

BAB I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Bahan baku yang digunakan di beberapa industri seringkali berasal dari bahan hasil sintesis. Namun, bahan hasil sintesis ini biasanya memiliki sifat yang tidak ramah lingkungan dan juga tidak dapat diperbaharui. Sejumlah alternatif dilakukan salah satunya sintesis bahan baku dari alam. Bahan yang bersumber dari alam memiliki keunggulan, seperti mudah didapat karena ketersediaannya yang melimpah, ramah lingkungan, serta biaya yang lebih murah. Salah satu upaya pemberdayaan alam yaitu pembuatan biopolimer.

Biopolimer adalah bahan yang dapat terurai secara hayati. Biopolimer bersifat kuat, mudah terbiodegradasi dan fleksibel yang dapat berasal dari tanaman, hewan, dan mikroorganisme¹. Dikarenakan kemampuannya tersebut maka biopolimer sering digunakan. Salah satu biopolimer yang tengah berkembang ialah selulosa. Selulosa bisa didapatkan dari berbagai sumber, seperti kayu (kayu keras dan kayu lunak), serat biji (katun, sabut, dll), kulit pohon serat (rami), rumput-rumputan (ampas tebu, bambu, dll.), hewan laut (tunikata), alga (*Valonica ventricosa*), jamur, invertebrata dan bakteri (*Acetobacter xylinum*)².

Di alam selulosa hampir tidak pernah ditemukan dalam bentuk murni, namun ditemukan berikatan dengan senyawa lain seperti lignin dan hemiselulosa³. Kedua senyawa ini berasosiasi untuk membentuk kerangka tumbuhan. Dikarenakan keberadaan lignin dan hemiselulosa ini maka perlu dilakukan isolasi selulosa dengan beberapa metode contohnya ultrasonikasi, teknologi enzimatik, metode asam, dan metode alkalinasi⁴.

Nanoselulosa didefinisikan sebagai produk atau ekstrak dari selulosa alam (ditemukan pada tumbuhan, hewan, dan bakteri) yang terdiri dari bahan struktur berskala nano, dan merupakan salah satu material selulosa yang telah maju dan memiliki potensi untuk dikembangkan karena sifat mekaniknya yang baik dan bahan bakunya berasal dari sumber daya alam yang melimpah dan dapat diperbarui⁵. Ukuran nanoselulosa berdiameter 1-100 nm dan panjang 500-2000 nm. Nanoselulosa seringkali dimanfaatkan untuk berbagai macam produk seperti kertas, kardus, kosmetik, kesehatan, peralatan optik dan farmasi⁶.

Selama beberapa dekade terakhir serat selulosa alami telah menjadi pusat perhatian komersial dan penelitian karena penggunaannya dalam produksi material komposit dan dari hari ke hari permintaan ini semakin meningkat. Menurut penelitian yang telah dilakukan oleh Khan (2020) selulosa dapat diisolasi dari bahan alam salah satunya yaitu limbah batang pare, dengan kadar selulosa (61,2 %), hemiselulosa (7,3 %), lignin (14,32 %), dan serta kadar air (6,3%). Selain itu, serat *Momordica charantia L.* mengandung kadar abu yang rendah (2,24%), sehingga meningkatkan karakteristik tahan api. Densitas serat *Momordica charantia L.* adalah $1339 \pm 6,4 \text{ kg/m}^3$ dimana lebih rendah dibandingkan dengan serat rami, sisal, dan katun. Diameter serat *Momordica charantia L.* yaitu $198 \pm 3,9 \text{ }\mu\text{m}$, yang mirip dengan serat alami lainnya. Dalam penelitian ini, serat selulosa didapatkan dari batang pare dengan merendam dan mengeringkannya⁷.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Hossen (2024) mengenai pembuatan nanoselulosa dilakukan beberapa proses pengolahan secara kimia yaitu perlakuan alkalisasi, *bleaching*, dan hidrolisis menggunakan (H_2SO_4), diikuti untuk mengekstraksi nanoselulosa dari serat tumbuhan. Sementara itu, beberapa teknik karakterisasi umum seperti *Field Emission Scanning Electron Microscope*. (FESEM) dan *Fourier Transform Infra Red* (FTIR) dilakukan untuk mengkonfirmasi pembentukan nanoselulosa dari buah pare. Pembuatan nanoselulosa dari kulit buah nipah telah dilaporkan oleh Putri (2024) dengan ukuran 15-20 nm, maka dari itu untuk mengetahui pengaruh konsentrasi asam terhadap karakteristik nanoselulosa dilakukan variasi konsentrasi asam yaitu menggunakan H_2SO_4 1% dan 5%⁸.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, maka rumusan masalah penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana proses isolasi selulosa dan pembuatan nanoselulosa dari serat pare (*Momordica charantia L.*) menggunakan asam kuat?
2. Bagaimana karakteristik nanoselulosa dari serat pare (*Momordica charantia L.*) menggunakan FTIR, XRD, FESEM?

