JPFS 9 (2) 2026 292-302

Jurna Pendidikan Fisika dan Sains (JPFS)

Journal homepage: http:// journal.unucirebon.ac.id/index.php/jpfs

Degradasi Air Limbah Tekstil Menggunakan Fotokatalis ZnO-$NiFe_2O_4$ Ditinjau dari Sumber Cahaya dan Waktu Kontak

Aisyah Yuniar*[1], Irani Pinanti[2], Yuniar[3], Erika Dwi Oktaviani[4], Lety Trisnaliani[5].

[1]Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Kimia Industri, Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Sriwijaya, Palembang, Indonesia

*E-mail: yuniar@polsri.ac.id

DOI: https://doi.org/10.52188/jpfs.v9i2.2486

Accepted: 14 September 2026 Approved: 17 Oktober 2026 Published: 26 Oktober 2026

ABSTRAK

Air limbah tekstil mengandung senyawa organik yang sulit terdegradasi sehingga berpotensi mencemari lingkungan apabila tidak diolah dengan baik. Penelitian ini bertujuan untuk mengkarakterisasi komposit ZnO–$NiFe_2O_4$ serta Mengevaluasi perubahan parameter pada variasi sumber cahaya dan waktu kontak terhadap perubahan pH, Total Suspended Solids (TSS), fenol, dan Chemical Oxygen Demand (COD) pada air limbah tekstil. Komposit ZnO–$NiFe_2O_4$ disintesis menggunakan metode kopresipitasi dan dikarakterisasi menggunakan X-Ray Diffraction (XRD) dan Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). Proses fotokatalisis dilakukan menggunakan variasi sumber cahaya tanpa cahaya, cahaya matahari, UV 20 Watt, dan LED 15 Watt dengan waktu kontak 0-180 menit. Hasil karakterisasi menunjukkan terbentuknya komposit ZnO-$NiFe_2O_4$ dengan ukuran kristalit rata-rata 24,975 nm serta keberadaan ikatan logam–oksigen penyusun komposit. Hasil terbaik di antara kondisi yang diuji diperoleh pada penyinaran UV 20 Watt selama 180 menit dengan nilai pH 6,73, TSS 25,18 mg/L, kadar fenol 0,051 mg/L, dan COD 46,6 mg/L. Efisiensi degradasi fenol dan COD masing-masing mencapai 98,43% dan 88,97%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa komposit ZnO-$NiFe_2O_4$ berpotensi digunakan sebagai fotokatalis untuk pengolahan air limbah tekstil.

Kata kunci: *ZnO–$NiFe_2O_4$, Fotokatalisis, Limbah Tekstil, Degradasi, Senyawa Organik*

ABSTRACT

Textile wastewater contains organic compounds that are difficult to degrade, so it has the potential to pollute the environment if not treated properly. This study aims to characterize the ZnO–$NiFe_2O_4$ composite and evaluate the changes in parameters under different light sources and contact times on pH, Total Suspended Solids (TSS), phenol, and Chemical Oxygen Demand (COD) in textile wastewater. The ZnO–$NiFe_2O_4$ composite was synthesized using the co-precipitation method and characterized using X-Ray Diffraction (XRD) and Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). The photocatalysis process was carried out using variations of light sources: no light, sunlight, 20 Watt UV, and 15 Watt LED with contact times ranging from 0 to 180 minutes. Characterization results showed the formation of the ZnO–$NiFe_2O_4$ composite with an average crystallite size of 24.975 nm and the presence of metal–oxygen bonds forming the composite. The best results among the conditions tested were obtained with UV irradiation at 20 Watts for 180 minutes, with a pH of 6.73, TSS of 25.18 mg/L, phenol content of 0.051 mg/L, and COD of 46.6 mg/L. The degradation efficiency of phenol and COD reached 98.43% and 88.97%, respectively. The study results indicate that ZnO-$NiFe_2O_4$ composite has the potential to be used as a photocatalyst for treating textile wastewater.

Keyword: ZnO–$NiFe_2O_4$, Photocatalysis, Textile Wastewater, Degradation, Organic Compounds

@2026 Pendidikan Fisika FKIP Universitas Nahdlatul Ulama Cirebon

PENDAHULUAN

Industri tekstil berkontribusi besar terhadap perekonomian, namun juga menghasilkan air limbah dalam jumlah besar yang berpotensi mencemari lingkungan. Air limbah tekstil berasal dari proses pencucian, pencelupan, pemutihan, dan finishing kain yang menghasilkan campuran kompleks berupa zat warna sintetis, surfaktan, senyawa organik persisten, padatan tersuspensi, serta residu bahan kimia lainnya. Limbah tersebut umumnya memiliki nilai *Chemical Oxygen Demand* (COD) yang tinggi akibat tingginya kandungan senyawa organik dan zat warna yang sulit terdegradasi secara biologis. Selain itu, limbah tekstil juga mengandung senyawa fenol yang bersifat toksik, stabil, dan berpotensi menimbulkan dampak negatif terhadap organisme akuatik apabila tidak diolah secara memadai (Yaseen & Scholz, 2019).

Solusi inovatif dalam penolahan limbah cair yaitu fotokatalis yaitu proses reaksi kimia dibantu oleh cahaya dan katalis padat.Proses ini sederhana dan tidak menghasilkan limbah sekunder (Zhang et.al, 2021). Oleh karena itu proses fotokatalisis, menjadi salah satu alternatif yang banyak dikembangkan karena mampu menghasilkan radikal hidroksil (•OH) yang memiliki kemampuan oksidasi tinggi untuk mendegradasi senyawa organik menjadi senyawa yang lebih sederhana seperti CO_2 dan H_2O (Lopez et.al, 2025).

