

## BAB II

### LANDASAN TEORI

#### 2.1. Tinjauan Pustaka

Nugroho, (2008) meneliti kekuatan *bending* dan impak komposit serat rami susun acak dengan matriks *polyester* BQTN 157 tanpa perlakuan alkali, pembuatan komposit dilakukan dengan metode *press mold*. Dari hasil pengujian *bending* didapatkan nilai tegangan *bending* rata-rata tertinggi dimiliki oleh komposit dengan  $V_f$  50% pada tebal 5 mm sebesar 95,33 MPa dan terendah pada komposit dengan  $V_f$  20% pada tebal 4 mm sebesar 44,52 MPa, modulus elastisitas *bending* rata-rata tertinggi dimiliki oleh komposit dengan  $V_f$  40% pada tebal 1 mm sebesar 5462,93 MPa dan terendah pada komposit dengan  $V_f$  20% pada tebal 4 mm sebesar 2486,87 Mpa. Untuk harga impak rata-rata tertinggi dimiliki oleh komposit dengan  $V_f$  20% pada tebal 1 mm sebesar 0,119 J/mm<sup>2</sup> dan terendah pada komposit dengan  $V_f$  40% pada tebal 5 mm sebesar 0,024 J/mm<sup>2</sup>.

Nurkholis, (2008) meneliti kekuatan tarik dan impak komposit berpenguat serat rami dengan perlakuan alkali (NaOH) selama 2, 4, 6 dan 8 jam dengan fraksi volume serat 10% bermatriks *polyester* BQTN 157, pembuatan komposit dilakukan dengan pencetakan metode *hand lay up* menggunakan kaca sebagai cetaknya dan perlakuan *post cure* 60° selama 4 jam. Diperoleh kekuatan tarik tertinggi dimiliki oleh komposit serat rami dengan perlakuan alkali 8 jam, yaitu sebesar 41,9 MPa dengan modulus elastisitas 2743,15 MPa pada perlakuan alkali 2 jam. Harga impak tertinggi didapat pada perlakuan alkali 4 jam yaitu sebesar 0,0725 J/mm<sup>2</sup>.

Junaedi, (2008) menguji kekuatan tarik dan impak komposit berpenguat serat rami dengan variasi panjang serat 25 mm, 50 mm dan 100 mm dengan fraksi volume 90% matriks *polyester* BQTN 157 dan 10% serat rami, pembuatan komposit dengan cara *press mold*. Diperoleh kekuatan tarik tertinggi pada komposit serat rami dengan panjang serat 100 mm yaitu 52,483 MPa dengan modulus elastisitas 5577,213 MPa. Harga impak tertinggi diperoleh pada komposit serat rami dengan panjang serat 50 mm yaitu 0,087 J/mm<sup>2</sup>.

Sari, (2011) dalam penelitiannya mengkaji ketahanan *bending* komposit *hybrid* serat batang kelapa/serat gelas dengan matrik *urea formaldehyde*. Pembuatan komposit dilakukan dengan cara *hand lay up* dimana panjang serat batang kelapa/serat gelas 2 cm, dengan arah serat random. Pengujian yang dilakukan adalah pengujian *bending* dan dilakukan tiga kali pengulangan. Penelitian ini menggunakan *hybrid* serat batang kelapa/serat gelas dengan variasi fraksi volume serat batang kelapa/serat gelas 10:20, 15:15, 20:10 (%). Spesimen pengujian *bending* sesuai dengan standar ASTM D 790. Dari hasil penelitian menunjukkan bahwa kekuatan *bending* tertinggi komposit *hybrid* serat batang kelapa/serat gelas pada fraksi volume serat batang kelapa/serat gelas 10:20 % yaitu 22,7 N/mm<sup>2</sup>, kemudian berturut-turut 15:15 % dan 20:10 % yaitu 19,6 N/mm<sup>2</sup> dan 17,37 N/mm<sup>2</sup>.

Munandar, dkk (2013) melakukan penelitian tentang kekuatan tarik serat ijuk dengan diameter 0,25-0,35 mm, 0,36-0,45 mm, dan 0,46-0,55 mm yang direndam larutan alkali (NaOH) 5% selama 2 jam, kemudian dioven selama 15 menit dengan suhu 80<sup>0</sup>C. Setelah itu dilakukan pengujian tarik dengan standar ASTM D 3379-75. Dari penelitian tersebut didapatkan bahwa semakin kecil diameter serat maka kekuatan tariknya semakin tinggi. Kekuatan tarik terbesar pada kelompok serat ijuk berdiameter kecil (0,25-0,35) mm sebesar 208,22 MPa, regangan sebesar 0,192 %, dan modulus elastisitas 5,37 GPa. Sedangkan kuat tarik kelompok ijuk berdiameter besar (0,46-0,55) mm sebesar 198,15 MPa, regangan 0,37%, dan modulus elastisitas 2,84 GPa. Hal ini dikarenakan rongga pada serat diameter 0,46-0,55 mm lebih besar dibandingkan serat berdiameter 0,25-0,35 mm.

Purkuncoro, (2014) mengkaji pemanfaatan komposit *hybrid* serat bulu ayam (*chicken feather*) dan serat ijuk sebagai panel pintu rumah terhadap sifat mekanik dan sifat termal komposit *hybrid* bermatriks *polyester*. Hasilnya larutan NaOH sebesar 2% memberikan pengaruh kenaikan kekuatan tarik sebesar 138,71 MPa dan setelah diproses menjadi komposit *hybrid* dengan serat limbah bulu ayam memberikan pengaruh ke sifat mekanik impak dan tarik serta dapat menyerap panas. Besar kekuatan impak 0,161 J/mm<sup>2</sup> dan energi impak 19,53 Joule. Kekuatan tarik 72,304 kg/mm<sup>2</sup> dan bisa menyerap panas sehingga siap untuk dijadikan bahan *hybrid* komposit untuk produk-produk panel pintu.

## 2.2. Teori Komposit

### 2.2.1. Pengertian Komposit

Kata komposit berasal dari kata kerja dan kata sifat, yaitu “*to compose*” yang berarti menyusun atau menggabung dan “*composite*” yang berarti susunan atau gabungan. Jadi, pengertian komposit adalah gabungan dari dua atau lebih bahan matriks dan bahan penguat yang memiliki karakteristik yang berbeda dengan bahan-bahan pembentuknya dan secara makroskopis dicampur dengan tetap memiliki batas fasa yang jelas dan teridentifikasi (Chawla, 1987). Jones (1975), komposit adalah suatu material campuran atau kombinasi dari dua atau lebih bahan pada skala makroskopis untuk membentuk material ketiga yang lebih bermanfaat.

Pada umumnya komposit dibentuk dari dua jenis material yang berbeda yaitu:

1. Matriks, umumnya lebih *ductile* tetapi mempunyai kekuatan yang lebih rendah.
2. Penguat (*reinforcement*), umumnya berbentuk serat yang mempunyai sifat kurang *ductile* tetapi lebih kuat.

Komposit juga dapat dibagi menjadi tiga pengertian dasar (Urquhart, 1991), beberapa definisi komposit adalah sebagai berikut:

1. Tingkat dasar: pada molekul tunggal dan kisi kristal, bila material yang disusun dari dua atom atau lebih disebut komposit (contoh senyawa, paduan, polimer dan keramik)
2. Mikrostruktur: pada kristal, fase dan senyawa, bila material disusun dari dua fase atau senyawa atau lebih disebut komposit (contoh paduan Fe dan C)
3. Makrostruktur: material yang disusun dari campuran dua atau lebih penyusun makro yang berbeda dalam bentuk dan/atau komposisi dan tidak larut satu dengan yang lain disebut material komposit.