1.3 Tujuan

1. Mengisolasi nanoselulosa dari serat pare (*Momordica charantia L.*) menggunakan asam kuat.
2. Menganalisis karakteristik nanoselulosa dari serat pare (*Momordica charantia L.*) menggunakan FTIR, XRD, dan FESEM.

1.4 Manfaat Penelitian

Berdasarkan penelitian ini akan dihasilkan nanoselulosa dari hasil isolasi selulosa dari batang pare (*Momordica charantia L.*) yang dapat mengurangi limbah dari batang pare (*Momordica charantia L.*) yang tidak dimanfaatkan dengan baik dan meningkatkan nilai ekonomisnya. Selain itu, dapat mengetahui kemampuan dari metode yang diterapkan untuk menghasilkan nanoselulosa serta karakteristik dari jenis nanoselulosa yang dihasilkan.

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pare

Pare (*Momordica charantia L.*) adalah tanaman merambat tropis dan subtropic dari keluarga labu-labuan. Tanaman ini banyak dibudidayakan di Asia, Afrika, dan Karibia karena buahnya dapat dimakan. Umumnya dikenal sebagai labu pahit, pir balsam, pare, kugua dan karela. Buah ini berasal dari negara bagian Kerala, di India selatan, dan diperkenalkan ke Tiongkok pada abad ke-14. Pare banyak digunakan dalam masakan Asia Timur, Asia Selatan, dan Asia Tenggara. Pare digunakan untuk pencegahan kanker, pengobatan diabetes, demam, HIV dan AIDS, serta infeksi⁷.



Gambar 2. 1 Pare

2.1.1 Klasifikasi Tanaman

Kingdom	: <i>Plantae</i>
Subkingdom	: <i>Tracheobionta</i>
Super Divisi	: <i>Spermatophyta</i>
Divisi	: <i>Magnoliophyta</i>
Kelas	: <i>Magnoliopsida</i>
Sub Kelas	: <i>Dilleniidae</i>
Ordo	: <i>Violales</i>
Famili	: <i>Cucurbitaceae</i>
Genus	: <i>Momordica</i>
Spesies	: <i>Momordica charantia L.</i>

2.2 Kandungan Batang Pare

2.2.1 Kandungan Kimia

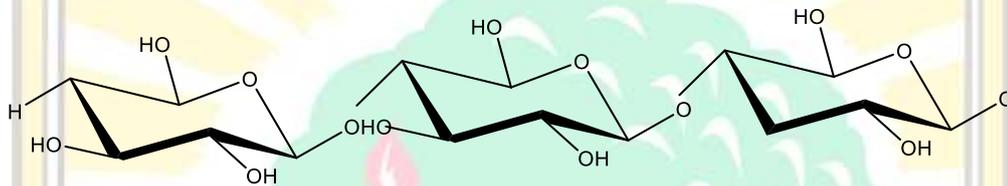
Batang pare (*Momordica charantia L.*), mengandung sejumlah besar selulosa (61,2%), hemiselulosa (7,3%), lignin (14,32%). Kandungan lilin dan kadar air serat pare masing-masing sebesar 1,1% dan 6,3%. Serat pare mengandung kadar abu paling rendah (2,24%), sehingga meningkatkan karakteristik tahan api⁷. Selain itu, pare memiliki banyak senyawa kimia termasuk *charantin*, *saponin*, *flavonoid*, *polifenol*, *glikosida cucurbitacin*, *momordicin*, dan *polifenol*⁹.

2.3 Selulosa

Sebagai polimer organik yang paling umum, selulosa menyumbang sekitar 1,5 triliun ton biomassa setiap tahun. Dianggap sebagai sumber yang tidak terbatas untuk memenuhi

permintaan yang meningkat untuk produk yang ramah lingkungan dan biokompatibel. Selulosa merupakan senyawa organik dengan rumus $(CHO)_n$, sebuah polisakarida yang terdiri dari rantai linier dari beberapa ratus hingga lebih dari sepuluh ribu ikatan β (1-4) glikosidik beberapa ratus hingga ribu unit D-glukosa. Sebanyak 8.000 hingga 15.000 unit glukosa membentuk rantai molekul selulosa. Sekitar 33% dari semua materi tanaman adalah selulosa (isi selulosa dari kapas adalah 90% dan dari kayu adalah 40-50%)¹⁰.