ZnO merupakan material semikonduktor yang banyak digunakan sebagai fotokatalis karena memiliki stabilitas kimia yang baik, aktivitas fotokatalitik tinggi, serta biaya sintesis yang relatif rendah. Akan tetapi, ZnO murni memiliki kelemahan berupa laju rekombinasi pasangan elektron–hole yang tinggi sehingga menurunkan efisiensi pembentukan spesies oksidatif selama proses fotokatalisis (Mishra et.al, 2024). Salah satu pendekatan yang banyak dilakukan untuk meningkatkan kinerja ZnO adalah membentuk komposit dengan material semikonduktor lain, seperti $NiFe_2O_4$. Material $NiFe_2O_4$ memiliki struktur spinel, bersifat magnetik, serta mampu membentuk heterojunction dengan ZnO sehingga dapat meningkatkan pemisahan pasangan elektron–hole dan memperbaiki aktivitas fotokatalitik. Selain itu, sifat magnetik $NiFe_2O_4$ memungkinkan fotokatalis dipisahkan kembali dari larutan menggunakan medan magnet sehingga berpotensi digunakan kembali pada proses berikutnya (Adeleke et.al, 2018).

Beberapa penelitian melaporkan bahwa material berbasis ZnO mampu mendegradasi berbagai senyawa organik pada air limbah. Aderibigbe et.al (2024) melaporkan bahwa nanopartikel ZnO efektif menurunkan konsentrasi fenol, sedangkan Fernandez (2025) menunjukkan bahwa komposit ZnO-zeolit mampu menurunkan kadar COD dan fenol pada air limbah tekstil. Di sisi lain, Hariani et.al (2021) melaporkan bahwa komposit ZnO-$NiFe_2O_4$ memiliki aktivitas fotokatalitik yang baik terhadap degradasi zat warna sintetis serta mudah dipisahkan dari media reaksi karena sifat magnetiknya. Meskipun demikian, sebagian besar penelitian tersebut masih menggunakan larutan model atau polutan tunggal sehingga belum sepenuhnya merepresentasikan karakteristik air limbah tekstil nyata yang mengandung campuran berbagai senyawa pencemar. Selain itu, penelitian mengenai pengaruh kondisi operasional, khususnya variasi sumber cahaya dan waktu kontak terhadap kinerja komposit ZnO-$NiFe_2O_4$ dalam mendegradasi senyawa organik pada air limbah tekstil nyata masih relatif terbatas. Padahal, kedua parameter tersebut berperan penting dalam pembentukan pasangan elektron–hole dan radikal oksidatif yang menentukan efektivitas proses fotokatalisis. Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mengkarakterisasi komposit ZnO-$NiFe_2O_4$ menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) dan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR), serta mengevaluasi perubahan pH, TSS, fenol, dan COD pada air limbah tekstil pada berbagai variasi sumber cahaya dan waktu kontak. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi mengenai potensi kompositZnO-$NiFe_2O_4$ sebagai fotokatalis yang efektif dalam pengolahan air limbah tekstil.

METODE

Penelitian eksperimental dilaksanakan di Laboratorium Jurusan Teknik Kimia Politeknik Negeri Sriwijaya pada April-Mei 2026. Bahan yang digunakan meliputi *zinc asetat dihidrat* ($Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$), nikel(II) *klorida heksahidrat* ($NiCl_2 \cdot 6H_2O$), besi(III) *klorida heksahidrat* ($FeCl_3 \cdot 6H_2O$), *natrium hidroksida* (NaOH), *polietilen glikol* (PEG-4000), serta air limbah tekstil yang diperoleh dari salah satu tempat pembuatan kain jumputan di Tuan Kentang, Palembang.

Komposit ZnO–$NiFe_2O_4$ disintesis menggunakan metode kopresipitasi yang mengacu pada penelitian Salam (2025) dan Mawarni (2021) dengan beberapa modifikasi. Sintesis ZnO diawali

dengan melarutkan zinc asetat dihidrat dalam air deionisasi, kemudian ditambahkan larutan NaOH secara bertahap hingga mencapai pH 14 sambil diaduk secara kontinu. Endapan yang terbentuk didiamkan selama 24 jam, dicuci menggunakan air deionisasi hingga mencapai pH netral, kemudian dikeringkan pada suhu 100 °C selama 6 jam dan dihaluskan hingga lolos ayakan 800 mesh. Selanjutnya, komposit ZnO–$NiFe_2O_4$ disintesis dengan mencampurkan 2 gr ZnO hasil sintesis dengan larutan $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ dan $NiCl_2 \cdot 6H_2O$ menggunakan PEG-4000 sebagai surfaktan. Campuran diaduk pada suhu ±60°C, kemudian ditambahkan larutan NaOH 2 M hingga mencapai pH 12 untuk membentuk endapan. Endapan didiamkan selama 24 jam, dicuci hingga pH netral, dikeringkan pada suhu 100°C selama 6 jam, kemudian dikalsinasi pada suhu 500°C selama 2 jam sehingga diperoleh komposit ZnO–$NiFe_2O_4$.

