

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Kajian Pustaka

Pemanfaatan serat alam sebagai bahan penguat komposit polimer mempunyai beberapa kelebihan diantaranya memiliki massa jenis yang rendah, sifat mekanik yang baik dan dapat diperbaiki karena berasal dari alam, mudah didaur ulang, dan murah (Mallick, 2007). Komposit berpenguat serat alam telah banyak dikembangkan dan diaplikasikan, salah satunya komposit berpenguat serat kenaf. Serat kenaf memiliki densitas yang rendah, ramah lingkungan dan harganya relatif murah jika dibandingkan dengan serat sintetis. Walaupun demikian penggunaan serat alam sebagai bahan penguat komposit terkadang tidak cukup untuk mengatasi kebutuhan desain produk komposit, karena kekuatan mekaniknya yang rendah dibandingkan dengan serat sintesis.

Berdasarkan hal tersebut maka dibuatlah komposit hibrida yang diperkuat oleh serat alam (kenaf) dan serat sintetis (*E-glass*), sehingga dapat meningkatkan sifat mekanis komposit (Salleh *et al.*, 2012). Penelitian tentang komposit berpenguat serat alam untuk aplikasi otomotif telah dilakukan, salah satunya untuk komponen interior dan eksterior otomotif (Jeyanthi & Janci Rani, 2012).

Modifikasi permukaan kenaf menggunakan larutan alkali 6 % NaOH selama satu jam pada temperatur ruangan merupakan konsentrasi optimum kenaf. Namun, konsentrasi larutan alkali > 6 % dan pada temperatur 100 °C dapat menyebabkan kerusakan (*defect*) permukaan serat, sehingga dapat menurunkan kekuatan mekanisnya (Sosiati *et al.*, 2015).

Sosiati, *et al* (2016) dalam penelitiannya tentang *bio composites fabricated by sandwiching sisal fibers with polypropylene* menggunakan mesin *hotpress* sebagai alat untuk mencetak spesimen komposit laminat. Temperatur dan tekanan yang digunakan masing-masing sebesar 170 °C dan 5.5 MPa selama 15 menit.

Pada penelitian pengaruh panjang serat alam (sisal) dengan orientasi serat acak terhadap kekuatan mekanis komposit berpenguat serat sisal dan bermatriks *epoxy* dihasilkan panjang serat optimal pada pengujian tarik yakni 10 mm dengan

kuat tarik sebesar 40.25 MPa. Pada pengujian bending panjang serat optimum 15 mm dengan *flexural strength* sebesar 128.79 MPa, sedangkan untuk ketahanan impak, ukuran panjang serat optimum 20 mm dengan besar energi yang dapat diserap sebesar 27.6295 KJ/m² (Om *et al.*, 2015).

Hibridisasi serat E *glass* pada komposit berpenguat serat sisal-E *glass*/LDPE dengan fraksi volume matrik & serat 80% / 20% dengan orientasi serat acak yang dilakukan oleh Kalaprasad *et al.*, (2004) mengungkapkan bahwa, pada perbandingan serat sisal – E *glass* 30/70 diperoleh nilai kuat tarik sebesar 31.23 MPa. Kuat tarik & modulus elastisitas tarik komposit akan meningkat seiring bertambahnya volume serat E *glass* (Kalaprasad *et al.*, 2004).

2.2. Dasar Teori

2.2.1. Komposit

Komposit merupakan material yang tersusun atas dua (atau lebih) material yang memiliki sifat berbeda yang berukuran makroskopis yang dapat dilihat oleh mata. Keunggulan dari material komposit yakni dapat dibuat sesuai dengan keinginan. Sifat mekanik material komposit dapat dikembangkan antara lain, kekuatan (*strength*), kekakuan (*stiffness*), ketahanan korosi (*corrosion resistance*), ketahanan aus (*wear resistance*), berat komposit, ketahanan lelah dan *life time* material komposit (Jones M, 1999).

Perkembangan teknologi komposit mulai berkembang dengan pesat. Material komposit digunakan dalam berbagai komponen untuk aplikasi otomotif, pesawat terbang, pesawat luar angkasa, kapal dan lain-lain (Jones M, 1999).