Selulosa merupakan polisakarida kristalin yang berperan sebagai komponen struktural utama dalam dinding sel tumbuhan. Senyawa ini tersusun atas monomer glukosa dengan rumus kimia $C_6H_{12}O_6$. Rantai-rantai ini kemudian berasosiasi membentuk struktur fibril selulosa. Secara kimia, selulosa dinyatakan dengan rumus umum $(C_6H_{10}O_5)_n$, di mana 'n' menunjukkan jumlah unit glukosa yang berulang, yang juga dikenal sebagai derajat polimerisasi (*degree of polymerization/DP*)¹⁰.

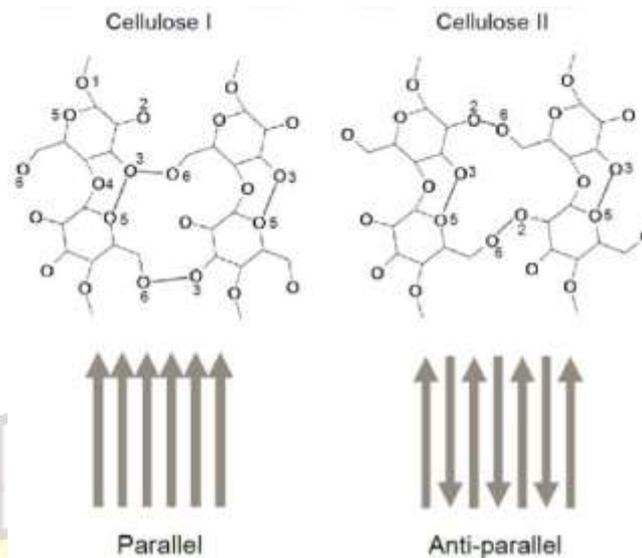


Gambar 2. 2 Struktur Selulosa

Selulosa rantai panjang mempunyai sifat fisik yang lebih kuat, lebih tahan lama terhadap degradasi yang disebabkan oleh pengaruh panas, bahan kimia maupun pengaruh biologis. Selain itu pula selulosa memiliki sifat tidak larut dalam air maupun pelarut organik, tetapi sebagian larut dalam larutan alkali. Dalam keadaan kering, selulosa bersifat higroskopis, keras dan rapuh. Bila selulosa cukup banyak mengandung air maka akan bersifat lunak. Jadi fungsi air disini adalah sebagai pelunak. Selulosa dalam kristal mempunyai kekuatan lebih baik jika dibandingkan dengan bentuk amorfnya¹⁰.

Terdapat dua polimorf selulosa yaitu : selulosa I dan selulosa II. Selulosa I, struktur selulosa alami, merupakan bentuk yang paling melimpah dan dapat ditemukan terutama di dinding sel tumbuhan. Selulosa mengandung 7000-15.000 unit gula per polimer dan terurai pada suhu 300°C-400°C. Secara umum, serat selulosa I ditujukan untuk industri pakaian, kosmetik, dan farmasi. Sedangkan selulosa II adalah selulosa buatan manusia yang paling umum digunakan. Dan selulosa II lebih disukai digunakan dalam kertas elektroaktif, sensor, aktuator, dan bahan penguat².

Dari struktur molekulnya, selulosa I memiliki susunan untai rantai parallel dan selulosa I memiliki susunan untai rantai anti parallel. Karena rantai anti parallel, ikatan hidrogen terbentuk di antara bidang-bidang, membuat keadaan polimorfik ini lebih stabil secara termodinamika².



Gambar 2. 3 Perbedaan struktur selulosa I dan selulosa II

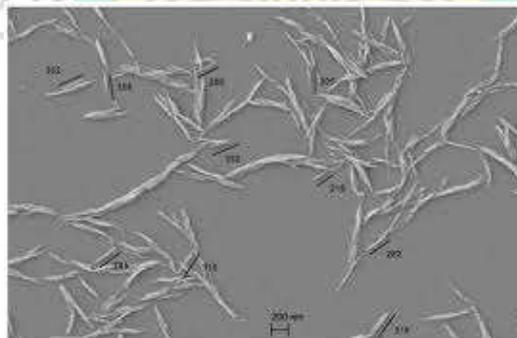
2.4 Nanoselulosa

Nanoselulosa merupakan salah satu jenis nanomaterial dengan bahan baku utama selulosa yang memiliki paling tidak satu dimensi dalam ukuran nano. Nanoselulosa memiliki diameter 1-100 nm dan panjang 500-2000 nm. Dimensi ukuran yang dimiliki nanoselulosa dapat membuat mempunyai luas permukaan yang tinggi serta jumlah gugus hidroksil yang tinggi sehingga memudahkan jika dilakukan modifikasi permukaan¹¹. Banyak penelitian yang telah mencoba untuk mensintesis nanoselulosa dari bahan baku sumber serat lain selain kayu, misalnya limbah pertanian. Limbah pertanian yang bisa digunakan sebagai bahan sumber sintesis nanoselulosa adalah jerami gandum, tongkol jagung, daun nanas, kulit kacang kedelai, ampas tebu dan sebagainya¹².