Komposit hasil sintesis kemudian dikarakterisasi menggunakan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) untuk mengidentifikasi gugus fungsi dan ikatan kimia penyusun komposit serta *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk mengidentifikasi fase kristal dan menghitung ukuran kristalit, rumus umum yang digunakan adalah persamaan *Debye–Scherrer*, rumus sebagai berikut (Aprilia et.al, 2020):

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos\theta}$$

Keterangan:
D = Ukuran kristal (crystallite) dalam nanometer (nm)
K = Konstanta Scherrer (0,9)
λ = Panjang gelombang sinar-X (0,154056 nm)
β = Lebar puncak difraksi pada setengah tinggi maksimum (*Full Width of Half Maximum*, FWHM)
θ = sudut difraksi (°)

Uji aktivitas fotokatalitik dilakukan menggunakan 250 mL air limbah tekstil yang telah diencerkan sebanyak 25 kali dengan penambahan 1,25 gr komposit ZnO–$NiFe_2O_4$. Proses fotodegradasi dilakukan menggunakan variasi sumber cahaya berupa tanpa cahaya, cahaya matahari, sinar UV 20 Watt, dan lampu LED 15 Watt, serta variasi waktu kontak selama 0, 60, 120, dan 180 menit. Setiap kombinasi perlakuan dilakukan satu kali tanpa pengulangan eksperimental (*single trial*), sehingga diperoleh satu hasil pengujian untuk setiap kombinasi perlakuan. Setelah waktu reaksi tercapai, campuran didiamkan hingga fotokatalis mengendap, kemudian dipisahkan menggunakan magnet atau filtrasi. Air limbah yang telah didegradasi menggunakan fotokatalis kemudian dianalisa dengan spektrofotometri UV-Vis untuk mengetahui degradasi fenol dalam limbah tekstil. Metode analisa kandungan fenol dalam air limbah mengacu pada *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Prinsip dari analisa fenol pada limbah tekstil mengacu pada metode kolorimetri menggunakan reagen 4-aminoantipirin yaitu senyawa fenolik dalam suasana basa dan adanya heksasianoferat akan bereaksi dengan 4-aminoantipirin membentuk kompleks berwarna merah kecoklatan dari antipirin. Intensitas warna yang terbentuk dapat digunakan untuk mengestimasi kandungan fenol dalam air limbah. Intensitas warna yang dihasilkan diukur absorbansinya menggunakan spektrofotometer pada panjang gelombang 520 nm. Selanjutnya nilai absorbansi tersebut dimasukkan dalam kurva kalibrasi sehingga dihasilkan nilai kandungan fenol dalam air limbah (Roustaei et al. 2024)

Dalam studi degradasi senyawa organik dengan fotokatalis, menentukan persentase degradasi merupakan langkah penting untuk menilai efektivitas fotokatalis yang digunakan. Rumus yang umum digunakan dalam perhitungan % degradasi adalah sebagai berikut (Prayitno et.al, 2016):

$$\%\ Degradasi = \frac{C_o - Ct}{C_o} \times 100$$

Keterangan:
C_0 = konsentrasi awal senyawa (sebelum proses degradasi)
C_t = konsentrasi senyawa setelah proses degradasi pada waktu tertentu

Air limbah yang telah di degradasi menggunakan fotokatalis nanokomposit ZnO-$NiFe_2O_4$ dianalisa pula nilai *Chemical Oxygen Demind* (COD) menggunakan COD Analyzer untuk mengetahui penurunan nilai COD pada air limbah serta menghitung efisieansi penurunan COD setelah proses fotodegradasi, analisa *Total Suspended Solid* (TSS) menggunakan metode gravimetri (SNI 6989.3:2019) (Khofifah dan Utami, 2022) untuk mengetahui kadar padatan pengotor pada air limbah serta analisa pH menggunakan pH meter untuk mengetahui tingkat keasam-basaan air limbah untuk kemudian

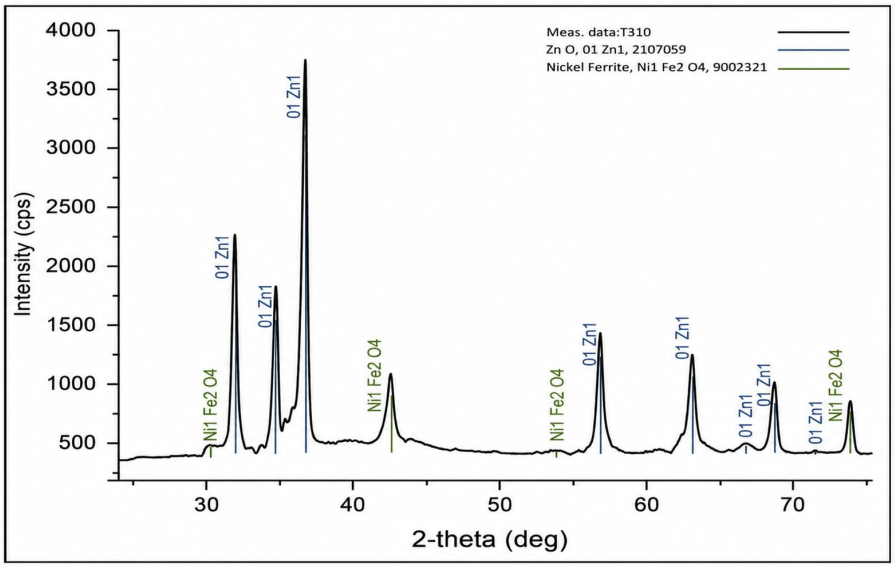
dibandingkan antara sampel awal air limbah sebelum proses fotodegradasi dan sampel akhir air limbah setelah proses fotodegradasi menggunakan fotokatalis ZnO-NiFe2O4 lalu dihitung efektivitas degradasinya pada masing-masing variabel yang diuji kemudian dianalisis pengaruh-pengaruh variabel bebas yang divariasikan berupa sumber cahaya dan waktu kontak terhadap efektivitas fotokatalis dalam mendegradasi kandungan pada limbah tekstil.

HASIL

Hasil karakterisasi dan pengujian Komposit ZnO–$NiFe_2O_4$ disajikan pada Gambar 1–2 serta Tabel 1. Penyajian hasil dipisahkan dari interpretasi agar pola empiris dapat dibaca terlebih dahulu sebelum dibahas secara mekanistik.

