

**SINTESIS NANOSELULOSA DARI LIMBAH BIOMASSA TANDAN
KOSONG KELAPA SAWIT (TKKS) DENGAN METODE HIDROLISIS
ASAM**

(Skripsi)

Oleh

Difa Putri Himawan

2157011007



**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2025

ABSTRAK

SINTESIS NANOSELULOSA DARI LIMBAH BIOMASSA TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT (TKKS) DENGAN METODE HIDROLISIS ASAM

Oleh

Difa Putri Himawan

Penelitian ini dilakukan dengan beberapa tahapan utama, yaitu mengisolasi selulosa dari Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) melalui proses delignifikasi, pemurnian selulosa, pemutihan selulosa, dan mensintesis nanoselulosa dari selulosa menggunakan metode hidrolisis asam, dengan asam sulfat variasi konsentrasi 5%, 10%, dan 15%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa isolasi selulosa optimum diperoleh pada selulosa A1 dengan kadar selulosa sebesar 96,9%. Variasi optimum selulosa A1, kemudian dihidrolisis dengan asam sulfat konsentrasi 5%, 10%, dan 15%. Karakterisasi FTIR menunjukkan kemurnian optimal nanoselulosa terdapat pada nanoselulosa 15%. Analisis *Field Emission Scanning Electron Microscopy* (FESEM) menunjukkan hasil nanoselulosa 15% dengan ukuran diameter 173 nm-550 nm. Sementara itu, analisis difraksi sinar *X-Ray Diffraction* (XRD) mengonfirmasi tingkat kristalinitas nanoselulosa 15% dengan indeks kristalinitas mencapai 86%.

Kata Kunci :Tandan Kosong Kelapa Sawit, Selulosa, Hidrolisis Asam, FTIR, FESEM, XRD.

ABSTRACT

SYNTHESIS OF NANOCELLULOSE FROM OIL PALM EMPTY FRUIT BUNCH (OPEFB) BIOMASS WASTE BY ACID HYDROLYSIS METHOD

By

Difa Putri Himawan

This research was conducted with several main stages, namely isolating cellulose from Empty Palm Oil Bunches (TKKS) through the delignification process, purifying cellulose, bleaching cellulose, and synthesizing nanocellulose from cellulose using the acid hydrolysis method, with sulfuric acid concentration variations of 5%, 10%, and 15%. The results showed that the optimum cellulose isolation was obtained in cellulose A1 with a cellulose content of 96.9%. The optimum variation of cellulose A1 was then hydrolyzed with sulfuric acid concentrations of 5%, 10%, and 15%. FTIR characterization showed that the optimal purity of nanocellulose was found in 15% nanocellulose. Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM) analysis showed 15% nanocellulose with a diameter of 173 nm-550 nm. Meanwhile, X-Ray Diffraction (XRD) analysis confirmed the crystallinity level of 15% nanocellulose with a crystallinity index of 86%.

Keywords : Oil Palm Empty Bunch, Cellulose, Acid Hydrolysis, FTIR, FESEM, XRD.

**SINTESIS NANOSELULOSA DARI LIMBAH BIOMASSA TANDAN
KOSONG KELAPA SAWIT (TKKS)
DENGAN METODE HIDROLISIS ASAM**

Oleh

Difa Putri Himawan

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Memperoleh Gelar
SARJANA SAINS**

Pada

**Jurusan Kimia
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**



**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

Judul : Sintesis Nanoselulosa dari Limbah Biomassa
Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) dengan
Metode Hidrolisis Asam

Nama Mahasiswa : **Difa Putri Himawan**

Nomor Pokok Mahasiswa : 2157011007

Jurusan : Kimia

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam




Prof. Dr. Eng. Supto Dwi Y., S.Si., M.T.
NIP. 197407052000031001


Dr. Fathan Bahfie, S.T., M.Si.
NIP. 199012182014011001

2. Ketua Jurusan Kimia
FMIPA Universitas Lampung

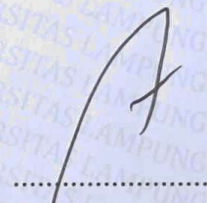

Prof. Dr. Mita Rilyanti, S.Si., M.Si.
NIP. 197205302000032001

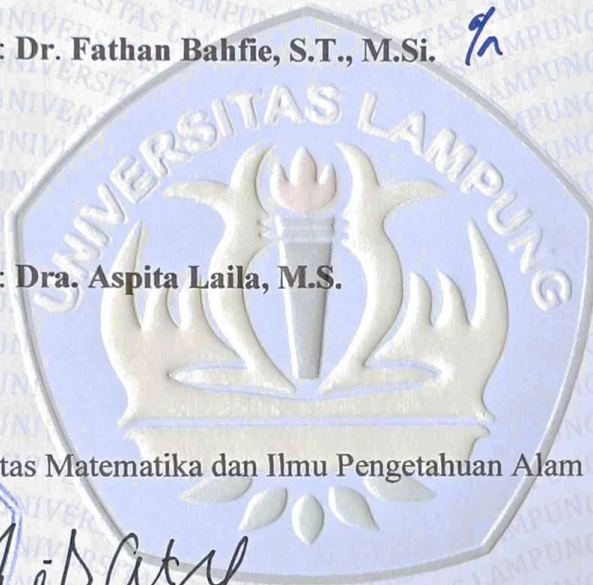
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : Prof. Dr. Eng. Suripto Dwi Yuwono, S.Si., M.T. 

Sekretaris : Dr. Fathan Bahfie, S.T., M.Si. 

Anggota : Dra. Aspita Laila, M.S. 



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam


Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si.
NIP. 197110012005011002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 25 Juli 2025

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Difa Putri Himawan
Nomor Pokok Mahasiswa : 2157011007
Jurusan : Kimia
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Perguruan Tinggi : Universitas Lampung

Dengan ini menyatakan sesungguhnya bahwa skripsi yang berjudul **“Sintesis Nanoselulosa dari Limbah Biomassa Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) dengan Metode Hidrolisis Asam”** adalah benar karya saya sendiri dan tidak terdapat karya yang ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis tercantum dalam naskah ini sebagaimana disebutkan dalam daftar pustaka. Saya tidak keberatan jika sebagian atau seluruh data di dalam skripsi ini digunakan oleh dosen atau program studi untuk kepentingan publikasi, sepanjang nama saya disebutkan dan terdapat kesepakatan sebelum dilakukan publikasi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sadar dan sebenar-benarnya untuk digunakan sebagaimana mestinya.

Bandar Lampung, 28 Juli 2025
Yang Menyatakan



Difa Putri Himawan
NPM. 2157011007

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Indramayu, Jawa Barat, pada tanggal 26 Juli 2002, sebagai anak pertama dari dua bersaudara, dari Bapak Lucky Himawan dan Ibu Muafiyah. Penulis mulai menempuh pendidikan di SD Negeri 6 Sumber Rejo Bandar Lampung dan lulus pada tahun 2014. Setelah itu, penulis melanjutkan pendidikannya di SMP Negeri 14 Bandar Lampung dan berhasil menyelesaikannya pada tahun 2017.

Penulis melanjutkan pendidikan di MA Negeri 1 Indramayu pada tahun yang sama dan menjadi siswi yang aktif mengikuti kompetisi Fisika dan Kimia, dan meraih Juara 3 KSM Fisika Terintegrasi tingkat Kabupaten Indramayu pada Tahun 2018, serta meraih Juara 1 KSM Kimia Terintegrasi tingkat Kabupaten Indramayu pada Tahun 2019. Penulis menamatkan masa SMA-nya di tahun 2020. Penulis lalu melanjutkan pendidikannya pada tahun 2021 di Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung melalui jalur seleksi SMM PTN-Barat.

Selama menjadi mahasiswa, penulis pernah menjadi asisten praktikum mata kuliah Kimia Organik untuk mahasiswa Jurusan Biologi Universitas Lampung pada tahun 2024. Penulis juga aktif dalam kegiatan organisasi kemahasiswaan, antara lain menjadi anggota bidang Sains dan Penalaran Ilmu Kimia (SPIK) di Himpunan Mahasiswa Kimia (HIMAKI) pada periode 2022. Penulis juga tergabung dalam Unit Kegiatan Mahasiswa Penelitian Universitas Lampung sebagai anggota divisi kaderisasi pada periode 2022–2023. Selain itu, penulis merupakan penerima beasiswa dari Yayasan Karya Salemba Empat (KSE) periode 2022-2025 dan turut aktif dalam berbagai kegiatan pengembangan diri yang diselenggarakan oleh Paguyuban Beasiswa KSE Unila. Pada tahun 2023, penulis menjalani Praktik Kerja Lapangan di Laboratorium Hidrometalurgi, Pusat Riset Teknologi Pertambangan, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN).

MOTTO

“Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya.”

(Q.S. Al-Baqarah: 286)

“Allah tidak mengatakan hidup ini mudah. Tetapi Allah berjanji, bahwa sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan.”

(Q.S. Al-Insyirah: 5-6)

“Dan apabila hamba-hambaku bertanya kepadamu tentang Aku, maka (jawablah), bahwasanya Aku adalah dekat”

(Q.S. Al-Baqarah: 186)

“Hidup ternyata bukanlah perlombaan. Tidak masalah jika langkahmu melambat dan tak secepat orang yang lain. Sekali-kali, kita memang perlu menikmati apa yang sedang terjadi dan terus percaya bahwa pada akhirnya semua akan membaik.”

(Brian Khrisna)

“Untuk bisa memakai baju saja, dunia ini menyuruh kita membayarnya. Tapi untuk hidup, Tuhan tidak pernah menagih *bill*-nya.”

(Khoirul Trian)

“Jalani hidupmu seolah-olah semuanya dirancang untuk kebaikanmu.”

(Jalaluddin Rumi)

“Jika bukan karena Allah yang mampukan, aku mungkin sudah lama menyerah.”

PERSEMBAHAN



Atas limpahan kasih dan izin dari Allah SWT, Sang Maha Pengasih dan Penyayang, yang senantiasa menerangi langkah ini dengan rahmat dan hidayah-Nya. Shalawat serta salam tercurah indah kepada junjungan mulia Nabi Muhammad SAW.

Dengan kerendahan hati, kupersembahkan karya sederhana ini sebagai bentuk wujud cinta, bakti, dan sayangku kepada:

Orang Tuaku Tercinta

Bapak Lucky Himawan dan Ibu Muafiyah

Saudariku Tersayang

Syifa Rizqy Aulia

Rasa Hormat Saya Kepada:

Bapak Prof. Dr. Eng Suropto Dwi Yuwono, S.Si., M.T. | Bapak Dr. Fathan Bahfie S.T., M.Si. | Ibu Dra. Aspita Laila, M.S. | serta seluruh dosen Jurusan Kimia yang telah dengan tulus membagikan ilmu, memberikan bimbingan, dan menunjukkan dedikasi tanpa lelah dalam mendampingi proses belajar penulis.

Keluarga besar dan sahabat-sahabatku yang senantiasa menghadirkan dukungan moral dan spiritual, terima kasih atas setiap do'a yang dipanjatkan dan semangat yang tak henti diberikan.

Serta,

Almamater Tercinta
Universitas Lampung

SANWANCANA

Alhamdulillahirobbil 'alaamiin, segala puji hanya bagi Allah, *Rabb* semesta alam yang telah memberikan nikmat dan karunia-Nya kepada penulis, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **SINTESIS NANOSELULOSA DARI LIMBAH BIOMASSA TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT (TKKS) DENGAN METODE HIDROLISIS ASAM**. *Allahumma sholli 'ala Muhammad sholli wasallim wabaarik 'alaihi*, semoga shalawat, salam, dan keberkahan senantiasa tercurah kepada Nabi Muhammad SAW yang akan memberi syafa'at kepada umatnya di dunia maupun di akhirat. *Aamiin*.

Dengan penuh do'a dan ketulusan, penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Tuhan Yang Maha Esa, Allah SWT, atas segala rahmat, nikmat, dan karunia-Nya yang telah dilimpahkan, sehingga penulis diberi kekuatan, kesehatan, serta kemudahan dalam menyelesaikan penyusunan skripsi ini dengan baik.
2. Kepada orang tua penulis, yang telah berjasa besar dalam hidup penulis, atas segala do'a, dukungan, semangat, dan kasih sayang yang tak pernah putus.
3. Adik tersayang, atas segala dukungan, do'a, semangat, dan kesediaannya menjadi tempat berbagi suka dan duka.
4. Bapak Prof. Dr. Eng. Suropto Dwi Yuwono, M.T. selaku pembimbing pertama dalam penelitian ini, yang telah memberikan ilmu, bimbingan, arahan, bantuan, serta masukan dan saran yang sangat berarti bagi penulis selama proses penyusunan skripsi ini.

5. Bapak Dr. Fathan Bahfie, M.Si. selaku pembimbing kedua dalam penelitian ini, yang telah berbagi banyak pengetahuan, terutama di bidang nanoselulosa, serta memberikan bimbingan, arahan, bantuan, kritik, dan saran yang sangat membantu penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
6. Ibu Dra. Aspita Laila, M.S. selaku pembahas dalam penelitian ini, yang telah berkenan meluangkan waktu untuk memberikan arahan, bimbingan, bantuan, serta masukan dan kritik yang membangun, sehingga penulis dapat menyempurnakan penyusunan skripsi ini.
7. Ibu Devi Nur Anisa, M.Sc. selaku dosen pembimbing akademik yang senantiasa hadir memberikan dukungan, semangat, arahan, serta nasihat yang bijaksana selama proses perencanaan studi hingga pelaksanaan penelitian ini.
8. Ibu Prof. Dr. Mita Rilyanti, M.Si. selaku Ketua Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung.
9. Bapak Dr. Eng. Heri Satria, M. Si. selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam.
10. Bapak dan Ibu Dosen di Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung yang telah membagikan ilmu, pengalaman berharga, serta motivasi yang begitu berarti kepada penulis selama menjalani masa studi sebagai mahasiswi jurusan kimia.
11. Bapak dan Ibu peneliti dan penyelia di Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) Tanjung Bintang, terutama Ibu Ulin Herlina, M.T. yang telah memberikan bimbingan dan ilmu yang bermanfaat bagi penulis selama proses penelitian.
12. Kakak-kakak *Research Assistant* (RA) di Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) Tanjung Bintang, yang tidak dapat disebutkan satu per satu namanya, atas bantuan dan bimbingannya.

