

***GREEN SYNTHESIS* NANOKOMPOSIT $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$
DARI EKSTRAK KULIT BUAH DELIMA (*Punica
granatum L.*) DAN APLIKASINYA UNTUK
DEGRADASI LIMBAH ZAT WARNA**

TUGAS AKHIR

Untuk memenuhi sebagian persyaratan
Mencapai derajat Sarjana S-1

Program Studi Fisika



STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

diajukan oleh :

Nisa Fajria

18106020024

**PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UIN SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA**

2025



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-1175/Un.02/DST/PP.00.9/06/2025

Tugas Akhir dengan judul : Green Synthesis Nanokomposit Fe₃O₄/TiO₂ dari Ekstrak Kulit Buah Delima (*Punica granatum L.*) dan Aplikasinya Untuk Degradasi Limbah Zat Warna

yang dipersiapkan dan disusun oleh:

Nama : NISA FAJRIA
Nomor Induk Mahasiswa : 18106020024
Telah diujikan pada : Rabu, 11 Juni 2025
Nilai ujian Tugas Akhir : A

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

TIM UJIAN TUGAS AKHIR



Valid ID: 6851a37aed99b

Ketua Sidang

Dr. Widayanti, S.Si. M.Si.
SIGNED



Valid ID: 6851fa48cdf1f

Penguji I

Asih Melati, S.Si., M.Sc., Ph.D.
SIGNED



Valid ID: 685185a615823

Penguji II

Dr. Thaqibul Fikri Niyartama, S.Si., M.Si.
SIGNED



Valid ID: 68521ba018e91

Yogyakarta, 11 Juni 2025
UIN Sunan Kalijaga
Dekan Fakultas Sains dan Teknologi
Prof. Dr. Dra. Hj. Khurul Wardati, M.Si.
SIGNED

3SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Nisa Fajria
NIM : 18106020024
Program Studi : Fisika
Fakultas : Sains dan Teknologi

Menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul "*Green Synthesis* Nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ Dari Ekstrak Kulit Buah Delima (*Punica granatum L.*) dan Aplikasinya Untuk Degradasi Limbah Zat Warna " merupakan hasil penelitian saya sendiri, tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu perguruan tinggi, dan sepanjang pengetahuan saya tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan orang lain kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Yogyakarta, 30 Mei 2025

Penulis


Nisa Fajria
18106020024



SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR

Hal : Persetujuan skripsi

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 : NISA FAJRIA

NIM : 18106020024

Judul Skripsi : *Green Synthesis* Nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ Dari Ekstrak Kulit Buah Delima (*Punica granatum L.*) dan Aplikasinya Untuk Degradasi Limbah Zat Warna

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

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

Wassalamu'alaikum wr. wb.

Yogyakarta, 2 Juli 2025

Pembimbing

Dr. Widayanti, S.Si., M.Si.

NIP. 19760526 200604 2 005

**GREEN SYNTHESIS NANOKOMPOSIT $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ DARI EKSTRAK
KULIT BUAH DELIMA (*Punica granatum L.*) DAN APLIKASINYA
UNTUK DEGRADASI LIMBAH ZAT WARNA**

Nisa Fajria
18106020024

INTISARI

Industri tekstil merupakan salah satu penyumbang utama pencemaran air akibat limbah cair yang mengandung zat warna sintetis, terutama jenis azo seperti *Remazol red*, sebagian besar pewarna tidak berikatan dengan serat dan tetap berada dalam larutan, lalu terbuang bersama limbah cair industri. Pewarna ini bersifat toksik dan sulit terdegradasi secara biologis, sehingga memerlukan metode alternatif yang efektif dan ramah lingkungan. Salah satu metode yang menjanjikan adalah fotodegradasi. Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis Nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ menggunakan metode *green synthesis* dengan ekstrak kulit buah delima (*Punica granatum L.*) sebagai agen pereduksi, serta mengkaji aplikasinya dalam fotodegradasi zat warna *Remazol red*. Nanokomposit yang dihasilkan dikarakterisasi menggunakan *X-ray Diffraction* (XRD) untuk menentukan struktur kristal, serta *Scanning Electron Microscopy* dan *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (SEM-EDX) untuk mengamati morfologi permukaan dan komposisi unsur. Hasil XRD menunjukkan bahwa Fe_3O_4 dan TiO_2 berhasil terbentuk dalam struktur kristalit dengan tiga puncak difraksi dengan puncak pada $35,6^\circ$ (311); $62,4^\circ$ (440); $75,1^\circ$ (622) dengan struktur kristal *cubic* untuk Fe_3O_4 dan enam puncak difraksi dengan puncak pada sudut $25,3^\circ$ (101); $37,8^\circ$ (004); $48,0^\circ$ (200); $53,9^\circ$ (105); $68,7^\circ$ (116); $70,2^\circ$ (220) dengan struktur kristal tetragonal untuk TiO_2 . Analisis SEM menunjukkan morfologi partikel dengan ukuran dalam kisaran 40-180 nanometer, sementara data EDX mengonfirmasi keberadaan unsur Fe, Ti, dan O dengan persentase massa Ti 21,24%, O 32,89% dan Fe 45,87%. Nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ yang disintesis kemudian diaplikasikan sebagai fotokatalis untuk degradasi zat warna sintetis *Remazol Red* di bawah sinar ultraviolet. Kemampuan fotodegradasi diuji menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum 524 nm. Variasi waktu penyinaran UV dilakukan selama 30, 60, 90, dan 120 menit untuk menentukan efektivitas degradasi. Uji fotodegradasi menunjukkan efisiensi degradasi yang signifikan, dengan efisiensi mencapai 97,54% dalam waktu 120 menit. Studi ini menunjukkan bahwa kulit buah delima berpotensi sebagai reduktor untuk sintesis $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$, serta dapat diaplikasikan dalam pengolahan limbah tekstil.

Kata kunci: $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$, Fotodegradasi, *Green synthesis*, *Remazol Red*

GREEN SYNTHESIS OF $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ NANOCOMPOSITE FROM POMEGRANATE PEEL EXTRACT (*Punica granatum* L.) AND APPLICATION FOR DEGRADATION OF DYE WASTE WATER

Nisa Fajria

18106020024

ABSTRACT

*The textile industry is one of the main contributors to water pollution because it releases liquid waste containing synthetic dyes, especially azo dyes like Remazol Red. These dyes cannot bind to fibers, so they remain in solution and get discharged with industrial liquid waste. These dyes are toxic. They are also difficult to degrade biologically. This requires the development of effective and environmentally friendly alternative methods. One promising method is photodegradation using photocatalysts. The objective of this study is to synthesize $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ photocatalysts using green synthesis with pomegranate peel extract (*Punica granatum* L.) as the reducing agent and to examine its efficiency in photodegrading Remazol red dye. The resulting nanocomposite's crystal structure was determined using X-ray Diffraction (XRD), and its surface morphology and elemental composition were observed using Scanning Electron Microscopy and Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (SEM-EDX). The XRD results showed that Fe_3O_4 and TiO_2 formed a crystalline structure with three diffraction peaks of Fe_3O_4 at 35.6° (311), 62.4° (440), and 75.1° (622) with a cubic crystal structure and six diffraction peaks at 25.3° (101); 37.8° (004); 48.0° (200); 53.9° (105); 68.7° (116); 70.2° (220) with tetragonal crystal structure for TiO_2 . Scanning electron microscopy (SEM) analysis revealed particle morphology with sizes ranging from 40 to 180 nanometers. Energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX) data confirmed the chemical composition of the sample, which contained 21.24% Ti, 32.89% O, and 45.87% Fe by mass. The synthesized $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ nanocomposite was then used as a photocatalyst to degrade the synthetic dye Remazol Red under ultraviolet light. Photodegradation efficiency was tested using a UV-Vis spectrophotometer at a maximum wavelength of 524 nm. UV irradiation times of 30, 60, 90, and 120 minutes were used to evaluate degradation efficiency. The photodegradation test showed significant degradation efficiency, reaching 97.54% within 120 minutes. These results suggest that pomegranate peel has potential as a reducing agent for $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ synthesis and could be used in processing textile waste.*

Kata kunci: $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$, Photodegradation, Green synthesis, Remazol Red

MOTTO

“Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya.”

(QS. Al-Baqarah: 286)

“Walau tak tahu cara melipatnya, suatu saat pasti akan berhasil lalu terbang.”

— Pesawat Kertas 365 Hari (JKT48)



STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

HALAMAN PERSEMBAHAN

Mama dan Papa tercinta atas doa yang tiada henti, segala pencapaian ini tak akan berarti tanpa restu dan ridamu.

Uni, Abang dan semua anggota keluarga yang senantiasa memberikan dukungan moril dan semangat dalam setiap langkah perjuangan.

Sahabat-sahabat seperjuangan, yang telah menjadi teman berbagi tawa dan lelah

Diriku sendiri yang terus bertahan dalam jatuh bangun, yang belajar untuk tidak menyerah, dan tetap melangkah walau perlahan.

Almamater tercinta sebagai tempat tumbuh dan belajar

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

KATA PENGANTAR

Puji syukur selalu dipanjatkan kehadirat Allah yang Maha Esa karena atas rahmat dan hidayah-Nya penulis dapat menyusun Tugas akhir dengan judul “Green Synthesis Nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ Dari Ekstrak Kulit Buah Delima (*Punica granatum* L.) dan Aplikasinya Untuk Degradasi Limbah Zat Warna”. Shalawat serta salam selalu tercurahkan kepada Nabi Muhammad SAW, yang telah membawa kita dari zaman jahiliyah menuju zaman terang benderang dan penuh ilmu.

Tugas akhir merupakan salah satu syarat untuk mencapai gelar strata satu Program Studi Fisika Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga. Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan laporan ini tidak lepas dari bantuan banyak pihak. Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Kedua orang tua penulis dan kakak yang senantiasa memberi semangat, doa dan dukungan
2. Dr. Widayanti, M. Si. selaku Kepala Program Studi Fisika
3. Dr. Widayanti, M. Si. selaku Dosen Pembimbing Tugas akhir yang senantiasa memberikan arahan dan bimbingan kepada penulis
4. Dr. Nita Handayani, S.Si, M.Si selaku Dosen Pembimbing Akademik Mahasiswa angkatan 2018
5. Seluruh dosen fisika beserta jajarannya yang telah memberikan dukungan dan ilmunya
6. Teman-teman *Study Club* Fisika Material, atas kerja sama, bantuan, dan kebersamaan selama proses penelitian berlangsung
7. Laila yang selalu bersama dan membantu selama penelitian berlangsung

8. Zizah dan Dita yang telah menjadi sumber inspirasi, semangat, dan kebanggaan tersendiri selama proses penyusunan tugas akhir ini
9. Teman-teman dan keluarga yang senantiasa memberi semangat dan dalam penyusunan tugas akhir ini
10. Penulis juga ingin berterima kasih kepada diri sendiri, karena sudah memilih untuk tetap berjalan, karena telah mampu bertahan di saat ingin menyerah dan tetap percaya bahwa setiap usaha akan membuahkan hasil.

Semoga Allah senantiasa melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya serta petunjuk bagi kita semua. Penulis sangat menyadari dalam penyusunan tugas akhir ini baik tulisan maupun kata-kata jauh dari kesempurnaan karena keterbatasan ilmu, pengetahuan dan pengalaman. Saran dan masukan selalu berguna untuk perkembangan penulis. Semoga laporan ini dapat memberikan manfaat, baik bagi penulis pribadi maupun pembaca.

Yogyakarta, 28 Mei 2025

Penulis

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

DAFTAR ISI

PENGESAHAN TUGAS AKHIR	ii
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN.....	iii
HALAMAN PERSETUJUAN TUGAS AKHIR.....	iv
INTISARI.....	v
ABSTRACT	vi
MOTTO	vii
HALAMAN PERSEMBAHAN	viii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvi
DAFTAR ISTILAH	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	7
1.3 Tujuan Penelitian.....	8
1.4 Batasan Penelitian	8
1.5 Manfaat Penelitian.....	8
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	10
2.1 Studi Pustaka	10
2.2 Landasan Teori	14
2.2.1 Buah Delima (<i>Punica granatum L.</i>)	14
2.2.2 Fe_3O_4	18
2.2.3 TiO_2	20
2.2.4 Nanokomposit.....	23
2.2.5 <i>Green Synthesis</i>	24
2.2.6 Kopresitasi	28
2.2.7 Fotodegradasi.....	30
2.2.8 <i>Remazol Red</i>	31
2.2.9 Spektroskopi UV-Vis.....	33
2.2.10 SEM - EDX.....	36

2.2.11 <i>X-Ray Diffraction (XRD)</i>	41
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	45
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	45
3.2 Alat dan Bahan Penelitian	45
3.2.1 Alat Penelitian.....	45
3.2.2 Bahan Penelitian	47
3.3 Prosedur penelitian	47
3.3.1 Ekstraksi kulit buah delima.....	48
3.3.2 Sintesis Fe_3O_4	49
3.3.3 Sintesis $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$	50
3.3.4 Karakterisasi	51
3.3.5 Aplikasi Fotodegradasi	54
3.4 Metode Analisa Data	57
3.4.1 Analisa Fasa Kristal	57
3.4.2 Analisa Morfologi dan Komposisi Unsur	57
3.4.3 Uji Efisiensi Fotodegradasi.....	58
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	59
4.1 Hasil Penelitian.....	59
4.1.1 Hasil Sintesis $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$	59
4.1.2 Hasil Karakterisasi $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$	59
4.1.3 Hasil Pengujian Fotokatalis	61
4.2 Pembahasan	64
4.2.1 Sintesis $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$	64
4.2.2 Karakterisasi $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$	67
4.2.3 Fotodegradasi <i>Remazol Red</i> oleh Nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$	72
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	79
5.1 Kesimpulan.....	79
5.2 Saran	80
DAFTAR PUSTAKA	82
LAMPIRAN.....	91

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Buah Delima (<i>Punica Granatm L.</i>).....	16
Gambar 2.2 Mekanisme pembentukan Nanopartikel Fe ₃ O ₄ menggunakan ekstrak kulit buah <i>Punica granatum L</i>	17
Gambar 2.3 Gambaran struktur kristalografi magnetit	19
Gambar 2.4 Fasa kristal TiO ₂	22
Gambar 2.5 proses untuk sintesis nanopartikel besi dari Daun Nimba (<i>Azadirachta indica</i>)	26
Gambar 2.6 Green synthesis nanopartikel	27
Gambar 2.7 Skema proses kopresipitasi	28
Gambar 2.8 Mekanisme fotokatalitik.....	30
Gambar 2.9 Struktur molekul <i>Remazol Red</i>	32
Gambar 2.10 Prinsip kerja spektrofotometer UV/Vis.....	35
Gambar 2.11. Interaksi antara elektron dengan sampel pada mikroskop	37
Gambar 2.12. Skema SEM.....	38
Gambar 2.13 Prinsip kerja EDX	39
Gambar 2.14 Peta unsur pada EDX	41
Gambar 2.15. Ilustrasi difraksi sinar-X.....	43
Gambar 3.1 Desain Reaktor fotokatalis	46
Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian	47
Gambar 3.3 Diagram alir ekstraksi kulit buah delima	48
Gambar 3.4 Diagram alir pembuatan Fe ₃ O ₄	49
Gambar 3.5 Diagram alir pembuatan Fe ₃ O ₄ /TiO ₂	51
Gambar 3.6 Diagram alir karakterisasi XRD	52
Gambar 3.7 Diagram alir karakterisasi SEM	53
Gambar 3.8 Diagram alir karakterisasi EDX	53
Gambar 3.9 Diagram alir aplikasi fotodegradasi	54
Gambar 3.10 Kurva Standar <i>Remazol Red</i>	56
Gambar 4.1 Hasil sintesis (a) Fe ₃ O ₄ , (b) Fe ₃ O ₄ yang sudah digerus dan (c) Fe ₃ O ₄ /TiO ₂	59
Gambar 4.2 Grafik XRD Fe ₃ O ₄ /TiO ₂	60
Gambar 4.3 Hasil Karakterisasi SEM Fe ₃ O ₄ /TiO ₂ (a) morfologi pada perbesaran 20.000x dan (b) diameter butir.....	60
Gambar 4.4 Komposisi Unsur dalam Fe ₃ O ₄ /TiO ₂	61
Gambar 4.5 Panjang gelombang maksimum <i>Remazol Red</i>	62
Gambar 4.6 Kurva standar <i>Remazol Red</i>	62
Gambar 4.7 Larutan <i>Remazol Red</i> Setelah degradasi (a) dengan katalis Fe ₃ O ₄ (b) TiO ₂ dengan katalis Fe ₃ O ₄ /TiO ₂	63
Gambar 4.8 Ekstraksi Kulit Buah Delima (a) bubuk kulit buah delima, (b) proses ekstraksi dan (c) filtrasi.....	65
Gambar 4.9 Sintesis Fe ₃ O ₄ (a) bahan prekursor (b) pencampuran prekursor (c) setelah penambahan ekstrak kulit buah delima (d) Setelah penambahan NH ₄ OH (e) Proses pencucian.....	66
Gambar 4.10 Fe ₃ O ₄ dan TiO ₂	66

Gambar 4.11 proses furnace Nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$	67
Gambar 4.12 Analisis Kristal	68
Gambar 4.13 Reaktor Fotokatalis	74
Gambar 4.14 Katalis dapat ditarik magnet.....	75



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbedaan Penelitian terdahulu.....	14
Tabel 2.2 Skrining fitokimia kulit buah <i>Punica granatum</i> L.....	17
Tabel 3.1 Alat Penelitian.....	45
Tabel 3.2 Bahan Penelitian	47
Tabel 4.1 Persentase degradasi <i>Remazol Red</i>	64
Tabel 4.2 Ukuran Krisalit	68



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Uji UV-Vis	91
Lampiran 2 Perhitungan efektivitas degradasi	94
Lampiran 3 Karakterisasi XRD.....	98
Lampiran 4 JCPDS.....	100
Lampiran 5 Perhitungan ukuran kristalit.....	101



DAFTAR ISTILAH

A

Absorbansi	Ukuran seberapa banyak cahaya (pada panjang gelombang tertentu) yang diserap oleh suatu zat saat cahaya melewati larutan tersebut
Adsorpsi	Proses zat menempel pada permukaan zat lain, tanpa masuk ke dalam struktur atau volume zat tersebut.
Afinitas	Kekuatan atau kecenderungan suatu zat untuk berinteraksi atau berikatan dengan zat lain
Aglomerasi	Proses partikel-partikel kecil bergabung atau menggumpal membentuk partikel yang lebih besar
Akseptor	Zat atau molekul yang menerima elektron
Analit	Zat yang diukur atau dianalisis dalam suatu sampel
Anastase	Fase kristal dari TiO_2 yang bersifat fotokatalitik tinggi
Antioksidan	Senyawa yang mencegah oksidasi dengan menangkap radikal bebas
Antiproliferasi	Sifat zat yang menghambat pertumbuhan atau reproduksi sel
Azo	Gugus $-\text{N}=\text{N}-$ yang sering ditemukan pada senyawa pewarna

B

<i>Backscattered electron</i>	Elektron yang dipantulkan kembali dalam mikroskop elektron
Biokompatibilitas	Kemampuan suatu bahan berinteraksi dengan sistem biologis tanpa reaksi buruk
Biomassa	Bahan organik dari makhluk hidup yang bisa digunakan sebagai sumber energi
Biomolekul	Molekul biologis seperti protein, DNA, dan karbohidrat
<i>Bottom up</i>	Metode sintesis dari skala atomik/molekul kecil menjadi struktur lebih besar

C

Cahaya monokromatik	Cahaya dengan satu panjang gelombang saja
Celah pita	Energi minimum yang diperlukan untuk memindahkan elektron dari pita valensi ke pita konduksi

D

Degradasi	Pemecahan molekul kompleks menjadi lebih sederhana
Deprotonisasi	Proses pelepasan proton (ion H^+) dari suatu molekul atau ion.
Difraksi	Penyebaran gelombang, biasanya cahaya atau sinar-X, ketika melewati celah atau melewati kisi kristal.
Dispersibilitas	Kemampuan suatu zat untuk menyebar merata dalam medium lain tanpa mengendap.

E

Eksitasi	Proses pemindahan elektron atau eksitasi elektron dari keadaan dasar ke keadaan energi lebih tinggi.
Elektrokonduktivitas	Kemampuan suatu larutan atau bahan untuk menghantarkan listrik.

F

Fabrikasi	Proses pembuatan atau penciptaan suatu produk atau material.
<i>Face centered cubic</i>	Struktur kristal dengan atom tersusun pada pusat setiap muka kubus dan sudutnya.
Fenolik	Senyawa kimia yang mengandung gugus fenol, yaitu cincin aromatik dengan gugus hidroksil ($-\text{OH}$).
Feromagnetik	Material magnetik dengan momen magnetik antiparalel yang tidak sama besar sehingga menghasilkan magnetisasi total.

Flavonoid	Senyawa alami yang termasuk golongan polifenol dan berfungsi sebagai antioksidan.
Fotokatalis	Bahan yang dapat mempercepat reaksi kimia dengan bantuan cahaya.
G	
GAE	Ekivalen asam galat, unit pengukuran aktivitas antioksidan dalam ekstrak tanaman.
Garam besi	Senyawa yang mengandung ion besi (Fe).
<i>Green Synthesis</i>	Metode sintesis bahan menggunakan bahan ramah lingkungan.
Gugus kromofor	Gugus dalam molekul yang menyerap cahaya tampak dan memberikan warna.
H	
Heterojungsi	Senyawa yang mengandung dua jenis gugus fungsional berbeda.
Hidrotermal	Metode sintesis atau reaksi yang dilakukan dalam larutan air pada suhu dan tekanan tinggi.
I	
Ikatan antar muka	Ikatan yang terbentuk di antara dua fase berbeda pada permukaan perbatasannya.
Injeksi	Proses memasukkan zat atau bahan ke dalam suatu sistem atau media.
Inklusi	Proses penggabungan suatu zat ke dalam struktur kristal atau matriks bahan lain.
Ion	Atom atau molekul yang memiliki muatan listrik positif atau negatif.
K	
Kalsinasi	Proses pemanasan suatu bahan hingga suhu tinggi.
Karsinogenik	Zat atau senyawa yang dapat menyebabkan kanker.
Katalis	Zat yang mempercepat laju reaksi kimia tanpa ikut bereaksi.
Kopresipitasi	Metode pengendapan bersama dua atau lebih ion dari larutan untuk membentuk presipitat.
Kristalit	Bagian kecil dalam material yang memiliki struktur kristal tertentu.
Kualitatif	Metode analisis yang bersifat deskriptif.
Kuantitatif	Metode analisis yang melibatkan pengukuran dan perhitungan.
Kultivar	Varietas tanaman yang dibudidayakan dengan ciri khas tertentu.
M	
Magnetisasi	Besaran magnetisasi suatu bahan, yaitu momen magnetik per satuan volume atau massa.
Matriks	Bahan atau fase yang menjadi lingkungan tempat partikel atau fase lain berada.
<i>Mesocarp</i>	Lapisan tengah dari buah yang biasanya berdaging.
Metabolit	Senyawa yang dihasilkan dalam metabolisme organisme.
Metode fisik	Metode pengolahan material dengan teknik fisik seperti pemanasan atau tekanan.
Metode kimia	Metode pengolahan material dengan reaksi kimia untuk membentuk bahan baru.
Molaritas	Konsentrasi larutan yang dinyatakan dalam mol zat terlarut per liter larutan.
Molekul	Unit terkecil dari zat yang dapat berdiri sendiri secara kimia.
Morfologi	Bentuk atau struktur permukaan serta ukuran partikel suatu bahan.
Mutagenik	Zat yang dapat menyebabkan mutasi atau perubahan genetik pada DNA.

N	
Nanokomposit	Komposit yang terdiri dari matriks dengan partikel berukuran nanometer.
Non-destruktif	Metode pengujian tanpa merusak objek yang diuji, dalam proses adsorpsi polutan tetap utuh, hanya berpindah ke adsorben.
Nukleasi	Proses pembentukan inti atau titik awal pengkristalan.
O	
Okluasi	Penutupan atau penyumbatan saluran atau rongga oleh suatu zat.
Oksidasi tingkat lanjut	Reaksi kimia yang melibatkan pembentukan radikal bebas atau spesies oksigen aktif.
Oktahedral	Bentuk geometri molekul dengan delapan atom atau ion mengelilingi pusat secara simetris.
Optik	Berkaitan dengan sifat cahaya dan interaksinya dengan materi.
P	
Pengkelat	Zat yang dapat mengikat ion logam membentuk kompleks stabil.
pH	Ukuran keasaman atau kebasaan suatu larutan.
Polifenol	Senyawa polifenol yang ditemukan dalam tanaman dan berfungsi sebagai antioksidan.
Polikromatik	Memiliki beberapa warna atau panjang gelombang berbeda.
Prekursor	Zat awal atau bahan dasar dalam suatu proses kimia atau sintesis.
Presipitasi	Proses pengendapan zat padat dari larutan.
Presipitat	Zat padat yang terbentuk dari proses presipitasi.
R	
Reagen	Zat atau bahan yang digunakan dalam reaksi kimia untuk menghasilkan produk tertentu.
Reaksi redoks	Reaksi kimia yang melibatkan transfer elektron antara zat.
Reduksi	Proses penambahan elektron ke suatu zat kimia.
Rutin	Senyawa flavonoid yang berfungsi sebagai antioksidan dan anti inflamasi.
S	
Sel satuan	Unit terkecil dalam kisi kristal yang mengulang secara berulang.
Selulosa	Polimer alami yang membentuk dinding sel tumbuhan.
Semikonduktor	Material dengan konduktivitas listrik di antara isolator dan konduktor.
Senyawa bioaktif	Senyawa yang memiliki aktivitas biologis dalam tubuh.
Serat	Struktur halus yang membentuk bahan tekstil.
Sifat mekanik	Sifat fisik bahan yang berkaitan dengan kekuatan, elastisitas, dan keuletan.
Sintesis	Proses pembuatan senyawa atau material baru dari bahan dasar.
Sol-gel	Metode sintesis material dengan proses pembentukan gel dari larutan.
Spektroskopi	Teknik analisis yang mempelajari interaksi antara materi dengan radiasi elektromagnetik.
Spektrum	Distribusi intensitas radiasi pada berbagai panjang gelombang.
Spektrum emisi	Spektrum cahaya yang dipancarkan oleh atom atau molekul setelah eksitasi.
Spinel	Mineral dengan struktur kristal tertentu, umumnya oksida logam.
Suhu curie	Suhu di mana material magnetik kehilangan sifat magnetik.

Superparamagnetik	Bahan magnetik yang menunjukkan magnetisasi hanya dalam medan magnet eksternal dan tidak mempertahankan magnetisasi saat medan hilang.
T	
Tanin	Senyawa polifenol yang banyak terdapat pada tanaman dan memiliki efek antioksidan.
Terhidrolisis	Proses pemecahan senyawa dengan air.
Transmisi	Proses perpindahan gelombang melalui suatu medium atau objek.
U	
Ultraviolet	Gelombang elektromagnetik dengan panjang gelombang lebih pendek dari cahaya tampak.
V	
Vinil sulfon	Senyawa organik yang mengandung gugus vinil dan sulfon.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kelestarian lingkungan memerlukan dua syarat utama yaitu pengurangan produksi limbah dan pengolahan bahan limbah setelah terbentuk. Pewarna merupakan salah satu limbah perairan yang banyak jumlahnya, sekitar 700.000 ton pewarna organik di seluruh dunia diproduksi setiap tahunnya, antara 10%–15% pewarna terbuang ke sungai selama proses pewarnaan dan aplikasi (Dossoki dkk., 2021). Allah Subhanahu wa Ta'ala berfirman:

ظَهَرَ الْفَسَادُ فِي الْبَرِّ وَالْبَحْرِ بِمَا كَسَبَتْ أَيْدِي النَّاسِ لِيُذِيقَهُمْ بَعْضَ الَّذِي عَمِلُوا لَعَلَّهُمْ يَرْجِعُونَ

Artinya: “Telah tampak kerusakan di darat dan di laut disebabkan perbuatan tangan manusia. (Melalui hal itu) Allah membuat mereka merasakan sebagian dari (akibat) perbuatan mereka agar mereka kembali (ke jalan yang benar)” (Q.S. Ar Rum [30]:41)

Ayat di atas menjelaskan, kerusakan yang terjadi di darat maupun di laut disebabkan oleh manusia, salah satunya karena limbah, jika limbah menumpuk maka akan sangat mencemari alam kita. Manusia harus mengikuti dan mematuhi semua hukum Allah, termasuk tidak melakukan kerusakan terhadap sumber daya alam yang ada. Mereka juga harus bertanggung jawab terhadap keberlanjutan kehidupan di bumi ini. Namun, manusia mengalami kesulitan untuk tidak menghasilkan limbah. Oleh karena itu, langkah yang terbaik adalah mengolah limbah agar tidak mencemari lingkungan.

Sudah seharusnya sebagai umat muslim melakukan pemeliharaan alam dan menanggulangi pencemaran. Pencemaran tersebut merupakan ancaman terhadap kesejahteraan manusia dan sistem ekologi. Tercemarnya air yang intensif mencegah

penetrasi sinar matahari, mengurangi kadar oksigen, mempengaruhi fotosintesis, dan menghancurkan kehidupan akuatik dan ekosistem darat (Rawat dkk., 2018).

Limbah cair dari industri tekstil menjadi salah satu penyumbang pencemaran lingkungan terbesar, terutama di daerah-daerah sentra produksi seperti Pekalongan. Menurut Menurut laporan *Kompas* pada 8 Maret 2022, sembilan sumur warga di Kelurahan Simbangkulon, Kecamatan Buaran, Pekalongan, tercemar limbah batik yang menyebabkan air berwarna hitam kemerahan, berbau menyengat, dan tidak layak digunakan. Warga terpaksa membeli air bersih setiap hari akibat tidak tersedianya pengolahan limbah terpadu yang optimal (Utami, 2022).

Salah satu pencemar utama dalam limbah industri tekstil adalah zat warna reaktif, khususnya golongan *azo dye* seperti *Remazol Red*, yang banyak digunakan untuk mewarnai kain berbahan dasar katun, sutra, dan wol (Gürses dkk., 2023). Pewarna ini termasuk dalam kelompok vinil sulfon reaktif yang bersifat anionik, memiliki gugus sulfonat terionisasi dan struktur molekul besar, sehingga memiliki afinitas tinggi terhadap serat tetapi juga bersifat kurang reaktif. Akibatnya, sebagian besar pewarna tidak berikatan dengan serat dan tetap berada dalam larutan, lalu terbuang bersama limbah cair industri (Gürses dkk., 2023). Tingkat pertumbuhan tahunan pewarna reaktif di seluruh dunia adalah empat kali lipat dibandingkan pewarna konvensional (Zollinger, 2003). Zat warna *Remazol Red* ini digunakan sebagai pewarna merah pada industri pencelupan tekstil atau biasanya dicampur dengan zat warna lain sebagai warna primer untuk menghasilkan warna yang baru. Zat ini menjadi pilihan karena dipandang cukup mewakili zat warna yang digunakan pada industri tekstil.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, diperlukan inovasi dalam pengolahan limbah tekstil yang mampu mendegradasi senyawa pewarna secara efektif. Berbagai metode telah diterapkan untuk tujuan menghilangkan pewarna. Metode fisik seperti adsorpsi, teknik ini berguna dan dapat digunakan untuk menghilangkan kotoran dari air limbah namun bersifat non-destruktif karena hanya mentransfer pewarna dari fase cair ke fase padat. Sehingga menimbulkan pencemaran sekunder yang memerlukan pengelolaan lanjutan untuk menyelesaikannya (Kiwaan dkk., 2021). Proses oksidasi tingkat lanjut tampaknya menjadi alternatif yang efektif karena adanya reaksi redoks dalam proses ini, yang dapat memutus rantai kimia air limbah menjadi molekul sederhana (Kadam dkk., 2018). Teknik yang paling umum digunakan dalam oksidasi tingkat lanjut adalah fotokatalisis, dimana cahaya digunakan sebagai energi eksternal untuk menghasilkan lubang elektron. Peristiwa ini menghasilkan reaksi redoks dengan air, memecah makromolekul dan memutus rantai kimia pewarna. Reaksi ini terjadi ketika oksidan digabungkan dengan sinar ultraviolet (UV) atau cahaya tampak dan katalis, seperti ion logam atau semikonduktor (de Oliveira Guidolin dkk., 2021). Oleh karena itu, pengembangan teknik yang efektif, murah, dan andal untuk menghilangkan pewarna organik dari air limbah selalu menjadi perhatian para peneliti.

Beberapa bahan semikonduktor, seperti TiO_2 , ZnO , WO_3 , CdO , CuO , NiO , dan SnO_2 , menunjukkan optimalisasi kinerja tinggi untuk degradasi pewarna organik (Ghanbarnezhad dkk., 2017). Berbagai bahan nano semikonduktor fotokatalitik telah dikembangkan dan digunakan sebagai fotokatalis untuk degradasi pewarna organik dalam air, di antaranya adalah Titanium dioksida

(TiO₂). Semikonduktor tersebut telah mendapat perhatian luar biasa karena stabilitas kimia dan termalnya yang tinggi, tidak beracun, dan biaya rendah (Beketova dkk., 2020). Titanium dioksida (TiO₂) merupakan bahan semikonduktor yang sangat baik untuk aktivitas fotokatalitik dan memiliki potensi dalam pemurnian air (Nakata dan Fujishima, 2012). Meskipun memiliki kemampuan fotokatalitik yang sangat baik, TiO₂ sulit untuk dipisahkan selama pemurnian air karena ukurannya yang kecil dan sulitnya untuk pemrosesan lebih lanjut (Xuan dkk., 2009). Hal ini merupakan tantangan besar yang membatasi aplikasinya.

Diantara berbagai nanopartikel magnetik, oksida besi magnetit (Fe₃O₄) telah banyak diminati dalam fotokatalisis karena sifat elektrokonduktivitas, superparamagnetik, optik, dan kimianya, luas permukaan spesifik yang tinggi, dan ramah lingkungan (Beketova dkk., 2020). Fe₃O₄ merupakan nanopartikel besi oksida dengan sifat unik, seperti superparamagnetisme ketika berukuran nano, mudah terurai secara hayati, dan toksisitas rendah. Karena luas permukaannya yang besar dan dapat digunakan kembali, nanopartikel Fe₃O₄ dapat digunakan sebagai adsorben untuk mendukung proses pengolahan air limbah (Stan dkk., 2017). Fe₃O₄ menjawab tantangan dari rendahnya penggunaan kembali fotokatalis TiO₂ melalui mekanisme pemisahan magnetik.

Struktur heterojungsi antara Fe₃O₄ dan TiO₂ meningkatkan reaktivitas permukaan, menghasilkan laju fotodegradasi $\pm 96\%$ (Istiqomah dkk., 2020). Fe₃O₄ menggabungkan sifat katalitik dengan magnet untuk membuat fotokatalis dapat didaur ulang karena fotokatalis dapat dengan mudah dikumpulkan dari larutan yang diolah dengan bantuan medan magnet eksternal (Rehman dkk., 2021).

Penggabungan antara Fe_3O_4 dan TiO_2 memiliki dua efek positif dalam meningkatkan aktivitas fotokatalitik. Pertama, lapisan tersebut memblokir injeksi elektron dari TiO_2 ke Fe_3O_4 di antarmuka, dan kedua, menyediakan permukaan berpori dengan rasio permukaan yang besar untuk reaksi fotokatalitik (Wang dkk., 2017).

Beberapa penelitian telah menunjukkan kelayakan penggabungan Fe_3O_4 magnetik ke dalam TiO_2 . Misalnya Gnanasekaran dkk (2019) menggunakan teknik presipitasi dan pencampuran sol-gel untuk menggabungkan Fe_3O_4 pada permukaan TiO_2 untuk meningkatkan degradasi fotokatalitik kontaminan organik (Gnanasekaran dkk., 2019). Katalis yang disintesis menunjukkan stabilitas yang lebih tinggi hingga lima siklus fotokatalitik tanpa kehilangan aktivitasnya secara nyata. Lee Shi dkk (Shi dkk., 2020) menggunakan metode hidrotermal untuk degradasi pewarna *Rhodamin blue*. Namun penelitian tersebut masih menggunakan metode konvensional untuk pembuatan nanopartikel.

Metode konvensional adalah pembuatan nanopartikel menggunakan metode sintesis kimia basah dengan prekursor kimia yang tidak ramah lingkungan (Roy dkk., 2021). Penggunaan bahan kimia tersebut setidaknya harus diminimalkan untuk mengurangi terbentuknya limbah baru hasil sintesis nanopartikel. Dibandingkan dengan metode kimia dan fisika yang memakan waktu dan melibatkan proses kompleks, metode ramah lingkungan lebih mudah digunakan dan lebih aman (Prasad dkk., 2018). Saat ini telah banyak dilakukan sintesis nanopartikel dengan metode biologi yang dikenal dengan biosintesis. Biosintesis atau bisa juga disebut *Green synthesis* menggunakan ekstrak dari bahan alami yang

mampu menggantikan bahan kimia berbahaya menjadi bahan ramah lingkungan (Singh dkk., 2018). Oleh karena itu, *Green synthesis* lebih menguntungkan dalam hal biokompatibilitas, ramah lingkungan, tidak beracun, dan efektivitas biaya (Khatami dkk., 2018). Ekstrak tumbuhan seperti daun kelor pada penelitian Tumbelaka dkk. (Tumbelaka dkk., 2022), daun jambu pada penelitian Madima dkk. (Madima dkk., 2022) serta kulit buah delima (*Punica granatum*) pada penelitian Bouafia dkk. (Bouafia dkk., 2022) mempunyai potensi dalam reduksi ion logam. Karena sifat menarik ini, tanaman dianggap sebagai cara yang lebih ramah lingkungan untuk melakukan biosintesis nanopartikel Fe_3O_4 .

Kulit *Punica granatum* memiliki beragam asam fenolik, flavonoid dan tanin (Alexandre dkk., 2019), yang telah berfungsi sebagai zat pereduksi dan penstabil dalam biosintesis beberapa logam dan oksida logam (Bibi dkk., 2019). Kholani (2017) menyebutkan besar kandungan asam fenolik dan flavonoid dalam *Punica granatum L.* sebesar 198,33 mg GAE/g dan 46,63 mg QE/g (El-Kholany, 2017). Sedangkan nilai asam fenolik dan flavonoid dalam kulit manggis (*Garcinia mangostana L.*) sekitar 27,07 mg GAE/g dan 2,01 mg QE/g, serta pada kulit jeruk (*Citrus maxima*) memiliki 4,32 mg QE/g flavonoid (Nseme dkk., 2022; Sowmya dkk., 2019). Besar flavonoid kulit buah delima masih lebih besar dibanding dengan kulit manggis dan kulit jeruk. Ekstrak kulit delima merupakan alternatif ekonomis terhadap metode untuk sintesis nanopartikel Fe_3O_4 . Ekstrak kulit buah *Punica granatum L.* mempunyai potensi untuk mengikat dan mereduksi ion Fe (Sotto dkk., 2019). Oleh karena itu, kulit buah delima dianggap sebagai reagen yang lebih ramah lingkungan untuk biosintesis nanopartikel Fe_3O_4 .

Menemukan bahan ramah lingkungan yang bekerja secara efisien di bawah iradiasi UV merupakan tantangan besar yang dihadapi para peneliti. Studi mengenai *Green synthesis* $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ dan nanokomposit lainnya masih relatif langka. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan fotokatalis nanopartikel magnetik sensitif UV berbasis $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ melalui pendekatan sintesis ramah lingkungan untuk degradasi limbah warna *remazol red* di bawah simulasi UV. Katalis yang diperoleh diselidiki menggunakan berbagai teknik struktural dan morfologi, seperti difraksi sinar-x (XRD) untuk menganalisis struktur dan ukuran kristal $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ dan SEM-EDX untuk mengukur diameter bulir dan komposisi unsur dalam $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$. Kondisi optimal untuk proses fotodegradasi dicari beserta efisiensi dalam penggunaan berulang katalis. Uji degradasi *Remazol red* dilakukan menggunakan spektroskopi UV-Vis.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana mensintesis nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ dengan ekstrak kulit buah delima (*Punica granatum L.*)?
2. Bagaimana karakterisasi Nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ dengan SEM-EDX dan XRD?
3. Bagaimana hasil kinerja fotodegradasi *remazol red* oleh nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mensintesis nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ dengan ekstrak kulit buah delima (*Punica granatum L.*)
2. Mengkarakterisasi Nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ dengan SEM dan XRD
3. Menganalisis hasil kinerja fotodegradasi *remazol red* oleh nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$

1.4 Batasan Penelitian

Penelitian ini memiliki batasan sebagai berikut:

1. Metode pembuatan nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ menggunakan metode kopresipitasi dengan ekstrak kulit buah delima (*Punica granatum L.*)
2. Komposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ akan diaplikasikan pada *Remazol Red* pada lampu UV dengan variasi waktu serta penggunaan berulang katalis selama lima kali
3. Uji kinerja katalis dilakukan dengan analisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan mampu memperluas pengetahuan dalam bidang fisika khususnya fisika material dan memberikan informasi mengenai kajian pengembangan kegunaan kulit buah delima yang belum dimanfaatkan secara maksimal untuk proses sintesis Fe_3O_4 serta menambah pengetahuan tentang pembuatan nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$

Penelitian ini diharapkan pula mampu memberikan alternatif dalam pengelolaan limbah khususnya sampah organik sisa kulit buah agar lebih bermanfaat serta dapat memberikan opsi dalam penanggungan pencemaran zat warna dalam air.



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Sintesis Nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ berhasil dilakukan dengan metode green synthesis dengan ekstrak kulit buah delima (*Punica granatum L.*). Sintesis Fe_3O_4 dilakukan dengan metode kopresipitasi menghasilkan 1,9 gram serbuk Fe_3O_4 dan dilanjutkan pengkompositan dengan TiO_2 yang menghasilkan serbuk Nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ sebanyak 3 gram.
2. Nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ yang telah di sintesis dikarakterisasi oleh XRD dan SEM-EDX. Hasil karakterisasi XRD menunjukkan bahwa Nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ berhasil dibentuk dengan puncak pada Fe_3O_4 $35,6^\circ(311)$; $62,4^\circ(440)$ dan $75,1^\circ(622)$, puncak pada $25,3^\circ(101)$; $37,8^\circ(004)$; $48,0^\circ(200)$; $53,9^\circ(105)$; $68,7^\circ(116)$ dan $70,2^\circ(220)$. Sampel ini memiliki ukuran kristalit Fe_3O_4 sebesar 10,3 nm dan TiO_2 sebesar 12,9 nm. sampel berbentuk hampir bulat namun tidak sempurna dan sampel teraglomerasi atau terjadi penumpukan partikel. Distribusi ukuran partikel ada pada rentang 40-180 nm dengan frekuensi relatif 143 nm serta komposisi massa untuk Ti 21,24%, O 32,89% dan Fe 45,87%.
3. Konsentrasi larutan *Remazol Red* dengan katalis Fe_3O_4 terlihat penurunan konsentrasi sebesar 43,69% pada kondisi tanpa sinar. konsentrasi *Remazol Red* turun seiring pertambahan waktu hingga konsentrasi 3,5 ppm pada waktu penyinaran 120 menit, ini menunjukkan persentase degradasi

menggunakan katalis Fe_3O_4 dapat mencapai 64.21%. Konsentrasi larutan *Remazol Red* dengan katalis TiO_2 terlihat penurunan konsentrasi sebesar 30,84% pada kondisi tanpa sinar. konsentrasi *Remazol Red* turun seiring pertambahan waktu hingga konsentrasi 1,9 ppm pada waktu penyinaran 120 menit, ini menunjukkan persentase degradasi menggunakan katalis TiO_2 dapat mencapai 80,43%. Larutan *Remazol Red* dengan katalis Nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ terlihat penurunan konsentrasi 73.44% pada saat kondisi gelap. Konsentrasi *Remazol Red* turun seiring pertambahan waktu hingga konsentrasi 0,2 ppm pada waktu penyinaran 120 menit, ini menunjukkan persentase degradasi menggunakan katalis TiO_2 dapat mencapai 97.54% yang berarti proses fotodegradasi berhasil dilakukan dengan nilai efektifitas yang mendekati sempurna dan pepaduan antara Fe_3O_4 dan TiO_2 menjadi Nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ meningkatkan efektivitas degradasi.

5.2 Saran

Penelitian ini diharapkan dapat menjadi kajian ilmiah dengan memerhatikan beberapa saran seperti:

1. Penggunaan variasi volume prekursor, presipitat serta agen hijau dalam proses sintesis Fe_3O_4
2. Pembuatan Fe_3O_4 dengan agen hijau lain dan variasi lain serta pembuatan Nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ dengan metode lain sebagai pembanding
3. Penggunaan variasi limbah

4. diantaranya, zat warna yang lain maupun langsung menggunakan limbah industri
5. Penggunaan variasi dalam proses fotodegradasi diantaranya, variasi pH larutan, berat katalis dan waktu kontak.



DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, M., Lenggoro, I. W., Xia, B., & Okuyama, K. 2005. Novel Processing for Softly Agglomerated Luminescent $\text{Y}_2\text{O}_3: \text{Eu}^{3+}$ Nanoparticles Using Polymeric Precursors. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, **Vol. 113 No. 1313**: 97–100.
- Adhim, M. S. 2018. *Synthesis Of Fe_3O_4 (Magnetite) Nanoparticles From Iron Stone Using Co-Precipitation Method With Ph Variation*. (Tugas Akhir), Institut Teknologi Sepuluh November, Surabaya
- Alara, O. R., Abdurahman, N. H., Ukaegbu, C. I., Azhari, N. H., & Kabbashi, N. A. 2018. Metabolic profiling of flavonoids, saponins, alkaloids, and terpenoids in the extract from *Vernonia cinerea* leaf using LC-Q-TOF-MS. *Journal of Liquid Chromatography & Related Technologies*, **Vol. 41 No. 11**: 722–731.
- Albert, D. R., Todt, M. A., & Davis, H. F. 2012. A Low-Cost Quantitative Absorption Spectrophotometer. *Journal of Chemical Education*, **Vol. 89 No. 11**: 1432–1435.
- Alexandre, E. M. C., Silva, S., Santos, S. A. O., Silvestre, A. J. D., Duarte, M. F., Saraiva, J. A., & Pintado, M. 2019. Antimicrobial activity of pomegranate peel extracts performed by high pressure and enzymatic assisted extraction. *Food Research International*, **Vol. 115**: 167–176.
- Alfarisa, S., Rifai, D. A., & Toruan, P. L. 2018. Studi Difraksi Sinar-X Struktur Nano Seng Oksida (ZnO). *Risalah Fisika*, **Vol. 2 No. 2**: 53–57.
- Al-Rawi, N. N., Anwer, B. A., Al-Rawi, N. H., Uthman, A. T., & Ahmed, I. S. 2020. Magnetism in drug delivery: The marvels of iron oxides and substituted ferrites nanoparticles. *Saudi Pharmaceutical Journal*, **Vol. 28 No. 7**: 876–887.
- Bardik, V., Fisenko, A. I., Magazu, S., & Malomuzh, N. P. 2020. The crucial role of water in the formation of the physiological temperature range for warm-blooded organisms. *Journal of Molecular Liquids*, **Vol. 306**.
- Beketova, D., Motola, M., Sopha, H., Michalicka, J., Cicmancova, V., Dvorak, F., Hromadko, L., Frumarova, B., Stoica, M., & Macak, J. M. 2020. One-Step Decoration of TiO_2 Nanotubes with Fe_3O_4 Nanoparticles: Synthesis and Photocatalytic and Magnetic Properties. *ACS Applied Nano Materials*, **Vol. 3 No. 2**: 1553–1563.
- Bibi, I., Nazar, N., Ata, S., Sultan, M., Ali, A., Abbas, A., Jilani, K., Kamal, S., Sarim, F. M., Khan, M. I., Jalal, F., & Iqbal, M. 2019. Green synthesis of iron oxide nanoparticles using pomegranate seeds extract and photocatalytic

- activity evaluation for the degradation of textile dye. *Journal of Materials Research and Technology*, **Vol. 8 No. 6**: 6115–6124.
- Bouafia, A., Laouini, S. E., Tedjani, M. L., Ali, G. A., & Barhoum, A. 2022. Green biosynthesis and physicochemical characterization of Fe₃O₄ nanoparticles using *Punica granatum L.* fruit peel extract for optoelectronic applications. *Textile Research Journal*, **Vol. 92 No. 15**: 2685–2696.
- Bruker. 2025. *Introducing Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy*. Diakses 28 Mei 2025 dari <https://www.bruker.com/en/landingpages/bna/technology/what-is-eds.html>
- Burda, C., Lou, Y., Chen, X., Samia, A. C. S., Stout, J., & Gole, J. L. 2003. Enhanced Nitrogen Doping in TiO₂ Nanoparticles. *Nano Letters*, **Vol. 3 No. 8**: 1049–1051.
- Can, O. T., Bayramoglu, M., & Kobya, M. 2003. Decolorization of Reactive Dye Solutions by Electrocoagulation Using Aluminum Electrodes. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **Vol. 42 No. 14**: 3391–3396.
- Crismeli, C., Nurhidayah, N., Restianingsih, T., Anggraini, R. M., & Deswardani, F. 2024. Sintesis Dan Karakterisasi Nanokomposit Fe₃O₄/TiO₂ Berbasis Pasir Besi Sungai Batanghari. *Journal Online Of Physics*, **Vol. 9 No. 2**: 12–17.
- Dachriyanus. 2004. *Analisis Struktur Senyawa Organik Secara Spektroskopi*. LPTIK Universitas Andalas. Padang.
- Dalton, A. B., Collins, S., Muñoz, E., Razal, J. M., Ebron, V. H., Ferraris, J. P., Coleman, J. N., Kim, B. G., & Baughman, R. H. 2003. Super-tough carbon-nanotube fibres. *Nature*, **Vol. 423 No. 6941**: 703–703.
- de Oliveira Guidolin, T., Possolli, N. M., Polla, M. B., Wermuth, T. B., Franco de Oliveira, T., Eller, S., Klegues Montedo, O. R., Arcaro, S., & Cechinel, M. A. P. 2021. Photocatalytic pathway on the degradation of methylene blue from aqueous solutions using magnetite nanoparticles. *Journal of Cleaner Production*, **Vol.318**.
- Devatha, C. P., & Thalla, A. K. 2018. Green Synthesis of Nanomaterials. Dalam *Synthesis of Inorganic Nanomaterials*. Elsevier. Amsterdam.
- Di Sotto, A., Locatelli, M., Macone, A., Toniolo, C., Cesa, S., Carradori, S., Eufemi, M., Mazzanti, G., & Di Giacomo, S. 2019. Hypoglycemic, Antiglycation, and Cytoprotective Properties of a Phenol-Rich Extract From Waste Peel of *Punica granatum L.* var. Dente di Cavallo DC2. *Molecules*, **Vol. 24 No. 17**: 3103.

- El-Dossoki, F. I., Atwee, T. M., Hamada, A. M., & El-Bindary, A. A. 2021. Photocatalytic degradation of Remazol Red B and Rhodamine B dyes using TiO₂ nanomaterial: estimation of the effective operating parameters. *Desalination And Water Treatment*, **Vol. 233**: 319–330.
- El-Hamamsy, S., & El-khamissi, H. 2020. Phytochemicals, Antioxidant Activity and Identification of Phenolic Compounds by HPLC of Pomegranate (*Punica granatum* L.) Peel Extracts. *Journal of Agricultural Chemistry and Biotechnology*, **Vol. 11 No. 4**: 79–84.
- El-Kholany, E. 2017. Evaluation Of Pomegranate Peel And Its Beverages As Antibacterial And Anticancer Agent. *Egyptian Journal of Agricultural Sciences*, **Vol. 68 No. 2**: 183–195.
- Fatimah, I., & Wijaya, K. 2005. Sintesis TiO₂/Zeolit Sebagai Fotokatalis Pada Pengolahan Limbah Cair Industri Tapioka Secara Adsorpsi-Fotodegradasi. *Teknoin*, **Vol. 10 No. 4**.
- Gabriele, E., Barteselli, A., Moiana, V., Porta, F., Gelain, A., Asai, A., & Sparatore, A. 2014. Methanethiosulfonate derivatives as ligands of STAT-3 SH2 domain. *Nuove Prospettive in Chimica Farmaceutica*. **Vol 32 No. 1**: 337-344
- Ghanbarnezhad, S., Baghshahi, S., Nemati, A., & Mahmoodi, M. 2017. Preparation, magnetic properties, and photocatalytic performance under natural daylight irradiation of Fe₃O₄ -ZnO core/shell nanoparticles designed on reduced GO platelet. *Materials Science in Semiconductor Processing*, **Vol.72**: 85–92.
- Ghuman, B. 2020. Nanocomposites—A Review. *Journal of Chemistry and Chemical Sciences*, **Vol. 5**: 506–510.
- Gibson, R. F. 1994. *Principles Of Composite Material Mechanics*. Mc Graw Hill, Inc. New York.
- Girardet, T., Venturini, P., Martinez, H., Dupin, J.-C., Cleymand, F., & Fleutot, S. 2022. Spinel Magnetic Iron Oxide Nanoparticles: Properties, Synthesis and Washing Methods. *Applied Sciences*, **Vol. 12 No. 16**.
- Gnanasekaran, L., Hemamalini, R., Rajendran, S., Qin, J., Yola, M. L., Atar, N., & Gracia, F. 2019. Nanosized Fe₃O₄ incorporated on a TiO₂ surface for the enhanced photocatalytic degradation of organic pollutants. *Journal of Molecular Liquids*, **Vol. 287**.
- Gunadi, N. 2008. *Degradasi Fotokatalitik Zat Warna Remazol Red RB 133 dalam sistem TiO₂ Suspensi*. (Tugas Akhir), Universitas Indonesia, Depok.

- Guo, Y., Liu, C., Ye, R., & Duan, Q. 2020. Advances on Water Quality Detection by UV-Vis Spectroscopy. *Applied Sciences*, **Vol. 10 No. 19**.
- Gürses, A., Güneş, K., Şahin, E., & Açıkyıldız, M. 2023. Investigation of the removal kinetics, thermodynamics and adsorption mechanism of anionic textile dye, Remazol Red RB, with powder pumice, a sustainable adsorbent from waste water. *Frontiers in Chemistry*, **Vol.11**.
- Hadiyawarman, Rijal, A., Nuryadin, B. W., Abdullah, M., & Khairurrijal. (2008). Fabrikasi Material Nanokomposit Superkuat, Ringan dan Transparan Menggunakan Metode Simple Mixing. *Jurnal Sains dan Nanoteknologi*, **Vol.1 No. 1**: 14–21.
- Iranfar, S., Hekmati, M., Ziyadi, H., Ghasemi, E., & Esmaceli, D. (2021). Synthesis of nanocomposite iron Oxide modified with Punica granatum peel extract and its application in azo dye degradation. *Inorganic Chemistry Communications*, **Vol. 133**.
- Istiqomah, N. I., Muzakki, A. T., Nofrianti, A., Suharyadi, E., Kato, T., & Iwata, S. 2020. The Effect of Silica on Photocatalytic Degradation of Methylene Blue Using Silica-Coated NiZn Ferrite Nanoparticles. *Key Engineering Materials*, **Vol. 855**: 268–273.
- Jain, R., Mathur, M., Sikarwar, S., & Mittal, A. 2007. Removal of the hazardous dye rhodamine B through photocatalytic and adsorption treatments. *Journal of Environmental Management*, **Vol. 85 No. 4**: 956–964.
- Jayanthi, S. A., Nathan, D. M. G. T., Jayashainy, J., & Sagayaraj, P. 2015. A novel hydrothermal approach for synthesizing α -Fe₂O₃, γ -Fe₂O₃ and Fe₃O₄ mesoporous magnetic nanoparticles. *Materials Chemistry and Physics*, **Vol. 162**: 316–325.
- Kadam, A. N., Bhopate, D. P., Kondalkar, V. V., Majhi, S. M., Bathula, C. D., Tran, A.-V., & Lee, S.-W. 2018. Facile synthesis of Ag-ZnO core-shell nanostructures with enhanced photocatalytic activity. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, **Vol. 61**: 78–86.
- Karatutlu, A., Barhoum, A., & Sapelkin, A. 2018. Liquid-phase synthesis of nanoparticles and nanostructured materials. Dalam *Emerging Applications of Nanoparticles and Architecture Nanostructures*. Elsevier. Amsterdam.
- Khatami, M., Alijani, H., Nejad, M., & Varma, R. (2018). Core@shell Nanoparticles: Greener Synthesis Using Natural Plant Products. *Applied Sciences*, **Vol. 8 No. 3**: 411.

- Kiwaan, H. A., Mohamed, F. Sh., El-Ghamaz, N. A., Beshry, N. M., & El-Bindary, A. A. 2021. Experimental and electrical studies of Na-X zeolite for the adsorption of different dyes. *Journal of Molecular Liquids*, **Vol. 332**.
- Kolthoff, I. M. 1932. Theory of Coprecipitation. The Formation and Properties of Crystalline Precipitates. *The Journal of Physical Chemistry*, **Vol. 36 No. 3**: 860–881.
- Koo, K. N., Ismail, A. F., Othman, M. H. D., Bidin, N., & A Rahman, M. 2019. Preparation and characterization of superparamagnetic magnetite (Fe₃O₄) nanoparticles: A short review. *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences*, **Vol. 15 No. 1**: 23–31.
- Kouhpanji, M. R. Z., & Stadler, B. J. H. 2020. A Guideline for Effectively Synthesizing and Characterizing Magnetic Nanoparticles for Advancing Nanobiotechnology: A Review. *Sensors*, **Vol. 20 No. 9**.
- Lestari, D. 2011. *Preparasi Nanokomposit ZnO/TiO₂ Dengan Metode Sonokimia Serta Uji Aktivitasnya Untuk Fotodegradasi Fenol*. (Tugas Akhir), Universitas Negeri Semarang, Semarang.
- Li Puma, G., Bono, A., Krishnaiah, D., & Collin, J. G. 2008. Preparation of titanium dioxide photocatalyst loaded onto activated carbon support using chemical vapor deposition: A review paper. *Journal of Hazardous Materials*, **Vol. 157 No. 2**: 209–219.
- Linsebigler, A. L., Lu, G., & Yates, J. T. 1995. Photocatalysis on TiO₂ Surfaces: Principles, Mechanisms, and Selected Results. *Chemical Reviews*, **Vol. 95 No. 3**: 735–758.
- Lisjak, D., & Mertelj, A. 2018. Anisotropic magnetic nanoparticles: A review of their properties, syntheses and potential applications. *Progress in Materials Science*, **Vol. 95**, 286–328.
- Listanti, A., Taufiq, A., Hidayat, A., & Sunaryono, S. 2018. Investigasi Struktur dan Energi Band Gap Partikel Nano TiO₂ Hasil Sintesis Menggunakan Metode Sol-Gel. *JPSE (Journal of Physical Science and Engineering)*, **Vol. 3 No. 1**: 8–15.
- Liu, S., Yu, B., Wang, S., Shen, Y., & Cong, H. 2020. Preparation, surface functionalization and application of Fe₃O₄ magnetic nanoparticles. *Advances in Colloid and Interface Science*, **Vol. 281**.
- Lubis, S., Maulana, I., & . M. 2018. Synthesis And Characterization Of TiO₂/A-Fe₂O₃ Composite Using Hematite From Iron Sand For Photodegradation Removal Of Dye. *Jurnal Natural*, **Vol. 18 No. 1**: 38–43.

- Macwan, D. P., Dave, P. N., & Chaturvedi, S. 2011. A review on nano-TiO₂ sol-gel type syntheses and its applications. *Journal of Materials Science*, **Vol. 46 No. 11**: 3669–3686.
- Madima, N., Kefeni, K. K., Mishra, S. B., Mishra, A. K., & Kuvarega, A. T. 2022. Fabrication of magnetic recoverable Fe₃O₄/TiO₂ heterostructure for photocatalytic degradation of rhodamine B dye. *Inorganic Chemistry Communications*, **Vol. 145**.
- Maulidiyah, Azis, T., Nurwahidah, A. T., Wibowo, D., & Nurdin, M. 2017. Photoelectrocatalyst of Fe co-doped N-TiO₂ /Ti nanotubes: Pesticide degradation of thiamethoxam under UV-visible lights. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, **Vol. 8**: 103–111.
- Meacock, G., Taylor, K. D. A., Knowles, M. J., & Himonides, A. 1997. The Improved Whitening of Minced Cod Flesh Using Dispersed Titanium Dioxide. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **Vol. 73 No. 2**: 221–225.
- Melgarejo, P., Núñez-Gómez, D., Legua, P., Martínez-Nicolás, J. J., & Almansa, M. S. (2020). Pomegranate (*Punica granatum* L.) a dry pericarp fruit with fleshy seeds. *Trends in Food Science & Technology*, **Vol. 102**: 232–236.
- Nadaroglu, H., Gungor, A. A., & Ince, S. 2017. Synthesis of Nanoparticles by Green Synthesis Method. *International Journal of Innovative Research and Reviews*, **Vol. 1 No. 1**: 6–9.
- Nakata, K., & Fujishima, A. 2012. TiO₂ photocatalysis: Design and applications. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, **Vol. 13 No. 3**: 169–189.
- Nandiyanto, A. B. D., Ragadhita, R., & Aziz, M. 2023. How To Calculate and Measure Solution Concentration Using Uv-Vis Spectrum Analysis: Supporting Measurement in The Chemical Decomposition, Photocatalysis, Phytoremediation, and Adsorption Process. *Indonesian Journal of Science and Technology*, **Vol. 8**: 345–362.
- Nseme, Y. D. M., Mandeng, K. F. P., Mounpou, J., Djuikoo, I. L. N., Nguedjo, M. W., Baleba, R. M. M., Mouafo, H. T., & Medoua, G. N. 2022. Bioactive Compounds from Mangosteen Fruit Peels (*Garcinia mangostana* L.) and Assessment of their Antioxidant Potential. *Microbiology Research Journal International*, **Vol. 32 No. 11**: 40–52.
- Nurdin, M., Wibowo, W., . S., Febrian, M. B., Surahman, H., Krisnandi, Y. K., & Gunlazuardi, J. 2010. Pengembangan Metode Baru Penentuan Chemical Oxygen Demand (Cod) Berbasis Sel Fotoelektrokimia: Karakterisasi

Elektroda Kerja Lapis Tipis TiO_2/Ito . *Makara Journal of Science*, **Vol. 13 No.1**.

- Orak, H. H., Yagar, H., & Isbilir, S. S. 2012. Comparison of antioxidant activities of juice, peel, and seed of pomegranate (*Punica granatum* L.) and inter-relationships with total phenolic, Tannin, anthocyanin, and flavonoid contents. *Food Science and Biotechnology*, **Vol. 21 No. 2**: 373–387.
- Orgil, O., Schwartz, E., Baruch, L., Matityahu, I., Mahajna, J., & Amir, R. 2014. The antioxidative and anti-proliferative potential of non-edible organs of the pomegranate fruit and tree. *LWT - Food Science and Technology*, **Vol. 58 No. 2**: 571–577.
- Özacar, M., & Şengil, İ. A. 2005. Adsorption of metal complex dyes from aqueous solutions by pine sawdust. *Bioresource Technology*, **Vol. 96 No. 7**: 791–795.
- Parveen, K., Banse, V., & Ledwani, L. 2016. *Green synthesis of nanoparticles: Their advantages and disadvantages*. **Vol. 1724 No. 1**.
- Prasad, S., Kumar, V., Kirubanandam, S., & Barhoum, A. 2018. Engineered nanomaterials: nanofabrication and surface functionalization. Dalam *Emerging Applications of Nanoparticles and Architecture Nanostructures*. Elsevier. Amsterdam.
- Rajput, R. B., & Kale, R. B. 2021. Hydro/solvothermally synthesized visible light driven modified SnO_2 heterostructure as a photocatalyst for water remediation: A review. *Environmental Advances*, **Vol. 5**.
- Rastogi, A., Singh, P., Haraz, F. A., & Barhoum, A. 2018. Biological synthesis of nanoparticles: an environmentally benign approach. Dalam *Fundamentals of Nanoparticles*. Elsevier. Amsterdam.
- Rawat, D., Sharma, R. S., Karmakar, S., Arora, L. S., & Mishra, V. 2018. Ecotoxic potential of a presumably non-toxic azo dye. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **Vol. 148**: 528–537.
- Rehman, G. U., Tahir, M., Goh, P. S., Ismail, A. F., Hafeez, A., & Khan, I. U. 2021. Enhancing the photodegradation of phenol using $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ binary nanocomposite mediated by silane agent. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, **Vol. 153**.
- Roy, S. D., Das, K. C., & Dhar, S. S. 2021. Conventional to green synthesis of magnetic iron oxide nanoparticles; its application as catalyst, photocatalyst and toxicity: A short review. *Inorganic Chemistry Communications*, **Vol. 134**.

- Saeed, M., Muneer, M., Haq, A. ul, & Akram, N. 2022. Photocatalysis: an effective tool for photodegradation of dyes—a review. *Environmental Science and Pollution Research*, **Vol. 29 No. 1**: 293–311.
- Setiabudi, A. 2012. *Karakterisasi Material; prinsip dan aplikasinya dalam penelitian kimia*. UPI PRESS. Bandung.
- Shi, L., Wang, X., Hu, Y., & He, Y. 2020. Investigation of photocatalytic activity through photo-thermal heating enabled by Fe₃O₄/TiO₂ composite under magnetic field. *Solar Energy*, **Vol. 196**: 505–512.
- Singh, J., Dutta, T., Kim, K.-H., Rawat, M., Samddar, P., & Kumar, P. 2018. ‘Green’ synthesis of metals and their oxide nanoparticles: applications for environmental remediation. *Journal of Nanobiotechnology*, **Vol. 16 No. 1**: 84.
- Sowmya, N., Haraprasad, N., & Bp, H. 2019. Exploring the total flavonoid content of peels of Citrus aurantium, Citrus maxima and Citrus sinensis using different solvents and HPLC- analysis of flavonones - Naringin and Naringenin in peels of Citrus maxima. *The Pharma Innovation Journal*, **Vol. 8**: 12–17.
- Stan, M., Lung, I., Soran, M.-L., Leostean, C., Popa, A., Stefan, M., Lazar, M. D., Opris, O., Silipas, T.-D., & Porav, A. S. 2017. Removal of antibiotics from aqueous solutions by green synthesized magnetite nanoparticles with selected agro-waste extracts. *Process Safety and Environmental Protection*, **Vol. 107**: 357–372.
- Sujatno, A., Salam, R., Bandriyana, B., & Dimiyati, A. 2017. Studi Scanning Electron Microscopy (Sem) Untuk Karakterisasi Proses Oksidasi Paduan Zirkonium. *Jurnal Forum Nuklir*, **Vol. 9 No. 1**: 44.
- Sunaryono, Taufiq, A., Mashuri, Pratapa, S., Zainuri, M., Triwikantoro, & Darminto. 2015. Various Magnetic Properties of Magnetite Nanoparticles Synthesized from Iron-Sands by Coprecipitation Method at Room Temperature. *Materials Science Forum*, **Vol. 827**: 229–234.
- Teixeira da Silva, J. A., Rana, T. S., Narzary, D., Verma, N., Meshram, D. T., & Ranade, S. A. 2013. Pomegranate biology and biotechnology: A review. *Scientia Horticulturae*, **Vol. 160**: 85–107.
- Teja, A. S., & Koh, P.-Y. 2009. Synthesis, properties, and applications of magnetic iron oxide nanoparticles. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, **Vol. 55 No. 1**: 22–45.
- Tumbelaka, R. M., Istiqomah, N. I., Kato, T., Oshima, D., & Suharyadi, E. 2022. High reusability of green-synthesized Fe₃O₄/TiO₂ photocatalyst nanoparticles

for efficient degradation of methylene blue dye. *Materials Today Communications*, **Vol. 33**.

Utami, K. D. 2022. Sumur Warga di Pekalongan Tercemar Limbah Batik. *Kompas*. Diakses 15 Juni 2025 dari <https://www.kompas.id/baca/nusantara/2022/03/08/sumur-warga-di-pekalongan-tercemar-limbah-batik>

Waghmode, T. R., Kurade, M. B., Kabra, A. N., & Govindwar, S. P. 2012. Degradation of Remazol Red dye by *Galactomyces geotrichum* MTCC 1360 leading to increased iron uptake in *Sorghum vulgare* and *Phaseolus mungo* from soil. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, **Vol. 17 No. 1**: 117–126.

Wang, F., Li, M., Yu, L., Sun, F., Wang, Z., Zhang, L., Zeng, H., & Xu, X. 2017. Corn-like, recoverable $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3@\text{SiO}_2@\text{TiO}_2$ photocatalyst induced by magnetic dipole interactions. *Scientific Reports*, **Vol.7 No. 1**.

Xuan, S., Jiang, W., Gong, X., Hu, Y., & Chen, Z. 2009. Magnetically Separable $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ Hollow Spheres: Fabrication and Photocatalytic Activity. *The Journal of Physical Chemistry C*, **Vol. 113 No. 2**: 553–558.