Berdasarkan morfologinya nanoselulosa terbagi menjadi 3 bagian, yaitu selulosa nanokristal (CNC), selulosa nanofiber (CNF), dan nanoselulosa bakterial (BNC)¹².

2.4.1 Selulosa Nanokristal (CNC)

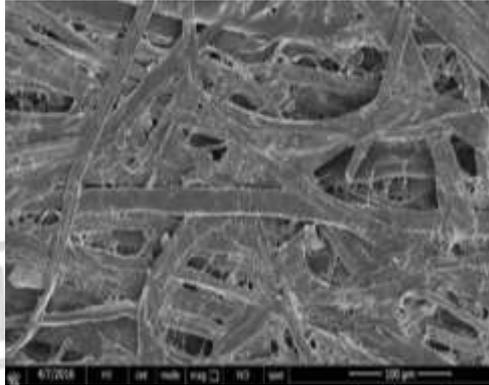
CNC adalah fragmen selulosa berbentuk jarum dengan struktur kristal yang hampir sempurna, biasanya dibuat setelah perlakuan kimia (seperti hidrolisis asam) dan mekanis (seperti pemrosesan bertekanan tinggi, ultrasonik, mikrofluidisasi, dan penggilingan *cryo*) yang berada pada serat selulosa alami¹².



Gambar 2. 4 Hasil SEM dari Selulosa Nanokristal¹³

2.4.2 Selulosa Nanofiber

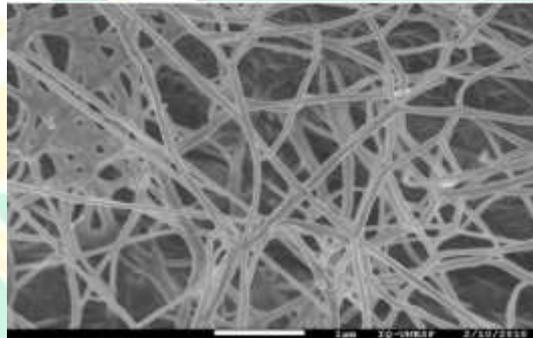
CNF adalah struktur fibrilasi semikristalin panjang yang memiliki bentuk dan ukuran yang sebanding atau lebih besar dari diameter CNC¹².



Gambar 2. 5 Hasil SEM dari Selulosa Nanofiber¹⁴

2.4.3 Nanoselulosa Bakterial

Selulosa bakteri (BNC) dibuat melalui fenomena fermentasi *bottom-up*, berbeda dengan selulosa tanaman. BNC benar-benar murni dan hanya terdiri dari beberapa elemen nutrisi kecil dan elemen sekunder mikroba, yang dapat dihilangkan dengan perlakuan alkali sederhana. Ada beberapa metode untuk sintesis nanoselulosa, yaitu metode mekanik, kimia, dan biologis¹².



Gambar 2. 6 Hasil SEM dari Nanoselulosa Bakterial¹⁵

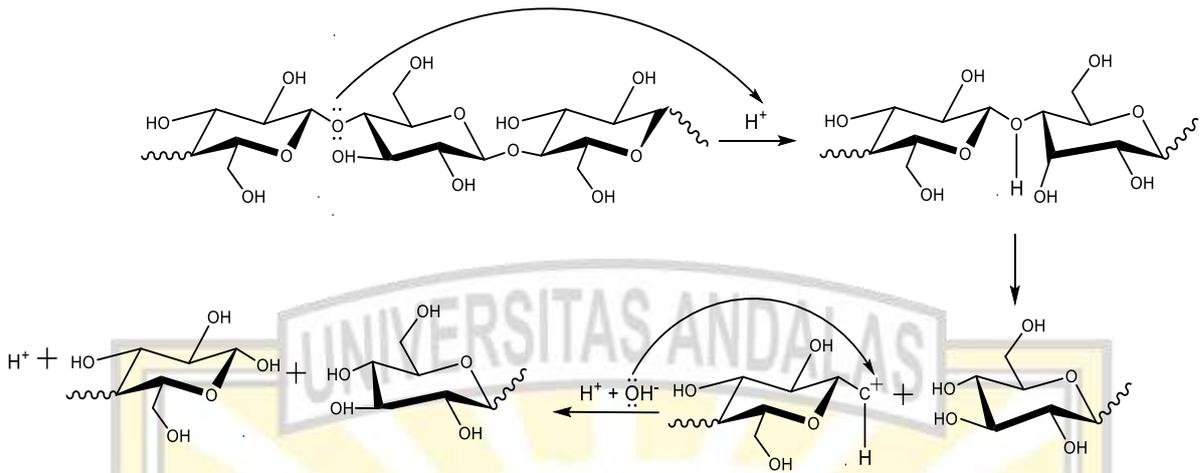
2.4.4 Metode Kimia

Untuk saat ini, metode produksi nanoselulosa secara kimia terdiri dari: metode hidrolisis asam, pelarut alkali.