Analisis *X-Ray Diffraction* (XRD)

Karakterisasi menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) dilakukan untuk mengidentifikasi fase kristal penyusun material hasil sintesis komposit ZnO–$NiFe_2O_4$ melalui metode kopresipitasi.



Gambar 1. Pola difraksi XRD komposit ZnO-$NiFe_2O_4$

Pada Gambar 1 menunjukkan pola difraksi puncak karakteristik ZnO pada sudut 2θ sebesar 31,89°, 34,53°, 36,38°, 56,75°, 63,01°, dan 68,11° yang sesuai dengan struktur kristal heksagonal wurtzite berdasarkan standar ICDD PDF No. 36-1451. Selain puncak karakteristik ZnO, pola difraksi juga memperlihatkan beberapa puncak dengan intensitas relatif rendah yang berkaitan dengan fase spinel $NiFe_2O_4$, dengan puncak utama teramati pada sudut 2θ sekitar 43,32° dan 74,41°. Keberadaan fase ZnO dan indikasi fase spinel $NiFe_2O_4$ mendukung identifikasi material hasil sintesis sebagai komposit ZnO–$NiFe_2O_4$ berhasil terbentuk melalui metode kopresipitasi. Tidak teramati puncak difraksi lain yang dominan di luar fase ZnO dan $NiFe_2O_4$, sehingga mengindikasikan bahwa tidak terdapat fase pengotor kristalin yang dominan pada komposit hasil sintesis.

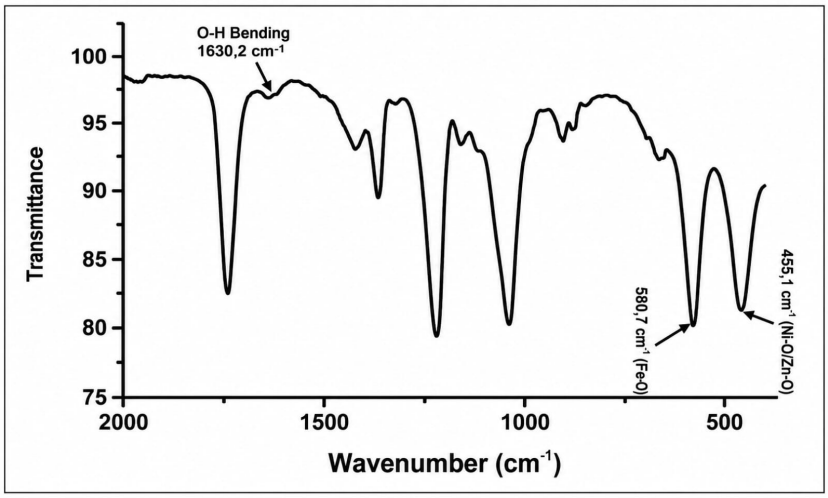
Intensitas puncak ZnO tampak lebih dominan dibandingkan fase $NiFe_2O_4$. Kondisi ini diduga berkaitan dengan perbandingan komposisi ZnO terhadap $NiFe_2O_4$ sebesar 2:0,1. Keberadaan fase kristal ZnO dan indikasi fase spinel $NiFe_2O_4$ dalam pola difraksi mendukung identifikasi material hasil sintesis sebagai komposit ZnO–$NiFe_2O_4$. Namun, pembentukan antarmuka heterojunction dan mekanisme pemisahan pasangan elektron–hole belum dapat dipastikan hanya berdasarkan hasil karakterisasi XRD.

Ukuran kristalit komposit dihitung menggunakan persamaan Debye–Scherrer berdasarkan pelebaran puncak difraksi dominan dan diperoleh ukuran kristalit rata-rata sebesar 24,98 nm. Ukuran kristalit pada skala nanometer menunjukkan bahwa material memiliki ukuran domain kristalin kecil yang berpotensi meningkatkan luas permukaan aktif dan menyediakan lebih banyak situs aktif untuk reaksi fotokatalitik. Luas permukaan yang lebih besar meningkatkan interaksi antara fotokatalis dengan molekul pencemar dan mempercepat pembentukan spesies oksidator reaktif selama proses fotodegradasi. Hasil ini sejalan dengan penelitian Ghaffar et al. (2024) yang melaporkan bahwa

komposit ZnO–$NiFe_2O_4$ berukuran nanometer menunjukkan aktivitas fotokatalitik yang lebih tinggi akibat meningkatnya luas permukaan dan berkurangnya rekombinasi pasangan elektron–hole.

Analisis *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR)

Karakterisasi melalui *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) dilakukan untuk mengidentifikasi gugus fungsi dan ikatan kimia yang terdapat pada material komposit ZnO–$NiFe_2O_4$. Gambar 2 menunjukkan spektrum FTIR komposit ZnO–$NiFe_2O_4$ hasil sintesis metode kopresipitasi. Spektrum memperlihatkan pita serapan utama pada bilangan gelombang sekitar 580,7 cm^{-1} dan 455,1 cm^{-1} yang masing-masing diatribusikan sebagai vibrasi ikatan logam–oksigen yang berasal dari gugus Fe–O pada $NiFe_2O_4$ serta Zn–O pada ZnO. Selain itu, pita serapan pada 1630,2 cm^{-1} berkaitan dengan vibrasi tekuk (bending) gugus hidroksil (–OH) dari molekul air yang teradsorpsi pada permukaan material. Keberadaan pita serapan tersebut mendukung identifikasi ikatan logam-oksigen yang berkaitan dengan komponen ZnO dan $NiFe_2O_4$ dalam meterial hasil sintesis.



