# BAB II
# DASAR TEORI

## 2.1. KLASIFIKASI DAN DEFINISI MATERIAL KOMPOSIT

Untuk mendefinisikan material komposit, diperlukan identifikasi yang jelas tentang material ini. Pengidentifikasian tersebut dapat dilakukan dengan klasifikasi sebagai berikut :

Material

- komposit/komplek ( > $10^{-8}$ m )
  - makro komposit ( > $10^{-6}$m )
  - mikro komposit ($10^{-8}$- $10^{-6}$) m
- monolitik ( < $10^{-8}$ m )

Pembagian material menjadi dua kelompok besar yaitu komposit dan monolitik yang didasarkan pada perbedaan jumlah unsur materi pembentuk. Komposit mempunyai dua atau lebih komponen pembangun. Sedangkan monolitik terdiri atas satu unsur pembangun.

Komposit dapat dibedakan menjadi makro komposit dan mikro komposit. Hal ini didasarkan tidak hanya pada ukurannya saja, tetapi juga fase dispersi dalam pembuatan komposit tersebut. Dikatakan makro komposit jika satu atau lebih fase dispersi dapat dibedakan dan secara makroskopik lebih besar $10^{-6}$m yang melewati sumbu panjang. Sedangkan jika seluruh fase tunggal antara $10^{-8}$- $10^{-6}$ m disebut mikro komposit.

Komposit lebih cenderung mengarah pada skala makro sebagai bagian dari komponen engineering yang

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. ( http://eprints.undip.ac.id)

terdiri atas gabungan beberapa material. Hal ini dimaksudkan untuk mendapatkan sifat utama bahan, selain itu juga untuk memberi visualitas yang bagus, serta sebagai bahan alternatif pengganti.

Dalam ruang lingkup material komposit, ada tiga hal yang dapat dimasukkan dalam pendekatan terhadap definisi material komposit untuk aplikasi strukturnya, yaitu :

1. Berisi dua material atau lebih yang dapat dibedakan baik secara fisik maupun secara mekanik.
2. Dapat dibuat dengan mencampur material-material yang semula terpisah dengan suatu cara sehingga distribusi material yang satu dengan yang lain dapat dikontrol sampai sifat bahan yang optimum.
3. Mempunyai sifat utama dan kemungkinan adanya sifat unik dari komponen pembangunnya.

Hal yang terakhir ini yang diharapkan pada hasil pembuatan komposit. Yakni penggabungan dua material atau lebih dengan sifat utama, sehingga menghasilkan material yang sifatnya jauh lebih baik atau sesuai dengan yang dibutuhkan. Misalnya dalam fiber reinforced plastic, fiber dan plastik masing-masing memiliki sifat yang berbeda. Fiber memiliki kekuatan dan modulus yang sangat tinggi, tetapi hanya pada fiber dengan diameter 7 - 15 mikrometer dan biasanya mudah rusak (dalam susunannya). Sedangkan plastik mempunyai kemampuan tahan di lingkungan kimia.



This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. ( http://eprints.undip.ac.id)

Dari penggabungan kedua material tersebut, diperoleh suatu material baru yang kekuatan dan kekakuannya menyerupai sifat fiber, tahan di lingkungan kimia seperti plastik dan ada satu sifat lagi akibat penggabungan ini yaitu material tersebut mempunyai ketahanan terhadap penjalaran retakan dan menyerap energi selama deformasi.

Dari sedikit gambaran di atas secara umum material komposit dapat didefinisikan sebagai campuran atau kombinasi dua jenis material atau lebih yang masing-masing dapat dibedakan secara fisis, mekanis maupun senyawanya dan masih memiliki sifat aslinya. Sedangkan di sini material komposit diartikan sebagai material yang terdiri atas serat (fiber) sebagai komponen penguat dan resin sebagai komponen pengikat (matriks).

## 2.2. PERBANDINGAN MATERIAL KOMPOSIT DAN KONVENSIONAL.

Material komposit dan material konvensional tidak dapat dibandingkan hanya pada kekuatan dan kekerasannya saja, karena dari sudut pandang ini keunggulan fiber reinforced tidak begitu kentara. Bahkan dalam perbandingan kekuatan, fiber reinforced tercatat lebih getas (mudah patah). Keunggulan material komposit dari material konvensional terlihat ketika keduanya diperbandingkan dalam hal modulus persatuan berat (modulus jenis) dan kekuatan per

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. ( http://eprints.undip.ac.id)

satuan berat. Hal ini berarti bahwa pada berat yang sama fiber reinforced mempunyai kekuatan lebih besar . Kenyataan ini berguna sekali pada komponen alat yang bergerak dalam sistim transportasi, karena efisiensi berat akan berpengaruh besar pada energi dan kemampuan angkut. Selain mempunyai kekuatan dan kekakuan yang tinggi, material komposit tahan terhadap korosi, dapat menahan perambatan panas dan selain itu juga dapat meredam suara.

## 2.3. STRUKTUR POLIMER

Polimer adalah suatu molekul raksasa (makro molekul) yang terbentuk dari perulangan satuan-satuan sederhana monomernya. Berawal dari polimer alam, perkembangan teknologi polimer memungkinkan pembuatan berbagai macam polimer sintetis seperti nylon, polykarbonat, propylen, epoxy dan lain-lain. Dalam pembuatan material komposit, proses polimerisasi yakni proses pembentukan polimer dari monomer-monomernya terjadi selama proses curing.

Ruang lingkup polimer sangat luas dan rumit. Bila dibedakan menurut reaksinya terhadap lingkungan yang mempengaruhi proses dan penggunaannya, dapat disebutkan dua macam polimer yaitu polimer termoset dan polimer termoplastik.

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. ( http://eprints.undip.ac.id)

### 2.3.1. TERMOSET

Yang dimaksud dengan termoset adalah suatu plastik yang ketika diproses dalam aplikasi panas atau kimiawi terjadi perubahan bentuk cair menjadi padatan keras yang tersusun atas bentuk jaringan tiga dimensi rantai polimer. Setelah material termoset terbentuk, maka dia tidak akan berubah oleh panas atau meleleh (*infusible*) dan tidak pula oleh zat kimia (*insoluble*). Mempunyai sifat mekanik yang bergantung pada satuan molekul penyusun jaringan dan pada panjang serta kerapatan rantai silangnya. Bentuknya ditentukan oleh zat kimia awal yang dipakai serta kelanjutan dalam kontrol proses rantai silang selama curing. Curing dapat dilakukan dalam temperatur kamar tetapi biasanya digunakan urutan curing yang melibatkan panas awal sehingga dicapai rantai silang (*cross link*) dan sifat optimum yang diharapkan. Penyusutan selama curing dan kontraksi termal saat pendinginan setelah curing dapat menimbulkan tekanan pada komposit.

Resin termoset biasanya isotropik yakni sifatnya tidak berubah dengan adanya perubahan arah. Sifat lentur akibat respon panas berguna pada perubahan bentuk untuk menyesuaikan bentuk komponen. Ada juga yang stabil pada temperatur tinggi seperti aromatik polyamide / kevlar dan polyimide. Tabel 2.1 menunjukkan bahwa resin epoxy punya kekuatan dan elastisitas yang baik dengan pengerutan yang kecil



This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. ( http://eprints.undip.ac.id)

pada curing dan koefisien ekspansi termalnya kecil. Selain itu kekuatan ikatan antar permukaan antara resin dan fiber juga lebih tinggi resin epoxy. Tetapi epoxy tidak bermanfaat jika mempunyai viskositas yang lebih tinggi sebelum curing.

