

BAB II LANDASAN TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Prasetyo. (2007) dalam penelitiannya menganalisis pengaruh fraksi volume serat ijuk dengan matriks *polyester* terhadap kekuatan *bending* dan tarik. Ijuk tersebut kemudian dicampur dengan *polyester*, kemudian dicetak menjadi lembaran komposit. Setelah itu, lembaran akan dibentuk spesimen uji tarik dan *bending*. Variabel yang digunakan dalam penelitian ini adalah variasi fraksi volume serat ijuk, yakni 10%, 20%, 30%, 40%. Dari hasil penelitian tersebut, bahwa *flexural modulus* dan *flexural strength* tertinggi terjadi pada komposit dengan fraksi volume 40%, yang besarnya adalah 1,269 GPa dan 62,76 MPa. Semakin kecil fraksi volume serat aren, maka kekuatan *bending* akan semakin rendah. Sedangkan penelitian terhadap kekuatan tarik komposit dengan matriks *polyester* menghasilkan kekuatan tarik dan modulus elastisitas tertinggi pada fraksi volume 40% yang besarnya 13,72 MPa dan 2,00 GPa. Semakin kecil/sedikit fraksi volume serat aren, maka kekuatan tarik akan semakin rendah.

Munandar. (2013) mengkaji kuat tarik serat ijuk. Dalam penelitian ini, serat ijuk yang dipilih yaitu serat berdiameter 0,25-0,35 mm, 0,36-0,45 mm, dan 0,46-0,55 mm. Selanjutnya dilakukan perendaman menggunakan larutan alkali yaitu NaOH 5% selama 2 jam, kemudian dioven dengan suhu 80°C selama 15 menit. Setelah itu dilakukan pengujian tarik dengan standar ASTM D 3379-75. Dari penelitian 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, dan modulus elastisitas 5,37 GPa. Dibandingkan dibandingkan kelompok serat ijuk dengan diameter besar (0,46-0,55 mm) sebesar 198,15 MPa, regangan 0,37%, modulus elastisitas 2,84 GPa. Hal ini dikarenakan rongga pada serat berdiameter 0,46-0,55 mm lebih besar dibandingkan rongga serat berdiameter 0,25-0,35 mm.

Widodo. (2008) menganalisa sifat mekanik komposit epoksi dengan penguat serat pohon aren (ijuk) model lamina acak (*random*). Dari hasil penelitian yang dilakukan didapatkan kekuatan tarik komposit tertinggi sebesar 5,538 kg/mm² pada fraksi volume ijuk 40% dan rata-rata kekuatan tarik tertinggi sebesar 5,128 kg/mm² pada fraksi volume ijuk 40%. Kekuatan impak komposit tertinggi sebesar 33,395 Joule/mm² dengan kekuatan impak rata-rata 11,132 Joule/mm² pada fraksi volume ijuk 40%.

Nasmi. (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. 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/mm², kemudian berturut-turut 15%:15% dan 20%:10% yaitu 19,6 N/mm² dan 17,37 N/mm².

Mengga. (2015) melakukan penelitian tentang pengaruh panjang serat dan fraksi volume terhadap sifat tarik komposit widuri poliester. Bahan yang digunakan adalah resin poliester dan serat widuri. Serat widuri yang digunakan diambil dari tanaman widuri yang sedang berbunga (berumur 3 bulan) kemudian diberi perlakuan NaOH selama 2 jam dengan panjang serat 3 mm, 5 mm dan 7 mm. Fraksi volume yang digunakan yaitu 20%, 30% dan 40% dengan orientasi serat acak. Spesimen uji tarik dibuat sesuai dengan standar ASTM D638. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kekuatan tarik tertinggi sebesar 16,78 MPa diperoleh pada panjang serat 7 mm dengan fraksi volume 30%, sedangkan kekuatan tarik terendah 12,41 MPa diperoleh pada panjang serat 3 mm dengan fraksi volume 20%. Regangan tarik tertinggi sebesar 0,036% diperoleh pada panjang serat 7 mm dengan fraksi volume 40%, sedangkan regangan terendah

sebesar 0,017% diperoleh pada panjang serat 3 mm dengan fraksi volume 20%. Modulus elastisitas tertinggi sebesar 0,76 GPa diperoleh pada panjang serat 3 mm dengan fraksi volume 30%, sedangkan modulus elastisitas terendah sebesar 0,43 GPa diperoleh pada panjang serat 3 mm dengan fraksi volume 40%.

Dari beberapa penelitian yang dilakukan di atas, dapat disimpulkan bahwa pengujian *bending* pada material komposit *hybrid* masih jarang dilakukan oleh beberapa peneliti terdahulu. Oleh karena itu, dengan adanya penelitian ini diharapkan dapat menambah wawasan tentang pengujian *bending* terhadap material komposit *hybrid* khususnya yang bermatrik epoxy. Uji *bending* merupakan salah satu bentuk pengujian untuk menentukan mutu suatu material secara visual. Selain itu uji *bending* digunakan untuk mengukur kekuatan material akibat pembebanan terhadap kelenturan. Fenomena *bending* sering terjadi pada bidang konstruksi (misalnya pada konstruksi jembatan gantung pada bagian deck (tengah) mengalami *bending*), otomotif (sasis (rangka) pada kendaraan bila diberi muatan) dan pada bidang teknik lainnya. Namun dalam material komposit untuk pengujian *bending* masih sangat jarang dilakukan, sehingga perlu adanya kajian tentang pengujian *bending* pada material komposit.

2.2. Dasar Teori

2.2.1. Komposit

Perkembangan bidang sains dan teknologi mulai menyulitkan bahan konvensional seperti logam untuk memenuhi keperluan aplikasi baru. Bidang angkasa lepas, perkapalan, *automobile* dan industri transportasi merupakan contoh aplikasi yang memerlukan bahan-bahan yang berdensitas rendah, tahan karat, kuat dan kokoh. Untuk itu, saat ini diperlukan bahan komposit sebagai pengganti bahan konvensional di bidang-bidang tersebut.

Komposit adalah salah satu material yang terbentuk dari dua atau lebih komponen (bahan penguat dan matriks), yang memiliki karakteristik yang berbeda dengan bahan-bahan pembentuknya dan secara makroskopis dicampur dengan tetap memiliki batas fasa yang jelas dan teridentifikasi (Chawla, 1987). Bahan

komposit pada umumnya terdiri dari dua unsur, yaitu serat (*fiber*) sebagai pengisi dan matriks sebagai bahan pengikat serat.