Gambar 2. Spektrum FTIR komposit ZnO–$NiFe_2O_4$

Keberadaan pita serapan yang berkaitan dengan ikatan logam–oksigen melengkapi hasil karakterisasi XRD dalam mengidentifikasi komponen penyusun material ZnO–$NiFe_2O_4$. Meskipun demikian, hasil FTIR dan XRD yang diperoleh belum cukup untuk membuktikan pembentukan antarmuka heterojunction secara langsung. Oleh karena itu, mekanisme peningkatan pemisahan pasangan elektron–hole pada material ini masih perlu dikaji lebih lanjut melalui karakterisasi atau pengujian tambahan yang sesuai.

Karakteristik Parameter Kualitas Air Limbah Tekstil

Sebelum proses fotokatalisis, karakterisasi awal air limbah tekstil dilakukan untuk mengetahui kondisi sampel yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Analisa Sampel Air Limbah Tekstil Sebelum Degradasi

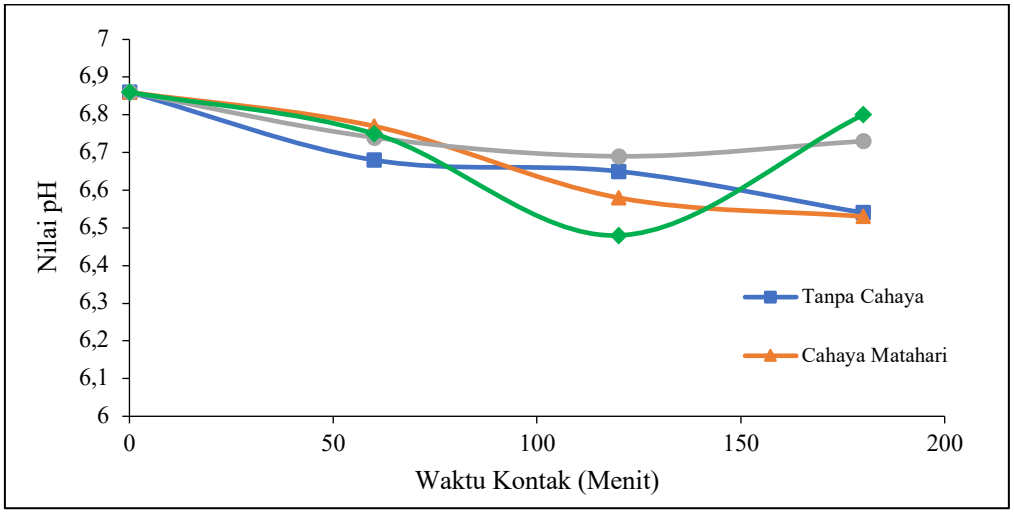
Paramater	Hasil
pH	8,3
TSS	235 mg/l
Fenol	3,256 mg/l
COD	422,5 mg/l

Nilai TSS, fenol, dan COD menunjukkan tingginya kandungan padatan tersuspensi serta senyawa organik dalam limbah, sementara nilai pH berada pada kondisi basa. Kondisi tersebut menunjukkan perlunya pengolahan lebih lanjut menggunakan fotokatalis ZnO–$NiFe_2O_4$ untuk menurunkan kadar pencemar.

PEMBAHASAN

Pengaruh Variasi Sumber cahaya dan Waktu Kontak terhadap Nilai pH

pH adalah ukuran tingkat keasaman atau kebebasan suatu larutan yang ditentukan oleh konsentrasi ion hidrogen (H^+) di dalamnya.



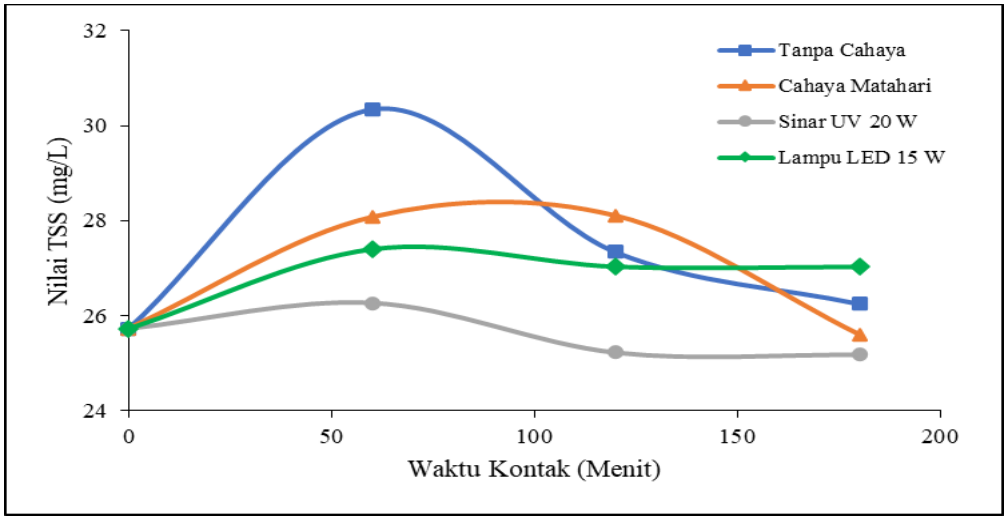
Gambar 3. Pengaruh variasi sumber cahaya dan waktu kontak terhadap pH

Gambar 3 menunjukkan adanya perbedaan nilai pH antarperlakuan, meskipun perubahan yang terjadi relatif kecil dibandingkan perubahan fenol dan COD. Perlakuan UV 20 W selama 180 menit menghasilkan nilai pH 6,73. Karena penelitian ini menggunakan satu kali pengulangan dan belum melakukan analisis statistik, perbedaan pH antarperlakuan belum dapat dinyatakan berpengaruh secara signifikan..

Perubahan pH selama proses fotokatalisis berkaitan dengan pembentukan spesies oksidatif dan senyawa antara hasil oksidasi senyawa organik. Pembentukan asam organik sederhana dapat menyebabkan penurunan pH, namun proses mineralisasi lanjutan menjadi CO_2 dan H_2O menyebabkan perubahan pH tetap relatif kecil (Al-Sabahi et.al, 2016). Nilai pH yang relatif stabil pada perlakuan UV mengindikasikan bahwa proses yang berlangsung tidak menyebabkan perubahan kondisi asam–basa yang besar. Namun, perubahan pH saja belum dapat digunakan sebagai bukti efektivitas degradasi senyawa organik. Hasil ini sejalan dengan penelitian Bilbao-García et.al (2025) yang melaporkan bahwa proses fotokatalisis umumnya hanya menyebabkan perubahan pH yang terbatas karena pembentukan dan degradasi senyawa antara berlangsung secara bertahap hingga mencapai kondisi yang lebih stabil.

Pengaruh Variasi Sumber cahaya dan Waktu Kontak terhadap TSS

Total suspended solid atau padatan tersuspensi total (TSS) adalah residu dari padatan total yang tertahan oleh saringan dengan ukuran partikel maksimal 2 µm atau lebih besar dari ukuran partikel koloid.



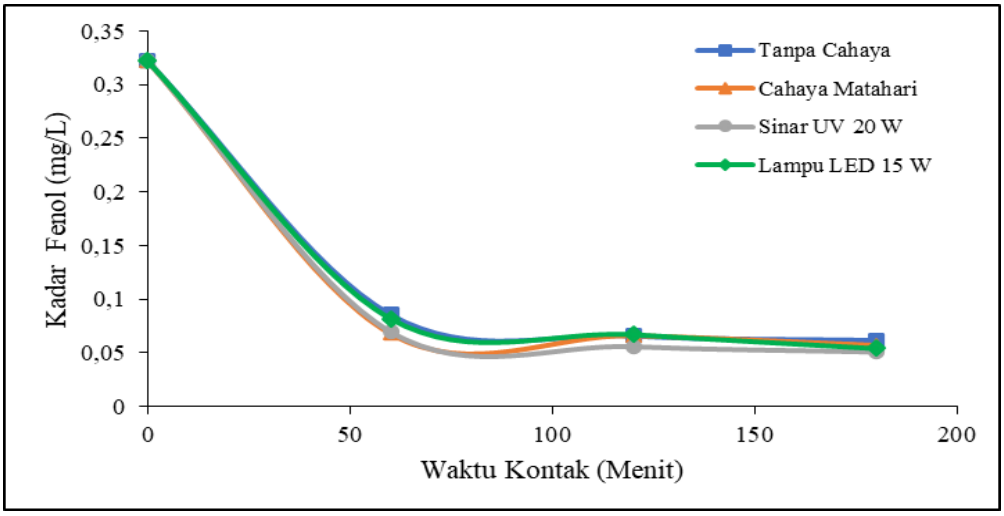
Gambar 4. Pengaruh variasi sumber cahaya dan waktu kontak terhadap TSS

Gambar 4 menunjukkan perubahan nilai *Total Suspended Solids* (TSS) selama proses fotokatalisis menggunakan komposit ZnO–$NiFe_2O_4$. Nilai TSS awal limbah sebelum pengenceran dan penambahan fotokatalis sebesar 235 mg/L, sedangkan nilai pada menit ke-0 sebesar 25,73 mg/L merupakan kondisi setelah pengenceran, penambahan fotokatalis, dan preparasi sampel. Oleh karena itu, kedua nilai tersebut tidak setara dan tidak dapat dibandingkan langsung sebagai efek fotodegradasi. Secara umum, nilai TSS mengalami peningkatan pada tahap awal reaksi, kemudian menurun seiring bertambahnya waktu kontak. Peningkatan TSS pada awal proses diduga berasal dari keberadaan partikel halus fotokatalis atau fragmen senyawa organik yang mengalami perubahan struktur selama proses degradasi. Setelah reaksi berlangsung lebih lama, nilai TSS menurun karena senyawa antara tersebut mengalami degradasi lanjutan menjadi senyawa yang lebih sederhana atau mengalami pengendapan pada permukaan fotokatalis. Fenomena serupa juga dilaporkan oleh Bilbao-García et.al (2025), yang menyatakan bahwa proses oksidasi lanjutan dapat menghasilkan produk antara sebelum terjadi mineralisasi sempurna.

Nilai TSS terendah diperoleh pada perlakuan UV 20 W selama 180 menit, yaitu 25,18 mg/L. Perbedaan nilai TSS antarperlakuan relatif kecil, sehingga perbedaan tersebut belum dapat dikaitkan secara langsung dengan aktivasi fotokatalis atau pembentukan heterojunction. Perubahan TSS dapat berkaitan dengan pengendapan partikel, adsorpsi pada permukaan fotokatalis, maupun perubahan struktur senyawa organik; namun, kontribusi masing-masing mekanisme belum dapat dipisahkan berdasarkan data yang tersedia. Meskipun demikian, perubahan TSS antarperlakuan relatif kecil dibandingkan penurunan fenol dan COD. Hal ini mengindikasikan bahwa mekanisme fotokatalisis menggunakan komposit ZnO–$NiFe_2O_4$ lebih dominan dalam mendegradasi senyawa organik terlarut dibandingkan menghilangkan padatan tersuspensi. Perubahan nilai TSS yang teramati menunjukkan adanya perubahan konsentrasi padatan tersuspensi selama perlakuan. Namun, berdasarkan karakterisasi yang dilakukan, perubahan tersebut belum dapat secara langsung dikaitkan dengan pembentukan heterojunction pada komposit ZnO– $NiFe_2O_4$.

Pengaruh Variasi Sumber cahaya dan Waktu Kontak terhadap Degradasi Fenol

Fenol merupakan senyawa organik yang dapat membahayakan lingkungan dan kesehatan manusia. Gambar 5 menunjukkan perubahan konsentrasi fenol selama perlakuan. Konsentrasi fenol awal limbah sebelum pengenceran dan penambahan fotokatalis sebesar 3,256 mg/L, sedangkan konsentrasi fenol pada menit ke-0 setelah pengenceran, penambahan fotokatalis, dan preparasi sampel sebesar 0,323 mg/L. Penurunan dari 3,256 mg/L menjadi 0,323 mg/L mencakup efek pengenceran/preparasi serta kemungkinan adsorpsi fenol pada permukaan fotokatalis sebelum penyinaran. Oleh karena itu, penurunan tersebut tidak dapat diinterpretasikan semata-mata sebagai efek fotodegradasi.



Gambar 5. Pengaruh variasi sumber cahaya dan waktu kontak terhadap konsentrasi fenol

Konsentrasi fenol akhir terendah diperoleh pada perlakuan UV 20 W selama 180 menit, yaitu 0,051 mg/L. Berdasarkan konsentrasi awal limbah sebelum pengenceran/preparasi, penurunan total fenol mencapai 98,43%. Namun, jika dihitung berdasarkan konsentrasi fenol pada menit ke-0, penurunan selama perlakuan penyinaran mencapai 84,21%. Nilai 84,21% lebih tepat digunakan

sebagai indikasi penurunan fenol selama periode pengamatan, sedangkan 98,43% merupakan penurunan total terhadap konsentrasi limbah awal sebelum pengenceran/preparasi. Kontribusi adsorpsi dan fotodegradasi belum dapat dipisahkan secara kuantitatif berdasarkan data yang tersedia.

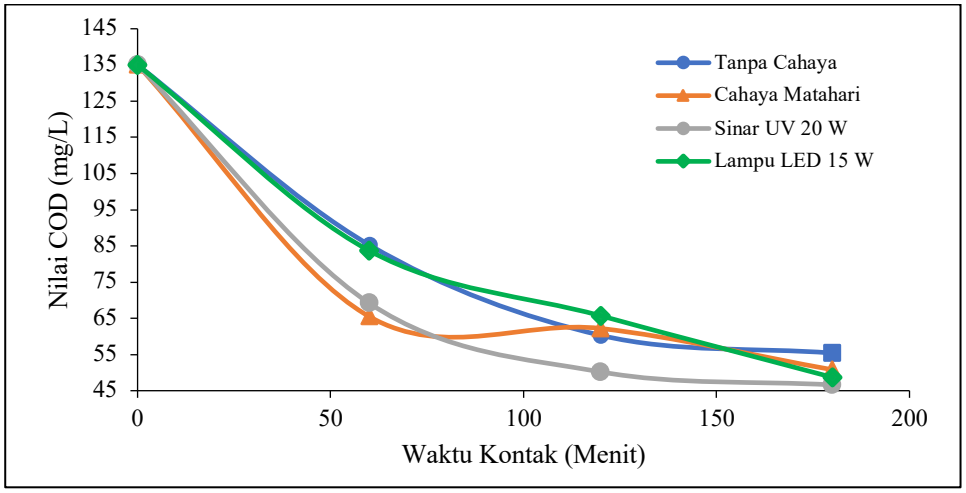
Hasil tersebut menunjukkan adanya perbedaan konsentrasi fenol akhir antarperlakuan sumber cahaya dan waktu kontak. Namun, karena penelitian ini menggunakan satu kali pengulangan dan belum melakukan analisis statistik, perbedaan tersebut belum dapat dinyatakan berpengaruh secara signifikan. Perbedaan efektivitas degradasi pada masing-masing perlakuan dipengaruhi oleh karakteristik sumber cahaya yang digunakan. Penyinaran UV menghasilkan degradasi fenol tertinggi karena energi foton yang dimiliki mampu memenuhi kebutuhan energi celah pita (*band gap*) ZnO sebesar sekitar 3,37 eV, sehingga proses eksitasi elektron berlangsung lebih efektif dibandingkan cahaya matahari maupun lampu LED. Cahaya matahari masih mampu mengaktivasi fotokatalis karena mengandung komponen sinar ultraviolet, namun intensitasnya dipengaruhi oleh kondisi lingkungan. Sebaliknya, lampu LED menghasilkan energi foton yang lebih rendah sehingga pembentukan pasangan elektron–hole menjadi kurang optimal. Pada perlakuan tanpa cahaya, penurunan fenol masih terjadi akibat proses adsorpsi pada permukaan komposit, tetapi tanpa aktivasi fotokatalitik yang memadai sehingga efisiensi degradasinya paling rendah. Hasil ini sejalan dengan penelitian Güell et.al (2023) dan Huszla et.al (2022) yang melaporkan bahwa aktivitas fotokatalitik ZnO meningkat secara signifikan di bawah penyinaran ultraviolet.

