

# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Semakin meningkatnya perkembangan hidup manusia maka jamanpun ikut berkembang dengan pesat. Karena perkembangan manusia bertambah maju maka bidang teknologi pun ikut berkembang sangat pesat dengan harapan segala kebutuhan manusia dapat terpenuhi dengan baik. Jika diperhatikan, segala kebutuhan manusia tidak lepas dari unsur material, sehingga material mempunyai peranan aktif dalam kehidupan manusia dan menunjang teknologi dijamin sekarang. Oleh karena itu timbul usaha-usaha manusia untuk memperbaiki sifat dari material tersebut yaitu dengan menggabungkan sifat dari kedua bahan atau atau lebih agar memiliki fungsi yang lebih baik sebelum digabungkan dengan syarat adanya ikatan permukaan antara kedua material tersebut.

Salah satunya adalah material komposit. Komposit pada umumnya diklasifikasikan menjadi 2 bagian yang berbeda dimana fasa kontinyu disebut matrik, dan fasa diskontinyu disebut sebagai penguat material. Interaksi antara komponen penyusun komposit juga merupakan hal yang penting, karena menentukan sifat dari bahan komposit yang dihasilkan. Komposit dari bahan serat (*fibrous composites*) terus diteliti dan dikembangkan guna menjadi bahan alternatif pengganti bahan logam, hal ini disebabkan karena sifat dari komposit serat yang kuat dan mempunyai berat yang lebih ringan dibandingkan dengan logam. Susunan komposit serat terdiri dari serat dan matrik sebagai pengikatnya. Bahan komposit telah banyak digunakan dalam industri pesawat terbang, otomotif, maupun untuk alat-alat olahraga sampai peralatan rumah tangga.

Serat adalah suatu jenis bahan berupa potongan-potongan komponen yang membentuk jaringan memanjang yang utuh. Serat sangat penting dalam bidang otomotif maupun dalam bidang ilmu pengetahuan. Manusia juga menggunakan serat dalam banyak hal yaitu untuk membuat tali, kain, atau kertas. Serat juga dapat digolongkan menjadi dua jenis yaitu serat alami dan serat sintetis (serat buatan manusia). Serat sintetis dapat diproduksi secara murah dalam jumlah yang besar. Namun, serat alami memiliki berbagai kelebihan khususnya dalam hal kenyamanan. Salah satu serat alam

yang banyak digunakan adalah serat batang pisang. Serat pisang ini merupakan jenis serat yang berkualitas baik, dan merupakan salah satu bahan potensial alternatif yang dapat digunakan sebagai penguat pada pembuatan komposit *polyester*. Batang pisang sebagai limbah dapat dimanfaatkan menjadi sumber serat yang mempunyai nilai ekonomis yang tinggi, ramah lingkungan, dan mudah didapat.

Sementara itu tempurung kelapa merupakan senyawa organik yang dapat diuraikan oleh mikroorganisme (biodegradasi) secara alamiah di alam, dan juga salah satu sumber bahan pengisi alamiah yang potensial dan mempunyai prospek ekonomis tinggi. Hal ini berkaitan dengan perkembangan teknologi, faktor ekonomis dan isu-isu lingkungan. Komposisi kimia yang dimiliki oleh tempurung kelapa hampir sama dengan komposisi pada batang kayu.

*Resin polyester* merupakan *resin* yang paling banyak digunakan dalam berbagai aplikasi komposit yang menggunakan *resin termoset* dalam bentuk material komposit. Walaupun secara mekanik, sifat mekanik yang dimiliki oleh *resin polyester* tidaklah terlalu baik atau hanya sedang-sedang saja namun *resin* ini mudah untuk didapat dan harga yang relatif terjangkau serta yang terpenting mudah dalam proses pabrikasinya.

Dari penggunaan matrik dan serat yang memiliki keunggulan dalam pemanfaatannya sebagai penguat pada bahan komposit, sehingga timbullah suatu keinginan untuk melakukan penelitian tentang pengaruh fraksi volume serat, panjang serat, dan fraksi volume *filler* tempurung kelapa terhadap kekuatan bending komposit.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang tersebut di atas dapat dirumuskan permasalahan adalah bagaimana pengaruh variasi fraksi volume serat pisang dan *filler* tempurung kelapa terhadap kekuatan bending komposit serat dengan matrik *polyester*.

## **1.3 Tujuan Penelitian**

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk:

- a. Untuk menganalisis pengaruh variasi fraksi volume serat pisang dan *filler* tempurung kelapa terhadap kekuatan bending komposit serat dengan matrik *polyester*.

#### **1.4 Manfaat Penelitian**

Adapun manfaat dilakukannya penelitian ini adalah:

- a. Dapat memberikan solusi terhadap pentingnya pemanfaatan serat alam dan *filler* tempurung kelapa sebagai penguat dan pengisi material komposit.
- b. Dapat mengetahui pengaruh variasi fraksi volume serat terhadap kekuatan material komposit.

#### **1.5 Batasan Masalah**

Penulisan tugas akhir ini dibatasi pada pembahasan:

- a. Serat yang digunakan dalam pembuatan komposit adalah serat pisang.
- b. Fraksi volume serat yaitu 20%, 30% dan 40% dengan fraksi volume *filler* 8%, 9% dan 10%
- c. Panjang serat yang digunakan 5 cm, 10 cm dan 15 cm
- d. Serat pisang yang digunakan dalam bentuk acak.
- e. Matrik yang digunakan adalah *unsaturated resin polyester* (UPR).
- f. Pembuatan spesimen uji dengan menggunakan metode *compaction*.
- g. Pengujian mekanis yang dilakukan yaitu pengujian *Bending*.

#### **1.6 Tempat Penelitian**

Penelitian ini akan dilakukan di Laboratorium Material Teknik Mesin dan Laboratorium Geologi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Mataram.

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

### 2.1 Tinjauan Pustaka

Serat alam telah terbukti sebagai material yang kuat, mampu untuk menggantikan serat sintetik sebagai penguat. Serat batang pisang di masyarakat pada umumnya hanya sebagai limbah yang tidak dimanfaatkan, padahal serat batang pisang bisa dimanfaatkan sebagai bahan komposit. Serat batang pisang kepok salah satu serat yang memiliki potensi sebagai penguat untuk *polyester* material komposit. Ojahan dan Aditya (2015) melakukan penelitian ada material komposit berpenguat (*fiber*) serat batang pisang kepok dapat menahan beban yang diterima material komposit. Sedangkan *unsaturated resin polyester* (UPR) sebagai pengikat serat batang pisang, bekerja menahan beban dan melindungi serat dari kerusakan.

Boimau (2010) melakukan penelitian yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh panjang serat dan fraksi volume terhadap sifat bending komposit polyester yang diperkuat serat batang pisang dengan panjang serat 5 cm dan 2 cm. dengan variasi fraksi volume serat yang digunakan sebesar 20 %, 30 %, dan 40 %. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kekuatan bending komposit meningkat seiring dengan meningkatnya fraksi volume serat dan komposit dengan panjang serat 5 cm memiliki nilai kekuatan bending yang lebih tinggi dari komposit dengan panjang serat 2 cm, pada semua fraksi volume. Tegangan bending terbesar diperoleh pada fraksi volume serat 40 % untuk komposit dengan panjang serat 5 cm sebesar 83,08 MPa dan terendah pada fraksi volume serat 20 % sebesar 34,53 MPa.

Diharjo (2005) telah meneliti pengaruh lama perlakuan alkali terhadap kekuatan tarik komposit serat kenaf dengan lama perlakuan 0, 2, 4, 6 dan 8 jam. Berdasarkan hasil penelitiannya dapat disimpulkan bahwa dengan perlakuan alkali serat alam selama 2 jam menghasilkan kekuatan tarik dan *modulus elastis* paling tinggi. Kekuatan komposit yang diperkuat serat tanpa perlakuan dan dengan perlakuan alkali masing-masing adalah 28,38MPa dan 31,57MPa. Hasil tersebut menunjukkan bahwa serat

dengan perlakuan alkali (5% NaOH) mampu meningkatkan kekuatan *bending* komposit tersebut (Jamarsi et al, 2006).