13. Teman sekaligus sahabat tersayang, Ayu Fortune Lisa Hutabarat dan Haryati Priskilla Tarigan, yang telah setia membersamai dalam suka maupun duka, menjadi tempat berbagi cerita dan pelipur lara dari awal perkuliahan hingga tersusunnya skripsi ini. Terima kasih atas segala bantuan, semangat, dan pelukan, hingga akhirnya penulis dapat menyelesaikan perjalanan yang tidak mudah ini.
14. Teman-teman Kimia angkatan 2021 yang tidak bisa disebutkan satu per satu namanya, atas segala bantuan, kebersamaan, dan dukungannya.
15. Anabul tersayang, Cimeng dan Chika, yang selalu setia menemani dan menghibur penulis dengan tingkah lucu dan menggemaskan, menjadi sumber semangat tersendiri dalam menyelesaikan skripsi ini.
16. Diriku sendiri, Difa Putri Himawan. *Thank you for sticking around. The journey that has passed yesterday was not easy, there were many obstacles, insults, and brokenness. May you become a successful person and prove to everyone, you can.*

Penulis menyadari bahwa karya ini masih jauh dari kata sempurna, namun besar harapan agar tulisan ini bisa memberi arti dan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan di masa mendatang. *Aamiin.*

Bandar Lampung, 28 Juli 2025
Penulis,

Difa Putri Himawan

DAFTAR ISI

Halaman

DAFTAR GAMBAR.....	iii
DAFTAR TABEL	ix
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Penelitian.....	4
1.3. Manfaat Penelitian.....	5
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1. Limbah Kelapa Sawit.....	6
2.2. Tandan Kosong Kelapa Sawit	6
2.2.1. Pemanfaatan Tandan Kosong Kelapa Sawit.....	7
2.3. Selulosa	8
2.4. Hemiselulosa	10
2.5. Lignin.....	11
2.6. Nanoselulosa	13
2.6.1. Sintesis Nanoselulosa	14
2.6.2. Penelitian Mengenai Nanoselulosa.....	15
2.6.3. Pemanfaatan Nanoselulosa	16
2.7. Uji Karakterisasi.....	17
2.7.1. <i>Fourier Transform Infra Red</i> (FTIR)	17
2.7.2. <i>X-ray Diffraction</i> (XRD)	19
2.7.3. <i>Field Emission Scanning Electron Microscope</i> (FESEM)	21
III. METODE PENELITIAN	23
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian	23
3.2. Alat dan Bahan.....	23
3.2.1. Alat	23
3.2.2. Bahan	23

3.3. Diagram Alir Penelitian	24
3.4. Prosedur Penelitian.....	24
3.4.1. Preparasi Sampel	25
3.4.2. Proses Isolasi Selulosa dari Tandan Kosong Kelapa Sawit.....	25
3.4.3. Proses Pemurnian Selulosa	26
3.4.4. Proses Pemutihan Selulosa	26
3.4.5. Penentuan Kadar Selulosa dengan Uji SNI 0444:2009 dan Penentuan Kadar Lignin dengan Uji SNI 0492:2008	27
3.4.6. Sintesis Nanoselulosa dari Selulosa Menggunakan Metode Hidrolisis Asam.....	29
3.4.7. Analisis FTIR	29
3.4.8. Analisis XRD.....	29
3.4.9. Analisis FESEM	30
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	31
4.1. Preparasi Sampel.....	31
4.2. Isolasi Selulosa dari Tandan Kosong Kelapa Sawit.....	31
4.3. Analisis Kuantitatif Selulosa dari Tandan Kosong Kelapa Sawit.....	34
4.4. Sintesis Nanoselulosa dari Selulosa Menggunakan Metode Hidrolisis Asam.....	36
4.5. Karakterisasi Nanoselulosa dari Selulosa	37
4.5.1. Analisis FTIR Nanoselulosa	37
4.5.2. Analisis XRD Nanoselulosa	41
4.5.3. Analisis PSA Nanoselulosa	43
4.5.4. Analisis FESEM Nanoselulosa.....	44
V. KESIMPULAN DAN SARAN	46
5.1. Kesimpulan	46
5.2. Saran.....	46
DAFTAR PUSTAKA	48
LAMPIRAN.....	56

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Struktur Selulosa	9
2. Struktur Hemiselulosa.....	10
3. Struktur Monomer Penyusun Lignin	12
4. Struktur Lignin.....	13
5. Mekanisme Hidrolisis Asam	15
6. Prinsip Kerja Alat FTIR.....	18
7. Prinsip Kerja Alat XRD	20
8. Diagram sudut pada Hukum Bragg.....	21
9. Cara Kerja Alat FESEM.....	23
10. Diagram Alir Penelitian	24
11. TKKS (a) Sebelum dipotong. (b) Setelah dipotong sekitar 2 cm. (c) Setelah dihaluskan.....	31
12. Hasil Delignifikasi TKKS	32
13. Selulosa (a) Sampel A1. (b) Sampel A2. (c) Sampel B1. (d) Sampel B2.....	33
14. Grafik kadar selulosa dan kadar lignin	35
15. Nanoselulosa (a) Variasi 5%. (b) Variasi 10%. (c) Variasi 15%.	36
16. Spektrum FTIR dari (a) <i>Raw</i> TKKS. (b) Sampel A1. (c) Sampel B2.....	37
17. Spektrum FTIR Nanoselulosa dari (a) Variasi H ₂ SO ₄ 10%. (b) Variasi H ₂ SO ₄ 15%.	39
18. Difraktogram XRD dari (a) <i>Raw</i> TKKS. (b) Selulosa A1. (c) Selulosa B2. (d) Nanoselulosa variasi H ₂ SO ₄ 10%. (e) Nanoselulosa variasi H ₂ SO ₄ 15%. ..	42
19. Hasil analisis PSA (a) konsentrasi H ₂ SO ₄ 5%. (b) konsentrasi H ₂ SO ₄ 10%. (c) konsentrasi H ₂ SO ₄ 15%.	43

20. Hasil Analisis FESEM (a) Nanoselulosa variasi H ₂ SO ₄ 10% perbesaran 5.000×. (b) Nanoselulosa variasi H ₂ SO ₄ 15% perbesaran 5.000×.	44
21. Larutan Blanko (a) Sebelum titrasi (b) Sesudah titrasi	59
22. Sebelum Titrasi Selulosa.....	61
23. Hasil Titrasi Selulosa	61
24. Difraktogram XRD Nanoselulosa variasi H ₂ SO ₄ 5%	63
25. FESEM Nanoselulosa (a) <i>Raw</i> TKKS perbesaran 1.000×. (b) Selulosa A1 perbesaran 1.000×. (c) Selulosa B2 perbesaran 1.000×. (d) Nanoselulosa 5% perbesaran 10.000×. (e) Nanoselulosa 10% perbesaran 10.000×. (f) Nanoselulosa 15% perbesaran 10.000×.....	66

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Komponen Penyusun Tandan Kosong Kelapa Sawit.....	7
2. Unsur-Unsur dalam Limbah Sawit.....	7
3. Kisaran Hasil Hemiselulosa dari Berbagai Sumber Lignoselulosa.....	11
4. Karakteristik Puncak Serapan Gugus Fungsional	18
5. Kadar Selulosa dan Kadar Lignin Hasil Isolasi TKKS	34
6. Daerah serapan inframerah TKKS dan Selulosa.....	38
7. Daerah serapan inframerah TKKS dan Selulosa.....	40
8. Nilai Difraktogram pada Selulosa dan Nanoselulosa.....	41
9. Volume Titrasi Blanko dan Titrasi Pulp	60
10. Nilai Difraktogram pada Nanoselulosa Variasi 5%	63
11. Data Puncak Kristal Nanoselulosa 5%.....	64
12. Data Puncak Kristal Nanoselulosa 10%.....	64
13. Data Puncak Kristal Nanoselulosa 15%.....	64
14. Data Nilai Diameter Nanoselulosa 10%	64
15. Data Nilai Diameter Nanoselulosa 15%	65

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Indonesia sebagai negeri khatulistiwa, menjadi negara yang sebagian besar penduduknya bekerja di sektor pertanian dan perkebunan. Dari berbagai macam hasil pertanian dan perkebunan, kelapa sawit berhasil mengantarkan Indonesia ke peringkat pertama penghasil komoditas tersebut (Horas *et al.*, 2021). Kelapa sawit menjadi tanaman perkebunan yang memiliki peranan penting dalam bidang pertanian di Indonesia (Ariyanti *et al.*, 2023). Indonesia menjadi produsen minyak kelapa sawit terbesar di dunia dan industrinya telah menjadi andalan dalam perekonomian Indonesia, karena kelapa sawit menjadi salah satu sumber penghasil devisa dari ekspor sektor pertanian. Menurut Indonesia *Oil Palm Statistics* 2022, Indonesia menghasilkan sekitar 50,03 juta ton *Crude Palm Oil* (CPO) dengan luas areal panen sebesar 13,5 juta hektar. Tandan kosong kelapa sawit (TKKS) menjadi salah satu limbah yang dihasilkan dari pengolahan tandan buah segar menjadi minyak sawit dan kernel (Hidayatulloh *et al.*, 2021). Limbah TKKS di Indonesia berdasarkan data Kementerian Perindustrian RI pada tahun 2023, mencapai 51 juta ton. Oleh karenanya, banyak penelitian yang dilakukan berfokus pada konversi limbah biomassa tandan kosong kelapa sawit (Rezki *et al.*, 2023).

Limbah padat tandan kosong kelapa sawit (TKKS) banyak mengandung lignoselulosa (selulosa, hemiselulosa, dan lignin) dengan persentase selulosa 41,3-46,5%, hemiselulosa 25,3-33,8%, dan lignin 27,6-32,5% sebagai komponen penyusun dinding sel pada TKKS (Han *et al.*, 2011). Dengan persentase selulosa yang terkandung dalam tandan kosong kelapa sawit (TKKS) sebesar 45,95% dan kandungan serat mencapai 72,67%, karenanya tandan kosong kelapa sawit (TKKS) potensial untuk menjadi *raw material* yang diambil selulosanya dan diteliti (Cahyaningtyas *et al.*, 2020). Hemiselulosa bersama lignin membalut serta

menyatukan serat-serat selulosa (Bahri, 2015). Selulosa tergolong ke dalam senyawa organik yang paling banyak melimpah di alam. Selulosa menjadi komponen utama dalam biomassa lignoselulosa yang terutama terlokalisasi di dinding sel tanaman sekitar 35-50% dan dapat diperoleh melalui proses ekstraksi dari berbagai sumber, seperti pada limbah tandan kosong kelapa sawit (Handayani, 2020). Bobot molekul selulosa alamiah sukar diukur, dikarenakan degradasi yang terjadi selama isolasi. Panjang rantainya berbeda-beda dari jenis tumbuhan yang berbeda. Selulosa termasuk senyawa polisakarida yang mempunyai rumus empiris $(C_6H_{10}O_5)_n$, dimana n memiliki nilai berkisar dari 2000 sampai 3000 (Bahri, 2015). Selulosa sendiri terdiri dari unit-unit monomer D-Glucopyranose yang terikat oleh ikatan β -1-4 glikosidik (Hussein, 2017). Jumlah gugus hidroksil yang tinggi pada selulosa, membuat molekul selulosa mudah untuk membentuk ikatan hidrogen intermolekuler maupun intramolekuler. Selulosa memiliki daerah kristal dengan ikatan hidrogen yang lebih sedikit, yang disusun secara bergantian (Kusumawati *et al.*, 2023). Berdasarkan jenis ikatannya, selulosa dibedakan menjadi tiga jenis, diantaranya α -selulosa, β -selulosa dan γ -selulosa (Poejiadi *et al.*, 2007). Selulosa dapat dipisahkan dari hemiselulosa dan lignin agar pemanfaatan selulosa dapat optimal, dengan menggunakan pelarut asam atau basa. Proses ini mencakup isolasi α -selulosa yang melibatkan tahap delignifikasi untuk melarutkan lignin, serta proses *bleaching* untuk memurnikan serat selulosa (Rahayu *et al.*, 2022).

Sejalan dengan kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi, selulosa banyak mengalami modifikasi menjadi material bernilai ekonomi lebih tinggi seperti nanoselulosa. Nanoselulosa tergolong ke dalam bentuk selulosa, dengan ukuran nano yang memiliki kekuatan mekanik yang lebih optimal, rasio permukaan yang besar, daya mengikat air yang tinggi, kekuatan tarik yang tinggi, dan memiliki jaringan yang lebih halus (Evandani, 2012). Nanoselulosa memiliki diameter sekitar 1-100 nm dengan panjang 500-2000 nm (Hertiwi *et al.*, 2024). Nanoselulosa menjadi material yang memiliki potensi besar sebagai bahan penguat polimer dan membran, zat pengental untuk dispersi, serta pada produk biodegradable sebagai zat aditif (Ioelovich, 2012). Sintesis nanoselulosa dapat dilakukan dengan metode kimia dan metode mekanik. Metode kimia yang umum

dilakukan, diantaranya proses hidrolisis asam menggunakan asam kuat (Barkane *et al.*, 2021). Proses hidrolisis asam sendiri menggunakan penambahan larutan asam untuk menghasilkan nanoselulosa dari bahan bakunya. Umumnya, hidrolisis nanoselulosa menggunakan asam kuat. Salah satu larutan asam yang paling efektif dalam proses hidrolisis adalah asam sulfat, karena di dalam beberapa penelitian asam sulfat terbukti mampu menghilangkan daerah amorf dalam proses isolasi nanoselulosa (Hidayatullah *et al.*, 2022). Faktor-faktor yang mempengaruhi morfologi dan karakteristik nanoselulosa yang dihasilkan meliputi sifat asam, konsentrasi asam, suhu, dan waktu reaksi (Deepa *et al.*, 2015). Hidrolisis asam menggunakan konsentrasi asam yang pekat dan dalam waktu yang lama dapat menyebabkan derajat kristalinitas menurun akibat susunan rantai selulosa, sehingga susunan rantai polimer dan selulosa lebih mudah terurai (Beck-Candanedo *et al.*, 2005). Dalam sintesis nanoselulosa, metode hidrolisis asam menjadi metode yang paling banyak dilakukan dalam penelitian karena kemampuan untuk secara efektif memecah daerah amorf selulosa, menghasilkan nanoselulosa dengan ukuran partikel yang lebih kecil (Elizabeth *et al.*, 2024).