2.4.4.1 Metode Hidrolisis Asam

Hidrolisis selulosa yang umum digunakan adalah dengan menggunakan asam kuat. Asam kuat dapat menghilangkan bagian amorf dari suatu rantai selulosa sehingga isolasi pada bagian kristalin selulosa dapat dilakukan. Menggunakan metode hidrolisis dengan asam kuat, yaitu asam sulfat (H_2SO_4). Asam-asam kuat yang digunakan dalam hidrolisis asam memang cocok dalam sintesis nanoselulosa. Namun, asam-asam kuat juga memiliki dampak negatif, seperti beracun, berbahaya, dan korosif. Asam-asam ini juga sangat korosif terhadap reaktor dan dalam penanganannya pun harus ekstra hati-hati. Ini menjadikan metode asam merupakan pilihan yang mahal. Sebagai tambahan, limbah asam-asam kuat harus diproses

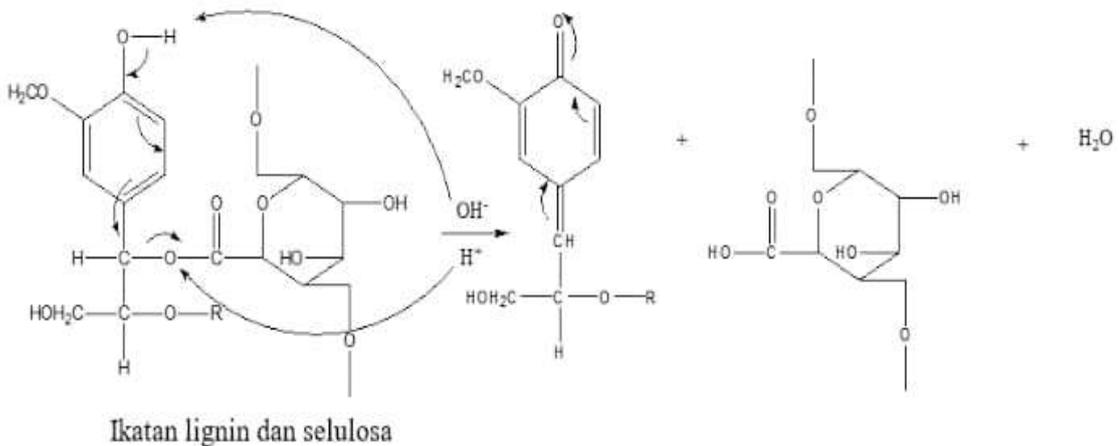
terlebih dahulu untuk membuat proses yang ekonomis dan ramah lingkungan. Berikut reaksi yang terjadi saat hidrolisis asam¹² :



Gambar 2. 7 Mekanisme Reaksi Hidrolisis Asam¹²

2.4.4.2 Metode pelarut alkali

Metode pelarut alkali biasanya diimplementasikan sebelum treatment dengan metode hidrolisis dengan asam untuk menghilangkan hemiselulosa dan sebagian lignin dari material lignoselulosa. Metode pelarut alkali memiliki beberapa kelemahan. Selain harga bahan kimianya yang mahal, pemutusan struktur lignin mengarah pada pemecahan ikatan eternya¹².