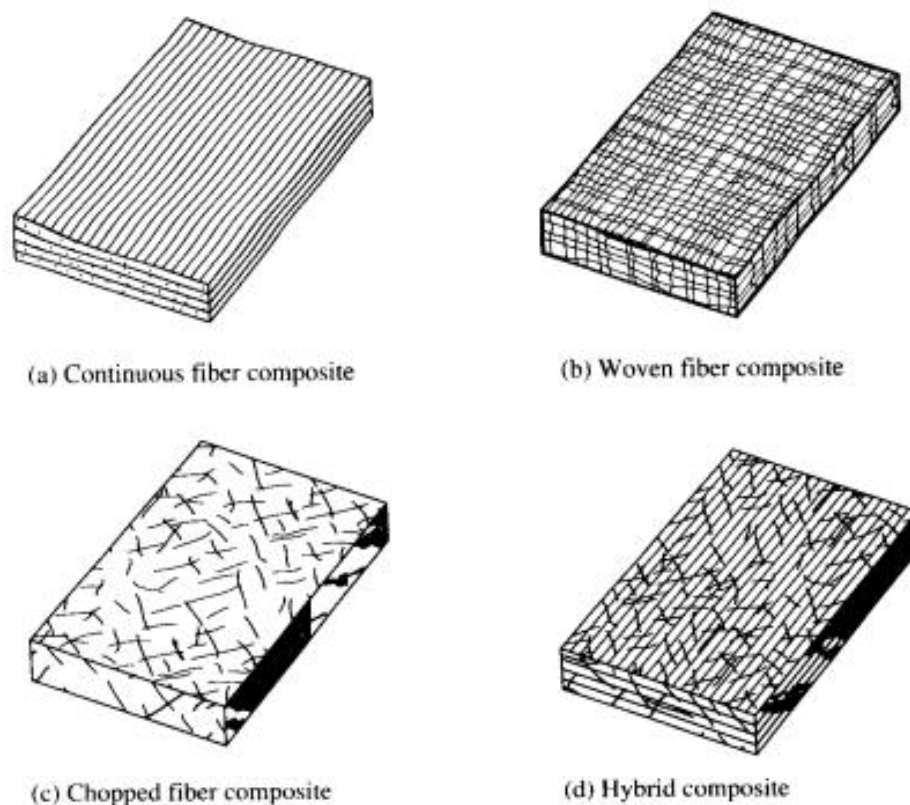
2.2.2. Klasifikasi Material Komposit

Material komposit dapat diklasifikasikan menjadi tiga macam jenis, diantaranya *fibrous composites* (komposit serat), *particulates composites* (komposit partikel) dan *laminates composites* (komposit lamina).

2.2.2.1. Komposit Serat

Komposit serat (*fiber reinforced composites*) merupakan material komposit yang terdiri dari serat dengan kekuatan yang tinggi (*high strength*) yang diikat

dengan matriks yang memiliki sifat fisik dan kimia yang berbeda. Pada umumnya serat berfungsi sebagai material yang menerima beban yang diterima komposit, sedangkan matriks berfungsi sebagai material pengikat antar serat yang menerima tegangan agar tidak terjadi dislokasi pada serat dan berfungsi untuk meneruskan tegangan diantara serat. Material matriks yang biasa digunakan sebagai material penyusun komposit adalah metal atau logam, polimer dan keramik, sedangkan material *fiber* (serat) yang umum digunakan adalah serat sintetis (serat gelas dan karbon) dan serat alam (Mallick, 2007). Berdasarkan orientasi serat, komposit berpenguat serat terbagi menjadi empat jenis, yakni *continuous fiber composite*, *woven fiber composite*, *chopped fiber composite* dan *hybrid composite*, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar. 2 (Gibson, 1994).

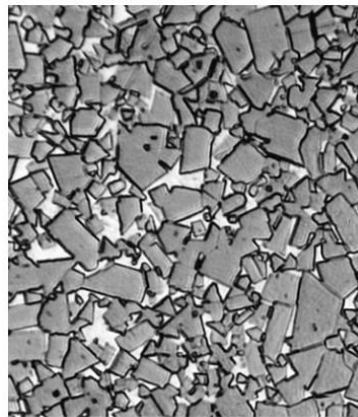


Gambar 2. Orientasi serat (Gibson, 1994).

2.2.2.2. Komposit Partikel

Material komposit partikel merupakan material komposit yang terdiri dari partikel-partikel yang tersuspensi kedalam matriks. Partikel tersuspensi kedalam

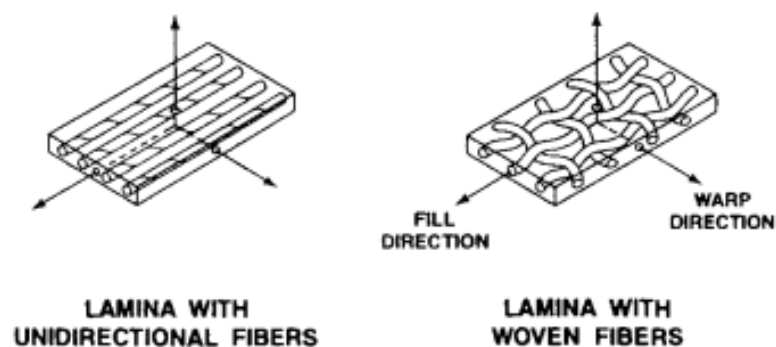
matriks dapat berupa logam maupun non logam yang berukuran $0.01 - 0.1 \mu\text{m}$ (10 - 100 nm) (Callister, 2007). Berikut ini merupakan *photomicrograph* dari material komposit partikel WC-Co, dimana area yang berwarna cerah merupakan *cobalt* yang berfungsi sebagai matriks dan area yang berwarna gelap merupakan *tungsten* sebagai partikel, seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 3.



Gambar 3. *Photomicrograph of WC-Co* (Callister, 2007).

2.2.2.3. Komposit Lamina

Komposit lamina merupakan material komposit yang terdiri dari beberapa lapis material berbeda. Laminasi digunakan untuk menggabungkan lapisan konstituen terbaik dan bahan pengikat (matriks) dengan tujuan untuk menghasilkan material yang diinginkan. Sifat-sifat yang dapat dihasilkan oleh laminasi adalah *strength, stiffness, low weight, corrosion resistance, wear resistance* dan *thermal insulation* (Jones M, 1999). Berikut ini merupakan ilustrasi komposit lamina, seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 4.



Gambar 4. Komposit lamina (Jones M, 1999)