Sebagai bahan pengisi, serat digunakan untuk menahan gaya yang bekerja pada bahan komposit, dan matriks berfungsi melindungi serta mengikat serat agar dapat bekerja dengan baik terhadap gaya-gaya yang terjadi. Oleh karena itu, untuk bahan serat digunakan bahan yang kuat, kaku dan getas, sedangkan bahan matriks dipilih bahan-bahan yang liat, lunak dan tahan terhadap perlakuan kimia.

2.2.2 Klasifikasi Bahan Komposit

Menurut bentuk struktur dari penyusunnya, komposit dibedakan menjadi 4 kelompok yaitu:

a. Komposit Serpih (*Flake Composite*)

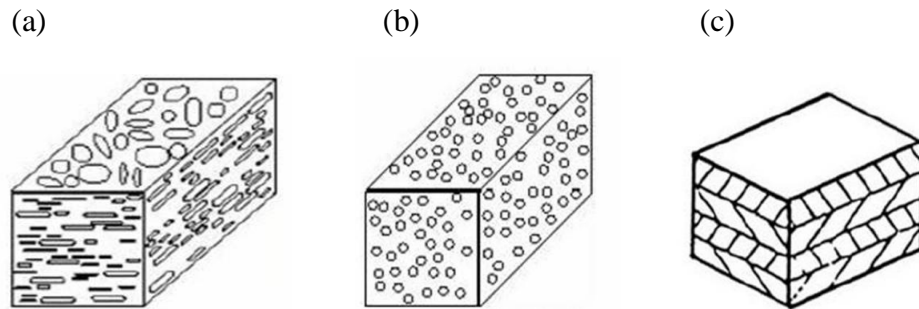
Komposit serpih adalah komposit dengan penambahan material berupa serpih kedalam matriksnya. Serpih dapat berupa serpihan mika, *glass* dan metal. Contoh pada Gambar 2.1.(a)

b. Komposit Partikel (*Particulate Composite*)

Komposit partikel adalah salah satu jenis komposit dimana dalam matriksnya ditambahkan material lain berupa serbuk/butir. Dalam komposit partikel material penambah terdistribusi secara acak atau kurang terkontrol dari pada komposit serpih, sebagai contoh adalah beton. Contoh pada Gambar 2.1.(b)

c. *Laminate Composite*

Laminate Composite adalah komposit dengan susunan dua atau lebih *layer*, dimana masing-masing *layer* dapat berbeda-beda dalam hal material, dan orientasi penguatnya. Contoh pada Gambar 2.1.(c)



Gambar 2.1. (a) Komposit serpih (b) Komposit partikel (c) *Laminate composite*
(Schwartz, 1984)

d. Komposit Serat (*Fiber Composite*)

Merupakan komposit yang hanya terdiri dari satu lapisan yang menggunakan penguat berupa serat. Serat yang digunakan dapat berupa serat sintetis dan serat alam. Serat disusun secara acak maupun orientasi tertentu bahkan dapat juga dalam bentuk yang lebih kompleks seperti anyam. (Schwartz, 1984).

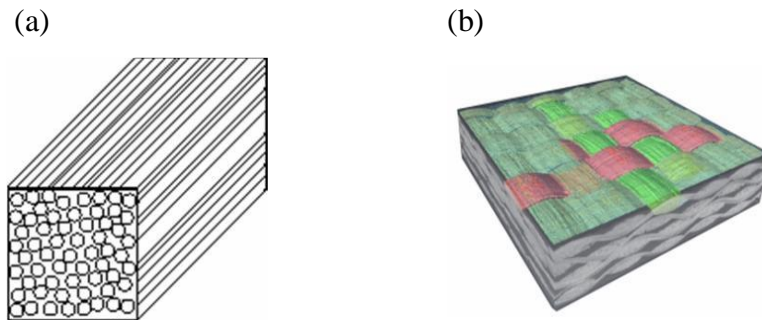
Komposit serat dapat dibagi berdasarkan penempatannya, yaitu:

1) *Continuous Fiber Composite*

Tipe ini mempunyai susunan serat panjang dan lurus, membentuk lamina diantara matriksnya. Tipe ini mempunyai kelemahan pemisahan antar lapisan. Contoh *continous fiber composite* dapat dilihat pada Gambar 2.2.(a) di bawah ini.

2) *Woven Fiber Composite (bi-directional)*

Komposit 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 fiber composite* dapat dilihat pada Gambar 2.2.(b).



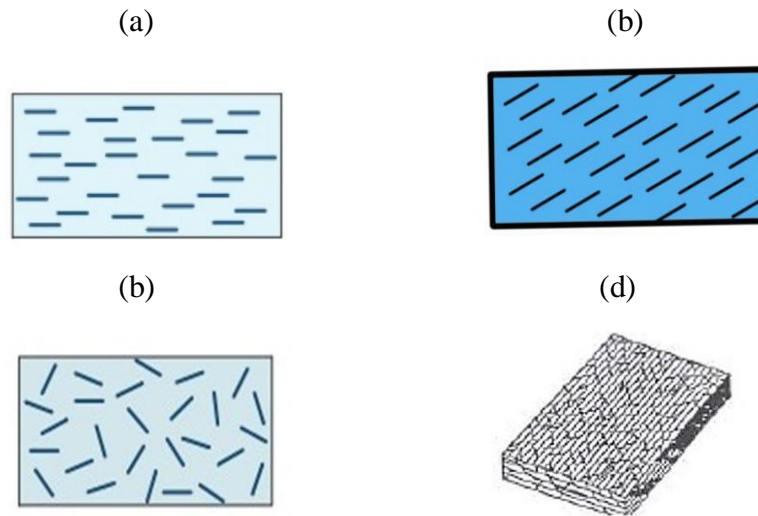
Gambar 2.2.(a) *Continuous fiber composite* (b) *Woven fiber composite*
(Gibson, 1994)

3) *Discontinuous Fiber Composite*

Discontinuous Fiber Composite adalah tipe komposit dengan serat pendek. Tipe ini dibedakan menjadi 3, yaitu:

- a) *off-axis aligned discontinuous fiber*
- b) *Random oriented discontinuous fiber*
- c) *Randomly oriented discontinuous fiber*
- d) *Hybrid fiber composite*

Hybrid fiber composite merupakan komposit gabungan antara tipe serat lurus dengan serat acak. Tipe ini digunakan supaya dapat mengganti kekurangan sifat dari kedua tipe dan dapat menggabungkan kelebihan keduanya.