### 2.2.2. Klasifikasi Material Komposit

Material komposit diklasifikasikan menjadi empat kelompok menurut bentuk struktur dari penyusunnya (Jones, 1975) yaitu:

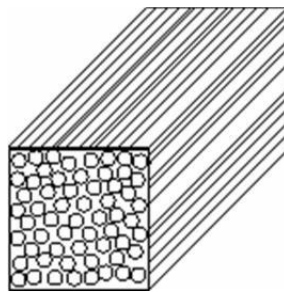
## 1. Komposit Serat (*Fibre Composites*)

Komposit serat adalah jenis komposit yang menggunakan serat sebagai bahan penguatnya. Komposit serat merupakan jenis komposit yang paling banyak digunakan karena komposit serat lebih kuat daripada komposit partikel. Komposit serat terdiri dari serat sebagai bahan penguat dan matriks sebagai bahan pengikat, pengisi volume dan pelindung serat yang berfungsi untuk mendistribusikan beban atau gaya kepada serat (Schwartz, 1984). Serat dapat menentukan karakteristik suatu komposit seperti kekuatan, keuletan, kekakuan dan sifat mekanik lainnya (Jones, 1975).

Komposit serat dapat dibagi berdasarkan penempatannya, yaitu:

### a) *Continuous Fibre Composites*

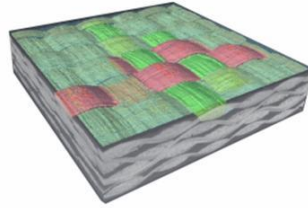
Komposit tipe ini mempunyai susunan serat panjang dan lurus, membentuk lamina diantara matriksnya. Komposit jenis ini paling banyak digunakan. Tipe ini mempunyai kelemahan pemisah antar lapisan. Contoh *continuous fibre composites* dapat dilihat pada Gambar 2.1. di bawah ini



**Gambar 2.1.** *Continuous fibre composites* (Gibson, 1994)

### b) *Woven Fibre Composites (bi-directional)*

Komposit jenis ini tidak mudah dipengaruhi pemisahan antar lapisan karena susunan seratnya mengikat antar lapisan. Susunan serat memanjang yang tidak begitu lurus mengakibatkan kekuatan dan kekakuan melemah. Contoh *woven fibre composites* seperti pada Gambar 2.2. di bawah ini.

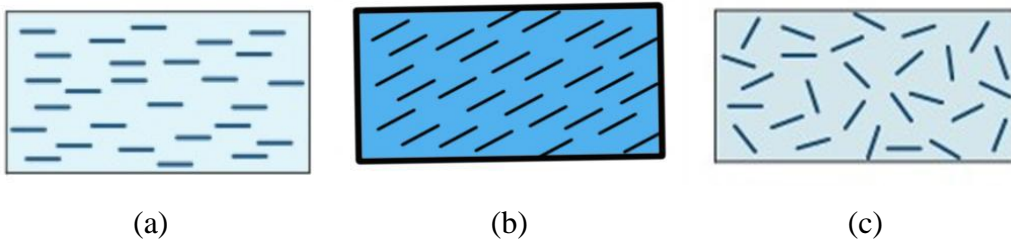


**Gambar 2.2.** *Woven fibre composites* (Gibson, 1994)

c) *Discontinuous Fibre Composites*

*Discontinuous Fibre Composites* adalah tipe komposit dengan serat pendek.

Tipe komposit ini dibedakan menjadi tiga seperti terlihat pada Gambar 2.3.



**Gambar 2.3.** Tipe komposit serat pendek (Gibson, 1994) (a). *Aligned discontinuous fibre* (b) *Off-axis aligned discontinuous fibre* (c) *Random oriented discontinuous fibre*

d) *Hybrid fibre composites*

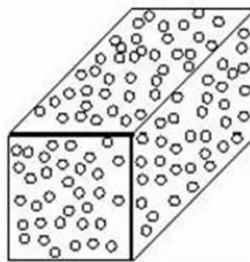
*Hybrid fibre composites* merupakan komposit gabungan antara tipe serat lurus dengan tipe serat acak. *Hybrid fibre composites* digunakan supaya dapat menggantikan kekurangan sifat dari kedua tipe dan dapat menggabungkan kelebihan keduanya. Contoh *hybrid fibre composites* seperti pada Gambar 2.4. di bawah ini.



**Gambar 2.4.** *Hybrid fibre composites* (Gibson, 1994)

## 2. Komposit Partikel (*Particulate Composites*)

Komposit partikel adalah komposit yang terdiri dari partikel dan matriks yaitu butiran (batu, pasir) dengan diperkuat oleh semen. Komposit partikel dihasilkan dengan menempatkan partikel-partikel dan mengikatnya dengan matriks bersama-sama dengan satu atau lebih unsur-unsur dengan perlakuan seperti katalisator, tekanan, panas, dan kelembaban. Komposit partikel bersifat isotropis karena berbeda jenis dengan serat acak, tetapi rata-rata berdimensi sama. Komposit partikel pada umumnya lebih lemah dibanding bahan komposit serat, akan tetapi mempunyai keunggulan seperti ketahanan terhadap aus, tidak mudah retak, dan mempunyai daya pengikat yang baik dengan matriks. Contoh komposit partikel dapat dilihat pada Gambar 2.5. di bawah ini.

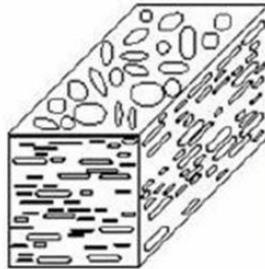


**Gambar 2.5.** Komposit partikel (Schwartz, 1984)

## 3. Komposit Serpih (*Flake Composites*)

Komposit serpih adalah komposit yang terdiri dari serpihan-serpihan yang ditambahkan ke dalam matriks untuk saling menahan dengan mengikat permukaan. Serpihan yang digunakan biasanya adalah serpihan mika, *glass*, dan metal (Schwartz). Sifat khusus dari serpihan adalah bentuknya yang besar dan datar

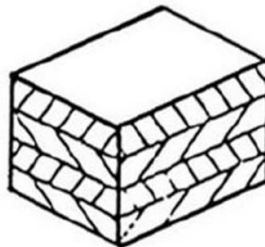
sehingga dapat disusun dengan rapat untuk menghasilkan bahan penguat yang kuat untuk luas penampang tertentu. Contoh komposit serpih seperti terlihat pada Gambar 2.6. di bawah ini.



**Gambar 2.6.** Komposit serpih (Schwartz, 1984)

#### 4. Komposit Laminat (*Laminate Composites*)

Komposit laminat merupakan jenis komposit yang tersusun atas dua atau lebih lapisan/lamina yang digabung menjadi satu dan memiliki karakteristik khusus disetiap lapisannya. Komposit laminat terdiri dari empat jenis, yaitu komposit serat anyam, komposit serat *hybrid*, komposit serat acak, dan komposit serat kontinu. Contoh komposit laminat dapat dilihat pada Gambar 2.7. di bawah ini.



**Gambar 2.7.** Komposit laminat (Schwartz, 1984)

#### 2.2.3. Aspek Geometri

Sifat-sifat mekanik suatu bahan komposit tergantung pada aspek geometri dan jenis seratnya. Oleh karena itu, penempatan serat juga harus mempertimbangkan aspek arah, distribusi serat, dan fraksi volume serat, sehingga material komposit yang dihasilkan memiliki kekuatan yang tinggi.

