

**SINTESIS DAN KARAKTERISASI KOMPOSIT *BEADS*
NANOSELULOSA BERBASIS LIMBAH TANDAN KOSONG KELAPA
SAWIT (*Elaeis guineensis Jacq*) SEBAGAI ADSORBEN METHYLENE
BLUE**

Skripsi

**Untuk memenuhi sebagian persyaratan
Mencapai derajat Sarjana S-1
Program studi Kimia**



**Oleh:
Wiwin Arfanudin
22106030021**

**STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA**

2026

HALAMAN JUDUL

**SINTESIS DAN KARAKTERISASI KOMPOSIT *BEADS*
NANOSELULOSA BERBASIS LIMBAH TANDAN KOSONG KELAPA
SAWIT (*Elaeis guineensis Jacq*) SEBAGAI ADSORBEN METHYLENE
BLUE**

Skripsi

**Untuk memenuhi sebagian persyaratan
Mencapai derajat Sarjana S-1
Program studi Kimia**

Oleh:

**Wiwini Arfanudin
22106030021**

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

PROGRAM STUDI KIMIA

FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI

UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA

YOGYAKARTA

2026

HALAMAN PENGESAHAN



KEMENTERIAN AGAMA
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI

Jl. Marsda Adisucipto Telp. (0274) 540971 Fax. (0274) 519739 Yogyakarta 55281

PENGESAHAN TUGAS AKHIR

Nomor : B-960/Un.02/DST/PP.00.9/05/2026

Tugas Akhir dengan judul : Sintesis dan Karakterisasi Komposit Beads Nanoselulosa Berbasis Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit (*Elaeis guineensis* Jacq) sebagai Adsorben Methylene Blue

yang dipersiapkan dan disusun oleh:

Nama : WIWIN ARFANUDIN
Nomor Induk Mahasiswa : 22106030021
Telah diujikan pada : Kamis, 07 Mei 2026
Nilai ujian Tugas Akhir : A

dinyatakan telah diterima oleh Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta

TIM UJIAN TUGAS AKHIR



Ketua Sidang

Dr. Imelda Fajriati, M.Si.
SIGNED

Valid ID: 6a0e57c4556d1



Penguji I

Dr. Hobilah, S.Si., M.Si.
SIGNED

Valid ID: 6a0e648c14d13



Penguji II

Prof. Dr. Maya Rahmayanti, S.Si. M.Si.
SIGNED

Valid ID: 6a0e6aa7e98c9



Yogyakarta, 07 Mei 2026
UIN Sunan Kalijaga
Dekan Fakultas Sains dan Teknologi

Prof. Dr. Dra. Hj. Khurul Wardani, M.Si.
SIGNED

Valid ID: 6a13e94457909

HALAMAN PERNYATAAN KEASLIAN

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Yang bertandatangan di bawah ini :

Nama : Wiwin Arfanudin
Nomor Induk Mahasiswa : 22106030021
Program Studi : S-1 Kimia
Fakultas : Sains dan Teknologi

Menyatakan bahwa skripsi yang berjudul *Sintesis dan Karakterisasi Komposit Beads Nanoselulosa Berbasis Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit (Elaeis guineensis Jacq)* sebagai Adsorben Methylene Blue merupakan hasil penelitian saya sendiri, tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjana di suatu Perguruan Tinggi, dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Yogyakarta, 30 April 2026



Wiwin Arfanudin
NIM.22106030021

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR



Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga

FM-UINSK-8M-05-03/R1

SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR

Nal : Persetujuan Skripsi/ Tugas Akhir

Lamp : -

Kepada
Yth. Dekan Fakultas Sains dan Teknologi
UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta
Di Yogyakarta

Assalamu'alaikum wa. wa.

Setelah membaca, meneliti, memberikan petunjuk dan mengoreksi serta mengadakan perbaikan seperlunya, maka kami selaku pembimbing berpendapat bahwa skripsi Saudara:

Nama : Wiwin Arfanudin
NIM : 22106030021
Judul Skripsi : Sintesis dan Karakterisasi Komposit *Zeolit Nanopelutusa* Berbasis Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit (*Elaeis guineensis Jacq*) sebagai Adsorben Methylene Blue

sudah dapat diajukan kembali kepada Fakultas Sains dan Teknologi Program Studi kimia UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Strata Satu dalam bidang kimia.

Dengan ini kami berharap agar skripsi/tugas akhir Saudara tersebut di atas dapat segera dimunafkan. Atas perhatiannya kami ucapkan terima kasih.

Yogyakarta,

Pembimbing I

Dr. Imelda Fajriah, M.Si
NIP.19750725290002001

Pembimbing II

Dr. Holidah, S.Si., M.Si
NIP.199102102023212019

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

MOTTO

“Sesungguhnya engkau adalah kumpulan dari hari-harimu. Setiap hari yang berlalu, maka berkurang pula bagian dari dirimu.”

(Hasan al-Basri)

“Janganlah engkau merasa lambatnya terkabul doa membuatmu putus asa, sementara Allah telah menjamin untuk mengabulkannya. Bukan menurut keinginanmu, tetapi menurut kehendak-Nya, dan pada waktu yang Dia tentukan, bukan pada waktu yang engkau inginkan.”

(Ibn ‘Athaiillah al-Iskandari)

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

MADEP, MANTEP, KAREP
(Wiwin Arfanudin)

HALAMAN PERSEMBAHAN



**Skripsi ini penulis
persembahkan untuk Diri
sendiri, Seluruh Keluarga,
Sahabat dan Almamater
Program Studi Kimia UIN
Sunan Kalijaga Yogyakarta**

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirobbilalamin, segala puji dan syukur kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan segala rahmat, taufiq dan hidayah-Nya kepada kita semua, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul “*Sintesis dan Karakterisasi Komposit Beads Nanoselulosa Berbasis Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit (Elaeis guineensis Jacq) sebagai Adsorben Methylene Blue*” dengan tepat waktu. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana Kimia di UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.

Proses penyusunan skripsi ini tentunya melibatkan bantuan serta dukungan dari berbagai pihak, oleh karena itu pada kesempatan kali ini penulis ingin mengucapkan terima kasih. Ucapan terima kasih tersebut secara khusus penulis sampaikan kepada:

1. Ibu Hj. Dr. Khurul Wardati, M.Si. selaku dekan Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.
2. Ibu Prof. Dr. Maya Rahmayanti, M.Si. selaku Ketua Program Studi Kimia yang telah memberikan motivasi serta pengarahan selama masa studi.
3. Ibu Dr. Imelda Fajriati, M.Si. selaku Dosen Pembimbing Skripsi ke-1 yang secara ikhlas dan sabar meluangkan waktunya untuk memberikan motivasi, nasihat, bimbingan, serta dukungan kepada penulis dalam penyusunan skripsi ini.
4. Ibu Dr. Holilah, M.Si. selaku Pembimbing Skripsi ke-2 yang secara ikhlas dan sabar meluangkan waktunya untuk memberikan motivasi, nasihat, bimbingan, serta dukungan kepada penulis dalam penyusunan dan proses penelitian skripsi ini.
5. Bapak Dr. Asranudin, M.Si selaku Pembimbing riset yang secara ikhlas dan sabar meluangkan waktunya untuk memberikan motivasi, nasihat, bimbingan, serta dukungan kepada penulis dalam penyusunan dan proses penelitian skripsi ini.

6. Orang tua dan keluarga yang selalu memberikan dukungan, doa, serta motivasi kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
7. Teman-teman Organisasi HMPS Kimia, DEMA-F, GenBI, komunitas aksarayasemesta dan teman-teman seperjuangan program studi kimia angkatan 2022 atas kebersamaan, semangat, dan bantuannya selama masa studi.
8. Teman-teman di laboratorium penelitian bionanokomposit, laboratorium terpadu biomassa dan bioproduk, Kawasan Sains dan Teknologi (KST) BRIN Cibinong terkhusus Mas Sapto, Mba Nanda, Mba Merdi, Mba Putri, Tria, Zila, Ika, Alvia dan Cindy yang telah membantu dan berdiskusi selama masa penelitian skripsi ini.
9. Seluruh dosen program studi kimia UIN Sunan Kalijaga yang telah memberikan motivasi dan dukungan untuk menyelesaikan skripsi ini.
10. Segenap peneliti dan operator alat karakterisasi di Kawasan Sains dan Teknologi (KST) BRIN Cibinong yang telah membantu proses pengambilan data untuk skripsi ini.
11. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu atas bantuannya dalam penyelesaian skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan skripsi ini masih terdapat banyak kekurangan dan jauh dari kesempurnaan. Maka dari itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun. Penulis juga berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat untuk perkembangan ilmu pengetahuan secara umum dan kimia secara khusus.

