

**SINTESIS MAGNETIT Fe_3O_4 /NANOSELULOSA DARI
PELEPAH POHON SALAK DAN APLIKASINYA SEBAGAI
ADSORBEN ZAT WARNA *MALACHITE GREEN***

**Skripsi
Untuk memenuhi sebagian persyaratan
mencapai derajat Sarjana Kimia**



**Cindy Marsella Husen
22106030020**

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-1442/Un.02/DST/PP.00.9/07/2026

Tugas Akhir dengan judul : Sintesis Magnetit Fe₃O₄/Nanoselulosa dari Pelepah Pohon Salak dan Aplikasinya sebagai Adsorben Zat Warna Malachite Green

yang dipersiapkan dan disusun oleh:

Nama : CINDY MARSELLA HUSEN
Nomor Induk Mahasiswa : 22106030020
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: 6a4e857b37284



Penguji I

Endaruji Sedyadi, M.Sc.
SIGNED

Valid ID: 6a453b078313



Penguji II

Priyagung Dheni Widiakongko, M.Sc.
SIGNED

Valid ID: 6a420c0c37245



Yogyakarta, 18 Juni 2026

UIN Sunan Kalijaga
Dekan Fakultas Sains dan Teknologi

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

Valid ID: 6a4ea22a91059

SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI



Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga



FM-UINSK-BM-05-03/R0

SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR

Hal : Persetujuan Skripsi / Tugas Akhir
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 : Cindy Marsella Husen
NIM : 22106030020
Judul Skripsi : Sintesis Magnetit Fe_3O_4 /Nanoselulosa dari Pelepah Pohon Salak dan Aplikasinya sebagai Adsorben Zat Warna *Malachite Green*

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

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

Wassalamu'alaikum wr. wb.

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

Yogyakarta, 25 Mei 2026
Pembimbing

Didik Krisdiyanto, S.Si., M.Sc
NIP: 19811111 201101 1 007

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Yang bertandatangan di bawah ini :

Nama : Cindy Marsella Husen
NIM : 22106030020
Jurusan : Kimia
Fakultas : Sains dan Teknologi

Menyatakan bahwa skripsi yang berjudul “Sintesis Magnetit Fe_3O_4 /Nanoselulosa dari Pelepah Pohon Salak dan Aplikasinya sebagai Adsorben Zat Warna *Malachite Green*” 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, 18 Mei 2026



Cindy Marsella Husen
22106030020

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

MOTTO

“Maka sesungguhnya beserta kesulitan ada kemudahan. Sesungguhnya beserta kesulitan ada kemudahan”
(Q.S. Al-Insyirah: 5-6)



HALAMAN PERSEMBAHAN

Karya ini dipersembahkan untuk almamater,
Program Studi Kimia Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga
Yogyakarta

Karya ini juga dipersembahkan kepada Almarhumah Ibu, Bapak, dan Keluarga
besar penulis, serta untuk diri penulis sendiri



KATA PENGANTAR

Bismillahirrahmaanirrahiim. Alhamdulillahahirabbil'aalamiin

Puji syukur kehadiran Allah SWT karena atas rahmat dan karunia-Nya, penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi dengan judul "Sintesis Magnetit Fe_3O_4 /Nanoselulosa dari Pelepah Pohon Salak dan Aplikasinya sebagai Adsorben Zat *Warna Malachite Green*". Skripsi ini ditulis sebagai syarat kelulusan tingkat sarjana strata satu (S1) Program Studi Kimia Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan skripsi ini banyak pihak yang telah memberikan kontribusi, baik berupa bantuan, dukungan, bimbingan, maupun kritik yang membangun pada saat persiapan dan pelaksanaan penelitian. Penulis dengan penuh kerendahan hati ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Bapak Prof. Noorhaidi, S.Ag., M.A., M.Phil., Ph.D. selaku UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.
2. Ibu Prof. Dr. Dra. Hj. Khurul Wardati, M.Si. selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.
3. Ibu Prof. Dr. Maya Rahmayanti, S.Si., M.Si. selaku Ketua Program Studi Kimia Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.
4. Ibu Prof. Dr. Susy Yunita Prabawati, M.Si. selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah memberikan motivasi dan pengarahan selama studi.
5. Bapak Didik Krisdiyanto, S.Si., M.Sc. selaku Dosen Pembimbing Skripsi yang telah meluangkan waktunya untuk membimbing dan mengarahkan penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
6. Seluruh Dosen Kimia UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta yang telah memberikan pengajaran selama bangku perkuliahan.
7. Segenap PLP Laboratorium Kimia UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta khususnya Indra Nafiyanto, S. Si., yang telah membantu dan memberi motivasi kepada penulis selama penelitian.
8. Seluruh Staf Karyawan Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.
9. Sosok yang senantiasa dirindukan, Ibu tercinta, almarhumah yang telah lebih dahulu berpulang ke hadirat Allah SWT. Kasih sayang dan doa Ibu akan selalu menjadi cahaya yang menerangi setiap langkah penulis. Segala perjuangan ini penulis dedikasikan untuk Ibu, yang cintanya tidak akan pernah lekang oleh waktu. Semoga Allah SWT menempatkan almarhumah Ibu di tempat terbaik di sisi-Nya.
10. Bapak penulis, yang telah memberikan segala pengorbanan dan kasih sayang, dan menjadi satu-satunya orang tua yang setia mendampingi setiap langkah penulis hingga saat ini. Terima kasih atas keteguhan hati yang selalu menguatkan penulis untuk terus melangkah maju hingga mampu menyelesaikan studi ini. Semoga Bapak selalu diberikan kesehatan, panjang umur, dan kebahagiaan.
11. Seluruh keluarga besar penulis yang selalu memanjatkan doa dari kejauhan, perhatian, dan dukungan.

12. Seluruh teman-teman *Xenon*, kimia angkatan 2022 yang telah memberikan banyak kenangan selama masa perkuliahan.
 13. Teman-teman FKIST terutama mas Azri dan mas Sidik yang telah banyak mengajarkan penulis tentang dunia kepenulisan.
 14. Teman-teman PPKK A05 (mba 'Izzah, Widya, Nanda, Sheila, Dea, Wilma, Kyra, Nikmah, Tintan, Syira, Novi, dan Titi) yang telah memberikan pengalaman baik di masa perkuliahan.
 15. Teman-teman satu bimbingan, Atifa, Yumroh, dan Arya, yang membantu ketika penulis mengalami kesulitan dalam proses penyusunan skripsi ini.
 16. Teman-teman "Diskualifikasi", Elvira dan Astri yang menjadi teman seperjuangan sejak semester satu hingga sekarang, menjadi tempat bercerita dan berbagi tawa, serta saling menguatkan.
 17. Teman-teman "SdK" atas semangat dan kebersamaan di semester akhir ini.
 18. Teman-teman di laboratorium penelitian kimia UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta
 19. Diri sendiri, dan semua pihak yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu
- Demi kesempurnaan skripsi ini, kritik dan saran sangat penulis harapkan. Penulis berharap skripsi ini bermanfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan secara umum dan kimia secara khusus.