Merujuk pada penelitian sebelumnya, telah dilakukan sintesis nanoselulosa dari bahan baku tandan kosong kelapa sawit menggunakan beberapa metode kimia seperti metode hidrolisis asam, metode ultrasonikasi, metode peleburan alkali, metode oksidasi, dan metode dengan menggunakan cairan ionik. Pada prinsipnya, sintesis nanoselulosa berpatokan pada reaksi hidrolisis atau pemutusan (Wulandari *et al.*, 2016). Hidayatullah *et al.* (2022) telah melakukan sintesis nanoselulosa menggunakan metode hidrolisis asam dengan asam sulfat (H_2SO_4) 67%. Penelitian dilakukan pada suhu 40 °C dengan variasi waktu 10, 20, 30, dan 40 menit, diperoleh nanoselulosa berukuran 13,34-35,28 nm. Fatah *et al.* (2014) juga telah melakukan penelitian menggunakan metode hidrolisis asam dengan asam sulfat (H_2SO_4) konsentrasi 30%. Pada suhu 60 °C dengan waktu 2 jam, dihasilkan nanoselulosa berukuran 5-10 nm. Penelitian menggunakan hidrolisis asam juga dilakukan oleh Burhani dan Septevani (2018) dengan konsentrasi H_2SO_4 97%, waktu 3,5 jam, dan suhu 50°C. Nanoselulosa yang diperoleh berukuran 8–23 nm.

Atakhanov *et al.* (2019) telah melakukan pengamatan isolasi nanoselulosa dari selulosa kapas berdasarkan pengamatan waktu reaksi hidrolisis selulosa dengan pemanasan dan ultrasonikasi. Selulosa dihidrolisis dengan menambahkan asam sulfat 61% rasio 1:10 (g/mL), pada suhu 25-45°C dengan lama reaksi 0,5-2 jam. Kemudian dilanjutkan ultrasonikasi selama 10 menit. Berdasarkan hasil yang dinformasikan, waktu reaksi 40-45°C menjadi waktu yang optimum, dengan memperoleh nanokristal selulosa (NC) memiliki panjang 50-300 nm dan ukuran diameter 10-40 nm, serta memiliki kristalinitas 81%. Pembuatan nanoselulosa dengan reaksi alkali dilakukan oleh Raju *et al.* (2023), menggunakan natrium hidroksida (NaOH) pada suhu tinggi 165-170°C. Nanoselulosa yang diperoleh berukuran 27,801 nm dan 28,690 nm. Widiastuti dan Marlina (2022) telah melakukan pembuatan nanoselulosa menggunakan metode oksidasi dengan agen pengoksidasi hidrogen peroksida (H₂O₂) 30%, melalui proses hidrolisis asam yang disertai dengan proses mekanik terhadap selulosa dengan asam sulfat 64%, suhu (40±5)°C, dan waktu reaksi 3 jam. Nanoselulosa yang dihasilkan berdiameter ≤ 100 nm. Nugraha *et al.* (2021) menghasilkan nanoselulosa 12,1-25,1 nm, dengan metode oksidasi menggunakan amonium persulfat (APS).

Dalam penelitian ini, akan dilakukan sintesis nanoselulosa dari tandan kosong kelapa sawit (TKKS) melalui metode hidrolisis asam. Asam yang digunakan adalah asam sulfat, dengan variasi konsentrasi asam sebesar 5%, 10%, dan 15%. Setelah diperoleh nanoselulosa, analisis kualitatif dilakukan melalui karakterisasi *Fourier Transform Infra-Red* (FTIR), *X-ray Diffraction* (XRD), *Particle Size Analyzer* (PSA), dan *Field Emission Scanning Electron Microscopy* (FESEM).

1.2. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari Penelitian ini, yaitu:

1. Mengisolasi selulosa dari Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) dengan metode delignifikasi.
2. Mensintesis nanoselulosa dari selulosa melalui metode hidrolisis asam dengan variasi konsentrasi 5%, 10%, dan 15%.

3. Mengetahui konsentrasi optimum dari asam sulfat yang digunakan, pada sintesis nanoselulosa dari selulosa.
4. Mempelajari karakteristik nanoselulosa, dengan uji karakterisasi nanoselulosa menggunakan FTIR, XRD, PSA (uji tambahan), dan FESEM.

1.3. Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini, mampu mengoptimalkan limbah biomassa dengan memanfaatkan limbah padat tandan kosong kelapa sawit (TKKS), menjadi bahan baku utama pembuatan nanoselulosa dari selulosa.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Limbah Kelapa Sawit

Minyak kelapa sawit dibuat sebagai produk utama dan juga terdapat limbah sebagai produk sampingan dalam proses pengolahan kelapa sawit. Limbah cair dan padat menjadi limbah yang dihasilkan dalam proses pengolahan kelapa sawit. Limbah cair kelapa sawit merupakan produk akhir berupa liquid dari proses pengolahan tandan buah segar (Nugraha *et al.*, 2021). Sementara itu, limbah padat kelapa sawit menjadi produk utama berupa padatan yang dihasilkan dari proses pengolahan. Sebagai hasil sampingan dari proses pengolahan kelapa sawit, limbah padat terdiri dari fiber, tandan kosong, cangkang, solid, dan abu boiler. Limbah ini harus dikelola dengan benar untuk mengurangi dampak negatifnya terhadap lingkungan. Beberapa di antaranya dapat diolah lebih lanjut untuk mendapatkan nilai tambahan atau digunakan untuk berbagai kegunaan (Rum *et al.*, 2024). Limbah padat tandan kosong kelapa sawit (TKKS) menjadi limbah yang cukup banyak dihasilkan dari pengolahan tandan buah segar (TBS).

2.2. Tandan Kosong Kelapa Sawit

Tandan kosong kelapa sawit (TKKS) merupakan kumpulan serat yang tertinggal setelah memisahkan buah dari tandan buah segar yang telah disterilkan. Tandan kosong kelapa sawit menjadi limbah dengan kandungan lignoselulosa yang belum banyak dioptimalkan (Yoricya *et al.*, 2016). Dalam mikrofibril tandan kosong kelapa sawit (TKKS) terdapat selulosa, lignin, dan hemiselulosa sebagai komponen utama (Susi *et al.*, 2023). Komposisi kimia tandan kosong kelapa sawit ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Komponen Penyusun Tandan Kosong Kelapa Sawit

Komposisi	Konsentrasi (%)
Lignin	21,27 - 36,68
Selulosa	35,66 – 57,75
Hemiselulosa	6,61 – 15,96
Kadar air	8,56
Tanin, alkaloid, dll	4,19

(Susi *et al.*, 2023).

2.2.1. Pemanfaatan Tandan Kosong Kelapa Sawit

Tandan kosong kelapa sawit (TKKS) adalah salah satu limbah utama yang dihasilkan dari industri pengolahan kelapa sawit. TKKS merupakan sisa dari proses pemisahan buah sawit dari tandannya untuk diambil minyaknya. Dalam jumlah yang sangat besar, TKKS menjadi limbah padat yang signifikan dan harus dikelola dengan baik untuk mengurangi dampak lingkungan. Selain TKKS, industri kelapa sawit juga menghasilkan limbah lain, seperti cangkang sawit dan batang sawit, yang semuanya memiliki kandungan bahan organik dan unsur kimia yang serupa. Kandungan unsur-unsur ini menjadikan limbah kelapa sawit, potensial untuk digunakan terutama di perkebunan kelapa sawit itu sendiri. Unsur-unsur tersebut disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Unsur-Unsur dalam Limbah Sawit

No.	Limbah Kelapa Sawit Bobot Kering/ha Tanaman	Bobot dalam Kg/ha Tanaman				
		N	P	K	Mg	Ca
1.	Batang sawit	368,2	3,5	527,4	82,3	166,4
2.	Pelepah	150,1	13,9	193,9	24	35,7
3.	Pangkasan sawit	107,9	10	139,4	17,2	25,6
4.	Serat buah sawit	5,2	1,3	7,6	2	1,8
5.	Cangkang sawit	3	0,1	0,8	0,2	0,2

(Ditjen PPHP, 2020).

Unsur-unsur dalam TKKS dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan. Pemanfaatan TKKS sebagai karbon aktif dapat meningkatkan nilai ekonomis limbah industri kelapa sawit serta berfungsi sebagai alternatif untuk mengurangi konsentrasi logam berat di lingkungan perairan. Proses preparasi karbon aktif dari TKKS dilakukan melalui tahap karbonisasi pada suhu 700°C. Aktivasi dilakukan dengan merendamnya dalam larutan ZnCl₂ 50% selama 48 jam, kemudian dipanaskan pada suhu 700°C selama satu jam. Setelah itu, bahan dicuci dan dikeringkan pada suhu 105°C (Rahmalia *et al.*, 2006).

TKKS dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi listrik. Untuk pembangkit listrik tenaga biomassa skala 4 MW, rata-rata dibutuhkan sekitar 4.100 ton TKKS dan 1.600 ton cangkang per bulan. Proses ini dimulai dengan pengepresan TKKS menggunakan *Fibre Shredder* dan *Agitator Breaker*. Setelah itu, TKKS disimpan di dalam hopper sebelum dibakar di unit boiler tunggal, dan proses ini berlanjut hingga menghasilkan energi listrik (Febijanto, 2011).

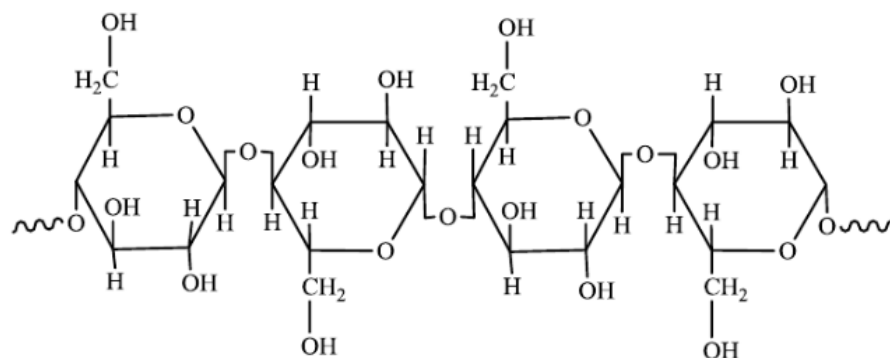
TKKS (tandan kosong kelapa sawit) dapat dimanfaatkan sebagai bahan campuran dalam pembuatan eternit. Berdasarkan uji kekerasan, terlihat bahwa kekerasan eternit meningkat seiring dengan penambahan serat TKKS, namun mulai menurun pada komposisi serat antara 15% hingga 20%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa eternit berbasis serat TKKS memiliki kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan dengan bahan *gypsum* (Tarkono dan Hadi, 2015).

2.3. Selulosa

Selulosa tergolong ke dalam jenis polisakarida yang paling dominan, yang berperan sebagai komponen utama dalam struktur penyusun hampir semua tumbuhan. Selulosa terbentuk dari monomer-monomer glukosa.

Rantai polimer pada glukosa tersusun oleh unit D-anhydroglucopyranose dan dihubungkan oleh ikatan β -1-4 glikosidik dengan rumus molekul (C₆H₁₀O₅)_n, yang menyebabkan rantai polimer selulosa cenderung linear (Moon *et al.*, 2011). Agregat rantai glukosa linier dapat membentuk mikrofibril yang kuat.

Daerah amorf menunjukkan ikatan internal yang lebih lemah, sedangkan daerah kristalin menunjukkan ikatan internal yang kuat (Collins *et al.*, 2019). Sifat-sifat dari selulosa dipengaruhi oleh Derajat Polimerisasi (DP), yang merupakan jumlah unit glukosa yang terhubung dalam rantai polimer selulosa. Nilai DP sangat dipengaruhi oleh sumber selulosanya. Tingginya jumlah gugus hidroksil (-OH) pada kerangka cincin glukosa sendiri merupakan faktor penyebab terjadinya ikatan hidrogen antara rantai selulosa (Navarro *et al.*, 2019). DP yang lebih tinggi sering kali berkaitan dengan kristalinitas yang lebih tinggi, yang membuat selulosa menjadi lebih kaku dan kurang mudah larut dalam pelarut. Oleh karena itu, struktur selulosa dengan DP yang tinggi menjadi lebih teratur, kaku, dan lebih sulit larut, sementara DP yang rendah menghasilkan struktur yang lebih amorf dan lebih mudah larut. Struktur selulosa dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Struktur Selulosa (Mulyadi, 2019).

Penyusunan serat-serat selulosa menghasilkan daerah kristalin (bila molekul selulosa tersusun teratur) dan amorf (bila tidak teratur). Perbandingan daerah kristalin dengan daerah amorf dari selulosa sangat bervariasi. Daerah kristalin dalam selulosa berkisar antara 50-70% (Shaghaleh *et al.*, 2018). Berdasarkan jenis ikatan penyusun serat selulosa dan derajat polimerisasi dalam NaOH 17,5%, selulosa dapat dibagi atas tiga jenis, diantaranya :

1. α -Selulosa (*Alpha Cellulose*) adalah selulosa berantai panjang yang tidak larut dalam larutan natrium hidroksida 17,5% atau larutan basa kuat, dengan derajat polimerisasi antara 600-1500. α -selulosa berfungsi sebagai indikator

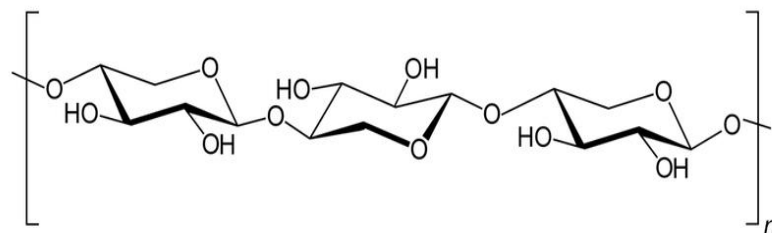
kemurnian selulosa. Semakin tinggi kandungan α -selulosa, semakin baik kualitas materialnya

2. Selulosa β (*Beta Cellulose*) adalah selulosa dengan rantai pendek yang larut dalam larutan natrium hidroksida 17,5% atau larutan basa kuat, dengan derajat polimerisasi antara 15-90, dapat mengendap bila dinetralkan.
3. Selulosa γ (*Gamma Cellulose*) adalah fraksi selulosa yang tidak mengendap melalui proses netralisasi dan larut dalam larutan alkali dengan kepekatan tertentu. Gamma Selulosa (γ -selulosa) memiliki derajat polimerisasi kurang dari 15, menjadikannya kurang stabil secara struktural dibandingkan dengan α -selulosa dan β -selulosa.

(Umar, 2019).