Pratama et al. (2014) meneliti pengaruh perlakuan alkali, fraksi volume serat, dan panjang serat terhadap kekuatan tarik komposit serat sabut kelapa-*polyester* dengan fraksi volume serat yaitu 35%, 40%, dan 45%. Hasil penelitiannya pada variasi fraksi volume menunjukkan bahwa semakin besar fraksi volume serat semakin kecil nilai kuat tariknya. Fraksi volume serat yang terlalu besar menurunkan kekuatan tarik karena semakin banyak serat pada komposit maka komposisi serat akan lebih padat sehingga mempersulit resin/matrik untuk masuk kesela-sela serat secara sempurna, sehingga berakibat resin tidak dapat mengikat seluruh bagian serat secara sempurna. Dengan fraksi volume serat 35% mempunyai nilai rata-rata kuat tarik ter tinggi sebesar 16,42 MPa. Prasetyo (2007) telah meneliti pengaruh fraksi volume serat aren (*arenga pinata*) dengan matrik *polyester* terhadap kekuatan *bending* dan tarik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kekuatan tarik maksimal dimiliki oleh komposit dengan fraksi volume 40% yang besarnya 1,4 kg/mm<sup>2</sup>. Sedangkan *flexural* modulus dan *flexural strength* tertinggi terjadi pada komposit dengan fraksi volume 40 %, yang besarnya adalah 129,4 kg/mm<sup>2</sup> dan 6,4 kg/mm<sup>2</sup>.

Penelitian mengenai komposit telah banyak dilakukan. Salah satunya fraksi volume dari *filler* material komposit akan mempengaruhi sifat mekanik dari material komposit. Azwar (2009) meneliti mengenai perilaku mekanik komposit *polyester* yang diperkuat dengan prtikel serbuk kayu keras dan lunak, dengan perbandingan fraksi volume antara volume *filler* dengan volume matrik dengan rasio 10, 15 dan 20. Hasil pengujian menunjukkan komposit dengan *filler* dari jenis serbuk kayu lunak dengan komposisi dan ukuran *filler* 10 fraksi volume dan 0.4 mm mengalami peningkatan sifat mekanik yang paling bagus yaitu 0,0722 kN/mm<sup>2</sup> untuk *filler* kayu lunak dan 0,0657 kN/mm<sup>2</sup> untuk *filler* kayu keras. Hasil penelitian yang sudah dilakukan oleh Sari, dkk (2013) menunjukkan bahwa pada fraksi volume 20% serat dan fraksi volume *filler* serbuk kayu sengon 5%, terjadi kecenderungan peningkatan kekuatan *bending* pada variasi panjang serat 15, 20, 25, 50 (mm) dengan rata-rata kekuatan *bending* secara berurutan masing-masing sebesar 56,7 Mpa, 67 Mpa, 90 Mpa dan 93.33 Mpa.

## 2.2 Dasar Teori

### 2.2.1. Komposit

#### A. Definisi Komposit

Kata komposit merupakan kata sifat yang berarti susunan atau gabungan. Komposit berasal dari kata “*to compose*” yang berarti menyusun atau menggabungkan. Jadi secara sederhana bahan komposit berarti bahan gabungan dari dua atau lebih bahan yang berlainan. Dalam hal ini gabungan bahan ada dua macam yaitu (Jones, 1999):

- 1). Gabungan secara makro yaitu dibedakan secara visual, penggabungan lebih secara fisis dan mekanis, dapat dipisahkan secara fisis dan mekanis.
- 2). Gabungan secara mikro yaitu tidak dapat dibedakan secara visual, penggabungan ini lebih secara kimia, sulit dipisahkan, tetapi dapat dilakukan secara kimia.

Bahan komposit merupakan bahan gabungan secara makro sehingga bahan komposit dapat didefinisikan sebagai suatu sistem material yang tersusun dari campuran atau kombinasi dua atau lebih unsur-unsurnya yang secara makro berbeda di dalam bentuk dan atau komposisi material pada dasarnya tidak dapat dipisahkan. Komposit dibentuk dari dua komponen penyusun yang berbeda yaitu penguat (*reinforcement*) yang mempunyai sifat sulit dibentuk tetapi lebih kaku serta lebih kuat dan matrik yang umumnya mudah dibentuk tetapi mempunyai kekuatan dan kekakuan yang lebih rendah.

Perbedaan dan penggabungan dari unsur-unsur yang berbeda tersebut menyebabkan daerah-daerah yang berbatasan. Daerah tersebut disebut dengan *interface*. Sedangkan daerah ikatan antara material penyusun komposit disebut *interphase*. Berdasarkan uraian tersebut, maka aspek penting yang menunjukkan sifat-sifat mekanis dari komposit tersebut adalah optimasi dari ikatan antara *fiber* polimer (matrik) yang digunakan. Ikatan antara *fiber* dengan matrik dipengaruhi langsung oleh reaksi yang terjadi antara matrik dan *fiber*. Dengan kata lain transfer beban atau tegangan diantara dua fase yang berbeda ditentukan oleh derajat adhesi (Schwartz, 1984).

Berikut ini adalah tujuan dari dibentuknya komposit, yaitu sebagai berikut:

1. Memperbaiki sifat mekanik dan/atau sifat spesifik tertentu
2. Mempermudah design yang sulit pada manufaktur
3. Keleluasaan dalam bentuk/design yang dapat menghemat biaya
4. Menjadikan bahan lebih ringan

Berdasarkan bentuk komponen strukturnya, bentuk-bentuk komponen utama yang digunakan dalam material komposit dapat dibagi atas tiga kelas (Schwartz, 1984), yaitu :

### 1. Komposit Serat

Komposit serat (*Fibrous Composite*) adalah komposit yang terdiri dari serat dan matrik yang dibuat secara fabrikasi, misalnya serat ditambah resin sebagai bahan perekat. Fungsi utama dari serat adalah sebagai penopang kekuatan dari komposit, sehingga tinggi rendahnya kekuatan komposit sangat tergantung dari serat yang digunakan, karena tegangan yang dikenakan pada komposit mulanya diterima oleh matrik akan diteruskan kepada serat, sehingga serat akan menahan beban sampai beban maksimum. Oleh karena itu serat harus mempunyai tegangan tarik dan modulus elastisitas yang lebih tinggi daripada matrik penyusun komposit.

Komposit serat merupakan jenis komposit yang hanya terdiri dari satu lamina atau satu lapisan yang menggunakan penguat berupa serat. Serat yang digunakan bisa berupa glass fibers, carbon fibers, aramid fibers, dan sebagainya. Serat ini disusun secara acak (*chopped strand mat*) maupun dengan orientasi tertentu bahkan bisa juga dalam bentuk yang lebih kompleks seperti anyaman, sebagai contoh FRP (*Fibrous Reinforced Plastic*) plastik yang diperkuat dengan serat dan banyak digunakan, yang sering disebut fiber glas, contoh lainya PCB (*Pulp Cement Bord*) semen yang diperkaya dengan seret pulp dan dicetak dalam lembaran datar atau gelombang. PCB menggantikan papan asbes dalam penggunaannya, karena asbes akan terhisap dan merugikan kesehatan dengan menimbulkan gangguan kesehatan pada paru-paru.

Fiber yang digunakan harus memiliki syarat sebagai berikut :

- a. Mempunyai diameter yang lebih kecil dari diameter bulknya (matriksnya) namun harus lebih kuat dari bulknya
- b. Harus mempunyai tensile strength yang tinggi

### 2. Komposit partikel

Komposit partikel (*Particulate Composite*) adalah komposit yang terdiri dari partikel dan matrik yaitu butiran. Komposit partikel mempunyai bahan penguat yang dimensinya kurang lebih sama, seperti bulat serpih, balok serta bentuk-bentuk lainya yang memiliki sumbu hampir sama, yang kerap disebut partikel, dan bisa terbuat dari

satu atau lebih material yang dibenamkan dalam suatu matriks dengan material yang berbeda. Partikelnya bisa logam atau nonlogam, seperti halnya matriks. Adapula polimer yang mengandung partikel yang hanya dimaksudkan untuk memperbesar volume material dan bukan untuk kepentingan sebagai bahan penguat. Komposit ini bisa dinamakan komposit skeletal/bermuatan.