Yogyakarta, 27 April 2026

Wiwin Arfanudin

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
HALAMAN PERNYATAAN KEASLIAN	iii
HALAMAN PERSETUJUAN SKRIPSI	iv
HALAMAN MOTTO	v
HALAMAN PERSEMBAHAN	vi
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
GLOSARIUM.....	xv
ABSTRAK	xvii
BAB I.....	1
PENDAHULUAN.....	1
A. Latar Belakang	1
B. Batasan Masalah.....	4
C. Rumusan Masalah	5
D. Tujuan Penelitian.....	5
E. Manfaat Penelitian	6
BAB II	7
TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI	7
A. Tinjauan Pustaka.....	7

B. Landasan Teori.....	11
1. Tandan Kosong Kelapa Sawit.....	11
2. Selulosa	11
3. Nanofiber Selulosa (NCF).....	12
4. Isolasi Selulosa	14
5. Isolasi Selulosa Nanofibril	16
5.1 Oksidasi TEMPO	16
5.2 Ultrasonikasi.....	17
6. <i>Bead</i> Mesopori	17
7. Metylene Blue	18
8. Adsorpsi	19
C. Kerangka Berpikir dan Hipotesis Penelitian	19
BAB III.....	22
METODOLOGI PENELITIAN	22
A. Waktu dan Tempat Penelitian	22
B. Alat-Alat Penelitian.....	22
C. Bahan-Bahan Penelitian	22
D. Cara Kerja Penelitian	22
E. Metode Analisis dan Karakterisasi.....	24
F. Teknik Analisis Data.....	28
BAB IV	29
HASIL DAN PEMBAHASAN	29
A. Isolasi dan Sintesis <i>Beads</i> Nanoselulosa	29
B. Karakteristik Nanoselululosa dan Komposit <i>Beads</i> Nanoselulosa	34
1. Karakteristik Nanoselulosa	34
a. Hasil Karakterisasi FTIR.....	34

b.	Hasil Karakterisasi <i>XRD</i>	36
c.	Hasil Karakterisasi TG-DTG	38
d.	Hasil Karakterisasi <i>SEM</i> dan <i>TEM</i>	40
2.	Karakteristik Komposit <i>Beads</i> Nanoselulosa	43
a.	Hasil Analisis <i>SEM</i>	43
b.	Hasil analisis efek variasi konsentrasi nanoselulosa dalam <i>beads</i>	45
c.	Hasil Studi Adsorpsi.....	47
a.	Penentuan kurva kalibrasi	47
b.	Hasil uji pengaruh waktu terhadap efektivitas adsorpsi	48
c.	Hasil uji pengaruh dosis <i>beads</i> terhadap efektivitas adsorpsi	50
d.	Hasil analisis pengaruh pH terhadap efektivitas adsorpsi	51
e.	Hasil analisis Isoterm adsorpsi	53
BAB V	.....	55
PENUTUP	.....	55
A.	Kesimpulan.....	55
B.	Saran.....	56
DAFTAR PUSTAKA	.....	57
LAMPIRAN	.....	71
DAFTAR RIWAYAT HIDUP	.....	88

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Struktur Selulosa	12
Gambar 2.2 Struktur CNF	13
Gambar 2.3 Reaksi Alkalisasi	14
Gambar 2.4 Proses <i>Bleaching</i>	16
Gambar 3.1 Skema umum tahapan pengujian adsorpsi	25
Gambar 4.1 Serbuk tandan kosong kelapa sawit (a), pulp delignifikasi (b), dan pulp bleaching (c).....	29
Gambar 4.2 Nanoselulosa sebelum ultrasonikasi (a) dan Nanoselulosa setelah ultrasonikasi (b).....	31
Gambar 4.3 Mekanisme reaksi selulosa yang teroksidasi TEMPO.....	32
Gambar 4.4 produk komposit <i>beads</i> nanoselulosa berbasis natrium alginat dan silika mesopori	33
Gambar 4.5 spektra FTIR dari tandan kosong kelapa sawit (TKKS), hasil perlakuan perlakuan delignifikasi (TKKS-A), selulosa tandan kosong kelapa sawit (TKKS-CL), selulosa nanofiber (TKKS-CNF).....	34
Gambar 4.6 (a) Difraktogram tandan kosong kelapa sawit (TKKS), hasil perlakuan delignifikasi (TKKS-A), selulosa tandan kosong kelapa sawit (TKKS-CL) dan selulosa nanofiber (TKKS-CNF), (b) Indeks kristalinitas TKKS,TKKS-A,TKKS-CL, dan TKKS-CNF.....	36
Gambar 4.7 Analisis termogravimetri (TG) (a) dan derivatif termogravimetri (DTG) (b) tandan kosong kelapa sawit (TKKS), hasil perlakuan delignifikasi (TKKS-A), selulosa tandan kosong kelapa sawit (TKKS-CL) dan selulosa nanofiber (TKKS-CNF).....	39
Gambar 4.8 Analisis SEM tandan kosong kelapa sawit (a), hasil perlakuan delignifikasi (b), dan selulosa tandan kosong kelapa sawit (c), analisis <i>TEM</i> selulosa nanofiber (d) dan ukuran diameter selulosa nanofiber (e).	40
Gambar 4.9 Analisis Morfologi SEM B1-SAS (a), B2-SAS (b), B3-SAS (c), B4-SAS (d), dan BA-SAS (e)	43
Gambar 4.10 kurva kalibrasi larutan standar metilen biru	47
Gambar 4.11 hasil uji pengaruh waktu terhadap efektivitas adsorpsi.....	48
Gambar 4.12 hasil uji pengaruh dosis <i>beads</i> terhadap efektivitas adsorpsi.....	50
Gambar 4.13 hasil uji pengaruh pH terhadap efektivitas adsorpsi.....	51
Gambar 4.14 kurva model Isoterm adsorpsi (a) Isoterm Langmuir dan (b) Isoterm Freundlich	53

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Isolasi CNF menggunakan metode oksidasi TEMPO dari berbagai biomassa.....	13
Tabel 4.1 Sifat termal kulit edamame, selulosa dan selulosa nanofiber.....	38
Tabel 4.2 pengaruh konsentrasi nanoselulosa terhadap karakteristik beads	45
Tabel 4.3 Parameter Terhitung Model Isoterm Langmuir dan Freundlich	54



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Data hasil pengujian FTIR.....	69
Lampiran 2. Data Hasil Pengujian XRD.....	71
Lampiran 3. Data Hasil Pengujian SEM dan TEM.....	74
Lampiran 4. Data Hasil Pengujian TGA.....	75
Lampiran 5. Data hasil pengujian DTG.....	77
Lampiran 6. Hasil Pengujian Solid Content %.....	78
Lampiran 7. Perhitungan Indeks Kristalinitas.....	79
Lampiran 8. Data Larutan Standar Metilen Biru.....	79
Lampiran 9. Data pengujian adsorpsi.....	80
Lampiran 10. Perhitungan Isoterm Adsorpsi.....	82
Lampiran 11. Foto Penelitian.....	83

