

**SINTESIS BIOADSORBEN MAGNETIT/NANOSELULOSA DARI
PELEPAH POHON SALAK (*Salacca zalacca*) DAN APLIKASINYA
SEBAGAI ADSORBEN ZAT WARNA *CONGO RED***

SKRIPSI

Untuk memenuhi sebagian persyaratan

Mencapai derajat sarjana S-1

Program Studi Kimia



Oleh:
Atifa Nur Nazira
22106030043

**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-1443/Un.02/DST/PP.00.9/07/2026

Tugas Akhir dengan judul : Sintesis Bioadsorben Magnetit/Nanoselulosa (Fe 3 O 4 /CNC) Dari Pelepah Pohon Salak (Salacca Zalacca) Dan Aplikasinya Pada Zat Warna Congo Red

yang dipersiapkan dan disusun oleh:

Nama : ATIFA NUR NAZIRA
Nomor Induk Mahasiswa : 22106030043
Telah diujikan pada : Kamis, 18 Juni 2026
Nilai ujian Tugas Akhir : A

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

TIM UJIAN TUGAS AKHIR



Ketua Sidang

Didik Krisdiyanto, S.Si., M.Sc
SIGNED

Valid ID: 6a4c8441ed985



Penguji I

Prof. Dr. Susy Yunita Prabawati, M.Si.
SIGNED

Valid ID: 6a44785d03f3f



Penguji II

Priyagung Dhemmi Widiakongko, M.Sc.
SIGNED

Valid ID: 6a420e2c60a85



Yogyakarta, 18 Juni 2026
UIN Sunan Kalijaga
Dekan Fakultas Sains dan Teknologi

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

Valid ID: 6a4ea25e1897b

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Yang bertandatangan di bawah ini :

Nama : Atifa Nur Nazira
NIM : 22106030043
Jurusan : Kimia
Fakultas : Sains dan Teknologi

- Menyatakan bahwa skripsi yang berjudul "Sintesis Bioadsorben Magnetit/Nanoselulosa ($\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CNC}$) dari Pelepah Pohon Salak (*Salacca zalacca*) dan Aplikasinya Pada Zat Warna Congo Red" merupakan hasil penelitian saya sendiri, tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar sarjana 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 dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Yogyakarta, 3 Juni 2026



Atifa Nur Nazira

NIM. 221030043

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR



Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga

FM-UINSK-BM-05-03/R1

SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR

Hal : Persetujuan

Lamp : -

Kepada

Yth. Dekan Fakultas Sains dan Teknologi

UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta

Di Yogyakarta

Assalamu'alaikum wr. wb.

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

Nama : Atifa Nur Nazira

NIM : 22106030043

Judul Skripsi : Sintesis Bioadsorben Magnetit/Nanoselulosa ($\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CNC}$) Dari Pelepah Pohon Salak (*Salacca Zalacca*) Dan Aplikasinya Pada Zat Warna *Congo Red*

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 Sains Kimia.

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

Yogyakarta, 25 Mei 2026

Pembimbing

Didik Krisdiyanto, S.Si., M. Sc

NIP. 19811111 201101 1 007

HALAMAN MOTTO

“Karena sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan” (Quran Surat Al-Insyirah : 6)

“Barang siapa bertakwa kepada Allah niscaya Dia akan membukakan jalan keluar baginya” (Quran Surat At-Talaq : 2)

“Dunia jahat dan kau kalah? Lihatlah telapak tanganmu. Ayah selalu menempa tangan itu agar tak menyerah. Ibu tak henti memapah tangan itu untuk berdoa. Bangkitlah.” J.S. Khairen

“Jika jalannya terlihat terlalu mudah, mungkin kita berada di jalan yang salah,” Monkey D. Luffy



STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

HALAMAN PERSEMBAHAN

Bismillahirrahmanirrahim dengan memanjatkan puji syukur kepada Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya serta tidak lupa sholawat dan salam kepada Nabi Muhammad SAW, karya ini penulis persembahkan untuk:

- Keluarga, Alm Bapak Maryoto yang selama hidupnya telah mendidik dan memberikan kasih sayang penuh kepada putrinya, Ibu Wuryaningsih yang telah berjuang, bertahan, dan mendoakan sejauh ini untuk anak-anaknya, dan Kakak Amalia yang telah memberikan dukungan moral maupun material.
- Untuk almamater tercinta yang telah menjadi tempat belajar, berproses, dan bertumbuh penulis.

Program Studi Kimia Fakultas Sains dan Teknologi
UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta



KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puji bagi Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, hidayah dan inayah-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan penelitian dan skripsi yang berjudul “Sintesis Bioadsorben Magnetit/Nanoselulosa dari Pelepah Pohon Salak (*Salacca zalacca*) dan Aplikasinya sebagai Adsorben Zat Warna *Congo Red*” sebagai salah satu persyaratan mencapai gelar Sarjana Sains Program Studi Kimia Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga.

Penulis menyadari dalam penyusunan skripsi ini banyak hambatan dan kesulitan dalam prosesnya. Namun, berkat adanya bimbingan, dukungan, dan doa dari berbagai pihak, penyusunan skripsi ini dapat selesai dengan baik. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Prof. Noorhaidi, M.A., M.Phil., Ph.D. selaku Rektor UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.
2. Ibu Prof. Dr. Hj. Khurul Wardati, M.Si. selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.
3. Ibu Prof. Dr. Maya Rahmayanti, M.Si selaku Ketua Program Studi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.
4. Bapak Didik Krisdiyanto, M.Sc selaku Dosen Pembimbing Skripsi yang senantiasa memberikan arahan, bimbingan, nasihat, dan dukungan kepada penulis selama penelitian hingga penyusunan skripsi ini.
5. Bapak dan Ibu dosen Program Studi Kimia Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga yang telah memberikan ilmu selama perkuliahan.
6. Segenap PLP Laboratorium Kimia UIN Sunan Kalijaga, khususnya Bapak Wijayanto, S. Si yang telah membantu dan mengarahkan penulis selama pelaksanaan penelitian.
7. Segenap keluarga tersayang, Alm Bapak Maryoto yang telah menanamkan semangat dan pantang menyerah sejak kecil, Ibu Wuryaningsih dan Saudara Kandung Amalia Nur Fathaniah yang telah memberikan dukungan dan doa demi kelancaran penyusunan skripsi ini.
8. Rekan penelitian dan satu bimbingan, Yumroh Dwi Utami dan Cindy Marsella Husen yang telah menjadi teman berproses dan belajar bersama yang baik selama penelitian.

9. Teman dan sahabat satu jurusan, Yumroh, Abel, Andhini, Gishella, Salisia, Rahma, Sitha, Ira, Wawa, Eris, Annisa dan Hella yang telah menjadi teman saling mendukung dan tempat berdiskusi yang asik.
10. Teman dan sahabat “Family Tantrum”, Abel, Eris, Fanesa, Zunan, Ali, Heru, dan Harkim yang telah menjadi tempat tentram untuk bercerita serta memberikan dukungan penuh selama penulisan skripsi dan selama perkuliahan.
11. Teman-teman Xenon Kimia angkatan 2022 yang telah berjuang dan kebersamai selama perkuliahan.
12. Penulis sendiri yang telah berjuang, bertahan, dan menyelesaikan skripsi ini.
13. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu atas bantuan selama penyelesaian penulisan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa penulisan skripsi ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun. Demikian, penulis berharap skripsi ini dapat memberikan wawasan dan manfaat bagi perkembangan ilmu, khususnya kimia.

Penulis

Atifa Nur Nazira



STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN	ii
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI	iii
SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR.....	iv
HALAMAN MOTTO	v
HALAMAN PERSEMBAHAN	vi
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xv
ABSTRAK	xvi
ABSTRACT	xvii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
A. Latar Belakang	1
B. Batasan Masalah.....	4
C. Rumusan Masalah	5
D. Tujuan Penelitian	5
E. Manfaat Penelitian.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI.....	7
A. Tinjauan Pustaka.....	7
B. Landasan Teori.....	11
1. Pelepah Pohon Salak	11
2. Nanoselulosa	12
3. Magnetit	13
4. Isolasi α -selulosa	14
5. Metode Hidrolisis Asam	15

6.	Kopresipitasi <i>in situ</i>	17
7.	Magnetit/Nanoselulosa.....	19
8.	<i>Congo red</i>	20
9.	Adsorpsi	21
10.	<i>X-ray Diffraction</i> (XRD).....	24
11.	<i>Fourier Transform Infra Red</i> (FTIR).....	26
12.	<i>Scanning Electro Microscopy</i> (SEM)	27
13.	<i>Gas Sorption Analyzer</i> (GSA)	28
14.	Spektroskopi UV-Vis	33
C.	Kerangka Berpikir dan Hipotesis Penelitian	34
BAB III METODE PENELITIAN		37
A.	Waktu dan Tempat Penelitian.....	37
B.	Alat-alat Penelitian	37
C.	Bahan-bahan Penelitian	37
D.	Prosedur Kerja Penelitian	38
E.	Teknik Analisis Data	43
BAB IV PEMBAHASAN.....		45
A.	Karakterisasi FTIR Fe ₃ O ₄ /nanoselulosa	45
B.	Karakterisasi XRD Fe ₃ O ₄ /nanoselulosa	52
C.	Karakterisasi SEM Fe ₃ O ₄ /nanoselulosa	56
D.	Karakterisasi GSA Fe ₃ O ₄ /nanoselulosa.....	59
E.	Penentuan Gelombang Maksimum Zat Warna Congo red dan Pembuatan Kurva Standar Larutan Zat Warna Congo red.....	67
F.	Analisis Pengaruh pH Larutan terhadap Proses Adsorpsi Congo red oleh Fe ₃ O ₄ /nanoselulosa	69
G.	Pengaruh Massa Adsorben terhadap Proses Adsorpsi Congo red oleh Fe ₃ O ₄ /nanoselulosa	74

H.	Kinetika Adsorpsi Zat Warna <i>Congo red</i> oleh Fe_3O_4 /nanoselulosa.	75
I.	Isoterm Adsorpsi Zat Warna <i>Congo red</i> oleh Fe_3O_4 /nanoselulosa ..	81
BAB V KESIMPULAN		88
A.	Kesimpulan.....	88
B.	Saran	89
DAFTAR PUSTAKA		90
LAMPIRAN.....		109



DAFTAR GAMBAR

Gambar II. 1. Struktur selulosa (Mulyadi, 2019).....	12
Gambar II. 2. Mekanisme pemutusan ikatan Lignin dan selulosa dengan nukelofil OH (Lestari, 2018).....	15
Gambar II. 3. Hidrolisis asam menghilangkan bagian amorf nanoselulosa (Peng dkk., 2011).....	17
Gambar II. 4. Reaksi Kopresipitasi in situ (Kang dkk., 2024).....	18
Gambar II. 5. Struktur zat warna congo red (Siddiqui dkk., 2023).....	20
Gambar II. 6. Morfologi nanoselulosa/magnetit berdasarkan analisis SEM.....	28
Gambar II. 7. Klasifikasi isoterm adsorpsi berdasarkan IUPAC	29
Gambar IV. 1. Spektra FTIR Nanoselulosa pelepah salak, magnetit kontrol. dan magnetit/selulosa (Fe_3O_4 /nanoselulosa)	46
Gambar IV. 2. Interaksi antara magnetit dan nanoselulosa	50
Gambar IV. 3. Pola difraktogram nanoselulosa, magnetit (Fe_3O_4), dan komposit magnetit/nanoselulosa variasi 25, 50, dan 75 mL.....	52
Gambar IV. 4. Morfologi magnetit/nanoselulosa (Fe_3O_4 /nanoselulosa) 25 ml pada perbesaran 10.000x	57
Gambar IV. 5. Distribusi ukuran agregat Fe_3O_4 /nanoselulosa 25 ml	58
Gambar IV. 6. Distribusi ukuran partikel magnetit/nanoselulosa (Fe_3O_4 /nanoselulosa).....	58
Gambar IV. 7. Grafik Isoterm Fe_3O_4 /nanoselulosa variasi 25 mL	61
Gambar IV. 8. Grafik distribusi ukuran pori Fe_3O_4 /nanoselulosa variasi 25 mL.....	65
Gambar IV. 9. Kurva gelombang maksimum congo red	68
Gambar IV. 10. Kurva kalibrasi standar larutan congo red	68
Gambar IV. 11. Kurva analisis pHpzc Fe_3O_4 /nanoselulosa.....	69

Gambar IV. 12. Pengaruh pH terhadap adsorpsi <i>congo red</i> oleh Fe_3O_4 /nanoselulosa.....	71
Gambar IV. 13. Interaksi <i>congo red</i> dengan magnetit/nanoselulosa (a) Interaksi elektrostatik, (b) Interaksi tolak menolak, (c) Interaksi ikatan hidrogen	73
Gambar IV. 14. Pengaruh massa terhadap adsorpsi <i>congo red</i> oleh Fe_3O_4 /nanosleulosa.....	74
Gambar IV. 15. Pengaruh waktu kontak terhadap adsorpsi <i>congo red</i> oleh Fe_3O_4 /nanoselulosa.....	76
Gambar IV. 16. Kurva kinetika adsorpsi <i>congo red</i> oleh Fe_3O_4 /nanoselulosa model PFO Lagergen	77
Gambar IV. 17. Kurva kinetika adsorpsi <i>congo red</i> oleh Fe_3O_4 /nanoselulosa model PSO Ho.....	78
Gambar IV. 18. Pengaruh konsentrasi awal terhadap adsopsi <i>congo red</i> oleh Fe_3O_4 /nanoselulosa.....	82
Gambar IV. 19. Kurva isoterm model Langmuir <i>congo red</i> oleh Fe_3O_4 /nanoselulosa.....	83
Gambar IV. 20. Kurva isoterm model Freundlich <i>congo red</i> oleh Fe_3O_4 /nanoselulosa.....	83

DAFTAR TABEL

Tabel IV. 1. Bilangan Gelombang FTIR nanoselulosa, Fe_3O_4 , dan komposit Fe_3O_4 /nanoselulosa 25, 50, dan 75 mL.....	48
Tabel IV. 2. Sudut 2θ magnetit dan magnetit/nanoselulosa (Fe_3O_4 /nanoselulosa)	54
Tabel IV. 3. Tabel Perbandingan sifat luas permukaan dan porositas komposit Fe_3O_4	60
Tabel IV. 4. Luas permukaan mikropori dan eksternal berdasarkan t-plot.....	64
Tabel IV. 5. Parameter kinetika adsorpsi <i>congo red</i> oleh Fe_3O_4 /nanoselulosa.....	79
Tabel IV. 6. Parameter isoterm adsorpsi <i>congo red</i> oleh Fe_3O_4 /nanoselulosa.....	84

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Perhitungan pembuatan larutan pada sintesis $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CNC}$	109
Lampiran 2. Hasil karakterisasi FTIR	111
Lampiran 3. Perhitungan ukuran kristal dan kristalinitas $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CNC}$	116
Lampiran 4. Data morfologi SEM	120
Lampiran 5. Data perhitungan analisis GSA (Gas Sorption Analyzer)	121
Lampiran 6. Data perhitungan kurva kalibrasi standar <i>congo red</i>	125
Lampiran 7. Data perhitungan pengaruh massa adsorben terhadap adsorpsi zat warna <i>congo red</i> dengan $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CNC}$	127
Lampiran 8. Data perhitungan kinetika adsorpsi zat warna <i>congo red</i> dengan $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CNC}$	127
Lampiran 9. Data perhitungan isoterm adsorpsi zat warna <i>congo red</i> dengan $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CNC}$	129
Lampiran 10. Dokumentasi penelitian	133

ABSTRAK
SINTESIS BIOADSORBEN MAGNETIT/NANOSELULOSA
DARI PELEPAH POHON SALAK (*Salacca zalacca*) DAN
APLIKASINYA SEBAGAI ADSORBEN ZAT WARNA *CONGO*
RED

Oleh :
Atifa Nur Nazira
22106030043

Pembimbing :
Didik Krisdiyanti, S. Si., M. Sc

Penelitian ini telah dilakukan sintesis bioadsorben magnetit/nanoselulosa dari pelepah salak dan aplikasinya sebagai adsorben zat warna *congo red*. Penelitian ini bertujuan mensintesis, mengkarakterisasi, dan mengkaji kinerja adsorben magnetit/nanoselulosa dari pelepah pohon salak. Metode sintesis nanoselulosa dilakukan secara hidrolisis asam dan sintesis Fe_3O_4 /nanoselulosa secara kopresipitasi *in situ* dengan variasi nanoselulosa 25, 50, dan 75 mL yang dikarakterisasi dengan FTIR, XRD, SEM, dan GSA. Studi adsorpsi zat warna *congo red* dikaji kinetika, isoterm, analisis pH, serta analisis massa. Fe_3O_4 /nanoselulosa hasil sintesis yang dikarakterisasi menggunakan FTIR menunjukkan ketiga variasi terdapat vibrasi ulur -OH nanoselulosa pada bilangan gelombang 3488 dan OH tekuk pada 1642 cm^{-1} serta pita khas Fe-O pada bilangan gelombang 582-584 cm^{-1} . Hasil difraktogram XRD ketiga variasi komposit menunjukkan kesesuaian dengan standar material Fe_3O_4 (JCPDS No. 19-0629) pada 2θ 30° (220), 35° (311), 43° (400), 57° (511), 62° (440) yang sesuai dengan struktur oksida besi magnetik kristalin. Hasil pengukuran kristal yaitu 14,75 nm; 15,44 nm; 13,96 nm dan derajat kristalinitas yaitu 38,56%; 43,04%; dan 52,55%. Hasil SEM menunjukkan partikel magnetit kurang terdistribusi merata karena rendahnya kandungan nanoselulosa. Hasil analisis permukaan menunjukkan luas permukaan sebesar 49,91 m^2/g , volume pori 0,2155 cc/g dan rata-rata ukuran pori 8,63 nm. Hasil uji aktivitas adsorpsi menunjukkan kinerja adsorben efektif di bawah pH_{pzc} dan semakin banyak jumlah adsorben semakin tinggi persenitas adsorpsi. Adsorpsi *congo red* oleh Fe_3O_4 /nanoselulosa mengikuti model kinetika orde dua semu (PSO) Ho dan model isoterm adsorpsi Langmuir. Selama proses adsorpsi, interaksi antara Fe_3O_4 /nanoselulosa dan *congo red* diduga melalui mekanisme elektrostatik.

Kata kunci : *adsorpsi, congo red, kopresipitasi, magnetit, nanoselulosa*

ABSTRACT
SYNTHESIS OF MAGNETITE/NANOCELLULOSE FROM
SALAK (*Salacca zalacca*) FRONDS AND ITS APPLICATION
FOR CONGO RED DYE REMOVAL

By :
Atifa Nur Nazira
22106030043

Adviser :
Didik Krisdiyanti, S. Si., M. Sc

This study reports the synthesis of a magnetite/nanocellulose bioadsorbent derived from salak fronds and its application as an adsorbent for Congo red dye. The objectives of this research were to synthesize, characterize, and evaluate the performance of magnetite/nanocellulose adsorbents derived from salak fronds. Nanocellulose was synthesized using an acid hydrolysis method, while Fe₃O₄/nanocellulose was prepared via in situ co-precipitation with variations of nanocellulose volume (25, 50, and 75 mL). The obtained materials were characterized using FTIR, XRD, SEM, and GSA. The adsorption study of Congo red dye included kinetic analysis, isotherm modeling, as well as the effects of pH and adsorbent mass. FTIR characterization of the synthesized Fe₃O₄/nanocellulose showed that all variations exhibited O–H stretching vibrations of nanocellulose at 3488 cm⁻¹ and O–H bending at 1642 cm⁻¹, along with a characteristic Fe–O band at 582–584 cm⁻¹. XRD diffractograms of all composite variations were consistent with the standard Fe₃O₄ material (JCPDS No. 19-0629), showing diffraction peaks at 2θ values of 30° (220), 35° (311), 43° (400), 57° (511), and 62° (440), confirming the crystalline structure of magnetic iron oxide. The crystallite sizes were 14.75 nm, 15.44 nm, and 13.96 nm, with degrees of crystallinity of 38.56%, 43.04%, and 52.55%, respectively. SEM analysis indicated that magnetite particles were not uniformly distributed due to the low nanocellulose content. Surface analysis revealed a specific surface area of 49.91 m²/g, a pore volume of 0.2155 cc/g, and an average pore size of 8.63 nm. Adsorption activity tests showed that the adsorbent performed effectively at pH values below pH_{pzc}, and that increasing the adsorbent mass improved the adsorption percentage. The adsorption of Congo red by Fe₃O₄/nanocellulose followed the pseudo-second-order (PSO) kinetic model proposed by Ho and the Langmuir adsorption isotherm model. During the adsorption process, the interaction between Fe₃O₄/nanocellulose and Congo red is presumed to occur through an electrostatic mechanism.

Keywords: *adsorption, Congo red, co-precipitation, magnetite, nanocellulose*

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Industrialisasi tekstil menjadi kontributor yang signifikan terhadap polusi air karena pelepasan jenis limbah pewarna sintesis khususnya zat warna azo yang bersifat kompleks, karsinogenik, dan tahan terhadap degradasi lingkungan (Oladoye dkk., 2024). Pewarna azo seperti *congo red* dengan karakteristik ikatan - azo terkonjugasi dan resonansi membuat pewarna ini sangat stabil terhadap cahaya dan lingkungan yang agresif serta bersifat karsinogenik (Harja dkk., 2022; Lade dkk., 2015). Pewarna *congo red* sangat beracun, menimbulkan risiko signifikan bagi kehidupan perairan ketika mencemari sistem perairan. Oleh karena itu, diperlukan langkah-langkah efektif untuk mengurangi dampak lingkungan dari limbahnya (Siddiqui dkk., 2023).

Salah satu metode yang menjanjikan adalah adsorpsi karena pengaplikasiannya yang mudah, efektivitas yang tinggi, dan tidak memberikan potensi bahaya (Fauzi dkk., 2021). Teknologi adsorpsi sangat bergantung pada jenis material adsorben yang digunakan. Magnetit (Fe_3O_4) menjadi salah satu bahan adsorben yang menarik karena memiliki sifat superparamagnetik, luas permukaannya yang tinggi, kompatibilitas yang baik, toksisitas rendah, dan magnetisasi saturasi tinggi terhadap medan magnet eksternal. Namun, sintesis nanomaterial magnetit memiliki tantangan dalam proses penyiapan yang dapat menyebabkan perubahan ukuran, aglomerasi berat, dispersi yang buruk, kristalisasi yang tidak memadai, serta respon magnetik yang rendah (Amiralian dkk., 2020).

Di sisi lain, nanoselulosa sebagai material berbasis biomassa memiliki potensi besar sebagai adsorben yang dapat diisolasi dari limbah biomassa lokal, seperti pelepah pohon salak dengan kandungan tinggi selulosa sebesar 35,32%. Nanoselulosa memiliki karakteristik unggul karena luas permukaan tinggi, kekakuan mekanis tinggi, derajat kristalin tinggi, stabilitas dalam air, dan tegangan permukaan tinggi sehingga mendukung penggunaannya dalam pengolahan air limbah (Barhoum dkk., 2019). Nanoselulosa memiliki kemampuan dispersi yang besar dalam air sehingga dapat mengadsorpsi adsorbat dengan baik (Pham dkk., 2023a). Namun, stabilitas dispersi yang tinggi dari partikel ini memunculkan masalah dalam tahap pemisahan adsorben dari sistem air (Salama dkk., 2021).

Berdasarkan keterbatasan masing-masing material, pengembangan komposit magnetit/nanoselulosa menjadi solusi dengan menggabungkan keunggulan keduanya. Sintesis magnetit secara *in situ* pada nanoselulosa akan meningkatkan gugus fungsi -OH sebagai situs nukleasi sehingga memungkinkan pembentukan nanopartikel yang terdistribusi merata dan mengurangi aglomerasi. Penambahan nanoselulosa akan membentuk partikel dengan ukuran yang lebih kecil (Yang dkk., 2025; Amiralian *et al.*, 2020). Material nanokomposit Fe₃O₄/nanoselulosa responsif terhadap medan magnet dapat diaplikasikan secara luas, seperti pemurnian limbah yang memungkinkan material ini dipisahkan dan digunakan kembali, sehingga menurunkan biaya pengolahan air limbah (Alvarez dkk., 2018).

Beberapa penelitian telah melaporkan sintesis komposit nanoselulosa/magnetit secara kopresipitasi *in situ*. Sebagian besar penelitian masih berfokus pada karakterisasi terhadap pengaruh rasio jumlah nanoselulosa

(Janićijević dkk., 2022), kajian adsorpsi logam berat (Pham dkk., 2023b) dan degradasi zat warna (Amiralian dkk., 2020). Namun, kajian spesifik terhadap kinerja adsorpsi nanoselulosa/magnetit terhadap zat warna *congo red* masih terbatas. Selain itu, beberapa penelitian sebelumnya masih menunjukkan aglomerasi magnetit yang akan mempengaruhi distribusi partikel, luas permukaan adsorben, dan efektivitas adsorpsi.

Oleh karena itu, penelitian ini akan mengembangkan komposit magnetit/nanoselulosa dari pelepah salak, mengkaji lebih lanjut sifat permukaannya menggunakan instrumen GSA dan mengkaji fenomena adsorpsinya terhadap zat warna *congo red*. Sintesis komposit bioadsorben ini memanfaatkan nanoselulosa dari limbah pelepah pohon salak dengan prekursor magnetit yaitu $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dan $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ melalui kopresipitasi *in situ*. Sintesis komposit magnetit secara kopresipitasi *in situ* pada permukaan nanoselulosa akan mencegah aglomerasi partikel magnetit dan memungkinkan distribusi partikel magnetit yang lebih merata. Hal ini diharapkan dapat meningkatkan luas permukaan spesifik dan jumlah situs aktifnya yang akan dibuktikan dengan karakterisasi komposit dengan FTIR, XRD, SEM, dan GSA. Karakterisasi tersebut pada komposit magnetit/nanoselulosa akan memberikan informasi gugus fungsi, struktur kristal, ukuran partikel, dan sifat porositas yang diharapkan memiliki kinerja adsorpsi yang tinggi terhadap zat warna *congo red*. Penentuan kinerja adsorpsi akan dikaji pada kinetika adsorpsi, isoterm adsorpsi, serta analisis pengaruh parameter pH dan massa adsorben terhadap adsorpsi *congo red*. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan material adsorben berbasis biomassa lokal yang ramah lingkungan dan berkelanjutan untuk aplikasi pengolahan air limbah.

B. Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Sintesis magnetit/nanoselulosa dengan metode kopresipitasi menggunakan prekursor $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ dan $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dengan rasio $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ dijaga konstan 2:1.
2. Metode isolasi nanoselulosa dari pelepah pohon salak menggunakan metode hidrolisis asam dan ultrasonikasi.
3. Bioadsorben magnetit/nanoselulosa dikarakterisasi sifat kristalinitas menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD), sifat gugus fungsi menggunakan *Fourier Transform Infrared* (FTIR), sifat morfologi menggunakan *Scanning Electro Microscopy* (SEM), dan sifat luas permukaan menggunakan *Gas Sorption Analyzer* (GSA).
4. Zat warna yang digunakan adalah *congo red* dalam bentuk larutan tunggal.
5. Uji aktivitas untuk mengkaji kinetika, isoterm, serta pengaruh pH dan massa adsorben dilakukan dengan sampel bioadsorben magnetit/nanoselulosa variasi 25 mL.
6. Parameter adsorpsi yang diuji terbatas pada pengaruh waktu kontak (15, 30, 60, 90, dan 120 menit), pengaruh konsentrasi awal zat warna *congo red* (10, 15, 20, 25, dan 30 ppm), pengaruh pH larutan (pH 3, 5, 7, 9) dan massa adsorben (5mg/L, 10 mg/L, dan 15 mg/L).
7. Konsentrasi *congo red* setelah proses adsorpsi dianalisis menggunakan spektrofotometri UV-Vis pada panjang gelombang maksimum *congo red*.

C. Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang akan dikaji berdasarkan pemaparan latar belakang masalah adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana sintesis dan karakterisasi bioadsorben magnetit/nanoselulosa dari pelepah pohon salak menggunakan instrumen XRD, FTIR, SEM, dan GSA?
2. Bagaimana pengaruh variasi pH, jumlah adsorben, waktu kontak, dan konsentrasi zat warna terhadap kemampuan adsorpsi zat warna *congo red* oleh magnetit/nanoselulosa pelepah pohon salak?

D. Tujuan Penelitian

Berdasarkan latar belakang dan rumusan masalah yang telah diuraikan sebelumnya, maka tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mensintesis dan mengkarakterisasi bioadsorben magnetit/nanoselulosa dari pelepah pohon salak dengan instrumen FTIR, SEM, XRD, dan GSA.
2. Mengkaji pengaruh pH, pengaruh massa adsorben, kinetika adsorpsi, dan isoterm pada aktivitas adsorpsi zat warna *congo red* oleh magnetit/nanoselulosa dari pelepah salak.

E. Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah mengembangkan ilmu pengetahuan mengenai karakterisasi dan uji aktivitas magnetit/nanoselulosa dari limbah pelepah pohon salak sebagai adsorben. Penelitian ini menyediakan informasi magnetit Fe_3O_4 /nanoselulosa sebagai adsorben berdasarkan analisis FTIR, XRD, SEM, dan GSA. Informasi hasil karakterisasi gugus fungsi, struktur kristalinitas, dan morfologi adsorben akan memberikan pengaruh pada sifat luas permukaan serta porositas yang diharapkan dapat meningkatkan kinerja adsorpsi. Penelitian ini juga diharapkan dapat mengkaji kinerja adsorpsi melalui kinetika adsorpsi, isoterm

adsorpsi, pengaruh pH, serta pengaruh massa adsorben terhadap aktivitas bioadsorben magnetit/nanoselulosa dari pelepah pohon salak untuk mengetahui fenomena adsorpsi limbah zat warna *congo red*. Penelitian ini juga memanfaatkan limbah pelepah pohon salak yang belum banyak digunakan untuk mendukung pengembangan teknologi pengolahan air limbah yang berkelanjutan.



BAB V KESIMPULAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa :

1. Hasil karakterisasi menunjukkan magnetit berhasil disintesis di permukaan nanoselulosa. Karakterisasi FTIR pada 25 mL, 50 mL, dan 75 mL memberikan hasil serapan khas magnetit pada bilangan gelombang 584 cm^{-1} dan gugus fungsi nanoselulosa dengan pergeseran pada bilangan gelombang 3400 cm^{-1} yang menunjukkan adanya interaksi ikatan hidrogen antara gugus -OH selulosa dengan magnetit. Puncak difraksi pada XRD sesuai dengan data JCPDS No. 19-0629 dengan ukuran kristal 14,75 nm; 15,44 nm; 13,96 nm dan kristalinitas 38,56%; 43,04%; 52,55%. Hasil SEM magnetit/nanoselulosa 25 mL menunjukkan permukaan dan ukuran yang terdistribusi kurang merata dan adanya agregasi. Hasil analisis GSA menunjukkan luas permukaan $49,91\text{ m}^2/\text{g}$, rata-rata volume pori $0,2155\text{ cc/g}$, dan rata-rata ukuran pori 8,63 nm.
2. Berdasarkan uji aktivitas adsorpsi Fe_3O_4 /nanoselulosa pada larutan *congo red*, semakin besar massa adsorben maka semakin tinggi persen teradsorpsinya. Interaksi adsorben dan adsorbat terjadi secara elektrostatis dan ikatan hidrogen yang efektif pada pH dibawah pH_{pzc} adsorben 5,69. Hal ini didukung oleh kajian kinetika adsorpsi *Pseudo Second Orde* Ho dan isoterm adsorpsi Langmuir yang menggambarkan lapisan tunggal/*monolayer* melalui interaksi kemisorpsi. Kinetika adsorpsi mengikuti model *Pseudo Second Orde* Ho dengan nilai korelasi 0,9884; nilai q_e 44,64 mg/g; dan konstanta laju adsorpsi

(h) sebesar 0,00156 g/mg.min. Isoterm adsorpsi penelitian ini mengikuti model Isoterm Langmuir dengan nilai korelasi 0,9848; nilai konstanta langmuir K_L sebesar 0,802 L/mol, kapasitas adsorpsi lapisan tunggal maksimum sebesar nilai 43,103 mg/g, yang mengindikasikan proses adsorpsi berlangsung secara kemisorpsi monolayer.

B. Saran

1. Melakukan karakterisasi SEM dan GSA pada seluruh variasi untuk mengetahui pengaruh jumlah nanoselusa terhadap distribusi partikel, luas permukaan, volume pori, dan ukuran pori adsorben magnetit.
2. Uji aktivitas adsorpsi Fe_3O_4 /nanoselulosa dilakukan lebih lanjut pada limbah zat warna untuk melihat secara aplikatif kemampuan adsorben dalam menyerap limbah tekstil.

DAFTAR PUSTAKA

- Adamson, A. W., & Gast, A. P. (1967). *Physical Chemistry of Surfaces*. John Wiley & Sons.
- Alanazi, A. K. (2022). An Innovative Preparation, Characterization, and Optimization of Nanocellulose Fibers (NCF) Using Ultrasonic Waves. *Polymers*, 14(10), 1930. <https://doi.org/10.3390/polym14101930>
- Alarifi, I. M., Al-Ghamdi, Y. O., Darwesh, R., Ansari, M. O., & Uddin, M. K. (2021). Properties and application of MoS₂ nanopowder: Characterization, Congo red dye adsorption, and optimization. *Journal of Materials Research and Technology*, 13, 1169–1180. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.05.028>
- Ali, H. R., Nassar, H. N., & El-Gendy, N. Sh. (2017). Green synthesis of α -Fe₂O₃ using Citrus reticulum peels extract and water decontamination from different organic pollutants. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 39(13), 1425–1434. <https://doi.org/10.1080/15567036.2017.1336818>
- Al-Sabagh, A. M., Moustafa, Y. M., Hamdy, A., Killa, H. M., Ghanem, R. T. M., & Morsi, R. E. (2018). Preparation and characterization of sulfonated polystyrene/magnetite nanocomposites for organic dye adsorption. *Egyptian Journal of Petroleum*, 27(3), 403–413. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2017.07.004>
- Alvarez, P. J. J., Chan, C. K., Elimelech, M., Halas, N. J., & Villagrán, D. (2018). Emerging opportunities for nanotechnology to enhance water security. *Nature Nanotechnology*, 13(8), 634–641. <https://doi.org/10.1038/s41565-018-0203-2>

- Amirah Badi, N. S., Zul Hilmey Makmud, M., Se Mun, C., Jamain, Z., Asik, J., & Mohd Amin, K. N. (2024). Synthesis and characterization of cellulose nanocrystal derived from paper as nanofiller for polymer insulation materials. *Materials Today: Proceedings*, 97, 69–74. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.12.059>
- Amiralian, N., Mustapic, M., Hossain, Md. S. A., Wang, C., Konarova, M., Tang, J., Na, J., Khan, A., & Rowan, A. (2020). Magnetic nanocellulose: A potential material for removal of dye from water. *Journal of Hazardous Materials*, 394, 122571. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122571>
- Anggriani, U. M., Hasan, A., & Purnamasari, I. (2021). *KINETIKA ADSORPSI KARBON AKTIF DALAM PENURUNAN KONSENTRASI LOGAM TEMBAGA (Cu) DAN TIMBAL (Pb)*. 12(02).
- Arslan, R., Tozluoğlu, A., Sertkaya, S., FiDan, H., & Küçük, S. (2021). Atık sularda boya giderimi için fonksiyonellenmiş nanoselüloz esaslı adsorbanlar. *Artvin Çoruh Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 22(1), 148–160. <https://doi.org/10.17474/artvinofd.830601>
- Bagbi, Y., Sarswat, A., Mohan, D., Pandey, A., & Solanki, P. R. (2017). Lead and Chromium Adsorption from Water using L-Cysteine Functionalized Magnetite (Fe₃O₄) Nanoparticles. *Scientific Reports*, 7. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-03380-x>
- Bardestani, R., Patience, G. S., & Kaliaguine, S. (2019). Experimental methods in chemical engineering: Specific surface area and pore size distribution

- measurements—BET, BJH, and DFT. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 97(11), 2781–2791. <https://doi.org/10.1002/cjce.23632>
- Barhoum, A., Pal, K., Rahier, H., Uludag, H., Kim, I. S., & Bechelany, M. (2019). Nanofibers as new-generation materials: From spinning and nano-spinning fabrication techniques to emerging applications. *Applied Materials Today*, 17, 1–35. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2019.06.015>
- Bassyouni, M., Zoromba, M. S., Aziz, M. A., & Mosly, I. (2022). Extraction of Nanocellulose for Eco-Friendly Biocomposite Adsorbent for Wastewater Treatment. *Polymers, Polymers for Energy and Environmental Applications*, 14(9), 1852. <https://doi.org/10.3390/polym14091852>
- Bath, M., Ranjitha, M. T., Sv, M., & Nayak, R. (2024). Removal of Congo red, Patton Reeder's, and Rhodamine B Dyes from Aqueous Solution Using Tabebuia rosea Peel as Natural Adsorbent. *ES Food and Agroforestry*, 16(1143). <https://doi.org/10.30919/esfa1143>
- Bernet, T., Canu, C., & Jackson, G. (2026). Revisiting the Classification of Physisorption Isotherms with Classical Density Functional Theory. *The Journal of Physical Chemistry B*, 130(6), 1933–1949. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcb.5c08129>
- Caf, F. (2022). Biogenic Synthesis of Iron Oxide Nanoparticle Using Padina Pavonica Extract: Application for Photocatalytic Degradation of Congo Red Dye, Neurotoxicity and Antioxidant Activity. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 23(2). <https://doi.org/10.4194/TRJFAS21398>

- Cai, C., Sun, Y., Chen, Y., Wei, Z., Wang, Y., Chen, F., Cai, W., Ji, J., Ji, Y., & Fu, Y. (2023). Large scalable, ultrathin and self-cleaning cellulose aerogel film for daytime radiative cooling. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 8(4), 421–429. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2023.06.004>
- Charurvedi, & Dave, P. (2012). *Microscopy in Nanotechnology*. Formatex.
- Chauhan, A. (2012). FTIR: A Novel Bio-Analytical Technique. *Journal of Analytical & Bioanalytical Techniques*, 03(05). <https://doi.org/10.4172/2155-9872.1000e107>
- Devi, D., Astutik, D., Cahyanto, M. N., & Djaafar, T. F. (2019). KANDUNGAN LIGNIN, HEMISELULOSA DAN SELULOSA PELEPAH SALAK PADA PERLAKUAN AWAL SECARA FISIK KIMIA DAN BIOLOGI. *Jurnal Ilmiah Rekayasa Pertanian dan Biosistem*, 7(2), 273–282. <https://doi.org/10.29303/jrpb.v7i2.148>
- Effendi, F., Elvia, R., & Amir, H. (2018). PREPARASI DAN KARAKTERISASI MIKROKRISTALIN SELULOSA (MCC) BERBAHAN BAKU TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT (TKKS). *Alotrop*, 2(1). <https://doi.org/10.33369/atp.v2i1.4672>
- Fadhila, D. A. N., Nugroho, S. A., Perwitasari, D. S., Aziz, A., Nugraha, R. E., Jovita, S., Utami, D. I., & Damayanti, N. (2024). *Studi Kinetika Adsorpsi Limbah Zat Warna Metilen Biru Menggunakan Grafen Oksida dari Karbon Limbah Baterai*. 11(2), 83–92. <https://doi.org/https://doi.org/10.21776/ub.jsal.2024.012.02.4>

- Fauzi, M. D. N., Nasra, E., Amran, A., & Khair, M. (2021). Pengaruh pH dan Konsentrasi Terhadap Penyerapan Zat Warna Rhodamin B Menggunakan Karbon Aktif Kulit Pisang Kepok (*Musa balbisiana* Colla). *Jurnal Periodic Jurusan Kimia UNP*, 10(2), 51. <https://doi.org/10.24036/p.v10i2.112375>
- Fitriana, L., & Hidayah, M. (2018). Sintesis Nanoselulosa dari Batang Bambu menggunakan Hidrolisis Asam dan Gelombang Ultrasonik sebagai adsorben Logam Kadmium(II) dalam Limbah Industri Elektroplating. *Seminar Nasional Teknik Kimia EcoFest*, 212–219.
- Furozi, N., Fajriati, I., Artsanti, P., & Krisdiyanto, D. (2020). Adsorpsi Zat Warna Rhodamin B Dan Congo Red Dengan Silika Gel Dari Limbah Ampas Tebu (*Saccharum Officinarum*). *Indonesian Journal of Materials Chemistry*, 2(2), 53–59.
- Gómez, N. T., Nava, O., Argueta-Figueroa, L., García-Contreras, R., Baeza-Barrera, A., & Vilchis-Nestor, A. R. (2019). Shape Tuning of Magnetite Nanoparticles Obtained by Hydrothermal Synthesis: Effect of Temperature. *Journal of Nanomaterials*, 2019, 1–15. <https://doi.org/10.1155/2019/7921273>
- Gong, J., Li, J., Xu, J., Xiang, Z., & Mo, L. (2017). Research on Cellulose Nnaocrystals Produced from Cellulose Sources with Various Polymorphs. *The Royal Society of Chemistry*, 7, 33486–33493. <https://doi.org/10.1039/c7ra06222b>
- Hakim, L., Dirgantara, M., & Nawir, M. (2019). Karakterisasi Struktur Material Pasir Bongkahan Galian Golongan C Dengan Menggunakan X-Ray

- Difraction (X-RD) Di Kota Palangkaraya. *Jurnal Jejaring Matematika dan Sains*, 1(1), 44–51. <https://doi.org/10.36873/jjms.v1i1.136>
- Harahap, M. F., Lubis, R. A., Nurmi, A., & Harahap, D. E. (2020). *Metal Content Of Midrib Sap Flour Salak Tree (Tgps) As A Thickening Agent*. 1288–1293.
- Harja, M., Buema, G., & Bucur, D. (2022). Recent advances in removal of Congo Red dye by adsorption using an industrial waste. *Scientific Reports*, 12(1), 6087. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-10093-3>
- Hasan, M. J., Petrie, F. A., Johnson, A. E., Peltan, J., Gannon, M., Busch, R. T., Leontsev, S. O., Vasquez, E. S., & Urena-Benavides, E. E. (2021). Magnetically induced demulsification of water and castor oil dispersions stabilized by Fe₃O₄-coated cellulose nanocrystals. *Cellulose*, 28(8), 4807–4823. <https://doi.org/10.1007/s10570-021-03813-x>
- Herlina, R., & Masri, M. (2017). *Studi Adsorpsi Dedak Padi terhadap Zat Warna Congo Red di Kabupaten Wajo Adsorption Study of Rice Bran against Congo Red Dyes in Wajo*.
- Hidayat, B., Sebayang, N. U. W., Jamilah, J., & Mahardika, A. (2025). Brunauer-Emmett-Teller, Fourier-transform infrared, and scanning-electron-microscope analysis of biochar from marine organic waste. *SAINS TANAH - Journal of Soil Science and Agroclimatology*, 22(1), 127. <https://doi.org/10.20961/stjssa.v22i1.93314>
- Hou, L., Liang, Q., & Wang, F. (2020). Mechanisms that control the adsorption–desorption behavior of phosphate on magnetite nanoparticles: The role of

- particle size and surface chemistry characteristics. *RSC Advances*, 10(4), 2378–2388. <https://doi.org/10.1039/C9RA08517C>
- Ibrahim, I., Ahmad Farid, M. A., & Andou, Y. (2025). Novel one-step dilute acid-assisted hydrothermal delignification using dilute HNO₃ for facile high-purity cellulose extraction from oil palm fronds (OPF). *Biomass and Bioenergy*, 201, 107862. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.107862>
- Jakfar. (2023). *Kajian Pemanfaatan Adsorben Ramah Lingkungan Pada Adsorpsi Logam Berat Berbahaya Serta Optimasi*. Syiah Kuala University Press.
- Janićjević, A., Pavlović, V. P., Kovačević, D., Perić, M., Vlahović, B., Pavlović, V. B., & Filipović, S. (2022). Structural Characterization of Nanocellulose/Fe₃O₄ Hybrid Nanomaterials. *Polymers*, 14(9), 1819. <https://doi.org/10.3390/polym14091819>
- Krishnan, A., Paul, S., Phiri, R., Srisuk, R., Kumar Singh, M., Palaniappan, S. K., Rangappa, S. M., Dominic C.D, M., Ajithkumar, T. G., & Siengchin, S. (2026). Sustainable Nanocellulose Extraction from *Salacca zalacca* Peel Using Chlorine-Free and Low-Acid Treatments. *ACS Omega*, 11(8), 13253–13267. <https://doi.org/10.1021/acsomega.5c09694>
- Kumbhar, P., Narale, D., Bhosale, R., Jambhale, C., & Kim, J.-H. (2022). Synthesis of tea waste/Fe₃O₄ magnetic composite (TWMC) for efficient adsorption of crystal violet dye: Isotherm, kinetic and thermodynamic studies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10.
- Kurniawan, T. W., Panjaitan, S. D., & Sitorus, B. (2016). *PEMODELAN KINETIKA DAN ISOTHERM ADSORPSI ION LOGAM MERKURI*

MENGGUNAKAN KARBON AKTIF DARI TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT.

- Lade, H., Govindwar, S., & Paul, D. (2015). Mineralization and Detoxification of the Carcinogenic Azo Dye Congo Red and Real Textile Effluent by a Polyurethane Foam Immobilized Microbial Consortium in an Upflow Column Bioreactor. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(6), 6894–6918. <https://doi.org/10.3390/ijerph120606894>
- Lahiri, N., Song, D., Zhang, X., Huang, X., Stoerzinger, K. A., Carvalho, O. Q., Adiga, P. P., Blum, M., & Rosso, K. M. (2023). Interplay between Facets and Defects during the Dissociative and Molecular Adsorption of Water on Metal Oxide Surfaces. *Journal of the American Chemical Society*, 145(5), 2930–2940. <https://doi.org/10.1021/jacs.2c11291>
- Lelekakis, N., Wijaya, J., Martin, D., & Susa, D. (2014). The effect of acid accumulation in power-transformer oil on the aging rate of paper insulation. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 30(3), 19–26. <https://doi.org/10.1109/MEL.2014.6804738>
- Lestari, M. D. (2018). *Ekstraksi Selulosa dari Limbah Pengolahan Agar Menggunakan Larutan NaOH sebagai Prekursor Bioetanol.*
- Li, Y.-Y., Wang, B., Ma, M.-G., & Wang, B. (2018). The Influence of Pre-treatment Time and Sulfuric Acid on Cellulose Nanocrystals. *BioResources*, 13(2), 3585–3602. <https://doi.org/10.15376/biores.13.2.3585-3602>
- Low, L. E., Tey, B. T., Ong, B. H., Chan, E. S., & Tang, S. Y. (2016). Dispersion stability, magnetivity, and wettability of cellulose nanocrystal (CNC)-

dispersed superparamagnetic Fe₃O₄ nanoparticles: Impact of CNC concentration. *RSC Advances*, 6(114).

Mahlaule-Glory, L., Moema, E. D., Thatyana, M., Hintsho-Mbita, N. C., & Mketi, N. (2024). Adsorption studies on the removal of lead ions by magnetic cellulose nanocrystals as an eco-friendly nanoadsorbent derived from maize waste. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1–34. <https://doi.org/10.1080/03067319.2024.2436003>

Mangelsen, S., Srinivasan, B. R., Schürmann, U., Kienle, L., Näther, C., & Bensch, W. (2019). Nanostructured tungsten sulfides: Insights into precursor decomposition and the microstructure using X-ray scattering methods. *Dalton Transactions*, 48(4), 1184–1201. <https://doi.org/10.1039/C8DT04205E>

Marcelo, G. A., Lodeiro, C., Capelo, J. L., Lorenzo, J., & Oliveira, E. (2020). Magnetic, fluorescent and hybrid nanoparticles: From synthesis to application in biosystems. *Materials Science and Engineering: C*, 106, 110104. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.110104>

Mukhtar, A. M. A., Sudyana, I. N., & Rosmainar, L. (2024). *Humic Acid-Fe₃O₄ Synthesis from Central Kalimantan Peat as Magnetic Adsorbent of Congo Red Dyestuff Waste*. 02(02).

Mulyadi, I. (2019). ISOLASI DAN KARAKTERISASI SELULOSA: REVIEW. *Jurnal Saintika Unpam : Jurnal Sains dan Matematika Unpam*, 1(2), 177. <https://doi.org/10.32493/jsmu.v1i2.2381>

- Munasir, M., Triwikantoro, T., Zainuri, M., & Darminto, D. (2012). Uji XRD DAN XRF PADA BAHAN MENERAL (BATUAN DAN PASIR) SEBAGAI SUMBER MATERIAL CERDAS (CaCO_3 DAN SiO_2). *Jurnal Penelitian Fisika dan Aplikasinya (JPFA)*, 2(1), 20. <https://doi.org/10.26740/jpfa.v2n1.p20-29>
- Mursal, P. & Iin Lidia. (2017). PENGARUH PENAMBAHAN ASAM BORAT (H_3BO_3) TERHADAP HASIL KARAKTERISASI NANOKRISTAL TiO_2 . *Pharma Xplore : Jurnal Ilmiah Farmasi*, 1(2). <https://doi.org/10.36805/farmasi.v1i2.116>
- Musah, M., Azeh, Y., Mathew, J., Umar, M., Abdulhamid, Z., & Muhammad, A. (2022). Adsorption Kinetics and Isotherm Models: A Review. *Caliphate Journal of Science and Technology*, 4(1), 20–26. <https://doi.org/10.4314/cajost.v4i1.3>
- Mustapić, M., Bafti, A., Glumac, Z., Pavić, L., Skoko, Ž., Šegota, S., Klaser, T., Nedeljković, R., Masud, M. K., Alothman, A. A., Mushab, M. S. S., & Al Hossain, M. S. (2023). Magnetic nanocellulose: Influence of structural features on conductivity and magnetic properties. *Cellulose*, 30(2), 1149–1169. <https://doi.org/10.1007/s10570-022-04956-1>
- Nasiri, S., Rabiei, M., Palevicius, A., Janusas, G., Vilkauskas, A., Nutalapati, V., & Monshi, A. (2023). Modified Scherrer equation to calculate crystal size by XRD with high accuracy, examples Fe_2O_3 , TiO_2 and V_2O_5 . *Nano Trends*, 3, 100015. <https://doi.org/10.1016/j.nwnano.2023.100015>

- Nguyen, T., Dao, T., Pham, G., Do, T., Nguyen, T., Nguyen, T., Chu, M., Quoc, N., & Tien, N. (2020). Effect of pH on the adsorption behaviour of Congo Red Dye on the Mg-Al layered double hydroxide. *Energy Security and Chemical Engineering Congress, Materials Science and Engineering*, 736(022077). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/736/2/022077>
- Ningtyas, K. R., Muslihudin, M., & Sari, I. N. (2020). Sintesis Nanoselulosa dari Limbah Hasil Pertanian dengan Menggunakan Variasi Konsentrasi Asam. *Jurnal Penelitian Pertanian Terapan*, 20(2), 142–147. <https://doi.org/10.25181/jppt.v20i2.1631>
- Oladoye, P. O., Kadhon, M., Khan, I., Hama Aziz, K. H., & Alli, Y. A. (2024). Advancements in adsorption and photodegradation technologies for Rhodamine B dye wastewater treatment: Fundamentals, applications, and future directions. *Green Chemical Engineering*, 5(4), 440–460. <https://doi.org/10.1016/j.gce.2023.12.004>
- Pander, M., Gogoi, C., & Bury, W. (2026). Gas Sorption Measurements in MOFs—A Tutorial for Beginners. *ACS Materials Au*, acsmaterialsau.6c00063. <https://doi.org/10.1021/acsmaterialsau.6c00063>
- Parlindungan, Y., Rusnadi, Siregar, L. F., & Pongkendek, J. J. (2026). Pemanfaatan Cangkang Telur Terenkapsulasi sebagai Adsorben: Karakterisasi dan Studi Kinetika Adsorpsi Metilen Biru. *Jurnal Teknik Kimia USU*, 15(1), 21–29. <https://doi.org/https://doi.org/10.32734/jtk.v15i1.22507>
- Peng, B. L., Dhar, N., Liu, H. L., & Tam, K. C. (2011). Chemistry and applications of nanocrystalline cellulose and its derivatives: A nanotechnology

- perspective. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 89(5), 1191–1206. <https://doi.org/10.1002/cjce.20554>
- Petit, S., & Madejova, J. (2013). Fourier Transform Infrared Spectroscopy. Dalam *Developments in Clay Science* (Vol. 5, hlm. 213–231). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-098259-5.00009-3>
- Pham, T. B. N., Ngoc, H. T. T., Dinh, S. T., Tan, N. T. L., Phuc, T. L. N., Mai, T. P., & Nguyen, D. Q. (2023a). *Synthesis of Ferromagnetic Nanocomposites from Nanocrystalline Cellulose and Characterization as an Adsorbent to Remove Lead in the Water*. In Review. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2639545/v1>
- Pham, T. B. N., Ngoc, H. T. T., Dinh, S. T., Tan, N. T. L., Phuc, T. L. N., Mai, T. P., & Nguyen, D. Q. (2023b). *Synthesis of Ferromagnetic Nanocomposites from Nanocrystalline Cellulose and Characterization as an Adsorbent to Remove Lead in the Water*. In Review. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2639545/v1>
- Pratama, J. H., Rohmah, R. L., Amalia, A., & Saraswati, T. E. (2019). Isolasi Mikroselulosa dari Limbah Eceng Gondok (*Eichornia crassipes*) dengan Metode Bleaching-Alkalinasi. *ALCHEMY Jurnal Penelitian Kimia*, 15(2), 239. <https://doi.org/10.20961/alchemy.15.2.30862.239-250>
- Qi, J., Wang, H., Zhang, M., Xu, T., Wang, X., Zhang, H., Du, H., Hu, J., Liu, K., & Si, C. (2024). Simultaneous preparation of lignin-containing cellulose nanocrystals and lignin nanoparticles from wood sawdust by mixed organic

- acid hydrolysis. *Industrial Crops and Products*, 222, 119658.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119658>
- Rahmawati, A. W., Jumaeri, & Sulistyaningsih, T. (2018). Zeolit Alam Termodifikasi Surfaktan Heksadesiltrimetilammonium (HDTMA) dan Pemanfaatannya sebagai Adsorben Zat Warna Congo Red (Bag. 110-116). *Indonesia Journal of Chemical Science*, 7(2).
- Rahmayanti, M. (2020). SINTESIS DAN KARAKTERISASI MAGNETIT (Fe_3O_4): STUDI KOMPARASI METODE KONVENSIONAL DAN METODE SONOKIMIA. *AL ULUM: JURNAL SAINS DAN TEKNOLOGI*, 6(1), 26. <https://doi.org/10.31602/ajst.v6i1.3659>
- Rahmayanti, M., Putra, M. D., Karmanto, & Sedyadi, E. (2023). Potential organic magnetic nanoparticles from peel extract of *Archidendron pauciflorum* for the effective removal of cationic and anionic dyes. *Korean Jurnal Chemical Engineering*, 40, 2579–2770. <https://doi.org/10.1007/s11814-023-1499-7>
- Rahmayanti, M., Syakina, A. N., Triastuti, S., & Fatiham, I. (2022). Green synthesis of magnetite nanoparticles using peel extract of jengkol (*Archidendron pauciflorum*) for methylene blue adsorption from aqueous media. *Chemical Physics Letters*, 803(139834).
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cplett.2022.139834>
- Rahmayanti, M., Yahdiyani, A., & Afifah, I. Q. (2022). Eco-friendly synthesis of magnetite based on tea dregs (Fe_3O_4 -TD) for methylene blue adsorbent from simulation waste. *COMMUNICATIONS IN SCIENCE AND*

<https://doi.org/https://doi.org/10.21924/cst.7.2.2022.965>

- Rampengan, A. M., & Polii, J. (2019). Analisis Struktur Kristal Polyetilen Glicol (PEG-4000) Coated Nanopartikel Magnetite (Fe₃O₄). *Fullerene Journal of Chemistry*, 4(2), 82. <https://doi.org/10.37033/fjc.v4i2.99>
- Ramutshatsha-Makhwedzha, D., Mnisi, P. M., Akawa, M. N., Mavhungu, M. L., & Mubiayi, M. P. (2026). Adsorptive removal of Congo Red from wastewater using Magnetite@ZnO@Zeolite composite. *Discover Water*, 6(1), 44. <https://doi.org/10.1007/s43832-026-00359-6>
- Raval, N. P., Shah, P. U., & Shah, N. K. (2016). Adsorptive amputation of hazardous azo dye Congo red from wastewater: A critical review. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(15), 14810–14853. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6970-0>
- Reddy, A. V. B., Rafiq, R., Aqeel, A., Maulud, A. S., & Moniruzzaman. (2022). Cross-Linked Ionic Liquid Polymer for the Effective Removal of Ionic Dyes from Aqueous Systems: Investigation of Kinetics and Adsorption Isotherms. *Molecules*, 27.
- Romano, S., Kaur, H., Zelenka, M., Hijes, P. M. D., Eder, M., Parkinson, G. S., Backus, E. H. G., & Dellago, C. (2024). *Structure of the water/magnetite interface from sum frequency generation experiments and neural network based molecular dynamics simulations* (arXiv:2410.12717). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.12717>

- Salama, A., Abouzeid, R., Leong, W. S., Jeevanandam, J., Samyn, P., Dufresne, A., Bechelany, M., & Barhoum, A. (2021). Nanocellulose-Based Materials for Water Treatment: Adsorption, Photocatalytic Degradation, Disinfection, Antifouling, and Nanofiltration. *Nanomaterials*, 11(11), 3008. <https://doi.org/10.3390/nano11113008>
- Santos, F. C. D., Fernandes, M. D. S., Fadul, J. A. G. D. O., Souza, V. D. S. D., & Souza, D. (2024). Extraction of cellulose nanofibers from sugarcane bagasse at different hydrolysis conditions. *CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES*, 17(10), e11397. <https://doi.org/10.55905/revconv.17n.10-110>
- Schönenberger, J., Momose, T., Wagner, B., Leong, W. H., & Tarnawski, V. R. (2012). Canadian Field Soils I. Mineral Composition by XRD/XRF Measurements. *International Journal of Thermophysics*, 33(2), 342–362. <https://doi.org/10.1007/s10765-011-1142-4>
- Setyaningsih, L. W. N., Mutiara, T., Hapsari, C. Y., Kusumaningtyas, N., Munandar, H., & Pranata, R. J. (2020). Karakteristik dan Aplikasi Selulosa Kulit Jagung Pada Pengembangan Hidrogel. *Journal of Science and Applicative Technology*, 4(2), 61. <https://doi.org/10.35472/jsat.v4i2.252>
- Siddiqui, S. I., Allehyani, E. S., Al-Harbi, S. A., Hasan, Z., Abomuti, M. A., Rajor, H. K., & Oh, S. (2023). Investigation of Congo Red Toxicity towards Different Living Organisms: A Review. *Processes*, 11(3), 807. <https://doi.org/10.3390/pr11030807>

- Sudarlin. (2012). *Prinsip dan Teknik Penggunaan Gas Sorption Analyzer (GSA)*.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.13364.07048>
- Supramaniam, J., Adnan, R., Mohd, K., N. H., & Bushra, R. (2018). Magnetic nanocellulose alginate hydrogel beads as potential drug delivery system. *Int. J. Biol. Macromol.*, (118), 640–648.
- Swenson, H., & Stadie, N. P. (2019). Langmuir's Theory of Adsorption: A Centennial Review. *Langmuir*, 35(16), 5409–5426.
<https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.9b00154>
- Tan, Y., Huang, W., Lei, Q., Huang, S., Yang, K., Chen, X., & Li, D. (2023). Insight into the adsorption of magnetic microspheres with large mesopores: Tailoring mesoporous structure and ethylenediamine functionalization for ultrahigh Congo red removal. *Separation and Purification Technology*, 311, 123265. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.123265>
- Tang, R., Xu, S., Hu, Y., Wang, J., Lu, C., Wang, L., Zhou, Z., Liao, D., Zhang, H., & Tong, Z. (2023). Multifunctional nano-cellulose aerogel for efficient oil–water separation: Vital roles of magnetic exfoliated bentonite and polyethyleneimine. *Separation and Purification Technology*, 314, 123557. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.123557>
- Tara, N., Siddiqui, S. I., Rathi, G., Chaudhry, S. A., Inamuddin, & Asiri, A. M. (2020). Nano-engineered Adsorbent for the Removal of Dyes from Water: A Review. *Current Analytical Chemistry*, 16(1), 14–40.
<https://doi.org/10.2174/1573411015666190117124344>

- Thommes, M., Kaneko, K., Neimark, A. V., Olivier, J. P., Rodriguez-Reinoso, F., Rouquerol, J., & Sing, K. S. W. (2015). Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 87(9–10), 1051–1069. <https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117>
- Triyastiti, L., & Krisdiyanto, D. (2018). Isolasi Nanokristal Selulosa Dari Pelepah Pohon Salak Sebagai Filler Pada Film Berbasis Polivinil Alkohol (PVA).. *Indonesian Journal of Materials Chemistry (IJMC)*, 1(1), 39–45.
- Ullmann, F., & Gerhartz, W. (2011). Nondestructive Testing, 3. Ultrasonics. Dalam Wiley-VCH (Ed.), *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry* (1 ed.). Wiley. https://doi.org/10.1002/14356007.o17_o02
- Vogt, C., Wondergem, C. S., & Weckhuysen, B. M. (2023). Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Spectroscopy. Dalam I. E. Wachs & M. A. Bañares (Ed.), *Springer Handbook of Advanced Catalyst Characterization* (hlm. 237–264). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-07125-6_11
- Wang, J., & Guo, X. (2020). Adsorption kinetic models: Physical meanings, applications, and solving methods. *Journal of Hazardous Materials*, 390.
- Wang, J., Shan, K., Tang, Y., Na, W., & Nan, L. (2023). The Adsorption of CTC onto CFB : A Study on Fabrication of Magnetic Cellulosa/Fe₃O₄ (CFBs) and Adsorption Kinetics. *Materials (Basel)*, 16(3). <https://doi.org/10.3390/ma16031189>

- Widihati, I. A. G., Asih, I. A. R. A., & Juniari, T. I. T. (2025). SINTESIS DAN KARAKTERISASI NANOSELULOSA DARI AMPAS TEBU HITAM (*Saccharum officinarum* L.). *JST (Jurnal Sains dan Teknologi)*, 14(2), 297–308. <https://doi.org/10.23887/jst-undiksha.v14i2.92363>
- Xu, Z., Liu, Q., Lv, B., Nie, X., Konietzky, H., Lee, K. S., & Cheng, Y. (2026). Analysis of error sources and impacts in determining the free space of sample vessels in isothermal adsorption experiments. *Measurement Science and Technology*, 37(2), 025004. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ae2cb0>
- Yang, C., Duan, G., Zhang, C., Huang, Y., Li, S., & Jiang, S. (2025). Preparation and applications of magnetic nanocellulose composites: A review. *Carbohydrate Polymers*, 354, 123317. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2025.123317>
- Yanlinastuti, & Fatimah, S. (2016). Pengaruh Konsentrasi Pelarut Untuk Menentukan Kadar Zirkonium dalam Paduan U-Zr dengan Menggunakan Spektrofotometer UV-Vis. *Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir*, (17), 22–33.
- Yousif, N., Al-Jawad, S., Taha, A., & Stamatis, H. (2023). A review of Structure, Properties, and Chemical Synthesis of Magnetite Nanoparticles. *Journal of Applied Sciences and Nanotechnology*, 3(2), 18–31. <https://doi.org/10.53293/jasn.2022.5179.1178>
- Zelenka, T., Zelená, L., Abreu-Jaureguí, C., Silvestre-Albero, J., Zelenková, G., & Slovák, V. (2024). On the Low-Pressure Hysteresis (LPH) in Gas Sorption

Isotherms of Porous Carbons. *Small*, 2311990.

<https://doi.org/10.1002/sml.202311990>

Zhang, X., Qiu, C., Li, F., Zhang, X., Li, M.-C., Xie, J., De Hoop, C. F., Qi, J., & Huang, X. (2023). Magnetic nanocellulose-based adsorbent for highly selective removal of malachite green from mixed dye solution. *International Journal of Biological Macromolecules*, 253, 126752. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.126752>

Zuliat, F. A., Suardi, M., & Djamaan, A. (2020). CNC (Cellulose Nanocrystals) Isolation from Various Agriculture and Industrial Waste Using Acid Hydrolysis Methods. *Cellulose Nanocrystals*.