2.2.3. Matrik

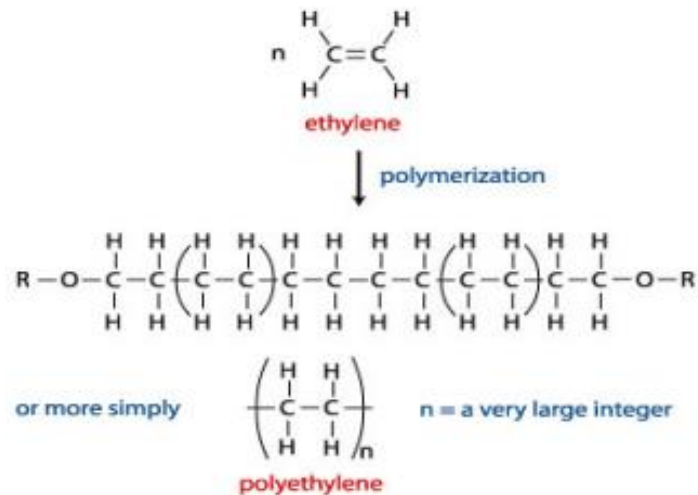
Matrik berfungsi sebagai material pengikat pada komposit berpenguat serat yakni, menjaga serat agar tidak terjadi dislokasi atau terdeformasi, meneruskan tegangan antar serat, melindungi serat dari kelembaban dan bahan kimia. Matriks pada komposit polimer terbagi menjadi dua jenis yakni, termoplastik dan termoset. Matriks termoset seperti *epoxy*, *polyester* dan *vynil ester* pada umumnya digunakan sebagai matriks *continuous* dan *long fibers reinforced composites*, karena mudah dalam proses pembuatannya dan memiliki viskositas rendah. Sedangkan matriks termoplastik seperti *polypropylene*, *PVC (polyvynil chloride)*, *LDPE (low density polyethylene)*, *HDPE (high density polyethylene)* pada umumnya digunakan sebagai matriks *short fibers reinforced composites* dikarenakan dalam proses pembuatannya menggunakan mesin *injection molding*. Namun, perkembangan teknologi komposit sangat pesat, sehingga dapat dikembangkan *continuous fibers composites* bermatriks termoplastik (Mallick, 2007).

2.2.3.1. Polyethylene

Polyethylene dibuat melalui proses polimerisasi monomer *ethylene* yang diproduksi dalam jumlah terbesar dibandingkan dengan plastik jenis lainnya. *Polyethylene* memiliki sifat ulet, lentur, tahan terhadap bahan kimia, serapan uap air rendah dan mudah diproses. Namun, *polyethylene* memiliki kelemahan antara lain: modulus elastisitas rendah, batas mulur rendah dan titik lebur rendah.

Polyethylene pada umumnya digunakan dalam pembuatan botol, lembaran film, pipa dan lain-lain. *Polyethylene* dapat dibuat dalam struktur homopolimer dan kopolimer. Pada struktur homopolimer *polyethylene* hanya tersusun dari *carbon* dan *hydrogen*, sehingga memiliki berat jenis relatif rendah (kurang dari 1). *Polyethylene* memiliki beberapa jenis antara lain: *LDPE (low density polyethylene)*, *LLDPE (linier low density polyethylene)*, *HDPE (high density polyethylene)* dan *UHMWPE (ultra high molecular weight polyethylene)* yang dibedakan oleh kerapatan (*density*) serta konfigurasi rantainya. Konfigurasi rantai molekul menentukan derajat kristal, berat molekul, serta sifat *thermalnya*. Sifat umum yang dimiliki *polyethylene* jika dilihat dari parameter proses adalah bahan ini sulit direkatkan dan sulit dilas dengan frekuensi tinggi dan dapat transparan pada

ketebalan film serta tahan terhadap bahan kimia (Budyantoro, 2009). Berikut ini merupakan polimerisasi *polyethylene* seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 5.



Gambar 5. Polimerisasi *polyethylene* (Budyantoro, 2009).

2.2.3.2. Low Density Polyethylene (LDPE)

Low density polyethylene (LDPE) dibuat dalam reaktor yang bekerja secara kontinyu dengan suhu dibawah 100 °C dan tekanan antar 6 hingga 20 atm. LDPE mempunyai gabungan sifat tahan kejut, lentur dan ulet, sehingga sangat tepat digunakan sebagai bahan plastik lembaran untuk kemasan. LDPE diproses dengan polimerisasi radikal bebas dengan grup cabang alkyl. Panjang cabang umumnya hingga empat *carbon* pada rantai cabang, dengan tekanan reaksi tinggi dihasilkan daerah kristalnya. Derajad kristal yang dihasilkan berkisar antara 400 hingga 50000 (Budyantoro, 2009). Berikut ini merupakan ilustrasi konfigurasi rantai LDPE dan tabel sifat dari LDPE, seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 6 dan Tabel 2.



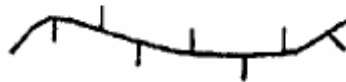
Gambar 6. Konfigurasi rantai LDPE (Budyantoro, 2009).

Tabel 2. Sifat LDPE (Budiyantoro, 2009).

Berat Jenis (g/cm ³)	T _m (°C)	T _g (°C)	Shrinkage (%)	Modulus Elastisitas (Gpa)
0.917 – 0.94	105-110	-110	2-4	0.13-0.3

2.2.3.3. Linear Low Density Polyethylene

Linier low density polyethylene (LLDPE) adalah jenis *polyethylene* yang diperkenalkan pada tahun 1977. LLDPE diproduksi dengan proses tekanan rendah dan memiliki struktur dengan rantai pendek melalui kecepatan pendinginan cairan, sehingga material membentuk struktur molekul yang saling terikat. Pada umumnya berat jenis LLDPE lebih mampu tarik dibanding dengan LDPE dan juga memiliki modulus elastisitas serta kelenturan yang lebih tinggi, sehingga dalam perkembangannya penggunaan material ini untuk film mengungguli popularitas LDPE. Sesuai dengan namanya, LLDPE memiliki rantai linier yang panjang tanpa rantai sisi atau cabang yang panjang (Budiyantoro, 2009). Berikut ini merupakan ilustrasi konfigurasi rantai LLDPE, seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 7.



Gambar 7. Konfigurasi rantai LLDPE (Budiyantoro, 2009).

Rantai pendek memungkinkan terhambatnya pembentukan kristal secara seragam hingga mencegah berat jenis yang tinggi. Dalam hal kemudahan proses, LLDPE juga lebih ekonomis jika dibanding dengan LDPE. Tekanan proses untuk LDPE memerlukan sekitar 35000 lb/in² dan pada LLDPE dapat dikurangi hingga 300 lb/in² dengan temperatur proses sekitar 100 °C (pada LDPE menggunakan temperatur 200 °C) (Budiyantoro, 2009). Berikut ini merupakan tabel sifat dari LLDPE, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Sifat LLDPE (Budyantoro, 2009).

Berat Jenis (g/cm ³)	T _m (°C)	T _g (°C)	Shrinkage (%)	Modulus Elastisitas (Gpa)
0.915-0.95	122-124	-110	2-2.5	0.27-0.53

2.2.3.4. High Density Polyethylene (HDPE)

Material ini memiliki massa jenis sekitar 0.935 hingga 0.965 gr/cm³ dan kandungan kristalnya lebih tinggi dari LDPE. Harganya juga sedikit lebih mahal, namun lebih kuat dan kaku. Proses polimerisasi menggunakan katalis berupa *metallocene* dengan keuntungan utama polimer yang dihasilkan lebih seragam jika dibanding dengan katalis tradisional (Ziegler-Natta) yang menghasilkan rantai beragam panjang pendeknya. Polimerisasi dilaksanakan dalam suatu reaktor berisi larutan hidrokarbon yang diaduk pada suhu 100 °C dengan tekanan hingga 30 atm dalam waktu kontak 0.5 sampai 2 jam. Dengan keseragaman ini dapat dihasilkan berat jenis polimer yang lebih tinggi, dimana berat molekulnya dicapai melalui kontrol suhu proses. Dalam rantai utama HDPE terdapat 4 hingga 10 cabang pendek untuk setiap 1000 atom C (Budyantoro, 2009). Berikut ini merupakan ilustrasi konfigurasi rantai HDPE, seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 8.



Gambar 8. Konfigurasi rantai HDPE (Budyantoro, 2009).

HDPE banyak dipakai pada proses produksi menggunakan *blow molding* untuk pembuatan botol, mainan, tangki, drum dan lain-lain. Banyak dipakai juga untuk pembuatan berbagai barang kebutuhan rumah tangga misalnya keranjang sampah, keranjang botol, pipa, dan wadah multi guna. Sedangkan dalam bentuk lembaran film, HDPE pada umumnya diaplikasikan sebagai kantong plastik dan kantong sampah (Budyantoro, 2009). Berikut ini tabel sifat dari HDPE, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Sifat HDPE (Budyantoro, 2009).

Berat Jenis (g/cm ³)	Tm (°C)	Tg (°C)	Shrinkage (%)	Modulus Elastisitas (Gpa)
0.94-0.97	130-135	-110	1.5 - 4	0.3-0.6

2.2.3.5. Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHMWP)

UHMW (*Ultra High Molecular Weight Polyethylene*) identik dengan HDPE tetapi memiliki berat molekul yang lebih tinggi. Besarnya berat molekul berpengaruh pada peningkatan ketahanan terhadap abrasi, keuletan, serta ketahanan terhadap regangan retak (*stress cracking*), namun akan membuatnya lebih sulit diproses secara konvensional. Hal ini disebabkan oleh rantai molekul yang terikat secara kuat sehingga titik leburnya secara praktis sulit ditentukan bahkan cenderung mendekati titik dekomposisi. UHMWPE sering diproses dalam bentuk bubuk dengan proses *ram extruder* atau *compression molding*. Aplikasi dari bahan ini adalah sebagai lapisan pelumas pada otomotif untuk melindungi gesekan antar logam, juga banyak dipakai untuk peralatan ski dan alat-alat medis. Perkembangan terakhir dari aplikasinya adalah sebagai baju pelindung dengan kemampuan setara dengan Kevlar (Budyantoro, 2009).

2.2.4. Serat

Serat merupakan konstituen utama pembentuk material komposit berpenguat serat (*fiber reinforced composites*). Serat menempati sebagian besar fraksi volume pada komposit lamina dan berfungsi untuk meneruskan beban yang diterima struktur komposit. Pemilihan jenis serat, fraksi volume serat, panjang serat dan orientasi serat sangat penting, karena dapat mempengaruhi karakteristik komposit yang telah dibuat. Berikut ini merupakan tabel sifat mekanik dari beberapa serat yang digunakan sebagai *filler* pada komposit berpenguat serat (P.K. Mallick, 2007).

Serat yang biasa digunakan dalam komposit bermatriks polimer yakni serat sintetis dan serat alam. Berikut ini merupakan tabel sifat mekanis serat sintetis dan serat alam, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Sifat mekanis serat komersil (Holbery & Houston, 2006).

Fiber	Density (g/cm³)	Elongation (%)	Tensile Strength (MPa)	Elastic Modulus (GPa)
Cotton	1.5–1.6	7.0–8.0	400	5.5–12.6
Jute	1.3	1.5–1.8	393–773	26.5
Flax	1.5	2.7–3.2	500–1,500	27.6
Hemp	1.47	2–4	690	70
Kenaf	1.45	1.6	930	53
Ramie	—	3.6–3.8	400–938	61.4–128
Sisal	1.5	2.0–2.5	511–635	9.4–22
Coir	1.2	30.0	593	4.0–6.0
Softwood Kraft Pulp	1.5	4.4	1,000	40.0
E-glass	2.5	0.5	2,000–3,500	70.0
S-glass	2.5	2.8	4,570	86.0
Aramid (Std.)	1.4	3.3–3.7	3,000–3,150	63.0–67.0
Carbon (Std. PAN-based)	1.4	1.4–1.8	4,000	230–240

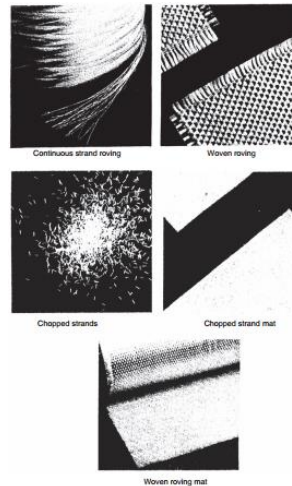
2.2.4.1. Serat E glass

Serat gelas merupakan salah satu serat sintetis yang banyak digunakan pada komposit polimer. Kelebihan dari serat gelas adalah *low cost*, *high tensile strength*, *high chemical resistance* dan sebagai insulator yang baik. Kekurangan dari serat gelas yakni *relatively low fatigue resistance*, memiliki tingkat abrasi yang tinggi (*during handling*) sehingga dapat menurunkan kekuatan mekanisnya, densitas yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan serat sintetis lainnya.

Pada umumnya serat gelas memiliki tiga jenis tipe serat yakni E-glass, S-glass dan C-glass. Dimana E-glass memiliki harga yang relatif murah dan umumnya digunakan untuk material penguat pada komposit polimer. S-glass pada umumnya dikembangkan sebagai material penyusun pada komponen pesawat (*aircraft component*), karena S-glass memiliki *tensile strength* yang tinggi dibandingkan dengan tipe serat gelas yang lainnya. Sedangkan C-glass merupakan serat yang memiliki ketahanan terhadap korosi yang tinggi, sehingga dapat diaplikasikan pada industri kimia (*chemical application*). Berikut ini merupakan tabel komposisi dan gambar bentuk dari serat gelas, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 6 dan Gambar. 9.

Tabel 6. Komposisi dari serat gelas (P.K. Mallick, 2007).

Type	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	B ₂ O ₃	Na ₂ O
E-glass	54.5	14.5	17	4.5	8.5	0.5
S-glass	64	26	—	10	—	—



Gambar 9. Bentuk dari serat gelas (Mallick, 2007).

2.2.4.2. Serat Kenaf

Kenaf merupakan salah satu tanaman tropis tahunan yang memiliki batang tunggal bercabang yang terdiri atas serat pada bagian luar dan *woody core* pada bagian dalam. Tanaman kenaf dapat tumbuh hingga 5 – 6 m dengan diameter 25-35 mm dan dapat dipanen setelah berumur 5-6 bulan. Serat kenaf memiliki keunggulan yakni memiliki sifat *biodegradable* dan ramah lingkungan (Cook, 1960). Pada tahun 1950 sampai dengan pertengahan 1980 penelitian kenaf dilakukan oleh The U.S. *Department of Agricultural Research service* untuk aplikasi serat kenaf sebagai material alternatif pembuatan kertas (Bosisio, 1988).

Serat kenaf diperoleh dari kulit pohon yang terikat dengan serat *lignocellulosic*. Ukuran ikatan serat tergantung dari sel utama disetiap ikatan, yang biasanya ditunjukkan dengan kandungan *lignin*. Kandungan *lignin* dalam serat kenaf mempresentasikan jumlah sel utama disetiap ikatan serat. Serat kenaf tersusun atas 65.7 % selulosa, 21.6 % terdiri dari *lignin*, *pectin* dan komposisi lainnya. *Lignin* harus diekstraksi untuk memisahkan serat (Kaldor, 1989).

2.2.5. Alkalisasi

Alkalisasi pada serat alam dilakukan dengan tujuan untuk melarutkan kotoran yang menempel dilapisan luar serat dan kandungan lignin, karena lignin merupakan matriks pembungkus selulosa pada serat alam. Larutan yang biasa digunakan dalam proses alkalisasi adalah NaOH (Natrium Hidroksida), KOH (Kalium Hidroksida) dan LiOH (Lithium Hidroksida). Serat yang telah dilakukan alkalisasi memiliki sifat *hydrophillic*, dikarenakan lignin yang masih menempel pada selulosa telah larut. Sehingga, tingkat penyerapan moisture menjadi lebih tinggi jika proses alkalisasi yang terlalu lama dan konsentrasi yang tinggi. Sifat *hydrophillic* pada selulosa menyebabkan ikatan antara matriks polimer dan serat menjadi kurang baik, dikarenakan matriks polimer memiliki sifat *hydrophobic*. Proses alkalisasi yang tepat dapat memperbaiki kompatibilitas serat alam dengan matriks polimer, dikarenakan lignin yang menempel pada selulosa tidak larut seluruhnya, karena lignin memiliki sifat *hydrophobic* yang kompatibel dengan matriks (John & Anandjiwala, 2008).

2.2.6. Densitas Komposit

Massa total komposit merupakan jumlah total antara massa *fiber* dan matriks pada material komposit, berikut ini merupakan rumus untuk menghitung jumlah total massa dan *volume* komposit seperti yang ditunjukkan pada persamaan 2.1 dan 2.2.

$$M_c = M_f + M_m \text{ (gr)} \dots\dots\dots(2.1)$$

dimana, M_f = massa serat/*fiber* (gr)

M_m = massa matrik (gr)

M_c = massa komposit (gr)

$$V_c = V_f + V_m + V_v \text{ (cm}^3\text{)} \dots\dots\dots(2.2)$$

dimana, V_c = volume komposit (cm³)

V_f = volume serat (cm³)

V_m = volume matrik (cm³)

V_v = volume *void* (gelembung udara) (cm³)

Sehingga, massa jenis komposit, ρ_c (g/cm^3), adalah

$$M_f = \rho_f \cdot V_f \text{ (gr)} \dots \dots \dots (2.3)$$

$$M_m = \rho_m \cdot V_m \text{ (gr)} \dots \dots \dots (2.4)$$

$$\rho_c = \frac{M_c}{V_c} \text{ (gr/cm}^3\text{)} \dots \dots \dots (2.5)$$

Dimana : ρ_f = massa jenis serat (gr)

ρ_m = massa jenis matrik (gr)

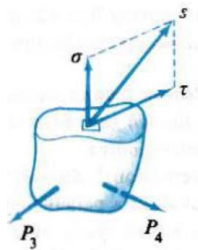
$$\text{Maka: } \rho_c = \frac{\rho_f \cdot V_f + \rho_m \cdot V_m}{V_f + V_m + V_v} \text{ (gr/cm}^3\text{)} \dots \dots \dots (2.6)$$

Pada kenyataannya volume *void* (V_v) relatif sangat kecil, sehingga V_v dapat diabaikan (Chawla, 1998).

2.2.7. Mekanika Material Komposit

2.2.7.1. Tegangan

Popov (1984) menyatakan bahwa intensitas gaya yang bekerja pada luasan yang kecil tak berhingga suatu potongan berubah-ubah dari suatu titik ke titik lain, umumnya intensitas ini berarah miring pada bidang potongan. Dalam praktek keteknikan biasanya intensitas gaya diuraikan menjadi tegak lurus dan sejajar dengan irisan yang sedang diselidiki. Penguraian intensitas gaya ini pada luasan kecil takberhingga diperlihatkan dalam Gambar. 10, intensitas gaya yang tegak lurus atau normal terhadap irisan disebut tegangan normal (*normal stress*) pada sebuah titik dilambangkan dengan huruf Yunani σ (*sigma*).



Gambar 10. Komponen tegangan normal dan geser (Popov,1984).

Suatu tegangan tertentu yang dianggap benar-benar bertitik tangkap pada sebuah titik, secara matematis didefinisikan sebagai

$$\sigma = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} \dots\dots\dots(2.7)$$

Dimana F adalah suatu gaya yang bekerja tegak lurus terhadap potongan, sedangkan A merupakan luas yang bersangkutan. Tegangan normal yang menghasilkan tarikan (*traction* atau *tension*) pada permukaan sebuah potongan disebut tegangan tarik (*tensile stress*), untuk tegangan normal yang mendorong potongan tersebut disebut tegangan tekan (*compressive stress*).

Komponen lain dari intensitas gaya yang bekerja sejajar dengan bidang miring dari luas elementer disebut tegangan geser (*shearing stress*) dan dilambangkan dengan abjad Yunani τ (tau). Secara sistematis didefinisikan sebagai

$$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{\Delta A} \dots\dots\dots(2.8)$$

dimana A menyatakan luas sedangkan V adalah komponen gaya yang sejajar dengan potongan.

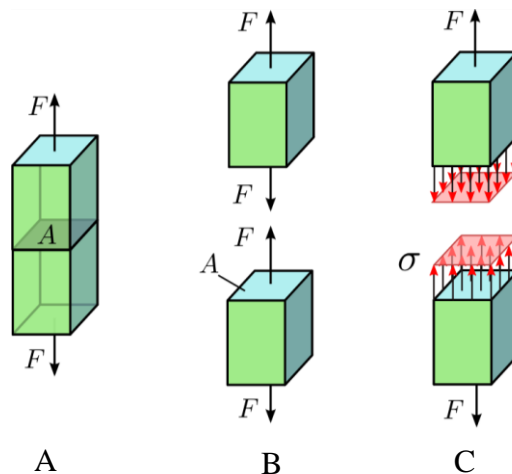
Tegangan normal dan geser merupakan intensitas gaya pada sebuah luas, maka tegangan diukur dalam satuan gaya dibagi dengan satuan luas. Karena gaya adalah *vector* sedangkan luas adalah suatu *scalar* maka hasil dari keduanya yang dinyatakan sebagai komponen-komponen gaya dalam arah tertentu adalah suatu besaran *vector*.

Tegangan tarik yang bekerja pada potongan seperti pada Gambar. 11, merupakan tegangan maksimum, sedangkan potongan yang lain yang tidak tegak lurus pada sumbu mempunyai permukaan yang lebih luas untuk melawan gaya terpakai. Tegangan maksimum merupakan tegangan paling penting karena akan menyebabkan kegagalan bahan tersebut. Untuk memperoleh ungkapan aljabar dari tegangan maksimum perhatikan Gambar 11.A, bagian batang yang berada pada potongan $x - x$ berada dalam keseimbangan. Pada potongan tersebut dimana luas penampang batang 11.A dengan gaya (F) yang setara haruslah terbentuk seperti diperlihatkan pada Gambar 11.B dan C. Berikut ini merupakan rumus dari tegangan normal.

$$\sigma = \frac{F}{A} \text{ atau } \frac{\text{gaya}}{\text{luas}} \dots\dots\dots(2.9)$$

Dengan :

- σ = Tegangan normal (N/m²)
- F = Gaya yang bekerja (N)
- A = Luas penampang (m²)



Gambar 11. Analisis tegangan sebuah benda (Popov,1984).

2.2.7.2. Regangan

Regangan (*strain*) didefinisikan sebagai perbandingan nilai pertambahan panjang (ΔL) dengan panjang awal (L_0) yang disebabkan dua gaya pada ujung benda yang berlawanan arah (menjauhi pusat benda). Berikut ini merupakan rumus dari regangan.

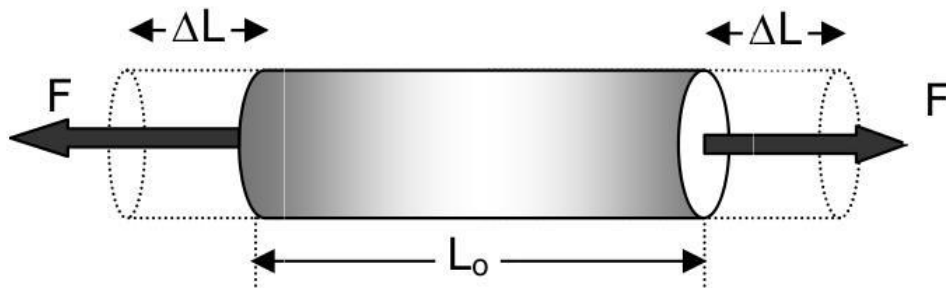
$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \dots\dots\dots(2.10)$$

Dimana:

- ε = regangan
- ΔL = perubahan panjang (mm)
- L_0 = Panjang awal (mm)

Regangan merupakan besaran yang tidak berdimensi, tetapi lebih baik memiliki dimensi meter per meter atau m/m. Kadang-kadang regangan diberikan

dalam bentuk persentase (%). Besarnya regangan sangat kecil, kecuali untuk beberapa bahan seperti karet. Berikut ini merupakan ilustrasi gambar regangan yang terjadi pada sebuah benda seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 12.



Gambar 12. Regangan (Popov,1984).

2.2.7.3. Hukum Hooke

Hubungan antara tegangan dan regangan berbentuk linier untuk semua material, hal ini menuju kepada idealisasi dan penyamarataan (generalisasi) yang berlaku untuk semua material, yang dikenal sebagai hukum Hooke. Hukum Hooke dinyatakan dalam persamaan (2.11).

$$\sigma = E \varepsilon \dots \dots \dots (2.11)$$

atau

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \dots \dots \dots (2.12)$$

Dengan :

E = modulus elastisitas (N/m^2)

σ = tegangan (N/m^2)

ε = regangan

Secara sederhana tegangan berbanding lurus dengan regangan, karena ε tidak berdimensi maka dari persamaan 2.10 mempunyai satuan tegangan dalam SI yaitu (N/m^2) atau Pa. Nilai modulus elastisitas merupakan suatu sifat yang pasti dari suatu bahan (popov, 1984).

2.2.7.4. Rule Of Mixture

Untuk memprediksi kuat tarik, regangan tarik dan modulus elastisitas tarik material komposit, maka dapat diperhitungkan menggunakan rumus *rule of mixture*, dengan catatan sifat mekanis dan fraksi volume komposit telah diketahui.

Berikut ini merupakan persamaan *rule of mixture* untuk mencari modulus elastisitas komposit, seperti yang ditunjukkan pada persamaan.

$$E_t = E_f V_f + E_m V_m \dots \dots \dots (2.13)$$

Sedangkan untuk *randomly oriented discontinuous fiber composites* diperlukan faktor efisiensi panjang dan orientasi serat. Berikut ini merupakan persamaan model Cox-Krenchel, seperti yang ditunjukkan pada persamaan.

$$\sigma_t = X_1 X_2 \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \dots \dots \dots (2.14)$$

$$E_t = X_1 X_2 E_f V_f + E_m V_m \dots \dots \dots (2.15)$$

$$\epsilon_t = \sigma_t / E_t \dots \dots \dots (2.16)$$

Dimana, X_1 dan X_2 merupakan efisiensi faktor efisiensi panjang dan orientasi serat, σ_t E_t dan ϵ_t merupakan kuat tarik, modulus elastisitas tarik dan regangan tarik komposit, V_f dan V_m merupakan fraksi volume serat dan matrik. Faktor orientasi serat dapat dilihat pada Tabel 7 sedangkan faktor panjang serat dapat diselesaikan menggunakan persamaan 2.17 dan 2.18.

Tabel 7. Faktor orientasi serat (H. Krenchel, *Fibre Reinforcement*, Copenhagen: Akademisk Forlag, 1964).

<i>Fiber Orientation</i>	<i>Stress Direction</i>	<i>Reinforcement Efficiency</i>
All fibers parallel	Parallel to fibers	1
	Perpendicular to fibers	0
Fibers randomly and uniformly distributed within a specific plane	Any direction in the plane of the fibers	$\frac{3}{8}$
Fibers randomly and uniformly distributed within three dimensions in space	Any direction	$\frac{1}{5}$

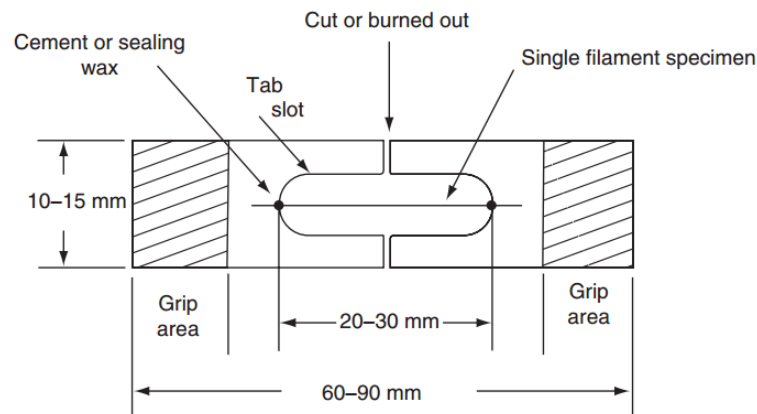
$$X_1 = 1 - \frac{\tanh\left(\frac{\zeta L_f}{2}\right)}{\frac{\zeta L_f}{2}} \dots \dots \dots (2.17)$$

$$\zeta = \frac{1}{r} \frac{E^m}{E_f(1-\nu) \ln\left(\frac{\pi}{4V_f}\right)^{\frac{1}{2}}} \dots \dots \dots (2.18)$$

L_f dan r merupakan panjang serat dan radius serat, ν merupakan *poisson ratio* matrik dan E_f merupakan modulus elastisitas matrik (Lopez, *et al.*, 2012).

2.2.8. Pengujian Serat Tunggal

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui besarnya kuat tegangan tarik maksimum, regangan patah dan modulus elastisitas serat tunggal. Standar yang bisa digunakan antara lain ASTM D3379. Skema spesimen uji tarik serat tunggal ditunjukkan pada Gambar. 13.



