

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Sebagai dasar dalam penyusunan dan pengembangan Proyek Akhir ini, diperlukan pemahaman mendalam terhadap teori-teori, hasil penelitian terdahulu, dan perkembangan teknologi yang relevan. Bab ini menyajikan tinjauan pustaka yang mencakup pembahasan mengenai serat alam sebagai material terbarukan, teknologi fibrilasi serat alam, serta berbagai aplikasi serat alam dalam produk inovatif. Selain itu, ditinjau pula hasil studi dan proyek sebelumnya yang menjadi landasan utama dalam melanjutkan pengembangan teknologi fibrilasi yang berorientasi pada keberlanjutan dan inovasi material. Tinjauan ini diharapkan dapat memperkuat argumentasi ilmiah dan memberikan arah yang jelas bagi pelaksanaan proyek akhir.

2.1 Serat Alam Sebagai Material Terbarukan

Serat alam merupakan material yang berasal dari sumber hayati seperti tumbuhan dan hewan, yang memiliki potensi sebagai bahan baku alternatif dalam berbagai aplikasi industri. Serat ini memiliki sifat-sifat unggulan seperti ringan, dapat diperbaharui, biodegradable, serta memiliki ketersediaan yang melimpah, khususnya di negara tropis seperti Indonesia. Beberapa contoh serat alam yang banyak digunakan antara lain serat rami, kenaf, abaka, dan sabut kelapa. Serat alam menunjukkan kekuatan tarik dan modulus elastisitas yang cukup baik, sehingga dapat dimanfaatkan sebagai penguat dalam bahan komposit (Bledzki and Gassan, 1999).

Dalam konteks keberlanjutan (*sustainability*), penggunaan serat alam dinilai lebih ramah lingkungan dibandingkan serat sintetis seperti fiberglass. Selain itu, proses produksinya memerlukan energi yang lebih rendah, sehingga turut mengurangi jejak karbon secara keseluruhan (Mohanty, A. K., Misra, M., & Drzal, 2005).

2.1.1 Klasifikasi Sumber Serat Alam

Serat alam dapat diklasifikasikan berdasarkan sumbernya menjadi tiga kategori utama: serat tumbuhan, serat hewan, dan serat mineral. Dalam konteks penelitian ini, fokus diberikan pada serat tumbuhan yang dapat diklasifikasikan lebih lanjut berdasarkan bagian tumbuhan yang menjadi sumber serat (Jawaid and Abdul Khalil, 2011):

1. **Serat batang (*bast fibers*):** Serat yang diperoleh dari lapisan floem batang tumbuhan, seperti rami, kenaf, flax, dan jute. Serat jenis ini umumnya memiliki kandungan selulosa tinggi dan lignin rendah, serta kekuatan mekanik yang baik.
2. **Serat daun (*leaf fibers*):** Serat yang diekstrak dari daun tumbuhan, seperti sisal, abaka, dan daun nanas. Serat daun umumnya lebih kasar dan kaku dibandingkan serat batang, dengan kandungan lignin yang lebih tinggi.
3. **Serat buah dan biji (*fruit and seed fibers*):** Serat yang berasal dari buah atau biji tumbuhan, seperti kapas, kapok, dan sabut kelapa. Serat jenis ini bervariasi dalam karakteristiknya, dengan kapas yang memiliki kandungan selulosa sangat tinggi (88-96%) dan sabut kelapa yang memiliki kandungan lignin tinggi (Bledzki and Gassan, 1999).
4. **Serat rumput dan rerumputan (*grass and reed fibers*):** Serat yang diperoleh

dari berbagai jenis rumput dan rerumputan, seperti bambu dan tebu. Serat jenis ini umumnya memiliki struktur yang lebih kompleks dengan kandungan silika yang relatif tinggi.

Di Indonesia, serat alam yang banyak tersedia dan memiliki potensi untuk dikembangkan antara lain:

1. **Serat daun nanas (*Ananas comosus*):** Memiliki kandungan selulosa 70-82%, hemiselulosa 5-12%, dan lignin 5-12%. Serat ini memiliki kekuatan tarik yang tinggi (170-1627 MPa) dan modulus Young 6.21-41.07 GPa (Asim *et al.*, 2015).
2. **Serat pelepah pisang (*Musa paradisiaca*):** Mengandung 60-65% selulosa, 6-8% hemiselulosa, dan 5-10% lignin. Kekuatan tarik serat pelepah pisang berkisar antara 180-430 MPa dengan modulus Young 7.5-20.0 GPa (Pappu *et al.*, 2015).

2.2 Fibrilasi Serat Alam Skala Nanometer

Serat alam skala nanometer merujuk pada serat alam yang telah diproses hingga mencapai ukuran nanometer. Ukuran nanometer umumnya memiliki batasan yang diterima secara luas dalam rentang 1–100 nm. Batasan ukuran nanometer pada 1 hingga 100 nm diatur berdasarkan perbedaan karakteristik dan sifat material dalam skala tersebut. Material yang memenuhi rentang ini dianggap sebagai nanopartikel atau material nanometer, dan sifat-sifat uniknya membuatnya sangat berguna dalam aplikasi komposit. Dalam konteks fibrilasi serat alam, ukuran nanometer sangat penting karena dapat mempengaruhi sifat mekanik dan fungsional dari serat

tersebut. Dan dalam pembuatan bahan komposit, mengubah serat alam menjadi skala nanometer memiliki beberapa keuntungan utama terkait kekuatan, stabilitas, dan sifat mekanik yang dihasilkan, antara lain peningkatan luas permukaan, distribusi yang lebih merata, peningkatan sifat mekanik, dan peningkatan ketahanan terhadap air dan degradasi.

