

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Kuan, H. T. N. (2014), meneliti tentang sifat tarik dari *Pandanus Atrocarpus* dengan basis komposit. Dalam penelitian ini membandingkan sifat tarik antara komposit berlapis dengan lapisan daun pandan dan ekstrak serat daun pandan berpenguat *polyethylene*. Hasil uji tarik menunjukkan bahwa komposit berlapis dengan ekstrak serat daun pandan berpenguat *polyethylene* lebih unggul daripada menggunakan daun pandan sendiri. Hasil pengujian menunjukkan bahwa semakin besar fraksi serat maka semakin tinggi kekuatan. Dari penelitian ini didapatkan kesimpulan bahwa serat daun pandan memiliki karakteristik mampu digunakan dalam komposit.

Jones, Molent (2014), dalam penelitiannya untuk menentukan efek dari perambatan retak berdasarkan variasi level tegangan pada material komposit pesawat dengan metode *aircraft fatigue test*. Menunjukkan bahwa perambatan retakan pada tegangan tingkat satu dapat diprediksi secara akurat dengan mempelajari tingkat kedua dan ukuran retakan awal efektif yang menyebabkan mudahnya memprediksi perambatan retak terjadi. Dari penelitian ini dapat disimpulkan adanya konsentrasi tegangan yang menyebabkan semakin meningkatnya perambatan retak.

2.2 Pengertian Material Komposit

Material komposit adalah kombinasi makroskopik dari dua atau lebih bahan yang memiliki sifat mekanik dan karakteristik yang berbeda. Dikarenakan perbedaan dari bahan pembentuknya, maka dihasilkan material komposit yang sifat mekanik dan karakteristiknya berbeda pula dari bahan-bahan pembentuknya (Schwartz, 1992).

Pengertian bahan komposit berarti material yang terdiri dari dua atau lebih bahan yang berbeda yang digabung atau dicampur secara makroskopis menjadi suatu bahan yang berguna (Jones, 1975). Karena bahan komposit merupakan bahan gabungan secara makro, maka bahan komposit dapat didefinisikan sebagai suatu sistem material yang tersusun dari campuran/kombinasi dua atau lebih unsur-unsur utama yang secara makro berbeda di dalam bentuk dan atau komposisi material yang pada dasarnya tidak dapat dipisahkan (Schwartz, 1984). Bahan komposit secara umum terdiri dari penguat dan matrik.

Tujuan dibuatnya komposit yaitu memperbaiki sifat mekanik atau sifat spesifik tertentu, mempermudah desain yang sulit pada manufaktur, keeluasaan dalam bentuk atau desain yang dapat menghemat biaya produksi, dan menjadikan bahan lebih ringan. Komposit yang diproduksi oleh suatu instansi atau pabrik biasanya dapat diprediksi sifat mekanik dari bahan komposit berdasarkan bahan matrik dan bahan penguatnya (Callister, 2007).

Standar minimal pemberian penguat serat pada komposit untuk fraksi berat adalah 10%, dan selebihnya bisa divariasikan asal masih dalam batas prosentase *reinforcement* atau bahan penguat yaitu kurang dari 50% (ASM Handbook Vol.21).

Adapun beberapa sifat mekanik yang dapat diprediksi dari komposit yaitu kekuatan tarik dan kelayakan sebagai material komposit (validitas komposit). Dalam komposit kekuatan tarik dipengaruhi oleh kekuatan interface-nya. Dari pengujian kekuatan interface sangat sulit ditentukan karena prosesnya yang tidak sederhana. Sehingga hasil pengujian juga sangat sulit ditentukan karena adanya faktor teknis pembuatan spesimen.

Untuk komposit polimer/serat, perbedaan campuran unsur matrik dan perbedaan serat juga menghasilkan kekuatan adhesive yang berbeda sehingga tidak jarang serat akan putus sebelum terlepas dari matriknya (Matthew, 1999).

Berdasarkan jenis matrik yang digunakan komposit dapat dibagi kedalam tiga kelompok utama yaitu,

- a. Komposit matrik logam (metal matrix composites/MMC)

Komposit matrik logam (metal matrix composites) ditemukan berkembang pada industri otomotif. Metal matrix composites adalah salah satu jenis komposit

yang memiliki matrik logam. Bahan ini menggunakan suatu logam seperti aluminium sebagai matrik dan penguatnya dengan serat seperti silikon karbida. Contoh: aluminium beserta paduannya, titanium beserta paduannya, magnesium beserta paduannya.

b. Komposit matrik keramik (ceramic matrix composites/CMC)

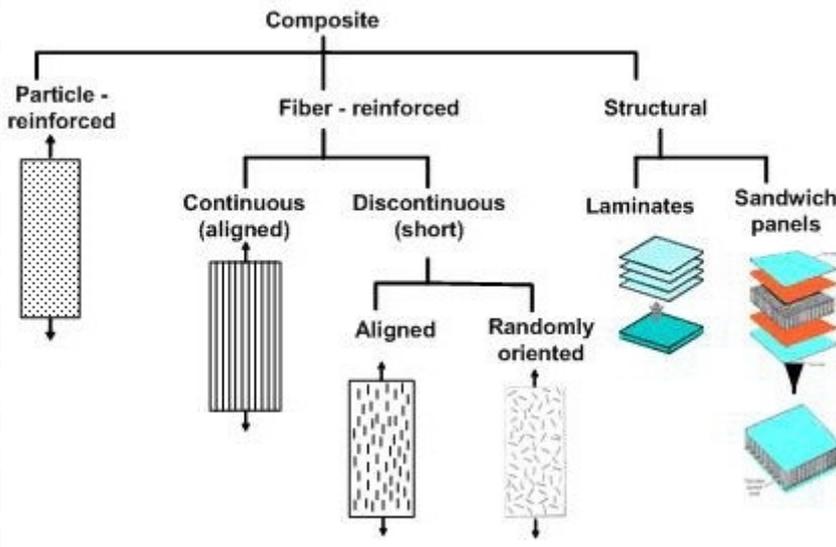
Komposit matrik keramik (ceramic matrix composites) digunakan pada lingkungan bertemperatur sangat tinggi, CMC merupakan material 2 fasa dengan 1 fasa berfungsi sebagai penguat dan 1 fasa sebagai matrik, dimana matriksnya terbuat dari keramik. Bahan ini menggunakan keramik sebagai matrik dan diperkuat dengan serat pendek, atau serabut-serabut (whiskers) dimana terbuat dari silikon karbida atau boron nitrida. Penguat yang umum digunakan pada CMC adalah oksida, carbide, dan nitrid.

c. Komposit matrik polimer (polymer matrix composites/PMC)

Komposit ini menggunakan bahan polimer sebagai matriksnya. Secara umum, sifat-sifat komposit polimer ditentukan oleh sifat-sifat penguat, sifat-sifat polimer, rasio penguat terhadap polimer dalam komposit (fraksi volume penguat), geometri dan orientasi penguat pada komposit. Apapun komposit polimer yang digunakan dalam bahan komposit akan memerlukan sifat-sifat berikut:

- Sifat-sifat mekanis yang bagus
- Sifat-sifat daya rekat yang bagus
- Sifat-sifat ketangguhan yang bagus
- Ketahanan terhadap degradasi lingkungan bagus sifat-sifat mekanis yang bagus.

Komposit polimer memiliki beberapa sifat yaitu biaya pembuatan lebih rendah, dapat dibuat dengan produksi misal, ketangguhan baik, tahan simpan, siklus pabrikasi dapat dipersingkat, kemampuan mengikuti bentuk, lebih ringan. Adapun keuntungan dari PMC adalah ringan, specific stiffness tinggi, Specific strength tinggi, Anisotropy.



Gambar 2.1 Klasifikasi Komposit

Sumber: Ramatawa (2008)

Komposit dapat dikelompokkan dalam beberapa jenis, tergantung pada geometri dan jenis seratnya (Schwartz, 1992) :

1. Komposit partikel (*particulate composites*)

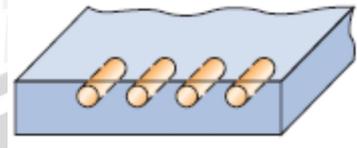
Pada dasarnya, terdapat dua jenis komposit berpenguat partikel, partikel berpenguat partikel besar dan kecil. Klasifikasi dari komposit partikel ini tidak sepenuhnya berdasarkan dimensi fisik, melainkan berdasarkan mekanisme penguatan.

Partikel dapat meningkatkan kekuatan patahan komposit melebihi matriksnya dengan mencegah dan menghambat perambatan retak melalui matriks baik secara fisik menghalangi dan menghentikan retak ataupun mengalihkan dan membelah retak tersebut sehingga menghambat perambatan ke seluruh bagian. Partikel juga dapat meningkatkan kekakuan dan kekuatan komposit atas matriksnya.

2. Komposit serat (*fiber composite*)

Fiber composite merupakan komposit yang diperkuat oleh serat. Serat komposit dari komposit serat berbentuk serat pendek (*short fiber composite*) atau serat panjang (*long fiber composite*). Serat umumnya anisotropik seperti karbon dan aramid, pengertian dari anisotropik itu sendiri adalah sifat permeabilitas suatu material yang tidak seragam pada arah rembesan atau serapan yang berbeda. Serat ini bisa disusun secara acak dengan orientasi tertentu ataupun bisa juga dalam

bentuk yang lebih tersusun seperti anyaman. Komposit serat atau *fiber composite* ini hanya terdiri dari satu lamina atau lapisan menggunakan serat sebagai penguat. *Fiber composite* yang diperkuat dengan serat dapat digolongkan menjadi dua bagian yaitu:

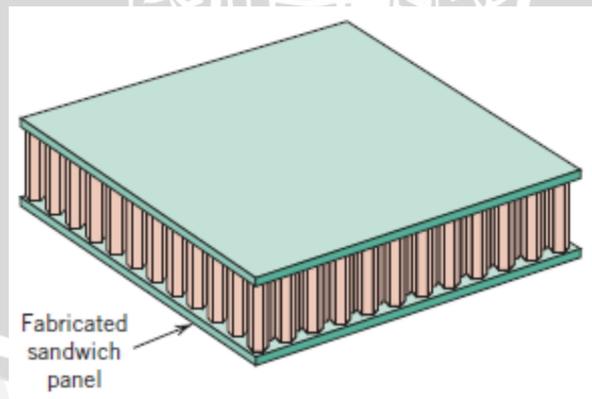


Gambar 2.2 Komposit serat (*fiber composite*)

Sumber: Callister (2007)

3. Komposit laminat (*laminated composite*)

Komposit laminate merupakan gabungan dari lapisan material komposit berserat yang mampu disatukan untuk memberikan properti mekanik yang dibutuhkan seperti kekakuan, kelenturan, kekuatan, maupun koefisien ekspansi termal. Karena tiap lapisan terdiri dari material berbeda, material tidak terintegrasi secara bersamaan seperti tipe komposit yang lainnya. Hal yang perlu diperhatikan pada komposit laminat adalah bahwa lamina yang ada bukan hanya lapisan-lapisan saja, melainkan harus secara permanen diikat antara satu sama lain dengan perekat, sehingga mereka berperilaku sebagai satu kesatuan.



Gambar 2.3 Komposit laminat (*laminated composite*)

Sumber: Callister (2007)

Pada umumnya sifat-sifat yang ditekankan pada komposit laminat ialah ketahanan korosi, kekuatan, kekakuan, ketahanan aus, isolasi termal, dan isolasi

listrik. Komposit laminat terdiri dari empat jenis yaitu komposit serat kontinyu, komposit serat anyam, komposit serat acak dan komposit serat hibrid:

- *Continous fiber composite* (komposit diperkuat dengan serat kontinue)
- *Woven fiber composite* (komposit diperkuat dengan serat anyaman)
- *Chopped fiber composite* (komposit diperkuat serat pendek/acak)
- *Hybrid composite* (komposit diperkuat serat kontinyu dan serat acak).

2.3 Matriks

Matriks adalah bagian dari komposit yang berfungsi mengikat penguat satu dengan yang lain. Bahan yang umum dipakai sebagai matrik adalah metal, keramik, atau polimer. Pada saat ini polimer sering dipergunakan karena lebih ringan dan tahan korosi. (Schwartz, 1992).

Pada umumnya matriks berfungsi didalam material komposit sebagai:

1. Menjaga agar serat tetap berada di dalam struktur komposit.
2. Membantu mendistribusi beban yang diterima.
3. Melindungi serat dari kerusakan eksternal seperti pengausan.
4. Memberi perlindungan serat terhadap keadaan lingkungan yang kurang baik.

Polimer yaitu bahan dengan berat molekul (M_r) lebih besar dari 10.000. Keunggulan bahan polimer yaitu kemampuan cetaknya baik. Pada temperatur rendah, bahan dapat dicetak dengan penyuntikan, penekanan, ekstruksi dan seterusnya, produk ringan dan kuat, banyak polimer bersifat isolasi listrik, polimer dapat bersifat konduktor, baik sekali ketahannya terhadap air dan zat kimia. Bahan polimer biasa digunakan sebagai matrik pada komposit polimer. Adapun polimer yang sering dipakai antara lain:

- Thermoplastic

Thermoplastic adalah plastik yang dapat dilunakkan berulang kali (recycle) dengan menggunakan panas. Thermoplastic merupakan polimer yang akan menjadi keras apabila didinginkan. Thermoplastic meleleh pada suhu tertentu, melekat mengikuti perubahan suhu dan mempunyai sifat dapat balik (reversibel) kepada sifat aslinya, yaitu kembali mengeras bila didinginkan. Contoh dari thermoplastic yaitu Polyamide (PI), Polysulfone (PS), Poluetheretherketone (PEEK), Polypropylene (PP), Polyethylene (PE) dll.

- Thermoset

Thermoset tidak dapat mengikuti perubahan suhu (irreversibel). Bila sekali pengerasan telah terjadi maka bahan tidak dapat dilunakkan kembali. Pemanasan yang tinggi tidak akan melunakkan termoset melainkan akan membentuk arang dan terurai karena sifatnya yang demikian sering digunakan sebagai tutup ketel, seperti jenis-jenis melamin. Plastik jenis termoset tidak begitu menarik dalam proses daur ulang karena selain sulit penanganannya juga volumenya jauh lebih sedikit (sekitar 10%) dari volume jenis plastik yang bersifat termoplastik. Contoh dari termoset yaitu epoksi, polyester, plenol, resin amino, resin furan dll.

PMMA *Poly(Methyl metacrylate)* merupakan material thermoplastic transparan yang biasa digunakan dalam bentuk lembaran untuk alternatif kaca yang ringan dan kuat. PMMA merupakan material yang digunakan sebagai fiber optik, optical disc, dan berbagai macam lensa karena sifat transparan, serta digunakan untuk lensa lampu mobil dan motor (Surdia, 2000). Berikut adalah mechanical properties dari PMMA:

Tabel 2.1 *Mechanical Properties Poly(MethylMetacrylate)*

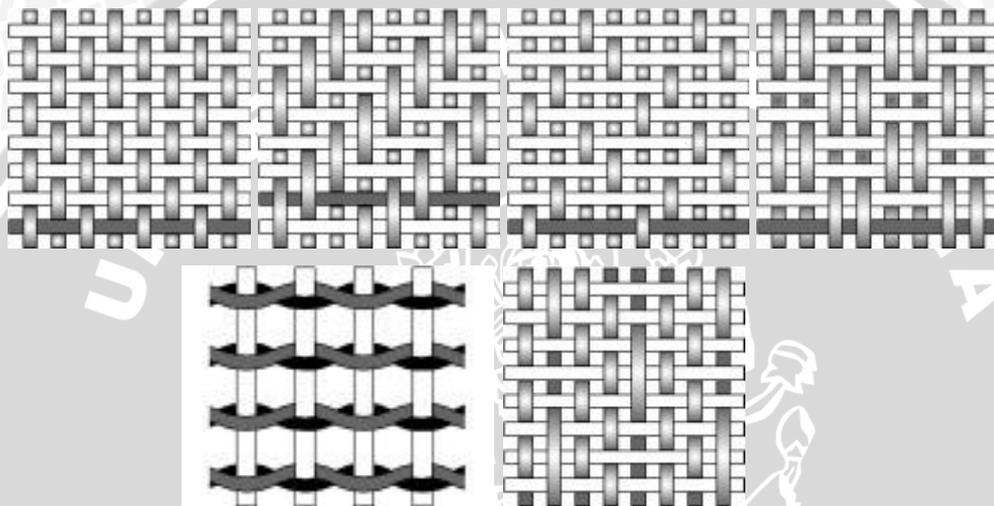
Mechanical Properties	Value
Hardness, Rockwell M	63-97
Tensile Strength, Ultimate	47-79 MPa
Elongation at Break	1-30%
Tensile Modulus	2,2-3,8 GPa
Flexural Modulus	3-3,5 GPa
Izod Impact, Notched	1,2-20 kJ/m ²
Izod Impact, Unnotched	11 kJ/m ²
Tensile Creep Modulus, 1h	1800-2700 MPa
Tensile Creep Modulus, 1000h	1200-1800 MPa

Sumber: Surdia (2000)

2.4 Anyaman (*Woven*)

Serat dalam komposit merupakan serat panjang yang berguna sebagai penguat komposit yang jumlahnya satu atau lebih lapisan serat tersebut. Lapisan lapisan serat digabungkan melalui mekanisme *mechanical interlocking* oleh serat itu sendiri maupun

dari material lain yang berguna untuk menjaga kedudukan serat agar tetap pada posisinya. Anyaman serat dihasilkan dengan cara menjalin sejajar bagian serat agar tidak bergerak (*warp*) atau benang lungsin dengan pola anyaman tertentu dimasukkan dan serat diletakkan melintang pada bagian benang tersebut dan membentuk suatu jenis bentuk anyaman. Tetapnya posisi serat dikarenakan adanya mekanisme saling kunci (*mechanical interlocking*). Teknik menganyam serat yang umumnya digunakan antara lain *plain*, *twill*, *satin*, *basket*, *leno*, dan *mock leno*. Kekuatan komposit serat anyam dapat berbeda sesuai variasi serat dan metode anyaman.



Gambar 2.4 Jenis anyaman *plain*, *twill*, *satin*, *basket*, *leno*, dan *mock leno*.

Sumber: NetComposites (2016)

2.5 Serat Daun Pandan Laut

Serat alam (*natural fiber*) adalah jenis-jenis serat sebagai bahan baku industri tekstil atau lainnya, yang diperoleh langsung dari alam. Berdasarkan asal usulnya, serat alam dapat diklasifikasikan menjadi beberapa kelompok, yaitu serat yang berasal dari hewan, bahan tambang, dan tumbuhan (Kirby, 1963).

Pandanus Tectorius atau disebut juga pandan laut merupakan tumbuhan yang termasuk dalam famili Pandanaceae yang banyak dijumpai di pesisir pantai Indonesia. Asal mula tanaman ini dari Australia Timur, Hawaii, dan Kepulauan Pasifik. Daun pandan laut merupakan tumbuhan yang daunnya berbentuk pita, berwarna hijau tua, agak kaku seperti daun nanas, yang tepi dan punggung daunnya berduri, biasanya dianyam untuk membuat tikar, topi, dsb. (Tim Redaksi Kamus Besar Bahasa Indonesia, 2002:821).

2.6 Metode Hand Lay Up

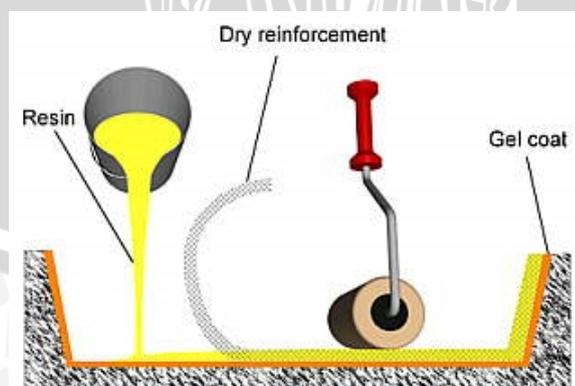
Proses ini merupakan metode yang paling sederhana untuk memproduksi polimer yang diperkuat serat. Cara pembuatan dengan sistem *hand lay-up* dilakukan dengan melapisi cetakan dengan lilin yang bertujuan mencegah lengketnya material pada cetakan yang terlebih lagi di sudut cetakan. Setelah melapisi cetakan, meletakkan matriks yang akan digunakan dan kemudian melapisi dengan perekat berupa epoxy adhesive lalu kemudian meletakkan serat. Setelah serat diletakkan pada cetakan, selanjutnya dilapisi oleh perekat dan diletakkan matrik yang kedua. Adanya penekanan digunakan untuk meratakan dan menghilangkan udara yang terperangkap.

Kelebihan:

- Biayanya murah
- Dapat digunakan untuk benda besar maupun kecil
- Alat yang digunakan sederhana
- Bisa digunakan untuk serat pendek / panjang
- Mudah mengerjakannya

Tahap proses pembuatan produk material komposit secara umum:

1. Pembersihan dan pemberian pelicin.
2. Pemberian matriks polimer
3. Pemberian serat pada matriks polimer yang telah dilapisi perekat
4. Pemberian matriks pada serat yang telah dilapisi perekat
5. Penekanan untuk mengurangi gelembung udara terjebak



Gambar 2.5 Metode *hand lay up*

Sumber: Gibson (1994)

2.7 Perekatan

Perekatan merupakan proses penggabungan dua permukaan material dengan menggunakan suatu bahan tambahan berupa perekat atau *adhesive*.