Untuk meningkatkan kekuatan *Fibre-Matriks Composites*, ada beberapa faktor yang harus diperhatikan dalam penggabungan antara matriks dan serat, diantaranya:

## 1. Letak Serat

Kekuatan mekanik suatu bahan material komposit ditentukan oleh letak dan arah serat. Oleh karena itu, dalam proses pembuatan material komposit letak dan arah serat dalam matriks dapat mempengaruhi kekuatan mekanik material komposit tersebut. Letak dan arah serat dapat diklasifikasikan menjadi tiga, yaitu:

- a. *One dimensional reinforcement*, mempunyai kekuatan dan modulus maksimum pada arah *axis* serat.
- b. *Two dimensional reinforcement* (planar), mempunyai kekuatan pada dua arah atau masing-masing arah orientasi serat.
- c. *Three dimensional reinforcement*, mempunyai sifat *isotropic* sehingga kekuatannya lebih tinggi dibanding dengan dua tipe sebelumnya.

## 2. Panjang Serat

Dalam pembuatan bahan komposit serat panjang serat sangat berpengaruh terhadap kekuatan mekanik komposit. Ada dua penggunaan serat dalam campuran komposit yaitu serat pendek dan serat panjang. Penggunaan serat dalam material komposit berpengaruh pada kekuatan maupun modulus elastisitas komposit karena mempunyai panjang dan diameter yang tidak seragam pada setiap jenisnya.

Faktor yang mempengaruhi panjang serat adalah *critical length* (panjang kritis). Panjang kritis (*critical length*) adalah panjang minimum serat pada suatu diameter serat yang dibutuhkan untuk mencapai tegangan patah yang tinggi (Schwartz, 1984).

## 3. Faktor Matriks

Matriks yang digunakan sangat berpengaruh dalam sifat mekanik komposit. Tergantung dari jenis matriks yang digunakan dan tujuan dalam penggunaan matriks tersebut.

## 4. Katalis

Katalis berfungsi untuk membantu proses pengeringan (*curing*) pada bahan matriks suatu komposit. Penggunaan katalis yang berlebihan akan semakin



mempercepat proses laju pengeringan, tetapi akan menyebabkan bahan komposit yang dihasilkan semakin getas.

## 2.3. Serat

### 2.3.1. Macam-Macam Serat

Secara umum serat terdiri dari dua jenis, yaitu serat alam dan serat sintetis. Serat alam adalah serat yang dapat langsung diperoleh dari alam. Biasanya berupa serat yang dapat langsung diperoleh dari tumbuh-tumbuhan dan binatang. Serat ini telah banyak digunakan oleh manusia diantaranya adalah kapas, wol, sutera, pelepah pisang, sabut kelapa, ijuk, bambu, nanas, dan kenaf.

Serat sintetis adalah serat yang dibuat dari bahan-bahan anorganik dengan komposisi kimia tertentu. Serat sintetis mempunyai beberapa kelebihan yaitu sifat dan ukurannya yang relatif seragam, kekuatan serat dapat diupayakan sama sepanjang serat. Serat sintetis yang telah banyak digunakan antara lain serat gelas, serat karbon, kevlar, nylon, dan lain-lain, (Schwartz, 1984).

Serat berperan sebagai penyangga kekuatan dari struktur komposit, beban yang awalnya diterima oleh matriks kemudian diteruskan ke serat. Oleh karena itu, serat harus mempunyai kekuatan tarik dan elastisitas yang lebih tinggi daripada matriks.

Schwartz, (1984) menjelaskan bahwa serat sebagai penguat dalam struktur komposit serat harus memenuhi persyaratan sebagai berikut, yaitu:

- a. Modulus elastisitas yang tinggi
- b. Kekuatan patah yang tinggi
- c. Kekuatan yang seragam di antara serat
- d. Stabil selama penanganan proses produksi
- e. Diameter serat yang seragam.

Macam-macam jenis serat diantaranya adalah sebagai berikut:

#### a. Serat *asbestos*

Serat ini dibagi menjadi dua, yaitu: (a). *Chrysotile asbestos* (serat asbestos putih) mempunyai rumus kimia  $3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  dan merupakan mineral yang tersedia cukup banyak di alam. Serat ini mempunyai diameter minimum 0,001

meter. Ditinjau dari segi kekuatannya cukup baik, tetapi serat ini jarang digunakan di pasaran umum sehingga menjadikan kurang banyak digunakan sebagai bahan tambahannya. (b). *Chrysotile asbestos* mempunyai rumus kimia  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $3\text{FeO}$ ,  $8\text{SiO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ . Serat ini mempunyai kuat tarik yang cukup tinggi sekitar 3500 MPa dan cukup banyak di Kanada, Afrika Selatan dan Rusia. Hambatan jarang dipakainya serat ini adalah sulit didapatkan di setiap negara sehingga harganya relatif mahal, disamping itu beberapa tahun belakangan ini banyak pendapat tentang bahaya serat ini terhadap kesehatan manusia, serat ini dianggap sebagai salah satu penyebab penyakit kanker (*karsiogenik*).

b. Serat kaca

Serat ini mempunyai kuat tarik yang cukup tinggi, sehingga penambahan serat kaca pada beton akan meningkatkan kuat lentur beton. Tetapi permukaan kaca yang licin mengakibatkan daya lekat terhadap bahan ikatnya menjadi lemah dan serat ini kurang tahan terhadap alkali semen sehingga dalam jangka waktu lama serat akan rusak. Serat ini banyak digunakan sebagai bahan penguat komposit. Fungsi utama dari serat ini adalah sebagai penopang kekuatan dari komposit, sehingga tinggi rendahnya kekuatan komposit sangat bergantung dari serat yang digunakan, karena tegangan yang dikenakan pada komposit mulanya diterima oleh matriks dan diteruskan ke serat, sehingga serat akan menambah beban sampai beban maksimum. Oleh karena itu, serat haruslah mempunyai tegangan tarik dan modulus elastisitas yang tinggi dari pada matriks penyusun komposit. Aplikasi dari serat gelas yang terkenal misalnya otomotif dan bodi kapal, pipa plastik, kotak penyimpanan, dan industri dasar.

c. Serat baja (*Steel fiber*)

Serat baja mempunyai banyak kelebihan diantaranya: mempunyai kuat tarik dan modulus elastisitas yang cukup tinggi, tidak mengalami perubahan bentuk akibat pengaruh sifat alkali semen. Penambahan serat baja pada beton akan menaikkan kuat tarik, kuat lentur dan kuat impak. Sedangkan kelemahan serat baja adalah apabila serat baja tidak terlindungi dalam beton akan mudah terjadi karat (korosi), adanya kecenderungan serat baja tidak menyebar secara merata dalam adukan dan serat baja hasil produksi pabrik harganya cukup mahal.

d. Serat karbon

Serat karbon mempunyai beberapa kelebihan yaitu tahan terhadap lingkungan agresif, stabil pada suhu yang tinggi, tahan terhadap abrasif, relatif kaku dan lebih tahan lama. Tetapi penyebaran serat karbon dalam adukan beton sulit dibandingkan dengan serat jenis lain.

e. Serat *polypropylene*

Serat *polypropylene* dalam kehidupan sehari-hari dikenal sebagai tali raffia. Serat *polypropylene* mempunyai sifat tahan terhadap serangan kimia, permukaannya tidak basah sehingga mencegah terjadinya penggumpalan serat selama pengadukan. Serat *polypropylene* mempunyai titik leleh 165°C dan mampu digunakan pada suhu lebih dari 100°C untuk jangka waktu yang pendek.

f. Serat *polyethylene*

Serat *polyethylene* dalam kehidupan sehari-hari dikenal sebagai tali tambang plastik. Serat *polyethylene* ini hampir sama dengan serat *polypropylene* hanya bentuknya berupa serat tunggal.