Tabel 2.1. Perbandingan sifat resin epoxy dan polyester dalam material komposit.

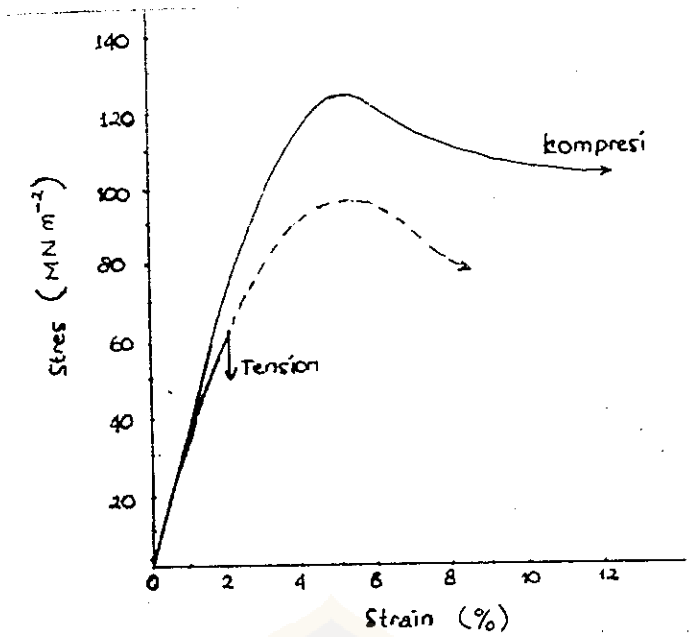
| Sifat | Satuan | Resin Epoxy | Resin Polyester |
|---|---|---|---|
| Density | $Mgm^{-3}$ | 1,1-1,4 | 1,2-1,5 |
| Modulus Young | $GNm^{-3}$ | 3 - 6 | 2 -4,5 |
| Poisson Rasio | | 0,38-0,4 | 0,37-0,39 |
| Tensile strength | $MNm^{-2}$ | 35 -100 | 40 - 90 |
| Compressiv strength | $MNm^{-2}$ | 100-200 | 90 - 250 |
| Tension | % | 1 - 6 | 2 |
| Konduktivitas termal | $Wm^{-1}{}^{o}C$ | 0,1 | 0,2 |
| Koef.Ekspansi termal | $10^{-6}{}^{o}C^{-1}$ | 60 | 100-200 |
| Suhu distorsi panas | $^{o}C$ | 50 -300 | 50 -110 |
| Penyusutan pada curing | % | 1 - 2 | 4 - 8 |
| Absorbsi air (24 h , 20°C) | % | 0,1-0,4 | 0,1-0,3 |

Resin termoset pada dasarnya dianggap rapuh. Dapat dilihat dari gambar di bawah, yang menggambarkan kurva tegangan-regangan. Patahan tension terjadi pada 63 $MNm^{-2}$ dan regangan 2,0 % yang tidak menunjukkan tanda pecah sebelumnya. Perubahan bentuk terlihat pada proses kompresi dan tidak kentara pada tegangan sebab patahan prematur berbaur dengan keretakan material. Pada tension rasio yakni hasil dari perbandingan kuat kompresi dan kuat tegangan = 1,3. Garis patah pada tegangan menunjukkan bahwa pecah prematur dari



This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. ( http://eprints.undip.ac.id)

stres-strain diabaikan.




gb.2.1. Kurva stres-strain.

Ada tiga cara untuk membuat material fiber reinforced dengan resin termoset, yaitu :

1. Dengan *wet processing* yaitu meresapkan resin berviskositas rendah ke dalam fiber kering, dalam urutan sebagai berikut :
   a. Dengan *wet lay-up* yakni meresapkan resin ke dalam fiber berbentuk anyaman menggunakan rolling dan pressing
   b. Dengan *wet winding* atau *filamen winding* melewatkan fiber pada kolam resin sebelum digulung atau dianyam sesuai dengan bentuk yang dikehendaki.
   c. Dengan *resin injection*, fiber ditempatkan dalam cetakan tertutup, kemudian resin diinjeksikan

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. ( http://eprints.undip.ac.

ke dalam cetakan dengan tekanan luar.

Keberhasilan proses ini tergantung rata kandungan resin pada fiber, dan ini berarti tergantung pada viskositas resin. Selain itu juga tergantung pada tegangan permukaan antara fiber dan resin.

2. Cara kedua biasa dilakukan pada proses produksi. Ada dua tahap dalam pembuatannya :
   - Tahap pertama adalah pembuatan prepreg dengan meresapkan resin ke dalam lembaran anyaman fiber dan resin di antara lembaran kertas silikon atau plastik film, kemudian ditekan dan digulung.
   - Tahap kedua, prepreg dipotong sesuai engan bentuk komponen yang diharapkan. Dengan laminasi antar prepreg atau dengan honeycomb. Akhirnya dipanasi dibawah tekanan.
3. Cara ketiga adalah variasi pendekatan prepreg. Produk menengahnya adalah lembaran SMC (*Sheet Moulding Compound*) dan DMC (*Dough Moulding Compound*) yang didasarkan pada polyester resin. Untuk membuat SMC, resin yang mengandung pengental kimia khusus seperti kalsium karbonat, dicampur fiber untuk membuat lembaran. Lembaran fiber secara paralel biasanya mempunyai fraksi volume antara 15% - 40%. DMC dibuat dengan cara yang sama tetapi materialnya mempunyai konsentrasi yang lebih tinggi dan berisi fiber lebih sedikit. Selain itu fiber diorientasikan dalam tiga dimensi. Setelah campuran



This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. ( http://eprints.undip.ac.id)

fiber, resin dan pengisi material merata maka diubah dalam bentuk benda tegar dengan tekanan panas dalam cetakan.

### 2.3.2. TERMOPLASTIK

Tidak seperti resin termoset, resin termoplastik tidak di-cross link. Dia mempunyai kekuatan dan kekakuan dari sifat kelompok monomernya dan berat molekul yang tinggi. Hal ini menjamin bahwa termoplastik amorphous mempunyai jalinan molekuler dengan konsentrasi tinggi yang beraksi seperti cross link, dan dalam material kristalin terdapat tingkat molekuler yang tinggi. Pada amorphous, pemanasan akan merusak jalinan dan merubah dari bentuk padat ke cair (meleleh). Dalam material kristalin pemanasan mengakibatkan pelelehan fase kristal dan membentuk amorphous cair.

## 2.4. TEORI ADHESI

Sistem bonding yang cukup sederhana pada interface dapat dijumpai antara fiber dan matrik. Gaya tarik menarik antara molekul-molekul di permukaan fiber dan matrik dapat ditandai dengan lima mekanisme yang dapat terjadi pada antar permukaan untuk membentuk ikatan. Mekanisme tersebut adalah : adsorbsi dan wetting, interdifusion, gaya elektrostatik, ikatan kimia dan adhesi mekanik.