Perekat atau *adhesive* merupakan suatu bahan tambahan yang digunakan pada proses perekatan yang bekerja secara *physical reaction* dan *chemical reaction* terhadap permukaan suatu material sehingga terjadi gaya tarik-menarik atau terjadinya suatu ikatan. Perekat umumnya terdiri dari dua type yaitu *water base* dan *solvent base*, dimana setiap tipe tersebut memiliki karakteristik yang berbeda.

Sedangkan material pada perekatan merupakan bahan yang akan direkatkan atau digabungkan yang memiliki permukaan padat. Salah satu alternatif untuk menyambung material yang tidak tahan panas adalah dengan cara perekatan dengan bahan perekat (*adhesive*). Kelebihan dari perekatan adalah tidak merusak struktur material induknya. Pada saat perekatan, dimana semakin luas panjang area perekatan maka semakin besar kekuatan sambungan. Penting untuk menjaga dua permukaan material yang sedang direkatkan tetap contact serta diberi penekanan (Timming, 1994).

Hal yang perlu diperhatikan dalam perekatan antara lain kekasaran permukaan material yang akan direkatkan, tipe perekat atau perekat yang akan digunakan, pemberian penekanan untuk mengurangi rongga dan udara di dalam lapisan perekat, dan pengujian untuk mengetahui kekuatan geser.

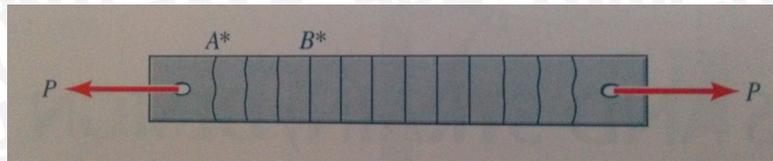
2.8 Pembebanan

Pembuatan komposit dilakukan berdasarkan sifat-sifat dasar bahan untuk mencapai kekuatan yang tepat dalam pengaplikasian bahan dengan mempertimbangkan tegangan ataupun kekuatan yang dibutuhkan. Karena material komposit merupakan gabungan dari material dasar yang memiliki sifat tertentu dan kelebihan terhadap beban tertentu juga. Untuk itu material komposit sangat berguna untuk memperbaiki sifat dasar dan menambah kekuatan dari segala sisi pembebanan.

Terdapat empat beban langsung utama dimana setiap bahan dalam suatu struktur harus menahannya yaitu tarik, tekan, geser/lintang dan lentur.

1. Tarik

Pembebanan tarik dilakukan secara aksial dengan arah yang berlawanan. Reaksi komposit terhadap beban tarik sangat tergantung pada sifat kekakuan dan kekuatan tarik dari serat penguat yang lebih besar dari kekuatan tarik dari matriks dan penguat (mika).

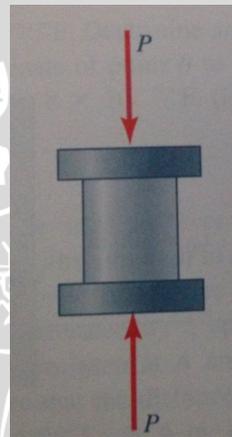


Gambar 2.6 Pembebanan Tarik

Sumber: Roy, Craig (1996)

2. Tekan

Pembebanan tekan dilakukan secara aksial yang berlawanan arah dan menuju ke titik pusat material. Reaksi komposit terhadap pembebanan tekan berdasarkan kekuatan tekan yang berasal dari daya rekat dan kekakuan dari material karena ikatan antara penguat, matriks dan filler yang nantinya akan menjaga dan mencegah dari tekukan (buckling).

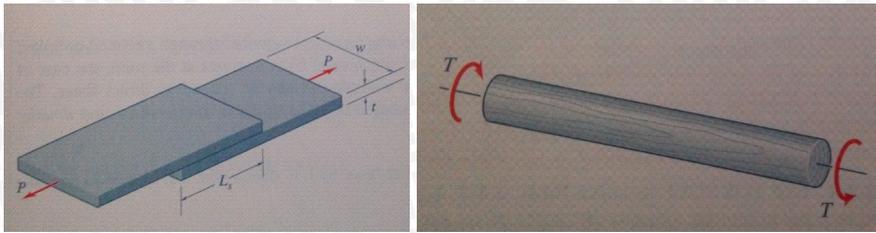


Gambar 2.7 Pembebanan Tekan

Sumber: Roy, Craig (1996)

3. Geser

Pembebanan geser dilakukan dengan memberikan pembebanan uniaksial. Tergantung dari arah pembebanan, beban geser bisa berkembang menjadi beban puntir. Dalam komposit laminate, beban geser mencoba untuk meluncurkan setiap lapisan seratnya. Di dalam tegangan geser komposit, peranan utama adalah peran matriks. Untuk membuat komposit tahan terhadap beban geser, unsur matriks diharuskan tidak hanya mempunyai sifat-sifat mekanis yang baik tetapi juga daya rekat yang tinggi terhadap serat penguat.