g. Serat alami

Serat alami yang telah dikaji penggunaannya sebagai serat penguat material komposit antara lain kenaf, flax, rami atau henep, selulosa, ijuk, serat daun aren dan pelepah kurma, bambu, sabut kelapa, pandan dan serat pohon pisang. Kualitas serat alami pada umumnya sangat tergantung pada umur pohon bakalannya, tempat menanam dan waktu memanen, prosedur ekstraksinya dan perlakuan yang diberikan. Serat-serat tersebut pada umumnya diperoleh dengan cara pelarutan lignin atau bahan pengikat serat dengan cara merendam dalam air selama beberapa hari atau dengan menggunakan bahan alkali (pada umumnya larutan sampai dengan 15% NaOH pada 160 °C – 180 °C selama 45 menit sampai dengan kurang dari satu jam), sehingga tersisa seratnya. Serat tersebut kemudian disisir dan dicuci sehingga relatif bersih dari unsur bukan serat. Serat basah yang telah bersih tersebut kemudian dikeringkan dengan cara dijemur atau dioven pada suhu sampai dengan 60 °C selama beberapa jam. perlu dicatat bahwa suhu oven tidak boleh terlalu tinggi agar tidak merusak

struktur dan kualitas seratnya. Tabel 2.1. menunjukkan kadar air dan massa jenis serat alam pada cuaca normal. Sedangkan Tabel 2.2. menunjukkan sifat mekanis dari beberapa serat alam.

Serat alam memiliki kelebihan diantaranya:

1. Bahan baku yang terbarukan.
2. Massa jenisnya rendah.
3. Tidak sensitif terhadap retakan.
4. Tidak abrasif.
5. Limbahnya mudah terurai di alam.

Sedangkan kekurangan yang dimiliki serat alam diantaranya:

1. Ukuran serat yang tidak seragam.
2. Sifat mekanisnya relatif rendah dibandingkan serat sintetis.
3. Tidak tahan terhadap suhu tinggi.
4. Laju penyerapan air yang relatif tinggi.
5. Meskipun dari satu jenis, namun sifat yang dimiliki sangat bervariasi.

**Tabel 2.1.** Kadar air dan massa jenis serat alam pada cuaca normal (Rao, 2007)

<b>Jenis Serat Alam</b>	<b>Kadar Air (%)</b>	<b>Massa Jenis (kg/m<sup>3</sup>)</b>
Pelepah Aren	12,09	810
Daun Kurma	10,67	990
Pelepah Kurma	9,55	960
Bambu (Sisi Luar)	9,16	910
Bambu (Sisi Dalam)	10,14	890
Ijuk	12,8	1030
Sabut Kelapa	11,36	1150
Batang Pisang	10,71	1350
Sisal	9,76	1450

**Tabel 2.2.** Sifat mekanis beberapa jenis serat alam (Rao, 2007)

Jenis serat alami	$\varepsilon$ (%)	$\sigma$ (MPa)	$E$ (GPa)	$\sigma'$ (MPa/(kg·m <sup>3</sup> ))	$E'$ (GPa/(kg·m <sup>3</sup> ))
Pelepah aren	3,46	549	15,85	0,6678	19,56
Daun kurma	2,73	309	11,32	0,3121	11,44
Pelepah kurma	24,00	459	1,91	0,4781	1,99
Bambu (bagian luar)	1,40	503	35,91	0,5527	39,47
Bambu (bagian dalam)	1,73	341	19,61	0,3831	22,10
Ijuk	13,71	377	2,75	0,3660	2,67
Sabut kelapa	20,00	500	2,50	0,4348	2,17
Batang pisang	3,36	600	17,85	0,4444	13,22
Sisal	5,45	567	10,40	0,3910	7,17

### 2.3.2. Serat Ijuk

Serat ijuk adalah serat yang berasal dari pohon aren yang memiliki banyak keistimewaan, diantaranya tahan lama dan tidak mudah terurai, tahan terhadap asam dan garam air laut. Keunggulan lain yang dimiliki serat ijuk yaitu serat ijuk lebih ramah lingkungan karena mampu terurai secara alami dan harganya lebih murah bila dibandingkan dengan serat sintetis. Tabel 2.3. menunjukkan sifat mekanik serat ijuk.

**Table 2.3.** Sifat mekanik serat ijuk (Munandar, 2013)

No	Diameter	Sifat Mekanik		
		Stress (MPa)	Strain (%)	Modulus elastisitas (GPa)
1	0,25-0,35	208,22	0,192	4,72
2	0,36-0,45	198,15	0,277	3,56
3	0,46-0,55	173,43	0,37	2,84

Aplikasi serat ijuk masih dilakukan secara tradisional, seperti digunakan sebagai saringan air, sebagai bahan tali temali, penahan getaran rumah adat karo, dan sebagai pembungkus pangkal kayu bangunan yang ditanam di dalam tanah sebagai pencegahan terhadap serangan rayap. Kegunaan tersebut digunakan karena serat ijuk yang memiliki sifat yang elastis, tahan air, dan sulit dirusak oleh organisme perusak.

Kualitas serat alam pada umumnya sangat tergantung pada umur pohon bakalannya, tempat menanam dan waktu memanennya, serta prosedur pemisahan serat dengan unsur bukan serat dan perlakuan yang diberikan pada serat. Pada umumnya perlakuan yang diberikan pada serat dilakukan dengan cara pelarutan lignin atau bahan pengikat serat dengan cara merendam dalam air selama beberapa hari atau dengan menggunakan larutan NaOH. Untuk mendapatkan kekuatan mekanis yang optimal serat harus benar-benar kering. Pengeringan serat dapat dilakukan dengan cara dijemur atau dioven selama beberapa jam pada suhu sampai dengan 60°C. Serat ijuk dapat dilihat pada Gambar 2.8. di bawah ini.