Gambar 13. Spesimen uji tarik serat tunggal, ASTM D 3379.

Serat sebagai spesimen uji harus benar-benar lurus dan bebas dari tegangan awal (*initial stress*). Serat dibenamkan pada *holder* yang pada umumnya terbuat dari polimer. Celah dibuat dengan cara dipotong atau dibakar dengan sangat hati-hati, setelah spesimen dipasang pada mesin uji untuk menjamin serat yang telah dicor pada posisi lurus akan tetap lurus selama pengujian.

Luas penampang, A (mm^2), diukur secara planimetri dari foto optik atau secara *optic individual fiber* yang menjadi sample. Setelah dipasang pada mesin uji dan dibuat celahnya, maka spesimen dibebani secara gradual sampai putus dan secara simultan grafik gaya versus perpanjangannya, F vs Δl , direkam. Dengan demikian, maka tegangan patah serat adalah

$$\sigma_f = F_{\max} / A \text{ (MPa)} \dots \dots \dots (2.19)$$

dimana F_{\max} (N) adalah gaya tarik pada waktu patah. Untuk rentang tertentu dari bagian linier grafik F vs Δl -nya, harga modulus elastisitas (E) serat dapat dihitung sebagai berikut.

$$E_f = (\Delta F/A) / (\Delta l/l) / 1000 \text{ (GPa)} \dots\dots\dots(2.20)$$

dengan ΔF (N) adalah perubahan besar gaya tarik, sedangkan Δl dan l (mm) adalah perubahan panjang dan panjang awal serat. Sedangkan besar regangan pada suatu titik tertentu dapat dihitung dengan

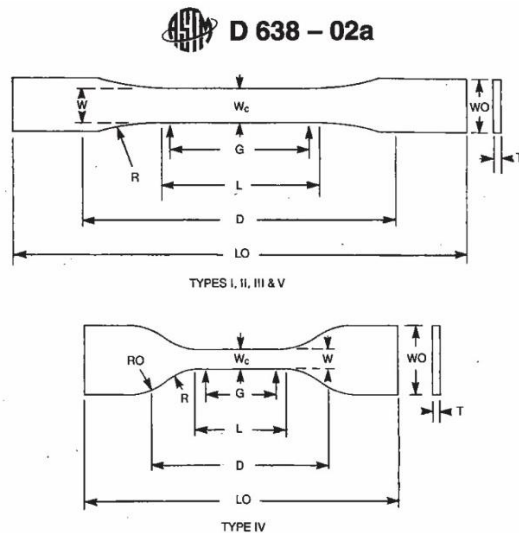
$$\epsilon_f = \Delta l / l \text{ (mm/mm)} \dots\dots\dots(2.21)$$

2.2.9. Pengujian Tarik Komposit

Pengujian kuat tarik matrik polimer dapat dilakukan menurut standar ASTM D638, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 8 dan Gambar. 14.

Tabel 8. Dimensi spesimen ASTM D 638-02a.

Dimensions (see drawings)	Specimen Dimensions for Thickness, T, mm (in.) ^a					Tolerances
	7 (0.28) or under		Over 7 to 14 (0.28 to 0.55), incl	4 (0.16) or under		
	Type I	Type II	Type III	Type IV ^B	Type V ^{C,D}	
W—Width of narrow section ^{E,F}	13 (0.50)	6 (0.25)	19 (0.75)	6 (0.25)	3.18 (0.125)	±0.5 (±0.02) ^{B,C}
L—Length of narrow section	57 (2.25)	57 (2.25)	57 (2.25)	33 (1.30)	9.53 (0.375)	±0.5 (±0.02) ^C
WO—Width overall, min ^G	19 (0.75)	19 (0.75)	29 (1.13)	19 (0.75)	...	+ 6.4 (+ 0.25)
WO—Width overall, min ^G	...	...	...	...	9.53 (0.375)	+ 3.18 (+ 0.125)
LO—Length overall, min ^H	165 (6.5)	183 (7.2)	246 (9.7)	115 (4.5)	63.5 (2.5)	no max (no max)
G—Gage length ^I	50 (2.00)	50 (2.00)	50 (2.00)	...	7.62 (0.300)	±0.25 (±0.010) ^C
G—Gage length ^I	...	...	...	25 (1.00)	...	±0.13 (±0.005)
D—Distance between grips	115 (4.5)	135 (5.3)	115 (4.5)	65 (2.5) ^J	25.4 (1.0)	±5 (±0.2)
R—Radius of fillet	76 (3.00)	76 (3.00)	76 (3.00)	14 (0.56)	12.7 (0.5)	±1 (±0.04) ^C
RO—Outer radius (Type IV)	...	...	...	25 (1.00)	...	±1 (±0.04)



Gambar 14. Dimensi spesimen ASTM D 638-02a.

Spesimen bisa dicetak langsung sebagaimana bentuk yang diperlukan, atau bisa juga dicetak sebagai bahan lembaran kemudian dipotong dengan alat pemotong

bermata intan, semacam alat pemotong ubin keramik, lalu sisi-sisinya diampelas untuk menghilangkan kerusakan yang mungkin terjadi akibat pemotongan. Perpanjangan yang terjadi dalam pengujiannya dapat diukur dengan ekstensometer atau dengan pengukuran langsung regangan yang terjadi dengan menggunakan *strain gage*. Bila diperlukan pengukuran angka perbandingan *poisson*-nya, maka bisa digunakan *strain gage* roset saling tegak lurus yang dipasang berorientasi pada arah memanjang dan melintang. Untuk spesimen yang cukup tebal, 5 (mm) atau lebih), *strain gage* harus digunakan untuk menghindari pengaruh sensitivitas melintang.