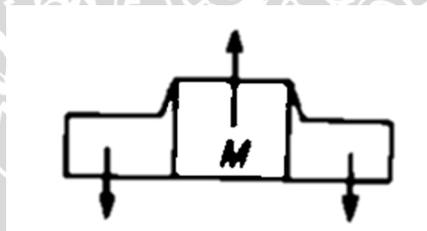


Gambar 2.8 Pembebanan Geser dan Puntir

Sumber: Roy, Craig (1996)

4. Lendutan (*Bending*)

Beban lendut dilakukan untuk mengetahui nilai elastisitas dari material karena lendutan. *Bending* atau sering disebut lendutan merupakan suatu karakteristik dari suatu material yang dikarenakan oleh gaya luar yang tegak lurus dengan benda. Terdapat tiga gaya internal yang diakibatkan oleh beban lateral yaitu *shear* (sejajar dengan pembebanan lateral), tekan (sepanjang bagian atas *beam*) dan tarik (sepanjang bagian bawah *beam*). Pembebanan lentur biasanya dilakukan dengan cara memberikan beban pada material yang ditumpu, seperti Gambar 2.8 (c).



Gambar 2.9 Pembebanan Bending

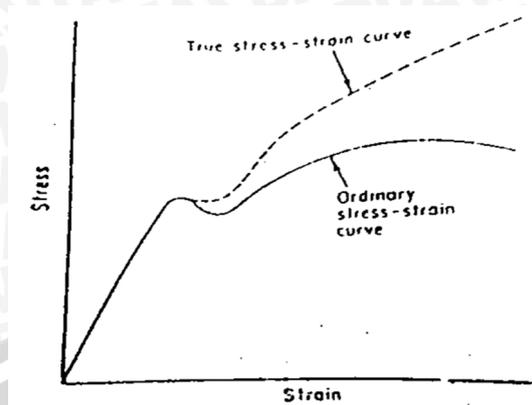
Sumber: Timoshenko (1983)

2.9 Uji Tarik

Pengujian Tarik adalah suatu metode yang digunakan untuk menguji kekuatan suatu bahan/material dengan cara memberikan beban gaya yang sesumbu dan statis yang diberikan secara lambat. Salah satu cara untuk mengetahui besaran sifat mekanik dari logam adalah dengan uji tarik. Sifat mekanik yang dapat diketahui adalah kekuatan dan elastisitas dari logam tersebut. Uji tarik banyak dilakukan untuk melengkapi informasi rancangan dasar kekuatan suatu bahan dan sebagai data pendukung bagi spesifikasi bahan. Nilai kekuatan dan elastisitas dari material uji dapat dilihat dari kurva uji tarik.

Pengujian Tarik dilakukan dengan memberi penjepit di ujung material dan diberikan sebuah beban yang letaknya segaris dengan sumbu benda. Beban segaris dengan sumbu dilakukan untuk menghilangkan adanya momen tarik apabila dilakukan pengujian.

1. Kekuatan Tarik



Gambar 2.10 Kurva Tegangan – Regangan

Sumber: Timoshenko (1983)

Hampir semua logam memiliki hubungan antara beban atau gaya yang diberikan berbanding lurus dengan perubahan panjang bahan pada tahap awal pada pengujian tarik. Apabila ditarik sebuah daerah, maka daerah ini disebut daerah linier atau *linear zone*. Di daerah ini, kurva pertambahan panjang dan beban mengikuti aturan Hooke yaitu rasio tegangan (*stress*) dan regangan (*strain*) adalah konstan. *Stress* adalah besarnya beban yang diterima tiap satuan luas pada spesimen, yang secara matematis dapat dirumuskan sebagai besarnya beban dibagi dengan luas penampang. *Strain* adalah besarnya perbandingan antara besar deformasi yang terjadi dan panjang mula-mula bahan.

2. Tegangan Tarik (*Stress*)

Tegangan tarik adalah besar gaya tarik dibagi dengan luas penampang suatu benda. Tegangan tarik termasuk gaya persatuan luas.

$$\sigma = F / A \dots\dots\dots \text{Timoshenko (1983) (2-1)}$$

dengan:

$$\sigma = \text{Tegangan (kg/cm}^2\text{)}$$

$$F = \text{Gaya yang bekerja/beban (kg)}$$

$$A = \text{Luas penampang (cm}^2\text{)}$$

3. Regangan (*Strain*)

Regangan didefinisikan sebagai perubahan ukuran atau bentuk material dari panjang awal sebagai hasil dari gaya yang menarik atau yang menekan pada material.

$$\varepsilon = \Delta \ell / L_0 \dots\dots\dots \text{Timoshenko (1983) (2-2)}$$

dengan:

ε = Regangan (*Strain*)

$\Delta \ell$ = Perubahan Panjang

L_0 = Panjang mula-mula

4. Modulus Young

Selama gaya F yang bekerja pada benda elastis tidak melampaui batas elastisitasnya, maka perbandingan antara tegangan (σ) dengan regangan (ε) adalah konstan. Bilangan (konstanta) tersebut dinamakan modulus elastis atau Modulus Young (E). Jadi, modulus elastis atau Modulus Young merupakan perbandingan antara tegangan dengan regangan yang dialami oleh suatu benda.

$$E = \sigma / \varepsilon \dots\dots\dots \text{Timoshenko (1983) (2-3)}$$

dengan:

E = Modulus Young (Pa)

σ = Tegangan (kg/cm²)