2.4. Hemiselulosa

Hemiselulosa adalah polisakarida yang berada bersama dengan selulosa di dinding sel primer dan sekunder pada semua tanaman tingkat tinggi, dengan fungsi sebagai cadangan makanan (Sorieul *et al.*, 2016). Hemiselulosa berbeda dari selulosa, karena hemiselulosa tersusun atas rantai unit mono-gula yang lebih pendek dibandingkan dengan selulosa. Monomer gula yang menyusun hemiselulosa, terbagi menjadi kelompok seperti pentosa (5 karbon), heksosa (6 karbon), asam heksuronat, dan deoksi-heksosa. Heksosa terdiri dari D-galaktosa, D-glukosa, dan D-manosa. Sedangkan pentosa terdiri dari D-xylose dan L-arabinosa (Shinde *et al.*, 2022). Rata-rata derajat polimerisasi (DP) yang dimiliki hemiselulosa berkisar antara 80-200 (Chen, 2015). Struktur hemiselulosa ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Struktur Hemiselulosa (Bakker, 2010).

Hemiselulosa tergolong dalam serat yang tidak larut dalam air, sehingga perlu dihidrolisis untuk mendegradasinya. Hemiselulosa dihidrolisis pada suhu yang lebih rendah daripada selulosa, kelarutannya meningkat seiring dengan suhu (Bakker, 2010). Aldo-keto reduktase (AKR) adalah salah satu dari banyak mekanisme yang melibatkan enzim yang memungkinkan oksidasi hemiselulosa. Proses ini menghasilkan senyawa aldo dan keto, yang dibentuk oleh perubahan pada struktur karbonil (Kratzer *et al.*, 2006). Rantai molekul hemiselulosa lebih pendek dan bercabang, mengakibatkan hemiselulosa akan mengalami reaksi oksidasi dan degradasi lebih cepat daripada selulosa (Fengel dan Wenger, 1989).

Rantai utama dan samping hemiselulosa memiliki banyak gugus hidroksil bebas, yang merupakan lokasi ideal untuk modifikasi kimia. Melalui perlakuan modifikasi, sifat fisikokimia hemiselulosa, seperti berat molekul, kristalinitas, kelarutan, tegangan permukaan, bioaktivitas, dan stabilitas termal dapat diubah (Rao *et al.*, 2023). Hemiselulosa bersumber dari tumbuh-tumbuhan yang tertera pada Tabel 3.

Tabel 3. Kisaran Hasil Hemiselulosa dari Berbagai Sumber Lignoselulosa

Sumber Lignoselulosa	Kisaran Hasil Hemiselulosa (Berat Kering)
Rumput	20–35%
Kayu keras	25–35%
Kayu lunak	18–35%
Jerami	23–36%
Bambu	24–34%
Batok kelapa	22–28%
Serpihan kayu dan serbuk gergaji	15–35%

(Díez *et al.*, 2020)

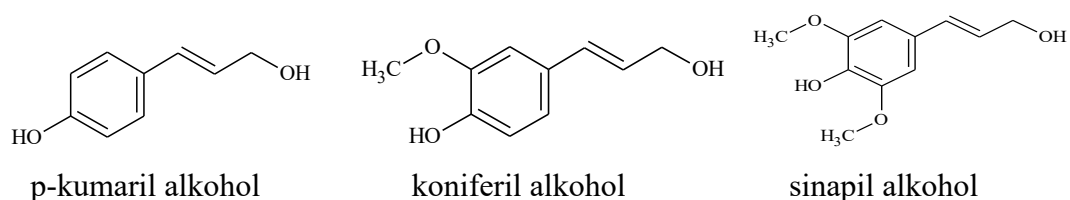
2.5. Lignin

Lignin adalah makromolekul *amorf* dan polifenol alami dengan struktur tiga dimensi yang kompleks yang ditemukan di dinding sel tanaman, yang terkait dengan selulosa dan berbagai polisakarida (Shorey *et al.*, 2024). Meskipun

tersusun atas karbon, hidrogen, dan oksida, tetapi lignin bukanlah suatu karbohidrat (Bahri, 2015). Lignin merupakan polimer kompleks dengan berat molekul tinggi, yang tersusun dari unit-unit fenilpropana. Monomer pada unit fenilpropana lignin membentuk struktur yang *amorf*. Adanya sifat amorf pada lignin, membuatnya sulit untuk ditentukan secara fisik dan bentuk molekulnya (Fengel dan Wenger, 1989).

Lignin dapat membentuk ikatan kovalen dengan berbagai bagian hemiselulosa, membuatnya sulit untuk diuraikan. Akibatnya, lignin membuat struktur lignoselulosa yang kompleks dan menghambat proses degradasi selulosa oleh mikroba atau bahan kimia lainnya (Octavia, 2016). Lignin sulit diuraikan, sehingga pada proses hidrolisis, baik dalam konversi biomassa menjadi gula sederhana maupun dalam produksi bioetanol, menjadi kurang efisien.

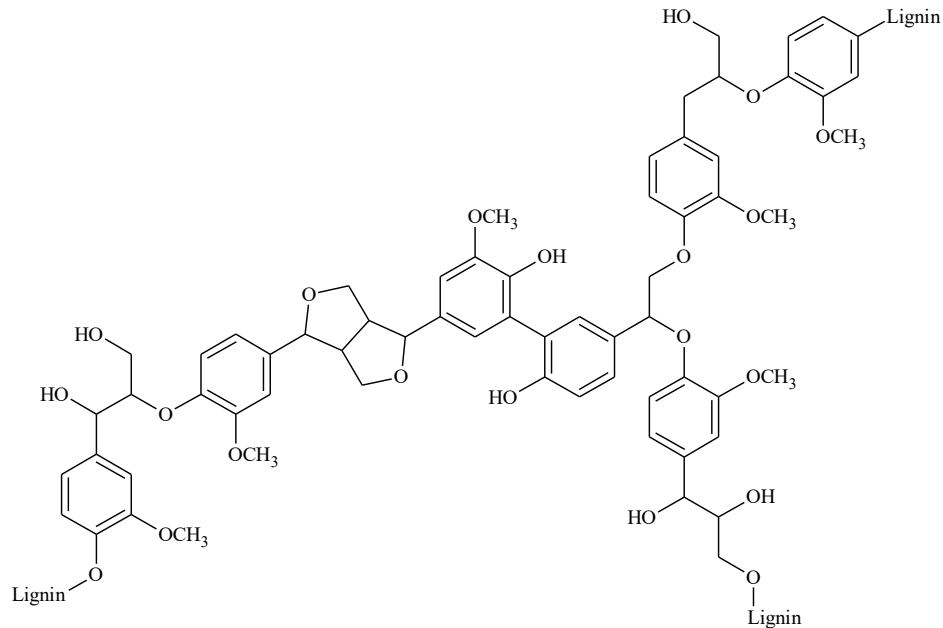
Lignin memiliki komponen struktural yang sangat keras dan kuat, hal ini yang menyebabkan lignin dapat menghalangi proses hidrolisis. Dalam proses hidrolisis, enzim mencoba memecah selulosa dan hemiselulosa untuk menghasilkan gula sederhana atau bahan lain, tetapi lignin menghalangi enzim dari mencapai serat selulosa (Wu *et al.*, 2023). Jumlah lignin yang terdapat dalam tumbuhan yang berbeda sangat bervariasi. Struktur monomer-monomer yang menyusunnya pun berbeda-beda bergantung dari mana sumber lignin tersebut (Risanto *et al.*, 2014). Struktur monomer penyusun lignin disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Struktur Monomer Penyusun Lignin (Chio *et al.*, 2019).

Lignin bersifat reaktif karena mengandung gugus fungsional seperti hidroksil, metoksil, karbonil, dan fenil propan. Lignin bebas tidak larut dalam air, asam mineral kuat, maupun dalam hidrokarbon (Karlinasari, 2010) Polimer lignin sulit terdegradasi menjadi monomer-monomernya, karena lignin mengalami kesulitan untuk kembali ke bentuk dasarnya. Ikatan aril alkil dan ikatan eter pada lignin

menghalangi selulosa, sehingga membuatnya tahan terhadap proses hidrolisis. Senyawa lignin dapat mengalami perubahan struktur pada suhu yang tinggi (Lempang, 2016). Struktur lignin disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Struktur Lignin

2.6. Nanoselulosa

Nanoselulosa adalah bentuk selulosa yang memiliki ukuran nano, yaitu berada pada skala nanometer (Ioelovich, 2012). Nanoselulosa memiliki diameter 1-100 nm dengan panjang 500-2000 nm (Ningtyas *et al.*, 2020). Nanoselulosa terbagi menjadi dua bentuk utama, yaitu selulosa nanokristal (CNC) dan selulosa nanofibril (NFC). CNC merupakan nanoselulosa dengan struktur kristalin, sementara NFC terdiri dari serat-serat halus. Nanoselulosa dapat diekstraksi dari berbagai sumber tumbuhan, seperti kayu, jerami, kulit nanas, dan limbah biomassa seperti tandan kosong kelapa sawit (TKKS).

Nanoselulosa banyak digunakan untuk membuat bahan transparan optik, bahan penguat polimer, bahan biomimetik, sensor, dan perangkat pengumpul. Nanoselulosa memiliki kekuatan mekanik yang sangat baik, menjadikannya optimal untuk meningkatkan kekuatan material polimer. Nanoselulosa memiliki

banyak sifat yang membedakannya dari selulosa alami, termasuk sifat terbarukan, kemampuan terurai secara biologis, kompatibilitas dengan organisme hidup, kekuatan, luas permukaan yang besar, rasio aspek yang tinggi, stabilitas dimensional, dan stabilitas termal hingga sekitar 200°C (Duan dan Yu, 2016).

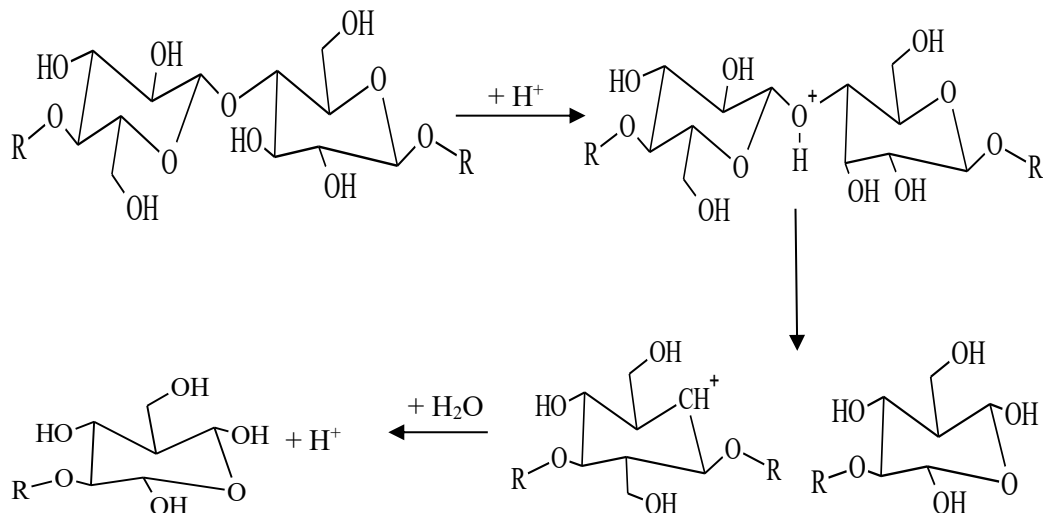
2.6.1. Sintesis Nanoselulosa

Berbagai penelitian tentang nanoselulosa telah dilakukan menggunakan beragam metode penelitian. Salah satunya adalah pendekatan yang dilakukan oleh Gautam dan Kumar Walia (2024). Sintesis nanoselulosa dari α -selulosa melibatkan empat tahap diantaranya, hidrolisis asam, sentrifuse, ultrasonikasi, dan *freeze drying*. Pada tahap hidrolisis asam, selulosa yang disintesis dimasukkan ke dalam 50 mL larutan H_2SO_4 secara bertahap dengan konsentrasi 60%, kemudian diaduk selama satu jam pada suhu kamar. Setelah hidrolisis dan menambahkan 500 mL air, endapan disentrifugasi dan dicuci hingga pH netral. Suspensi yang dihasilkan dari sentrifugasi dilanjutkan dengan proses sonikasi dan diikuti dengan proses *freeze drying* untuk mendapatkan kristal nanoselulosa (CNC).

Menetralkan larutan yang dihasilkan dari hidrolisis asam dengan aquades, dilakukan dengan tujuan untuk menghentikan reaksi hidrolisis yang disebabkan oleh asam. Hal ini dapat mengurangi jumlah asam yang berlebihan dan mencegah nanoselulosa yang dihasilkan rusak. Penetralkan juga penting untuk memastikan pH larutan kembali ke kondisi netral atau hampir netral, agar endapan hasil hidrolisis stabil untuk proses selanjutnya. Hidrolisis asam menjadi metode yang paling umum digunakan dalam produksi nanoselulosa. Proses ini melibatkan penggunaan asam, baik dalam bentuk encer maupun pekat, untuk menghidrolisis bagian *amorf* dari selulosa (Kandhola *et al.*, 2020).

Keaktifan asam pekat dalam menghidrolisis selulosa dapat bervariasi tergantung pada jenis dan konsentrasinya, khususnya dalam hal penggunaan asam sulfat. Asam sulfat pekat sangat reaktif dan efektif dalam memecah daerah *amorf* pada selulosa, yaitu bagian yang kurang teratur dalam struktur selulosa. Reaksi

hidrolisis dengan asam sulfat pekat biasanya berlangsung cepat dalam mengubah selulosa menjadi nanoselulosa (Maryam dan Rahmad, 2019). Setelah hidrolisis, larutan perlu dinetralkan untuk menghentikan reaksi. Mekanisme hidrolisis asam dari selulosa disajikan pada Gambar 5.



Gambar 5. Mekanisme Hidrolisis Asam (Sasmal dan Mohanty, 2018).

Tahap sentrifuse bertujuan memisahkan nanoselulosa yang lebih padat dari fase cair larutan asam. Pada tahap selanjutnya yaitu ultrasonikasi, bertujuan untuk mengurangi ukuran partikel nanoselulosa menggunakan gelombang ultrasonik. Pada tahap terakhir yaitu *freeze drying*, bertujuan untuk mengeringkan nanoselulosa dari sisa aquades tanpa menyebabkan kerusakan pada struktur dan sifat-sifatnya.