Gambar 2.3.(a) *Aligned discontinuous fiber* (b) *Off-axis discontinuous fiber* (c) *Randomly oriented discontinuous fiber* (d) *Hybrid fiber composite* (Gibson,1994)

2.2.3 Faktor yang Mempengaruhi Sifat-sifat Mekanik Komposit

Ada beberapa faktor yang mempengaruhi performa komposit, baik dari faktor serat penyusunnya maupun faktor matriksnya, yaitu:

a. Faktor Serat

1) Letak Serat

- a) *One dimensional reinforcement*, mempunyai kekuatan 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*, kekuatannya lebih tinggi dibanding dengan dua tipe sebelumnya.

2) Panjang Serat

Serat panjang lebih kuat dibandingkan dengan serat pendek. Oleh karena itu panjang dan diameter sangat berpengaruh pada kekuatan maupun modulus komposit. Serat panjang (*continuous fiber*) lebih efisien dalam peletakannya dari pada serat pendek.

3) Bentuk Serat

Bentuk serat tidak mempengaruhi, yang mempengaruhi adalah diameter seratnya. Semakin kecil diameter serat, maka akan menghasilkan kekuatan komposit yang tinggi.

b. Faktor Matriks

Matriks sangat berpengaruh dalam performa komposit. Tergantung dari matriks jenis apa yang dipakainya, dan untuk tujuan apa dalam pemakaian matriks tersebut.

c. Katalis

Katalis digunakan 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.

2.2.4 Kelebihan dan Kekurangan Material Komposit

Material komposit mempunyai beberapa kelebihan dibandingkan dengan bahan konvensional seperti logam. Kelebihan tersebut pada umumnya dapat dilihat dari beberapa sudut penting seperti sifat-sifat mekanik, fisik dan biaya. Seperti yang diuraikan dibawah ini:

a. Sifat mekanik dan fisik

Pada umumnya pemilihan bahan matriks dan serat memainkan peranan penting dalam menentukan sifat-sifat mekanik dan sifat komposit. Gabungan matriks dan serat dapat menghasilkan komposit yang mempunyai kekuatan dan kekakuan yang lebih tinggi dari bahan konvensional seperti besi dan baja.

b. Biaya

Faktor biaya juga memainkan peranan yang sangat penting dalam membantu perkembangan industri komposit. Biaya yang berkaitan erat dengan penghasilan suatu produk yang seharusnya memperhitungkan beberapa aspek seperti bahan mentah, proses pembuatan, upah tenaga kerja, dan sebagainya.

Selain kelebihan yang dimiliki, komposit juga memiliki beberapa kekurangan antara lain:

- a. Tidak tahan terhadap beban kejut (*shock*) dan tabrak (*crash*) jika dibandingkan dengan metal.
- b. Kurang elastis.
- c. Lebih sulit dibentuk secara plastis.

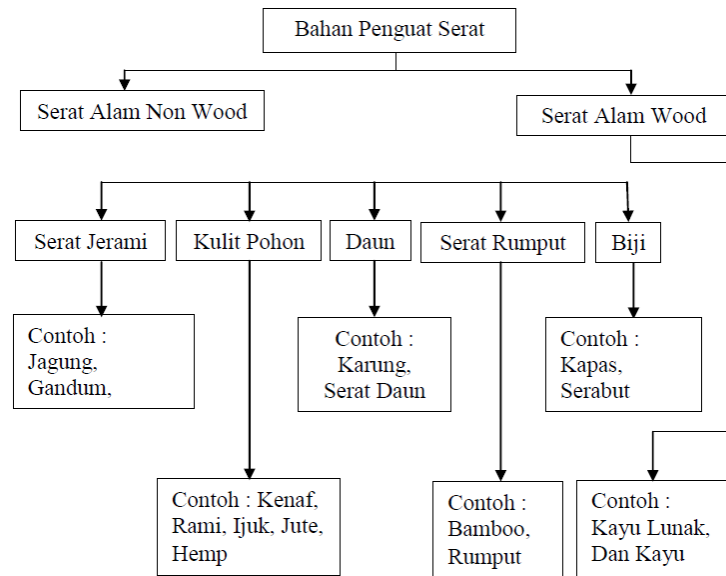
2.3. Serat Sintetis dan Serat Alam

Serat sintetis dan serat alam banyak klasifikasinya. Serat alam yang sering digunakan adalah serat pisang, kapas, wol, serat nanas, serat rami, serat ijuk dan serat sabut kelapa, sedangkan serat sintetis diantaranya nilon, gelas, akril dan rayon. Serat alam adalah serat yang banyak diperoleh di alam sekitar, yang berasal dari tumbuh-tumbuhan seperti serat batang pisang, bambu, rosella, nanas, kelapa, ijuk dan lain-lain.

Table 2.1. Klasifikasi serat/serat tekstil (Surdia, 1992)

NO	Serat	Jenis
1	Serat kimia atau serat buatan	Serat regenerasi
		Serat sintetis
		Serat anorganik
2	Serat alam	Serat tumbuhan
		Serat binatang
		Serat galian atau asbes

Saat ini, serat alam mulai mendapatkan perhatian serius dari para ahli material komposit, karena (a) Serat alam memiliki kekuatan spesifik yang tinggi, karena serat alami memiliki massa jenis yang rendah. (b) Serat alam mudah diperoleh dan merupakan sumber daya alam yang dapat diolah kembali, harga relatif murah, dan tidak beracun. Serat alam ijuk, sabut kelapa, sisal, jerami, nanas dan lain-lain merupakan hasil alam yang banyak tumbuh di Indonesia. Gambar 2.10 berikut adalah skema klasifikasi jenis serat alami.



Gambar 2.4. Klasifikasi jenis serat alami (Loan, 2006)

Macam-macam jenis serat diantaranya:

a. Serat *asbestos*

Serat ini dibagi menjadi dua, yaitu: (a). *Crhysottile asbestose* (serat asbestos putih) mempunyai rumus kimia $3MgO \cdot 2SiO_2 \cdot H_2O$ dan merupakan mineral yang tersedia cukup banyak di alam. Serat ini mempunyai diameter minimum 0,001 m. 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 $Na_2O, Fe_2O_3, 3FeO \cdot 8SiO_2 \cdot H_2O$. 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 (*kaesirordanik*).

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 serat ini adalah sebagai penopang kekuatan dari komposit, sehingga tinggi rendahnya kekuatan komposit sangat bergantung serat yang digunakan, karena tegangan yang dikenakan pada komposit mulanya diterima oleh matriks yang diteruskan 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 serat gelas yang terkenal misalnya otomotif dan bodi kapal, pipa plastic, 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, stail pada suhu yang tinggi, tahan terhadap abrasif, relatif kaku dan lebih tahan lama. Tetapi penyebaran serat karbon dalam adonan 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 penggumpulan serat selama pengadukan.

f. Serat *polyethylene*

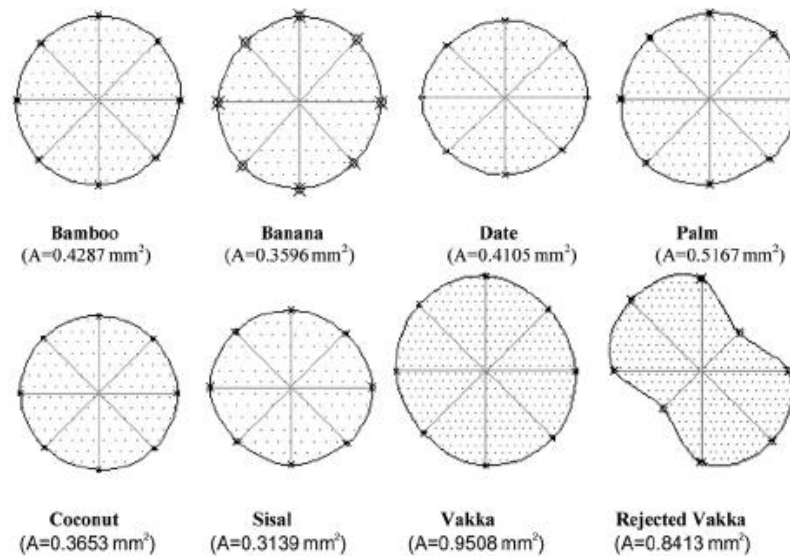
Serat *polyethylene* dalam kehidupan sehari-hari dikenal sebagai tali tambang plastic. Serat *polyethylene* ini hampir sama dengan serat *polypropylene* hanya bentuknya berupa serat tunggal.

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.

Bentuk penampang lintang serat alam pada umumnya tidak bulat benar, namun ada unsur kelonjongannya. Berbagai bentuk dan ukuran serat alami ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5. Bentuk dan ukuran beberapa jenis serat alami (Rao dan Rao, 2007)

Karena serat-serat tersebut pada umumnya tidak tahan suhu tinggi, maka yang digunakan adalah polimer, sehingga fabrikasi material kompositnya bisa dilakukan pada suhu relatif rendah. Van de Velde dan Kiekens menggunakan polipropilen sebagai matriks dan difabrikasi secara pultrusi. Dhakal dkk. Menggunakan polietilen dan difabrikasi secara *hand lay-up*, dipres pada suhu 22 °C dan ditekan 10 bar, dilanjutkan dengan curing pada 24 jam berikutnya pada suhu 22 °C, dan post-curing pada 60 °C selama 2 jam. Dwie dkk. Menggunakan matriks epoksi resin berbasis minyak kedelai yang telah mengalami proses pelakuan kimiawi, sedangkan fabrikasi dilakukan dengan teknik VATRM (*Vacuum Assisted Transfer Resin Moulding*) untuk pembuatan atap.

Beberapa kelebihan serat alam antara lain:

1. Bahan bakunya terbarukan
2. Massa jenisnya rendah
3. Tidak abrasif
4. Tidak sensitif terhadap retakan
5. Tidak menyebabkan iritasi pada kulit
6. Limbah mudah terurai di alam

7. Merupakan konduktifitas kalor yang baik.

Kekurangannya adalah:

1. Sifat mekanisnya relatif rendah dibandingkan dengan serat sintetis
2. Laju penyerapan uap airnya relatif tinggi
3. Tidak tahan terhadap suhu tinggi
4. Walau dari satu jenis, namun sifat-sifatnya sangat bervariasi.

Table 2.2. Sifat beberapa jenis serat alami dan serat kaca-E (Van de Velde dan kiekens, 2001)

Sifat	Sisal	Flax	Henep	Kaca-E
Kuat tarik (MPa)	610	900	690	2300
Modulus elastisitas (GPa)	28	50	64	73
Regangan patah (%)	2,2	1,8	1,8	3,2
Massa jenis (g/cm^3)	1,3	1,5	1,45	2,6
Kuat tarik spesifik ($\text{MPa}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$)	470	600	476	880
Modulus elastitas spesifik ($\text{GPa}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$)	22	33	44	28
Harga (US\$/kg)		1,20 – 1,75		1,50 – 5,00

Table 2.3. Kadar air dan massa jenis serat alami pada cuaca normal (Rao dan Rao, 2007)

Jenis serat alami	Kadar air (%)	Massa jenis (g/cm^3)	Jenis serat alami	Kadar air (%)	Massa jenis (g/cm^3)
Pelepah aren	12,09	0,810	Ijuk	12,08	1,030
Daun kurma	10,67	0,990	Sabut kelapa	11,36	1,150
Pelepah kurma	9,55	0,960	Batang pisang	10,71	1,350
Bambu (sisi luar)	9,16	0,910	Sisal	9,76	1,450
Bambu (sisi dalam)	10,14	0,890	---		

Table 2.4. Sifat mekanis beberapa jenis serat alami (Rao dan Rao, 2007)

Jenis serat alami	ε (%)	σ (MPa)	E (GPa)	σ' (MPa/($\text{kg}\cdot\text{m}^3$))	E' (GPa/($\text{kg}\cdot\text{m}^3$))
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

Catatan: ε = regangan patah E' = modulus elastisitas sepesifik
 σ = kuat tarik σ' = kuat tarik spesifik E = modulus elastisitas

2.4. Serat Ijuk

Serat ijuk adalah serat alam yang mungkin hanya sebagian orang mengetahui bahwa serat ini sangatlah istimewa dibandingkan serat alam lainnya. Serat berwarna hitam yang dihasilkan dari pohon aren memiliki banyak keistimewaan diantaranya (Widodo. 2008); (a). Tahan lama hingga ratusan tahun lebih, bahwa serat ijuk aren mampu bertahan hingga ribuan tahun lebih dan tidak mudah terurai. (b). Tahan terhadap asam dan garam air laut, serat ijuk merupakan salah satu serat yang tahan terhadap asam dan garam air laut, salah satu bentuk pengolahan dari serat ijuk adalah tali ijuk yang digunakan oleh nenek moyang kita untuk mengikat berbagai peralatan nelayan laut. (c). Mencegah penembusan rayap tanah. Serat ijuk sering digunakan sebagai bahan pembungkus pangkal kayu-kayu bangunan yang ditanam dalam tanah untuk memperlambat pelapukan kayu dan mencegah serangan rayap.