Keuntungan dari komposit yang disusun oleh reinforcement berbentuk partikel :

- a. Kekuatan lebih seragam pada berbagai arah
- b. Dapat digunakan untuk meningkatkan kekuatan dan meningkatkan kekerasan material
- c. Cara penguatan dan pengerasan oleh partikulat adalah dengan menghalangi pergerakan dislokasi.

Proses produksi pada komposit yang disusun oleh reinforcement berbentuk partikel :

- a. Metalurgi Serbuk
- b. *Stir Casting*
- c. *Infiltration Process*
- d. *Spray Deposition*
- e. *In-Situ Process*

### 3. Komposit Laminat

Komposit laminat(*Laminated Composite*), adalah gabungan dari dua atau lebih lamina (satu lembar komposit dengan arah serat tertentu) yang membentuk elemen struktur secara integral pada komposit. Proses pembentukan lamina ini menjadi laminate dinamakan proses laminasi. Sebagai elemen sebuah struktur, lamina yang serat penguatnya searah saja (unidirectional lamina) pada umumnya tidak menguntungkan karena memiliki sifat yang buruk. Untuk itulah struktur komposit dibuat dalam bentuk laminate yang terdiri dari beberapa macam lamina atau lapisan yang diorientasikan dalam arah yang diinginkan dan digabungkan bersama sebagai sebuah unit struktur.

Komposit serat dalam bentuk lamina ini yang paling banyak digunakan dalam lingkup teknologi otomotif maupun industri. Dalam hal polimer diperkuat serat, ada



zat ketiga yang disebut zat penjodoh, penggabungan atau penyerasi untuk meningkatkan sekatan antara serat dan matrik (Feldman, 1995).

## **B. Unsur Penyusun Komposit**

Pada umumnya bahan komposit terdiri dari dua unsur, yaitu serat (*fiber*) dan bahan pengikat serat tersebut yang disebut matrik.

### **1. Serat**

Salah satu unsur penyusun bahan komposit adalah serat. Serat inilah yang terutama menentukan karakteristik bahan komposit, seperti kekakuan, kekuatan serta sifat-sifat mekanik lainnya. Serat inilah yang menahan sebagian besar gaya-gaya yang bekerja pada bahan komposit.

Banyak jenis serat, baik serat alam maupun serat sintetik. Serat alam yang utama adalah kapas, wol, sutra dan rami (*hemp*). Sedangkan serat sintetik adalah rayon, *polyester*, akril, dan nilon. Masih banyak serat lainnya dibuat untuk memenuhi keperluan, sedangkan yang disebut di atas adalah jenis yang paling banyak dikenal.

Secara garis besar dapat disebutkan bahwa serat alam adalah kelompok serat yang dihasilkan dari tumbuhan, binatang dan mineral. Penggunaan serat alam di industri tekstil dan kertas secara luas tersedia dalam bentuk serat sutera, kapas, kapuk, rami kasar (*flax*), goni, rami halus dan serat daun.

Komposit dengan penguat serat (*fibrous composite*) sangat efektif, karena bahan dalam bentuk serat jauh lebih kuat dan kaku dibanding bahan yang sama dalam bentuk padat (*bulk*). Kekuatan serat terletak pada ukurannya yang sangat kecil, kadang-kadang dalam orde mikron. Ukuran yang kecil tersebut menghilangkan cacat-cacat dan ketidaksempurnaan kristal yang biasa terdapat pada bahan berbentuk padatan besar, sehingga serat menyerupai kristal tunggal yang tanpa cacat, dengan demikian kekuatannya sangat besar.

### **2. Matriks (Resin)**

*Matriks (resin)* dalam susunan komposit bertugas melindungi dan mengikat serat agar dapat bekerja dengan baik. Matriks harus bisa meneruskan beban dari luar ke serat. Umumnya matriks terbuat dari bahan-bahan yang lunak dan liat. *Polymer* (plastik) merupakan bahan umum yang biasa digunakan. Matriks juga umumnya

dipilih dari kemampuannya menahan panas. *Polyester*, *vinilester* dan *epoksi* adalah bahan-bahan *polymer* yang sejak dahulu telah dipakai sebagai bahan matriks.

Matriks mempunyai fungsi sebagai berikut :

- a. Mentransfer tegangan ke serat.
- b. Membentuk ikatan koheren, permukaan matrik/serat.
- c. Melindungi serat.
- d. Memisahkan serat.
- e. Melepas ikatan.
- f. Tetap stabil setelah proses manufaktur.

Persyaratan di bawah ini perlu dipenuhi sebagai bahan matriks untuk pencetakan bahan komposit :

- a. *Resin* yang dipakai perlu memiliki *viskositas* rendah, dapat sesuai dengan bahan penguat dan *permeable*.
- b. Dapat diukur pada temperatur kamar dalam waktu yang optimal.
- c. Mempunyai penyusutan yang kecil pada pengawetan.
- d. Memiliki kelengketan yang baik dengan bahan penguat.
- e. Mempunyai sifat baik dari bahan yang diawetkan.

Tidak ada bahan yang dapat memenuhi semua persyaratan diatas, tetapi pada saat ini paling banyak dipakai adalah *polyester* tak jenuh (Surdia, 2000).

### 3. Pengisi (*Filler*)

Pengisi adalah bahan yang banyak digunakan untuk ditambahkan pada bahan *polymer* untuk meningkatkan sifat-sifatnya dan pemerosesan untuk mengurangi ongkos produksi (Surdia, 2000). *Filler* dalam komposit digunakan sebagai penguat matrik resin *polymer*. Mekanisme *filler* dalam meningkatkan kekuatan adalah dengan membatasi pergerakan rantai polimer. Beberapa jenis *filler* ditambahkan dengan alasan meningkatkan stabilitas dimensi, anti oksidan, penyerap UV dan pewarna.

#### 4. *Katalyst*

Fungsi katalis adalah memperbesar kecepatan reaksinya (mempercepat reaksi) dengan jalan memperkecil energi pengaktifan suatu reaksi dan dibentuknya tahap-tahap reaksi yang baru. Dengan menurunnya energi pengaktifan maka pada suhu yang sama reaksi dapat berlangsung. Reaksi yang berlangsung lambat dapat dipercepat dengan menambahkan katalis yang sesuai untuk reaksi tersebut. Katalis akan mempercepat reaksi karena katalis akan mencari jalan dengan energi aktivasi yang lebih rendah sehingga reaksinya akan berlangsung lebih cepat. Satu yang harus diketahui tentang prinsip kerja katalis adalah bahwa katalis tersebut tetap ikut dalam jalannya reaksi, tetapi pada kondisi akhir, katalis akan keluar lagi dalam bentuk yang sama. Sifat-sifat kimia katalis akan sama sebelum dan sesudah mengkatalis suatu reaksi.

### **C. Faktor Yang Mempengaruhi Performa Komposit**

Penelitian yang menggabungkan antara matrik dan serat harus memperhatikan beberapa faktor yang mempengaruhi *performa* komposit (*Fiber-Matrix Composite*) antara lain:

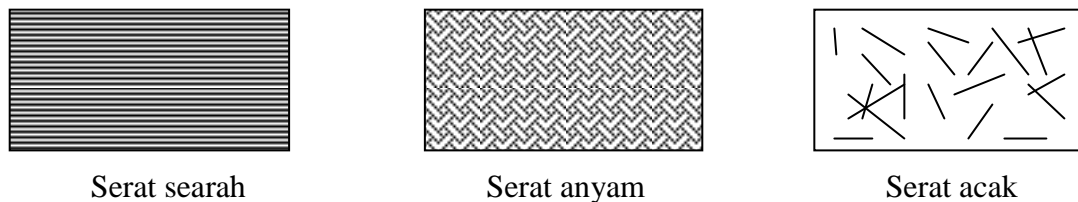
#### 1. Faktor Serat

Serat adalah bahan pengisi matrik yang digunakan untuk dapat memperbaiki sifat dan struktur matrik yang tidak dimilikinya, juga diharapkan mampu menjadi bahan penguat matrik pada komposit untuk menahan gaya yang terjadi.