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. ( http://eprints.undip.ac.id)

1. Adsorbsi dan wetting

Jika dua benda padat direkatkan, kekasaran permukaan kedua benda tersebut berskala mikro menimbulkan adanya titik terisolasi. Pada titik tersebut tidak terjadi kontak antara dua benda. Wetting merupakan pemecahan yang tepat untuk masalah ini. Dengan membasahi permukaan fiber dengan resin cair di setiap bukit dan lembah permukaannya dapat dicegah adanya ruang kosong. Usaha termodinamik adhesi (Wa) dari cairan ke permukaan benda dapat dituliskan dalam dua persamaan yang disebut sebagai persamaan Dupre´, yaitu :

$$Wa = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12} \qquad 2.1$$

dimana

$\gamma_1$ dan $\gamma_2$ energi bebas permukaan atau tegangan permukaan cairan.

$\gamma_{12}$ energi bebas permukaan antara permukaan cairan dan padatan

Persamaan tersebut dapat dihubungkan dengan situasi fisik tentang jatuhnya cairan pada permukaan lembaran seperti gb. 2.2b. dengan menggunakan persamaan Young. Ketika gaya pada titik A dianggap pada arah horisontal maka persamaan Young menjadi :

$$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos \theta \qquad 2.2$$

dimana

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. ( http://eprints.undip.ac.id)

$\gamma_{SV}$ = Tegangan permukaan dari uap - padat

$\gamma_{LV}$ = Tegangan permukaan dari cair - uap

$\gamma_{SL}$ = Tegangan permukaan dari cair - padat

$\theta$ = Sudut kontak

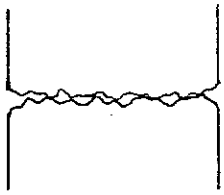
Untuk pembasahan spontan $\theta = 0^{o}$

Tegangan permukaan zat padat sangat sulit diukur tetapi sebaliknya tegangan permukaan zat cair sangat mudah ditentukan. $\gamma_{SV}$ dapat dicari dari $\gamma_{LV}$ yang telah membasahi padatan. Untuk ini Zisman memperkenalkan konsep tegangan permukaan kritis dari pembasahan $\gamma_c$ yang merupakan cairan, dengan $\gamma_{LV} < \gamma_c$ sehingga secara spontan terhampar pada permukaan padatan. Dengan konsep Zisman ini dapat mempermudah pemikiran mengenai pembasahan resin pada fiber .

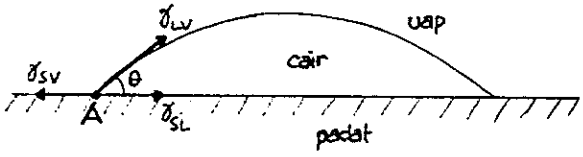
Usaha termodinamik adhesi yang mewakili gaya dispersi tinggi antara molekul yang dalam situasi ideal dapat memberi adhesi antara resin dan fiber. Tetapi ada beberapa hal yang menyebabkan keadaan ideal tersebut tidak selalu bisa dicapai untuk mendapatkan ikatan fisik yang kuat, yaitu :

a. Cairan yang melapisi permukaan fiber menyebabkan energi permukaan efektif lebih kecil dibanding jika permukaan adalah benda padat.
b. Jebakan udara atau gas lain pada permukaan padatan.
c. Terjadinya lipatan atau gelombang akibat tekanan sewaktu dalam keadaan basah pada proses curing.

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. ( http://eprints.undip.ac.id)



a.




b.

gb. 2.2a. Titik-titik terisolasi dari dua permukaan yang kasar.

2.2b. Sudut kontak $\theta$ dan tegangan permukaan $\gamma$ untuk jatuhnya cairan pada permukaan zat padat.

2. **Interdifusi**

Interdifusi merupakan pengikatan antara dua permukaan suatu zat dengan cara difusi antara molekul-molekul dari kedua permukaan tersebut. Dalam membentuk material komposit, interdifusi sangat mungkin dilakukan yakni mendifusikan molekul-molekul matrik dalam jaringan kerja permukaan fiber. Dapat dilihat pada gambar 2.3a. Kekuatan ikatan akan tergantung pada jumlah molekul yang berdifusi. Sedangkan jumlah difusi bergantung pada penyetaraan molekul dan kebebasan gerak molekul. Telah kita ketahui bahwa difusi dipengaruhi gerak termal, dan pada zat padat difusi terjadi sangat lambat pada suhu normal. Interdifusi dapat dihitung pada bonding yang tercapai sebelum fiber dilapisi polimer atau sebelum bersatu dengan matrik .

3. **Gerak elektrostatik**

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. ( http://eprints.undip.ac.id)

Gaya tarik terjadi antara dua permukaan, ketika permukaan yang satu membawa suatu jaringan bermuatan positip dan permukaan yang lain bermuatan negatip. Digambarkan gb. 2.3b. Kekuatan permukaan bergantung pada rapat permukaan.

**4. Ikatan kimia**

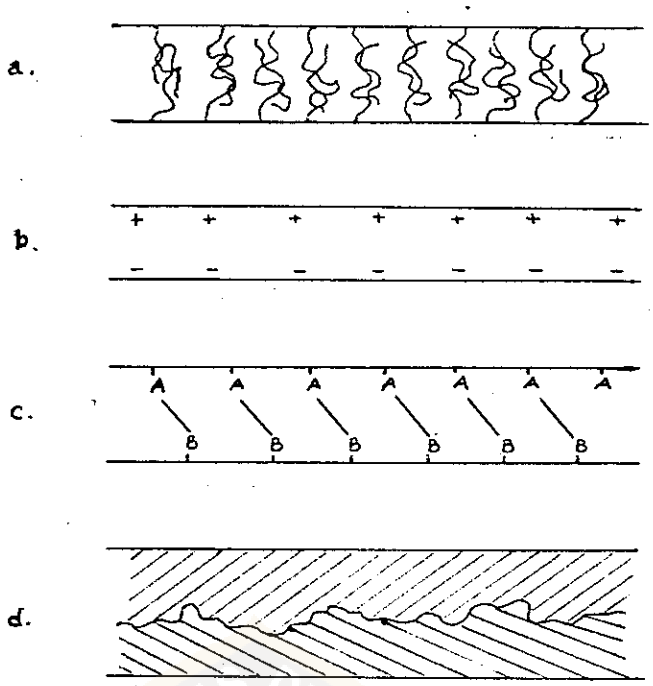
Merupakan bagian penting dari material fiber komposit. Jaringan kimia dibentuk antara molekul-molekul pada permukaan fiber dan gabungan molekul dalam matrik. digambarkan gb.2.3c. Dalam hal ini kekuatan ikatan kimia tergantung pada jumlah dan tipe ikatan. Sedangkan kerusakan interface terjadi oleh putusnya ikatan tersebut. Proses pembentukan ikatan maupun putusnya ikatan merupakan bentuk dari aktivasi kesetimbangan termodinamik.

**5. Adhesi mekanik**

Adhesi antara permukaan yang terjadi dengan cara saling mengunci antar kedua permukaan. Ditunjukkan dalam gambar 2.3d. Dalam hal ini resin yang secara menyeluruh membasahi permukaan fiber mengikuti setiap detail dari permukaan tersebut. Kekuatan interface dalam tegangan, mustahil menjadi tinggi kecuali ada sejumlah besar sudut re-entrant pada permukaan fiber. Sedangkan kekuatan dalam shear tergantung pada derajat kekasaran. Faktor yang berhubungan dengan derajat kekasaran permukaan

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. ( http://eprints.undip.ac.id)

fiber adalah potensial kekuatan ikatan tambahan.




gb.2.3. Mekanisme antar permukaan untuk membentuk ikatan.

a. Interdifusi

b. Gaya elektrostatik

c. Ikatan kimia

d. Adhesi mekanik

## 2.5. KEKUATAN IKATAN

Tidak ada metoda yang memuaskan untuk mengukur kekuatan ikatan antara fiber dan matrik, tetapi dapat digunakan pengukur kekuatan untuk mengevaluasi sifat komposit dan membangun desain interface yang baik. Berdasarkan pada pengukuran kekuatan adhesiv dan kegagalan kohesi, maka didapatkan gambaran sebagai

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. ( http://eprints.undip.ac.id)

berikut :

Andaikan ada dua padatan A dan B dijalin bersama dan dicoba dalam satu sumbu tegangan. Jika A dan B adalah padatan yang elastis linier dan kekuatan ikatan lebih kecil dari pada kekuatan keduanya. Kurva stres-strain untuk patahan akan terlihat dan celah akan terjadi di interface pada tekanan kritis $\sigma_F$. Kerja persatuan luas di bawah kurva stres-strain adalah :

$$W = 1/2\ \sigma_F\ \varepsilon \qquad 2.3$$

$$= \gamma_A + \gamma_B - \gamma_{A-B}$$

Dari teori Griffith kekuatan fraktur padatan adalah,

$$\sigma_F = \left(\frac{\alpha\ E\ \gamma_s}{c}\right)^{1/2} \qquad 2.4$$

dimana :

$\alpha$ = parameter geometri

E = modulus young

c = panjang celah pada permukaan interface

$$\gamma_s = \gamma_A + \gamma_B - \gamma_{AB} \qquad 2.5$$

Kekuatan fraktur adalah karena $c^{1/2}$ mendekati luasan kecil celah. Sesungguhnya dalam setiap materi menunjukkan bahwa selalu ada keretakan pada material. Perubahan bentuk menyebabkan keretakan sebesar co, sehingga

$$\sigma_F = \left(\frac{\alpha\ E\ \gamma_s}{co}\right)^{1/2} \qquad 2.6$$

Ketika zat padat A dan B tidak mempunyai modulus yang sama, maka harga E tidak sesuai lagi. Sehingga kekuatan fraktur antar muka tergantung pada sifat non



This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. ( http://eprints.undip.ac.id)

linier zat padat A dan B. Sebagai contoh, misalnya zat A adalah zat padat yang elastik dan padatan c menuju perubahan bentuk plastik sebelum fraktur. Usaha menuju permukaan baru, mengandung elastisitas dan bentuk plastik $\gamma_s+\gamma_p$, dimana $1/2\ \gamma_p$ adalah usaha persatuan luas dari permukaan celah baru. Sehingga kekuatan fraktur menjadi :

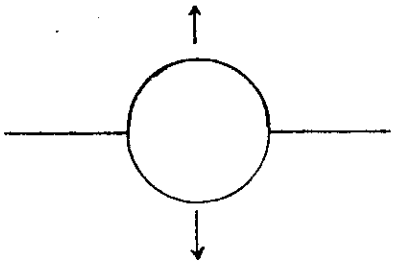
$$\sigma_F = \left( \frac{\alpha\ E\ (\gamma_s + \gamma_p)}{co} \right)^{1/2} \qquad 2.7$$

Dalam konteks kekuatan ikatan antar permukaan fiber-matrik menunjukkan bahwa penelitian untuk menentukan harga, tergantung pada kondisi stres pada antar muka dan sifat matrik. Kondisi ini tergantung pada distribusi fiber dan parameter mikrostruktural yang lain.

## 2.6. KEGAGALAN ADHESI DAN KOHESI

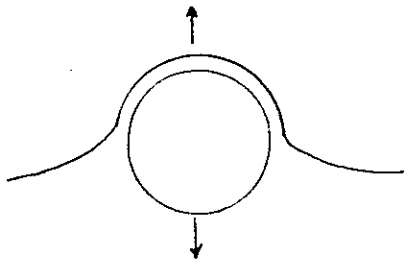
Kesukaran lebih jauh dalam mengevaluasi hasil eksperimen adalah sulit untuk menetapkan ada tidaknya kegagalan yang terjadi pada interface. Ada tiga kemungkinan yang skemanya digambarkan sebagai berikut:

a.

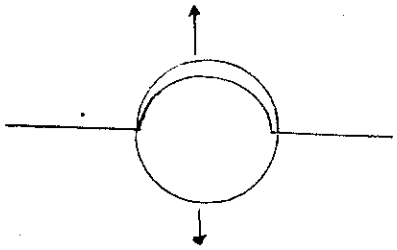


This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. ( http://eprints.undip.ac.id)

b.



c.



gb. 2.3. a. Kegagalan adhesiv pada interface

b. kegagalan kohesi resin pada interface

c. kegagalan kohesi fiber pada interface.

Ada dua pendekatan untuk menentukan kekuatan ikatan (*bond*) yaitu test dengan fiber tunggal dan test pada laminat unidirectional. Pendekatan pertama menggunakan dua fiber tunggal dengan sisi sejajar specimen (gb. 2.5.a) mewakili blok resin yang berisi sepotong fiber sepanjang sumbu pusat. Ketika specimen ditekan sepanjang sumbu paralel maka terjadi pergeseran fiber pada ujungnya. Hal ini disebabkan oleh perbedaan sifat elastik antara fiber dan matrik. Hubungan antara tekanan kompresif $\sigma_c$ dan tekanan geser interfacial $\tau_s$ adalah $\tau_s \simeq 2,5\ \sigma_c$. Kekuatan geser dari ikatan interface dapat dijelaskan dari pengukuran $\sigma_c$ yang dapat diketahui melalui debonding pada ujung fiber. Metode ini jarang digunakan karena hanya mengandalkan pada observasi visual.

Berdasarkan pada prinsip yang sama dengan test

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. ( http://eprints.undip.ac.id)

fiber tunggal, gb.2.5.b. dapat digunakan untuk menjelaskan tensile strength dari interface. Ketika specimen dikompresi, perbedaan hasil Poisson rasio dari resin dan fiber membuat tensile stres di pusat sudut kanan interface fiber matrik, diberikan oleh :

$$\sigma = \frac{\sigma_c (V_m - V_f) E_f}{(1 + V_m) E_f + (1 - V_f - 2V_f^{\,2}) E_m} \qquad 2.8.$$

dimana :

$V_m$ : Poisson rasio matrik

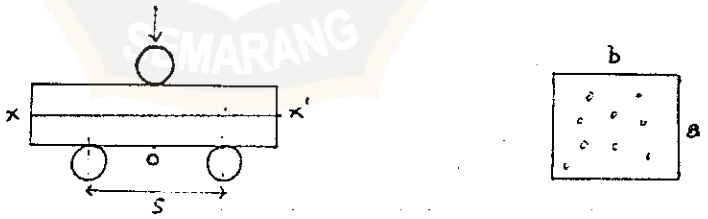
$V_f$ : Poisson rasio fiber

E : Modulus Young

Tensile strength dari interface dijelaskan dari harga $\sigma_c$ pada kejadian debonding.

Pendekatan kedua untuk mengukur kekuatan ikatan interfacial yaitu menguji laminat unidirectional dengan melihat keretakan yang terjadi dalam model geseran sejajar atau model tensile normal pada fiber.

a.




b.