2.2.1 Peningkatan Luas Permukaan

Ketika serat alam diubah ke skala nanometer, luas permukaannya meningkat secara signifikan. Luas permukaan yang lebih besar memungkinkan serat berinteraksi lebih baik dengan matriks komposit (misalnya resin), menghasilkan ikatan yang lebih kuat antara serat dan matriks. Hal ini berkontribusi pada peningkatan kekuatan tarik, kekakuan, dan ketangguhan komposit.

2.2.2 Distribusi Yang Lebih Merata

Serat dengan ukuran nanometer dapat terdistribusi lebih merata dalam matriks komposit. Distribusi serat yang lebih baik ini mencegah terjadinya penggumpalan atau kelemahan struktural yang dapat mengurangi kekuatan keseluruhan komposit. Hasilnya, serat yang dihasilkan lebih homogen dengan sifat mekanik yang konsisten.

2.2.3 Peningkatan Sifat Mekanik

Serat berukuran nanometer cenderung memiliki sifat mekanik yang lebih baik, seperti kekuatan tarik dan modulus elastisitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan serat dalam ukuran mikro. Ini berarti serat nano dapat memberikan

kontribusi yang lebih besar pada kekuatan dan kekakuan komposit secara keseluruhan.

2.2.4 Peningkatan Terhadap Air Dan Degradasi

Serat alam berukuran besar biasanya menyerap air lebih banyak, yang dapat menyebabkan degradasi pada bahan komposit. Namun, dengan mem-fibrilasi serat ke skala nano, serat alam menjadi lebih tahan terhadap penetrasi air dan degradasi. Hal ini meningkatkan ketahanan komposit terhadap lingkungan yang lembab, sehingga memperpanjang umur pemakaian bahan komposit. Dengan mengubah ukuran serat alam menjadi ukuran nanometer, komposit yang dihasilkan tidak hanya lebih kuat dan stabil tetapi juga tahan lama, sehingga cocok untuk aplikasi yang membutuhkan performa tinggi.

2.3 Aplikasi Perlakuan Fisik Awal Untuk Proses Fibrilasi

Sebelum memasuki tahap fibrilasi menggunakan proses putaran tinggi, serat nanas terlebih dahulu menjalani perlakuan fisik berupa penyisiran. Proses setelah penyisiran yaitu memotong serat berukuran 10 cm. Perlakuan ini dilakukan untuk memisahkan serat dari kotoran kasar yang masih menempel, melonggarkan ikatan antar serat, serta mengurai bundel serat menjadi serat-serat individual yang lebih halus.

Penyisiran serat merupakan tahap penting karena mampu meningkatkan kebersihan serat, memperbesar luas permukaan, dan mengurangi kekakuan serat sehingga lebih mudah terfibrilasi pada tahap mekanis berikutnya. Oleh sebab itu, penyisiran berfungsi sebagai tahap persiapan untuk memperoleh distribusi serat yang lebih

homogen serta mendukung proses fibrilasi hingga mencapai skala nanometer.

2.4 Aplikasi Perlakuan Kimia Untuk Proses Fibrilasi

Perlakuan kimia awal (pra-perlakuan) merupakan tahap krusial untuk keberhasilan proses fibrilasi selulosa. Tujuan utamanya adalah untuk delignifikasi, yaitu memecah dan melarutkan komponen non-selulosa (terutama lignin dan hemiselulosa) yang bertindak sebagai matriks pengikat antar mikrofibril selulosa. Dengan hilangnya matriks ini, struktur serat menjadi lebih longgar, sehingga proses fibrilasi mekanis menjadi lebih efisien.

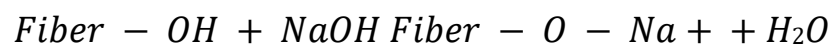
Metode pra-perlakuan kimia yang paling umum adalah alkalisasi menggunakan Natrium Hidroksida (NaOH). Perlakuan ini terbukti efektif membersihkan permukaan serat, meningkatkan kandungan selulosa, dan mengurangi kadar hemiselulosa.

2.5 Perlakuan Alkali

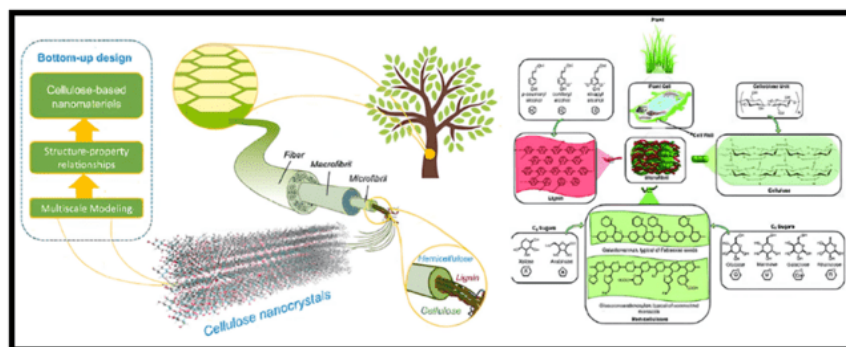
Perlakuan alkali (NaOH) dari serat alami adalah salah satu perlakuan kimia yang telah dikenal untuk meningkatkan kandungan selulosa melalui penghilangan hemiselulosa dan lignin. Perlakuan alkali adalah metode umum untuk membersihkan dan memodifikasi permukaan serat untuk menurunkan tegangan permukaan dan meningkatkan adhesi antarmuka antara serat alami dan matriks polimer. Mengingat begitu pentingnya perlakuan permukaan sebagai perlakuan awal dalam proses pembuatan komposit berpenguat serat alam maka penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk menjelaskan pengaruh perlakuan serat alkali (NaOH) terhadap kekuatan tarik dan morfologi serat nanas.