#### 2. Letak Serat

Dalam pembuatan komposit tata letak dan arah serat dalam matrik yang akan menentukan kekuatan mekanik komposit, dimana letak dan arah dapat mempengaruhi kinerja komposit tersebut.

Pada pencampuran dan arah serat mempunyai beberapa keunggulan, jika orientasi serat semakin acak (*random*) maka sifat mekanik pada satu arah akan melemah, bila arah tiap serat menyebar maka kekuatannya juga akan menyebar kesegala arah maka kekuatan akan meningkat.



Gambar 2.1. Tiga Tipe Orientasi Pada *Reinforcement*

(Fitransyah,2013)

### 3. Panjang Serat

Panjang serat dalam pembuatan komposit serat pada matrik sangat berpengaruh terhadap kekuatan. Ada 2 penggunaan serat dalam campuran komposit yaitu serat pendek dan serat panjang. Serat panjang lebih kuat dibanding serat pendek. Serat alami jika dibandingkan dengan serat sintetis mempunyai panjang dan diameter yang tidak seragam pada setiap jenisnya. Oleh karena itu panjang dan diameter sangat berpengaruh pada kekuatan maupun modulus komposit. Panjang serat berbanding diameter serat sering disebut dengan istilah aspect ratio. Bila aspect panjang serat mempengaruhi kemampuan proses dari komposit serat. Pada umumnya, serat panjang lebih mudah penanganannya jika dibandingkan dengan serat pendek. Serat panjang pada keadaan normal dibentuk dengan proses filament winding, dimana pelapisan serat dengan matrik akan menghasilkan distribusi yang bagus dan orientasi yang menguntungkan.

### 4. Bentuk Serat

Bentuk serat yang digunakan untuk pembuatan komposit tidak begitu mempengaruhi kekuatan komposit, yang mempengaruhi adalah diameter seratnya. Pada umumnya, semakin kecil diameter serat akan menghasilkan kekuatan komposit yang semakin tinggi.

### 5. Faktor Matrik

Dalam pembuatan komposit, matrik dalam komposit harus berfungsi sebagai bahan yang mengikat serat menjadi sebuah unit struktur, melindungi dari kerusakan eksternal, dan dapat meneruskan atau memindahkan beban eksternal pada bidang geser antara serat dan matrik. Untuk memilih matrik harus diperhatikan sifat-sifat seperti tahan terhadap panas, tahan cuaca yang buruk, dan tahan terhadap guncangan. Bahan *polymer*

yang sering digunakan sebagai material matrik dalam komposit ada dua macam, yaitu *thermoplastik* dan *thermoset*.

#### 6. Faktor Ikatan *Fiber-Matrik*

Hal yang mempengaruhi ikatan antara serat dan matrik adalah *void*, yaitu adanya celah pada serat yang menyebabkan matrik tidak mampu mengisi ruang kosong pada cetakan, sehingga ikatan *interfacial* antara matrik dan serat kurang baik. Kemudian bila komposit tersebut menerima beban, maka daerah tegangan akan berpindah ke daerah *void*, sehingga akan mengurangi kekuatan komposit tersebut (Schwatz, 1984).

### D. Klasifikasi Komposit

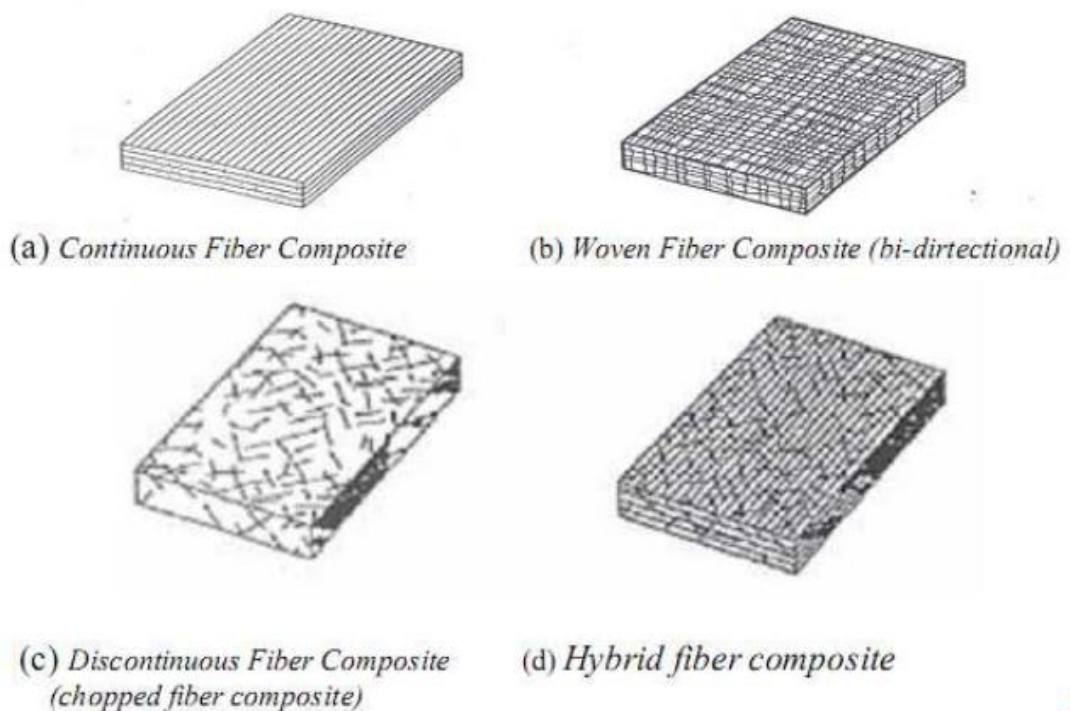
Berdasarkan *matriks* yang digunakan komposit dapat dikelompokkan atas:

1. *MMC: Metal matriks composite* (menggunakan matrik logam). *Metal matrik composite* adalah salah satu jenis komposit yang memiliki *matriks* logam. MMC mulai dikembangkan sejak tahun 1996. Pada mulanya yang diteliti adalah *Continous Filamen MMC* yang digunakan dalam industri penerbangan.
2. *CMC: Ceramic Matriks Composite* (menggunakan *matriks* keramik). CMC merupakan material dua fasa dengan satu fasa berfungsi sebagai penguat dan satu fasa sebagai *matriks* dimana matriksnya terbuat dari keramik. Penguat yang umum digunakan pada CMC adalah; oksida, carbide, nitride. Salah satu proses pembuatan dari CMC yaitu dengan proses *DIMOX* yaitu proses pembentukan komposit dengan reaksi oksidasi leburan logam untuk pertumbuhan *matriks* keramik di sekeliling daerah *filler*.
3. *PMC: Polymer Matriks Composite* (menggunakan *matriks polimer*). *Polimer* merupakan matriks yang paling umum digunakan pada material komposit. Karena memiliki sifat yang lebih tahan terhadap korosi dan lebih ringan. Matriks *polimer* terbagi 2 yaitu *thermoset* dan termoplastik. Perbedaannya *polimer* *thermoset* tidak dapat didaur ulang sedangkan termoplastik dapat didaur ulang sehingga lebih banyak digunakan belakangan ini. Jenis-jenis termoplastik yang biasa digunakan adalah *polypropylene* (PP), *polystyrene* (PS), *polyethylene* (PE), dan lain-lain.

Berdasarkan serat yang digunakan komposit serat (*fiber-matriks composites*) dibedakan menjadi:

1. *Fibre composites* (komposit serat) adalah gabungan serat dengan matrik.
2. *Flake composites* adalah gabungan serpih rata dengan matrik.
3. *Particulate composites* adalah gabungan partikel dengan matrik.
4. *Filled composites* adalah gabungan matrik *continous skeletal*
5. *Laminar composites* adalah gabungan lapisan atau unsur pokok lamina.