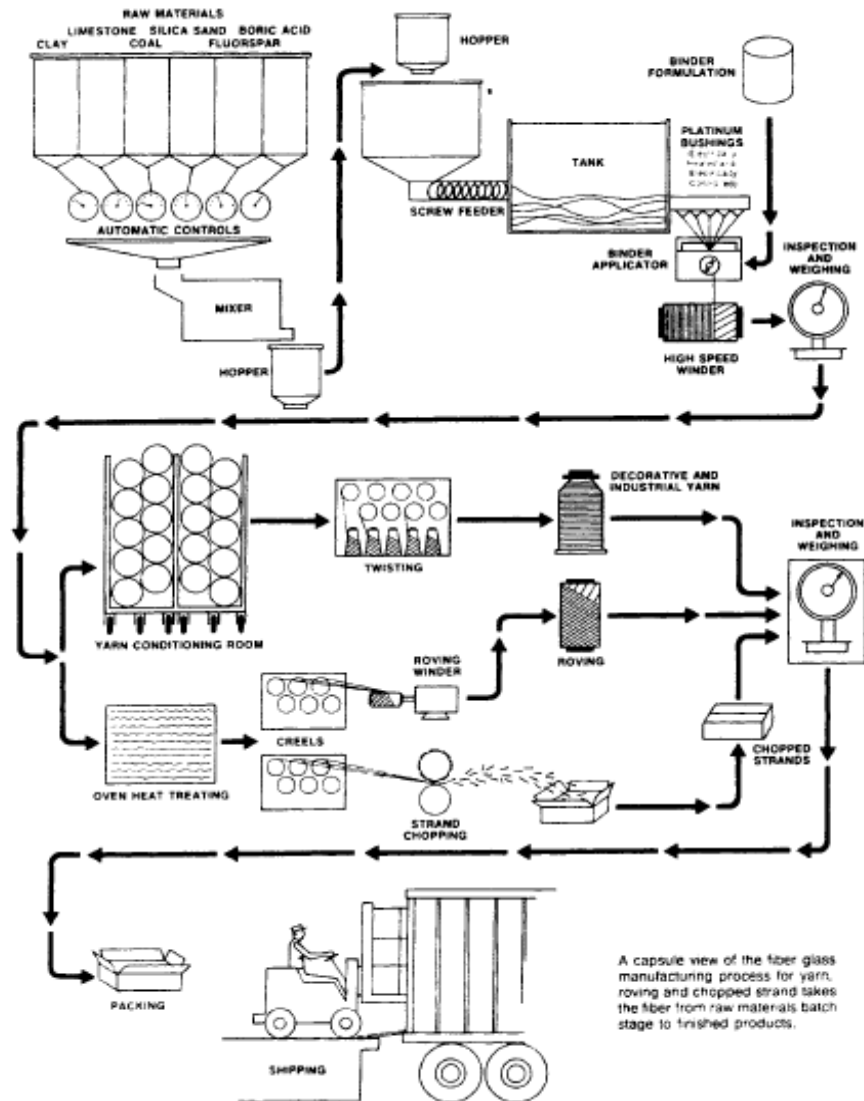
**Gambar 2.8.** Serat ijuk

### **2.3.3. Serat Gelas (*Glassfibre*)**

Serat gelas paling banyak digunakan karena harganya yang murah serta ketersediaannya dan kegunaannya, juga karena kekuatannya yang hanya sedikit di bawah serat karbon. Tabel 2.4. menunjukkan bahwa harga serat karbon 10x lebih mahal dibanding serat kaca-E, sedangkan kuat tarik serat karbon hanya sedikit lebih tinggi daripada serat kaca-E.

**Tabel 2.4.** Harga dan sifat serat kaca-E dan serat karbon bermodulus standar (Calliester, 2007)

Jenis serat kontinyu	Properties			
	Harga (US\$/kg)	Massa jenis (g/cm <sup>3</sup> )	Kuat tarik (MPa)	Modulus elastis (GPa)
Kaca-E	1,90 – 3,30	2,54	3450	73
Karbon	31,50 – 41,50	1,78	3800 - 4200	230

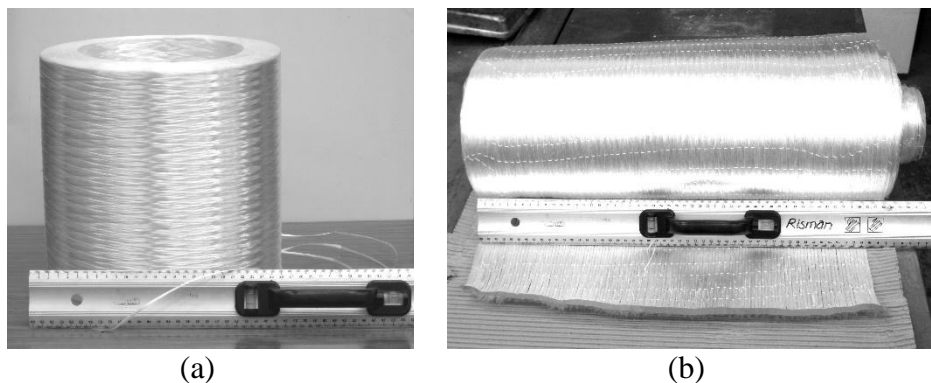


**Gambar 2.9.** Direct-melt glassfiber manufacturing process (Vaughan, 1998)

Proses produksi serat kaca ditunjukkan pada Gambar 2.9., bahan dasar (batu kapur, silica, pasir, asam boric, tanah liat, batu bara dan *flourospar*) → dicairkan → dilewatkan lubang-lubang kecil di dasar mangkok platina → filament kaca → *diquench* dengan dilewatkan semprotan kecil air → disalut dengan *binder* pelindung → dikumpulkan membentuk *bundle* (biasa disebut *tow* atau *strand*) → digulung pada suatu *spool* (Gambar 2.10. (a)).

Fungsi tambahan binder adalah:

1. Menyatukan filamen dalam *tow* untuk kemudahan pemrosesan
2. Melumasi permukaan filament untuk mengurangi abrasi yang mungkin terjadi akibat kontak dengan peralatan selama pembuatan komposit
3. Merupakan *anti-septic* untuk melunakkan dan memudahkan pemotongan
4. Menyediakan penghubung kimiawi untuk meningkatkan rekatan permukaan dengan matriks.



**Gambar 2.10.** (a) Gulungan serat kaca E2350-11 dari Owens Corning Asia-Pacific dengan berat bersih 17 kg, (b) Kaca-S2 *mat* unidireksional (Vaughan, 1998)

Jenis serat kaca berdasarkan komposisi kimianya, yang selanjutnya menentukan karakteristik dan penggunaannya:

1. Serat kaca-A: kandungan alkali tinggi → ketahanan kimiawi tinggi
2. Serat kaca-C: terbuat dari soda borosilikat → ketahanan kimiawinya sangat istimewa



3. Serat kaca-E: terbuat dari bahan berbasis Al borosilikat → resistansi elektrik yang baik. Tabel 2.5. menunjukkan sifat mekanis dari serat kaca-E.
4. Serat kaca-S (S- dan S2): unsur utama berupa Al silikat dan Mg → jauh lebih kuat dibanding serat kaca-E.

Struktur dan karakteristik kaca:

1. Kaca merupakan material *amorfous*. *Polihedron* yang masing-masing terdiri atas atom oksigen yang secara kovalent terikat dengan Si membentuk jejaring 3D yang panjang struktur kaca.
2. Struktur jejaring 3D → hampir *isotropic*, sangat kuat untuk tarik, ketangguhan retak tinggi, tidak sensitif terhadap lingkungan kimiawi, lembab, dan suhu relatif tinggi (Tabel 2.6.) dan pada umumnya murah.

**Table 2.5.** Sifat mekanis serat kaca-E (Barthelot, 1999)

Sifat mekanis	Satuan	Nilai
Densitas	gr/cm <sup>3</sup>	2,53 s.d 2,60
Modulus elastisitas	GPa	73
Kekuatan tarik	MPa	3450
Elongation	%	4,8

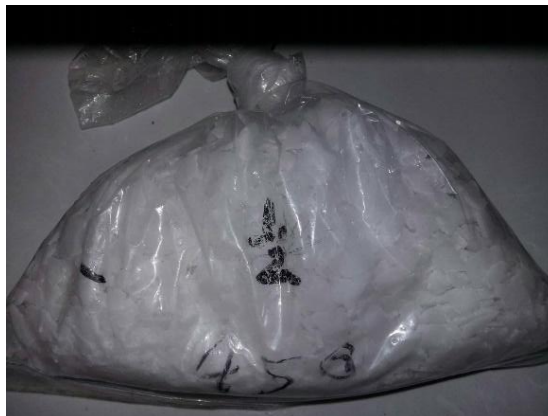
**Tabel 2.6.** Sifat-sifat serat kaca-E dan kaca-S (Callister, 2007)

Sifat	Kaca-E	Kaca-S
Masa jenis (g/cm <sup>3</sup> )	2,54	2,48
Koefisien muai termal linier (x10 <sup>6</sup> °C)	4,7	5,6
Kuat tarik pada 22 °C (MPa)	3450	4585
Modulus tarik pada 22 °C (GPa)	72,4	85,5
Perpanjangan luluh (%)	4,8	5,7

#### 2.4. Alkali (NaOH)

NaOH merupakan larutan basa yang tergolong mudah larut dalam air dan termasuk basa kuat yang dapat terionisasi dengan sempurna. Menurut teori *Arrhenius*, basa adalah zat yang dalam air menghasilkan ion OH negatif dan ion positif. Larutan basa memiliki rasa pahit dan jika mengenai tangan terasa licin (seperti sabun). Sifat licin terhadap kulit ini disebut sifat kaustik basa. Salah satu indikator yang digunakan untuk menunjukkan kebasaaan adalah lakmus merah. Bila lakmus merah dimasukkan ke dalam larutan basa maka berubah menjadi biru.