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. ( http://eprints.undip.ac.id)

gb. 2.5. Pengujian laminat unidirectional untuk mengukur :

a. Kekuatan shear antar lapisan

b. kekuatan tensile tegak.

Tekanan shear $\tau_{\#}$ pada bidang tengah xx' dihubungkan dengan beban yang dipakai P sebesar :

$$\tau_{\#} = \frac{3\ P}{4\ a\ b} \qquad 2.9$$

dimana :

a : tebal specimen

b : luas specimen

Untuk specimen atau suatu bentuk geometri yang sama maka tekanan maksimum sejajar ke fiber terjadi pada fiber terluar di titik O sebesar,

$$\sigma_{max} = \frac{3\ P\ S}{2\ a^2\ b} \qquad 2.10$$

dimana : S : Jarak antara titik beban.

Perbandingan $\tau_{\#}/\sigma_{max}$ tergantung pada test geometri, maka,

$$\frac{\tau_{\#}}{\sigma_{max}} = \frac{a}{2\ S} \qquad 2.11$$

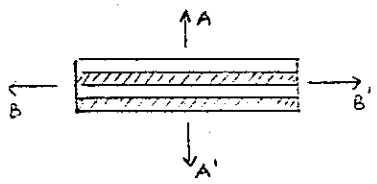
Kegagalan flexural pada titik O atau kegagalan shear sepanjang xx' akan tergantung pada perbandingan S/a. Maka dibuat test untuk memilih S sehingga terjadi keretakan oleh geseran. Tetapi ternyata sulit untuk mematahkan pada titik beban sehingga lebih mempersulit interpretasi hasilnya.

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. ( http://eprints.undip.ac.id)

## 2.7. SIFAT ELASTIK

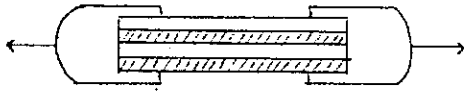
Struktur dan sifat bahan pembangun merupakan faktor yang mempengaruhi kekuatan komposit. Sifat elastik adalah salah satu diantaranya. Khususnya perbedaan sifat elastik antara permukaan fiber dan matrik pada komposit laminat komposit. Perbedaan tersebut menimbulkan tekanan pada matrik yang kemudian dipindahkan ke fiber melalui interface. gb.2.6.a. menggambarkan material komposit yang terdiri dari dua macam bahan yang berbentuk lembaran dan disusun secara berselang-seling. Kedua bahan tersebut mempunyai sifat elastik yang sangat berbeda. Diantara komposit yang berbentuk laminat ini terdapat ikatan kimia dan fisika tanpa kuat tarik pada arah normal AA'. Kekuatan dan modulus pada arah BB' sejajar dengan lembaran-lembaran tergantung cara memegang sampel. Jika tidak ada ikatan yang bekerja dan pengeleman adhesiv hanya pada lembar terluar (gb.2.6b), maka kekuatan komposit mendekati kekuatan lembaran terluar setelah beban diterima seluruhnya oleh lembaran-lembaran ini. Dan jika lembaran-lembaran tersebut dijepit dalam grip sehingga seluruhnya menyatu, maka ketika menerima beban komposit akan lebih kuat dan lebih kaku (gb.2.6c).

a.

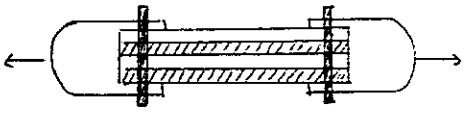



This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. ( http://eprints.undip.ac.id)

b.



c.



gb.2.6. Kekuatan ikatan antar permukaan

Dengan asumsi tersebut sangat mungkin untuk menghitung distribusi tegangan dan regangan dalam sebuah komposit. Perhitungan dapat ditinjau dari segi geometri, distribusi dan fraksi volume fiber, dan sifat elastik fiber maupun matriknya. Beberapa perhitungan ini sangat komplek dan sukar untuk beberapa persoalan. Sifat elastik bahan komposit dapat dihitung dari distribusi tegangan dan regangan.

### 2.7.1. SIFAT ELASTIK LAMINAT UNIDIRECTIONAL

Ketika beban tarik atau beban tekan yang diberikan secara paralel pada fiber dalam laminat unidirectional (gb.2.7) strain $\varepsilon_1$ pada matrik akan sama dengan strain pada fiber jika jalinan antara matrik dan fiber sempurna. Jika fiber dan matrik elastik maka hubungan stresnya diberikan oleh pendekatan :

$$\sigma_f = E_f \cdot \varepsilon_1 \qquad 2.12$$

$$\sigma_m = E_m \cdot \varepsilon_1 \qquad 2.13$$

Jika $E_f > E_m$ berarti bahwa stres pada fiber lebih

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. ( http://eprints.undip.ac.id)

besar dari pada di matrik. Ini sebagai dasar dari fiber reinforced ketika fiber menahan sebagian besar dari beban P yang diterima. Untuk suatu bahan komposit dengan luas tampang lintang total A, stres rata-rata diberikan oleh :

$$P = \sigma_1 A \qquad 2.14$$

$$P = P_f + P_m \qquad 2.15$$

$$P_f = \sigma_f A_f \quad ; \quad P_m = \sigma_m A_m \qquad 2.16$$

$$P = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m$$

$A_f$ dan $A_m$ adalah luas tampang lintang fiber dan matrik. Sedangkan $P_f$ dan $P_m$ adalah beban yang diberikan. Sehubungan dengan persamaan 2.12 dan 2.13 didapatkan,

$$\sigma_1 = E_1 \varepsilon_1$$

$$E_1 = \frac{E_f A_f}{A} + \frac{E_m A_m}{A} \qquad 2.17$$

$$V_f = \frac{A_f}{A} \quad ; \quad V_m = \frac{A_m}{A}$$

maka

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m \qquad 2.18$$

Bila $V_m = 1 - V_f$

$$^{*}E_1 \text{ atau } E_{//} = E_f V_f + E_m (1 - V_f) \qquad 2.19$$

* adalah tanda untuk laminat komposit unidirectional, $E_1 = E_{//}$, $E_2 = E_{\perp}$, $G_{12} = G_{//\perp}$, dan $v_{12} = v_{//\perp}$. Ini sering dikatakan sebagai persamaan *Rate of mixtures*. Analisa didasarkan pada asumsi bahwa persamaan 2.12 dan 2.13 adalah benar. Jika terdapat



This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. ( http://eprints.undip.ac.id)

perbedaan kontraksi Poisson ( $v_m \neq v_f$) maka persamaan ini tidak sesuai lagi, sebab kontraksi Poisson tersebut akan menimbulkan tekanan tambahan. Kesalahan $E_{//}$ kurang dari 2 %. Untuk menguji kebenaran persamaan 2.19 ada beberapa pengecekan eksperimental dari beberapa sistem fiber-resin. Salah satu contoh diberikan dalam gambar 2.8. Beban yang diberikan melalui fiber diterima sama besar oleh fiber dan matrik sehingga $\sigma_f = \sigma_m$. Hubungan dengan strain diberikan oleh

$$\varepsilon_f = \frac{\sigma_2}{E_f} \quad ; \quad \varepsilon_m = \frac{\sigma_2}{E_m} \qquad 2.20$$

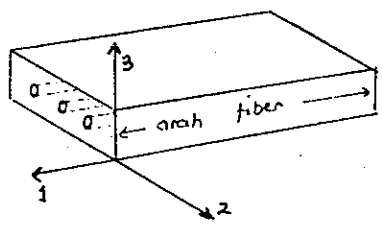
$$\varepsilon_2 = V_f \, \varepsilon_f + V_m \, \varepsilon_m \qquad 2.21$$

Subtitusi dari persamaan 2.20

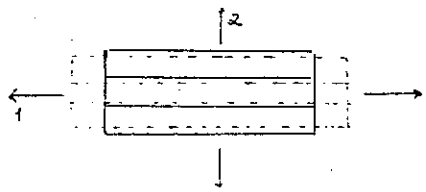
$$\varepsilon_2 = \frac{V_f \, \sigma_2}{E_f} + \frac{V_m \, \sigma_2}{E_m} \qquad 2.22$$

Dengan mensubtitusikan $\sigma_2 = E_2 \delta_2$ ke dalam persamaan 2.22 diperoleh

$$E_\perp = \frac{E_f \, E_m}{E_f (1 - V_f) + E_m V_f} \qquad 2.23$$




a.

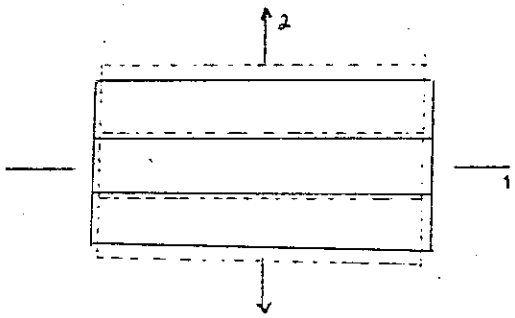



b.

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. ( http://eprints.undip.ac.id)

gb. 2.7.a. Laminat unidirectional dalam arah ´3´

b. Perubahan bentuk setelah mendapat beban tensile dengan ikatan yang sempurna antara fiber dan matrik.




gb. 2.8. Perubahan bentuk dalam pembebanan arah ´2´ pada ikatan fiber matrik sempurna.

Persamaan untuk menghitung efek kontraksi Poisson,

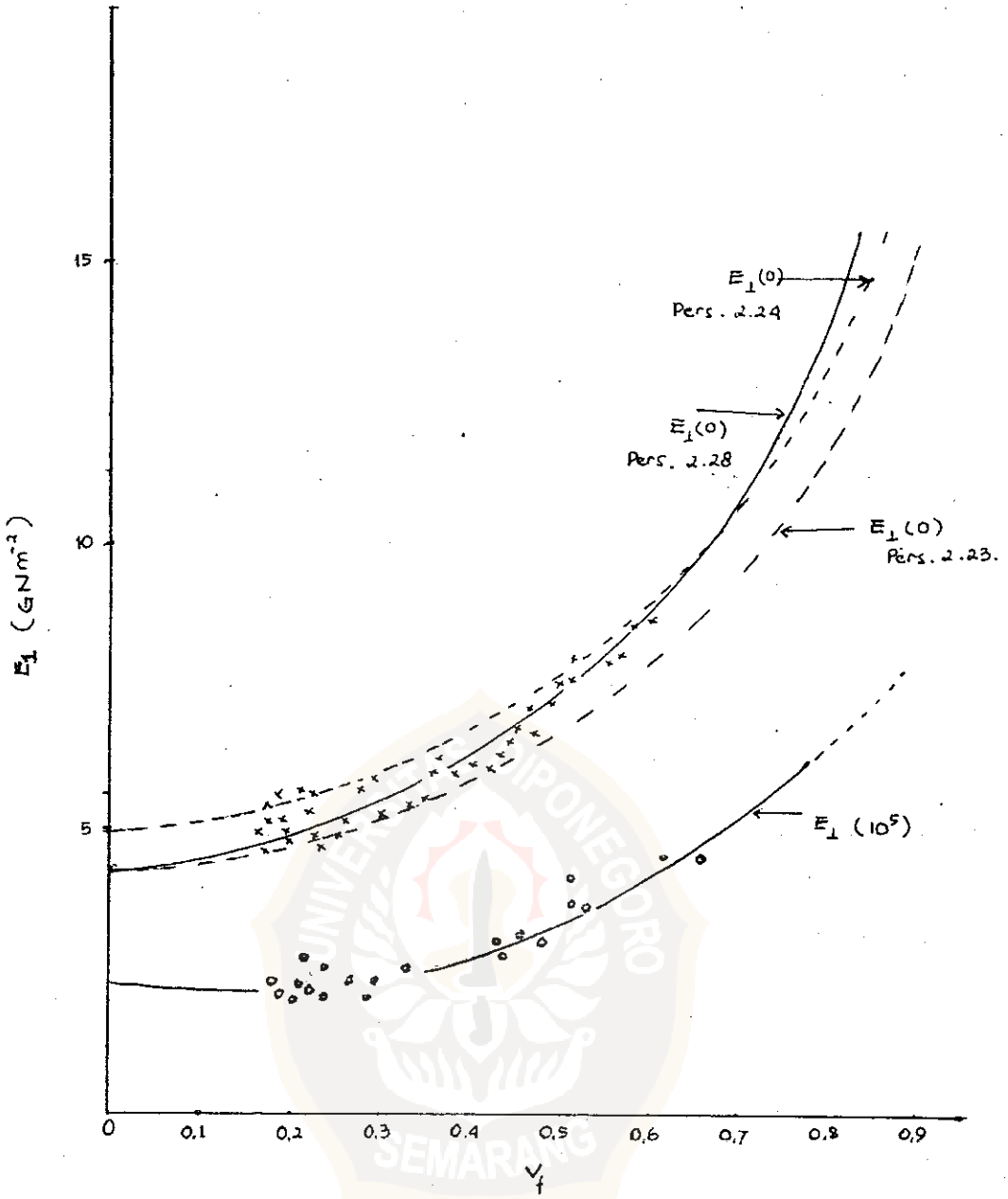
$$E_{\perp} = \frac{E'_m \quad E_f}{E_f(1-V_f) + V_f \; E'_m} \qquad 2.24$$

$$E'_m = \frac{E_m}{1 - V_m^2} \qquad 2.25$$

Persamaan ini memberikan pendekatan ke hasil eksperimen. Kurva (gb.2.9) menggambarkan pergantian efek sifat resin pada modulus tegak, khususnya pengaruh terhadap penjalaran resin.



This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. ( http://eprints.undip.ac.id)



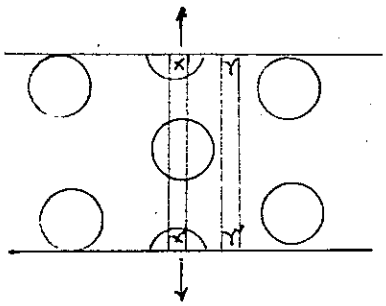

gb.2.9. Modulus elastisitas fiber laminat unidirectional fiber glass-polyester dengan perbedaan $V_f$

Persamaan 2.23 dan 2.25 diperlukan untuk desain yang efektif dari struktur laminat, dilengkapi pengertian fisis distribusi stres dan strain di



This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. ( http://eprints.undip.ac.id)

sekeliling fiber untuk interpretasi fraktur. Diasumsikan $\sigma_f = \sigma_m$ untuk menurunkan persamaan 2.23 pada tiap fase strain yang serba sama. Tetapi ini tidak mungkin karena fiber tidak dapat diperlakukan sebagai lembaran (*sheet*).