Berdasarkan penempatannya terdapat beberapa tipe serat pada komposit yaitu:



Gambar 2.2 Tipe serat pada komposit

(Fitransyah, 2013).

#### 1. *Continuous Fibre Composite*

Tipe ini mempunyai susunan serat panjang dan lurus, membentuk lamina diantara matriksnya. Jenis komposit ini paling banyak digunakan. Kekurangan tipe ini adalah lemahnya kekuatan antar antar lapisan. Hal ini dikarenakan kekuatan antar lapisan dipengaruhi oleh matriksnya.

## 2. *Woven Fibre Composite (bi-directional)*

Komposit ini tidak mudah dipengaruhi pemisahan antar lapisan karena susunan seratnya mengikat antar lapisan. Susunan serat memanjangnya yang tidak begitu lurus mengakibatkan kekuatan dan kekakuan melemah.

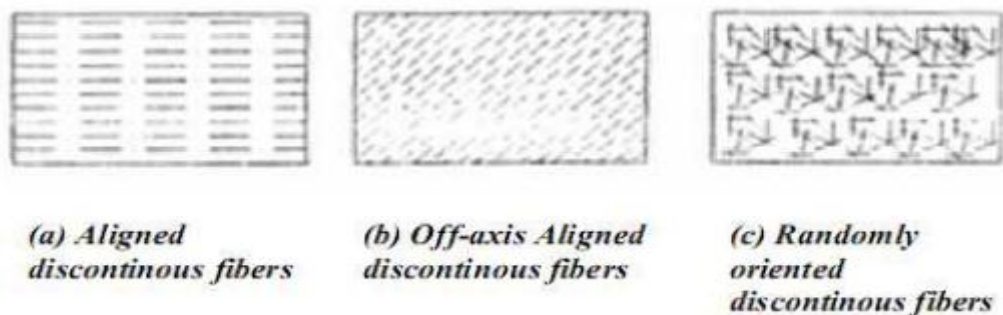
## 3. *Discontinuous Fibre Composite*

*Discontinuous Fibre Composite* adalah tipe komposit dengan serat pendek.

Tipe ini dibedakan lagi menjadi 3 yaitu :

- a. *Aligned discontinuous fibre*
- b. *Off-axis aligned discontinuous fibre*
- c. *Randomly oriented discontinuous fibre*

Randomly oriented discontinuous fiber merupakan komposit dengan serat pendek yang tersebar secara acak diantara matriksnya. Tipe acak sering digunakan pada produksi dengan volume besar karena faktor biaya manufakturnya yang lebih murah. Kekurangan dari jenis serat acak adalah sifat mekanik yang masih dibawah dari penguatan dengan serat lurus pada jenis serat yang sama.



Gambar 2.3 Tipe *discontinuous fiber*

(Fitransyah, 2013).

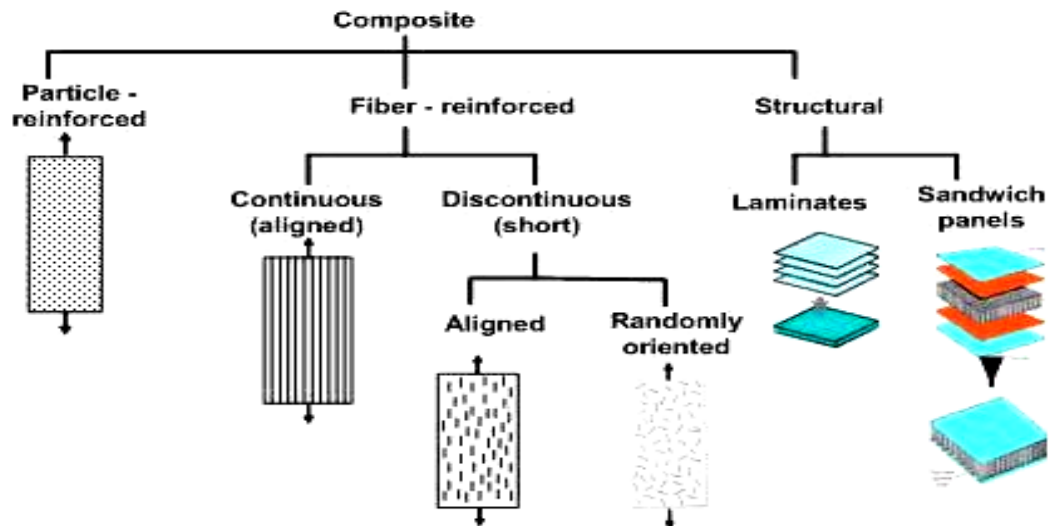
## 4. *Hybrid fiber composite*

*Hybrid fiber composite* merupakan komposit gabungan antara tipe serat lurus dengan serat acak. Pertimbangannya supaya dapat mengeliminir kekurangan sifat dari kedua tipe dan dapat menggabungkan kelebihan keduanya.

Jenis *fiber* yang biasa digunakan untuk pembuatan komposit antara lain sebagai berikut:

Berdasarkan strukturnya komposit dibedakan atas :

1. *Particulate Composite Materials* (komposit partikel) merupakan jenis komposit yang menggunakan partikel/butiran sebagai *filler* (pengisi). Partikel berupa logam atau non logam dapat digunakan sebagai *filler*.
2. *Fibrous Composite Materials* (komposit serat) terdiri dari dua komponen penyusun yaitu matriks dan serat.
3. *Structural Composite Materials* (komposit berlapis) terdiri dari sekurang-kurangnya dua material berbeda yang direkatkan bersama-sama. Proses pelapisan dilakukan dengan mengkombinasikan aspek terbaik dari masing-masing lapisan untuk memperoleh bahan yang berguna. Untuk lebih jelasnya, pembagian komposit dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 2.4. Struktur Bagan Komposit

(Ramatawa, 2008).

### 2.2.2. Serat Pisang

Pisang merupakan salah satu tanaman penghasil serat yang dapat dimanfaatkan sebagai penguat komposit *polyester*. Salah satu jenis pisang yang dapat diambil bagian seratnya ialah pisang abaka (*Musa textilis*). Aplikasi serat pisang dari jenis ini sudah dimanfaatkan sebagai tali kapal laut karena memiliki keunggulan, diantaranya kuat, tidak mudah putus, tekstur yang baik, sifat mengkilat seperti memantulkan cahaya,



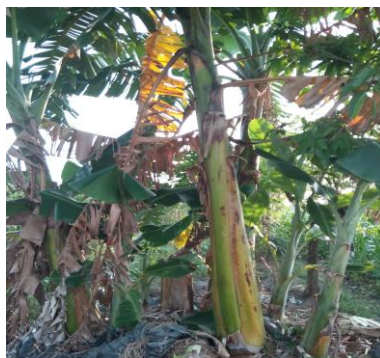
memiliki daya apung dan tahan terhadap kerusakan karena air garam. Serat pisang juga merupakan sumberdaya yang dapat diperbaharui dan mudah dibudidayakan.

Pisang abaka (*Musa textilis*) atau nama lainnya antara lain pisang manila adalah salah satu tumbuhan asli Filipina namun tumbuh liar dengan baik di Kalimantan, Sumatera, Sulawesi Utara (khususnya di pulau Talaud di desa Essang). Serat pisang ini diambil dari batang semunya yang dikeringkan. Serat ini dapat dibentuk menjadi benang dan pakaian tradisional Filipina yang dibuat dengan menggunakan serat tanaman ini. Serat pisang tersebut mulai di olah menjadi bahan kertas uang, benang, dan juga sebagai penguat komposit.

Jenis-jenis pisang yaitu:

1. pisang yang di makan buahnya tanpa harus matang,yaitu: *M.Paradisica var salenhum*, *M nana* atau di sebut juga *M. Cavendishii*, *sinensis*, misalnya pisang Ambon, susu, dan pisang raja.
2. Pisang yang dinamakan setelah buahnya dimasak yaitu: *M Paradisica normalis*, misalnya pisang nangka, tanduk dan kepok
3. pisang berbiji yaitu *M brachycarpa* yang di indonesia di manfaatkan daunnya, misalnya pisang batu dan klutuk.