Yogyakarta, 18 Mei 2026

Penulis

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI	iii
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI.....	iv
MOTTO	v
HALAMAN PERSEMBAHAN	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
INTISARI.....	xiv
ABSTRACT	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Batasan Masalah	5
C. Rumusan Masalah	6
D. Tujuan Penelitian	6
E. Manfaat Penelitian	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI.....	8
A. Tinjauan Pustaka	8
B. Landasan Teori.....	13
C. Kerangka Berpikir dan Hipotesis Penelitian.....	40
BAB III METODE PENELITIAN.....	46
A. Waktu dan Tempat Penelitian.....	46
B. Alat-alat Penelitian.....	46
C. Bahan Penelitian	47
D. Cara Kerja Penelitian	47
E. Teknik Analisis Data.....	52
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	55
A. Karakterisasi Magnetit Fe ₃ O ₄ /Nanoselulosa	55
B. Panjang Gelombang dan Kurva Standar <i>Malachite Green</i>	76
C. Kinetika Adsorpsi Magnetit Fe ₃ O ₄ /Nanoselulosa terhadap Zat Warna <i>Malachite Green</i>	78
D. Pengaruh Massa Adsorben terhadap Adsorpsi <i>Malachite Green</i>	84
E. Isoterm Adsorpsi Magnetit Fe ₃ O ₄ /Nanoselulosa terhadap Zat Warna <i>Malachite Green</i>	89
BAB V PENUTUP.....	97
A. Kesimpulan	97
B. Saran.....	99
DAFTAR PUSTAKA	100
LAMPIRAN	109

DAFTAR GAMBAR

Gambar II. 1 Struktur Nanoselulosa (Khattak <i>et al.</i> , 2019)	15
Gambar II. 2 Mekanisme Reaksi Delignifikasi dengan NaOH (Batu <i>et al.</i> , 2024).....	16
Gambar II. 3 Mekanisme Proses Delignifikasi menggunakan Na ₂ SO ₃ (Mashuni <i>et al.</i> , 2022)	17
Gambar II. 4 Mekanisme Reaksi Penguraian Lignin oleh H ₂ O ₂ (Jayanudin, 2012).....	19
Gambar II. 5 Mekanisme Hidrolisis Asam (Effendi <i>et al.</i> , 2015).....	20
Gambar II. 6 Pemisahan daerah amorf pada selulosa (Effendi <i>et al.</i> , 2015)....	20
Gambar II. 7 Skema Ultrasonikasi (Effendi <i>et al.</i> , 2015)	22
Gambar II. 8 Struktur Fe ₃ O ₄ (Ganapathe <i>et al.</i> , 2020)	23
Gambar II. 9 Mekanisme pembentukan Fe ₃ O ₄ pada matriks nanoselulosa dalam kondisi heterogen (Kang <i>et al.</i> , 2024)	25
Gambar II. 10 Rumus Struktur Zat Warna <i>Malachite Green</i> (Shetty <i>et al.</i> , 2023).....	27
Gambar IV. 1 Spektra FTIR nanoselulosa (a), Fe ₃ O ₄ kontrol (b), Fe ₃ O ₄ /Nanoselulosa 25 mL (c), Fe ₃ O ₄ /Nanoselulosa 50 mL (d), dan Fe ₃ O ₄ /Nanoselulosa 75 mL (e)	56
Gambar IV. 2 Difraktogram Nanoselulosa	62
Gambar IV. 3 Difraktogram Fe ₃ O ₄ kontrol, Fe ₃ O ₄ /Nanoselulosa 25 mL, Fe ₃ O ₄ /Nanoselulosa 50 mL, dan Fe ₃ O ₄ /Nanoselulosa 75 mL..	63
Gambar IV. 4 Mikrograf SEM Fe ₃ O ₄ /Nanoselulosa.....	67
Gambar IV. 5 Distribusi partikel Fe ₃ O ₄ /Nanoselulosa	69
Gambar IV. 6. Kurva isoterm adsorpsi-desorpsi nitrogen pada Fe ₃ O ₄ /Nanoselulosa.....	71
Gambar IV. 7 Plot BET Fe ₃ O ₄ /Nanoselulosa	72
Gambar IV. 8 Distribusi ukuran pori BJH Fe ₃ O ₄ /Nanoselulosa	74
Gambar IV. 9 Panjang Gelombang Maksimum Zat Warna <i>Malachite Green</i> . 77	
Gambar IV. 10 Grafik kurva standar <i>malachite green</i>	78
Gambar IV. 11 Grafik pengaruh waktu (a) terhadap konsentrasi <i>malachite green</i> oleh Fe ₃ O ₄ /Nanoselulosa (b) terhadap % teradsorpsi <i>malachite green</i> oleh Fe ₃ O ₄ /Nanoselulosa	79
Gambar IV. 12 Kinetika adsorpsi (a) Model PFO Lagergren (b) Model PSO Ho	81
Gambar IV. 13 Grafik (a) Pengaruh massa Fe ₃ O ₄ /Nanoselulosa terhadap konsentrasi <i>malachite green</i> (b) Persentase penyisihan zat warna <i>malachite green</i> oleh Fe ₃ O ₄ /Nanoselulosa	84
Gambar IV. 14 Grafik pengaruh massa adsorben terhadap kinetika laju reaksi PSO	88
Gambar IV. 15 Grafik (a) kapasitas adsorpsi <i>malachite green</i> oleh Fe ₃ O ₄ /Nanoselulosa (b) pengaruh konsentrasi awal terhadap % teradsorpsi <i>malachite green</i> oleh Fe ₃ O ₄ /Nanoselulosa	90
Gambar IV. 16 Grafik isoterm adsorpsi (a) Model isoterm Langmuir (b) Model isoterm Freundlich	92

Gambar IV. 17 pH_{PZC} magnetit Fe_3O_4 /Nanoselulosa	94
---	----



DAFTAR TABEL

Tabel IV. 1 Gugus fungsi nanoselulosa	57
Tabel IV. 2 Gugus fungsi Fe_3O_4	58
Tabel IV. 3 Gugus fungsi $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Nanoselulosa}$	60
Tabel IV. 4 Hasil perhitungan BET	73
Tabel IV. 5 Perbandingan parameter $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Nanoselulosa}$ dengan penelitian lain	75
Tabel IV. 6 Perhitungan hasil kinetika adsorpsi model PFO dan PSO.....	82
Tabel IV. 7 Hasil perhitungan kinetika adsorpsi PSO	87
Tabel IV. 8 Perhitungan dan perbandingan hasil isoterm adsorpsi <i>malachite green</i> dengan model Langmuir dan Freundlich.....	93



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Data FTIR	109
Lampiran 2. Data XRD	111
Lampiran 3. Data SEM perbesaran $\times 8.000$, $\times 10.000$, $\times 13.000$, dan $\times 15.000$.	113
Lampiran 4. Data GSA.....	114
Lampiran 5. Perhitungan ukuran kristal dengan persamaan <i>Debye-Scherrer</i> ..	117
Lampiran 6. Perhitungan indeks kristalinitas dengan persamaan Segal	118
Lampiran 7. Data larutan standar zat warna <i>malachite green</i>	118
Lampiran 8. Data perhitungan pengaruh waktu adsorpsi <i>malachite green</i> oleh $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Nanoselulosa}$	119
Lampiran 9. Data perhitungan pengaruh massa $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Nanoselulosa}$ terhadap adsorpsi <i>malachite green</i>	119
Lampiran 10. Data perhitungan pengaruh konsentrasi awal <i>malachite green</i> terhadap kapasitas adsorpsi oleh $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Nanoselulosa}$	120
Lampiran 11. Dokumentasi penelitian	121



INTISARI

Sintesis Magnetit Fe₃O₄/Nanoselulosa dari Pelepah Pohon Salak dan Aplikasinya sebagai Adsorben Zat Warna *Malachite Green*

Oleh:

Cindy Marsella Husen

NIM. 22106030020

Pembimbing:

Didik Krisdiyanto, S.Si., M.Sc

NIP. 198111112011011007

Magnetit Fe₃O₄/Nanoselulosa telah disintesis dari pelepah pohon salak menggunakan metode kopresipitasi *in situ* dan dikarakterisasi sebagai adsorben zat warna *malachite green*. Penelitian ini bertujuan mengkaji sintesis, karakterisasi, serta kinerja adsorpsi Fe₃O₄/Nanoselulosa terhadap zat warna *malachite green*. Nanoselulosa diisolasi melalui ekstraksi α -selulosa dan hidrolisis asam H₂SO₄ 40% yang dikombinasikan dengan ultrasonikasi. Fe₃O₄/Nanoselulosa disintesis dengan mendispersikan nanoselulosa ke dalam air deionisasi (variasi volume 25, 50, dan 75 mL), kemudian ditambahkan FeCl₃.6H₂O dan FeSO₄.7H₂O (rasio Fe³⁺:Fe²⁺ = 2:1), dipanaskan pada 60°C, dan ditambahkan NH₄OH 25% hingga pH 10, lalu diinkubasi selama 4 jam. Karakterisasi dilakukan menggunakan FTIR, XRD, SEM, dan GSA. Berdasarkan hasil karakterisasi FTIR, terbentuknya ikatan Fe-O dikonfirmasi pada bilangan gelombang 584-582 cm⁻¹ disertai pergeseran pita O-H yang mengindikasikan interaksi antara Fe₃O₄ dan nanoselulosa. Struktur spinel kubik magnetit ditunjukkan oleh difraktogram XRD dengan ukuran kristal 15,14 nm dan kristalinitas 75,15%. Morfologi permukaan tidak beraturan dengan diameter partikel rata-rata 23,7 nm diperoleh dari citra SEM, sedangkan material mesopori dengan luas permukaan BET 49,912 m²/g dan ukuran pori rata-rata 8,637 nm diidentifikasi melalui analisis GSA. Kinetika adsorpsi mengikuti model pseudo orde dua dengan nilai R² = 0,9964 dan *qe* = 7,082 mg/g, sementara isoterm adsorpsi sesuai model Freundlich (R² = 0,8521, 1/n = 0,736). Disimpulkan bahwa adsorpsi *malachite green* berlangsung secara *favorable* melalui fisisorpsi multilayer pada permukaan heterogen Fe₃O₄/Nanoselulosa.

Kata kunci: *adsorpsi, magnetit, malachite green, nanoselulosa, pelepah pohon salak*

ABSTRACT

Synthesis of Magnetite Fe₃O₄/Nanocellulose from Salak Tree Fronds and Its Application as an Adsorbent for Malachite Green Dye

By:

Cindy Marsella Husen

NIM. 22106030020

Supervisor:

Didik Krisdiyanto, S.Si., M.Sc

NIP. 198111112011011007

Magnetite Fe₃O₄/Nanocellulose was synthesized from salak tree fronds using an in situ coprecipitation method and characterized as an adsorbent for malachite green dye. This study aimed to investigate the synthesis, characterization, and adsorption performance of Fe₃O₄/Nanocellulose toward malachite green dye. Nanocellulose was isolated through α -cellulose extraction and hydrolysis using 40% H₂SO₄ combined with ultrasonication. Fe₃O₄/Nanocellulose was synthesized by dispersing nanocellulose in deionized water (volume variations of 25, 50, and 75 mL), followed by the addition of FeCl₃·6H₂O and FeSO₄·7H₂O (Fe³⁺:Fe²⁺ ratio = 2:1), heated at 60°C, and added with 25% NH₄OH dropwise until pH 10, then incubated for 4 hours. Characterization was performed using FTIR, XRD, SEM, and SSA analyses. The formation of Fe-O bonds was confirmed by FTIR at wavenumbers of 584-582 cm⁻¹, accompanied by a shift in the O-H band indicating interaction between Fe₃O₄ and nanocellulose. A cubic spinel magnetite structure was revealed by XRD with a crystallite size of 15.14 nm and crystallinity of 75.15%. Irregular surface morphology with an average particle diameter of 23.7 nm was observed from SEM images, while mesoporous characteristics with a BET surface area of 49.912 m²/g and an average pore size of 8.637 nm were identified through GSA analysis. Adsorption kinetics followed the pseudo second order model with R² = 0.9964 and *qe* = 7.082 mg/g, while the adsorption isotherm fitted the Freundlich model (R² = 0.8521, 1/*n* = 0.736). It was concluded that malachite green adsorption proceeded favorably through multilayer physisorption on the heterogeneous surface of Fe₃O₄/Nanocellulose.

Keywords: adsorption, magnetite, malachite green, nanocellulose, salak tree fronds

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Pencemaran air akibat limbah industri tekstil, farmasi, kosmetik, dan pengolahan pangan menjadi salah satu tantangan lingkungan paling mendesak di fase perkembangan industri. Zat warna sintetis merupakan kontributor utama pencemaran perairan karena sifatnya yang bertahan lama di lingkungan, toksik, dan sulit terurai secara alami. *Malachite green* (MG) adalah salah satu zat warna kationik yang digunakan secara luas dalam industri tekstil, plastik, kertas, dan akuakultur sebagai agen antijamur dan antibakteri. Namun, *malachite green* (MG) sangat berbahaya bagi kesehatan manusia, tanaman, dan fauna akuatik karena bersifat karsinogenik serta dapat menyebabkan kerusakan ginjal dan hati (Alorabi, 2021). Tingginya toksisitas dari *malachite green* (MG) mendorong pengembangan metode yang efisien untuk pengolahan limbah zat warna.

Berbagai metode telah dikembangkan untuk menghilangkan zat warna dari air limbah, antara lain filtrasi membran, fotodegradasi, oksidasi, elektrokimia, pertukaran ion, dan adsorpsi. Di antara metode-metode tersebut, adsorpsi diakui sebagai teknik yang paling efektif, ekonomis, dan mudah dioperasikan. Adsorpsi juga memiliki efisiensi penyisihan yang tinggi, dapat diregenerasi, serta digunakan kembali sehingga menekan biaya operasional secara keseluruhan (Mahlaule-Glory *et al.*, 2025). Dalam sepuluh tahun terakhir, penelitian adsorben berbasis biomassa mengalami perkembangan. Nanoselulosa menjadi salah satu adsorben yang menjanjikan karena merupakan biopolimer alami yang paling melimpah di bumi,

dapat diperbarui, tidak beracun, memiliki luas permukaan yang besar, dan kekuatan mekanik yang tinggi, serta mengandung gugus hidroksil (-OH) dalam setiap unit glukosa yang berfungsi sebagai situs aktif untuk mengikat zat pencemar (Zhang *et al.*, 2023).

Nanoselulosa dapat diperoleh melalui proses hidrolisis asam pada konsentrasi dan suhu tertentu setelah perlakuan alkali pada sumber biomassa, yang secara selektif menghilangkan bagian amorf sehingga meningkatkan kristalinitas dan luas permukaannya (Mahlaule-Glory *et al.*, 2025). Sementara itu, pelepah pohon salak merupakan limbah pertanian yang dihasilkan dalam jumlah sangat besar di wilayah sentra produksi salak seperti Sleman, Yogyakarta, dengan estimasi limbah mencapai 1.368 ton per bulan ($\pm$ 23.000 truk/tahun) akibat kegiatan pemangkasan rutin setiap empat bulan sekali (Triyastiti & Krisdiyanto, 2018). Pelepah pohon salak diketahui mengandung selulosa 31,7%, hemiselulosa 33,9%, lignin 17,4%, dan silika 0,6%, menjadikannya sumber bahan baku potensial yang belum dimanfaatkan secara optimal untuk bahan baku sintesis nanoselulosa.

Meskipun nanoselulosa memiliki berbagai keunggulan sebagai adsorben, dalam penerapannya terdapat tantangan berupa kesulitan pemisahan adsorben dari larutan setelah proses adsorpsi berlangsung akibat ukurannya yang sangat kecil. Hal ini menjadi kendala teknis dan ekonomi karena proses pemisahan konvensional, seperti sentrifugasi dan filtrasi membutuhkan waktu, energi, dan biaya yang besar. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, modifikasi nanoselulosa dengan nanopartikel magnetit (Fe_3O_4) melalui metode kopresipitasi *in situ* menjadi solusi yang menjanjikan. Nanopartikel Fe_3O_4 memiliki luas permukaan besar dan dapat

dengan mudah dipisahkan dari media larutan menggunakan medan magnet eksternal tanpa memerlukan sentrifugasi maupun filtrasi (Alorabi, 2021). Nanoselulosa diketahui memengaruhi distribusi partikel Fe_3O_4 pada permukaannya, di mana distribusi yang lebih homogen berpotensi meningkatkan luas permukaan aktif yang merupakan faktor penting dalam adsorpsi (Janićijević *et al.*, 2022).

Penelitian sebelumnya membuktikan bahwa material komposit magnetik berbasis biomassa seperti Fe_3O_4 @daun *Juniperus procera* teraktivasi (Fe_3O_4 @AJPL) mampu mengadsorpsi *malachite green* dengan kapasitas monolayer maksimum sebesar 318,3 mg/g pada suhu 45°C (Alorabi, 2021), sedangkan komposit magnetit nanoselulosa bambu dengan montmorillonit ($\text{BC/AA/MN@Fe}_3\text{O}_4$) mencapai kapasitas adsorpsi sebesar 2.282,3 mg/g yang merupakan salah satu kapasitas tertinggi yang dilaporkan dalam literatur (Zhang *et al.*, 2023). Fakta tersebut mengonfirmasi bahwa kombinasi nanoselulosa dan Fe_3O_4 dapat meningkatkan performa adsorpsi sekaligus mempermudah proses pemisahan pasca adsorpsi.

Kajian terhadap penelitian-penelitian terdahulu menunjukkan adanya kesenjangan penelitian yang membuka peluang pengembangan lebih lanjut. Sebagian besar studi sintesis nanoselulosa magnetik menggunakan sumber biomassa seperti tongkol jagung, bambu, atau selulosa komersial (Mahlaule-Glory *et al.*, 2025; Pham *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2023), sementara pemanfaatan limbah pertanian lokal Indonesia seperti pelepah pohon salak sebagai bahan baku nanoselulosa untuk adsorben magnetik belum pernah dilaporkan. Penelitian

Triyastiti & Krisdiyanto (2018) telah berhasil mengisolasi nanokristal selulosa dari pelepah salak dan mengaplikasikannya sebagai pengisi (*filler*) film berbasis polivinil alkohol (PVA), tetapi potensinya sebagai adsorben zat warna yang dikompositkan dengan magnetik belum dikaji. Sebagian besar penelitian terdahulu mengevaluasi performa adsorpsi *malachite green* menggunakan adsorben magnetik berbasis bahan non-selulosa atau selulosa non-termodifikasi, sehingga kontribusi spesifik nanoselulosa yang berasal dari sumber biomassa baru terhadap *malachite green* masih perlu dikaji lebih lanjut.

Berdasarkan kesenjangan penelitian yang telah diidentifikasi, penelitian ini memiliki urgensi yang kuat baik secara akademik dan praktis. Secara akademik, penelitian ini mengisi celah literatur mengenai komposit Fe_3O_4 /Nanoselulosa dari biomassa lokal untuk aplikasi adsorpsi zat warna *malachite green*. Karakterisasi dilakukan dengan menggunakan FTIR, XRD, SEM, dan GSA untuk memvalidasi keberhasilan sintesis dan mengkaji karakteristik fisikokimianya. Selanjutnya, performa aplikasinya dikaji melalui studi kinetika menggunakan model orde satu semu (PFO) dan orde dua semu (PSO) serta studi isoterm adsorpsi menggunakan model Langmuir dan Freundlich, sejalan dengan pendekatan yang digunakan pada penelitian-penelitian terdahulu (Alorabi, 2021; Mahlaule-Glory *et al.*, 2025; Zhang *et al.*, 2023). Secara praktis, penelitian ini menawarkan solusi untuk pengelolaan limbah pelepah salak yang selama ini belum termanfaatkan optimal dan pencemaran air oleh zat warna *malachite green* dari industri. Penggunaan bahan baku lokal yang melimpah dan murah, teknologi adsorpsi magnetik yang memungkinkan pemisahan dan regenerasi adsorben menjadikan material yang

dikembangkan dalam penelitian ini berpotensi sebagai adsorben yang efektif, ekonomis, dan berkelanjutan untuk pengolahan air limbah industri di Indonesia.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menyintesis komposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Nanoselulosa}$ dari pelepah pohon salak, mengkarakterisasi sifat fisikokimianya, serta mengkaji kinetika dan isoterm adsorpsinya terhadap *malachite green*. Material yang dihasilkan diharapkan bersifat superparamagnetik, memiliki luas permukaan yang besar, serta kaya gugus fungsi hidroksil yang berperan dalam mengikat molekul *malachite green*.

B. Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Sumber bahan baku nanoselulosa yang digunakan terbatas pada pelepah pohon salak (*Salacca zalacca*) dengan isolasi α -selulosa, dan sintesis nanoselulosa menggunakan metode hidrolisis asam serta ultrasonikasi.
2. Sintesis magnetit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Nanoselulosa}$ menggunakan prekursor $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dan $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ dan (rasio $\text{Fe}^{3+}:\text{Fe}^{2+}$ konstan di 2:1) dengan metode kopresipitasi *in situ*.
3. Parameter adsorpsi yang diuji terbatas pada waktu kontak (15 menit, 30 menit, 60 menit, 90 menit, dan 120 menit), massa adsorben (25mg, 30mg, dan 35mg), dan konsentrasi awal *malachite green* (6 mg/L, 8 mg/L, 10 mg/L, 12 mg/L dan 14 mg/L).
4. Karakterisasi material adsorben terbatas pada FTIR dan XRD untuk 5 sampel (Nanoselulosa, Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Nanoselulosa}$ 25 mL, $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Nanoselulosa}$ 50 mL,

Fe₃O₄/Nanoselulosa 75 mL) serta SEM dan GSA untuk satu sampel (Fe₃O₄/Nanoselulosa 25 mL).

5. Proses adsorpsi difokuskan pada penghilangan zat warna *malachite green* dalam bentuk larutan tunggal.
6. Konsentrasi *malachite green* setelah proses adsorpsi dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum *malachite green*.
7. Aplikasi adsorben untuk analisis pengaruh waktu kontak, pengaruh massa, dan konsentrasi awal zat warna *malachite green*, terbatas pada sampel Fe₃O₄/Nanoselulosa 25 mL.

C. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang, maka dirumuskan masalah penelitian sebagai berikut:

1. Bagaimana sintesis magnetit Fe₃O₄/Nanoselulosa dari pelepah pohon salak dengan metode kopresipitasi *in situ*?
2. Bagaimana hasil karakterisasi magnetit Fe₃O₄/Nanoselulosa oleh FTIR, XRD, SEM, dan GSA?
3. Bagaimana analisis studi kinetika, massa adsorben dan isoterm adsorpsi zat warna *malachite green* oleh magnetit Fe₃O₄/Nanoselulosa?

D. Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah, maka tujuan penelitian sebagai berikut:

1. Menyintesis magnetit Fe₃O₄/Nanoselulosa dari pelepah pohon salak melalui metode kopresipitasi *in situ*.

2. Mengkarakterisasi magnetit Fe_3O_4 /Nanoselulosa menggunakan FTIR, XRD, SEM, dan GSA untuk mengetahui gugus fungsi, struktur kristal, morfologi permukaan, serta luas permukaan dan sifat pori.
3. Menganalisis studi kinetika adsorpsi, pengaruh massa adsorben, dan isoterm adsorpsi zat warna *malachite green* oleh magnetit Fe_3O_4 /Nanoselulosa.

E. Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan kontribusi ilmiah dalam pemanfaatan limbah biomassa lokal, khususnya pelepah pohon salak, sebagai bahan baku nanoselulosa dalam pembuatan magnetit Fe_3O_4 /Nanoselulosa.
2. Menyediakan informasi magnetit Fe_3O_4 /Nanoselulosa sebagai adsorben berdasarkan analisis FTIR, XRD, SEM, dan GSA.
3. Memberikan data eksperimental mengenai efektivitas adsorpsi zat warna *malachite green* pada berbagai kondisi, yang dapat digunakan sebagai acuan dalam pengolahan limbah zat warna.

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

BAB V PENUTUP

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Sintesis adsorben magnetit Fe_3O_4 /Nanoselulosa dari pelepah pohon salak melalui metode kopresipitasi *in situ* berhasil dilakukan. Keberhasilan sintesis dikonfirmasi melalui kemunculan pita serapan Fe-O pada sekitar $584\text{-}582\text{ cm}^{-1}$ yang khas untuk struktur magnetit pada FTIR, terbentuknya puncak difraksi karakteristik Fe_3O_4 struktur spinel kubik sekaligus puncak selulosa pada $2\theta\ 22^\circ$ dari hasil XRD, morfologi permukaan tidak beraturan dengan struktur agregat yang padat akibat aglomerasi antar partikel, serta diameter rata-rata $23,7 \pm 0,27$ nm yang diperoleh dari partikel yang dapat teridentifikasi secara individual pada citra SEM, serta terbentuknya material mesopori dengan luas permukaan BET sebesar $49,912\text{ m}^2/\text{g}$ pada hasil GSA.
2. Karakterisasi adsorben magnetit Fe_3O_4 /Nanoselulosa menggunakan FTIR, XRD, SEM, dan GSA mengonfirmasi keberhasilan pembentukan material komposit dengan sifat fisikokimia yang khas. Hasil FTIR menunjukkan pergeseran pita serapan O-H dan kemunculan pita Fe-O pada sekitar $584\text{-}582\text{ cm}^{-1}$, yang mengindikasikan interaksi antara gugus hidroksil nanoselulosa dengan partikel Fe_3O_4 melalui ikatan hidrogen dan interaksi elektrostatis. Analisis XRD mengonfirmasi terbentuknya struktur kristal magnetit fase spinel kubik dengan persen kristalinitas berkisar $75,15\text{-}86,21\%$ dan ukuran kristal rata-

rata 13,78-16,64 nm. Citra SEM memperlihatkan morfologi permukaan yang tidak beraturan, kasar, dan berpori dengan aglomerasi antar partikel yang membentuk struktur agregat padat, sehingga pengukuran diameter rata-rata $23,7 \pm 0,27$ nm dilakukan hanya pada partikel yang dapat teridentifikasi secara individual. Karakterisasi GSA menghasilkan luas permukaan BET sebesar $49,912 \text{ m}^2/\text{g}$, volume pori total $0,2156 \text{ cm}^3/\text{g}$, dan ukuran pori rata-rata $8,637 \text{ nm}$, yang mengklasifikasikan material ini sebagai material mesopori.

3. Magnetit Fe_3O_4 /Nanoselulosa terbukti efektif dalam mengadsorpsi zat warna *malachite green* dengan karakteristik adsorpsi yang telah teridentifikasi secara komprehensif. Studi kinetika menunjukkan bahwa proses adsorpsi mengikuti model pseudo orde dua (PSO) Ho dengan nilai $R^2 = 0,9964$, yang mengindikasikan bahwa adsorpsi dikendalikan oleh interaksi kimia lemah pada permukaan heterogen dengan kapasitas adsorpsi kesetimbangan (q_e) sebesar $7,082 \text{ mg/g}$. Pengaruh massa adsorben menunjukkan bahwa peningkatan massa dari 25 mg hingga 35 mg meningkatkan persentase adsorpsi namun menurunkan nilai q_e , dengan konstanta laju (k_2) meningkat dari $0,040$ menjadi $0,125 \text{ g/mg.menit}$. Studi isoterm adsorpsi menunjukkan kesesuaian yang lebih baik dengan model Freundlich ($R^2 = 0,8521$) dengan nilai $1/n = 0,736$, yang mengindikasikan proses adsorpsi berlangsung secara *favorable* melalui mekanisme fisisorpsi multilayer pada permukaan heterogen dengan kontribusi interaksi dominan ikatan hidrogen dan gaya van der Waals.

B. Saran

Saran yang dapat disampaikan dalam penelitian lebih lanjut adalah sebagai berikut:

1. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengoptimalkan kondisi sintesis dan pengujian adsorpsi secara lebih menyeluruh, serta pengujian langsung pada limbah cair tekstil nyata.
2. Adsorben magnetit Fe_3O_4 /Nanoselulosa dari pelepah pohon salak yang telah terbukti efektif pada skala laboratorium disarankan untuk dikaji lebih lanjut penerapannya dalam sistem pengolahan limbah zat warna yang lebih kompleks dan berskala lebih besar, sehingga performa dan kelayakannya sebagai solusi pengolahan limbah industri tekstil secara nyata dapat dievaluasi dengan lebih baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Abewaa, M., Mengistu, A., Takele, T., Fito, J., & Nkambule, T. (2023). Adsorptive removal of malachite green dye from aqueous solution using *Rumex abyssinicus* derived activated carbon. *Scientific Reports*, 13(1), 14701. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41957-x>
- Abriyani, E., Putri, N. S., Rosidah, R. S. N., & Ismanita, S. S. (2022). Analisis Kafein Menggunakan Metode Uv-Vis: Tinjauan Literatur. *Jurnal Pendidikan dan Konseling*, 4(6).
- Adamson, A. W., & Gast, A. P. (1997). *Physical chemistry of surfaces* (6. ed). Wiley.
- Afandy, Moh. A., & Sawali, F. D. I. (2024). Adsorpsi Kromium Heksavalen Pada Larutan Aqueous Menggunakan Arang Kayu Teraktivasi Asam: Studi Isotherm Dan Kinetika. *Jurnal Ilmiah Teknik Kimia*, 8(1), 1–14. <https://doi.org/10.32493/jitk.v8i1.35315>
- Alfarisa, S., Rifai, D. A., & Toruan, P. L. (2018). Studi Difraksi Sinar-X Struktur Nano Seng Oksida (ZnO). *Risalah Fisika*, 2(2), 53–57. <https://doi.org/10.35895/rf.v2i2.114>
- Alorabi, A. Q. (2021). Effective Removal of Malachite Green from Aqueous Solutions Using Magnetic Nanocomposite: Synthesis, Characterization, and Equilibrium Study. *Adsorption Science & Technology*, 2021, 2359110. <https://doi.org/10.1155/2021/2359110>
- Alqadami, A. A., Naushad, M., Abdalla, M. A., Khan, M. R., & Alothman, Z. A. (2016). Adsorptive Removal of Toxic Dye Using Fe_3O_4 -TSC Nanocomposite: Equilibrium, Kinetic, and Thermodynamic Studies. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 61(11), 3806–3813. <https://doi.org/10.1021/acs.jced.6b00446>
- 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>
- Andalia, R., Rahmi, R., Julinawati, J., & Helwati, H. (2020). Isolation and characterization of cellulose from rice husk waste and sawdust with chemical method. *Jurnal Natural*, 20(1), 6–9. <https://doi.org/10.24815/jn.v20i1.12016>

- Anggriani, U. M., Hasan, A., & Purnamasari, I. (2021). *KINETIKA ADSORPSI KARBON AKTIF DALAM PENURUNAN KONSENTRASI LOGAM TEMBAGA (Cu) DAN TIMBAL (Pb)*. 12(02).
- Anngela, O., Muadifah, A., & Nugraha, D. P. (2021). Validasi Metode Penetapan Kadar Boraks pada Kerupuk Puli Menggunakan Spektrofotometer UV-Vis: Validation of Methods of Borax Concentrations Determination in Puli Crackers Using a UV-Vis Spectrophotometer. *Jurnal Sains dan Kesehatan*, 3(4), 375–381. <https://doi.org/10.25026/jsk.v3i4.258>
- Arabkhani, P., & Asfaram, A. (2020). Development of a novel three-dimensional magnetic polymer aerogel as an efficient adsorbent for malachite green removal. *Journal of Hazardous Materials*, 384, 121394. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121394>
- Atkins, P. W. ; K. (1999). *Kimia Fisika Jilid 1 / P.W. Atkins;penerjemah:Irma I. Kartohadiprodjo*. Erlangga. (Jakarta). http://library.walisongo.ac.id/slims/index.php?p=show_detail&id=12970&key words=
- Azis, A., Utomo, W. B., Bangngalino, H., Lamuru, A. S., Slamet, N. S., & Mahirullah. (2025). *Kimia Analisis Instrumen*. Penerbit NEM.
- Batu, M. S., Kolo, M. M., & Rika, F. (2024). *Synthesis of Cellulose Acetate From Coil Waste (Borassus flabellifer L) Using Delignification Time Variations*.
- Bhat, M., M.T., R., Sv, M., Nayak, R., Das, R., & Roymahapatra, G. (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*. <https://doi.org/10.30919/esfaf1143>
- Bonyadi, Z., Khatibi, F. S., & Alipour, F. (2022). Ultrasonic-assisted synthesis of Fe₃O₄ nanoparticles-loaded sawdust carbon for malachite green removal from aquatic solutions. *Applied Water Science*, 12(9), 221. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01745-w>
- Carvalho, A. P. A. D., Értola, R., & Conte-Junior, C. A. (2024). Nanocellulose-based platforms as a multipurpose carrier for drug and bioactive compounds: From active packaging to transdermal and anticancer applications. *International Journal of Pharmaceutics*, 652, 123851. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2024.123851>

- Devi, Cahyanto, M. N., & Djaafar, T. F. (2019). *PERLAKUAN PRETREATMEN SECARA FISIK, KIMIA DAN BIOLOGI PADA PELEPAH POHON SALAK*.
- Dwisa, M., & Mahyudin, A. (2021). Pengaruh Waktu Rendaman NaOH Terhadap Kristalinitas dan Densitas Nanoserat Selulosa Buah Pinang. *Jurnal Fisika Unand*, 10(1), 117–122. <https://doi.org/10.25077/jfu.10.1.117-122.2021>
- Effendi, D. B., Rosyid, N. H., & Nandiyanto, A. B. D. (2015). *REVIEW: SINTESIS NANOSELULOSA*. 5(2).
- Evans, S. K., Wesley, O. N., Koech, L., Nelana, S. M., & Rutto, H. L. (2022). Structural Features of Cellulose and Cellulose Nanocrystals via In Situ Incorporation of Magnetic Iron Oxide Nanoparticles: Modification and Characterization. *Coatings*, 13(1), 39. <https://doi.org/10.3390/coatings13010039>
- Fatimah, S. (2016). *PENGARUH KONSENTRASI PELARUT UNTUK MENENTUKAN KADAR ZIRKONIUM DALAM PADUAN U-Zr DENGAN MENGGUNAKAN METODE SPEKTROFOTOMETRI UV-VIS*. (17).
- Fatimah, S., Arnelli, A., & Astuti, Y. (2023). Pembuatan Karbon Aktif Berbahan Dasar Sabut Kelapa dengan Aktivator H₂SO₄ dan NaOH sebagai Adsorben Kation Fe dan Cu dalam Limbah Cair Batik Kebumen. *Greensphere: Journal of Environmental Chemistry*, 3(1), 1–8. <https://doi.org/10.14710/gjec.2023.16300>
- Fauzi, F. D., Wicaksono, H. D., & Waluyo, J. (2023). *A REVIEW OF NANOCELLULOSE SYNTHESIS METHODS AND ITS APPLICATION*. 10(1).
- Firnando, H. G. (2015). *PENGARUH SUHU PADA PROSES SONIKASI TERHADAP MORFOLOGI PARTIKEL DAN KRISTALINITAS NANOPARTIKEL*. 4(1).
- 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*.
- Ganapathe, L. S., Mohamed, M. A., Mohamad Yunus, R., & Berhanuddin, D. D. (2020). Magnetite (Fe₃O₄) Nanoparticles in Biomedical Application: From Synthesis to Surface Functionalisation. *Magnetochemistry*, 6(4), 68. <https://doi.org/10.3390/magnetochemistry6040068>

- Gong, J., Li, J., Xu, J., Xiang, Z., & Mo, L. (2017). Research on cellulose nanocrystals produced from cellulose sources with various polymorphs. *RSC Advances*, 7(53), 33486–33493. <https://doi.org/10.1039/C7RA06222B>
- Guo, F., Jiang, X., Li, X., Jia, X., Liang, S., & Qian, L. (2020). Synthesis of MgO/Fe₃O₄ nanoparticles embedded activated carbon from biomass for high-efficient adsorption of malachite green. *Materials Chemistry and Physics*, 240, 122240. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.122240>
- Handayani, M. (2009). *Uji Persamaan Langmuir dan Freunlich pada Penyerapan Limbah Chrom (VI) oleh Zeolit*.
- Hertiwi, L. R., Afni, A. N., Lailiyah, N., & Sanjaya, I. G. M. (2020). Ekstraksi dan Karakterisasi Nano Selulosa dari Limbah Kulit Bawang Merah. *JEDCHEM (JOURNAL EDUCATION AND CHEMISTRY)*, 2(2), 77–81.
- Indah, D. R. (2020). *ADSORPSI LOGAM TEMBAGA (Cu) PADA KARBON BAGGASE TERAKTIVASI NATRIUM HIDROKSIDA (NaOH)*. 7.
- Inkson, B. J. (2016). Scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM) for materials characterization. In *Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods* (pp. 17–43). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100040-3.00002-X>
- Janićijević, 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>
- Jayanudin, J. (2012). Pemutihan Daun Nanas Menggunakan Hidrogen Peroksida. *Jurnal Rekayasa Proses*, 3(1), 10–14. <https://doi.org/10.22146/jrekpro.560>
- Jiang, F., Dinh, D. M., & Hsieh, Y.-L. (2017). Adsorption and desorption of cationic malachite green dye on cellulose nanofibril aerogels. *Carbohydrate Polymers*, 173, 286–294. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.05.097>
- Kang, J., Hu, C., Liu, X., Zhou, H., Lin, X., & Gu, J. (2024). One-Pot Synthesis of Magnetic Nanocellulose/Fe₃O₄ Hybrids Using FeCl₃ as Cellulose Hydrolytic Medium and Fe₃O₄ Precursor. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 12(15), 5917–5926. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.3c08582>

- Khairil, D. F. (2022). *Optimasi pH dan Konsentrasi Penyerapan Malachite Green Menggunakan C-Sinamalkaliks[4]Resorsinarena Sebagai Adsorben*. 11(2).
- Kumar, A., Jena, H. M., & Gangawane, K. M. (2025). Iron oxide nanoparticles as efficient adsorbents for malachite green dye removal: Isotherms, kinetics, and thermodynamics analysis. *Environmental Science and Pollution Research*, 32(15), 9638–9654. <https://doi.org/10.1007/s11356-025-36291-w>
- Kumbhar, P., Narale, D., Bhosale, R., Jambhale, C., Kim, J.-H., & Kolekar, S. (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(3), 107893. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107893>
- 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*.
- Kusumaningrum, D. I. P., Sudarni, D. H. A., & Wahyuningsih, S. (2022). Optimasi Pengaruh Waktu Kontak dan Dosis Adsorben Limbah Daun Kayu Putih (*Melaleuca cajuputi*) dengan Metode Isoterm Adsorpsi Langmuir. *Jurnal Teknik Kimia USU*, 11(2), 72–79. <https://doi.org/10.32734/jtk.v11i2.9119>
- Li, W., Xu, M., Cao, Q., Luo, J., Yang, S., & Zhao, G. (2021). Magnetic GO/Fe₃O₄ for rapid malachite green (MG) removal from aqueous solutions: A reversible adsorption. *RSC Advances*, 11(32), 19387–19394. <https://doi.org/10.1039/D1RA02209A>
- Mahlaule-Glory, L., Moema, E. D., Thatyana, M., Hintsho-Mbita, N. C., & Mketo, N. (2025). 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*, 105(18), 7009–7042. <https://doi.org/10.1080/03067319.2024.2436003>
- Maryam, St., Effendi, N., & Kasmah, K. (2019). Produksi dan Karakterisasi Gelatin dari Limbah Tulang Ayam dengan Menggunakan Spektrofotometer Ftir (Fourier Transform Infra Red). *Majalah Farmaseutik*, 15(2), 96. <https://doi.org/10.22146/farmaseutik.v15i2.47542>
- Mashuni, M., Ahmad, L. O., Andra, M., & Jahiding, M. (2022). (PDF) *Inovasi Bioplastik dari Kitosan dengan Variasi Selulosa Limbah Kulit Durian sebagai Kemasan Makanan Antibakteri*.

https://www.researchgate.net/publication/358104205_Inovasi_Bioplastik_dari_Kitosan_dengan_Variasi_Selulosa_Limbah_Kulit_Durian_sebagai_Kemasan_Makanan_Antibakteri

- Mohammadi, A., & Zahmatkesh, M. (2021). Synthesis and effective dispersion of Fe_3O_4 NPs on alfalfa as a green nanoadsorbent for the removal of cationic dyes from aqueous solutions. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 103(18), 6704–6721. <https://doi.org/10.1080/03067319.2021.1959569>
- 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>
- Nagendran, V., Goveas, L. C., Vinayagam, R., Varadavenkatesan, T., & Selvaraj, R. (2024). Challenges and advances in nanocellulose-based adsorbents for dye removal: Mechanisms and future directions. *Discover Applied Sciences*, 7(1), 14. <https://doi.org/10.1007/s42452-024-06413-z>
- Nasution, N., & Fitri, A. (2018). SYNTHESIS OF RUTILE TiO_2 NANOPARTICLES BY CO-PRECIPIATION METHOD. *Fisitek: Jurnal Ilmu Fisika dan Teknologi*, 2(2), 18. <https://doi.org/10.30821/fisitek.v2i2.1808>
- 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>
- 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. (2023). *Synthesis of Ferromagnetic Nanocomposites from Nanocrystalline Cellulose and Characterization as an Adsorbent to Remove Lead in the Water*. <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>
- Prusov, A. N., Prusova, S. M., & Radugin, M. V. (2023). Magnetic Carbon Nanocomposites: Preparation from Cellulose via Chemical Activation with

FeCl₃ and Characterization. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 68(7), 902–910. <https://doi.org/10.1134/S0036023623600818>

R, R., Thomas, D., Philip, E., Paul, S. A., Madhavan, A., Sindhu, R., Binod, P., Pugazhendhi, A., Sirohi, R., Tarafdar, A., & Pandey, A. (2021). Potential of nanocellulose for wastewater treatment. *Chemosphere*, 281, 130738. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130738>

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 Journal of Chemical Engineering*, 40(11), 2759–2770. <https://doi.org/10.1007/s11814-023-1499-7>

Rahmayanti, M., Yahdiyani, A., & Afifah, I. Q. (2022). Eco-friendly synthesis of magnetite based on tea dregs (Fe₃O₄-TD) for methylene blue adsorbent from simulation waste. *Communications in Science and Technology*, 7(2), 119–126. <https://doi.org/10.21924/cst.7.2.2022.965>

Rajabi, M., Mahanpoor, K., & Moradi, O. (2019). Preparation of PMMA/GO and PMMA/GO-Fe₃O₄ nanocomposites for malachite green dye adsorption: Kinetic and thermodynamic studies. *Composites Part B: Engineering*, 167, 544–555. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.03.030>

Ramadhan, M. D., Iriany, Misran, E., & Turmuzi, M. (2021). Studi Model Isoterm Adsorpsi Kristal Violet oleh Biosorben Kulit Ubi Kayu (Manihot esculenta). *Jurnal Teknik Kimia USU*, 10(1), 38–44. <https://doi.org/10.32734/jtk.v10i1.5485>

Riyanto, R., & Nas, S. W. (2016). Validation of Analytical Methods for Determination of Methamphetamine Using Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy. *IOSR Journal of Pharmacy and Biological Sciences*, 11(05), 51–59. <https://doi.org/10.9790/3008-1105035159>

Saragi, T., Permana, B., Saputri, M., Safriani, L., Rahayu, I., & Risdiana, R. (2018). SINTESIS NANOPARTIKEL MAGNETIK DENGAN METODE KOPRESIPITASI. *Jurnal Material dan Energi Indonesia*, 7(02), 17. <https://doi.org/10.24198/jmei.v7i02.15393>

Shetty, B., Yashodha, S. R., & Johns, J. (2023). A Green Approach to the Removal of Malachite Green Dye from Aqueous Medium Using Chitosan/Cellulose Blend. *Fibers and Polymers*, 24(4), 1297–1307. <https://doi.org/10.1007/s12221-023-00134-7>

- Sims, R. A., Harmer, S. L., & Quinton, J. S. (2019). The Role of Physisorption and Chemisorption in the Oscillatory Adsorption of Organosilanes on Aluminium Oxide. *Polymers*, 11(3), 410. <https://doi.org/10.3390/polym11030410>
- Sotomayor, F. J., Cychosz, K. A., & Thommes, M. (2018). *Characterization of Micro/Mesoporous Materials by Physisorption: Concepts and Case Studies*.
- Sudarlin. (2012). *Prinsip dan Teknik Penggunaan Gas Sorption Analyzer (GSA)*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.13364.07048>
- Suhartati, T. (2017). *DASAR-DASAR SPEKTROFOTOMETRI UV-VIS DAN SPEKTROMETRI MASSA UNTUK PENENTUAN STRUKTUR SENYAWA ORGANIK*.
- Sulistiyawati, E., Anggorowati, H., Rochmah K.P, N., & Ariardini, N. (2022). Isotherm and Adsorption Thermodynamics Cross-Linked Chitosan Microcapsules of Kalium Persulphate to Methyl Orange Dye. *Eksergi*, 19(2), 51. <https://doi.org/10.31315/e.v19i2.6163>
- Sumari, S., Prakasa, Y. F., Asrori, M. R., & Baharintasari, D. R. (2020). Analisis Kandungan Mineral Pasir Pantai Bajul Mati Kabupaten Malang Menggunakan XRF dan XRD. *Fullerene Journal of Chemistry*, 5(2), 58. <https://doi.org/10.37033/fjc.v5i2.154>
- Syakina, A. N., & Rahmayanti, M. (2023). Removal of methyl violet from aqueous solutions by green synthesized magnetite nanoparticles with Parkia Speciosa Hassk. Peel extracts. *Chemical Data Collections*, 44, 101003. <https://doi.org/10.1016/j.cdc.2023.101003>
- Tang, F., Li, Y., Huang, J., Tang, J., Chen, X., Yu, H.-Y., Zhou, Y., & Tang, D. (2021). An environmentally friendly and economical strategy to cyclically produce cellulose nanocrystals with high thermal stability and high yield. *Green Chemistry*, 23(13), 4866–4872. <https://doi.org/10.1039/D1GC01392K>
- 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>

- Trisanti, P. N., H.P., S. S., Nura'ini, E., & Sumarno, S. (2018). EKSTRAKSI SELULOSA DARI SERBUK GERGAJI KAYU SENGON MELALUI PROSES DELIGNIFIKASI ALKALI ULTRASONIK. *Jurnal Sains Materi Indonesia*, 19(3), 113. <https://doi.org/10.17146/jsmi.2018.19.3.4496>
- Triyastiti, L., & Krisdiyanto, D. (2018). Isoalasi Nanokristal Selulosa Dari Pelepah Pohon Salak Sebagai Filler Pada Film Berbasis Polivinil Alkohol (PVA). *Indonesian Journal of Materials Chemistry*, (1), 39–45.
- Wang, J., & Guo, X. (2020). Adsorption kinetic models: Physical meanings, applications, and solving methods. *Journal of Hazardous Materials*, 390, 122156. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122156>
- Wijayanto, S. O., & Bayuseno, A. P. (2014). ANALISIS KEGAGALAN MATERIAL PIPA FERRULE NICKEL ALLOY N06025 PADA WASTE HEAT BOILER AKIBAT SUHU TINGGI BERDASARKAN PENGUJIAN: MIKROGRAFI DAN KEKERASAN. 2(1).
- 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>
- 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>
- 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>
- Zhao, X., Hua, Q., Wang, C., Wang, X., Zhang, H., Zhang, K., Zheng, B., Yang, J., & Niu, J. (2023). Study on adsorption performance and mechanism of peanut hull-derived magnetic biochar for removal of malachite green from water. *Materials Research Express*, 10(9), 095504. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/acf756>
- Zulnazri, Z., Lestari, D., Hakim, L., Dewi, R., & Sulhatun, S. (2022). Kajian Ekstraksi Selulosa dari Kulit Pinang dengan Menggunakan Larutan NaOH. *Jurnal Teknologi Kimia Unimal*, 11(2), 193–206. <https://doi.org/10.29103/jtku.v11i2.7846>