Table 2.5. Sifat mekanik serat ijuk (Munandar, 2013)

No	Diameter (mm)	Sifat Mekanik		
		Stress (MPa)	Strain (mm/mm)	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

Keunggulan komposit serat ijuk dibandingkan dengan serat gelas adalah komposit serat ijuk lebih ramah lingkungan karena mampu terdegradasi secara alami dan harganya pun lebih murah bila dibandingkan serat lain seperti serat gelas. Sedangkan serat gelas sukar terdegradasi secara alami. Selain itu serat gelas juga menghasilkan gas CO dan debu yang berbahaya bagi kesehatan jika serat gelas didaur ulang, sehingga perlu adanya bahan alternatif pengganti serat gelas tersebut. Dalam industri manufaktur dibutuhkan material yang memiliki sifat-sifat yang khusus dan khas yang sulit didapat dari material lain seperti logam.



Gambar 2.6. Serat ijuk

2.4.1. Metode Pengekstrakan Serat Ijuk

Pada umumnya pengekstrakan serat ijuk dari pohon aren hanya dilakukan secara manual yaitu ijuk dihasilkan dari pohon aren yang telah berumur dari 4-5 tahun sampai tongkol-tongkol bunganya keluar. Pohon yang masih muda produksi ijuhnya kecil. Demikian pula pohon yang berbunga kualitas dan hasil ijuhnya tidak baik.

Tahap awal pengekstrakannya yaitu dengan memotong pangkal pelepah-pelepah daun, kemudian ijuk yang bentuknya berupa lempengan anyaman itu dilepas dengan menggunakan parang dari tempat ijuk itu menempel. Lempengan-lempengan anyam ijuk yang baru dilepas dari pohon aren masih mengandung lidi-lidi ijuk. Lidi-lidi ijuk dapat dipisahkan dari serat-serat ijuk dengan menggunakan tangan. Untuk membersihkan serat ijuk dari berbagai kotoran dan ukuran serat ijuk yang besar, digunakan sisir kawat.

Proses produksi serat ijuk dapat dilakukan dengan tiga cara, yaitu; (1). Proses secara manual merupakan suatu proses produksi yang dalam seluruh rangkaianannya hanya menggunakan tenaga manusia dan peralatan yang digunakan adalah peralatan yang seadanya (*konvensional*). Dalam proses ini semua dilakukan dengan manual tanpa tersentuh oleh automasi sedikit pun, semua rangkaian proses mulai dari proses pertama sampai proses *finishing* semuanya dilakukan dengan tangan manusia. (2). Proses secara *automatic* yaitu serangkaian proses produksi yang di dalam prosesnya sudah menggunakan peralatan yang

canggih (*automatic*) bahkan ada yang sudah menggunakan robot dalam rangkaian prosesnya, dan tenaga manusia hanya digunakan saat proses *setting machine* saja. (3). Proses secara *semiautomatic* yaitu proses yang paling banyak digunakan di dunia industry, cara ini adalah gabungan antara cara manual dan otomatis.

2.5. Perlakuan Alkali

Serat alami adalah *hydrophilic*, yaitu suka terhadap air atau bisa dilarutkan dalam air, berbeda dari polimer yang *hydrophobic*. Pengaruh perlakuan alkali terhadap sifat permukaan serat alam selulosa telah diteliti dimana kandungan optimum air mampu direduksi sehingga sifat alami *hydrophilic* serat dapat memberikan ikatan interfacial dengan matrik secara optimal.

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 di 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 itu disebut sifat kaustik basa. Gambar 2.7. menunjukkan contoh alkali NaOH.



Gambar 2.7. Alkali NaOH

Salah satu indikator yang digunakan untuk menunjukkan kebasaaan adalah lakmus merah. Bila lakmus merah dimasukan ke dalam larutan basa maka berubah menjadi biru. Penelitian mengenai efek modifikasi kimia terhadap serat menyebutkan bahwa perlakuan alkali meningkatkan kekuatan rekatan antara serat

dengan matrik. Kekuatan tarik disebutkan mengalami peningkatan sebesar 5%. Dibandingkan alkali lain seperti KOH dan LiOH, perlakuan alkali NaOH adalah yang paling baik. Penelitian menyatakan bahwa Na^+ memiliki diameter partikel yang sangat kecil dimana dapat masuk ke pori terkecil serat dan masuk ke dalamnya sehingga dapat melepaskan minyak dan kontaminan lebih baik.

2.6. Serat Gelas (*Glass fibers*)

Serat gelas paling banyak digunakan karena harganya yang murah serta ketersediaan dan keandalannya, juga karena kekuatannya yang hanya sedikit di bawah serat karbon, lihat Tabel 2.6. Tabel tersebut menunjukkan bahwa serat kontinyu karbon bermodulus standar harganya 10x lebih mahal dibanding serat kaca-E, sedangkan kuat tarik serat karbon tersebut hanya sedikit lebih tinggi dari serat kaca-E.

Tabel 2.6. Harga dan sifat serat kaca-E dan karbon bermodulus standar (Calliester, 2007)

Jenis serat kontinyu	Properties			
	Harga (US\$/kg)	Massa jenis (g/cm^3)	Kuat tarik (MPa)	Modulus elastis (GPa)
Kaca-E	1,90 – 3,30	2,54	3450	72,5
Karbon	31,50 – 41,50	1,78	3800 - 4200	230

Table 2.7. Komposisi kimiawi serat kaca-E dan -S (%berat) (Agarwal dan Broutman, 1990)

Elemen	Kaca-E	Kaca-S
Silicon Oksida, SiO_2	52 – 56	64 - 66
Aluminium Oksida, Al_2O_3	12 – 16	24 - 26
Calcium Oksida, CaO	16 – 25	0,01
Magnesium Oksida, MgO	0 – 5	9 - 11
Sodium Oksida, Na_2O	0 – 2	0 - 3
Boron Oksida, B_2O_3	5 - 10	0,01



Gambar 2.8. (a) Gulungan serat kaca E2350-11 dari Owens Corning Asia-Pacific dengan berat bersih 17 kg, (b) Kaca-S2 *mat* unidireksional (Sudarisman, 2009)

Struktur dan karakteristik kaca:

1. Kaca merupakan material amorfous. Polihendron yang masing-masing terdiri atas atom oksigen yang secara kovalent terikat dengan Si membentuk jejaring 3D yang panjang struktur kaca.
2. Struktur jejaring 3D dan hampir isotropic, sangat kuat untuk tarik, ketangguhan retak tinggi, tidak sensitif terhadap lingkungan kimiawi, lembab, dan suhu relatif tinggi (Tabel 2.8) dan pada umumnya murah.