Batang pisang diambil seratnya untuk diolah menjadi pakaian,kertas, dan sebagainya. Namun dalam hal ini batang pisang akan diambil seratnya sebagai bahan penguat komposit.



Gambar 2.5 Pohon pisang (*musa spp*)

### **2.2.3. Resin Polyester**

*Unsaturated Polyester Resin* (UPR) adalah jenis *polimer termoset*. UPR terbuat dari reaksi *polimerisasi* antara asam dikarboksilat dengan glikol. *Polimer* dilarutkan dalam *monomer* reaktif seperti *styrene* untuk menghasilkan cairan dengan *viskositas* rendah. Ketika mengering, monomer bereaksi dengan ikatan tak jenuh pada *polimer* dan berubah menjadi struktur *termoset* padat.

*Resin polyester termoset* berbentuk cair dengan *viskositas* yang relatif rendah, dengan penambahan *katalist*, *polyester* mengeras pada suhu kamar, dengan penggunaan *katalist* tanpa menghasilkan gas sewaktu pengesetan seperti banyak resin *termoset* lainnya. Resin *polyester* banyak mengandung *monomer stiren* sehingga suhu *deformasi termal* lebih rendah dari pada resin *termoset* lainnya dan ketahanan panas jangka panjang adalah kira-kira 110-140<sup>o</sup> C. Ketahanan dingin resin ini relatif baik. Sifat listriknya lebih baik di antara resin *termoset*. Mengenai ketahanan kimianya, pada umumnya kuat terhadap asam kecuali asam pengoksid, tetapi lemah terhadap alkali. Bila dimasukkan ke dalam air mendidih untuk waktu yang lama (300 jam) bahan akan pecah dan retak-retak. Bahan ini mudah mengambang dalam pelarut, yang melarutkan polimer stiren. Kemampuan cuaca sangat baik, tahan terhadap kelembapan dan sinar *ultraviolet* bila dibiarkan di luar, tetapi sifat tembus cahaya permukaan rusak dalam beberapa tahun. Penggunaan resin jenis ini dapat dilakukan dari proses *hand lay up* sampai dengan proses yang kompleks yaitu dengan proses mekanik. Resin ini banyak digunakan dalam aplikasi komposit pada dunia industri dengan pertimbangan harga relatif murah, *curing* yang tepat, warna jernih, kestabilan dimensional, dan mudah penanganannya.

### **2.2.4. Tempurung kelapa**

Tanaman kelapa dikenal sebagai pohon yang mempunyai banyak kegunaan, mulai dari akar sampai pada ujungnya (daun). Bagi banyak negara di dunia, tanaman ini disebut sebagai "Pohon Kehidupan". Pohon kelapa memiliki nama botanik *Cocos Nucifera* dengan keluarga *Palmae*, keluarga palma (juga dikenal dengan *Arecaceae*).

Tanaman kelapa mudah ditemui hampir di seluruh wilayah Nusantara, yaitu di Sumatera, Jawa, Kalimantan, Sulawesi, Bali, Nusa Tenggara Barat, Nusa Tenggara Timur, Maluku dan Papua. Masyarakat Indonesia telah lama mengenal tanaman ini. Kelapa tumbuh dengan sendirinya maupun sengaja ditanam oleh masyarakat di

pekarangan dan kebun. Tinggi pohon kelapa dapat mencapai 15 sampai 30 meter di daerah perkebunan. Buah kelapa berbentuk lonjong dan dilapisi oleh kulit yang licin yang berwarna hijau terang, jingga cerah atau warna-warna gading. Di bawah lapisan kulit terdapat lapisan serat tebal yang digunakan untuk sabut. Lapisan berikutnya adalah tempurung. Tempurung dapat digunakan untuk membuat arang dan alat-alat makan. Bagian dalam dari tempurung dilapisi oleh lapisan putih yang dapat dimakan, yang disebut daging atau kopra. Daging buah ini juga dibuat menjadi produk kimia, industri, dan obat-obatan. Cairan di dalam lubang biji kelapa disebut air kelapa. Ketika biji berkecambah, batang baru akan muncul dari salah satu mata tempurung.

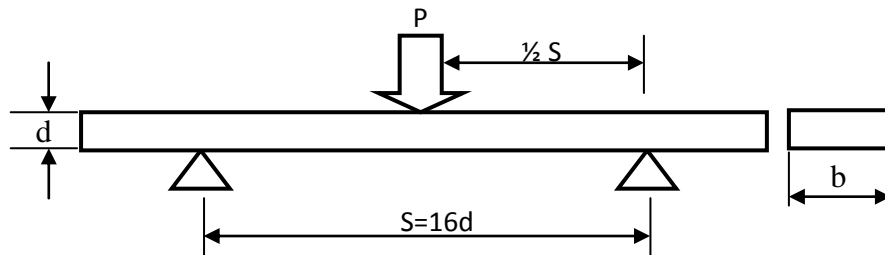
Tempurung kelapa merupakan salah satu bahan pengisi alamiah yang banyak terdapat di negara-negara tropis seperti Indonesia, Malaysia, Thailand dan Srilangka. Tempurung kelapa merupakan salah satu bagian dari produk pertanian yang memiliki nilai ekonomis tinggi yang dapat dijadikan sebagai basis usaha. Tempurung kelapa juga merupakan senyawa organik sehingga dapat diuraikan oleh mikroorganisme (biodegradasi) secara alamiah di alam, dan juga salah satu sumber bahan pengisi alamiah yang potensial dan mempunyai prospek ekonomis tinggi. Hal ini berkaitan dengan perkembangan teknologi, faktor ekonomis dan isu-isu lingkungan.

Analisis finansial pengolahan tempurung dilakukan dengan asumsi, analisis dihitung untuk memproses hasil 1 ha kelapa atau sekitar 6.000 butir tempurung kelapa/tahun, menghasilkan 15%-19% dari jumlah seluruh kelapa yang ada, jadi sekitar 900 tempurung kelapa murni di dapatkan dari 1 hektar kebun kelapa.

Setiap tahun tidak kurang ada 2.600.000 ton tempurung dari perkebunan rakyat, sedangkan dari perkebunan negara dan swasta 60.00 ton. Pada saat yang sama, volume ekspor arang tempurung kelapa mencapai 9.500 ton. Hal itu menunjukkan bahwa dari sisi ketersediaan bahan baku, industri pengolahan tempurung bisa dikembangkan secara *massivedi* berbagai tempat di indosnesia untuk menciptakan lapangan kerja maupun untuk meraih nilai tambah yang tinggi. Sedangkan dari sisi pasar, semua tahu bahwa krisis energi yang terjadi di seluruh dunia (yang terlanjur dimanjakan oleh bahan baku mineral) akan dengan sendirinya membuka peluang bagi Bahan Bakar Nabati (BBN). Maka dalam penelitian ini *filler* yang digunakan adalah serbuk tempurung kelapa karna tempurung kelapa merupakan limbah organik yang mudah terurai oleh mikroorganisme.

### 2.2.5. Kekuatan Bending

Kekuatan *bending* atau kekuatan lengkung adalah tegangan *bending* terbesar yang dapat diterima akibat pembebanan luar tanpa mengalami *deformasi* yang besar atau kegagalan. Akibat pengujian *bending*, pada bagian atas spesimen akan mengalami tekanan, dan bagian bawah akan mengalami tegangan tarik. Material komposit kekuatannya lebih tinggi terhadap tegangan tariknya. Kegagalan yang terjadi akibat pengujian bending, komposit akan mengalami patah pada bagian bawah yang disebabkan karena tidak mampu menahan tegangan tarik yang diterima.



Gambar 2.6 Sketsa pengujian spesimen uji *bending*  
(Sumber : ASTM, 2006).