GLOSARIUM

1. **Adsorpsi** adalah proses penyerapan zat pada permukaan material akibat gaya fisika atau kimia.
2. **Beads Mesopori** adalah partikel berbentuk bulat yang memiliki struktur pori berukuran 2–50 nm sehingga memberikan luas permukaan tinggi dan meningkatkan kemampuan adsorpsi material
3. **Bleaching** adalah proses pemutihan untuk menghilangkan lignin dan senyawa berwarna pada selulosa.
4. **CaCl₂** adalah senyawa garam yang digunakan sebagai agen crosslinking dalam pembentukan bead melalui proses gelasi ionik.
5. **CI (Crystallinity Index)** adalah parameter yang menunjukkan tingkat kristalinitas material berdasarkan analisis XRD.
6. **Delignifikasi** adalah proses penghilangan lignin dari biomassa untuk memperoleh selulosa.
7. **DTG (Derivative Thermogravimetry)** adalah analisis turunan dari TGA yang menunjukkan laju perubahan massa terhadap suhu.
8. **FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)** adalah teknik spektroskopi untuk mengidentifikasi gugus fungsi berdasarkan serapan inframerah.
9. **HCl (Asam Klorida)** adalah asam kuat yang digunakan untuk netralisasi dan pengaturan pH.
10. **H₂O₂ (Hidrogen Peroksida)** adalah agen oksidator yang digunakan dalam proses bleaching.
11. **Isoterm Adsorpsi** adalah model yang menggambarkan hubungan antara jumlah adsorbat yang teradsorpsi dan konsentrasi larutan pada kesetimbangan.
12. **Karakterisasi** adalah proses analisis untuk mengetahui sifat fisik dan kimia suatu material.
13. **MB (Metilen Biru / Methylene Blue)** adalah zat warna kationik yang digunakan sebagai model adsorbat dalam penelitian adsorpsi.
14. **NaBr (Natrium Bromida)** adalah senyawa yang berperan sebagai kofaktor dalam sistem oksidasi TEMPO.
15. **NaClO (Natrium Hipoklorit)** adalah agen oksidator dalam proses oksidasi TEMPO.
16. **NaOH (Natrium Hidroksida)** adalah basa kuat yang digunakan dalam proses delignifikasi dan pengaturan pH.
17. **Nanoselulosa** adalah selulosa berukuran nano yang memiliki luas permukaan tinggi dan gugus fungsi aktif.
18. **Natrium Alginat** adalah polimer alami berbasis polisakarida yang berasal dari alga coklat dan digunakan sebagai matriks pembentuk bead melalui proses gelasi ionik dengan ion divalen seperti Ca²⁺.
19. **NC / CNF (Nanocellulose / Cellulose Nanofiber)** adalah material selulosa berukuran nano dengan luas permukaan tinggi dan gugus fungsi aktif untuk adsorpsi.

20. **Oksidasi TEMPO** adalah metode oksidasi selektif untuk mengubah gugus hidroksil selulosa menjadi gugus karboksilat.
21. **pH** adalah derajat keasaman atau kebasaan larutan yang mempengaruhi proses adsorpsi.
22. **SBA-15** adalah silika mesopori dengan struktur pori teratur dan luas permukaan tinggi.
23. **SEM (Scanning Electron Microscopy)** adalah metode karakterisasi untuk mengamati morfologi permukaan menggunakan elektron.
24. **Silika Mesopori** adalah material berpori dengan ukuran pori 2–50 nm yang digunakan untuk meningkatkan kapasitas adsorpsi.
25. **TEM (Transmission Electron Microscopy)** adalah teknik mikroskopi untuk melihat struktur dan ukuran material pada skala nanometer.
26. **TEMPO (2,2,6,6-Tetramethylpiperidine-1-oxyl)** adalah senyawa radikal stabil yang digunakan sebagai mediator dalam proses oksidasi selektif pada selulosa, khususnya untuk mengoksidasi gugus hidroksil primer menjadi gugus karboksilat.
27. **TGA (Thermogravimetric Analysis)** adalah analisis termal untuk mengetahui perubahan massa terhadap suhu.
28. **TKKS (Tandan Kosong Kelapa Sawit)** adalah limbah padat dari pengolahan kelapa sawit yang kaya lignoselulosa dan berpotensi sebagai sumber nanoselulosa.
29. **Ultrasonikasi** adalah proses penggunaan gelombang ultrasonik untuk memperkecil ukuran partikel hingga skala nano.
30. **UV-Vis (Ultraviolet-Visible Spectroscopy)** metode untuk menentukan konsentrasi larutan berdasarkan absorbansi.
31. **XRD (X-Ray Diffraction)** analisis untuk menentukan struktur kristal dan derajat kristalinitas material.

ABSTRAK

Sintesis dan Karakterisasi Komposit *Beads* Nanoselulosa Berbasis Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit (*Elaeis guineensis Jacq*) sebagai Adsorben Methylene Blue

Oleh :

Wiwin Arfanudin
22106030021

Pembimbing I: Dr. Imelda Fajriati,
M.Si. Pembimbing II: Dr. Holilah.,
S.Si., M.Si.

Penurunan kualitas air akibat limbah industri, khususnya zat warna seperti metilen biru, mendorong perlunya pengembangan material adsorben yang efektif dan ramah lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk mengisolasi nanoselulosa dari limbah tandan kosong kelapa sawit (TKKS), mensintesis komposit *beads* berbasis nanoselulosa, silika mesopori, dan natrium alginat, serta mengkaji mekanisme adsorpsi metilen biru. Nanoselulosa diperoleh melalui tahapan delignifikasi, *bleaching*, oksidasi TEMPO, dan ultrasonikasi, kemudian disintesis menjadi *beads* menggunakan metode gelasi ionik dengan CaCl_2 . Karakterisasi dilakukan menggunakan *FTIR*, *XRD*, *SEM*, *TEM*, dan *TGA*, sedangkan uji adsorpsi meliputi variasi waktu kontak, variasi dosis adsorben, pH larutan, dan analisis isoterm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nanoselulosa berhasil diisolasi dengan rata-rata ukuran diameter 3,83 nm dan memiliki gugus fungsi aktif yang mendukung proses adsorpsi, sementara komposit *beads* yang dihasilkan memiliki struktur yang stabil dan morfologi berpori. Variasi waktu kontak menunjukkan bahwa proses adsorpsi berlangsung cepat pada tahap awal dan mencapai kondisi kesetimbangan pada menit ke 180. Peningkatan dosis adsorben menunjukkan meningkatkan efisiensi adsorpsi akibat bertambahnya jumlah situs aktif yang tersedia pada permukaan adsorben. Kinerja adsorpsi dipengaruhi oleh kondisi operasi, dengan hasil optimum pada pH 7, serta menunjukkan kesesuaian dengan model isoterm Freundlich yang menggambarkan karakter permukaan adsorben. Secara keseluruhan, komposit *beads* nanoselulosa berbasis TKKS berpotensi sebagai adsorben yang efektif dan berkelanjutan untuk pengolahan limbah zat warna.

Kata kunci: Nanoselulosa, tandan kosong kelapa sawit (TKKS), beads komposit, adsorpsi, metilen biru

ABSTRACT

Synthesis and Characterization of Nanocellulose-Based Composite Beads Derived from Oil Palm Empty Fruit Bunch (*Elaeis guineensis* Jacq.) as a Methylene Blue Adsorbent

By :
Wiwin Arfanudin
22106030021

Supervisor I: Dr. Imelda Fajriati, M.Si.
Supervisor II: Dr. Holilah., S.Si., M.Si.

The deterioration of water quality due to industrial wastewater, particularly from dyes such as methylene blue, has driven the need to develop effective and environmentally friendly adsorbent materials. This study aims to isolate nanocellulose from oil palm empty fruit bunch (OPEFB) waste, synthesize composite beads based on nanocellulose, mesoporous silica, and sodium alginate, and investigate the adsorption mechanism of methylene blue. Nanocellulose was obtained through a series of processes including delignification, bleaching, TEMPO-mediated oxidation, and ultrasonication, and subsequently synthesized into beads using an ionic gelation method with CaCl_2 . Characterization was carried out using *FTIR*, *XRD*, *SEM*, *TEM*, and *TGA*, while adsorption experiments included variations in contact time, adsorbent dosage, solution pH, and Isoterm analysis. The results showed that nanocellulose was successfully isolated with an average diameter of 3,83 nm and possessed active functional groups that support the adsorption process, while the resulting composite beads exhibited a stable structure and porous morphology. The contact time study indicated that adsorption occurred rapidly at the initial stage and reached equilibrium at 180 minutes. Increasing the adsorbent dosage enhanced adsorption efficiency due to the greater availability of active sites on the adsorbent surface. Adsorption performance was influenced by operating conditions, with optimum results at pH 7, and followed the Freundlich Isoterm model, indicating a heterogeneous surface characteristic. Overall, nanocellulose-based composite beads derived from OPEFB demonstrate significant potential as an effective and sustainable adsorbent for dye wastewater treatment.