2.6.2. Penelitian Mengenai Nanoselulosa

Berdasarkan studi sebelumnya, telah dilakukan sintesis nanoselulosa menggunakan metode kimia maupun metode mekanik. Hidayatulloh *et al.* (2021) telah melakukan sintesis nanoselulosa menggunakan metode kimia hidrolisis asam menggunakan asam sulfat 64% selama 45 menit pada suhu 50°C . Nanoselulosa yang dihasilkan berdiameter 86,8 nm dengan rentang distribusi 51,5 - 66,5 nm. Metode kimia dengan cara hidrolisis asam juga telah dilakukan oleh Wulandari *et al.* (2016) saat mensintesis nanoselulosa dari ampas tebu, menggunakan asam

sulfat variasi 60% dan 50% pada suhu 40°C. Selulosa yang diisolasi dari ampas tebu dihidrolisis menggunakan asam sulfat dengan rasio (w/v) 1:25. Suspensi nanoselulosa yang dihasilkan kemudian disentrifugasi pada kecepatan 6500 rpm selama 30 menit. Suspensi nanoselulosa yang telah netral, disonikasi selama 10 menit untuk menghomogenkan nanoselulosa yang terbentuk. Hasil optimum pada penelitian terjadi pada konsentrasi 50%, menghasilkan nanoselulosa berdiameter 111 nm dengan distribusi 95,9 nm dan kristalinitas sebesar 76,01%.

Ultrasonikasi adalah proses perlakuan menggunakan gelombang ultrasonik dengan bantuan perangkat ultrasonikator, yang berfungsi untuk mengurangi ukuran partikel. Durasi ultrasonikasi yang lebih lama menghasilkan nanoselulosa dengan ukuran yang lebih pendek, serta diameter dan ketebalan yang semakin kecil. Sebaliknya, tanpa perlakuan ultrasonikasi, ukuran nanoselulosa tetap lebih pendek, tetapi diameter dan ketebalannya cenderung stabil. Metode mekanik dengan cara ultrasonikasi pun telah dilakukan oleh Maryam dan Rahmad (2019) dalam waktu 60 menit. Nanoselulosa yang diperoleh berukuran 99,99 nm. Maryam dan Rahmad (2019) menyatakan, lama reaksi ultrasonik memberikan ukuran partikel nano yang terbaik. Kombinasi antara metode mekanik ultrasonik dan metode kimia hidrolisis untuk menghasilkan nanoselulosa telah dilaporkan W. Li *et al.* (2012). Nanoselulosa yang diperoleh memiliki panjang 50-90 nm dan diameter 4-10 nm dalam reaksi bertekanan tinggi (207 MPa).

2.6.3. Pemanfaatan Nanoselulosa

Nanoselulosa telah banyak dimanfaatkan di berbagai industri dan aplikasi sehari-hari. Misalnya, nanoselulosa dapat digunakan sebagai pengisi untuk memperkuat polimer, sebagai aditif dalam produksi material biodegradable, penguat membran, pengental untuk dispersi, serta sebagai media pembawa obat (Ioelovich, 2012). Serat TKKS digunakan sebagai bahan penguat dalam komposit dengan variasi konsentrasi asam yang berbeda (Mujianto dan Waloyo, 2023). Asam polilaktik (PLA) ditambahkan dengan nanoselulosa untuk menghasilkan nanokomposit yang berfungsi sebagai bahan aktif anti racun. Penambahan nanoselulosa meningkatkan

sifat penghalang pada polimer komposit yang dihasilkan (Fortunati *et al.*, 2012). Kerangka komposit berbahan nanoselulosa digunakan untuk membuat titania berpori. Material titania ini memiliki luas permukaan yang besar ($170\text{-}200\text{ m}^2/\text{g}$), yang membuatnya cocok digunakan sebagai katalis dan pendukung katalis (Shin dan Exarhos, 2007).

2.7. Uji Karakterisasi

Uji karakterisasi pada penelitian ini, bertujuan untuk mengidentifikasi gugus fungsional melalui teknik FTIR, serta mengamati bentuk dan struktur permukaan nanoselulosa menggunakan mikroskop FESEM.

2.7.1. *Fourier Transform Infra Red (FTIR)*

Fourier Transform Infra Red (FTIR) merupakan salah satu instrumen yang umum digunakan untuk menganalisis vibrasi molekul, yang berguna untuk memprediksi gugus fungsional dan struktur senyawa kimia. Pada ikatan kimia, molekul senyawa organik dapat mengalami berbagai jenis vibrasi, ketika frekuensi radiasi inframerah sama dengan frekuensi vibrasi ikatan. Hal ini menyebabkan molekul mengalami vibrasi yang lebih besar. Hasil penyerapan ini dapat dilihat dalam bentuk spektrum inframerah, dengan frekuensi tertentu yang diserap oleh senyawa di setiap puncak spektrum. Dalam spektroskopi inframerah, satuan yang digunakan adalah bilangan gelombang dinyatakan dalam satuan cm^{-1} .

Rentang bilangan gelombang dalam spektroskopi inframerah berkisar antara 400 cm^{-1} hingga 4000 cm^{-1} . Radiasi inframerah menghasilkan energi yang memicu terjadinya getaran atau vibrasi pada molekul. Frekuensi vibrasi ini berbanding terbalik dengan massa atom, sehingga atom yang lebih berat bergetar pada frekuensi yang lebih rendah (Bruice, 2010). Setiap molekul memiliki gugus fungsional yang berbeda, sehingga setiap senyawa yang mengandung molekul tersebut akan menghasilkan pola vibrasi yang khas dan karakteristik. Karakteristik

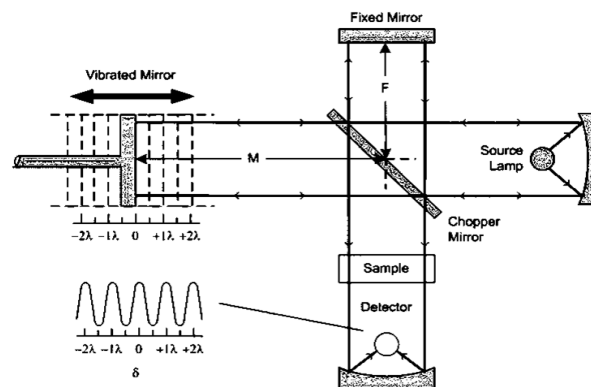
puncak dari beberapa gugus fungsi disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Karakteristik Puncak Serapan Gugus Fungsional

Frekuensi (cm^{-1})	Pita Serapan	Vibrasi
3500-3200	O-H	Ulur
2900	C-H dari (CH_2)	Ulur
1725	C=O	Ulur
1640	O-H dari (H_2O)	Tekuk
1610	COO-	Tekuk
1423	HCH dan OCH	Tekuk
1368	C-H	Tekuk
1314	CH_2	Ayunan
1160	C-O-C asimetri	Ulur
897	C-O-C	Ulur
662	C-OH	Tekuk

(B. Li *et al.*, 2015).

Komponen utama dalam FTIR meliputi laser, interferometer, *beamsplitter*, cermin, sumber cahaya infra merah, dan detektor. Laser digunakan untuk memastikan ketepatan pengukuran, sementara interferometer berfungsi menghasilkan interferensi cahaya. *Beamsplitter* membagi sinar infra merah menjadi dua jalur, yang kemudian dipantulkan oleh cermin. Sinar infra merah yang dihasilkan oleh sumber inframerah diarahkan ke sampel dan kemudian dideteksi oleh detektor untuk menganalisis spektrum yang dihasilkan (Nicolet, 2001). Prinsip kerja alat FTIR dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Prinsip Kerja Alat FTIR (Nicolet, 2001).

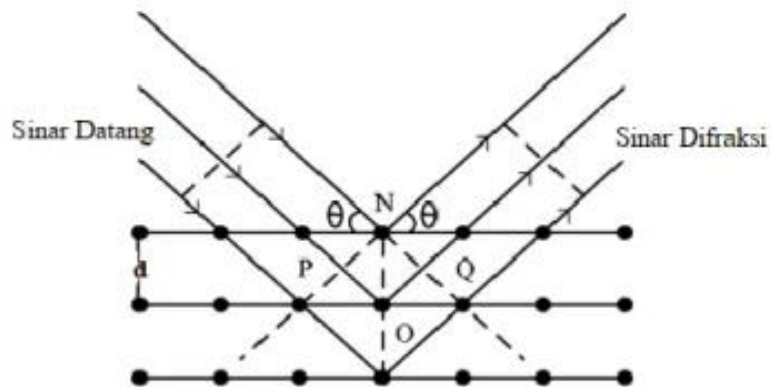
Proses kerja FTIR terdiri dari beberapa tahapan penting. Pertama, energi inframerah dipancarkan oleh sumber *black-body*. Cahaya inframerah tersebut kemudian melewati interferometer, yang bertugas mengodekan spektrum cahaya.

Setelah itu, cahaya diarahkan ke sampel, dimana cahaya mengalami transmisi atau refleksi tergantung pada karakteristik permukaan sampel dan jenis analisis yang diperlukan. Sinyal yang dihasilkan kemudian ditangkap oleh detektor, yang menghitung sinyal interferogram dengan rancangan khusus. Terakhir, data spektral diproses secara digital oleh komputer dan hasil spektrum inframerah ditampilkan untuk interpretasi analisis (Nurul, 2016).

2.7.2. *X-ray Diffraction (XRD)*

X-ray diffraction (XRD) merupakan metode karakterisasi yang berperan dalam mempelajari sifat-sifat kristal, seperti parameter kisi, jenis struktur, susunan atom dalam kristal, struktur kristal, dan tingkat kekristalan. Puncak difraksi yang tajam dan intens dihasilkan oleh kristalinitas yang tinggi, sedangkan puncak difraksi melebar (*amorf*) terjadi pada kristalinitas yang rendah (Khairurrijal, 2009).

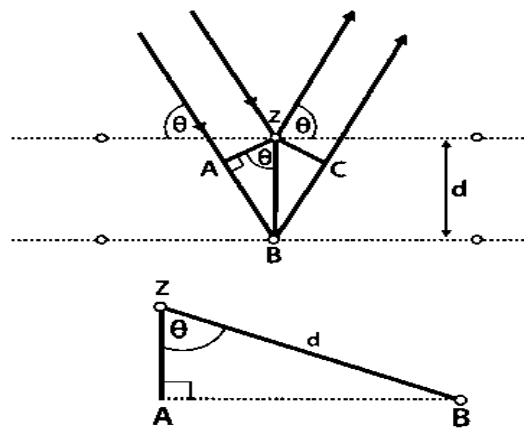
Secara umum, sinar terbentuk melalui percepatan arus listrik atau melalui transisi kuantum partikel dari satu tingkat energi ke tingkat energi lainnya. Sinar-X adalah radiasi elektromagnetik berenergi tinggi, dengan rentang energi sekitar 200 eV hingga 1 MeV. Sinar-X dihasilkan dari interaksi antara berkas elektron eksternal dan elektron pada lapisan atom. Spektrum sinar-X memiliki panjang gelombang 5-10 nm, frekuensi 10^{17} - 10^{20} Hz, dan energi 10^3 - 10^6 eV. Panjang gelombang sinar-X berada pada skala yang setara dengan jarak antar atom, sehingga cocok digunakan sebagai sumber difraksi kristal. Prinsip kerja alat XRD dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Prinsip Kerja Alat XRD

Difraksi terjadi akibat interaksi antara dua atau lebih gelombang. Sinar-X ditembakkan ke sampel padatan kristalin, dan kemudian sinar tersebut didifraksikan ke berbagai arah sesuai dengan Hukum Bragg. Detektor bergerak dengan kecepatan sudut tetap untuk mendeteksi berkas sinar-X yang didifraksikan oleh sampel. Sampel berupa serbuk atau padatan kristalin memiliki bidang kisi yang tersusun acak dengan berbagai orientasi, termasuk partikel-partikel kristal di dalamnya. Setiap kumpulan bidang kisi tersebut memiliki orientasi sudut tertentu, sehingga difraksi sinar-X mengikuti Hukum Bragg.

Pada dasarnya, hukum ini menjelaskan hubungan antara pemotretan sinar-X dan pantulannya dari permukaan kristal. Hukum Bragg menyatakan jika sinar-X mengenai permukaan kristal, sudut datangnya akan dipantulkan dengan sudut hamburan yang sama. Ketika berbeda lintasan, d sama dengan bilangan bulat, nilai n , panjang gelombang, dan interferensi konstruktif akan terjadi. Penurunan persamaan Hukum Bragg, dapat dijelaskan pada Gambar 8.



Gambar 8. Diagram sudut pada Hukum Bragg (Fahlepy, 2022).

Secara tidak langsung, prinsip kerja XRD adalah bahwa jika suatu bidang memiliki bentuk tertentu, partikel cahaya (foton) yang datang dengan sudut tertentu hanya akan menghasilkan pola pantulan atau pembiasan yang khas. Dengan kata lain, foton yang datang pada sudut tertentu terhadap bidang dengan bentuk tertentu tidak akan menghasilkan berbagai pola pantulan atau pembiasan yang berbeda. Kekhasan pola difraksi yang terbentuk inilah yang menjadi dasar dalam analisis kualitatif untuk membedakan satu senyawa dengan senyawa lainnya menggunakan instrumen XRD. Pola unik yang dihasilkan dari setiap difraksi cahaya pada material berfungsi seperti sidik jari, sehingga dapat digunakan untuk mengidentifikasi senyawa yang berbeda (Isnugroho, 2023).

2.7.3. *Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM)*

Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) adalah jenis mikroskop elektron yang memanfaatkan emisi medan pada perangkat *electron gun*.

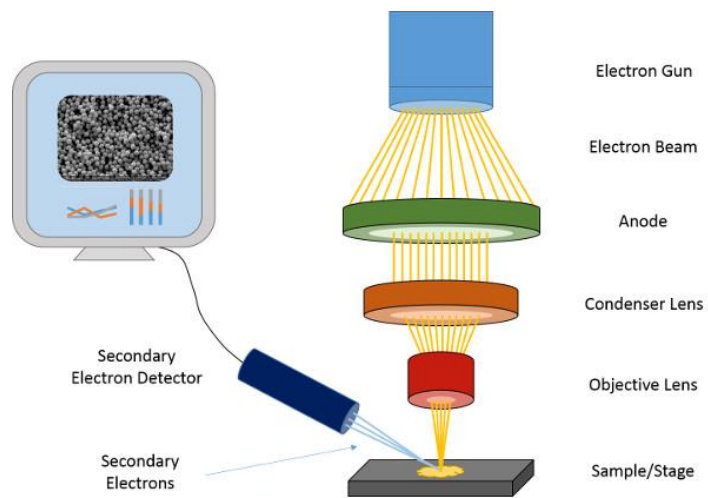
Perbedaan antara *Scanning Electron Microscope (SEM)* dengan *Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM)* adalah pada jenis sumber elektron yang digunakan. SEM menggunakan emiter termionik (*thermionic emitter*) sebagai sumber elektron, yang memerlukan pemanasan untuk menghasilkan elektron, sedangkan FESEM menggunakan emiter bidang (*field emitter*) yang

memproduksi elektron melalui emisi medan, memberikan kontrol yang lebih besar dan densitas aliran elektron yang lebih tinggi. Sumber termionik memiliki tiga kelemahan, diantaranya; kecerahan yang relatif rendah, terjadinya penguapan dari katoda, dan terjadinya konduksi panas selama pengoperasian (Masta, 2020).