Sebagaimana perilaku bahan terhadap pembebanan, semua bahan akan mengalami perubahan bentuk (*deformasi*) secara bertahap dari elastis menjadi plastis hingga akhirnya mengalami kerusakan (*patah*). Dalam proses pembebanan lengkung dimana dua gaya bekerja dengan jarak tertentu ( $1/2L$ ) serta arah yang berlawanan bekerja secara bersamaan (lihat gambar 2.6), maka Momen lengkung itu akan bekerja dan ditahan oleh sumbu batang tersebut atau sebagai momen tahanan lengkung. Dalam proses pengujian lengkung yang dilakukan terhadap material sebagai bahan teknik memiliki tujuan pengujian yang berbeda tergantung kebutuhannya.

Kekuatan *bending* suatu material dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\sigma_b = \frac{Mc}{I} \dots\dots\dots(2-7)$$

dimana :

$$M = \frac{P_{max}}{2} \cdot \frac{1}{2} S \dots\dots\dots(2-8)$$

Keterangan:

$\sigma_b$  = Kekuatan *bending*

M = Momen

I = Inersia

c = Jarak dari tepi ke sumbu netral material

S = Panjang span

Pada material yang homogen pengujian batang sederhana dengan dua titik dukungan dan pembebanan pada tengah-tengah batang uji (*three point bending*), maka tegangan maksimum dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$\sigma_b = \frac{3P_{max} \cdot S}{2b \cdot d^2} \dots\dots\dots(2-9)$$

Keterangan:

$P_{max}$  = Beban maksimum

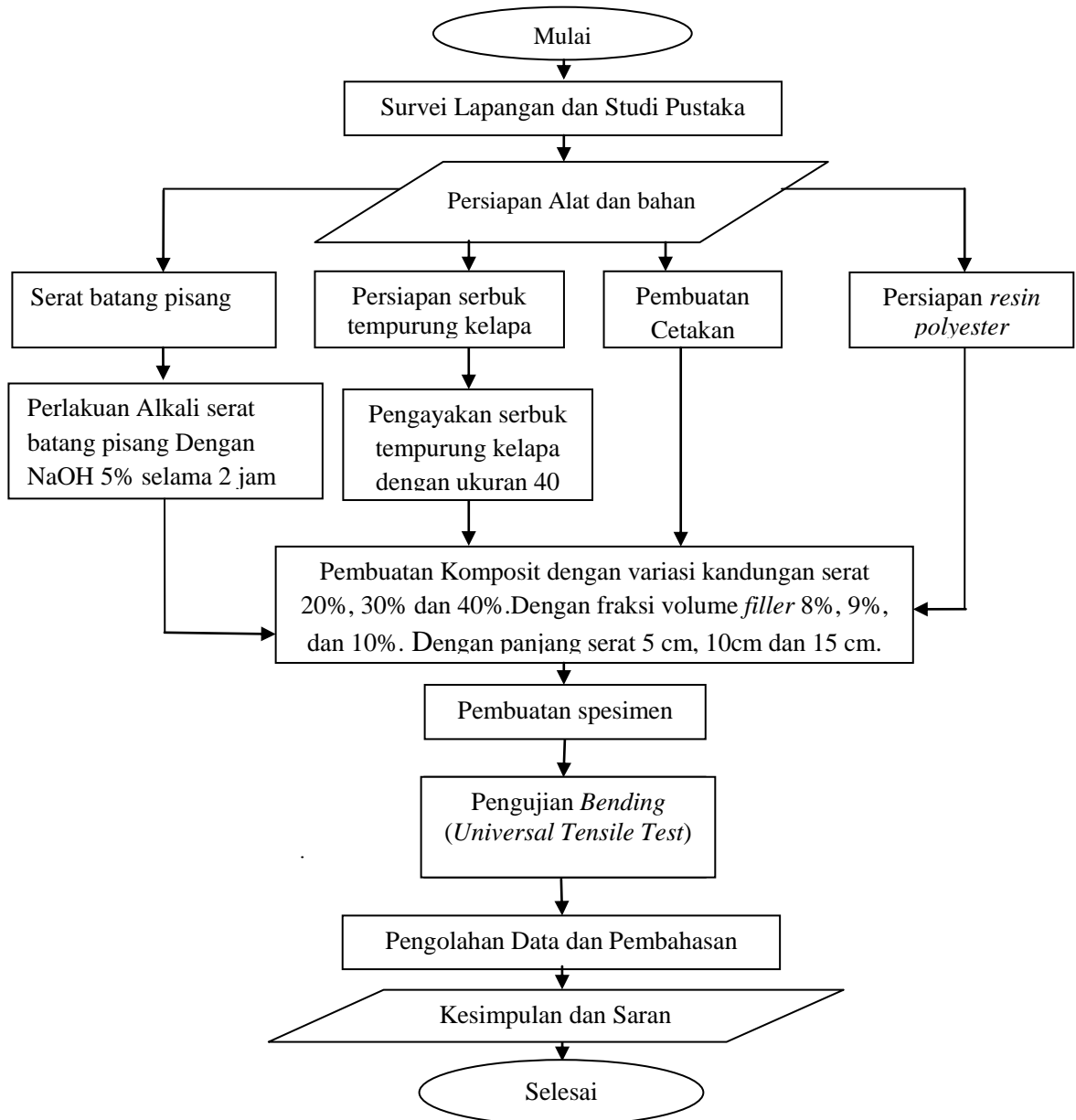
b = Lebar batang uji

d = Tebal batang uji

S = panjang span

**BAB III**  
**METODOLOGI PENELITIAN**

**3.1 Diagram alir penelitian**



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

## 3.2 Alat dan Bahan

### 3.2.1. Alat pembuatan komposit serat batang pisang

Alat yang digunakan dalam pembuatan serat batang pisang adalah:

- a. Cetakan  
Cetakan baja ini digunakan sebagai tempat mencetak komposit serat batang pisang sesuai dengan ukuran yang diperlukan.
- b. Timbangan digital  
Digunakan untuk menimbang serat batang pisang, *resin polyester*, dan *hardener* agar akurat dalam pencampuran serat.
- c. Sarung tangan  
Digunakan untuk melindungi tangan agar tidak terkena campuran resin.
- d. Gunting  
Digunakan untuk menggunting serat sesuai ukuran dimensi cetakan.
- e. Kamera  
Kamera digunakan untuk mengambil foto hasil pengujian.
- f. Amplas  
Amplas digunakan untuk menghaluskan komposit serat pisang yang sudah dibuat sebelum melakukan pengujian.
- g. Gelas ukur  
Gelas ukur digunakan untuk mengetahui persentase *resin* yang digunakan.
- h. Mistar  
Mistar digunakan untuk mengukur panjang serat yang akan digunakan.
- i. Plastik  
Digunakan untuk melapisi serat pisang setelah dibuat sehingga mempermudah dalam membuka cetakan.
- j. Gelas pencampur dan alat pengaduk  
Digunakan untuk tempat mengaduk campuran *resin* dan *hardener* dan sebagai pengaduk pada saat percampuran.
- k. Pipet tetes  
Digunakan untuk menuangkan *hardener* sesuai kebutuhan.
- l. Masker

Digunakan untuk melindungi peneliti agar bau dari resin *polyester* tidak mengganggu penelitian.

m. *Flexure testing machine*

Alat ini digunakan dalam pengujian *bending* komposit serat batang pisang.

### 3.2.2. Bahan pembuatan komposit

Adapun bahan yang digunakan dalam pembuatan komposit serat batang pisang adalah:

a. Resin *polyester*

Resin *Polyester* merupakan bahan *adhesive* yang digunakan untuk mengikat serat.

b. Serat batang pisang

Serat batang pisang digunakan sebagai bahan serat yang akan digunakan dan dipotong sesuai ukuran.

c. Wax

Wax merupakan bahan yang digunakan untuk melapisi bagian pada cetakan agar tidak lengket.

d. Hardener/katalist

Hardener digunakan untuk mencampur resin *polyester* agar dapat mengeras.

## 3.3 Dimensi Spesimen

### 3.3.1. Spesimen Uji Bending Komposit Serat Pisang

Dimensi spesimen uji bending komposit serat batang pisang mengacu pada standar ASTM D790 dengan tebal 6 mm, lebar 25 mm, dan panjang 152 mm. Spesimen uji *bending* komposit serat batang pisang dapat dilihat pada Gambar 3.2.