Keywords: *Nanocellulose, oil palm empty fruit bunch (OPEFB), composite beads, adsorption, methylene blue*

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Krisis ketersediaan air bersih saat ini menjadi isu global yang semakin mengkhawatirkan, terutama akibat menurunnya kualitas air yang dipicu oleh meningkatnya jumlah limbah dari berbagai sektor industri. Salah satu kontributor utama adalah limbah dari industri tekstil dan penyamakan kulit, yang setiap tahunnya menggunakan lebih dari 10.000 jenis pewarna komersial dan menghasilkan sekitar 7×10^5 ton pewarna untuk proses pencelupan (Kuhad et al., 2004; Mishra, & Das, 2017; Singh et al., 2019). Salah satu jenis pewarna yang banyak digunakan adalah metilen biru, senyawa aromatik heterosiklik berbasis tiazin yang dikenal karena kestabilannya. Meskipun umum dipakai, metilen biru dapat menimbulkan efek toksik dan berpotensi karsinogenik, sehingga keberadaannya dalam limbah menjadi perhatian serius.

Untuk menangani permasalahan tersebut, berbagai metode pengolahan air limbah telah dikembangkan, salah satunya adalah teknik adsorpsi. Adsorpsi dipilih karena tergolong metode yang sederhana, ekonomis, serta efisien dalam menghilangkan zat warna dari air limbah. Adsorben yang ideal seharusnya memiliki kapasitas adsorpsi tinggi, stabilitas yang baik, serta dapat digunakan kembali. Oleh karena itu, pengembangan material adsorben terus dilakukan, dengan fokus pada peningkatan luas permukaan, porositas, serta ketahanan mekanik dan kimia untuk menciptakan solusi pengolahan air yang berkelanjutan dan ramah lingkungan.

Upaya untuk menemukan material adsorben yang efektif, ekonomis, dan reusable terus menjadi perhatian. Namun, sistem adsorpsi berbasis serbuk masih menghadapi keterbatasan, seperti kebutuhan jumlah material yang besar dan kesulitan dalam proses pemisahan, khususnya dengan metode dekantasi (Asranudin et al., 2024). Sebagai solusi atas kendala tersebut, pendekatan berbasis *bead* komposit mulai banyak dikembangkan. *Bead* komposit dinilai unggul karena memiliki kapasitas adsorpsi yang tinggi, selektivitas yang lebih baik, serta stabilitas mekanik dan kimia yang tinggi. Selain itu, *bead* jenis ini mudah diregenerasi dan memiliki fleksibilitas dalam desain, menjadikannya menarik untuk aplikasi pengolahan air limbah.

Bead komposit umumnya dibuat dari campuran polimer seperti polivinil alkohol (PVA) dan natrium alginat, dikombinasikan dengan material anorganik mesopori untuk meningkatkan efisiensi transfer massa. Akan tetapi, PVA memiliki kelemahan, yaitu kecenderungan mengalami aglomerasi, yang menyulitkan pembentukan *bead* dengan bentuk morfologi yang stabil dan seragam (Ruan et al., 2018). Dalam hal ini, nanoselulosa hadir sebagai alternatif menjanjikan karena sifat-sifat unggul yang dimilikinya dan kemampuannya untuk mengatasi masalah aglomerasi, sekaligus meningkatkan efisiensi adsorpsi secara keseluruhan.

Nanoselulosa (NC) merupakan serat nano yang ringan, biodegradable, serta memiliki luas permukaan spesifik yang besar. Material ini juga sangat kuat, dengan modulus elastisitas mencapai 220 GPa, bahkan melebihi serat Kevlar (Moon et al., 2011). NC umumnya diisolasi dari biomassa lignoselulosa karena ketersediaannya yang melimpah, berkelanjutan, dapat diperbarui, serta biaya produksinya yang rendah (Holilah et al., 2021). Berbagai jenis biomassa telah dimanfaatkan sebagai sumber nanoselulosa, antara lain enceng gondok (Emam et al., 2020), ampas tebu (Moreno et al., 2018), daun nanas (Prado & Spinacé, 2018), kulit pisang (Harini et al., 2018), bonggol jagung (Liu et al., 2016), kulit dan cangkang kemiri sunan (Ramadhani et al., 2022), sekam padi (Rashid & Dutta, 2020), serat biduri (Gao et al., 2020), pelepah sawit (Owolabi et al., 2017; Trache et al., 2016), cangkang biji sagu (Naduparambath et al., 2017), dan kulit kurma (Abu-thabit et al., 2020).

Salah satu limbah biomassa yang sangat potensial untuk dimanfaatkan sebagai sumber nanoselulosa adalah Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS). Indonesia sendiri memproduksi sekitar 51 juta ton TKKS setiap tahun (Rezki et al., 2023), menjadikan limbah ini sangat melimpah. TKKS merupakan hasil samping dari proses pengolahan buah kelapa sawit, dengan volume limbah padat yang hampir sebanding dengan jumlah minyak sawit mentah yang diproduksi (Direktorat Statistik Tanaman Pangan, 2020). Kandungan selulosa dalam TKKS yang tinggi, yaitu sekitar 35–39%, menunjukkan potensi besar dalam upaya valorisasi limbah (BPDPKS, 2023). Dengan memanfaatkan TKKS untuk produksi nanoselulosa, tidak hanya diperoleh nilai tambah dari limbah tersebut, tetapi juga

berkontribusi pada pengurangan dampak lingkungan dan pengelolaan limbah secara berkelanjutan.

Proses isolasi nanoselulosa umumnya dilakukan melalui hidrolisis asam, terutama dengan menggunakan asam kuat seperti asam sulfat (Chen et al., 2018; Guo et al., 2020). Namun demikian, metode ini memiliki sejumlah kelemahan, seperti yield yang rendah, degradasi bagian kristalin selulosa, serta penggunaan air dalam jumlah besar untuk proses netralisasi (Chang et al., 2018; Yang et al., 2017). Oleh karena itu, metode alternatif seperti oksidasi yang dimediasi oleh 2,2,6,6-Tetramethylpiperidine 1-oxyl (TEMPO) menjadi pilihan yang lebih ramah lingkungan. Metode TEMPO secara selektif mengoksidasi gugus hidroksil primer menjadi gugus karboksil dalam kondisi reaksi yang moderat. Proses ini mempermudah defibrilasi mekanis serta menurunkan energi yang dibutuhkan karena ikatan hidrogen antar-fibril menjadi lebih lemah dan terjadi tolakan elektrostatis antar gugus karboksil bermuatan negatif (Peyre, 2014; Tejado et al., 2012).

Berdasarkan latar belakang tersebut, dilakukan penelitian untuk memanfaatkan nanoselulosa hasil isolasi dari limbah TKKS dengan metode oksidasi TEMPO, yang kemudian dikompositkan dengan silika mesopori menjadi *bead* komposit. Kombinasi ini diharapkan mampu berfungsi secara efektif dalam mengadsorpsi metilen biru dari air limbah. Proses penelitian mencakup isolasi nanoselulosa, sintesis komposit *bead*, serta karakterisasi terhadap komposit dan uji aktivitas adsorpsi.

B. Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bahan baku nanoselulosa yang digunakan berasal dari limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) yang diisolasi menggunakan metode oksidasi dengan 2,2,6,6-Tetramethylpiperidine-1-oxyl (TEMPO).
2. Material *bead* komposit yang dikembangkan merupakan kombinasi antara nanoselulosa dari TKKS, silika mesopori dan natrium alginat.
3. Silika Mesopori yang digunakan adalah Silika Mesopori komersil.
4. Pewarna yang digunakan sebagai model polutan adalah metilen biru (MB) yang mewakili limbah pewarna dari industri tekstil.
5. Pengujian adsorpsi yang dilakukan terbatas pada studi Isoterm, variasi dosis *beads*, variasi waktu kontak, dan variasi pH adsorpsi metilen biru.
6. Karakterisasi material meliputi analisis morfologi, struktur kristal, sifat termal, dan gugus fungsi, dengan menggunakan instrumen seperti *SEM*, *TEM*, *XRD*, *FTIR*, dan *TGA*.
7. Penelitian ini tidak membahas aplikasi skala industri maupun keberlanjutan jangka panjang penggunaan *bead* dalam sistem pengolahan air limbah secara menyeluruh.

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

C. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, maka dapat diambil rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana isolasi dan sintesis komposit *beads* nanoselulosa dari limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit.
2. Bagaimana karakteristik nanoselulosa dan komposit *beads* nanoselulosa yang meliputi gugus fungsi, analisis struktur kristal, morfologi, dan sifat termalnya?
3. Bagaimana uji aktivitas komposit *bead* nanoselulosa dalam mengadsorpsi zat warna metilen biru ditinjau dari pengaruh waktu kontak, variasi dosis *beads*, Isoterm adsorpsi, dan pengaruh pH terhadap efektivitas adsorpsi?

D. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini yakni:

1. Mendapatkan nanoselulosa dari limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS)
2. Melakukan sintesis komposit *bead* berbasis nanoselulosa, silika mesopori, dan natrium alginat
3. Mengkaji mekanisme adsorpsi zat warna metilen biru pada komposit *bead* nanoselulosa

D. Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Manfaat Akademik

Memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan teknologi adsorpsi limbah zat warna dengan memanfaatkan limbah biomassa sebagai sumber nanoselulosa, serta menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya di bidang material komposit ramah lingkungan dan teknologi pengolahan air.

2. Manfaat Praktis

Menawarkan alternatif solusi pengolahan air limbah, khususnya yang mengandung zat warna metilen biru, melalui penggunaan *bead* komposit berbasis nanoselulosa dan silika mesopori yang ramah lingkungan, efisien, dan berpotensi untuk diregenerasi.

3. Manfaat Lingkungan

Mendukung upaya pemanfaatan limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) yang melimpah dan belum dimanfaatkan secara optimal, sehingga dapat mengurangi dampak negatif limbah padat terhadap lingkungan sekaligus meningkatkan nilai tambah dari limbah tersebut.

BAB V PENUTUP

A. Kesimpulan

Berdasarkan pemaparan hasil yang telah disampaikan, dapat disimpulkan beberapa hal untuk penelitian ini diantaranya yaitu:

1. Nanoselulosa berhasil diisolasi dari limbah tandan kosong kelapa sawit (TKKS) melalui tahapan delignifikasi, *bleaching*, serta oksidasi menggunakan metode TEMPO yang dilanjutkan dengan proses ultrasonikasi. Proses ini mampu menghasilkan nanoselulosa dalam bentuk nanofibril dengan ukuran skala nanometer dengan diameter rata-rata 3,838 nm yang terdispersi secara stabil. Keberhasilan isolasi ini ditunjukkan oleh perubahan warna material menjadi lebih bening dalam bentuk hidrogel, peningkatan kemurnian selulosa, serta terbentuknya gugus karboksilat akibat oksidasi TEMPO. Gugus karboksilat tersebut memberikan muatan negatif pada permukaan nanoselulosa, sehingga meningkatkan sifat reaktif dan kemampuannya dalam berinteraksi dengan molekul zat warna kationik seperti metilen biru.
2. Komposit *beads* berbasis nanoselulosa, natrium alginat, dan silika mesopori berhasil disintesis melalui metode gelas ionik menggunakan CaCl_2 , menghasilkan *beads* dengan bentuk yang relatif bulat, stabil secara mekanik, dan memiliki struktur jaringan tiga dimensi yang kompak. Selain itu, analisis morfologi menunjukkan bahwa *beads* memiliki struktur berpori yang mendukung proses difusi adsorbat, serta distribusi nanoselulosa yang baik dalam matriks komposit. Kombinasi nanoselulosa sebagai penguat struktur, silika mesopori sebagai penyedia luas permukaan, dan alginat sebagai matriks pembentuk bead memberikan kontribusi terhadap peningkatan stabilitas serta potensi adsorpsi material.
3. Komposit *beads* nanoselulosa yang dihasilkan menunjukkan kemampuan adsorpsi yang efektif terhadap zat warna metilen biru. Kinerja adsorpsi dipengaruhi oleh beberapa parameter, seperti pengaruh waktu, dosis adsorben, pH larutan, dan konsentrasi awal metilen biru. Variasi waktu kontak menunjukkan bahwa persen adsorpsi meningkat secara signifikan pada tahap awal hingga mencapai kondisi kesetimbangan pada menit ke-

180, yang ditandai dengan nilai adsorpsi yang relatif konstan. Peningkatan dosis adsorben juga terbukti meningkatkan efisiensi adsorpsi karena bertambahnya jumlah situs aktif yang tersedia. Sementara itu, kondisi pH 7 hingga 9 memberikan hasil adsorpsi yang lebih optimal, yang menunjukkan bahwa mekanisme adsorpsi didominasi oleh interaksi elektrostatik antara permukaan adsorben yang bermuatan negatif dengan molekul metilen biru yang bermuatan positif. Analisis isoterm adsorpsi menunjukkan bahwa proses adsorpsi mengikuti model isoterm Freundlich dengan persamaan linier $y = 0,14296x + 0,03427$ dan nilai koefisien determinasi ($R^2 = 0,92835$), yang mengindikasikan bahwa mekanisme adsorpsi berlangsung secara multilayer pada permukaan adsorben. Hasil ini menunjukkan bahwa komposit *beads* nanoselulosa berbasis TKKS berpotensi sebagai adsorben ramah lingkungan yang efektif dalam pengolahan limbah zat warna.

B. Saran

Beberapa saran yang dapat disampaikan sebagai pengembangan lanjutan terkait topik dan mengatasi keterbatasan penelitian ini yakni disarankan untuk penelitian selanjutnya agar mengkaji lebih lanjut mengenai kemampuan regenerasi dan penggunaan ulang (*reuse*) dari komposit *beads* nanoselulosa guna mengetahui stabilitas dan efisiensi adsorben dalam jangka panjang. Selain itu juga juga disarankan untuk menguji kinerja adsorben terhadap jenis polutan lain, baik zat warna maupun logam berat, guna mengetahui selektivitas dan potensi aplikasinya secara lebih luas. Di samping itu, studi mekanisme adsorpsi secara lebih mendalam perlu dilakukan untuk memahami interaksi antara adsorben dan adsorbat secara komprehensif. Terakhir, pengujian dalam skala yang lebih besar serta simulasi pada kondisi limbah nyata sangat disarankan untuk mengevaluasi potensi penerapan material ini dalam sistem pengolahan limbah secara praktis.

DAFTAR PUSTAKA

- Abu-thabit, N. Y., Abu, A., Hakeem, A. S., Ul-hamid, A., Umar, Y., & Ahmad, A. (2020). International Journal of Biological Macromolecules Isolation and characterization of microcrystalline cellulose from date seeds (Phoenix dactylifera L .). *International Journal of Biological Macromolecules*, 155, 730–739. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.03.255>
- Aditiawati, P., Dungani, R., Fikri, R. M., & Hartati, S. (2019). Optimization of cellulose nanofiber production from oil palm empty fruit bunch using Trichoderma sp. with the solid state fermentation method. *BioResources*, 14(2), 3688–3700. <https://doi.org/10.15376/biores.14.2.3688-3700>
- Ait Benhamou, A., Boukind, S., Khalili, H., Moubarik, A., El Achaby, M., Kassab, Z., & Sehaqui, H. (2024). Strong and Flame-Resistant Nanocellulose Sheets Derived from Agrowastes via a Papermaking-Assisted Process. *ACS Applied Polymer Materials*, 6(5), 2763–2776. <https://doi.org/10.1021/acsapm.3c02941>
- Amanda, P., Kurniawan, Y. D., Prasetyo, K. W., Hasan, F., & Amelia, A. (2024). Adsorption of Congo Red from Aqueous Solutions by Alginate- Nanocellulose-Polyethyleneimine Hydrogel Beads. 21(1), 1–14.
- Amara, C., Razzak, A., Khiari, R., Dufresne, A., & Khwaldia, K. (2024). Sustainable production of cellulose nanofibers and nanopaper sheets from olive pomace waste through mechanical defibrillation. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s13399-024-06296-5>
- Anggorowati, H., & Lestari, I. (2022). Manik Komposit Abu Layang Batu Bara – Alginat untuk Menghilangkan Rhodamine B Fly Ash – Alginate Composites Beads for Rhodamine B Removal. 19(3), 160–164.
- Awalludin, M. F., Sulaiman, O., Hashim, R., & Nadhari, W. N. A. W. (2015). An overview of the oil palm industry in Malaysia and its waste utilization through thermochemical conversion, specifically via liquefaction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 1469–1484. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2015.05.085>
- Ayawei, N., Ebelegi, A. N., & Wankasi, D. (2017). Modelling and Interpretation of Adsorption Isotherms. *Journal of Chemistry*, 1(1), 1–10.