Untuk mendapatkan komposit dengan karakteristik yang baik dari bahan penguat serat alam, hal yang perlu diperhatikan adalah memperbaiki ikatan antarmuka serat alam dengan resin. Sifat alami serat adalah *hidrophylic*, yaitu suka terhadap air berbeda dari polimer yang *hidrophobic* yaitu menolak air. Adanya perbedaan sifat tersebut dapat menurunkan kemampuan resin untuk mengikat serat. Pengaruh perlakuan alkali terhadap sifat permukaan serat alam selulosa telah diteliti dimana kandungan optimum air mampu direduksi sehingga sifat alami *hidrophylic* serat dapat memberikan ikatan *interfacial* dengan matriks secara optimal (Bismarck, 2002). Contoh alkali terlihat seperti Gambar 2.11. di bawah ini.



**Gambar 2.11.** Alkali (NaOH)

Reaksi dari perlakuan alkali terhadap serat adalah :



Selama perlakuan alkali serat alam, sebagian unsur penyusun serat dapat larut dalam larutan alkali tersebut. Lignin dan hemiselulosa serta zat-zat lain seperti lilin, abu, dan kotoran lain dapat terbuang karena perlakuan alkali serat (Ray, dkk. 2001).

## 2.5. Polimer sebagai Matriks

Matriks adalah bahan/material yang digunakan sebagai bahan pengikat serat pada komposit yang tidak mengalami reaksi kimia dengan bahan pengisi. Matriks dalam komposit berfungsi sebagai bahan pengikat serat, pelindung dari kerusakan mekanis maupun kimia, dan mentransfer beban ke bahan pengisi.

Bahan matriks yang paling sering digunakan dalam komposit adalah matriks jenis polimer. Keuntungan menggunakan matriks polimer yaitu murah, ringan, ketahanan kimia yang tinggi, serta mudah dalam pembentukan produk. Adapun jenis polimer yaitu:

### 1. *Thermoset*

Resin jenis *thermoset* merupakan resin yang tidak dapat berubah kebentuk semula ketika dipanaskan atau tidak bisa didaur ulang. Keuntungan menggunakan resin *thermoset* diantaranya: viskositasnya yang rendah, mampu berinteraksi dengan baik terhadap serat, suhu kerja yang relatif rendah, serta harga yang lebih murah dibanding jenis resin lain. Contoh polimer *thermoset* yaitu: *epoxy, polyester, Plenol, phenolic, resin furan, resin amino* dll.

### 2. *Thermoplastic*

Resin jenis *thermoplastic* merupakan resin yang dapat dilunakkan terus menerus dan bisa berubah karena dipanaskan atau bisa didaur ulang. Resin *thermoplastic* mempunyai viskositas yang tinggi dan akan mencair pada temperatur tinggi dan berubah ke fase padat apabila diinginkan. Contoh polimer *thermoplastic* yaitu: *polyethylene (PE), nylon, polyamide (PI), polypropylene (PP), polysulfone (PS), poluetheretherketon (PEEK), polyhenylene sulfide (PPS)* dll.

Pembuatan komposit serat membutuhkan ikatan muka antar serat dan matriks yang kuat. Untuk memilih matriks yang kuat harus memperhatikan beberapa sifat-sifatnya seperti tahan terhadap bahan kimia, tahan terhadap panas, tahan terhadap cuaca ekstrim, dan tahan terhadap goncangan yang biasanya menjadi pertimbangan

dalam pemilihan matriks. Berikut adalah sifat-sifat mekanik dari beberapa bahan matriks *polymers* yang ditunjukkan pada Tabel 2.7. di bawah ini.

**Tabel 2.7.** Sifat mekanik dari beberapa jenis matriks *polymers* (Smith dan Hashemi, 2006)

<i>Type</i>	<i>Density (g/cm<sup>3</sup>)</i>	<i>Ultimate Tensile Strength (MPa)</i>	<i>Yield Strength (MPa)</i>	<i>Modulud of Elasticity (GPa)</i>	<i>% Elongation at Break</i>
<i>Epoxy</i>	1.20	70	60	2.25	5
<i>Polyester</i>	1.13	58	70	3.5	2.4
<i>Phenolic</i>	1.705	56	52	7	1.3
<i>Polybutylene Terephthalate (PBT)</i>	1.355	55	67	12	148
<i>Nylon 66</i>	1.095	62	63	2.1	152
<i>Polyethylene</i>	0.925	16	16	0.25	350
<i>Polypropylene (PP)</i>	1.07	50	28	2.25	427
<i>Polyvinyle Chloride (PVC)</i>	1.305	47	38	3.1	62
<i>Polymethyl Methacrylate (PMMA)</i>	1.17	62	69	2.9	15

### 2.5.1. Polyester

Resin *polyester* merupakan salah satu jenis matriks polimer *thermoset* yang paling banyak digunakan terutama dalam pembuatan komposit modern. Resin *polyester* mempunyai karakteristik yang khas yaitu transparan, tahan air, dapat diwarnai, fleksibel, tahan terhadap cuaca ekstrim, tahan kimia. Suhu kerja *polyester* dapat mencapai 70°C atau lebih tergantung keperluannya. *Curing* (pengerasan) pada *polyester* dapat dilakukan dengan penambahan katalis. Kecepatan *curing* ditentukan oleh perbandingan dalam penambahan katalis (Schwartz, 1984).

Keuntungan lain dari resin *polyester* yaitu *polyester* mudah dikombinasikan dengan serat, kestabilan dimensional, dapat digunakan untuk semua bentuk

penguatan plastik, dan mudah pembuatannya. Secara umum *polyester* digunakan untuk konstruksi sebagai bahan komposit. Spesifikasi resin *polyester* dapat dilihat pada Tabel 2.8.

**Tabel 2.8.** Spesifikasi resin *polyester* BQTN 108 (*Singapore Highpolymer Chemical Products Pte Ltd* ([www.frpservice.com](http://www.frpservice.com)))

Sifat	Hasil	Metode Pengujian
Absorpsi Air ( <i>Water Absorption</i> ) selama 7 hari	0,35%	ISO-6219-80
<i>Barcol Hardness</i>	48 BHC	ASTM D2583-67
Temperatur <i>Heat distortion</i>	67,3°C	ASTM D648-72
Regangan Patah ( <i>Elongation at Break</i> )	3,20%	ASTM D638-72
Massa jenis Resin cair pada 25°C	1,21 gr/cm <sup>3</sup>	ASTM D147
Penyusutan Volume Saat <i>Cure</i>	9%	Massa Jenis ( <i>Specific Gravity</i> )
<i>Volatile Content</i>	40 - 43%	ASTM D3030
Kekuatan Lentur ( <i>Flexural Strength</i> )	82,4 Mpa	ASTM 790
Modulus Lentur ( <i>Flexural Modulus</i> )	5257,3 Mpa	ASTM 790
<i>Tensile Strength</i>	29,4 Mpa	ASTM D638

## 2.6. Katalis

Katalis adalah bahan yang digunakan untuk mempersingkat waktu pengerasan (*curing*) pada resin. Waktu yang dibutuhkan untuk *curing* tergantung pada jumlah katalis yang dicampurkan. Semakin banyak katalis yang dicampurkan pada resin maka akan semakin mempercepat proses *curing*-nya. Tetapi apabila penambahan katalis berlebihan maka akan menghasilkan komposit yang getas. Penambahan katalis yang dianjurkan adalah sebesar 1% sampai dengan 2% dari berat resin. Pada saat penambahan katalis akan timbul reaksi panas antara 60°C-90°C. Panas ini cukup untuk mengeras resin sehingga diperoleh material dengan kekuatan yang

maksimal sesuai yang diinginkan. Salah satu katalis yang sering digunakan adalah MEKPO (*Metyl Ethyl Ketone Peroxide*).

