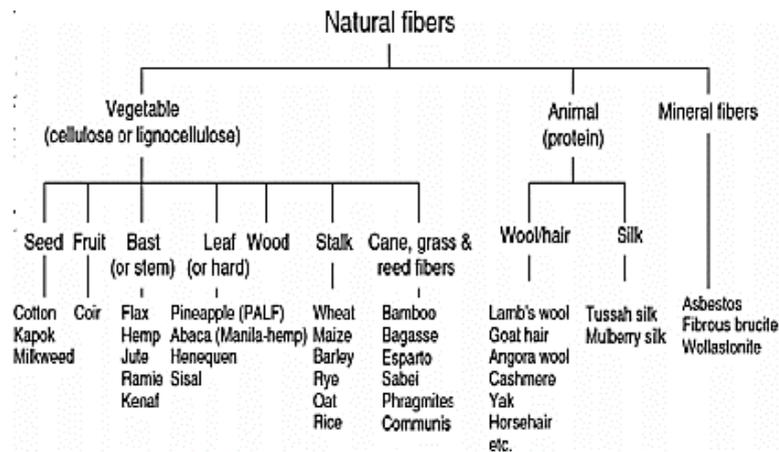
seringkali digunakan sebagai alternatif terhadap Polikarbonat (PC) karena karakteristiknya yang mudah dalam proses penanganan serta biaya yang relatif rendah. PMMA lebih transparan dan sedikit rapuh dibandingkan material gelas lainnya dan lebih mudah untuk diubah ke berbagai bentuk. Oleh karenanya PMMA merupakan material serbaguna yang dapat digunakan dalam berbagai aplikasi. PMMA digunakan dalam bidang industri dan kesehatan. PMMA dapat digunakan sebagai material matriks atau fase minor untuk meningkatkan karakteristik dari matriks biodegradable. Sebagai contoh yaitu dalam industri otomotif, monitor, filing listrik, lensa, bahan pelapis pada pesawat terbang, dan inkubator bayi. Dalam bidang kesehatan, yaitu dalam pembuatan sendi buatan, prostesis gigi, implan, lensa kontak, dan perekat tulang baik yang dengan obat maupun tidak. (Annusavice dkk. 2013).

2.2.5 Filler (Pengisi/Penguat)

Menurut Jones (1999) *filler* adalah bahan pengisi yang digunakan pada pembuatan komposit, *filler* bisa berupa serat atau serbuk. *Filler* berfungsi sebagai penguat, penanggung beban utama pada komposit, sehingga penggunaan *filler* yang tepat mampu meningkatkan sifat mekanis komposit. Serat yang digunakan pada pembuatan komposit adalah serat alam dan serat sintetis, sedangkan serbuk yang digunakan adalah serbuk logam dan non logam.

1. Serat Alam

Serat alam merupakan serat yang diperoleh langsung dari alam. Secara umum serat alam dibagi menjadi 3 yaitu serat hewan, tumbuhan, dan mineral. Serat tumbuhan dapat diperoleh dari berbagai tanaman seperti kenaf, pisang, sisal, rami, dan lain-lain. Klasifikasi serat alam dapat dilihat pada Gambar 2.8



Gambar 2. 8 Klasifikasi Serat Alam (Akil, 2011)

Penggunaan serat alam pada material komposit sudah banyak dilakukan, karena serat alam mudah diperoleh dan memiliki sifat mekanis yang cukup baik. Serat alam juga lebih ekonomis daripada serat sintesis. Pada Tabel 2.4 disajikan berbagai sifat mekanis serat.

Tabel 2. 4 Sifat Mekanis Serat (Akil, 2011)

Serat	Densitas (g/cm ³)	Diameter (μm)	Tensile Strength (MPa)	Modulus Young (GPa)	Elongation at break (%)
Flax	1.5	40-600	345-1500	27.6	2.7-3.2
Hemp	1.47	25-500	690	70	1.6
Jute	1.3-1.49	25-200	393-800	13-26.5	1.16-1.5
Kenaf	0.2-1.2	25-200	930	53	1.6
Rami	1.55	25-200	400-938	38	1.2-3.8
Sisal	1.45	50-200	468-700	9.4-22	3-7
Abaca	1.5	150-500	430-760	3.2	1.6
Kapas	1.5-1.6	12-38	121-220	5.5-12.6	7-8
Eglass	2.55	<17	3400	73	2.5
Kevlar	1.44		3000	60	2.5-3.7
Carbon	1.78	5-7	3400-4800	240-425	1.4-1.8

1. Serat Sisal

Sisal adalah tanaman perdu dengan daun-daun yang menjulang berbentuk pedang dengan panjang 1.5 sampai 2 meter dan mendapat nama itu karena dipercaya berasal dari wilayah Sisal, Yucatan di Meksiko Tenggara. Dari daunnya yang panjang ini diambil seratnya dengan proses dekortikasi, kemudian dijemur, disisir dan diikat. Serat ini akan dirangkai menjadi tali tambang yang terkenal karena keuletannya, keawetannya, keelastisannya, kemampuan menyerap warna dan tidak hancur karena air asin. Dengan berkembangnya *polypropylene* (bahan plastik), fungsi serat sisal sebagai *twine* (tali pengikat) sudah sebagian digantikan oleh tambang plastik. Namun karena sifatnya yang ramah lingkungan (*biodegradable*) maka serat sisal masih banyak dipakai dalam industri kertas, karpet, bahkan sebagai penguat pada bahan composite industri otomotif. Negara Brazilia diketahui sebagai penghasil sisal terbesar di dunia dengan menyuplai sebanyak 113 ribu ton serat sisal setahunnya.