- 2017, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2017/3039817>. *Journal of Chemistry*, 2017, 1–11. <https://www.hindawi.com/journals/jchem/2017/3039817/>
- Bajra, B. D., Edwin, M., Lubis, S., Suprianto, E., Yudanto, B. G., Mulyono, M. E., Rizki, I. F., & Kusumah, M. S. (2025). *Bioresource Technology Reports Bioconversion of oil palm empty fruit bunch and kernel meal by black soldier fly (Hermetia illucens) as an alternative protein and fat sources*. 29(February), 102067.
- Bian, H., Yang, Y., Tu, P., & Chen, J. Y. (2022). *Value-Added Utilization of Wheat Straw: From Cellulose and Cellulose Nanofiber to All-Cellulose Nanocomposite Film*.
- Busayo, J., Sie, A., Lau, Y., Hua, Y., Yong, Y., Tung, T., Nabisab, C., & Mubarak, M. (2025). *A comprehensive review on adsorption technologies for methylene blue elimination : efficiency , mechanisms , and future perspectives*. Springer International Publishing.
- Chang, J. K., Duret, X., Berberi, V., & Zahedi-niaki, H. (2018). *Two-Step Thermochemical Cellulose Hydrolysis With Partial Neutralization for Glucose Production*. 6(April), 1–11. <https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00117>
- Chen, Y. W., Hasanulbasori, M. A., Fung, P., & Lee, H. V. (2018). SC. *International Journal of Biological Macromolecules*, #pagerange#. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.10.013>
- Cueto-d, E. J., Castro, A., Alkorta, I., Gonz, V., & Mateo-mart, E. (2023). *Effect of Surface Organo-Silanization on SBA-15 Mesoporous Silicas in CO 2 Adsorption Processes : Design , Synthesis , and Computational Studies*. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c00475>
- Czaikoski, A., Lopes, R., & Menegalli, F. C. (2020). Rheological behavior of cellulose nano fi bers from cassava peel obtained by combination of chemical and physical processes. *Carbohydrate Polymers*, 248(July), 116744. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116744>
- De France, K. J., Hoare, T., & Cranston, E. D. (2017). Review of Hydrogels and Aerogels Containing Nanocellulose. *Chemistry of Materials*, 29(11), 4609–4631. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.7b00531>

- Dewanti, D. P. (2018). *Potensi Selulosa dari Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit untuk Bahan Baku Bioplastik Ramah Lingkungan Cellulose Potential of Empty Fruit Bunches Waste as The Raw Material of Bioplastics Environmentally Friendly*. 19(1), 81–88.
- Dkdq, X., Huds, R., Pradana, M. A., Ardhyanta, H., & Farid, M. (2017). *3hplvdkdq 6hoxorvd gdul /ljqlq 6hudw 7dqgdq .rvrqj .hodsd 6dzlw ghajdq 3urvvh Sondolvdlv xqwxn 3hqjxdw %dkdq .rpsrvlw 3hq\huds 6xdud*. 6(2), 413–416.
- Dotto, G. L., & McKay, G. (2020). Current scenario and challenges in adsorption for water treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(4), 103988. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103988>
- Dyah Kencana Wulan, P. P., Ismojo, Khumaeroh, Syabila, A. N., Handayani, A. S., & Ratnawati. (2024). Sustainable extraction of cellulose nanocrystals from empty palm oil bunches via low-acid hydrolysis. *Results in Engineering*, 24, 103012. <https://doi.org/10.1016/J.RINENG.2024.103012>
- Elizabeth, L. (n.d.). *Kosong Kelapa Sawit Sebagai Filler Pembuatan Tisu Toilet*. 51–59.
- Elmorsi, R. R., El-Wakeel, S. T., Shehab El-Dein, W. A., Lotfy, H. R., Rashwan, W. E., Nagah, M., Shaaban, S. A., Sayed Ahmed, S. A., El-Sherif, I. Y., & Abou-El-Sherbini, K. S. (2019). Adsorption of Methylene Blue and Pb 2+ by using acid-activated Posidonia oceanica waste. *Scientific Reports*, 9(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-39945-1>
- Emam, A. A., Faraha, S. A. A., Kamal, F. H., Gamal, A. M., & Basseem, M. (2020). Modification and characterization of Nano cellulose crystalline from Eichhornia crassipes using citric acid: An adsorption study. *Carbohydrate Polymers*, 240(December 2019), 116202. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116202>
- Fitriani, & Neily Zakiyah. (2021). Review Artikel Cellulose Nanofiber : Isolasi, Karakterisasi, Dan Aplikasi Di Bidang Farmasi. *Farmaka*, 19(3), 53–59.
- Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2010). *Insights into the modeling of adsorption isotherm systems*. 156, 2–10. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.09.013>
- Fukuda, J., & Hsieh, Y. (2022). *Industrial Crops & Products Almond shell*

- nanocellulose : Characterization and self-assembling into fibers , films , and aerogels. *Industrial Crops & Products*, 186(April), 115188. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115188>
- Gao, A., Chen, H., Tang, J., Xie, K., & Hou, A. (2020). Industrial Crops & Products Efficient extraction of cellulose nanocrystals from waste *Calotropis gigantea* fiber by SO₄²⁻ / TiO₂ nano-solid superacid catalyst combined with ball milling exfoliation. *Industrial Crops & Products*, 152(June 2019), 112524. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112524>
- Gases, A. O. F. (1918). *The Adsorption Of Gases On Plane Surfaces Of*. 345(1914).
- Guo, Y., Zhang, Y., Zheng, D., Li, M., & Yue, J. (2020). Journal Paper. *International Journal of Biological Macromolecules*. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.07.009>
- Harahap, M., Daulay, N., Zebua, D., & Gea, S. (2023). Nanofiber Cellulose/Lignin from Oil Palm Empty Fruit Bunches and the Potential for Carbon Fiber Precursor Prepared by Wet-spinning. *International Journal of Technology*, 14(1), 152–161. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v14i1.5082>
- Harini, K., Ramya, K., & Sukumar, M. (2018). Graphical abstract SC. *Carbohydrate Polymers*. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.08.081>
- Hastuti, N., Kanomata, K., & Kitaoka, T. (2019). Characteristics of TEMPO-Oxidized Cellulose Nanofibers from Oil Palm Empty Fruit Bunches Produced by Different Amounts of Oxidant. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 359(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/359/1/012008>
- Hidayatullah, I., Maria Widyanti, E., Aztaris, C., Melanitria, A., Elizabeth, L., Teknik Kimia, J., Negeri Bandung, P., Jl Gegerkalong Hilir, I., Parongpong, K., Bandung Barat, K., & Barat, J. (n.d.). *Kajian Pustaka Sintesis Nanoselulosa Dari Tandan Kosong Kelapa Sawit Sebagai Filler Pembuatan Tisu Toilet*.
- Ho, Y. S., & McKay, G. (1999). *Pseudo-second order model for sorption processes*. 34, 451–465.
- Holilah, Asranudin, El Messaoudi, N., Ulfa, M., Hamzah, A., Hamid, Z. A. A., Ramadhani, D. V., Suryanegara, L., Mahardika, M., Melenia, A. T., Pratama,

- A. W., & Prasetyoko, D. (2024). Fabrication a sustainable adsorbent nanocellulose-mesoporous hectorite bead for methylene blue adsorption. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 10. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100850>
- Holilah, H., Prasetyoko, D., Ediati, R., & Bahruji, H. (2021). Hydrothermal assisted isolation of microcrystalline cellulose from pepper (*Piper nigrum L .*) processing waste for making sustainable bio- composite. *Journal of Cleaner Production*, 305, 127229. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127229>
- Ii, C. (2018). *Chimica et Natura Acta*. 6(2), 56–64.
- Ilyas, R. A., Sapuan, S. M., & Ishak, M. R. (2018). Isolation and characterization of nanocrystalline cellulose from sugar palm fibres (*Arenga Pinnata*). *Carbohydrate Polymers*, 181, 1038–1051. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2017.11.045>
- Isogai, A., Hänninen, T., Fujisawa, S., & Saito, T. (2018). Progress in Polymer Science Review : Catalytic oxidation of cellulose with nitroxyl radicals under aqueous conditions. *Progress in Polymer Science*, 86, 122–148. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2018.07.007>
- Jin, E., Guo, J., Yang, F., Zhu, Y., Song, J., Jin, Y., & Rojas, O. J. (2016). On the polymorphic and morphological changes of cellulose nanocrystals (CNC-I) upon mercerization and conversion to CNC-II. *Carbohydrate Polymers*, 143, 327–335. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2016.01.048>
- Jin, S., & Spontak, R. J. (2023). Advanced Industrial and Engineering Polymer Research Fundamentals of and advances in nanocellulose and nanochitin systems. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 6(4), 356–381. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2023.04.003>
- Kalam, S., Abu-Khamsin, S. A., Kamal, M. S., & Patil, S. (2021). Surfactant Adsorption Isotherms: A Review. *ACS Omega*, 6(48), 32342–32348. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c04661>
- Kargarzadeh, H., Mariano, M., Huang, J., Lin, N., & Ahmad, I. (2017). *Recent developments on nanocellulose reinforced polymer nanocomposites : A review*. 132, 3861.
- Khakalo, A., Tanaka, A., Korpela, A., & Orelma, H. (2020). Delignification and