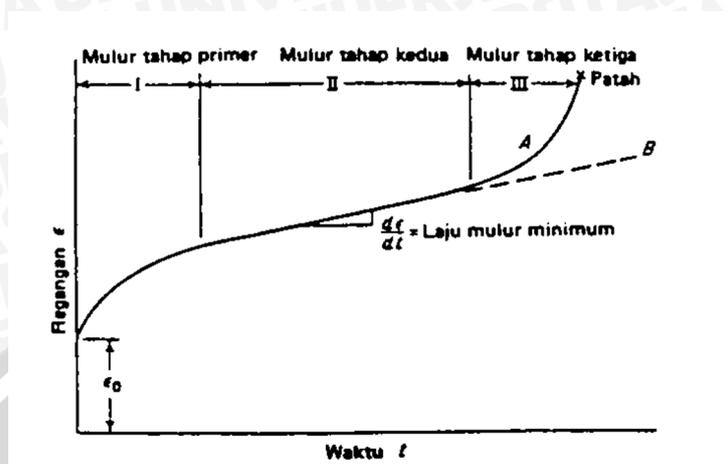
ε = Regangan (*Strain*)

2.10 Mulur (*Creep*)

Pada umumnya, apabila material dioperasikan pada temperatur tinggi, yaitu lebih dari sepertiga dari titik lebur material tersebut (dalam derajat Kelvin), dan secara bersamaan mendapat gaya tarik, geser, puntir atau gabungan dari gaya-gaya tersebut, secara fungsi waktu akan mengalami deformasi meskipun gaya yang bekerja besarnya dibawah titik luluh (*yield point*) material tersebut. Deformasi seperti ini dikenal dengan istilah *creep*, yaitu pemuluran bahan yang terjadi pada beban konstan, dan deformasinya tergantung pada waktu, atau secara bentuk persamaan dapat ditulis dengan:

$$\varepsilon = f(t, \sigma, T) \dots\dots\dots \text{Gibson (1994) (2-4)}$$

Pada gambar 2.11 memperlihatkan *creep* yang terjadi secara ideal pada suatu material, derajat kemiringan pada gambar ini adalah $d\varepsilon/dt$ menunjukkan *creep rate* yang merupakan fungsi dari waktu. Pada umumnya, terjadinya proses *creep* terdiri dari tiga tahap.



Gambar 2.11 Kurva regangan *creep* ideal.

Sumber: Gibson (1994)

Mulur tahap pertama (mulur primer) merupakan daerah utama dari mulur dimana hambatan mulur bahan mulau bertambah besar akibat deformasi yang terjadi. Mulur tahap kedua (mulur sekunder) merupakan daerah dimana laju mulur yang terjadi hampir tetap, akibat dari terjadinya keseimbangan antara kecepatan proses pengerasan regang dan pemulihan (recovery) sehingga pada daerah ini sering juga disebut daerah Mulur Steady-State. Nilai rata-rata laju mulur terjadi dalam daerah mulur sekunder ini dinamakan laju mulur minimum. Mulur tahap ketiga (mulur tersier) terjadi saat mulai adanya penyempitan luas penampang (necking) dan pembentukan rongga internal pada material.

Kurva mulur tegangan tetap merupakan superposisi dua buah proses mulur yang berbeda yang terjadi setelah regangan mendadak yang dihasilkan oleh beban yang dikenakan (Andrade, 1914).

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \left(1 + \beta \frac{1}{3} \right) e^{it} \dots \dots \dots \text{Andrade (1914) (2-5)}$$

Dari penelitian Nemy dan Rhines juga diketahui bahwa rongga terjadi bersamaan dengan kerusakan *creep*. Ada dua macam retakan *creep*, yaitu retakan baji (*wedge shape crack*) dan rongga berbentuk melingkar (*round shape cavities*). Retakan berbentuk baji terbentuk pada temperatur rendah dengan tegangan tinggi, sedangkan rongga berbentuk melingkar terjadi pada temperatur tinggi dan tegangan rendah.

2.11 Retak (*Crack*)

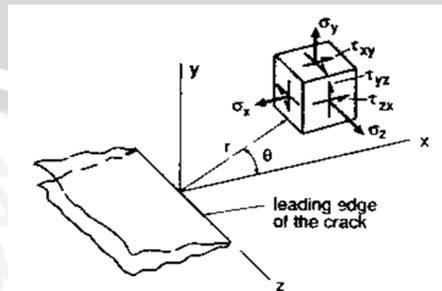
Fatigue (kelelahan) pada material dapat dikatakan sebagai terjadinya patah yang disebabkan oleh pembebanan yang terjadi dalam suatu siklus. *Fatigue* didefinisikan sebagai proses perubahan yang progresif pada struktur secara permanen di lokasi tertentu atau terlokalisir yang disebabkan oleh siklus beban berulang (*stress* atau *strain*), dengan akumulasi dari perubahan ini akan mengakibatkan retak (*crack*) ataupun patah (*fracture*) (ASTM, *American Society of Testing Material*). Kelelahan menduduki 90% penyebab utama kegagalan pemakaian. Terdapat 3 fase dalam perpatahan akibat kelelahan, yaitu :

1. Bertambahnya tegangan pada daerah retak yang dapat menimbulkan adanya konsentrasi tegangan yang kemudian akan terjadi bentuk plastis yang nantinya membentuk suatu retak mikro pada daerah tersebut.
2. Retak mikro yang terbentuk akan berkembang dan jika pembebanan berulang diteruskan, retak akan merambat.
3. Setelah retak merambat cukup jauh, beban yang bekerja akan hanya ditumpu oleh penampang sisa dan yang akhirnya terjadi *final fracture*.