Tabel 2.8. Sifat-sifat serat kaca-E dan kaca-S (Callister, 2007)

Sifat	Kaca-E	Kaca-S
Masa jenis (g/cm^3)	2,54	2,48
Koefisien muai termal linier ($\times 10^6$ °C)	4,7	5,6
Kuat tarik pada 22 °C (MPa)	3348	4585
Modulus tarik pada 22 °C (GPa)	72,4	85,5
Perpanjangan luluh (%)	4,8	5,7

2.7. Polimer Sebagai Matriks

Matriks adalah bahan/material yang dipergunakan sebagai pengikat bahan pengisi namun tidak mengalami reaksi kimia dengan bahan pengisi. Secara umum, matriks berfungsi sebagai: (a). Pelindung komposit dari kerusakan-kerusakan, baik kerusakan secara mekanis maupun kimia. (b). Untuk mentransfer beban dari luar ke bahan pengisi. (c). Untuk mengikat bahan pengisi.

Matriks dapat diklasifikasikan atas empat jenis yaitu: (1). Termoplastik yaitu suatu matriks dikatakan termoplastik apabila matriks tersebut dapat menjadi lunak kembali apabila dipanaskan dan mengeras apabila didinginkan. Hal ini disebabkan karena molekul matriks tidak mengalami ikat silang sehingga bahan tersebut dapat didaur ulang. (2). Termoset, suatu matriks dikatakan termoset apabila matriks tersebut tidak dapat didaur ulang. Hal ini disebabkan molekul matriks mengalami ikat silang, sehingga bila matriks telah mengeras tidak dapat lagi dilunakkan. (3). *Elastomer* merupakan jenis polimer dengan elastisitas tinggi. (4). Polimer natural seperti selulosa dan protein dimana bahan dasar yang terbuat dari tumbuhan dan hewan.

Resin adalah polimer dalam matriks, yang mempunyai fungsi sebagai pengikat, sebagai pelindung struktur komposit, memberi kekuatan pada komposit dan bertindak sebagai media transfer tegangan yang diterima oleh komposit serta melindungi serat dari abrasi dan korosi. Resin termoset adalah tipe sistem matrik yang paling umum dipakai sebagai material komposit. Mereka menjadi populer penggunaannya dalam komposit dengan sejumlah alasan, mempunyai kekuatan leleh yang cukup rendah, kemampuan interaksi dengan serat yang bagus dan membutuhkan suhu kerja yang relatif rendah. Selain itu juga mempunyai harga yang lebih rendah dari pada resin termoplastic (Hyer, 1998).

2.7.1. Resin epoksi

Epoksi adalah suatu kopolimer, terbentuk dari dua bahan kimia yang berbeda. Ini disebut sebagai "resin" dan "pengeras". Resin ini terdiri dari monomer atau polimer rantai pendek dengan kelompok epoksida di kedua ujung. Epoksi resin paling umum yang dihasilkan dari reaksi antara epiklorohidrin dan bisphenol-A, meskipun yang terakhir mungkin akan digantikan dengan bahan kimia yang serupa. Pengeras terdiri dari monomer polyamine, misalnya Triethylenetetramine (Teta). Ketika senyawa ini dicampur, kelompok amina bereaksi dengan kelompok epoksida untuk membentuk ikatan kovalen. Setiap kelompok NH dapat bereaksi dengan kelompok epoksida, sehingga polimer yang dihasilkan sangat silang, dan dengan demikian kaku dan kuat. Proses polimerisasi

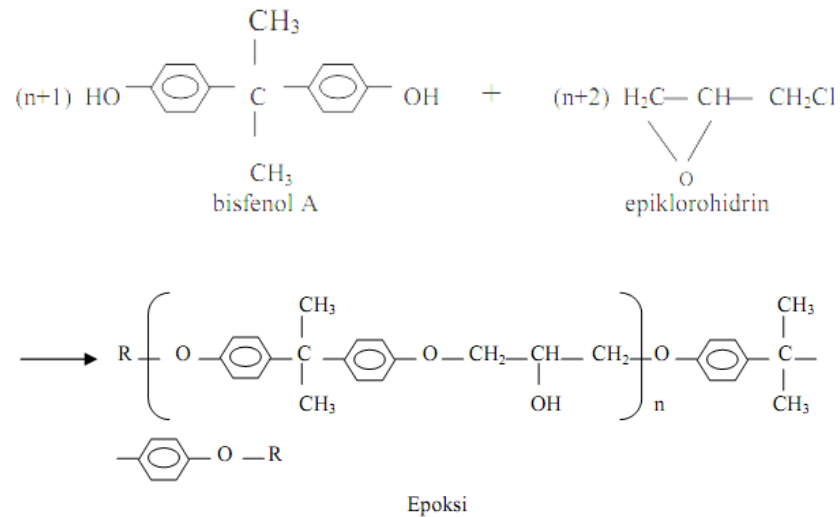
disebut "*curing*", dan dapat dikontrol melalui suhu, pilihan senyawa resin dan pengeras, dan rasio kata senyawanya; proses dapat mengambil menit untuk jam.

Reaksi *curing* pada sistem resin epoksi secara eksotermis, berarti dilepaskan sejumlah kalor pada proses *curing* berlangsung. Laju kecepatan proses *curing* bergantung pada temperatur ruang. Untuk kenaikan temperatur 10°C, maka laju kecepatan *curing* akan menjadi dua kali lebih cepat, sedangkan untuk penurunan temperaturnya dengan besar yang sama, maka laju kecepatan *curing* akan turun menjadi setengah dari laju kecepatan *curing* sebelumnya.