Gb. 2.10. Idealisasi larik heksagonal fiber pada material komposit.

Strain yang diterapkan gambar 2.10 secara eksternal serba sama. Bila $E_f >> E_m$, maka strain resin pada irisan xx′ dapat ditunjukkan pada gambar di atas. Strain pada irisan yy′ yang melewati resin lebih uniform, sedangkan strain rata-rata lebih kecil dari potongan resin xx′. Dengan kata lain ada besaran strain resin di antara fiber. Perbedaan strain dalam bagian resin yang berbeda memberikan tambahan stres dan selanjutnya distribusi stres menjadi non uniform.

Teori elastisitas dan analisa elemen tertentu digunakan untuk mengetahui E tegak, juga modulus-modulus yang lain dengan menggunakan asumsi yang nyata. Penyederhanaan beberapa penyelesaian disusun oleh Halpin dan Tsai (1967), yang dapat merumuskan sifat materi komposit :

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. ( http://eprints.undip.ac.id)

Persamaan Halpin-Tsai :

$$E_{//} = E_f V_f + E_m (1 - V_f) \qquad 2.26$$

$$v_{//} = v_f V_f + v_m (1 - V_f) \qquad 2.27$$

$$\frac{M_f}{M_m} = \frac{1 + \xi \eta V_f}{1 - \eta V_f} \qquad 2.28$$

$$\eta = \frac{\frac{M_f}{M_m} - 1}{\frac{M_f}{M_m} + \xi}$$

dimana : v = kontraksi Poisson

$\sigma$ = stres

$\tau$ = shear stres

$\xi$ = parameter geometri

$\eta$ = faktor koreksi

E = Modulus Young

$\varepsilon$ = strain

P = beban, tekanan

V = fraksi volume

M = momen, moduli

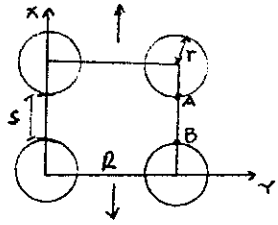
G = Modulus shear

Kies (1962) membuat suatu penaksiran kuantitatif dari distribusi strain non uniform matrik di antara



This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. ( http://eprints.undip.ac.id)

fiber dengan menggunakan model sederhana :

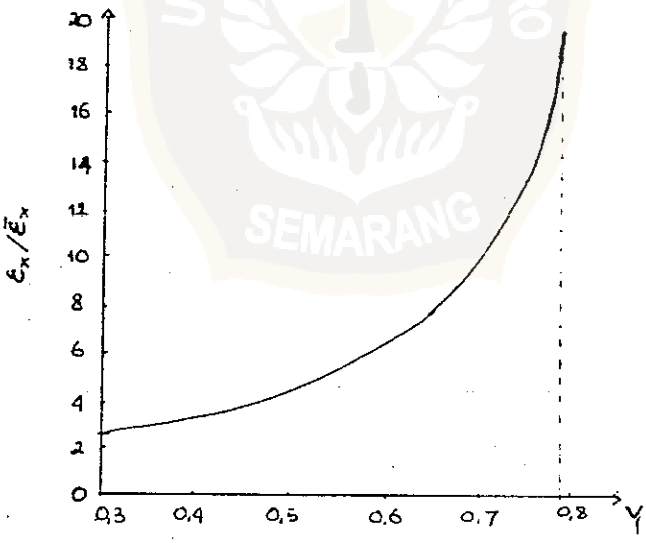



gb.2.11. Model keteraturan untuk menghitung strain.

Bujursangkar didasarkan pada suatu tensile strain sederhana $\bar{\varepsilon}_x$, sehingga besaran strain pada resin sepanjang garis AD :

$$\frac{\varepsilon_x}{\bar{\varepsilon}_x} = \frac{2 + \frac{s}{r}}{\frac{s}{r} + 2\,(E_m/E_f)} \qquad 2.29$$

dimana s dan r didefinisikan sebagai jarak seperti dalam gambar 2.11. Dengan menggabungkan luas $V_f = \frac{\pi}{4}[r/R]^{1/2}$ dengan persamaan 2.29 dapat digunakan untuk menghitung variasi besaran strain.




gb. 2.12. Tipe hasil sistem fiber glass-polyester ($E_f/E_m$ = 20).

Besaran strain yang sangat lebar terjadi pada fraksi

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. ( http://eprints.undip.ac.id)

volume yang tinggi. Besaran strain ini bergantung pada kondisi pembebanan dan variasi matrik.

Ini cukup menunjukkan bahwa besar dan arah stres yang bervariasi pada matrik tergantung pada fraksi volumeyang diberikan oleh susunan fiber (persegi/heksagonal) pada tingkat regularitasnya. Tekanan biaksial dan triaksial selalu dihasilkan pada matrik dan besarnya bergantung perbandingan modulus matrik dan fiber.

Untuk semua arah lamina dengan fiber yang terdistribusi acak, besaran strain akan bervariasi secara luas dari lapisan pertama ke lapisan yang lain. Hal inilah yang memungkinkan komposit mempunyai efek yang cukup besar pada proses fraktur.

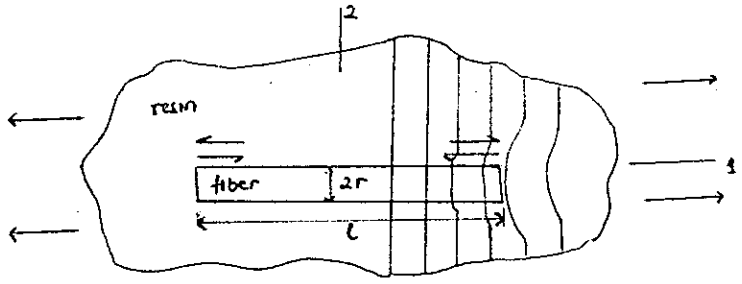
### 2.7.2. Distribusi Stres dan Strain pada Ujung Fiber

Sebagai aspek rasio l/2r dari pemotongan fiber, maka efek ujung fiber yang semula diabaikan menjadi lebih penting bila medan stres dan strain pada fiber maupun disekitar matrik dimodifikasi oleh diskontinuitas. Efisiensi fiber pada pengakuan dan penguatan matrik berkurang sebagai pengurangan panjang fiber. Ujung fiber berperan pada patahan atau fraktur komposit fiber pendek dan pada komposit fiber kontinu bila fiber panjang dipecah atau dirusak dalam potongan kecil.