Pemanfaatan emiter medan pada *electron gun* dalam FESEM dapat mengatasi tiga kelemahan yang dimiliki emitor termionik. Emitor medan (FE) tidak memerlukan pemanasan filamen, sehingga sering disebut sebagai *cold electron gun*. Emisi elektron terjadi dengan cara menempatkan filamen pada gradien potensial yang tinggi. Dalam FESEM, material yang digunakan untuk filamen adalah tungsten (*W*) yang dirancang dengan ujung runcing berukuran nanoskala (100 nm). Ujung runcing ini dibuat agar medan listrik dapat terkonsentrasi pada tingkat ekstrem, sehingga mencapai nilai yang sangat tinggi dan mengatasi energi ambang, memungkinkan elektron untuk dieksitasi dari filamen (katoda).

Emisi bidang yang dihasilkan oleh FESEM memiliki diameter penampang yang lebih kecil dibandingkan dengan emitor termionik. Hal ini membuat sumber emisi medan yang dihasilkan lebih mudah untuk difokuskan oleh lensa kondensator. Akibatnya, FESEM memiliki distorsi elektrostatik yang minimal dan resolusi yang tinggi (< 2 nm), yang berarti dapat mencapai kualitas hingga enam kali lebih baik dibandingkan SEM. Dengan demikian, FESEM menghasilkan gambar yang lebih jelas daripada SEM (Masta, 2020).

FESEM memiliki kesamaan dengan SEM, yang menawarkan berbagai informasi mengenai permukaan sampel, tetapi dengan resolusi yang lebih tinggi dan rentang energi yang jauh lebih luas. FESEM bekerja dengan cara yang mirip dengan SEM konvensional, yakni berkas elektron yang difokuskan oleh lensa elektromagnetik memindai permukaan spesimen, dimana elektron yang dipantulkan atau berinteraksi membentuk gambar yang menunjukkan permukaan dan topografi sampel. Ilustrasi cara kerja alat FESEM ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Cara Kerja Alat FESEM

III. METODE PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini berlangsung pada bulan Oktober 2024 hingga dengan bulan April 2025 di Laboratorium Hidro Elektro Metalurgi, Pusat Riset Teknologi Pertambangan, Badan Riset dan Inovasi Nasional, yang berlokasi di Jalan Ir. Sutami KM. 15, Kecamatan Tanjung Bintang, Lampung Selatan. Dalam penelitian ini, dilakukan karakterisasi menggunakan *Fourier Transform Infrared* (FTIR), *X-ray Diffraction* (XRD), dan *Field Emission Scanning Electron Microscope* (FESEM) di Laboratorium Karakterisasi Mineral, Pusat Riset Teknologi Pertambangan, Badan Riset dan Inovasi Nasional Tanjung Bintang.

3.2. Alat dan Bahan

3.2.1. Alat

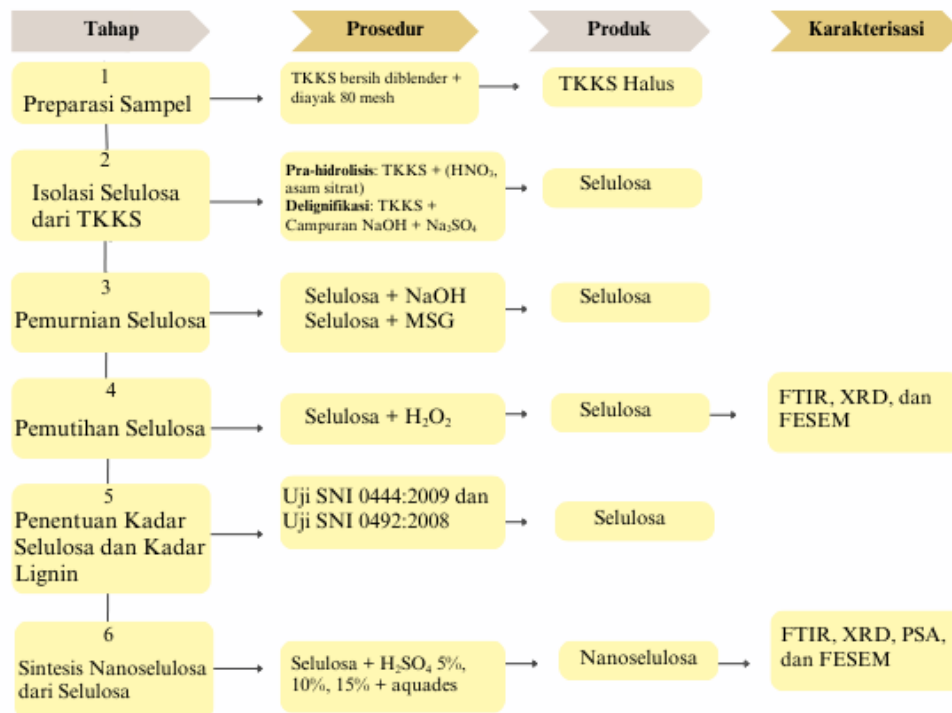
Adapun alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi *blender*, ayakan 80 *mesh*, neraca analitik, labu ukur, gelas beaker, erlenmeyer, pipet volume, mikro pipet, *magnetic stirrer bar*, *hot plate*, batang pengaduk, corong, kertas saring, kaca arloji, tabung *centrifuge*, botol vial, plastik *wrap*, pH indikator, *sieve shaker*, lemari asam, oven, sentrifuse, ultrasonikasi, FTIR, XRD (*X-Ray Diffraction*), dan FESEM (*Field Emission Scanning Electron Microscope*).

3.2.2. Bahan

Sedangkan, bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi tandan kosong kelapa sawit (TKKS), aquades, larutan HNO_3 3,5%, asam sitrat 0,5 M,

NaOH 2%, Na₂SO₄ 2%, NaOH 17,5%, MSG 17,5%, H₂O₂ 10%, larutan FAS 0,1 N, larutan H₂SO₄, indikator ferroin, K₂Cr₂O₇, dan etanol.

3.3. Diagram Alir Penelitian



Gambar 10. Diagram Alir Penelitian

Keterangan :

Sampel A1 : Sampel variasi HNO₃-NaOH

Sampel A2 : Sampel variasi HNO₃-MSG

Sampel B1 : Sampel variasi Asam sitrat-NaOH

Sampel B2 : Sampel variasi Asam sitrat-MSG

3.4. Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian yang digunakan dalam penelitian ini meliputi beberapa tahapan, yaitu preparasi sampel, isolasi selulosa, pemurnian selulosa, penentuan kadar selulosa dan penentuan kadar lignin, dan sintesis nanoselulosa dari selulosa dengan variasi konsentrasi asam.

3.4.1. Preparasi Sampel

Sampel kering tandan kosong kelapa sawit (TKKS) diperoleh dari kebun kelapa sawit PTPN VII di Natar, Lampung Selatan. Langkah awal, TKKS dipotong menjadi satu per empat bagian dan dicuci dengan air mengalir hingga bersih. Selanjutnya, TKKS dijemur di bawah sinar matahari hari hingga kadar airnya benar-benar hilang. Kemudian, TKKS yang telah kering digunting menjadi bagian kecil berkisar 2 cm, lalu dihaluskan dengan *blender* dan diayak menggunakan ayakan 80 mesh agar diperoleh serat yang lebih halus.

3.4.2. Proses Isolasi Selulosa dari Tandan Kosong Kelapa Sawit

Pada tahap ini, digunakan 2 jenis pelarut asam yakni HNO_3 3,5% dan asam sitrat 0,5 M. Pada percobaan menggunakan pelarut HNO_3 3,5%, TKKS yang telah diayak, ditimbang beratnya sebesar 100 g. TKKS yang telah ditimbang sebesar 100 g, dimasukkan ke dalam gelas beaker, kemudian ditambahkan HNO_3 3,5% dengan rasio (w/v) 1:20 (g/mL) sebanyak 2 L, lalu dipanaskan di atas *hot plate* pada suhu 90°C selama 2 jam dengan kecepatan 200 rpm. Setelah itu, dilakukan penyaringan sampel dan sampel dibilas hingga filtrat netral. Sampel yang telah netral, lalu dikeringkan dan ditimbang. Selanjutnya, sampel direfluks dengan 700 mL campuran NaOH 2% dan Na_2SO_4 2% pada suhu 50°C selama 1 jam. Kemudian, dilakukan penyaringan sampel dan dibilas sampel dengan aquades hingga filtrat mencapai pH netral. Sampel yang telah netral, dilakukan pengeringan dan ditimbang massanya.

Pada percobaan menggunakan pelarut asam sitrat 0,5 M, TKKS yang telah diayak, ditimbang beratnya sebesar 100 g. TKKS yang telah ditimbang sebesar 100 g, dimasukkan ke dalam gelas beaker, kemudian ditambahkan asam sitrat 0,5 M dengan rasio (w/v) 1:20 (g/mL) sebesar 2 L, lalu dipanaskan di atas *hot plate* pada suhu 90°C selama 2 jam dengan kecepatan 200 rpm. Setelah itu, dilakukan penyaringan sampel dan sampel dibilas hingga filtrat netral. Sampel yang telah

netral, lalu dikeringkan dan ditimbang. Selanjutnya, sampel direfluks dengan 700 mL campuran NaOH 2% dan Na₂SO₄ 2% pada suhu 50°C selama 1 jam. Kemudian, dilakukan penyaringan sampel dan dibilas sampel dengan aquades hingga filtrat mencapai pH netral. Sampel yang telah netral, dilakukan pengeringan dan ditimbang massanya.

3.4.3. Proses Pemurnian Selulosa

Pemurnian selulosa dilakukan dengan menggunakan larutan yang terdiri dari pelarut organik dan anorganik. Sampel yang telah dikeringkan, selanjutnya ditimbang dan dibagi menjadi dua bagian. Masing-masing sampel dilarutkan dalam masing-masing 500 mL larutan NaOH 17,5% untuk anorganik dan 500 mL larutan MSG 17,5% untuk organik. Proses pemurnian ini dilakukan di atas *hot plate* pada suhu 80°C selama 30 menit. Kemudian, dilakukan penyaringan sampel dan dibilas sampel dengan aquades hingga filtrat mencapai pH netral. Sampel yang telah netral, dilakukan pengeringan dan ditimbang massanya.

3.4.4. Proses Pemutihan Selulosa

Sampel yang telah dimurnikan dalam larutan anorganik NaOH 17,5% dan larutan organik MSG 17,5%, selanjutnya dilakukan pemutihan menggunakan 300 mL agen pemutih hidrogen peroksida (H₂O₂) dengan konsentrasi 10%. Pemutihan selulosa menggunakan H₂O₂ 10% dilakukan di atas *hot plate* pada suhu 60°C selama 1 jam dengan kecepatan 200 rpm. Setelah itu, dilakukan penyaringan sampel dan dibilas sampel dengan aquades hingga filtrat mencapai pH netral. Sampel yang telah netral, dilakukan pengeringan dan ditimbang massanya.

3.4.5. Penentuan Kadar Selulosa dengan Uji SNI 0444:2009 dan Penentuan Kadar Lignin dengan Uji SNI 0492:2008

Penentuan kadar selulosa dilakukan dengan menimbang semua sampel yang telah dilakukan proses pemutihan, sebesar 1,5 g. Selanjutnya, sampel dimasukkan ke dalam gelas beaker dan ditambahkan 75 mL larutan NaOH 17,5% pada suhu 25°C dan mencatat waktu saat larutan NaOH ditambahkan. Setelah itu, sampel diaduk perlahan hingga terdispersi dengan sempurna. Selama proses pengadukan, diperhatikan sampel agar tidak terjadi gelembung udara dalam suspensi pulp.

Setelah itu, ditambahkan 25 mL larutan NaOH 17,5% ke dalam gelas beaker yang berisi sampel hingga volume total mencapai 100 mL. Selanjutnya, suspensi pulp diaduk dengan batang pengaduk dan dipanaskan dalam air pada suhu 25°C. Setelah 30 menit dari penambahan 25 mL larutan NaOH 17,5%, lalu ditambahkan 100 mL aquades dan campuran tersebut diaduk kembali menggunakan batang pengaduk dan dipanaskan pada suhu 25°C selama 30 menit, sehingga total waktu proses seluruhnya sekitar 60 menit. Suspensi yang dihasilkan kemudian disaring di kertas saring untuk memperoleh filtrat.

Sebanyak 10 mL hingga 20 mL filtrat pertama dibuang, kemudian kumpulkan filtrat sekitar 100 mL ke dalam botol vial yang bersih. Suspensi yang dihasilkan jangan dibilas atau dicuci dengan aquades, untuk mencegah terbentuknya gelembung pada suspensi di kertas saring. Selanjutnya, 25 mL filtrat dipipet dan tambahkan 10 mL larutan $K_2Cr_2O_7$ 0,5 N ke dalam labu 250 mL. Kemudian, tambahkan campuran dengan 50 mL H_2SO_4 pekat sambil menggoyang labu agar homogen di dalam lemari asam. Campuran dipanaskan selama 15 menit pada suhu 125°C, lalu ditambahkan 50 mL aquades dan dinginkan hingga campuran mencapai suhu ruang.