Epoksi memiliki ketahanan korosi yang lebih baik dari pada *polyester* pada keadaan basah, namun tidak tahan terhadap asam. Epoksi mempunyai tiga sifat yang utama yaitu: (a) Sifat fisik, sebagaimana jenis plastik lain kebanyakan plastik adalah isolator listrik dan konduktor panas yang baik. Kecuali jika ditambahkan campuran lain misalnya serbuk logam / karbon lain. (b) Sifat kimia, Sebagaimana umumnya plastik, secara kimia plastik termasuk inert. Dalam jangka lama, sinar ultraviolet mempengaruhi struktur kimia plastik. (c) Sifat mekanik, Dalam bentuk asli epoksi resin keras dan getas tetapi dalam penggunaan, plastik hampir selalu mengandung bahan campuran lain untuk menyesuaikan sifat mekaniknya. Sifat mekanik sangat banyak dimodifikasi, baik dari sisi kekuatan, kekenyalan, keuletan, sampai kearah sobekan.

Selain sifat tersebut epoksi juga memiliki ulet, elastis, tidak bereaksi dengan sebagian besar bahan kimia dan mempunyai dimensi yang lebih stabil . Epoksi bila diberi bahan penguat komposit mempunyai kekuatan lebih baik dari dibanding resin lain. (Hyer, 1998).

Resin epoksi termasuk ke dalam golongan *thermosetting*, sehingga dalam pencetakan perlu diperhatikan hal sebagai berikut: (a). Mempunyai penyusutan yang kecil pada pengawetan. (b). Dapat diukur dalam temperatur kamar dalam waktu yang optimal. (c). Memiliki viskositas yang rendah disesuaikan dengan material penyangga. (d). Memiliki kelengketan yang baik dengan material penyangga. Epoksi terbentuk dari reaksi antara epiklorohidrin dengan bisfenol propane (bisfenol A) dengan persamaan reaksi sebagai berikut :



Gambar 2.9. Reaksi antara bisfenol A dan epiklorohidrin (Hyer, 1998)

Pembuatan dari jaringan epoksi yang sangat bagus dengan cara menambahkan *hardener* yang akan bereaksi dengan baik dengan struktur jaringan, maka kemampuan mekanik dari epoksi tergantung dari tipe *hardener* yang digunakan. Resin epoksi mengandung struktur *epoxy* atau *oxirene*. Resin ini berbentuk cairan kental atau hampir padat, yang digunakan untuk material ketika hendak dikeraskan.

Tabel 2.9. Spesifikasi matriks epoksi (Surdia, 1992)

Sifat-sifat	Satuan	Nilai Tipikal
Massa Jenis	Gram/cm ³	1,17
Penyerapan air (suhu ruang)	°C	0,2
Kekuatan Tarik	Kgf/mm ²	5,95
Kukuatan tekan	Kgf/mm ²	14
Kekuatan lentur	Kgf/mm ²	12
Temperatur pencetakan	°C	90

2.8. 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 :

a. 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 :

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).

2. 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 (cm³),

v_c = volume komposit (cm³)

b. Metode fraksi volume

Fraksi volume dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

1. Massa komposit

Massa komposit dapat dihitung dengan persamaan berikut:

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

2. Massa jenis komposit

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

3. Massa serat

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

4. 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)

ρ_c = massa jenis komposit (gr/cm³)

v_c = volume komposit (cm³)

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

V_m = fraksi volume matriks

ρ_m = massa jenis matriks (gr/cm³)

ρ_f = massa jenis serat (gr/cm³).

2.8.1. Uji *Bending*

Pengujian lentur merupakan salah satu pengujian sifat mekanik bahan yang dilakukan terhadap spesimen, baik yang akan digunakan sebagai konstruksi atau komponen yang akan menerima pembebanan lengkung maupun proses pelengkungan dalam pembentukan. Pelengkuan (*bending*) merupakan proses pembebanan terhadap suatu bahan pada suatu titik ditengah-tengah dari bahan yang ditahan diatas dua tumpuan.

Pengujian lentur ialah pengujian yang bertujuan untuk mengetahui aspek-aspek kemampuan bahan uji dalam menerima pembebanan lengkung, yakni (Prayoga, 2012) :

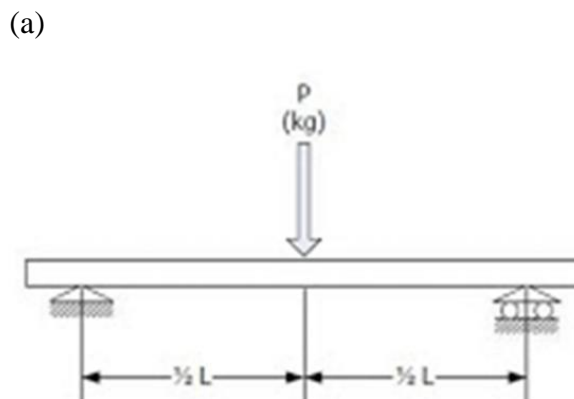
1. Kekuatan atau tegangan lengkung (σ)
2. Lentur atau defleksi (δ) sudut yang terbentuk oleh lenturan atau sudut defleksi
3. Elastisitas (E).

Pengujian *bending* dapat dilakukan dengan *Metode Three Point Bending* atau *Metode Four Point Bending* menurut kondisi dari benda uji yang dipergunakan. Biasanya pada benda uji dengan kerataan yang kurang begitu sempurna dilakukan dengan *Metode Three Point Bending*, akan tetapi dengan hasil yang kurang maksimal apabila dibandingkan dengan *Metode Four Point Bending*. Hal ini disebabkan terjadi konsentrasi pembebanan pada *Metode Three Point Bending*.

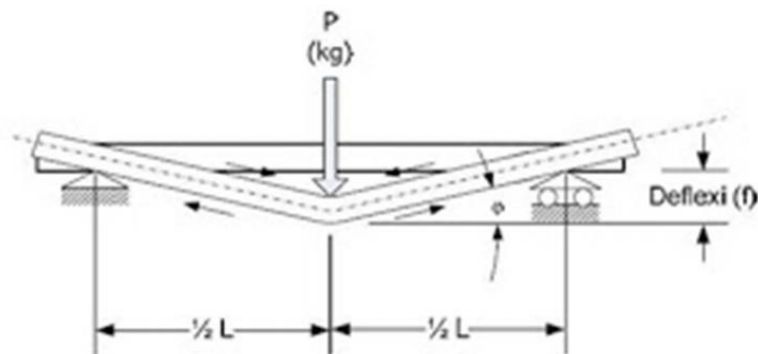
Metode *Three Point Bending*

Pada *three point bending*, spesimen atau benda dikenai beban pada satu titik yaitu tepat pada bagian tengah batang ($\frac{1}{2} L$). Pada metode ini spesimen harus tepat berada di $\frac{1}{2} L$, agar mendapatkan momen maksimum karena saat mencari σ dibutuhkan momen maksimum tersebut.

Berikut ini adalah ilustrasi dari pengujian kekuatan bending dengan *Metode Three Point Bending* :



(b)



Gambar 2.10. *Bending* Tiga Titik (Prayoga, 2012) : (a) sebelum dikenai beban (b) Setelah dikenai beban

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 2.18).

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

$$\sigma_b = 3PL/(2bd^2) \dots\dots\dots (2.6)$$

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

Dimana:

- σ_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:

$$\varepsilon_b = 6Dd/L^2 \dots\dots\dots (2.8)$$

Dimana:

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

Untuk mendapatkan nilai modulus elastisitas bending digunakan persamaan berikut:

$$E_B = L^3m/4bd^3 \dots\dots\dots (2.9)$$

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)

2.9. Karakteristik Patahan Pada Material Komposit

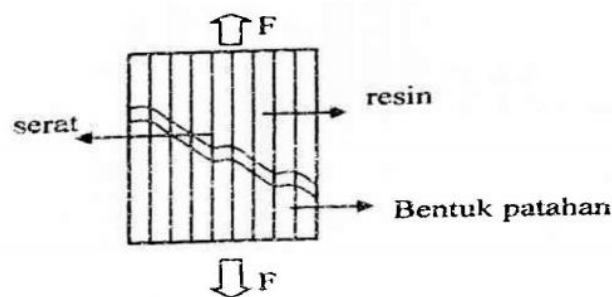
Patah didefinisikan sebagai pemisahan sebuah bahan menjadi dua atau lebih potongan sebagai respon terhadap tegangan statik yang berkerja dan pada temperatur yang relatif rendah terhadap temperatur cairnya. Dua model patah yang mungkin terjadi pada bahan teknik adalah patah liat (*ductile fracture*) dan patah getas (*brittle fracture*). Klasifikasi ini didasarkan pada kemampuan bahan

mengalami deformasi plastic. Bahan liat (*ductile*) memperlihatkan deformasi plastik dengan menyerap energi yang besar sebelum patah. Sebaliknya, patah getas hanya memperlihatkan deformasi palstik yang kecil atau bahkan tidak ada. Setiap proses perpatahan meliputi dua tahap yaitu pembentukan dan perambatan sebagai respon terhadap tegangan yang diterapkan. Jenis perpatahan sangat tergantung pada mekanisme perambatan retak.

Patahan material komposit dapat disebabkan oleh deformasi ganda, antara lain disebabkan oleh kondisi pembebanan serat struktur mikro komponen pembentuk komposit. Yang dimaksud struktur mikro ialah : diameter serat, fraksi volume serat dan distribusi serat. Kemungkinan lainnya adalah patahnya serat selama proses pembuatan, yang diakibatkan tegangan termal dan tegangan sisa. Jenis model patah material komposit antara lain adalah sebagai berikut:

2.9.1. Patah banyak

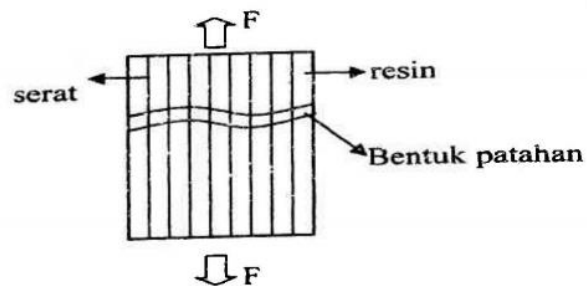
Menurut Chawla (1987), ketika jumlah serat yang putus akibat beban tarik masih sedikit dan kekuatan interface masih baik, resin mampu mendukung beban yang diterima dengan mendistribusikan beban tersebut ke sekitarnya. Apabila resin mampu menahan gaya geser dan meneruskan beban keserat yang lain maka jumlah serat yang putus semakin banyak. Patahan terjadi lebih dari satu bidang.



Gambar 2.11. Patah banyak (Schwartz, 1984)

2.9.2. Patah tunggal

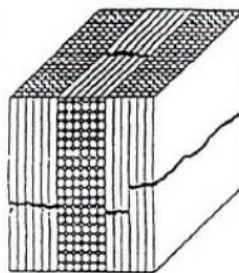
Menurut Chawla (1987), patah yang disebabkan ketika serat putus akibat beban tarik, resin tidak mampu menerima lagi beban tambahan. Patah terjadi satu bidang kontak.



Gambar 2.12. Patah tunggal (Schwartz, 1984)

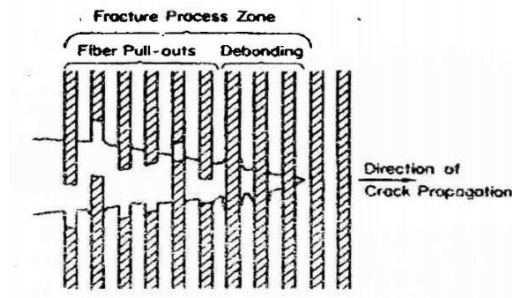
2.9.3. Deliminasi

Deliminasi (*interlaminar*) adalah perpatahan yang terjadi akibat terlepasnya ikatan antar lapisan komposit. 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 pada *core* secara sempurna sehingga dapat mengurangi kekuatan komposit secara keseluruhan. Gambar 2.21. menunjukkan deliminasi (Schwartz, 1984).



Gambar 2.13. Deliminasi (Schwartz, 1984)

2.9.4. *Fiber pull out*



Gambar 2.14. *Fiber pull out* (Schwartz, 1984)

Fiber pull out adalah tercabutnya serat dari matriks yang disebabkan ketika resin retak akibat beban tarik, kemampuan untuk menahan beban akan segera berkurang. Namun, komposit masih mampu menahan beban walau beban yang ditahan relatif kecil dari beban maksimal. Saat resin retak, beban akan ditransfer dari resin keserat di tempat persinggungan retak. Kemampuan untuk mendukung beban berasal dari serat. Seiring dengan bertambahnya deformasi, serat akan tercabut dari resin (akibat *debonding* dan patahnya serat).