## 2.7. Karakteristik Material Komposit

Salah satu faktor yang sangat penting dalam menentukan karakteristik material komposit adalah perbandingan antara matriks dengan serat. Sebelum melakukan proses pencetakan komposit, terlebih dahulu dilakukan perhitungan perbandingan keduanya. Dalam menentukan perbandingan antara komponen matriks dengan serat (pengisi) material komposit ini biasanya dilakukan dengan menggunakan dua metode, yaitu:

### 1. Metode fraksi massa

Metode ini digunakan jika massa komponen matriks dan pengisi material komposit tidak jauh berbeda atau serat yang dipakai cukup berat. Untuk menghitung perbandingan massa digunakan persamaan sebagai berikut:

#### a. Fraksi massa serat

$$W_f = \frac{m_f}{m_c} \dots\dots\dots (2.1a)$$

Dimana:

$W_f$  = fraksi massa serat (%)

$m_f$  = massa serat (gr)

$m_c$  = massa komposit (gr)

#### b. Fraksi volume serat

$$V_{f_{total}} = \frac{V_{f_{total}}}{v_c} \dots\dots\dots (2.1b)$$

Dimana:

$V_{f_{total}}$  = fraksi volume serat (%)

$V_{f_{total}}$  = volume serat total (cm<sup>3</sup>)

$v_c$  = volume komposit (cm<sup>3</sup>)

c. *Hybrid ratio*

Bila serat yang digunakan lebih dari satu jenis, maka:

$$V_{f_{tot}} = V_{f_1} + V_{f_2} + \dots$$

Perbandingan fraksi volume suatu serat dengan fraksi volume serat total disebut '*hybrid ratio*'.

$$r_h = \frac{V_{f_1}}{V_{f_{tot}}} \dots\dots\dots (2.1c)$$

Dimana:

$r_h$  = *hybrid ratio*

$V_{f_1}$  = fraksi volume serat gelas

$V_{f_{tot}}$  = fraksi volume serat total

2. Metode fraksi volume

Metode ini digunakan apabila berat antara komponen matriks dan penguat (serat) material komposit jauh berbeda. Fraksi volume dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

a. Massa komposit

Massa komposit dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$m_c = m_f + m_m \dots\dots\dots (2.2)$$

b. Massa jenis komposit

$$\rho_c = \frac{m_c}{v_c} \dots\dots\dots (2.3)$$

c. Massa serat

$$m_{f_{tot}} = v_c \cdot V_{f_{tot}} \cdot \rho_f \dots\dots\dots (2.4)$$

d. Massa matrik

$$\begin{aligned} m_m &= v_c \cdot V_m \cdot \rho_m \\ &= v_c \cdot (1 - V_{f_{tot}}) \cdot \rho_m \dots\dots\dots (2.5) \end{aligned}$$

Dimana:  $m_c$  = massa komposit (gr),  $m_{f_{tot}}$  = massa serat (gr),  $m_m$  = massa matriks (gr),  $\rho_c$  = massa jenis komposit ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ ),  $v_c$  = volume komposit ( $\text{cm}^3$ ),  $V_{f_{tot}}$  = fraksi volume serat (%),  $V_m$  = fraksi volume matriks,  $\rho_m$  = massa jenis matriks ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ ),  $\rho_f$  = massa jenis serat ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ ).

## 2.8. Karakteristik Patahan pada Material Komposit

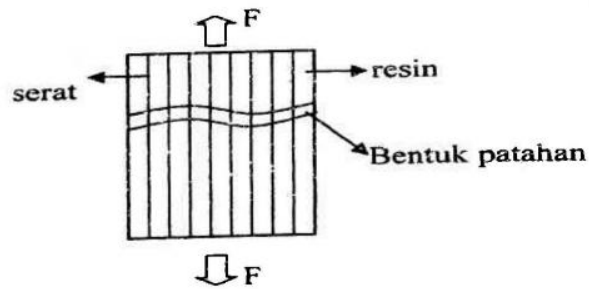
Patah didefinisikan sebagai pemisahan sebuah bahan menjadi dua atau lebih potongan sebagai respon dari tegangan statik yang bekerja. Dua model patah yang mungkin terjadi pada bahan teknik adalah patah liat (*ductile fracture*) dan patah getas (*brittle fracture*). Bahan liat (*ductile*) memperlihatkan deformasi plastik dengan menyerap energi yang besar sebelum patah. Sebaliknya, patah getas (*brittle*) hanya memperlihatkan deformasi plastik yang kecil atau bahkan tidak ada. Setiap proses perpatahan meliputi dua tahap yaitu pembentukan dan perambatan sebagai respon terhadap tegangan yang diberikan. Jenis perpatahan sangat tergantung pada mekanisme perambatan retak.

Patahan pada material komposit disebabkan karena deformasi ganda, diantaranya disebabkan oleh kondisi pembebanan dan struktur mikro komposit (diameter serat, fraksi volume serat, dan distribusi serat). Kemungkinan lainnya adalah patahnya serat selama proses pembuatan, yang diakibatkan tegangan termal dan tegangan sisa. Model patahan pada material komposit antara lain sebagai berikut.

### 2.8.1. Patah Tunggal

Patah tunggal pada komposit terjadi ketika serat putus akibat beban tarik dan matriks tidak mampu lagi menahan beban tambahan, sehingga patahan yang terjadi pada satu bidang. Gambar 2.12. menunjukkan patah tunggal (Schwartz, 1984).

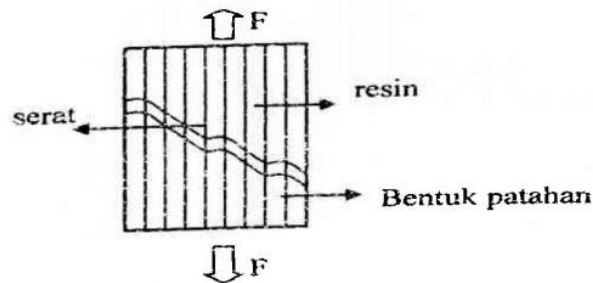




**Gambar 2.12.** Patah tunggal (Schwartz, 1984)

### 2.8.2. Patah Banyak

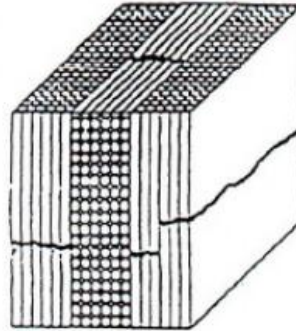
Komposit yang mengalami patah banyak terjadi apabila jumlah serat yang putus akibat beban tarik masih sedikit dan kekuatan *interface* masih baik sehingga matriks mampu menerima beban dan mendistribusikan beban tersebut ke sekitarnya. Jika matriks mampu menahan gaya geser dan meneruskan beban ke serat maka jumlah serat yang putus akan semakin banyak sehingga patah yang terjadi lebih dari satu bidang. Gambar 2.13. menunjukkan patah banyak (Schwartz, 1984).



**Gambar 2.13.** Patah banyak (Schwartz, 1984)

### 2.8.3. Delaminasi

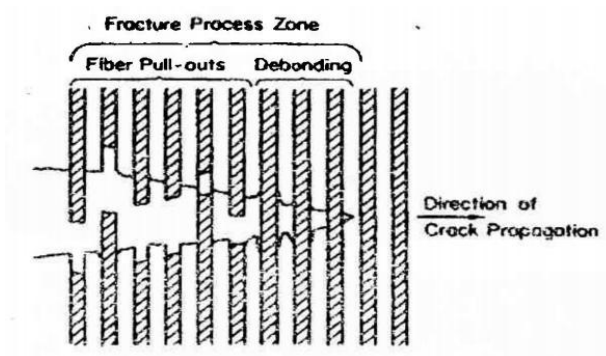
Delaminasi (*interlaminar*) adalah perpatahan yang terjadi akibat terlepasnya ikatan antar lapisan penguat. Penyebab utama perpatahan ini adalah gaya adhesi antara penguat dan matriks yang lemah. Selain itu kemampuan matriks untuk mengisi ruang antara serat juga mempengaruhi. Kondisi ikatan antara matriks dan serat yang lemah apabila diberi beban tarik akan mudah terlepas sebelum dapat mendistribusikan beban pada *core* secara sempurna sehingga dapat mengurangi kekuatan komposit secara keseluruhan. Gambar 2.14. menunjukkan delaminasi (Schwartz, 1984).



**Gambar 2.14.** Delaminasi (Schwartz, 1984)

#### 2.8.4. *Fibre Pull Out*

*Fibre pull out* adalah tercabutnya serat dari matriks yang disebabkan karena matriks retak akibat beban tarik sehingga kemampuan komposit menahan beban lebih kecil daripada beban maksimumnya. Ketika matriks retak, beban akan ditransfer dari matriks ke serat sehingga kemampuan menahan beban berpindah ke serat. Seiring dengan bertambahnya deformasi, serat akan tercabut dari matriks akibat *debonding* dan patahnya serat (Schwartz, 1984). Gambar 2.15. menunjukkan *fiber pull out* (Schwartz, 1984).



**Gambar 2.15.** *Fibre pull out* (Schwartz, 1984)

### 2.9. Pengujian *Bending*

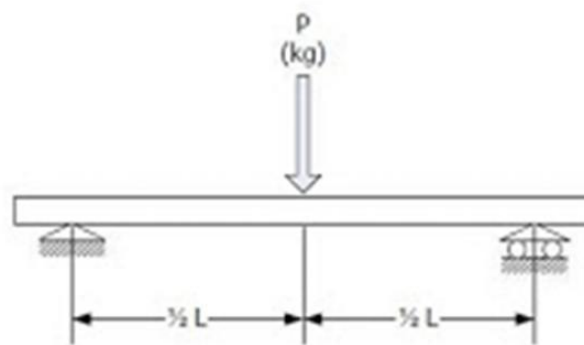
Pengujian lengkung (*bending*) merupakan salah satu pengujian sifat mekanik bahan, baik yang akan digunakan sebagai konstruksi atau komponen yang akan menerima pembebanan lengkung maupun proses pelengkungan dalam pembentukan. Pelengkungan (*bending*) merupakan proses pembebanan terhadap

suatu bahan pada suatu titik ditengah-tengah dari bahan yang ditahan diatas dua tumpuan seperti terlihat pada Gambar 2.16.

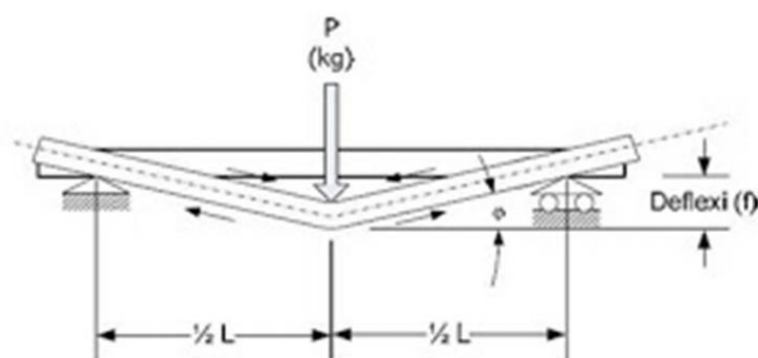
Pengujian lengkung ialah pengujian yang bertujuan untuk mengetahui aspek-aspek kemampuan bahan uji dalam menerima pembebanan lengkung, yakni:

1. Kekuatan atau tegangan lengkung ( $\sigma$ )
2. Lentur atau defleksi ( $\delta$ ) sudut yang terbentuk oleh lenturan atau sudut defleksi
3. Elastisitas (E) (Prayoga, 2012)

Pada perlakuan uji bending bagian atas spesimen mengalami proses penekanan dan bagian bawah mengalami proses tarik sehingga akibatnya spesimen mengalami patah bagian bawah karena tidak mampu menahan tegangan tarik.



**Gambar 2.16.** Penampang uji *bending* (Prayoga, 2012)



**Gambar 2.17.** Pengaruh pembebanan lengkung terhadap bahan uji (Prayoga, 2012)

Sebagaimana perilaku bahan terhadap pembebanan, semua bahan akan mengalami perubahan bentuk (deformasi) secara bertahap dari elastis menjadi

plastis hingga akhirnya mengalami kerusakan (patah). Dalam proses pembebanan lengkung dimana dua gaya bekerja dengan jarak tertentu ( $L/2$ ) serta arah yang berlawanan bekerja secara bersamaan (lihat Gambar 2.17.).

Setelah dilakukan pengujian *bending*, untuk mendapatkan angka kekuatan *bending* digunakan persamaan berikut:

$$\sigma_b = \frac{3PL}{2bd^2} \dots\dots\dots (2.6)$$

$$\sigma_b = \left(\frac{3PL}{2bd^2}\right) \left[1 + 6\left(\frac{D}{L}\right)^2 - 4\left(\frac{d}{L}\right)\left(\frac{D}{L}\right)\right] \dots\dots\dots (2.7)$$

Dimana:

- $\sigma_b$  = tegangan *bending* (MPa)
- P = gaya pembebanan (N)
- L = jarak antar tumpuan (mm)
- b = lebar spesimen (mm)
- d = tebal spesimen (mm)
- D = defleksi maksimum (mm)

Keterangan:

Pada persamaan 2.6 digunakan jika perbandingan  $L/d \leq 16$ , dimana L adalah *support span* dan d adalah tebal spesimen. Pada persamaan 2.7 digunakan jika nilai perbandingan  $L/d > 16$ .

Untuk mendapatkan nilai regangan *bending* digunakan persamaan berikut:

$$\varepsilon_b = \frac{6Dd}{L^2} \dots\dots\dots (2.8)$$

Dimana:

- $\varepsilon_b$  = regangan (mm/mm)
- D = defleksi maksimum (mm)
- L = panjang span (mm)
- d = tebal (mm)

Untuk mendapatkan nilai modulus elastisitas *bending* digunakan persamaan berikut:

$$E_b = \frac{L^3 m}{4bd^3} \dots\dots\dots (2.9)$$

Dimana:

$E_b$  = modulus elastisitas *bending* (MPa)

$L$  = panjang span (mm)

$b$  = lebar spesimen (mm)

$d$  = tebal spesimen (mm)

$m$  = *slope* tangent pada kurva beban defleksi (N/mm)