Langkah berikutnya, sampel ditambahkan dengan 2 hingga 4 tetes indikator ferroin, kemudian dititrasi menggunakan larutan ferro ammonium sulfat 0,1 N hingga mencapai warna ungu. Pada sampel dengan tingkat kelarutan pulp yang tinggi, kandungan selulosa bernilai rendah. Jika titrasi balik dikromat kurang dari

10 mL, volume filtrat dikurangi menjadi 10 mL dan penambahan H₂SO₄ menjadi 30 mL. Lakukan titrasi blanko dengan mengganti filtrat pulp sebanyak 12,5 mL, larutan NaOH 17,5% 12,5 mL, dan aquades 12,5 mL. Hasil analisis dibandingkan dan ditentukan berdasarkan kondisi yang paling optimum dengan menggunakan rumus berikut:

$$X = 100 - \frac{6,85 (V_1 - V_2) \times N \times 20}{A \times W}$$

Dimana:

X = kadar selulosa (%);

V₁ = volume titrasi blanko (mL);

V₂ = volume titrasi filtrat pulp (mL);

N = normalitas larutan ferro ammonium sulfat (N);

A = volume filtrat pulp yang dianalisa (mL);

W = berat kering oven contoh uji pulp (g).

Untuk menentukan kadar lignin, metode yang digunakan adalah SNI 0492:2008. Langkah pertama, 1 g sampel ditimbang dan dimasukkan ke dalam gelas beaker, kemudian ditambahkan 15 mL H₂SO₄ 72%. Larutan tersebut diaduk selama 2-3 menit, ditutup dengan kaca arloji dan didiamkan pada bak perendam dengan suhu ruang selama 2 jam, sambil sekali-kali diaduk. Setelah itu, campuran ditambahkan dengan 560 mL aquades dan direfluks selama 4 jam. Kemudian, campuran didinginkan dan dibiarkan selama 24 jam agar lignin mengendap dengan sempurna. Sampel kemudian disaring menggunakan kertas saring yang telah dioven dan diketahui beratnya di atas corong gelas. Selanjutnya, endapan bersama kertas saring dikeringkan dalam oven pada suhu 100°C dan ditimbang. Untuk mengetahui jumlah atau bobot lignin yang terkandung dalam sampel, digunakan rumus sebagai berikut:

$$L = \frac{A}{B} \times 100\%$$

Keterangan:

A = Endapan Lignin (g);

B = Berat Sampel (g).

3.4.6. Sintesis Nanoselulosa dari Selulosa Menggunakan Metode Hidrolisis Asam

Sebanyak 5 g sampel selulosa, dihidrolisis menggunakan 100 mL H₂SO₄ dengan variasi konsentrasi 5%, 10%, dan 15% (v/v), selama 5 jam pada suhu 50°C sambil sekali-kali diaduk. Setelah itu, ditambah 100 mL aquades dan didinginkan.

Campuran kemudian disentrifugasi pada kecepatan 12.000 rpm selama 15 menit, sambil terus dibilas dengan aquades. Selanjutnya, suspensi koloid diultrasonikasi selama 5 menit dalam *ice bath*. Kemudian sampel dikeringkan untuk menghilangkan kadar airnya menggunakan oven (*hot drying*).

3.4.7. Analisis FTIR

Analisis menggunakan FTIR dilakukan dengan meratakan sampel serbuk di atas detektor. Sampel tersebut dimasukkan ke dalam instrumen FTIR untuk dianalisis pada rentang panjang gelombang 4000–400 cm⁻¹.

3.4.8. Analisis XRD

Karakterisasi XRD (*X-Ray Diffraction*) digunakan untuk menentukan indeks kristalinitas dan ukuran kristal seperti yang dijelaskan oleh Salman Ali (2020).

Indeks kristalinitas diketahui melalui % kristalinitas, yang dapat ditentukan

dengan rumus $\frac{\text{Fraksi luas kristal}}{\text{Fraksi luas kristal} + \text{Fraksi luas amorf}} \times 100 \%$, sedangkan ukuran kristal

ditentukan dengan rumus $D_{hkl} = k\lambda / (B_{hkl} \cos \Theta)$.

Uraian:

D_{hkl} = ukuran kristal;

k = konstanta Scherrer (0,84);

λ = panjang gelombang *X-Ray*;

B_{hkl} = refleksi hkl yang diukur pada 2Θ .

3.4.9. Analisis FESEM

Analisis FESEM dilakukan dengan membekukan sampel yang telah diekstraksi dengan etanol, di atas permukaan aluminium foil hingga kering. Setelah itu, sampel diletakkan menggunakan pita konduktif karbon (*carbon tape*). *Stub* kemudian diletakkan di dalam ruang pelapisan. Sampel dilapisi dengan emas (*gold coating*), kemudian atom-atom emas akan ditembakkan pada permukaan sampel dengan waktu pelapisan selama 30–120 detik. Kemudian, hasil analisis ditampilkan menggunakan perangkat *stereoscan*.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan bahwa:

1. Isolasi selulosa dari tandan kosong kelapa sawit (TKKS) mencapai hasil optimal pada selulosa A1, menghasilkan selulosa sebesar 96,9%.
2. Karakterisasi nanoselulosa dari TKKS menggunakan FTIR menunjukkan kemurnian nanoselulosa optimal terdapat pada nanoselulosa 15%, ditunjukkan dengan bertambahnya daerah kristalin melalui pergeseran bilangan gelombang gugus O-H dan C-H pada nanoselulosa 15%.
3. Analisis XRD menunjukkan kristalinitas tertinggi pada nanoselulosa 15%, dengan indeks kristalin mencapai 86%.
4. Analisis FESEM menunjukkan morfologi nanoselulosa 15% yang optimal, dengan diameter serat berkisar antara 173-550 nm.
5. Hasil optimum nanoselulosa terdapat pada variasi konsentrasi H_2SO_4 15%, ditunjukkan melalui analisis FTIR, XRD, dan FESEM.

5.2. Saran

Adapun saran yang dapat dikembangkan dalam penelitian berikutnya adalah sebagai berikut:

1. Untuk mengoptimalkan pelepasan lignin dan mengubah warna pada selulosa menjadi lebih terang, perlu digunakan penambahan suhu pemutihan dan penambahan konsentrasi H_2O_2 sebagai mutu perbandingan.
2. Penggunaan H_2SO_4 dengan konsentrasi di bawah 15% menghasilkan nanoselulosa yang memiliki ukuran partikel lebih besar dan kurang mendekati ukuran nano ideal (< 100 nm). Oleh karena itu, disarankan untuk

meningkatkan konsentrasi H_2SO_4 yang digunakan.

3. Untuk mengoptimalkan pengurangan kadar air nanoselulosa setelah proses hidrolisis asam, disarankan juga menggunakan metode *freeze drying* untuk menjaga struktur serat lebih homogen dan menjaga warna sampel setelah proses hidrolisis, serta sebagai pembanding dengan metode *hot drying* (oven).

DAFTAR PUSTAKA

- Amirudin, S., Tamrin, dan Rejeki, S. 2024. Metode Sintesis Nanoselulosa: Kajian Pustaka. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Pangan*. 2(1): 89–96.
- Andari, I. G. A. A. U., Arnata, I. W., dan Dewi Anggreni, A. A. M. 2022. Pengaruh Konsentrasi Hidrogen Peroksida dan Waktu Proses Bleaching terhadap Karakteristik Selulosa Serat Sabut Kelapa (*Cocos nucifera* L.) *Jurnal Rekayasa dan Manajemen Agroindustri*. 10(3): 237-247.
- Ariyanti, M., Rosniawaty, S., dan Farah Nadiyah. 2023. Pengaruh Aplikasi *Bacillus sp.* dan Kompos Tandan Kosong Kelapa Sawit terhadap Pertumbuhan Bibit Kelapa Sawit. *Jurnal Agrikultura*. 2023(2): 306–314.
- Atakhanov, A., Turdikulov, I., Mamadiyrov, B., Abdullaeva, N., Nurgaliev, I., Khaydar, Y., and Rashidova, S. 2019. Isolation of Nanocellulose from Cotton Cellulose and Computer Modeling of Its Structure. *Journal of Polymer Chemistry*. 9(4): 117–129.
- Badan Pusat Statistik, 2022. *Indonesian Oil Palm Statistics*.
- Bahri, S. 2015. Pembuatan Pulp dari Batang Pisang. *Jurnal Teknologi Kimia Unimal*. 4(2).
- Bakker, R. R. 2010. *Literature Review of Physical and Chemical Pretreatment Processes for Lignocellulosic Biomass*.
- Barkane, A., Kampe, E., Platnieks, O., and Gaidukovs, S. 2021. Cellulose nanocrystals vs. Cellulose nanofibers: A Comparative Study Of Reinforcing Effects In Uv-Cured Vegetable Oil Nanocomposites. *Nanomaterials Journal*. 11(7).
- Beck-Candanedo, S., Roman, M., and Gray, D. G. 2005. Effect of Reaction Conditions on the Properties and Behavior of Wood Cellulose Nanocrystal Suspensions. *Biomacromolecules*. 6(2): 1048–1054.
- Bruice, P. Y. 2010. *Prentice-Hall International*.
- Cahyaningtyas, A. A., Amalia, B., Yuanita, E., Karima, R., Mailisa, T., dan Jati, B. N. 2020. Pengaruh Hidrolisis Menggunakan Asam Sulfat Pada Karakteristik Micro-Fibrillated Cellulose (MFC) dari Serat Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) sebagai agen Nukleasi. *Jurnal Litbang Industri*. 10(1): 1.

- Chen, H. 2015. *Lignocellulose Biorefinery Engineering*. 37-86.
- Chio, C., Sain, M., and Qin, W. 2019. Lignin Utilization: A review of Lignin Depolymerization from Various Aspects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 107: 232–249.
- Collins, M. N., Nechifor, M., Tanasa, F., Zanoaga, M., Mcloughlin, A., Strozyk, A., Culebras, M., Teaca, C. A., and Strozyk, M. A. 2019. Valorization of Lignin in Polymer and Composite Systems for Advanced: A Review. *International Journal of Biological Macromolecules*. 131.
- Deepa, B., Abraham, E., Cordeiro, N., Mozetic, M., Mathew, A. P., Oksman, K., Faria, M., Thomas, S., and Pothan, L. A. 2015. Utilization of Various Lignocellulosic Biomass for the Production of Nanocellulose: A Comparative Study. *Cellulose*. 22(2):1075–1090.
- Díez, D., Urueña, A., Pinero, R., Barrio, A., and Tamminen, T. 2020. Determination of Hemicellulose, Cellulose, and Lignin Content Different Types of Biomasses by Thermogravimetric Analysis and Pseudocomponent Kinetic Model. *Processes Journal*. 8(9).
- Ditjen PPHP. 2020. *Pedoman Pengolahan Limbah Industri Kelapa Sawit*. Departemen Pertanian. Jakarta.
- Dong, S., Revol, J.-F., and Gray, D. G. 1998. *Effect of chemical treatments on the structure and properties of cellulose crystallites*. *Cellulose*. 5(1): 19–32.
- Duan, L. dan Yu, W. 2016. *Review of Recent Research in Nano Cellulose Preparation and Application From Jute Fibers*.
- Effendi, F., Elvia, R., & Amir, H. (2018). Preparasi dan Karakterisasi Mikrokristalin Selulosa (MCC) Berbahan Baku Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS). *Jurnal Pendidikan dan Ilmu Kimia*. 2(1): 52–57.
- Elizabeth, L., Abdulloh, S. H., Nurrahmayani, A., Mulyani, S., Cahyono, M. Y. M., and Hidayatulloh, I. 2024. Nanocellulose Synthesis by One Pot Method With Fe Catalyst And Gelatine Capping Agent. *Journal of Oil Palm Research*. 36(2): 288–299.
- Evandani, N. (2012). *Sintesis Nanoselulosa dari Tongkol Jagung dengan Perlakuan Hidrolisis Kimia dan Homogenisasi*. Skripsi.
- Fahlepy, M. R. 2022. Hukum Bragg: Defenisi, Persamaan, dan Penerapannya dalam XRD. Diakses Pada Tanggal 8 Oktober 2024.

- Fatah, I. Y. A., Abdul Khalil, H. P. S., Hossain, M. S., Aziz, A. A., Davoudpour, Y., Dungani, R., and Bhat, A. 2014. Exploration of a Chemo-Mechanical Technique for the Isolation of Nanofibrillated Cellulosic Fiber from Oil Palm Empty Fruit Bunch as a Reinforcing Agent in Composites Materials. *Polymers*. 6(10): 2611–2624.
- Fauziyyah, A. H. A., Krisdayanti, S., Suwandi, L. A. C., Irsyada, M. Z., Faizin, M. N., Hastuti, N., and Rengga, W. D. P. 2024. Synthesis and Characterization of Cellulose Acetate from Oil Palm Empty Fruit Bunches (OPEFB) as Membrane Material. *E3S Web of Conferences*, 576, 06010.
- Febijanto, I. 2012. Kajian Teknis dan Keekonomian Pembangkit Listrik Tenaga Biomasa Sawit; Kasus: Di Pabrik Kelapa Sawit Pinang Tinggi, Sei Bahar, Jambi. *Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology*. 2(1): 11-22.
- Fengel, D., Wegener, G., Jojo, H. S., dan Prawirohatmodjo, S. 1989. *Kayu: kimia, ultrastruktur, reaksi-reaksi*. Gajah Madah Universiti Press.
- Fortunati, E., Peltzer, M., Armentano, I., Torre, L., Jiménez, A., and Kenny, J. M. 2012. Effects of Modified Cellulose Nanocrystals on the Barrier and Migration Properties of PLA Nano-Biocomposites. *Carbohydrate polymers*. 90(2): 948-956.
- Gautam, D. and Kumar Walia, Y. 2024. *Synthesis and Characterization of Cellulose Nanocrystals from Alkali-Pretreated Parthenium hysterophorus with Adsorption Kinetic Studies*.
- Handayani, N. 2020. Nanokomposit Ramah Lingkungan Melalui Isolasi Nanofibril Selulosa (NFS) dari Tandan Kosong Sawit dan Poly Lactid Acid (PLA) Sebagai Matrik. *Journal of Science and Technology Jurusan Teknik Kimia Politeknik Negeri Lhokseumawe*. 18(2).
- Hertiwi, L. R., Aminudin, M. R., and Sanjaya, I. G. M. 2024. Utilization of Nanocellulose from Red Onion Skins as Nanofiller in Polyvinyl Alcohol-Based Film. *Jurnal Kimia Sains Dan Aplikasi*. 27(1): 14–20.
- Hidayatulloh, I., Widyanti, E. M., Kusumawati, E., and Elizabeth, L. Nanocellulose Production from Empty Palm Oil Fruit Bunches (EPOFB) Using Hydrolysis Followed by Freeze Drying. *ASEAN Journal of Chemical Engineering*. 21(1): 52-61.
- Hidayatullah, I., Maria Widyanti, E., Aztaris, C., Melanitria, A., dan Elizabeth, L. 2022. Kajian Pustaka Sintesis Nanoselulosa Dari Tandan Kosong Kelapa Sawit sebagai Filler Pembuatan Tisu Toilet. *Jurnal Fliuda Volume*. 15(1): 51-59.
- Horas, J., Purba, V., dan Sipayung, T. 2021. *Palm Oil Agribusiness Strategic Policy Institute (PASPI)*.