Untuk mendapatkan komposit dengan karakteristik yang baik dari bahan penguat serat alam, hal yang perlu diperhatikan adalah memperbaiki ikatan antarmuka serat alam dengan resin. Sifat alami serat adalah *Hydrophilic*, yaitu suka terhadap air berbeda dari polimer yang *hydrophobic* yaitu menolak air. Adanya perbedaan sifat tersebut dapat menurunkan kemampuan resin untuk mengikat serat. Pengaruh perlakuan alkali terhadap sifat permukaan serat alam selulosa telah diteliti dimana kandungan optimum air mampu direduksi sehingga sifat alami *hydrophilic* serat dapat memberikan ikatan *interfacial* dengan matrik secara optimal.

Reaksi dari perlakuan alkali terhadap serat adalah:



2.6 Komposisi Kimia Dan Struktur Serat Alam

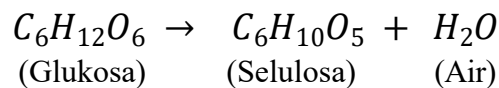


Gambar 2.1 Komposisi kimia serat alam

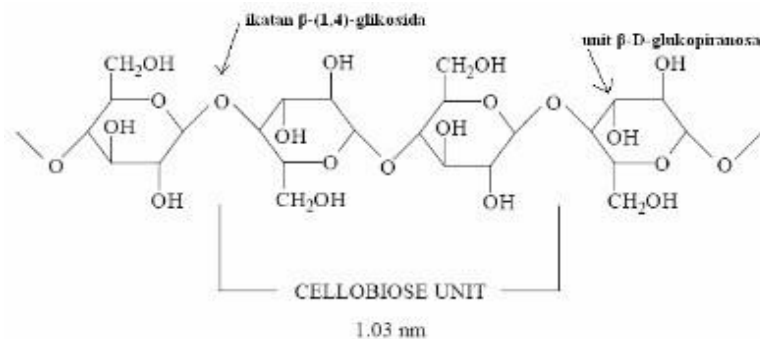
Serat alam tumbuhan terdiri dari tiga komponen utama: selulosa, hemiselulosa, dan lignin, dengan proporsi yang bervariasi tergantung pada jenis tumbuhan dan kondisi pertumbuhan. Selain itu, terdapat komponen minor seperti pektin dan lilin yang dapat mempengaruhi sifat serta ikatan antarmuka serat (Kabir *et al.*, 2012):

2.6.1 Selulosa

Selulosa merupakan suatu senyawa karbohidrat yang dapat ditemukan secara melimpah di alam ini. Selulosa terdapat di dalam dinding sel tumbuhan. Selulosa tersusun atas unit-unit glukosa yang berasal dari proses fotosintesis tumbuhan. Kemudian dalam suatu proses yang kompleks, glukosa mengalami modifikasi secara kimia dengan dipindahkannya satu molekul air dari setiap unit sehingga terbentuklah anhidrid glukosa.



2.6.2 Struktur Selulosa



Gambar 2.2 Struktur selulosa

Selulosa adalah suatu polimer yang terdiri dari unit-unit anhidrid glukosa yang saling bersambungan ujung-ujungnya secara bersama-sama. Dengan eliminasi bersama air membentuk rantai panjang yang dikenal dengan selulosa ($C_6H_{10}O_5$)_n dengan n (derajat polimerisasi) sekitar 500-10000. Tinjauan bidang glukosa pada selulosa seperti ditunjukkan pada gambar 2.2.

Molekul selulosa memiliki bentuk yang seluruhnya linier dan kecenderungan membentuk ikatan-ikatan hidrogen intra dan intermolekul. Sehingga susunan senyawa selulosa membentuk suatu kumpulan dalam bentuk mikrofibril, daerah yang teratur (kristalin) diselingi dengan daerah yang tidak teratur (*amorf*). Mikrofibril ini membentuk fibril-fibril dan akhirnya terbentuklah serat-serat selulosa. Selulosa memiliki struktur yang berserat dan ikatan hidrogen yang kuat mengakibatkan selulosa mempunyai kekuatan tarik yang tinggi dan tidak larut dalam kebanyakan pelarut. Meskipun selulosa merupakan karbohidrat, selulosa bukanlah sumber makanan bagi manusia atau hewan.

2.6.3 Sumber Selulosa

Sumber selulosa terutama berasal dari serat kayu, baik dari jenis kayu *hardwood* maupun kayu *softwood*. Proses memisahkan serat dari komponen selain serat, disebut dengan *pulping*. Proses *pulping* dapat dilakukan dengan cara mekanis, menggunakan bahan kimia, menggunakan panas atau kombinasinya. Produk yang dihasilkan setelah lignin dipisahkan dari serat kayu disebut *pulp* (Chen, 2014).