Berdasarkan tipe panjang retak, retak dibagi menjadi 3, yaitu :

1. *Physically Short Crack*, pada tipe ini ukuran retakan lebih kecil bila dibandingkan dengan ukuran butiran.
2. *Mechanically Short Crack*, retak yang merambat pada daerah plastis. Pada tipe ini, radius plastis lebih besar daripada panjang retak.
3. *Long Crack*, pada tipe ini panjang retak yang terjadi mempunyai ukuran yang lebih panjang daripada radius plastis yang terbentuk pada ujung retak.

Faktor intensitas tegangan digunakan dalam mekanika patahan suatu material agar lebih akurat dalam memprediksi intensitas tegangan yang terjadi di ujung retak yang disebabkan oleh pemberian beban atau tegangan sisa.



Gambar 2.12 Sistem koordinat di daerah ujung retak

Sumber: Dowling (1998)

Secara umum, faktor intensitas tegangan dapat dirumuskan sebagai :

$$K_I = FS \sqrt{\pi a} \dots\dots\dots \text{Dowling (1998) (2-6)}$$

dengan :

a = panjang retak (mm)

F = Faktor akibat adanya retakan

S = tegangan yang bekerja pada bahan (MPa)

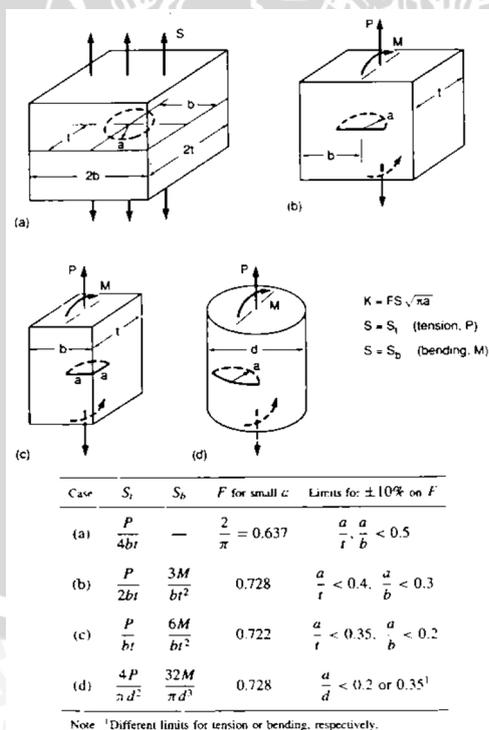
$$F = (1 - (0,1 \eta^2) + (0,96 \eta^4)) \sqrt{1/\cos(\pi a)} \dots\dots\dots \text{Pilkey (1996) (2-7)}$$

dengan :

$\eta = a/b$

b = lebar penampang

Dalam pengaplikasian, retak mempunyai berbagai bentuk seperti lingkaran, setengah lingkaran dan seperempat lingkaran seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.13 dibawah ini :

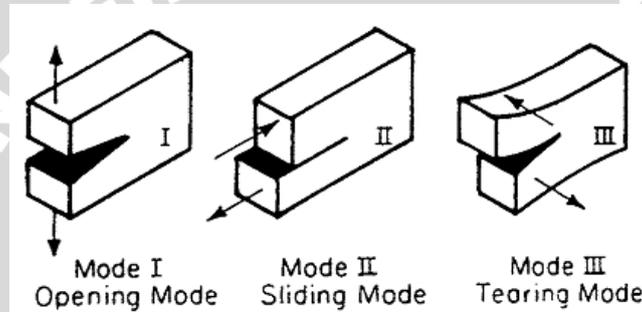


Gambar 2.13 Faktor intensitas tegangan untuk retak berbentuk lingkaran akibat tegangan tarik normal, setengah lingkaran, seperempat lingkaran, dan retak berbentuk setengah lingkaran pada permukaan poros

Sumber: Dowling (1998)

2.12 Mode Bukaian Retak

Fenomena perkembangan dan pembukaan retak dapat terjadi dalam berbagai bentuk. Berdasarkan beban yang bekerja pada material, bukaian retak ini dapat digolongkan ke dalam tiga mode bukaian, yaitu mode I, mode II dan mode III sebagaimana ditunjukkan dalam gambar 2.14. Retak mode I (opening mode) merupakan retak akibat beban normal atau beban bekerja tegak lurus pada bidang retak. Retak mode II (sliding mode) merupakan retak akibat beban geser yang bekerja pada material. Pada mode ini retak berkembang sejajar dengan gaya-gaya utama yang menyebabkan keretakan. Retak mode III (tearing mode) merupakan retak yang diakibatkan oleh gaya puntir yang mengarah keluar bidang retak. Kombinasi dari ketiga mode retak tersebut juga dapat terjadi.



Gambar 2.14 Mode bukaian retak

Sumber: Broek (1982)

2.13 Hipotesis

Berdasarkan dasar teori, maka hipotesis yang bisa diambil yaitu semakin besarnya beban yang diterima spesimen, maka akan menyebabkan regangan mulur yang lebih besar yang diakibatkan oleh adanya tegangan yang semakin besar. Dapat diambil juga hipotesis tentang semakin panjang *notch* yang ada pada spesimen maka semakin kecil regangan mulur yang terjadi akibat adanya faktor intensitas tegangan. Besarnya beban dan panjang *notch* mempengaruhi laju mulur dari spesimen.