- Hussein, N. (2017). *International Journal of Energy and Environment (IJEE)*.
- Ioelovich, M. (2012). Optimal Conditions for Isolation of Nanocrystalline Cellulose Particles. *Nanoscience and Nanotechnology*. 2(2): 9–13.
- Isnugroho, K. 2023. *Sintesis dan Karakteristik Foam Glass-Ceramic Berbahan Baku Limbah Padat Abu Terbang Batubara, Limbah Kaca dan Batuan Basal*. Tesis.
- Kandhola, G., Djioleu, A., Rajan, K., Labbe, N., Sakon, J., Carrier, D. J., and Kim, J. W. 2020. Maximizing Production of Cellulose Nanocrystals and Nanofibers from Pre-Extracted loblolly Pine Kraft Pulp: A Response Surface Approach. *Bioresources and Bioprocessing*. 7(1).
- Karlinasari, L. 2010. *Kajian Sifat Anatomi dan Kimia Kayu Kaitannya dengan Sifat Akustik Kayu Study of Anatomic and Mechanical Properties of Wood Relation with Acoustical Properties*.
- Khairurrijal, K. (2009). *Review: Karakterisasi Nanomaterial*.
- Kinney, T.J., Masiello, C.A., Dugan, B., Hockaday, W.C., Dean, M.R., Zygourakis, K., and Barnes, R.T. 2012. Hydrologic Properties of Biochars Produced at Different Temperatures. *Biomass and Bioenergy*. 14(1).
- Kratzer, R., Wilson, D. K., and Nidetzky, B. 2006. Catalytic Mechanism and Substrate Selectivity of Aldo-Keto Reductases: Insights from Structure-Function Studies of Candida Tenuis Xylose Reductase. *IUBMB Life*. 58(9): 499–507.
- Kusumawati, E., Hidayatulloh, I., and Elizabeth, L. 2023. Agglomeration Decrement from Nanocellulose Synthesis by adding PVA Capping Agent. *International Journal of Applied Technology Research*. 2023(2).
- Lempong, M. 2016. Pemanfaatan Lignin sebagai Bahan Perekat Kayu. *Buletin Eboni*. 13(2):139-150.
- Lestary, R. A. 2021. Pemutihan Pulp Jerami Padi dengan Hidrogen Peroksida Berbantu Gelombang Mikro: Studi Kinetika dan Optimasi. *Tesis*. Program Studi Magister Teknik Kimia, Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Li, B., Xu, W., Kronlund, D., Maattanen, A., Liu, J., Smatt, J. H., Peltonen, J., Willfor, S., Mu, X., and Xu, C. 2015. Cellulose Nanocrystals Prepared via Formic Acid Hydrolysis. *Carbohydrate Polymers*. 133: 605–612.
- Li, W., Yue, J., and Liu, S. 2012. Preparation of Nanocrystalline Cellulose via Ultrasound and Its Reinforcement Capability For Poly(Vinyl Alcohol) Composites. *Ultrasonics Sonochemistry*. 19(3): 479–485.

- Lidbrand, I. 2024. High Sulphidity Pulping Process an Alternative to The Kraft Pulping Process. *Journal The faculty of health, science and technology*: 15-23.
- Maryam, dan Rahmad, D. 2019. Synthesis of Nano Bacterial Cellulose Using Acid Hydrolysis-Ultrasonication Treatment. *Journal of Physics: Conference Series*. 1185(1).
- Maulidanti, N. N., Nurdin, A. M., Luthfiyah, A. F., dan Senania, A. 2024. Pengaruh Konsentrasi Asam Sulfat pada Sintesis Nanokristal Selulosa Bonggol Jagung (*Zea mays*). *Jurnal Penelitian Saintek*. 29(1): 27-28.
- Masta, N. 2020. *Buku Materi Pembelajaran Scanning Electron Microscopy*.
- Moon, R. J., Martini, A., Nairn, J., Simonsen, J., and Youngblood, J. 2011. Cellulose Nanomaterials Review: Structure, Properties and Nanocomposites. *Chemical Society Reviews*. 40(7): 3941–3994.
- Mujianto, A. dan Waloyo, H. T. 2023. Manufaktur Studi Kelayakan Serat Tandan Kosong Kelapa Sawit Sebagai Penguat Komposit Untuk Aplikasi Lambung Kapal. *Jurnal Teknologi Manufaktur*. 15(1): 75-80.
- Nafisah, A. R., Rahmawati, D., and Tarmidzi, F. M. 2022. Synthesis of Cellulose Nanofiber from Palm Oil Empty Fruit Bunches Using Acid Hydrolysis Method. In *Indonesian Journal of Chemical Science*. 11(3): 233-238.
- Navarro, D. M. D. L., Abelilla, J. J., and Stein, H. H. 2019. Structures and Characteristics of Carbohydrates in Diets Fed to Pigs: A review. *Journal of Animal Science and Biotechnology*. 10(1). BioMed Central Ltd.
- Neenu K.V., Midhun Dominic C.D., Begum PMS, Parameswaranpillai J., Kanoth B.P., David D.A., Sajadi S.M., Dhanyasree P., Ajithkumar T.G., and Badawi M. 2022. Effect of Oxalic Acid And Sulphuric Acid Hydrolysis On The Preparation And Properties Of Pineapple Pomace Derived Cellulose Nanofibers And Nanopapers. *Journal Biol Macromol*. 12(1): 8-14.
- Nicolet, T. and All, C. 2001. Introduction to Fourier Transform Infrared Spectrometry. *Thermo Nicolet Corporation*.
- Ningtyas, K. R., Muslihudin, M., and Sari, I. N., 2020. Synthesis of Nanoselulosa from Agricultural Waste Using Variation Acid Concentration. *Jurnal Penelitian Pertanian Terapan*, 20(2): 142–147.
- Nurul, T. 2016. *Pengaruh Konsentrasi NaOH Pada Karakterisasi α -Selulosa dari Tandan Kosong Sawit (TKS)*. Skripsi.
- Nugraha, A. B., Nuruddin, A., dan Sunendar, B. 2021. Isolasi Nanoselulosa Terkarsilasi dari Limbah Kulit Pisang Ambon Lumut dengan Metode Oksidasi. *Journal of Science and Applicative Technology*. 5(1): 236.

- Octavia, S. 2016. Pengurangan Kadar Lignin Pada Biomassa Lignoselulosik Menggunakan Urea Untuk Meningkatkan Perolehan Glukosa Bahan Mentah Bioetanol. *Jurnal Katalisator*. 1(1).
- Poejiadi,A., Supriyanti, T., dan Soemodimedjo, P. 2007. *Dasar-Dasar Biokimia*. UI-Press.
- Poletto, M., Ornaghi Júnior, H. L., and Zattera, A. J. 2014. Native cellulose: Structure, characterization and thermal properties. *Materials*. 7(9): 6105–6119.
- Rahayu, A., Hanum, F. F., Amrillah, N. A. Z., Lim, L. W., and Salamah, S. 2022. Cellulose Extraction from Coconut Coir with Alkaline Delignification Process. *Journal of Fibers and Polymer Composites*. 1(2): 106–116.
- Rahayu, D.P. 2021. *Analisis Kadar Air dan Abu, Serta Komponen Kimia Pada Sampel Batang Pisang Dengan Variasi Waktu Hidrolisis*. Skripsi.
- Rahmalia, W., Yulistira, F., Ningrum, J., Qurbaniah, M., dan Ismadi, M. 2009. Pemanfaatan Potensi Tandan Kosong Kelapa Sawit (*Elaeis guineensis* Jacq) sebagai Bahan Dasar C-Aktif untuk Adsorpsi Logam Perak dalam Larutan. *PKMP*.
- Raju, V., Revathiswaran, R., Subramanian, K. S., Parthiban, K. T., Chandrakumar, K., Anoop, E. V., dan Chirayil, C. J. 2023. Isolation and characterization of nanocellulose from selected hardwoods, viz., *Eucalyptus tereticornis* Sm. and *Casuarina equisetifolia* L., by steam explosion method. *Scientific Reports*. 13(1).
- Rao, J., Lv, Z., Chen, G., and Peng, F. 2023. Hemicellulose: Structure, chemical modification, and application. *Progress in Polymer Science*. 140: 101675.
- Rezki, A. S., Wulandari, Y. R., Alvita, L. R., and Sari, N. P. 2023. Potential of Empty Fruit Bunches (EFB) Waste as Bioenergy to Produce Bio-Oil using Pyrolysis Method: Temperature Effects. *Rekayasa Bahan Alam Dan Energi Berkelanjutan*. 7(1): 22–29.
- Risanto, L., Hermiati, E., and Sudiyani, Y. 2014. Properties of Lignin from Oil Palm Empty Fruit Bunch and Its Application for Plywood Adhesive. *Makara Journal of Technology*. 18(2): 67.
- Rum, A., Fachira, N., Suwayya, A., Gultom, K., Faizah, M., Syahrani, P., dan Aidha, Z. 2024. Pemanfaatan Limbah Padat Kelapa Sawit di PTPN X: *Journal of Health and Medical Research*. 4(3): 317–325.
- Salman Ali, A. 2020. Application of Nanomaterials in Environmental Improvement. *Nanotechnology and the Environment*. IntechOpen.

- Sasmal, S., and Mohanty, K. 2018. *Pretreatment of Lignocellulosic Biomass Toward Biofuel Production*. 203–221.
- Shaghaleh, H., Xu, X., and Wang, S. 2018. Current Progress in Production of Biopolymeric Materials Based on Cellulose, Cellulose Nanofibers, and Cellulose Derivatives. *RSC Advances*. 8(2):. 825–842.
- Shin, Y. and Exarhos, G. J. 2007. Template synthesis of porous titania using cellulose nanocrystals. *Materials Letters*. 61(11-12): 2594-2597.
- Shinde, R., Shahi, D. K., Mahapatra, P., Naik, S. K., Thombare, N., and Singh, A. K. 2022. Potential of Lignocellulose Degrading Microorganisms for Agricultural Residue Decomposition in Soil: A review. *Journal of Environmental Management*. 320(1).
- Shorey, R., Salaghi, A., Fatehi, P., and Mekonnen, T. H. 2024. Valorization of Lignin for Advanced Material Applications: A Review. *RSC Sustainability* 2(4): 804–831.
- Sorieul, M., Dickson, A., Hill, S. J., and Pearson, H. 2016. Plant Fibre: Molecular Structure and Biomechanical Properties, of a Complex Living Material, Influencing Its Deconstruction Towards a Biobased Composite. *Materials*. 9(8).
- Sukadana, I. M. 2021. Aktivitas Antibakteri Senyawa Flavonoid Dari Kulit Akar Awar-Awar (*Ficus septica* Burm F). *JCHEM*. 41(1); 63-67.
- Sri Redjeki, A., Ilmar Ramadhan, A., Meta Sari, A., Hidayati Fithriyah, N., Rahardja, I., Salsabila, M., dan Rahmawati Suryani. 2024. Pemanfaatan Limbah Kelapa Sawit menjadi Nanoselulosa dengan Variasi Waktu Ultrasonikasi. *Jurnal LPPM UMJ*.
- Stefanus Batu, M., Magdalena Kolo, M., and Rika, F. 2024. Synthesis of Cellulose Acetate From Coil Waste (*Borassus flabellifer* L) Using Delignification Time Variations. *Jurnal Sains Dan Terapan Kimia*. 6(2): 63–70.
- Sumarago, E. C., Dela Cerna, M. F. M., Leyson, A. K. B., Tan, N. P. B., and Magsico, K. F. 2024. Production and Characterization of Nanocellulose from Maguey (*Agave cantala*) Fiber. *Polymers*. 16(10).
- Sumiati, T., Yuningtyas, S., Haloho, L. E. B. 2023. Delignifikasi Lignoselulosa Daun Nanas (*Ananas Comosus* (L) Merr) untuk Produksi Alfa Selulosa. *Pharmamedica Journal*. 8(2): 130-136.
- Susi, S., Ainuri, M., Wagiman, W., and Falah, M. A. F. 2023. High-Yield Alpha-Cellulose from Oil Palm Empty Fruit Bunches by Optimizing Thermochemical Delignification Processes for Use as Microcrystalline Cellulose. *International Journal of Biomaterials*.

- Tarkono, T. dan Hadi, A. H. A. 2015. Similarity: Pengaruh Penambahan Serat Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) Terhadap Sifat Mekanik Eternit yang Ramah Lingkungan.
- Umar, S. T. 2019. *Pemanfaatan Serat Rami untuk Pembuatan Selulosa*. Datinlitbang–BPP Kemenham RI.
- Ulfah, A. A., Hidayat, M., Cahyono, R. B., and Ariyanto, T. 2024. The Oxidation of Nanocellulose from Oil Palm Empty Fruit Bunch (OPEFB). *ASEAN Journal of Chemical Engineering*. 24(3): 328–341.
- Widiastuti, E. dan Marlina. 2022. Optimasi Pembuatan Nanoselulosa dari Rumpun Alang-Alang. *Jurnal Fluida Volume*. 13(2): 59-64.
- Wu, W., Li, P., Huang, L., Wei, Y., Li, J., Zhang, L., and Jin, Y. 2023. The Role of Lignin Structure on Cellulase Adsorption and Enzymatic Hydrolysis. *Biomass (Switzerland.)* 3(1): 96–107. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI).
- Wulandari, W. T., Rochliadi, A., and Arcana, I. M. 2016. Nanocellulose Prepared by Acid Hydrolysis of Isolated Cellulose from Sugarcane Bagasse. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 107(1).
- Yoricya, G., Aisyah, S., Dalimunthe, P., Manurung, R., dan Bangun, N. 2016. Hidrolisis Hasil Delignifikasi Tandan Kosong Kelapa Sawit Dalam Sistem Cairan Ionik Choline Chloride. *Jurnal Teknik Kimia USU*. 5(1).
- Yuni Hendrawati, T., Umar, E., Ilmar Ramadhan, A., Meta Sari, A., Salsabila, M., Suryani, R., dan Budhi Rahardja, I. 2023. Sintesis dan Karakterisasi Nanoselulosa Serbuk dari Tandan Kosong Kelapa Sawit Menggunakan Ultrasonifikasi. *Jurnal Teknologi UMJ*. 15(1): 162-163.