Selulosa $C_6H_{10}O_5$ adalah homopolymer yang terdiri dari unit β -D'Glukopiranososa yang dihubungkan oleh ikatan (1,4)-glikosida, di mana n merupakan derajat polimerisasi selulosa (DP), selulosa mengandung karbon (44,44%) *hydrogen* (6,17%), dan oksigen (49,39%). Secara umum, kandungan selulosa berkisar 35-50% dari berat kering berlignoselulosa (Chen, 2014).

Tiga komponen utama pada dinding sel tumbuhan yaitu terdiri dari selulosa, hemiselulosa dan lignin. Struktur mikrofibril selulosa menyusun inti dinding sel

dan berfungsi memperkuat dinding sel. Hemiselulosa berada di sekeliling selulosa, berperan meningkatkan kekuatan dan sebagai penghubung antara selulosa dan lignin. Dengan struktur polimer bercabang, hemiselulosa dapat mencegah terjadinya aglomerasi *microfibril* selulosa. Sedangkan lignin merupakan matriks tempat melekatnya selulosa dan hemiselulosa.

2.6.4 Lignin

Lignin adalah suatu polimer yang kompleks dengan berat molekul tinggi, tersusun atas unit-unit fenilpropana. Meskipun tersusun atas karbon, hidrogen dan oksigen, lignin bukanlah suatu karbohidrat dan bahkan tidak ada hubungannya dengan golongan senyawa tersebut. Sebaliknya, lignin pada dasarnya adalah suatu fenol. Lignin sangat stabil dan sukar dipisahkan dan mempunyai bentuk yang bermacam-macam karenanya susunan lignin dalam tumbuhan tidak menentu.

Lignin terdapat di antara sel-sel dan di dalam dinding sel. Di antara sel-sel, lignin berfungsi sebagai perekat untuk mengikat sel-sel bersama sama. Dalam dinding sel, lignin sangat erat hubungannya dengan selulosa dan berfungsi untuk memberi ketegaran pada sel. Lignin juga berpengaruh dalam memperkecil perubahan dimensi sehubungan dengan perubahan kandungan air kayu dan juga dikatakan bahwa lignin mempertinggi sifat racun kayu tahan terhadap serangan cendawan dan serangga. Keterangan yang diberikan oleh lignin merupakan faktor penentu sifat-sifat kayu. Lignin merupakan bahan yang tidak berwarna. Apabila lignin terkena udara, terutama dengan sinar matahari, maka (bersama dengan karbohidrat karbohidrat tertentu) lama kelamaan lignin cenderung menjadi kuning. Massa yang

besar dan kekuatannya rendah karena serat-serat lignin kaku memiliki ikatan antar serat yang lemah.

Lignin bersifat termoplastik-artinya lignin akan menjadi lunak dan dapat dibentuk pada suhu yang lebih tinggi dan keras kembali apabila menjadi dingin. Sifat termoplastik lignin inilah yang menjadi pedoman pembuatan papan kertas (*hardboard*) dan lain-lain pada produk kayu yang dimampatkan.

2.6.5 Hemiselulosa

Polimer heterogen yang terdiri dari berbagai monosakarida seperti xilosa, arabinosa, galaktosa, dan manosa. Hemiselulosa berfungsi sebagai matriks pengikat antara mikrofibril selulosa dan berkontribusi pada fleksibilitas serat.

2.6.6 Pektin Dan Lilin

Komponen minor yang mempengaruhi adhesi antarmuka dalam komposit dan sifat hidrofilik serat. Struktur serat alam tumbuhan bersifat hierarkis, dimulai dari tingkat molekul hingga tingkat makroskopik. Mikrofibril selulosa (diameter 10-30 nm) diatur dalam fibril yang lebih besar, yang kemudian membentuk lapisan dinding sel. Dinding sel primer dan sekunder memiliki orientasi mikrofibril yang berbeda, dan sudut mikrofibril tersebut mempengaruhi sifat mekanik serat, khususnya arah longitudinal (Thakur and Thakur, 2014).

2.7 Fibrilasi Selulosa

Microfibrillated cellulose (mikrofibril selulosa) merupakan selulosa yang mengalami perlakuan pemisahan serat menjadi mikrofibril-mikrofibril dengan

kisaran diameter 10-100 nm dan panjang beberapa mikrometer. Mikrofibril selulosa mulai dikembangkan melalui perlakuan homogenisasi. Hingga saat ini mikrofibril selulosa merupakan bahan yang diminati karena memiliki karakteristik, antara lain memiliki luas permukaan spesifik, kekuatan dan kekakuan yang tinggi, memiliki berat yang rendah, bersifat *biodegradable* dan *renewable*. Karakteristik tersebut membuat mikrofibril selulosa memiliki sifat mekanik yang baik, sehingga berpotensi digunakan pada industri komposit, otomotif, pulp dan kertas, elektronik, cat dan *coating*, dan lain-lain. Kelebihannya sebagai penguat pada komposit selain mengurangi penggunaan komponen berbasis minyak bumi juga mengurangi abrasi pada komponen seperti baja dan keramik. Mikrofibril selulosa dapat dihasilkan melalui beberapa metode, terutama metode mekanik seperti *homogenization*, *microfluidization*, *micro grinding*, *refining*, *ultrasonication*, *cryo crushing* dan *electrospinning*.

Pengaplikasian produk komposit polimer-serat alam dapat diterapkan dalam berbagai bidang, diantaranya bidang konstruksi, *furniture*, peralatan olahraga, peralatan elektronik, peralatan komunikasi, pesawat dan otomotif. Untuk tujuan komersialisasi produk komposit polimer serat alam, faktor yang perlu dipertimbangkan di antaranya adalah ketersediaan bahan baku dan permintaan pasar.

2.8 Keunggulan Dan Tantangan Penggunaan Serat Alam

Dalam konteks keberlanjutan (*sustainability*), penggunaan serat alam dinilai lebih ramah lingkungan dibandingkan serat sintetis seperti fiberglass. Selain itu, proses

produksinya memerlukan energi yang lebih rendah, sehingga turut mengurangi jejak karbon secara keseluruhan (Mohanty, A. K., Misra, M., & Drzal, 2005). Menurut Joshi *et al.* (2004), material komposit berbasis serat alam memiliki dampak lingkungan yang lebih rendah dibandingkan komposit fiberglass dalam analisis siklus hidup (*life cycle assessment*).

Keunggulan serat alam sebagai material terbarukan meliputi:

1. Keberlanjutan: Serat alam merupakan sumber daya terbarukan yang dapat diperbarui dalam waktu relatif singkat dibandingkan bahan baku berbasis fosil yang digunakan pada serat sintetis (Faruk *et al.*, 2012).
2. Biodegradabilitas: Serat alam dapat terurai secara alami di lingkungan, mengurangi masalah penumpukan limbah.
3. Densitas rendah: Densitas serat alam ($1.2-1.5 \text{ g/cm}^3$) lebih rendah dibandingkan serat gelas (2.5 g/cm^3), menghasilkan material yang lebih ringan (Bledzki and Gassan, 1999).
4. Sifat mekanik spesifik yang baik: Meskipun kekuatan absolut lebih rendah dari serat sintetis, serat alam memiliki kekuatan dan kekakuan spesifik (per satuan massa) yang kompetitif.
5. Non-abrasif: Serat alam kurang abrasif terhadap peralatan pemrosesan, mengurangi keausan dan biaya pemeliharaan.
6. Insulasi termal dan akustik: Serat alam memiliki sifat insulasi yang baik, membuat material komposit berbasis serat alam cocok untuk aplikasi insulasi.

Namun, terdapat beberapa tantangan dalam pemanfaatan serat alam sebagai

penguat material komposit:

1. Sifat hidrofilik: Serat alam bersifat hidrofilik yang menyebabkan penyerapan kelembaban tinggi, mengakibatkan ketidakstabilan dimensi dan penurunan sifat mekanik komposit.
2. Variabilitas sifat: Sifat serat alam bervariasi tergantung pada faktor seperti kondisi pertumbuhan, iklim, dan metode pemrosesan, menyulitkan standardisasi kualitas.
3. Ketahanan termal terbatas: Serat alam mulai terdegradasi pada suhu relatif rendah (200-230°C), membatasi pilihan matriks polimer dan metode pemrosesan (Faruk *et al.*, 2012).
4. Kompatibilitas antarmuka rendah: Serat alam umumnya memiliki kompatibilitas rendah dengan matriks polimer hidrofobik, menghasilkan adhesi antarmuka yang lemah.
5. Stabilitas dimensi rendah: Serat alam dapat mengembang atau menyusut dengan perubahan kelembaban lingkungan, memengaruhi stabilitas dimensi komposit.

Untuk mengatasi tantangan tersebut, berbagai metode telah dikembangkan, termasuk perlakuan permukaan serat, penggunaan agen kopling, dan hibridisasi dengan partikel nano seperti nanoselulosa. Salah satu pendekatan yang menjanjikan adalah proses fibrilasi.

2.9 Teknologi Fibrilasi Serat Alam

Fibrilasi merupakan proses pemecahan struktur serat hingga ukuran mikro atau

nano, yang bertujuan meningkatkan luas permukaan serta meningkatkan kemampuan interaksi dengan matriks pengikat (Klemm *et al.*, 2011). Proses ini dapat dilakukan melalui metode mekanik, kimiawi, atau gabungan keduanya. Teknologi fibrilasi menghasilkan serat yang memiliki permukaan lebih kasar, sehingga meningkatkan adhesi dengan matriks dalam pembuatan material komposit (George, Sreekala and Thomas, 2001).

Serat yang mengalami proses fibrilasi dilaporkan memiliki luas permukaan spesifik yang lebih tinggi serta interaksi antarmuka yang lebih baik dengan matriks polimer, sehingga berpotensi meningkatkan sifat mekanik material komposit yang dihasilkan (Siqueira, Bras and Dufresne, 2010).

2.10 Konsep Dasar Fibrilasi Serat

Fibrilasi serat alam merupakan proses delaminasi struktur serat menjadi fibril berukuran mikro hingga nano, umumnya memiliki diameter puluhan nanometer, sehingga menghasilkan material nanocellulose dengan luas permukaan spesifik yang tinggi (Klemm *et al.*, 2011).

Struktur hierarkis serat alam memungkinkan proses fibrilasi yang bertahap. Serat alam terdiri dari bundel serat (makrofibril) dengan diameter 50-100 μm , yang terdiri dari sel serat individual dengan diameter 10-20 μm (Bledzki and Gassan, 1999). Dinding sel tersusun dari mikrofibril selulosa dengan diameter 0.5-1 μm , yang terdiri dari 30-100 rantai selulosa dengan diameter 3-5 nm (Siró and Plackett, 2010).

Proses fibrilasi bertujuan untuk:

1. Meningkatkan luas permukaan spesifik serat, meningkatkan area kontak dengan matriks polimer.
2. Meningkatkan fleksibilitas fibril untuk mengakomodasi deformasi dalam komposit.
3. Mengubah morfologi permukaan untuk meningkatkan interlocking mekanis dengan matriks.
4. Memodifikasi sifat kimia permukaan untuk meningkatkan adhesi antarmuka.

2.11 Metode Fibrilasi Serat

Terdapat beberapa metode yang dapat digunakan untuk melakukan fibrilasi serat alam, yang secara umum dapat diklasifikasikan menjadi tiga kategori: metode mekanis, metode kimia, dan metode kombinasi.

Metode mekanis fibrilasi melibatkan penggunaan gaya mekanik untuk memecah struktur serat menjadi fibril-fibril yang lebih kecil. Beberapa teknik yang umum digunakan meliputi:

1. Penggilingan (*grinding*): Serat dilewatkan di antara dua permukaan abrasif yang bergerak, menghasilkan gaya geser yang memecah struktur serat. Contoh peralatan termasuk disc refiner dan supermass collider.
2. Homogenisasi tekanan tinggi (*high-pressure homogenization*): Suspensi serat dipaksa melalui celah sempit di bawah tekanan tinggi (50-2000 bar), menghasilkan gaya geser dan tumbukan yang menyebabkan delaminasi fibril (Nechyporchuk, Belgacem and Bras, 2016).

3. Pengadukan berkecepatan tinggi (*high-speed stirring*): Suspensi serat diaduk dengan kecepatan tinggi (5.000-25.000 rpm) untuk jangka waktu tertentu, menghasilkan gaya geser yang memecah struktur serat. Metode ini relatif sederhana dan dapat diterapkan dalam skala laboratorium hingga industri kecil menengah.
4. Ultrasonikasi (*ultrasonication*): Gelombang ultrasonik digunakan untuk menghasilkan kavitasi dalam suspensi serat, menyebabkan terbentuknya gelembung mikro yang kemudian pecah dan menghasilkan gaya lokal yang memecah struktur serat (Chen *et al.*, 2011).
5. *Cryocrushing*: Serat dibekukan dengan nitrogen cair dan kemudian dihancurkan, menghasilkan retak pada dinding sel yang memudahkan fibrilasi selanjutnya.

Metode kimia fibrilasi melibatkan perlakuan kimia terhadap bahan lignoselulosa untuk melemahkan ikatan antar fibril selulosa atau menghilangkan komponen non-selulosa seperti lignin dan hemiselulosa. Tujuannya adalah untuk mempermudah proses pemisahan fibril selulosa menjadi ukuran nano atau mikro.

Perlakuan ini umumnya digunakan sebagai tahap pra-perlakuan sebelum proses fibrilasi mekanis. Dengan melemahkan struktur kompleks dinding sel tanaman melalui reaksi kimia, energi yang dibutuhkan dalam proses mekanis berikutnya dapat dikurangi secara signifikan.

Beberapa metode kimia yang umum digunakan meliputi:

1. Alkalisasi (NaOH): untuk menghilangkan hemiselulosa dan sebagian lignin yang ada.

2. Klorinasi atau oksidasi (seperti TEMPO): untuk mengoksidasi gugus hidroksil menjadi gugus karboksilat, meningkatkan hidrofobisitas dan mempercepat proses disintegrasi fibril.
3. Asam kuat (H_2SO_4 atau HCl): untuk menghidrolisis bagian amorf selulosa, sehingga hanya menyisakan bagian kristalin.

Dengan perlakuan kimia ini, fibrilasi menjadi lebih efisien, menghasilkan nanofibril selulosa (CNF) atau nanokristal selulosa (CNC) dengan sifat fungsional yang diinginkan.

Metode kombinasi dalam fibrilasi serat alam merupakan pendekatan yang menggabungkan dua atau lebih teknik—biasanya metode kimia, mekanis, atau enzimatik—untuk meningkatkan efisiensi proses fibrilasi dan kualitas produk akhir, seperti nanofibril selulosa (Nechyporchuk, Belgacem and Bras, 2016). Tujuan utamanya adalah untuk mengurangi konsumsi energi dalam metode mekanis dan menghasilkan fibril dengan dimensi halus serta distribusi ukuran yang seragam.

1. **Kimia + Mekanis**

Ini adalah kombinasi paling umum. Bahan serat alam terlebih dahulu diberi perlakuan kimia (misalnya alkalisasi, oksidasi TEMPO, atau asam sulfat) untuk menghilangkan komponen non-selulosa atau melemahkan ikatan antarmolekul. Setelah itu, proses mekanis seperti *high-pressure homogenization*, *grinding*, atau *ultrasonication* dilakukan untuk memisahkan fibril menjadi ukuran nano.

Keuntungan: Mengurangi energi mekanis yang dibutuhkan dan mempercepat proses fibrilasi.

2. **Enzimatik + Mekanis**

Enzim seperti selulase digunakan untuk secara selektif memutus rantai selulosa, terutama di bagian amorf. Perlakuan ini memudahkan proses mekanis berikutnya dalam mendispersikan fibril.

Keuntungan: Proses lebih ramah lingkungan dan selektif tanpa merusak struktur kristalin selulosa.

3. **Kimia + Enzimatik + Mekanis**

Kombinasi lengkap ini dimulai dengan pretreatment kimia untuk menghilangkan lignin dan hemiselulosa, diikuti oleh perlakuan enzimatik untuk pelunakan struktural, dan terakhir proses mekanis untuk disintegrasi fibril.

Keuntungan: Menghasilkan nanofibril dengan kualitas tinggi, struktur halus, dan lebih seragam.

Manfaat Metode Kombinasi:

- Efisiensi energi lebih tinggi dibanding metode mekanis murni.
- Kualitas fibril lebih baik (diameter lebih kecil dan distribusi lebih seragam).
- Dapat disesuaikan tergantung pada jenis bahan baku serat alam.
- Lebih ekonomis dan ramah lingkungan jika dirancang dengan tepat.

Metode kombinasi sangat penting dalam skala industri karena dapat menyeimbangkan aspek teknis, ekonomis, dan lingkungan.

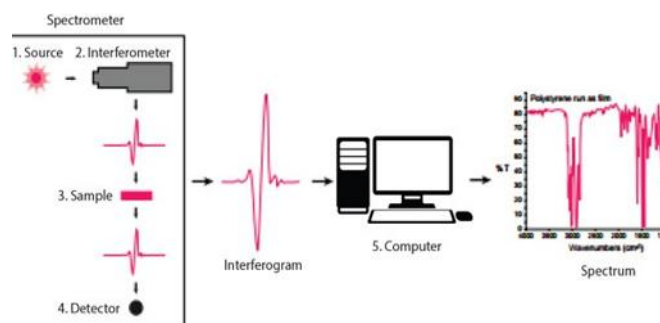
2.12 Scanning Electromagnetic Microscope

Scanning electron microscope (SEM) adalah salah satu jenis mikroskop elektron yang menggunakan berkas elektron untuk menggambarkan bentuk permukaan dari sampel yang dianalisis. SEM memiliki resolusi yang lebih tinggi daripada optical microscope (OM). Hal ini disebabkan panjang gelombang de Broglie yang memiliki elektron lebih pendek daripada gelombang OM. Karena semakin kecil panjang gelombang yang digunakan maka semakin tinggi resolusi mikroskop. Scanning Electron Microscope (SEM) mampu menghasilkan citra dengan resolusi lebih tinggi dibandingkan mikroskop optik karena menggunakan berkas elektron dengan panjang gelombang yang jauh lebih kecil.

2.13 Fourier Transform InfraRed (FTIR)

Spektroskopi FTIR merupakan suatu metode analisis yang dipakai untuk karakterisasi bahan polimer dan analisis gugus fungsi. Dengan cara menentukan dan merekam hasil spektra residu dengan serapan energi oleh molekul organik dalam sinar infra merah. Dengan infra merah didefinisikan sebagai daerah yang memiliki panjang gelombang dari $1-500\text{ cm}^{-1}$. Setiap gugus dalam molekul umumnya mempunyai karakteristik sendiri sehingga spektroskopi FTIR dapat digunakan untuk mendeteksi gugus yang spesifik pada polimer. Intensitas pita serapan merupakan ukuran konsentrasi gugus yang khas yang dimiliki oleh polimer. Metode ini didasarkan pada interaksi antara radiasi infra merah dengan materi (interaksi atom atau molekul dengan radiasi elektromagnetik). Interaksi ini berupa absorpsi pada frekuensi atau panjang gelombang tertentu yang

berhubungandengan energi transisi antara berbagai keadaan energi vibrasi, rotasi dan molekul. Radiasi infra merah yang penting dalam penentuan struktur atau analisis gugus fungsi terletak pada $650\text{ cm}^{-1} - 4000\text{ cm}^{-1}$.

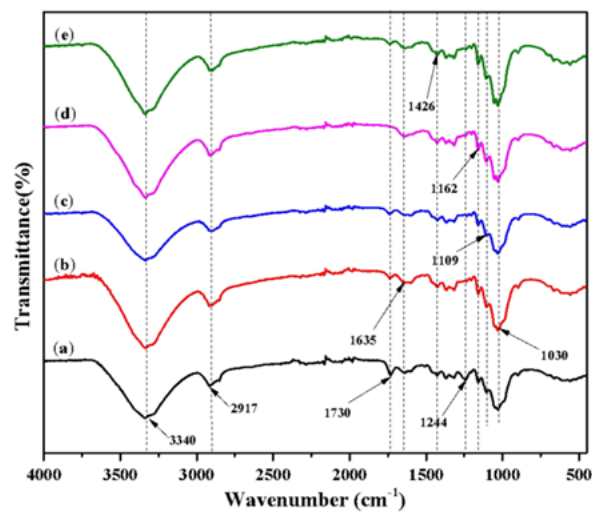


Gambar 2.3 Prinsip kerja FTIR

Pada serat alam, FTIR banyak digunakan untuk mengidentifikasi komponen utama penyusun serat, seperti selulosa, hemiselulosa, dan lignin, melalui karakteristik pita serapan pada bilangan gelombang tertentu (Ali *et al.*, 2025). Selulosa memiliki karakteristik serapan pada sekitar 1603 , 1427 , 1372 , 1156 , dan 893 cm^{-1} yang berkaitan dengan vibrasi gugus seperti O–H, C–H, dan C–O–C. Hemiselulosa dapat ditunjukkan melalui pita serapan pada sekitar 1739 , 1639 , 1510 , 1372 , dan 1263 cm^{-1} , sedangkan lignin memiliki karakteristik serapan pada sekitar 1659 , 1597 , 1505 , 1462 , 1330 , dan 1260 cm^{-1} . Perubahan intensitas maupun hilangnya pita serapan dapat digunakan untuk mengidentifikasi perubahan komponen kimia serat akibat perlakuan tertentu (Ali *et al.*, 2025).

Pada serat daun nanas (Pineapple Leaf Fiber/PALF), analisis FTIR dapat digunakan untuk mengamati perubahan struktur dan komposisi kimia akibat perlakuan, seperti perlakuan alkali. Pita serapan sekitar 1732 cm^{-1} yang berkaitan dengan gugus C=O pada hemiselulosa dan sekitar 1244 cm^{-1} yang berkaitan dengan gugus C–O pada

lignin mengalami penurunan setelah perlakuan alkali. Perubahan tersebut menunjukkan berkurangnya komponen hemiselulosa dan lignin pada serat (Akarapoowadol, Goh and Amornsakchai, 2026). Dengan demikian, FTIR dapat digunakan sebagai metode karakterisasi untuk mengidentifikasi gugus fungsi dan komponen kimia penyusun serat alam serta mengevaluasi perubahan struktur dan komposisi kimia serat setelah mengalami perlakuan atau proses fibrilasi.



Gambar 2. 4 Spektrum FTIR serat daun nanas sebelum dan sesudah perlakuan alkali

Sumber: Gaba et al. (2021)

2.14 Komposit

Komposit adalah perpaduan dari bahan yang dipilih berdasarkan kombinasi sifat fisik masing-masing material penyusun untuk menghasilkan material baru dengan sifat yang unik dibandingkan sifat material dasar sebelum dicampur dan terjadi ikatan permukaan antara masing-masing material penyusun.

Komposit juga dapat dibagi menjadi tiga pengertian dasar beberapa definisi komposit adalah sebagai berikut:

- Tingkat dasar: Pada molekul tunggal dan kisi kristal, bila material yang disusun dari dua atom atau lebih disebut komposit (contoh senyawa, paduan, polimer dan keramik)
- Mikrostruktur: Pada kristal, *phase* dan senyawa, bila material disusun dari dua phase atau senyawa atau lebih disebut komposit (contoh paduan Fe dan C)
- Makrostruktur: Material yang disusun dari campuran dua atau lebih penyusun makro yang berbeda dalam bentuk dan / atau komposisi dan tidak larut satu dengan yang lain disebut material komposit.

2.15 Karakteristik Komposit

Komposit merupakan paduan dari dua atau lebih bahan yang mempunyai sifat yang berbeda, maka hasilnya akan diperoleh sifat serta karakteristik yang berbeda pula. Sifat maupun karakteristik dari komposit ditentukan oleh:

- Material yang menjadi penyusun komposit karakteristik komposit ditentukan berdasarkan karakteristik material penyusun menurut rule of mixture sehingga akan berbanding secara proporsional.
- Bentuk dan penyusunan struktur dari penyusun bentuk dan cara penyusunan komposit akan mempengaruhi karakteristik komposit.
- Interaksi antar penyusun bila terjadi interaksi antar penyusun akan meningkatkan sifat dari komposit.

2.16 Klasifikasi Komposit

Secara umum pengelompokan komposit dapat dibedakan menjadi dua, pengelompokan tersebut yaitu berdasarkan matrik dan penguatnya. Berdasarkan

matriksnya komposit dapat digolongkan menjadi tiga yaitu:

1. Komposit matrik logam (KML), yaitu logam sebagai matrik
2. Komposit matrik polimer (KMP), yaitu polimer sebagai matrik
3. Komposit matrik keramik (KMK), yaitu keramik sebagai matrik.

Yang kedua adalah berdasarkan unsur penguatnya, dapat dibedakan menjadi tiga:

1. *Particulate composite*, yaitu penguatnya berbentuk partikel.
2. *Fibre composite*, yaitu penguatnya berbentuk serat.
3. *Structural composite*, yaitu cara penggabungan material komposit.

2.17 Aplikasi Serat Alam Dalam produk Inovatif

Penggunaan serat alam yang telah difibrilasi semakin luas dalam berbagai produk inovatif, seperti papan bangunan, biokomposit otomotif, tas ramah lingkungan, hingga produk desain seperti perabotan dan perlengkapan rumah tangga.

Pemanfaatan serat alam dalam produk inovatif kini semakin berkembang seiring meningkatnya kesadaran akan pentingnya keberlanjutan lingkungan dan efisiensi sumber daya. Serat alam seperti serat rami, kenaf, bambu, sabut kelapa, dan serat daun nanas memiliki potensi besar untuk menggantikan bahan sintetis dalam berbagai sektor industri, seperti otomotif, konstruksi, tekstil, serta peralatan rumah tangga.

Dalam bidang otomotif, serat alam digunakan sebagai bahan penguat dalam komposit untuk panel pintu, dashboard, dan penutup bagasi. Produk ini tidak hanya lebih ringan dibanding bahan sintetis, tetapi juga memiliki sifat redaman suara yang

baik dan mudah terurai secara hayati. Di sektor konstruksi, serat alam digunakan sebagai bahan insulasi termal dan akustik, serta dalam pembuatan panel bangunan berbasis bio-komposit. Dalam industri tekstil, serat alam telah dikembangkan menjadi bahan pakaian ramah lingkungan yang nyaman dan memiliki daya serap tinggi.

Selain itu, pemanfaatan serat alam juga mulai merambah ke bidang desain produk dan teknologi hijau. Contohnya adalah helm sepeda berbahan dasar serat rami, casing laptop dari serat bambu, dan kemasan biodegradable dari serat daun pisang. Aplikasi inovatif ini menunjukkan bahwa serat alam tidak hanya ramah lingkungan, tetapi juga kompetitif secara estetika dan fungsional.