### 3.3.2 Proses perlakuan serat dengan larutan alkali (NaOH)

Serat batang pisang yang sudah didapat kemudian direndam dalam larutan NaOH dengan konsentrasi 5% (berat) selama 2 jam. Setelah direndam dalam larutan NaOH serat batang pisang dicuci dengan menggunakan air PDAM sampai bersih dan dikeringkan dibawah sinar matahari. Kemudian serat batang pisang dipotong dengan panjang yang sudah di tentukan, dengan dilakukannya perlakuan alkali serat ini



adalah untuk menghilangkan kotoran atau getah dari sisa pembersihan serat agar terjadi ikatan yang kuat antara serat dengan matriknya. Sehingga komposit yang diperkuat dengan serat dengan waktu Serat yang diberi perlakuan alkali mengalami perubahan warna, yang mana sebelum diberi perlakuan berwarna putih dan setelah perlakuan berwarna coklat. Akan tetapi dengan perlakuan alkali yang terlalu lama akan menyebabkan rusaknya serat batang pisang (serat batang pisang menjadi rapuh). Sehingga komposit yang diperkuat dengan serat dengan waktu perendaman yang lebih lama menyebabkan turunnya kekuatan komposit.

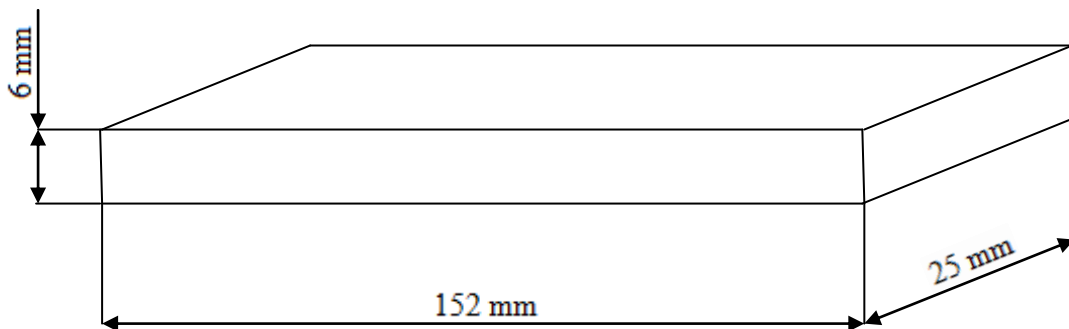
### 3.4 Proses Pembuatan Spesimen

Serat yang digunakan adalah serat batang pisang berupa serat acak. Pembuatan komposit serat batang pisang ini menggunakan cetakan manual yang terbuat dari baja. Adapun proses pembuatan komposit adalah sebagai berikut:

- a. Alat dan bahan dipersiapkan terlebih dahulu sesuai dengan komposisi komposit dengan kandungan serat 20%, 30% dan 40% dengan fraksi volume *filler* 8%, 9% dan 10% dengan panjang serat 5 cm, 10 cm dan 15 cm.
- b. Siapkan cetakan berupa baja yang telah dilapisi terlebih dahulu dengan cairan wax, untuk melapisi komposit serat pisang agar tidak menempel pada cetakan.
- c. Campurkan *polyester* dan hardener, setelah rata tuangkan cairan pada cetakan secara merata untuk dasar komposit..
- d. Kemudian letakkan serat batang pisang yang telah ditimbang dan dipotong di atasnya, selanjutnya tuangkan kembali cairan *polyester* merata pada permukaan serat.
- e. Selanjutnya lapisi bagian atas cetakan dengan kertas transparan agar saat pelapisan tidak lengket dengan penutup cetakan.
- f. Tutup bagian atas cetakan dengan baja dan diamkan selama 24 jam.
- g. Kemudian spesimen yang telah dicetak di *finishing* menjadi benda uji yang sesuai dengan standar uji *bending*.

### 3.5 Langkah Pengujian

Uji bending adalah salah satu jenis pengujian mekanik yang bertujuan untuk mengetahui kekuatan bahan terhadap gaya tekan dan gaya tarik atau untuk mendapatkan nilai kekuatan bending komposit serat pisang dan filler tempurung kelapa yang digunakan dalam penelitian ini.



Gambar 3.2. Spesimen Uji Bending ASTM D790  
(Sumber : ASTM, 2006).

Langkah pengujian bending komposit adalah sebagai berikut:

- Sebelum dilakukan pengujian *bending* diukur dimensi spesimen terlebih dahulu meliputi panjang, lebar dan tebal spesimen.
- Kemudian spesimen uji bending dipasang tepat pada kedua tumpuan.
- Pastikan idendor di tengah-tengah spesimen dengan pembaca beban menunjukkan nol.
- Kemudian dicatat besarnya beban yang diberikan kepada spesimen komposit setiap 5 *displacement* sampai spesimen patah. Sehingga didapatkan beban bending maksimum spesimen.

### 3.6 Analisis Data

Tabel 3.1 Anova untuk percobaan *trifaktor*

Pengaruh variasi	Jumlah kuadrat	Derajat kebebasan	Rataan kuadrat	F hitung
Pengaruh utama				
A	$JKA$	$a - 1$	$s_1^2$	$f_1 = \frac{s_1^2}{s^2}$
B	$JKB$	$b - 1$	$s_2^2$	$f_2 = \frac{s_2^2}{s^2}$
C	$JKC$	$c - 1$	$s_3^2$	$f_3 = \frac{s_3^2}{s^2}$
Interaksi dwifaktor				
AB	$JK(AB)$	$(a - 1)(b - 1)$	$s_4^2$	$f_4 = \frac{s_4^2}{s^2}$
AC	$JK(AC)$	$(a - 1)(c - 1)$	$s_5^2$	$f_5 = \frac{s_5^2}{s^2}$
BC	$JK(BC)$	$(b - 1)(c - 1)$	$s_6^2$	$f_6 = \frac{s_6^2}{s^2}$
Interaksi trifaktor				
ABC	$JK(ABC)$	$(a - 1)(b - 1)(c - 1)$	$s_7^2$	$f_7 = \frac{s_7^2}{s^2}$
Galat	$JKG$	$abc(n - 1)$	$s^2$	
Jumlah	$JKT$	$abcn - 1$		

Dari data di atas didapatkan rumus untuk mencari jumlah kuadrat, sebagai berikut :

$$JKT = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^n y^2ijkl - \frac{T^2 \dots}{abcn}$$

$$JKA = \sum_{i=1}^a \frac{T^2i \dots}{bcn} - \frac{T^2 \dots}{abcn}$$

$$JKB = \sum_{j=1}^b \frac{T^2.j..}{acn} - \frac{T^2 \dots}{abcn}$$

$$JKC = \sum_{k=1}^c \frac{T^2..k.}{abn} - \frac{T^2 \dots}{abcn}$$

$$JK(AB) = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{T^2ij..}{cn} - \sum_{i=1}^a \frac{T^2i \dots}{bcn} - \sum_{j=1}^b \frac{T^2.j..}{acn} + \frac{T^2 \dots}{abcn}$$

$$JK(AC) = \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^c \frac{T^2i.k.}{bn} - \sum_{i=1}^a \frac{T^2i \dots}{bcn} - \sum_{k=1}^c \frac{T^2..k.}{abn} + \frac{T^2 \dots}{abcn}$$

$$JK(BC) = \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \frac{T^2.jk.}{an} - \sum_{j=1}^b \frac{T^2.j..}{acn} - \sum_{k=1}^c \frac{T^2..k.}{abn} + \frac{T^2 \dots}{abcn}$$

$$JK(ABC) = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \frac{T^2ijk}{n} - \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{T^2ij..}{cn} - \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^c \frac{T^2i.k.}{bn} - \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \frac{T^2.jk.}{an} \\ + \sum_{i=1}^a \frac{T^2i \dots}{bcn} + \sum_{j=1}^b \frac{T^2.j..}{acn} + \sum_{k=1}^c \frac{T^2..k.}{abn} - \frac{T^2 \dots}{abcn}$$