- Ionic Liquid Treatment of Wood toward Multifunctional High-Performance Structural Materials. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 12(20), 23532–23542. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c02221>
- Khan, I., Saeed, K., Zekker, I., Zhang, B., Hendi, A. H., Ahmad, A., Ahmad, S., Zada, N., Ahmad, H., Shah, L. A., et al. (2022). Review on methylene blue: Its properties, uses, toxicity and photodegradation. *Water*, 14, 242. <https://doi.org/10.3390/w14020242>
- Larasati, E. D., Driananta, R., Dewi, T., Zahirah, A., Rahmatullah, N., Herawati, N., Surabaya, U. N., & Ketintang, J. (2023). *Selulosa dan glukosa*. 6(1), 1–10.
- Li, S., Cui, Y., Wen, M., & Ji, G. (2023). *Toxic Effects of Methylene Blue on the Growth, Reproduction and Physiology of Daphnia magna*.
- Liu, C., Li, B., Du, H., Lv, D., Zhang, Y., & Yu, G. (2016). Properties of nanocellulose isolated from corncob residue using sulfuric acid , formic acid , oxidative and mechanical methods. *Carbohydrate Polymers*, 151, 716–724. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.06.025>
- Luo, H., Cha, R., Li, J., Hao, W., Zhang, Y., & Zhou, F. (2019). Advances in tissue engineering of nanocellulose-based scaffolds: A review. *Carbohydrate Polymers*, 224, 115144. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2019.115144>
- Malekpour, K., Hazrati, A., Khosrojerdi, A., Roshangar, L., & Ahmadi, M. (2023). An overview to nanocellulose clinical application: Biocompatibility and opportunities in disease treatment. *Regenerative Therapy*, 24, 630–641. <https://doi.org/10.1016/J.RETH.2023.10.006>
- Manuscript, A. (2014). *Green Chemistry*. <https://doi.org/10.1039/C4GC02001D>
- Meng, F., Fan, J., Cui, F., Yang, H., Shi, Z., & Wang, D. (2023). *Bioresource Technology An innovative and efficient hydrogen peroxide-citric acid pretreatment of bamboo residues to enhance enzymatic hydrolysis and ethanol production*. 383(May), 129230.
- Meng, F., Yang, H., Shi, Z., Zhao, P., & Yang, J. (2022). *Bioresource Technology Alkaline deacetylation-aided hydrogen peroxide-acetic acid pretreatment of bamboo residue to improve enzymatic saccharification and bioethanol production*. 358(May), 650224.
- Mishra, A., & Das, T. K. (2017). *Methods of Impact Evaluation: A Review*. SSRN

Electronic Journal. <https://doi.org/10.2139/SSRN.2943601>

- Moon, R. J., Martini, A., Nairn, J., Youngblood, J., Martini, A., & Nairn, J. (2011). *Chem Soc Rev Cellulose nanomaterials review : structure , properties and nanocomposites*. <https://doi.org/10.1039/c0cs00108b>
- Moreno, G., Ramirez, K., Esquivel, M., & Jimenez, G. (2018). *Isolation and Characterization of Nanocellulose Obtained from Industrial Crop Waste Resources by Using Mild Acid Hydrolysis*. 6(4), 362–369. <https://doi.org/10.7569/JRM.2017.634>
- Mulyadi, I. (2019). *Jurnal Saintika Unpam Vol. 1 No. 2 Januari 2019*. 1(2), 177–182.
- Naduparambath, S., Jinitha, T. V., Shaniba, V., Sreejith, M. P., Balan, A. K., & Purushothaman, E. (2017). Isolation And Characterisation Of Cellulose Nanocrystals From Sago Seed Shells. *Carbohydrate Polymers*. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.09.088>
- Najafi, H., Asasian-kolur, N., Sharifian, S., Haddadi, B., Jordan, C., & Harasek, M. (2022). *Calcium Alginate Encapsulated Pillared Clay Beads for Adsorption of Ni (Ii) from Aqueous Solution*. 94(May), 1213–1218. <https://doi.org/10.3303/CET2294202>
- Nanokomposit, S., Untuk, B. N., Gabryelle, K., Fadil, M., & Ramadhan, A. (n.d.). *Limbah Red Base 218 (Synthesis Nanocomposites of Nanocellulose-TiO2 for Red Base 218 Waste Water Treatment)*. 218, 51–57.
- Nascimento, D. M., Nunes, Y. L., Figueirêdo, M. C. B., De Azeredo, H. M. C., Aouada, F. A., Feitosa, J. P. A., Rosa, M. F., & Dufresne, A. (2018). Nanocellulose nanocomposite hydrogels: Technological and environmental issues. *Green Chemistry*, 20(11), 2428–2448. <https://doi.org/10.1039/c8gc00205c>
- Nguyen, T. T., Le, T. T., Nguyen, T. B. T., Thi, T. N., Tran, L. B., Nguyen, T. Q. A., & Nguyen, N. H. (2022). Effect of pH on the Performance of Bi2O2CO3 Nanoplates for Methylene Blue Removal in Water by Adsorption and Photocatalysis. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering and Catalysis*, 17(2), 331–339. <https://doi.org/10.9767/brec.17.2.13370.331-339>
- Ningtyas, K. R., Muslihudin, M., & Sari, I. N. (n.d.). *Sintesis Nanoselulosa dari*

Limbah Hasil Menggunakan Variasi Konsentrasi Asam Pertanian dengan Synthesis of Nanoselulosa from Agricultural Waste Using Variation Acid Concentration. 20(2), 142–147.

- Norrahim, M. N. F., Kasim, N. A. M., Knight, V. F., Misenan, M. S. M., Janudin, N., Ahmad Shah, N. A., Kasim, N., Wan Yusoff, W. Y., Mohd Noor, S. A., Jamal, S. H., Ong, K. K., & Wan Yunus, W. M. Z. W. (2021). Nanocellulose: A bioadsorbent for chemical contaminant remediation. *RSC Advances*, 11, 7347–7368
- Ojanen, T., Häkkinen, K., Hanhikoski, J., & Kyröläinen, H. (2020). Effects of task-specific and strength training on simulated military task performance in soldiers. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(21), 1–17. <https://doi.org/10.3390/ijerph17218000>
- Owolabi, A. F., Haafiz, M. K. M., Hossain, S., Hussin, M. H., & Fazita, M. R. N. (2017). International Journal of Biological Macromolecules Influence of alkaline hydrogen peroxide pre-hydrolysis on the isolation of microcrystalline cellulose from oil palm fronds. *International Journal of Biological Macromolecules*, 95, 1228–1234. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.11.016>
- Park, J., Lee, D., Hwang, K., Lee, J., Lee, T.-J., Kim, Y., Kim, J. H., Lee, J., You, W.-J., Chun, S.-J., & Gwon, J. (2024). Effect of catalyst and oxidant concentrations in a TEMPO oxidation system on the production of cellulose nanofibers. *RSC Advances*, 14, 32852. <https://doi.org/10.1039/D4RA04948A>
- Pathania, D., Sharma, S., & Singh, P. (2017). Removal of methylene blue by adsorption onto activated carbon developed from *Ficus carica* bast. *Arabian Journal of Chemistry*, 10, S1445–S1451. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.04.021>
- Perspectives, F. (2024). *Advancing Adsorption and Separation with Modified SBA-15 : A Comprehensive Review and Future Perspectives.*
- Pisang, L. B., Kimia, J. T., Teknik, F., Lampung, U., Prof, J., & Brojonegoro, S. (2019). *Journal of Chemical Process Engineering Pengaruh Suhu Dan Waktu Pretreatment Alkali Pada Isolasi Selulosa. 4(2655), 18–22.*
- Prado, K. S., & Spinacé, M. A. S. (2018). PT SC. *International Journal of*