Gambar 2. 8 Mekanisme Reaksi Delignifikasi¹⁶

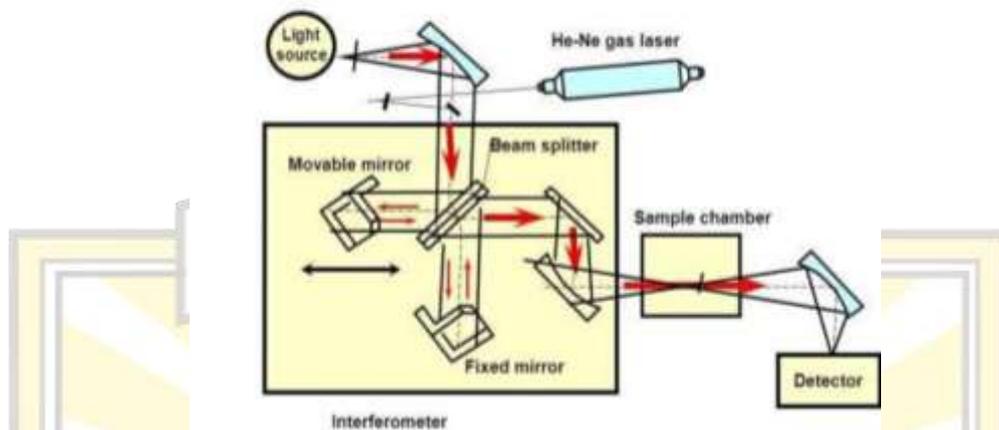
2.5 Karakterisasi

2.5.1 Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

Spektroskopi vibrasi merupakan cabang dari spektroskopi molekuler yang berkaitan dengan getaran antar atom dalam suatu molekul. Spektroskopi inframerah mempelajari bagaimana radiasi inframerah berinteraksi dengan materi. Spektrum inframerah wilayah tengah (4000-400 cm^{-1}) biasanya dimanfaatkan untuk menganalisis dan menentukan struktur molekul. Sementara itu, wilayah inframerah dekat (12.800-4000 cm^{-1}) digunakan untuk mendeteksi *overtone* dan pita kombinasi yang timbul akibat getaran molekul. Adapun spektrum inframerah

jauh ($400\text{-}10\text{ cm}^{-1}$) berkaitan dengan getaran dari molekul yang memiliki atom berat, getaran rangka molekul, serta getaran kisi pada struktur kristal¹⁷.

FTIR Instrumentation



Gambar 2. 9 Diagram Skema FTIR

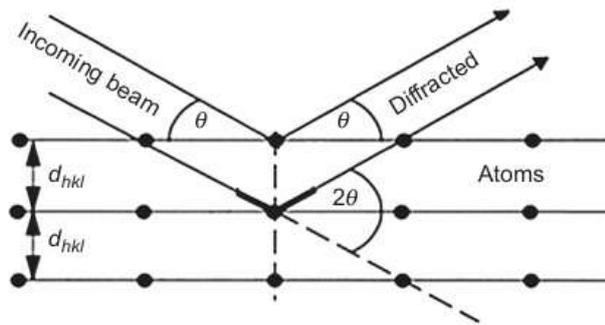
Spektroskopi inframerah transformasi Fourier (FTIR) merupakan pendekatan analitik modern yang mengembangkan prinsip spektroskopi IR menjadi metode yang akurat dan terpercaya. Inovasi dalam teknologi FTIR memungkinkan penggunaannya dalam pengujian baik secara kuantitatif maupun kualitatif. Teknik ini mampu menjangkau beragam jenis analisis, mulai dari senyawa bermolekul kecil hingga struktur kompleks seperti sel dan jaringan. FTIR juga mendukung analisis berbagai bentuk sampel, termasuk padatan, cairan, dan gas, dalam kisaran panjang gelombang 4000 hingga 400 cm^{-1} ¹⁷.

Prinsip kerja spektrometer FTIR pada Gambar 2.8 adalah sebagai berikut: Berkas radiasi inframerah dari sumber radiasi diteruskan ke interferometer sebagai pengganti monokromator. Dari interferometer radiasi inframerah diteruskan ke sampel. Sebagian radiasi diabsorpsi oleh sampel, sedangkan sebagian lain¹⁸. Beberapa kelebihan menggunakan alat FTIR ini 1) Cepatnya pengukuran, sebagian besar pengukuran dengan FT-IR dilakukan dalam hitungan menit. 2) Sensitivitas yang tinggi, dan 3) Kemungkinan terjadinya kesalahan mekanik sangat kecil¹⁷.

2.5.2 X-Ray Diffraction (XRD)

Sinar X adalah gelombang elektromagnetik berenergi tinggi dengan panjang gelombang antara 10^{-3} dan 10^{-1} nm. Metode XRD didasarkan pada kemampuan kristal untuk mendifraksi sinar-X dengan cara yang khas sehingga memungkinkan studi yang presisi terhadap struktur fase kristal. Dengan posisi puncak, parameter kisi, grup ruang, komposisi kimia, makrostres, atau analisis fase kualitatif dapat diselidiki. Berdasarkan intensitas puncak, informasi tentang struktur kristal (posisi atom, faktor suhu, atau okupansi) serta tekstur dan analisis fase kuantitatif dapat diperoleh. Terakhir, bentuk puncak memberikan informasi tentang kontribusi pelebaran sampel (ketegangan mikro dan ukuran kristalit)¹⁹.