2. Serat Karbon

Perlakuan serat karbon ada 2 tipe, yaitu:

- a. Oksidatif, menghasilkan kelompok fungsional asam seperti *carbocyclic*, *phenolic*, dan *hydrocyclic* pada permukaan serat karbon. Menggunakan oksigen atau yang mengandung gas dengan melalui fase oksidasi yang dipanaskan sampai temperatur 250 °C.
- b. Non oksidatif, yaitu serat dilapisi dengan polimer organik yang memiliki kemampuan bereaksi dengan matriks resin.

Serat karbon didefinisikan serat yang mengandung sedikitnya 90% karbon melalui proses pirolisis tertentu (Hedge, 2004). Komposisi terbesar dalam serat ini dinamakan *precursor* (bahan baku) yang digunakan untuk memproduksi serat karbon dengan berbagai bentuk dan karakteristik yang berbeda. Serat karbon dapat dibedakan berdasarkan *precursor* yang digunakan yaitu pitch, PAN (*poly acrylonitrile*), dan serat selulosa. Sifat-sifat *fiber carbon* adalah sebagai berikut:

- a. Densitas karbon cukup ringan yaitu sekitar 2,3 g/cc

- b. Struktur grafit yang digunakan untuk membuat *fiber* berbentuk seperti kristal intan.
- c. Mempunyai karakteristik yang ringan, kekuatan yang sangat tinggi.

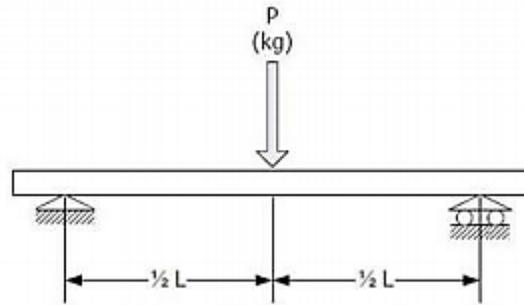
2.2.5 Pengujian Bending

Pengujian bending merupakan pengujian sifat mekanis komposit, digunakan pada konstruksi atau komponen yang menerima beban lentur maupun fabrikasi pelengkungan. Pelengkungan (bending) merupakan pembebanan satu titik ditengah-tengah dari bahan yang ditahan pada tumpuan. Pengujian lengkung beban bertujuan untuk mengetahui berbagai aspek yaitu:

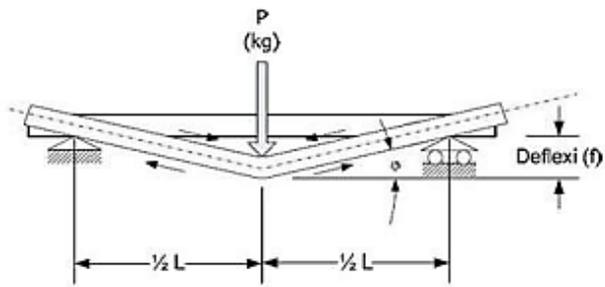
1. Kekuatan dan tegangan bending (σ)
2. Defleksi sudut yang terbentuk oleh lenturan (δ)
3. Elastisitas (E)

Pengujian bending dapat dilakukan dengan 2 metode yaitu *Three Point Bending* dan *Four Point Bending* menurut kondisi dari spesimen uji. Untuk benda uji dengan kerataan kurang sempurna dilakukan metode *Three Point Bending*.

Metode *Three Point Bending* yaitu metode dengan pembebanan satu titik pada specimen tepat pada bagian tengah ($1/2 L$). Pada metode ini material harus tepat berada di titik tengah agar mendapatkan momen maksimum kekuatan dan tegangan bending (σ). Pengujian bending material bermatriks polimer menggunakan ASTM D790, dengan panjang span 80 mm. Berikut ilustrasi pengujian bending menggunakan metode *Three Point Bending* seperti pada Gambar 2.9



Gambar 2. 9 Pembebanan Lengkung *Three Point Bending*



Gambar 2. 10 Pengaruh Pembebanan Lengkung Menyebabkan Defleksi

Penambahan beban secara terus menerus akan menyebabkan deformasi elastis menuju plastis dan akhirnya mengalami kerusakan. Gambar 2.10 menunjukkan adanya defleksi yaitu sudut yang terbentuk oleh lenturan. Setelah dilakukan uji bending, untuk mendapatkan kekuatan bending dilakuakn perhitungan sebagai berikut :

$$\sigma_b = \frac{3PL}{(2bd^2)} \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana :

- σ_b = Kekuatan bending (MPa)
- P = Beban (N)
- L = Panjang span (mm)
- b = Lebar batang uji (mm)
- d = Tebal batang uji (mm)

$$\sigma_b = \frac{3PL}{(2bd^2)} \left[1 + 6 \left(\frac{D}{L} \right)^2 - 4 \left(\frac{d}{L} \right) \left(\frac{D}{L} \right) \right] \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana

- σ_b = Kekuatan bending (MPa)
- P = Gaya pembebanan (N)
- L = Jarak antar tumpuan/span (mm)
- b = Lebar specimen (mm)
- d = Tebal specimen (mm)
- D = Defleksi maksimum (mm)

Persamaan 2.1 digunakan apabila perbandingan $L/d \leq 16$ dimana L adalah *support span* dan d adalah tebal spesimen. Pada persamaan 2.2 digunakan jika nilai perbandingan $L/d > 16$. Untuk mendapatkan nilai regangan bending digunakan persamaan berikut :

$$\epsilon_b = \frac{6Dd}{L^2} \dots\dots\dots(2.3)$$

Dimana

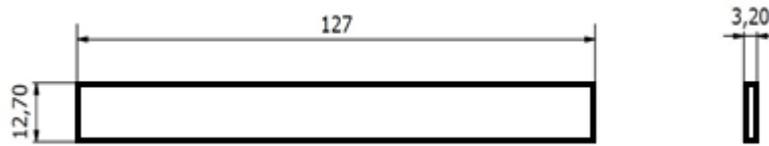
- ϵ_b = regangan (mm/mm)
- D = defleksi maksimum (mm)
- L = panjang span (mm)
- d = tebal (mm)

Untuk mendapatkan nilai modulus elastisitas, menggunakan persamaan berikut:

$$E_B = \frac{L^3 m}{4bd^3} \dots\dots\dots(2.4)$$

- E_B = modulus elastisitas bending (MPa)
- L = Panjang span (mm)
- b = lebar specimen (mm)
- d = tebal specimen (mm)
- m = slope tangent pada kurva beban defleksi (N/mm)

Gambar 2.11 berikut adalah ukuran spesimen pengujian bending dengan ASTM D790-02 yang digunakan pada penelitian ini.



Gambar 2. 11 Ukuran Spesimen Pengujian Bending ASTM D790

2.2.6 Pengujian *Water Absorption*

Pengujian *water absorption* bertujuan untuk mengetahui kemampuan komposit dalam menyerap air. Pengujian ini sangat penting untuk mengetahui difusi antar molekul air ke dalam permukaan matriks. Data yang diambil adalah berat dan tebal spesimen sebelum dan setelah perendaman dalam air. Ukuran spesimen pengujian *water absorption* mengacu ASTM D570-98 dengan dimensi (76,2 mm x 25,4 mm x 3,2 mm). Untuk menghitung pertambahan berat (*weight gain*) dan tebal (*thickness swelling*) pada pengujian *water absorption*, dapat menggunakan persamaan 2.5 dan persamaan 2.6 sebagai berikut:

$$WG = \frac{B_2 - B_1}{B_1} \times 100 \% \dots\dots\dots(2.5)$$

- Dimana
- WG = Penambahan berat (*weight gain*) (%)
 - B₁ = Berat sebelum perendaman (gram)
 - B₂ = Berat setelah perendaman (gram)

$$TS = \frac{T_2 - T_1}{T_1} \times 100 \% \dots\dots\dots(2.6)$$

- Dimana
- TS = Penambahan tebal (*Thickness Swelling*) (%)
 - T₁ = Tebal sebelum perendaman (mm)
 - T₂ = Tebal setelah perendaman (mm)

2.2.7 Pengujian Makro dengan Mikroskop Optik

Mikroskop optik merupakan suatu alat bantu yang digunakan untuk mengamati objek berukuran sangat kecil dengan memperbesar bayangan objek. Bayangan objek dapat diperbesar 5 kali, 10 kali, hingga 100 kali.

Mikroskop optik dapat dilihat pada Gambar 2.12 dan spesifikasinya pada Tabel 2.5



Gambar 2. 12 Mikroskop Optik

Tabel 2. 5 Spesifikasi Mikroskop Optik

Warna	Hitam
Resolusi Gambar/Video	640*480 pixels
Kontroler	16Bit DSP
Pembesaran	50x-1600x (manual)
Format Foto	JPEG
Format Video	AVI
Lampu LED	8
Penghubung	USB 2.0
Penerima system	WIN XP/VISTA, WIN 7 32/64-bit
Ukuran Microscope	3.2*11.4 (cm) (diameter*panjang)