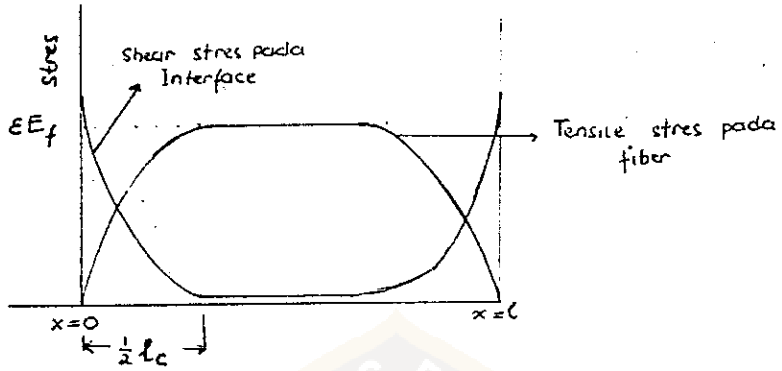
Dimisalkan sebuah fiber panjang l dimasukkan dalam matrik dengan modulus lebih kecil seperti

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. ( http://eprints.undip.ac.id)

digambarkan pada gb. 2.13.




b.




gb.2.13. a. Deformasi di sekitar fiber diskontinyu dalam matrik dengan beban tensile paralel ke fiber.

b. Diagram perbandingan efek distribusi.stres antara tensile stres dan shear stres fiber sepanjang l.

Jika fiber dan matrik melekat baik maka stres yang diberikan pada resin akan ditransfer ke fiber melalui permukaan. Di daerah sekitar ujung fiber, strain fiber lebih kecil dari pada strain matrik. Didaerah deformasi matrik digambarkan pada gb.2.13a. Cox (1952) menyebut masalah ini sebagai "*shear analysis*", Yaitu bahwa fiber dan matrik adalah



This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. ( http://eprints.undip.ac.id)

elastis. Untuk suatu stres yang dikenakan pada resin secara paralel ke fiber, tekanan tensile sepanjang fiber adalah :

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_m \left( \frac{1 - \cosh \beta (1/2 l - x)}{\cosh 1/2 \beta l} \right) \qquad 2.30$$

dimana,

$$\beta = \left( \frac{2 G_m}{E_f r^2 \ln (R/r)} \right)^{1/2} \qquad 2.31$$

2R = jarak antar fiber

Dari gambar 2.13b dapat dilihat bahwa tensile stres pada ujung fiber (x = 0) sama dengan nol dan maksimum pada pusat fiber. Berbeda dengan shear stres yang mempunyai harga maksimum pada ujung fiber dan mendekati nol pada pusat. Shear stres diberikan oleh :

$$\tau = E_f \varepsilon_m \left( \frac{Gm}{2E_f \ln(R/r)} \right)^{1/2} \frac{\sinh \beta (1/2 l - x)}{\cosh 1/2 \beta l} \qquad 2.32$$

Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa ada daerah pada ujung fiber yang tidak memikul beban penuh, sehingga stress rata-rata pada fiber sepanjang l lebih kecil dibandingkan dengan fiber kontinyu pada pembebanan yang sama. Efisiensi penguatan berkurang sebanding dengan pengurangan panjang fiber rata-rata. Ini disebabkan oleh pembebanan yang tidak penuh pada porsi yang lebih besar dari total panjang fiber. Pada fiber, harga strain maksimum yang mungkin yaitu $\varepsilon$ yang dikenakan pada material komposit sebagai suatu besaran tertentu sehingga stres maksimum fiber $\varepsilon E_f$.

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. ( http://eprints.undip.ac.id)

Untuk mencapai stres maksimum , panjang fiber harus lebih besar dari haraga kritis $l_c$. Gb. 2.13b. telah memperlihatkan bahwa pada ujung fiber yang tidak dibebani secara penuh sepanjang $\frac{1}{2} l_c$ .

Efisiensi penguatan bergantung pada kekuatan interface selama transfer beban mencapai bond interface yang kuat. Kekuatan shear yang besar pada ujung fiber dapat menghasilkan :

1. Debonding shear pada interface.
2. Kerusakan kohesi pada matrik
3. Kerusakan kohesi pada fiber
4. Shear pada matrik

Keempat hal diatas bergantung pada kekuatan kerusakan relatif dihubungkan dengan proses ini. Faktor pendekatan yang lain untuk efisiensi penguatan adalah kekuatan fiber. Perbandingan kekuatan shear interface maksimum pada ujung fiber dengan kekuatan tensile di pusat fiber dapat dihitung dengan persamaan 2.30 - 2.32.

$$\frac{\tau_{max}}{\sigma_{fmax}} = \left(\frac{G_m}{2E_f \ln(R/r)}\right)^{1/2} \cosh \tfrac{1}{4} \beta l \qquad 2.33$$



This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. ( http://eprints.undip.ac.id)

Tabel 2.2. Harga $\tau_{max}/\sigma_{fmax}$ dari beberapa material komposit.

| Material | $G_m/E_f$ | $V_f$ | $\tau_{max}/\sigma_{fmax}$ |
|---|---|---|---|
| glas-plyester | 0,017 | 0,3 | 0,13 |
| | 0,017 | 0,6 | 0,25 |
| glass-nylon | 0,010 | 0,3 | 0,10 |
| | 0,010 | 0,6 | 0,19 |
| Carbon-epoxy | 0,005 | 0,3 | 0,07 |
| | 0,005 | 0.6 | 0,13 |
| kevlar49-epoxy | 0,015 | 0,3 | 0,12 |
| | 0,015 | 0,6 | 0,23 |

## 2.8. Tekanan curing dan tekanan termal

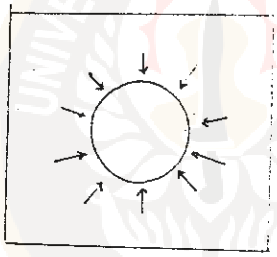
Penyusutan selama tekanan curing dan termal memberikan perbedaan antara koefisien ekspansi termal matrik dan fiber. Hal ini sangat berpengaruh pada tekanan mikro dalam komposit. Penambahan tekanan diperoleh dari beban eksternal. Mikrostres cukup untuk membuat retakan kecil tanpa adanya beban eksternal.

Stres pada curing ditimbulkan dari kombinasi pengurangan resin selama curing dan penurunan kontraksi termal setelah atau sebelum curing dengan kenaikan temperatur. Banyak penyusutan resin terjadi ketika masih cair sehingga stres tidak terbentuk.

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. ( http://eprints.undip.ac.id)

Penyusutan itu membuat adanya efek permukaan yang tidak diharapkan pada produk plastik. Dapat dipikirkan bahwa usaha yang telah diterapkan pada pembentukan resin yang mempunyai sifat penyusutan yang rendah. Pengurangan resin tingkat selanjutnya tergantung pada sensitifitas parameter struktural.

Sebagai contoh penyusutan resin yang mengelilingi fiber menghasilkan stres kompresi fiber normal ke interface fiber-matrik. Tekanan akan sama, ketika sebuah batang dengan jarak $r + \delta r$ dimasukkan pada lubang dengan radius $r$, pengurangan $\delta r$. Penyusutan kantung resin antara paket fiber yang dekat akan menghasilkan tekanan tensile pada resin dan interface fiber-matrik.



gb.2.14 Penyusutan pada matrik.

Pada proses pembentukan komposit perubahan kenaikan termal curing berpengaruh pada resin, yaitu terjadi perubahan fase. Pada tingkat suhu tertentu resin yang berbentuk gel akan mulai berubah menjadi cair. Dan ketika suhu diturunkan (proses pendinginan) resin menjadi padat. Disamping itu proses kenaikan



This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. ( http://eprints.undip.ac.id)

suhu juga memperbesar porositas fiber yang berarti bahwa proses bonding lebih sempurna apabila pada hal ini diiringi dengan tekanan curing yang disesuaikan untuk menghasilkan komposit yang diharapkan.

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. ( http://eprints.undip.ac.id)