Prinsip metode ini didasarkan pada difraksi sinar-X oleh atom periodik bidang dan sudut dari sinyal terdifraksi. Ketika radiasi elektromagnetik melewati suatu bahan, ia berinteraksi dengan elektron dalam atom, beberapa di antaranya tersebar ke segala arah. Di beberapa arah, gelombang berada dalam fase dan saling memperkuat, menyebabkan interferensi konstruktif, sementara beberapa gelombang keluar dari fase dan membatalkan satu sama lain, menyebabkan interferensi destruktif. Interferensi konstruktif bergantung pada jarak medan (d), ukuran sudut difraksi (θ), dan hanya terjadi jika memenuhi hukum Bragg¹⁹.

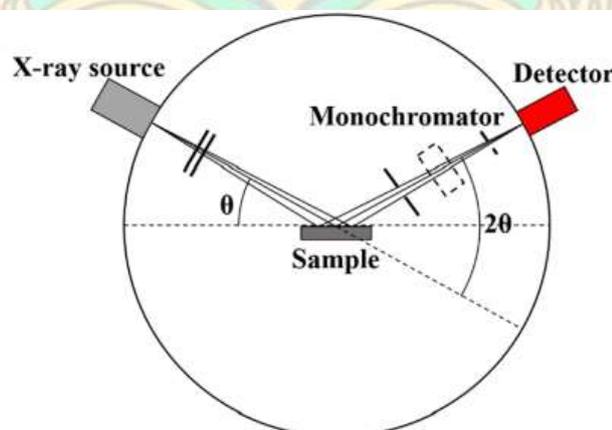


Gambar 2. 10 Kondisi geometris untuk difraksi dari bidang kisi

Hukum Bragg diberikan dalam persamaan :

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (1)$$

dimana, n adalah orde difraksi, λ adalah panjang gelombang sinar datang dalam nm, d adalah jarak kisi dalam nm, dan θ adalah sudut sinar terdifraksi dalam derajat. Peralatan XRD terdiri dari tabung sinar-X (generator sinar-X), goniometer, monokromator, detektor, unit kontrol/pengolahan data, dll. Diagram skema peralatan XRD ditunjukkan pada Gambar 2.5. Sinar-X mengenai sampel, sudut datang diubah menggunakan goniometer, dan sinar-X yang tersebar dimonokromisasi melalui monokromator dan dideteksi menggunakan detektor. Melalui informasi sinar-X yang terdeteksi, berbagai informasi struktural tentang material, seperti kristalinitas, komposisi kimia, struktur kristal, dan ukuran kristal, dapat diperoleh¹⁹.



Gambar 2. 11 Diagram skema XRD

Analisis difraksi sinar-X (XRD) juga dimanfaatkan untuk menentukan ukuran kristalit dari suatu fase tertentu. Penentuan ini dilakukan dengan mengacu pada puncak-puncak utama

dalam pola difraksi, menggunakan pendekatan dari persamaan Debye-Scherrer yang dinyatakan sebagai berikut²⁰:

$$D = \frac{k \times \lambda}{\beta \times \cos \theta} \quad (2)$$

Beberapa teknik XRD telah diusulkan untuk menentukan Indeks Kristalinitas. Metode XRD yang paling banyak diterapkan untuk mempelajari kristalinitas selulosa adalah menggunakan persamaan Segal. Indeks kristalinitas (IK) telah digunakan untuk menggambarkan jumlah relatif material kristalin dalam selulosa. Indeks ini dihitung sebagai kontribusi bagian kristalin dari material relatif terhadap gabungan luas area kristalin dan amorf. Persamaan Segal dinyatakan sebagai berikut²¹:

$$\%Cr = \frac{I_{200}}{I_{200} + I_{am}} \times 100\% \quad (3)$$

2.5.3 Scanning Electron Microscope (SEM)

Scanning Electron Microscope (SEM) adalah teknik pencitraan permukaan yang menghasilkan gambar sampel dengan memindainya dengan berkas elektron terfokus. Alat ini memindai permukaan sampel menggunakan berkas elektron padat, mengubah sinyal yang diterima menjadi data skala abu-abu, dan menampilkannya di layar. Karena panjang gelombang berkas elektron jauh lebih kecil daripada cahaya tampak, resolusi mikroskop elektron jauh lebih tinggi daripada mikroskop optik. Pembesaran maksimum mikroskop optik hanya sekitar 1500 kali, dan mikroskop pemindaian ini dapat memperbesar lebih dari 10.000 kali²².



Gambar 2. 12 Skema alat SEM

Scanning Electron Microscope (SEM) bekerja dengan memanfaatkan interaksi antara elektron yang dipancarkan dan atom-atom pada permukaan sampel, sehingga menghasilkan

sinyal yang dapat digunakan untuk mengungkap morfologi, komposisi unsur, serta struktur dari material tersebut²².