Biological Macromolecules, #page#.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.10.187>

- Purnomo, A. S., Prasetyoko, D., Messaoudi, N. El, Rohmah, A. A., Romadhoni, A., Hidayat, P., & Subagyo, R. (2024). *methyl orange using Ralstonia pickettii*. 18277–18290. <https://doi.org/10.1039/d3ra08692e>
- Putri, S. A., & Febrianti, R. (2020). *Potensi Nanoselulosa untuk Agen Slow Release Bahan Alam : Review Potential of Nanocellulose for Slow-Release Agents of Natural Materials : Review*. 2(2), 56–60.
- Rashid, S., & Dutta, H. (2020). Industrial Crops & Products Characterization of nanocellulose extracted from short , medium and long grain rice husks. *Industrial Crops & Products*, 154(May), 112627. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112627>
- Rezki, A. S., Wulandari, Y. R., Alvita, L. R., Sari, P., Rekayasa, T., Industri, K., Lampung, P. N., & Lampung, B. (2023). *Rekayasa Bahan Alam dan Energi Berkelanjutan Potensi Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) sebagai Bioenergi pada Produksi Bio-Oil dengan Metode Pirolisis : Efek Temperatur*. 07(1), 22–29.
- Rovalino-Córdova, A. M., Aguirre Montesdeoca, V., & Capuano, E. (2021). A mechanistic model to study the effect of the cell wall on starch digestion in intact cotyledon cells. *Carbohydrate Polymers*, 253, 117351. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2020.117351>
- Ruan, B., Wu, P., Chen, M., Lai, X., Chen, L., Yu, L., Gong, B., Kang, C., Dang, Z., Shi, Z., & Liu, Z. (2018). Ecotoxicology and Environmental Safety Immobilization of *Sphingomonas* sp . GY2B in polyvinyl alcohol – alginate – kaolin beads for efficient degradation of phenol against unfavorable environmental factors. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 162(June), 103–111. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.06.058>
- Sapto, M., Bahruji, H., & Prasetyoko, D. (2025). Case Studies in Chemical and Environmental Engineering The effect of organic acid hydrolysis on the properties of nanocellulose from edamame husk (*Glycine max* (L .) merill). *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 11(January), 101179. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2025.101179>

- Science, A. E. (n.d.). *Advances in Biological Treatment of Industrial Waste Water and their Recycling for a Sustainable Future*.
- Solhi, L., Guccini, V., Heise, K., Solala, I., Niinivaara, E., Xu, W., Mihhels, K., Kröger, M., Meng, Z., Wohler, J., Tao, H., Cranston, E. D., & Kontturi, E. (2023). Understanding Nanocellulose-Water Interactions: Turning a Detriment into an Asset. *Chemical Reviews*, 123(5), 1925–2015. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00611>
- Susanto, J. P., Dwi, A., Dan, S., & Suwedi, N. (2020). *Perhitungan Potensi Limbah Padat Kelapa Sawit untuk Sumber Energi Terbaharukan dengan Metode LCA Palm Solid Wastes Potential Calculation for Renewable Energy with LCA Method*. 18(2), 165–172.
- Ta, I., & Ge, K. (2019). *Composite of Kaolin / Sodium Alginate (SA) Beads for Methylene Blue Adsorption*. 19(2), 100–109. <https://doi.org/10.22146/ajche.51457>
- Tan, Z. Q., Kobayashi, T., & Aht-Ong, D. (2021). Extraction of cellulose nanofibers from empty palm fruit bunches via mechanical defibrillation. *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 31(3), 10–19. <https://doi.org/10.14456/jmmm.2021.34>
- Tarrahi, R., Khataee, A., Karimi, A., Golizadeh, M., & Ebadi Fard Azar, F. (2021). Development of a cellulose-based scaffold for sustained delivery of curcumin. *International Journal of Biological Macromolecules*, 183, 132–144. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2021.04.123>
- Tejado, A., Alam, N., & Antal, M. (2012). *Energy requirements for the disintegration of cellulose fibers into cellulose nanofibers*. 831–842. <https://doi.org/10.1007/s10570-012-9694-4>
- Thomas, S. P. (2025). A brief review on extraction and characterization of nanocellulose from date palm biomass. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 37(5). <https://doi.org/10.1007/s44444-025-00005-x>
- Trache, D., Hussin, M. H., Tan, C., Chuin, H., Sabar, S., Fazita, M. R. N., Taiwo, O. F. A., Hassan, T. M., & Haafiz, M. K. M. (2016). International Journal of Biological Macromolecules Microcrystalline cellulose: Isolation , characterization and bio-composites application — A review. *International*

- Journal of Biological Macromolecules*, 93, 789–804.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.09.056>
- Tran, H. N., You, S. J., Hosseini-Bandegharai, A., & Chao, H. P. (2017). Mistakes and inconsistencies regarding adsorption of contaminants from aqueous solutions: A critical review. *Water Research*, 120, 88–116.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.04.014>
- Treatment, H. P. (2021). *Homogenization of Maritime Pine Wood Color by Alkaline*. 1–18.
- Tserki, V., Zafeiropoulos, N. E., Simon, F., & Panayiotou, C. (2005). A study of the effect of acetylation and propionylation surface treatments on natural fibres. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 36(8), 1110–1118. <https://doi.org/10.1016/J.Compositesa.2005.01.004>
- Uhad, R. C. K., Ood, N. S., Ripathi, K. K. T., & Ingh, A. S. (2004). *Developments in Microbial Methods for the Treatment of Dye Effluents*. 56.
- Ulfah, A. A. (2024). *The Oxidation of Nanocellulose from Oil Palm Empty Fruit Bunch (OPEFB) by TEMPO / NaClO / NaBr*. 24(3), 328–341.
<https://doi.org/10.22146/ajche.14058>
- Vi, B. A. B., Selulosa, M., & Durian, K. (1840). *Bab vi. modifikasi selulosa kulit durian menggunakan glutaraldehyd sebagai koagulan untuk pemulihan limbah cair tepung pati aren*. 115–144.
- Viandi, D., Holilah, H., Bahruji, H., & Jadid, N. (2022). Biocatalysis and Agricultural Biotechnology Effect of lignocellulosic composition of Reutealis trisperma waste on nanocrystalline cellulose properties. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 45(October), 102516.
<https://doi.org/10.1016/j.bcab.2022.102516>
- Vu, A. N., Nguyen, L. H., Tran, H. C. V., Yoshimura, K., Tran, T. D., Van Le, H., & Nguyen, N. U. T. (2024). Cellulose nanocrystals extracted from rice husk using the formic/peroxyformic acid process: isolation and structural characterization. *RSC Advances*, 14(3), 2048–2060.
<https://doi.org/10.1039/d3ra06724f>
- Vu, H., Luong, T., Pha, P., Quoc, Q., & Thieu, V. (2024). Heliyon Alginate functionalized sugarcane cellulose-based beads to improve methylene blue

adsorption from aqueous solution. *Heliyon*, 10(18), e37860.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37860>

Wardhono, E., Kustiningsih, I., Yustanti, E., Kurniawan, B., Sukamto, D., Meliana, Y., & Gu, E. (2025). *South African Journal of Chemical Engineering Enhanced cellulose extraction from delignified oil palm empty fruit bunches using sequential ultrasound-microwave processing*. 54(July), 179–190.
<https://doi.org/10.1016/j.sajce.2025.07.015>

Xu, H., Luis, J., Salvador, S., Balea, A., Blanco, A., & Negro, C. (2022). Optimization of reagent consumption in TEMPO - mediated oxidation of Eucalyptus cellulose to obtain cellulose nanofibers. *Cellulose*, 29(12), 6611–6627. <https://doi.org/10.1007/s10570-022-04672-w>

Xue, J. (2022). *Dye adsorption performance of nanocellulose beads with different carboxyl group content*. 1–16.

Yang, X., Han, F., Xu, C., Jiang, S., Huang, L., & Liu, L. (2017). Industrial Crops & Products Effects of preparation methods on the morphology and properties of nanocellulose (NC) extracted from corn husk. *Industrial Crops & Products*, 109(July), 241–247. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.08.032>

Zhao, D., Feng, J., Huo, Q., Melosh, N., Fredrickson, G. H., Chmelka, B. F., & Stucky, G. D. (1998). *Triblock Copolymer Syntheses of Mesoporous Silica with Periodic 50 to 300 Angstrom Pores*. 279(January).

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA