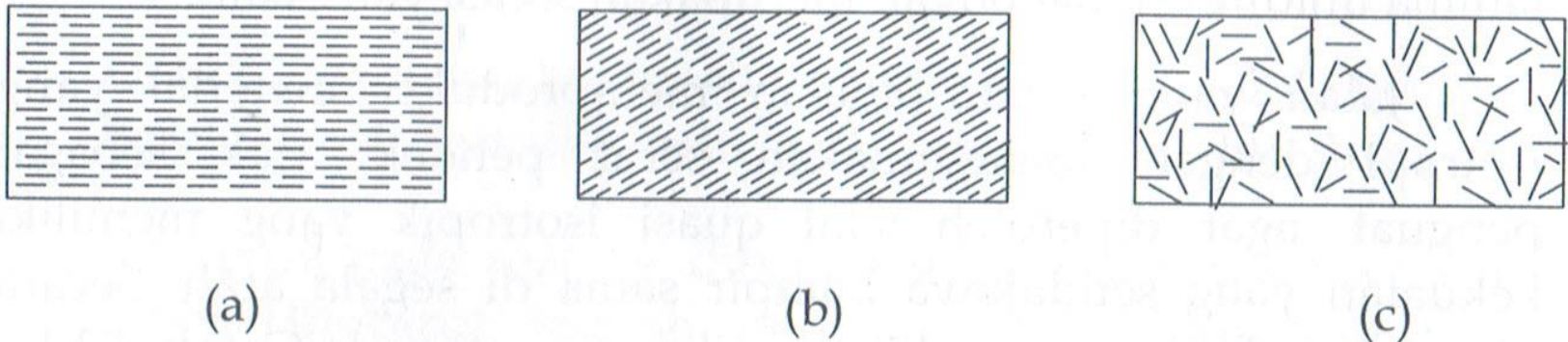


Bab 3

Komposit Serat Pendek




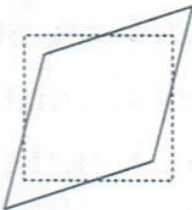

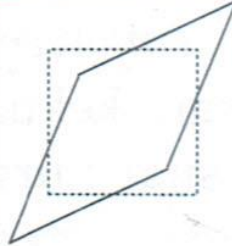

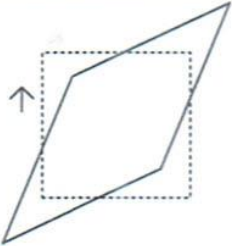
- Komposit unidireksional memiliki kekuatan dan modulus elastisitas tertinggi pada arah sumbu serat dan terlemah pada arah tegak lurus sumbu serat.
- Pada pembebanan yang tidak bisa diprediksi arahnya, maka komposit unidireksional tidak efektif dan dibutuhkan komposit isotropik (kekuatannya sama untuk segala arah)
- komposit serat pendek acak mempunyai kekuatan yang hampir sama disegala arah (isotropik)



Gambar 3.1 orientasi serat pendek: a). teratur; b).teratur off axis; c). acak

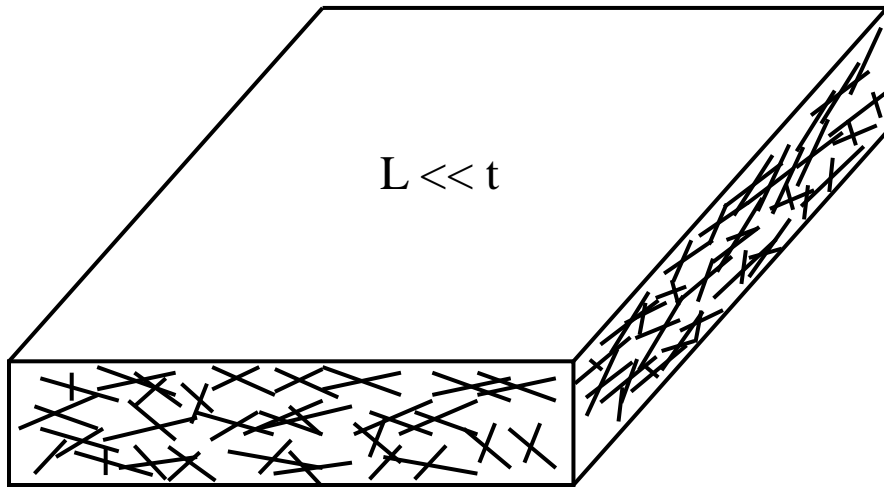


Perilaku Mekanik Komposit

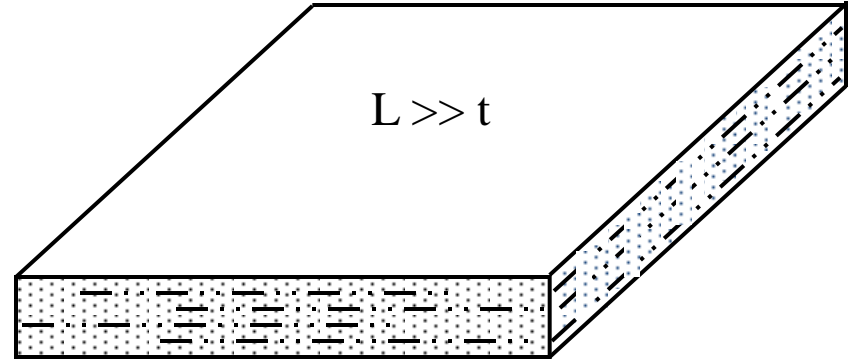
Isotropi		Orthotropi		Anisotropi	
					
Teg normal	Teg geser	Teg normal	Teg geser	Teg normal	Teg geser

- **Material Isotropi**, gaya normal menyebabkan perpanjangan pada arah pembebanan dan pemendekan pada arah tegak lurus. sedangkan gaya geser menyebabkan deformasi geser
- **Material Orthotropi**, gaya normal pada arah utama menyebabkan deformasi tarik searah pembebanan dan deformasi tekan ke arah tegak lurus pembebanan dengan nilai deformasi berbeda dengan material isotropi (tergantung modulus elastis dan angka poisson). begitu juga dengan deformasi geser akibat gaya geser.
- **Material Anisotropi**, pembebanan arah normal menyebabkan deformasi searah dan tegaklurus beban, juga pada arah deformasi geser. demikian juga dengan pembebanan geser juga menyebabkan deformasi geser pada arah kombinasi. hal yang sama terjadi pada material orthotropi dengan beban normal pada arah non prinsipal

3 dimensional dan 2 dimensional serat orientasi random



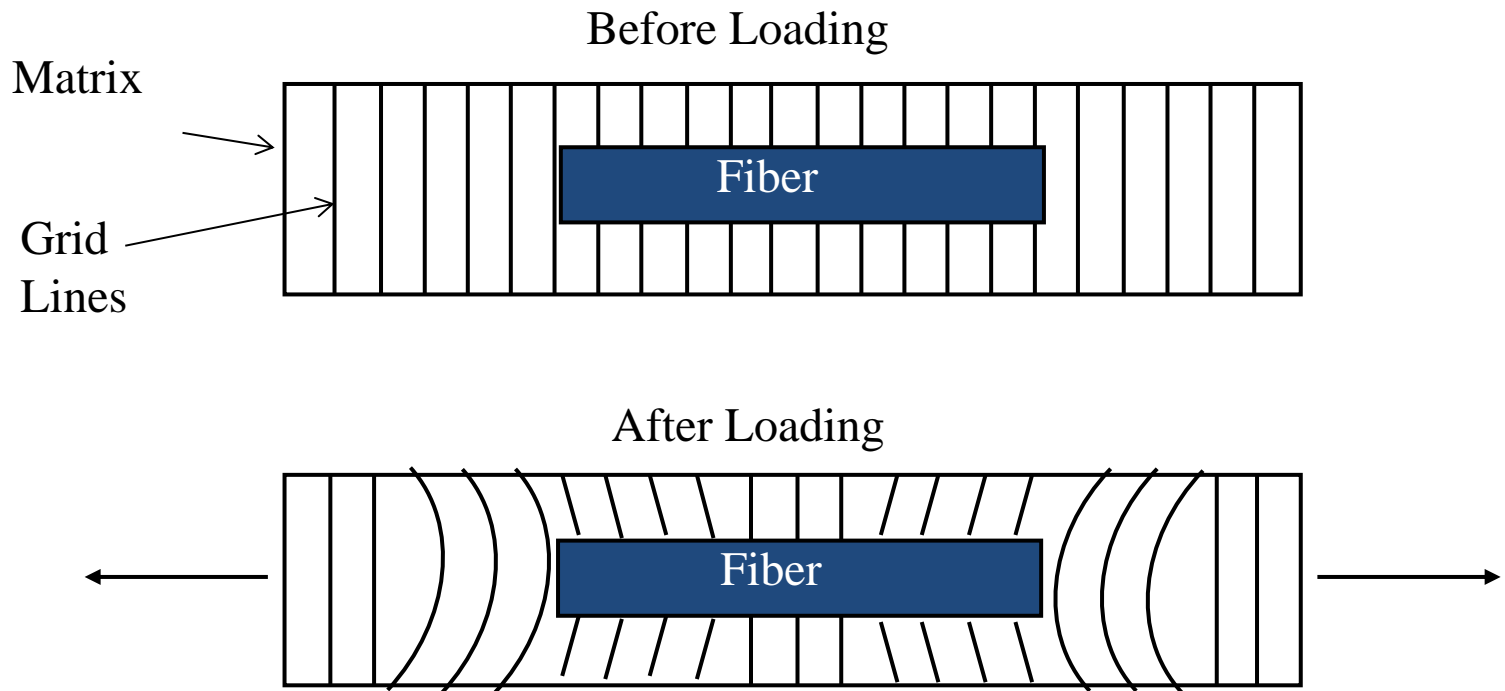
(a) panjang serat kurang dari tebal bahan, maka serat diorientasikan secara random dalam 3 dimensi



(b) panjang serat lebih dari tebal bahan, maka serat diorientasikan secara random dalam 2 dimensi.

Teori Transfer Tegangan

- Ketika panjang serat melebihi length over (panjang serat tempat mentransfer beban), maka efek ujung (end effect) dapat diabaikan dan serat dipertimbangkan sebagai serat kontinyu.
- Pada serat pendek, efek ujung tidak dapat diabaikan, karena berpengaruh pada distribusi tegangan sebagai fungsi panjang serat

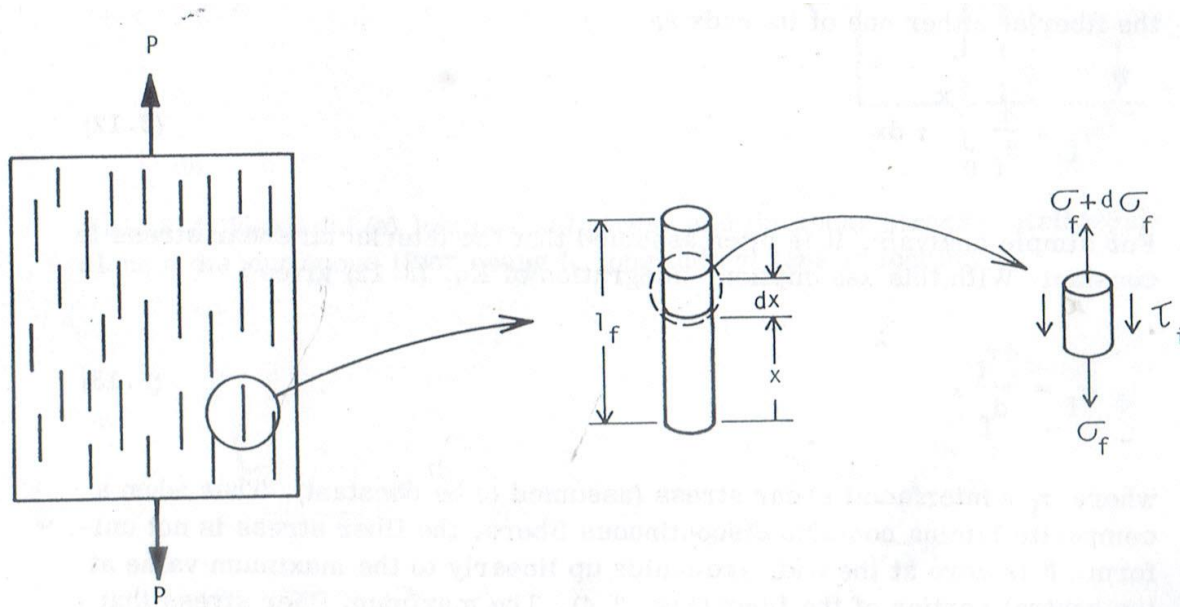


Gambar. 3.2. deformasi geser sepanjang serat diskontinyu

- Distribusi tegangan geser di interface serat-matrik di ujung serat tidak sama dengan ditengah serat

3.1 Serat Diskontinu Sejajar

3.1.1 Pembebanan Tarik Longitudinal



Gambar. 3.3. Kestimbangan gaya paralel pada serat diskontinyu

- Kestimbangan gaya

- Disederhanakan menjadi:

$$\left(\frac{\pi}{4} d_f^2\right)(\sigma_f + d\sigma_f) - \left(\frac{\pi}{4} d_f^2 \sigma_f\right) - \pi d_f dx \cdot \tau = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{d\sigma_f}{dx} = \frac{4\tau}{d_f} \quad \dots\dots\dots(3.1)$$

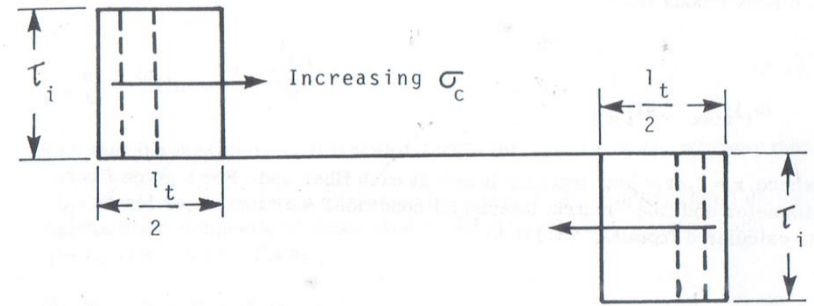
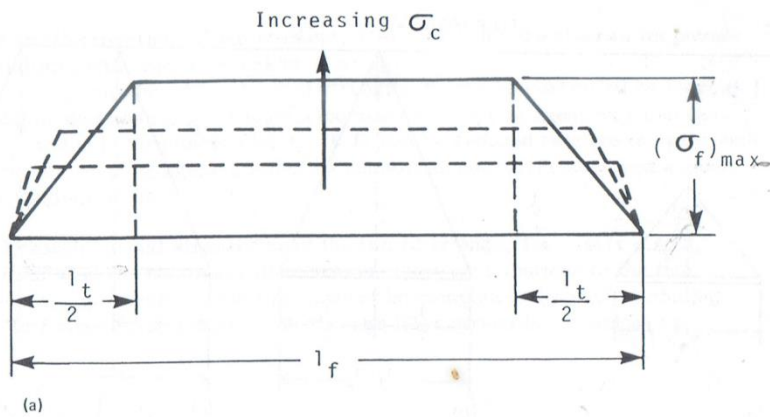
- Dimana: τ = teg geser di interface serat- matrik
 σ_f = teg serat longitudinal pada jarak x dari ujung serat
 d_f = diameter serat

- Diasumsikan tidak ada tegangan yang dipindahkan pada ujung serat, $\sigma_f = 0$ pada $x=0$, maka distribusi teg normal pada salah satu ujungnya :

$$\sigma_f = \frac{4}{d_f} \int_0^x \tau \cdot dx \quad \dots\dots\dots(3.2)$$

- untuk penyederhanaan analisa, maka diasumsikan bahwa tegangan geser antarmuka konstan sehingga didapat:

$$\sigma_f = \frac{4 \cdot \tau_i \cdot x}{d_f} \quad \dots\dots\dots(3.3)$$



Gambar. 3.4. Distribusi : a). tegangan longitudinal; b). tegangan geser sepanjang serat diskontinyu untuk pembebanan longitudinal

- Pada komposit lamina serat diskontinyu, tegangan serat tidak seragam. nilainya nol pada ujung dan meningkat secara linier ke nilai maksimum di bagian tengah serat.
- Tegangan serat maksimum yang dapat dicapai saat pembebanan adalah

$$(\sigma_f)_{\max} = \frac{2 \cdot \tau_i \cdot l_t}{d_f} \dots\dots\dots(3.4)$$

Dimana:

$x = l_t/2$ = panjang transfer beban di setiap ujung serat.

τ_i = tegangan geser antarmuka = τ_y = tegangan geser luluh matrik

- Untuk kondisi ikatan antarmuka serat-matrik dan diameter serat yang diberikan, maka panjang kritis serat (l_c) adalah

$$\frac{l_c}{d_f} = \frac{(\sigma_{fu})}{2\tau_i} \dots\dots\dots(3.5)$$

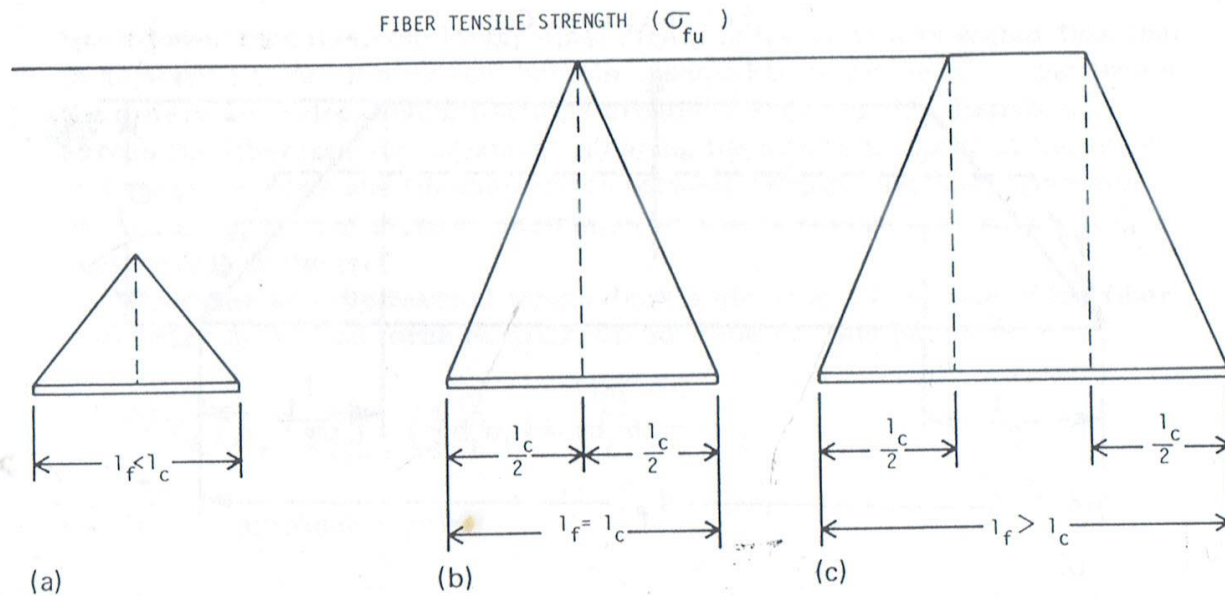
- Dimana:

σ_{fu} = tegangan serat ultimate

l_c = panjang minimum serat yang dibutuhkan agar tegangan serat sama dengan tegangan ultimate serat

τ_i = tegangan geser antarmuka = τ_y = tegangan geser luluh matrik

Distribusi tegangan serat pada variasi panjang serat



Gambar. 3.5. Panjang kritis serat pada tegangan longitudinal serat diskontinu

- Untuk $l_f < l_c$, tegangan maksimum serat tidak pernah mencapai tegangan ultimate serat, dlm kasus ini ikatan antarmuka serat-matrik atau matrik akan rusak sebelum serat mencapai tegangan ultimate
- Untuk $l_f > l_c$, tegangan maksimum serat mencapai tegangan ultimate serat. untuk jarak lebih dari $l_c/2$ dari ujung serat, serat tetap tidak efektif
- Untuk penguatan serat yang efektif, maka $l_f \gg l_c$

Untuk $x < l_t/2$, tegangan normal diujung lebih rendah dari tegangan maksimum serat. Tegangan rata-rata serat:

$$\bar{\sigma}_f = \frac{1}{l} \int_0^l \sigma_f \cdot dz$$

$$\bar{\sigma}_f = (\sigma_f)_{\max} \left(1 - \frac{l_t}{2l} \right), l > l_t \quad \dots\dots\dots(3.6)$$

- Catatan : Panjang untuk mentransfer beban maksimum saat $l_f < l_c$ adalah l_f , sedangkan untuk $l_f > l_c$ adalah l_c

1. Untuk $l_f > l_c$, tegangan tarik longitudinal komposit serat diskontinu, $(\sigma_f)_{\max} = \sigma_{fu}$ dan $l_t = l_c$

$$\begin{aligned} \sigma_{Ltu} &= \sigma_{fu} \cdot v_f + \sigma'_m \cdot (1 - v_f) \\ &= \sigma_{fu} \cdot \left(1 - \frac{l_c}{2l_f}\right) v_f + \sigma'_m \cdot (1 - v_f) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(3.7)$$

- Untuk $l_f > 5 l_c$, lebih dari 90% penguatan dapat diperoleh dengan serat kontinu

2. Untuk $l_f < l_c$, tidak ada serat yang patah. dua mode kegagalan yang mungkin terjadi adalah:

- a. Kegagalan ikatan antarmuka yang diikuti dengan fiber pull out dari matrix. Kekuatan tarik longitudinal komposit :

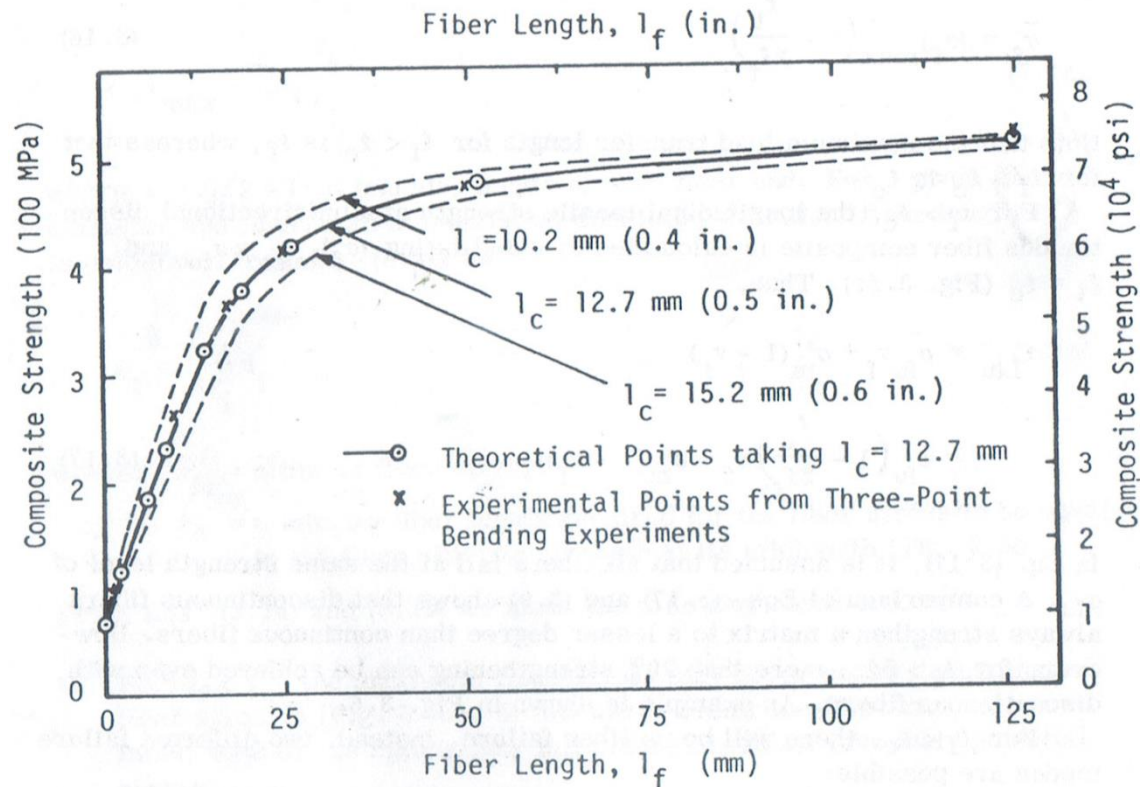
$$\sigma_{Ltu} = \tau_m \cdot \frac{l_f}{d_f} v_f + \sigma'_m \cdot (1 - v_f) \quad \dots\dots\dots(3.8)$$

- Dimana: τ_m = tegangan geser antarmuka serat-matrik
 σ'_m = tegangan matrik saat fiber pullout

2. b. matrix patah, sehingga Kekuatan tarik longitudinal komposit :

$$\sigma_{Ltu} = \tau_i \cdot \frac{l_f}{d_f} v_f + \sigma_{mu} \cdot (1 - v_f) \quad \dots\dots\dots(3.9)$$

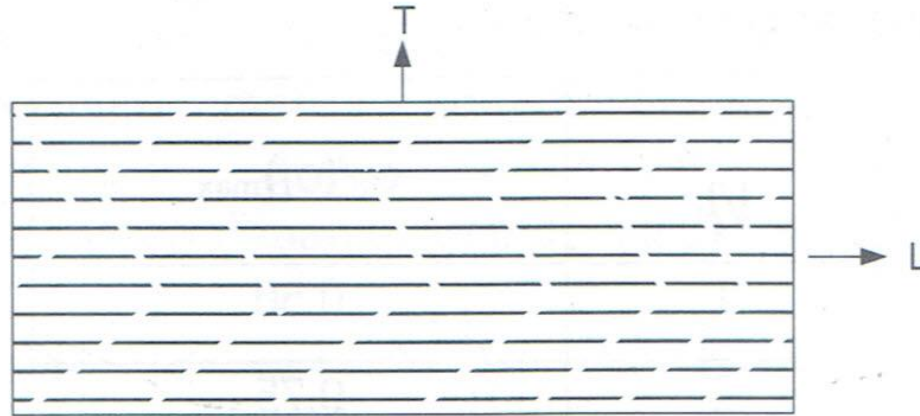
- Dimana: σ_{mu} = tegangan tarik matrik



Gambar. 3.6. variasi kekuatan longitudinal komposit diskontinu paralel sebagai fungsi panjang serat.

Kekuatan dan Modulus Komposit Serat Pendek

- Modulus longitudinal dan modulus transversal **komposit serat pendek lurus** dapat diprediksi dengan persamaan Halpin-Tsai



- **untuk arah longitudinal**

$$E_L = \frac{1 + 2l/d \cdot \eta_L \cdot V_f}{1 - \eta_L \cdot V_f} \cdot E_m \quad \dots\dots\dots(3.10)$$

dimana:

$$\eta_L = \frac{\left(\frac{E_f}{E_m} \right) - 1}{\left(\frac{E_f}{E_m} \right) + 2 \left(\frac{l}{d} \right)}$$

- untuk arah transversal

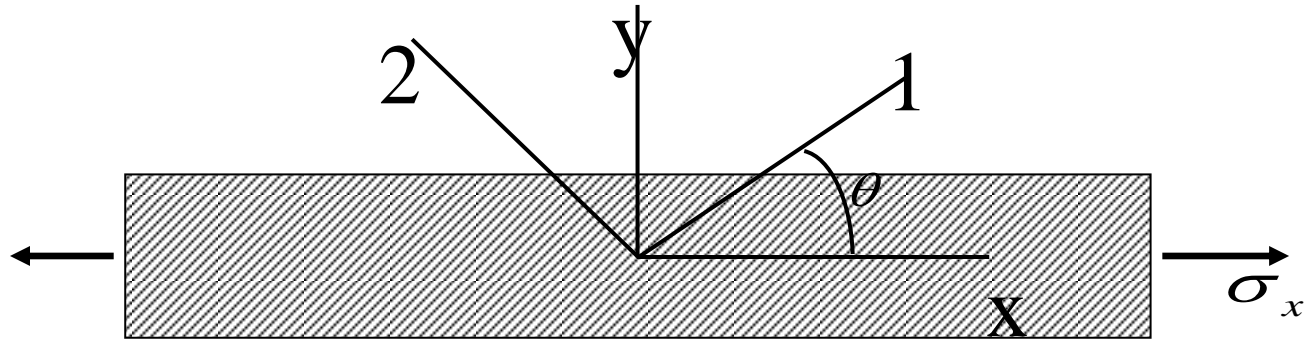
$$E_T = \frac{1 + 2 \cdot \eta_T \cdot V_f}{1 - \eta_T \cdot V_f} \cdot E_m \quad \dots\dots\dots(3.11)$$

dimana:

$$\eta_T = \frac{\left(\frac{E_f}{E_m} \right) - 1}{\left(\frac{E_f}{E_m} \right) + 2}$$

3.2 Serat diskontinu miring -

analisa kekuatan 2-D



Transformasi tegangan:

$$\text{Teg. longitudinal} = \sigma_L = \sigma_1 = \sigma_x \cos^2 \theta$$

$$\text{Teg. transversal} = \sigma_T = \sigma_2 = \sigma_x \sin^2 \theta \quad (3.12)$$

$$\text{Teg. Geser. Bidang} = \tau_{LT} = \tau_{12} = -\sigma_x \cos \theta \sin \theta$$

Tegangan komposit

$$\sigma_c = \left[\frac{\cos^4 \theta}{\sigma_L^2} + \left(\frac{1}{\tau_{LT}^2} - \frac{1}{\sigma_L^2} \right) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \frac{\sin^4 \theta}{\sigma_T^2} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (3.13)$$

Modulus young komposit

$$E_c = \frac{1}{\frac{1}{E_L} \cos^4 \theta + \left[-\frac{2\nu_{12}}{E_L} + \frac{1}{G_{12}} \right] \cos^2 \theta \sin^2 \theta + \frac{1}{E_T} \sin^4 \theta} \quad (3.14)$$

3.3 Serat Random

1. Modulus Elastisitas **komposit serat pendek random** dapat diprediksi dengan persamaan:

$$E_{random} = \frac{3}{8} \cdot E_L + \frac{5}{8} \cdot E_T \quad \dots\dots\dots(3.15)$$

2. Modulus Geser **komposit serat pendek random** :

$$G_{random} = \frac{1}{8} \cdot E_L + \frac{1}{4} \cdot E_T \quad \dots\dots\dots(3.16)$$

3. Poisson rasio:

$$\nu_{random} = \frac{E_{random}}{2G_{random}} - 1 \quad \dots\dots\dots(3.17)$$

4. Kekuatan Tarik **komposit serat pendek random** :

$$\sigma_c = \frac{2\tau_{LT}}{\pi} \left[1 + \frac{\sigma_T}{\sigma_m} + \ln \frac{\sigma_T \sigma_m}{\tau_{LT}} \right] \quad \dots\dots\dots(3.18)$$

Dimana : τ_{LT} = tegangan geser bidang, σ_T = tegangan tarik transversal,
 σ_L = tegangan tarik longitudinal, σ_m = tegangan matrik

Contoh 1. Komposit epoxy/ serat grafit pendek serba searah harus dibuat sehingga berperilaku sebagai komposit serat kontinu dengan modulus komposit (E_c) = 80 GPa. serat berdiameter 0,01 mm memiliki modulus elastisitas (E_f) = 240 GPa dan kekuatan tarik (σ_f) = 2,5 GPa. Matriks epoksi dapat diasumsikan sebagai bahan plastik kaku dengan kekuatan geser luluh (τ_y) = 20 MPa. Tentukan (a) panjang serat yang diperlukan untuk mencapai “tegangan serat kontinu “di titik tengah untuk tegangan komposit 50 MPa dan (b) panjang serat dan tegangan komposit yang diperlukan kekuatan tarik ultimat serat tercapai

Jawab:

Diketahui: $E_c = 80$ GPa, $d_f = 0.01$ mm, $E_f = 240$ GPa, $\sigma_f = 2.5$ GPa, $\tau_y = 20$ MPa

a. Besarnya “Tegangan serat kontinu” adalah:
$$\sigma_{f \max} = \frac{E_f \cdot \sigma_c}{E_c} = \frac{240 \cdot 50}{80} = 150 \text{ MPa}$$

- Dari persamaan 3.4 akan diperoleh panjang serat yang dibutuhkan:

$$l_t = \frac{\sigma_{f \max} \cdot d_f}{2 \cdot \tau_y} = \frac{150 \cdot 0.01}{2 \cdot 20} = 0.0375 \text{ mm}$$

b. Panjang serat dikaitkan dengan tegangan serat ultimate dapat dihitung dengan Pers. 3.5

$$l_c = \frac{(\sigma_{fu})}{2 \tau_i} d_f = \frac{2500}{2 \cdot 20} \cdot 0.01 = 0,625 \text{ mm}$$

Besarnya tegangan komposit:
$$\sigma_c = \frac{E_c \cdot \sigma_f}{E_f} = \frac{80 \cdot 2.5}{240} = 0.833 \text{ GPa} = 833 \text{ MPa}$$

Contoh 2. Komposit epoxy/ serat graphite pendek dengan orientasi random dibuat dengan fraksi volume serat 50,6%, modulus longitudinal (E_1)= 113 GPa, modulus longitudinal (E_2) =5,65 GPa, Teg. tarik transversal (σ_T)= 66.9 MPa, teg matrik (σ_m)= 37.95MPa. Asumsikan tegangan geser bidang (τ_{LT})= 60 MPa dan panjang serat lebih besar dibanding tebal bahan. Hitunglah modulus tarik, modulus geser , poisson rasio dan tegangan tarik komposit.

Jawaban.

- Dari persamaan 3.15 diperoleh modulus young sebesar:

$$E_{random} = \frac{3}{8} \cdot E_L + \frac{5}{8} \cdot E_T = \frac{3}{8} (113) + \frac{5}{8} (5,65) = 45,9 GPa$$

- Dan Modulus Geser (pers 3.16):

$$G_{random} = \frac{1}{8} \cdot E_L + \frac{1}{4} \cdot E_T = \frac{1}{8} (113) + \frac{1}{4} (5,65) = 15,54 GPa$$

- Dan Poisson rasio (pers 3.17):

$$\nu_{random} = \frac{E_{random}}{2G_{random}} - 1 = \frac{45,9}{2(15,54)} - 1 = 0,47$$

- Dan Kekuatan tarik komposit (pers 3.18):

$$\sigma_c = \frac{2\tau_{LT}}{\pi} \left[1 + \frac{\sigma_T}{\sigma_m} + \ln \frac{\sigma_T \sigma_m}{\tau_{LT}^2} \right] = \frac{2(60)}{\pi} \left[1 + \frac{66,9}{37,95} + \ln \frac{66,9(37,95)}{60^2} \right] = 92,2 MPa$$