Prinsip kerja SEM diawali dengan pembentukan pancaran elektron. Sumber elektron yang digunakan umumnya berasal dari katoda termionik berbahan tungsten atau *Field Emission Gun* (FEG) yang terbuat dari logam seperti tantalum. Berkas elektron ini kemudian dipercepat dengan tegangan tinggi biasanya berkisar antara 1 kV hingga 30 kV agar memiliki energi cukup untuk berinteraksi dengan permukaan sampel²².

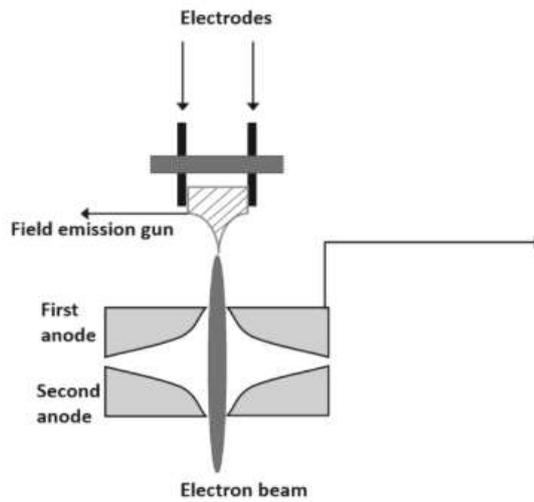
Selanjutnya, berkas tersebut diarahkan melalui sistem lensa elektromagnetik yang terdiri dari lensa kondensor dan lensa objektif. Fungsi utama dari lensa-lensa ini adalah memfokuskan berkas elektron hingga membentuk titik kecil di permukaan sampel. Proses ini sangat berpengaruh terhadap kualitas resolusi gambar; semakin sempit titik fokus yang dihasilkan, maka semakin tinggi pula resolusi citra yang diperoleh²².

Setelah berkas elektron difokuskan, pemindaian dilakukan melintasi permukaan sampel dalam pola raster, yakni secara horizontal dari kiri ke kanan dan vertikal dari atas ke bawah. Proses pemindaian ini dikendalikan oleh koil khusus yang mengatur pergerakan berkas elektron dengan tingkat presisi tinggi. Saat berkas elektron mengenai permukaan sampel, akan timbul berbagai sinyal, seperti elektron sekunder, elektron pantul (*backscattered*), dan sinar-X karakteristik²².

Sinar-X karakteristik terbentuk ketika elektron dari berkas utama mengenai atom dalam sampel dan menyebabkan elektron pada kulit dalam tereksitasi. Saat elektron tersebut kembali ke tingkat energi semula, dilepaskan sinar-X dengan energi khas yang spesifik untuk setiap unsur. Energi sinar-X ini kemudian dapat dianalisis menggunakan detektor seperti *Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy* (EDS) untuk mengidentifikasi kandungan unsur kimia dalam sampel²².

Salah satu keunggulan utama SEM adalah kemampuannya menghasilkan citra beresolusi tinggi dengan kedalaman fokus yang besar, sehingga memungkinkan visualisasi detail sangat halus pada permukaan sampel. SEM generasi terbaru mampu mencapai resolusi hingga skala nanometer, memungkinkan analisis mendalam terhadap struktur mikro maupun nano²².

Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM) merupakan kemajuan dari SEM yang menawarkan resolusi dan kemampuan pencitraan yang lebih tinggi dengan rentang energi yang luas. Jika dibandingkan dengan SEM konvensional yang menggunakan kawat filamen tungsten berbentuk jepit rambut yang dipanaskan untuk menghasilkan elektron, FESEM menggunakan kristal tungsten dengan ujung runcing yang disebut *Field Emission Gun* (FEG) yang memungkinkan pembangkitan elektron yang sangat terfokus bahkan dengan tegangan percepatan rendah. Selain itu, ukuran titik yang lebih kecil memungkinkan pembesaran yang dapat enam kali lebih banyak daripada SEM konvensional²³.



Gambar 2. 13. Skema dari FEG

Citra beresolusi tinggi yang dapat diperoleh pada tegangan percepatan rendah menjadikan FESEM pilihan yang sangat baik untuk sampel yang terlalu sensitif dan nonkonduktif. FESEM dapat digunakan dalam bidang ilmu material, geologi, biologi, analisis kegagalan, dll., seperti SEM konvensional, tetapi dapat memberikan informasi yang lebih lengkap dalam hal kedalaman bidang pandang, resolusi, dan perbesaran²³.