Penurunan kadar fenol terjadi melalui mekanisme fotokatalisis pada permukaan komposit ZnO–$NiFe_2O_4$. Ketika material menyerap energi cahaya, elektron pada pita valensi tereksitasi menuju pita konduksi sehingga terbentuk pasangan elektron–hole. Elektron bereaksi dengan oksigen terlarut membentuk radikal superoksida ($\bullet O_2^-$), sedangkan hole mengoksidasi molekul air atau ion hidroksida menghasilkan radikal hidroksil (•OH). Radikal hidroksil yang memiliki potensial oksidasi tinggi kemudian menyerang cincin aromatik fenol dan membentuk senyawa antara seperti hidrokuinon, katekol, dan resorsinol. Senyawa-senyawa tersebut selanjutnya mengalami oksidasi lanjutan, pembukaan cincin aromatik (*ring opening*), hingga termineralisasi menjadi CO_2 dan H_2O (Al-Sabahi et.al, 2016).

Keberadaan fase ZnO dan indikasi fase $NiFe_2O_4$ dalam material komposit memungkinkan adanya interaksi antarkomponen yang berpotensi memengaruhi proses fotokatalisis. Namun, peran antarmuka heterojunction dalam meningkatkan pemisahan pasangan elektron–hole belum dapat dipastikan berdasarkan hasil XRD dan FTIR yang tersedia. Hasil penelitian ini sejalan dengan Stiadi et.al (2023) yang melaporkan bahwa ZnO–$NiFe_2O_4$ memiliki kemampuan fotokatalitik lebih tinggi dibandingkan ZnO murni karena mampu menekan rekombinasi elektron–hole. Berdasarkan hasil yang diperoleh, kombinasi komposit ZnO–$NiFe_2O_4$, penyinaran UV 20 W, dan waktu kontak 180 menit menunjukkan kinerja terbaik di antara perlakuan yang diuji dalam menurunkan konsentrasi fenol.

Pengaruh Variasi Sumber Cahaya dan Waktu Kontak terhadap COD

Chemical Oxygen Demand (COD) adalah jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk mengoksidasi bahan organik dan anorganik secara kimiawi dalam air limbah. Gambar 6 menunjukkan bahwa nilai COD menurun pada seluruh perlakuan seiring bertambahnya waktu kontak. Nilai COD awal limbah sebelum pengenceran dan penambahan fotokatalis sebesar 422,5 mg/L, sedangkan nilai pada menit ke-0 sebesar 135 mg/L merupakan kondisi setelah pengenceran, penambahan fotokatalis, dan preparasi sampel. Perbedaan kedua nilai tersebut mencakup efek pengenceran/preparasi serta kemungkinan adsorpsi atau penyisihan senyawa pada tahap awal pengujian. Di antara kondisi yang diuji, penyinaran UV 20 W selama 180 menit menghasilkan nilai COD akhir terendah, yaitu 46,6 mg/L. Berdasarkan COD awal limbah, penurunan total mencapai 88,97%. Namun, nilai tersebut mencakup penurunan yang terjadi sebelum penyinaran, sehingga tidak dapat langsung diinterpretasikan sebagai efisiensi fotodegradasi. Jika dihitung berdasarkan COD pada menit ke-0, penurunan hingga menit ke-180 mencapai 65,48%.



Gambar 6. Pengaruh variasi sumber cahaya dan waktu kontak terhadap COD

Nilai ini menggambarkan penurunan COD selama periode pengamatan, tetapi belum memisahkan kontribusi fotokatalisis dari kemungkinan proses lain, seperti adsorpsi pada permukaan katalis. Perbedaan nilai COD akhir pada setiap perlakuan menunjukkan adanya variasi hasil berdasarkan sumber cahaya dan waktu kontak yang digunakan. Penyinaran UV 20 W menghasilkan nilai COD akhir terendah di antara kondisi yang diuji. Secara teoritis, energi cahaya yang diserap fotokatalis dapat mengeksitasi elektron dari pita valensi menuju pita konduksi dan menghasilkan pasangan elektron–hole. Spesies reaktif, seperti radikal hidroksil (•OH) dan radikal superoksida ($\bullet O_2^-$), dapat terbentuk melalui reaksi lanjutan dan berperan dalam oksidasi senyawa organik. Pada perlakuan tanpa cahaya, penurunan COD juga teramati, yang dapat berkaitan dengan adsorpsi atau proses lain selama perlakuan. Namun, kontribusi masing-masing mekanisme belum dapat ditentukan secara terpisah berdasarkan data yang tersedia.

Perbandingan penurunan total dan penurunan selama periode pengamatan pada perlakuan UV 20 W selama 180 menit disajikan pada Tabel 2. Penurunan total dihitung terhadap nilai awal limbah sebelum pengenceran dan penambahan fotokatalis, sedangkan penurunan selama periode pengamatan dihitung berdasarkan nilai pada menit ke-0 setelah pengenceran, penambahan fotokatalis, dan preparasi sampel. Perbedaan nilai awal dan nilai menit ke-0 mencakup efek pengenceran/preparasi serta kemungkinan adsorpsi awal fotokatalis. Oleh karena itu, penurunan total tidak dapat diinterpretasikan sebagai efisiensi fotodegradasi murni.

Tabel 2. Hasil Analisa Sampel Air Limbah Tekstil Sebelum Degradasi

Paremeter	Nilai awal sebelum pengenceran	Nilai pada menit ke-0 (setelah pengenceran)	Nilai pada menit ke-180 (setelah perlakuan UV 20 W)	Penurunan terhadap nilai awal sebelum pengencetan	Penurunan selama perlakuan berdasarkan menut ke-0
pH	8,3	6,86	6,54	1,5	0,13
TSS	235 mg/L	25,73 mg/L	25,18 mg/L	89.29%	2,14%
Fenol	3,256 mg/L	0,323 mg/L	0,051 mg/L	98,43%	84,21%
COD	422,5 mg/L	135 mg/L	46,6 mg/L	88,97%	65,48%

Berdasarkan Tabel 2, nilai penurunan total fenol dan COD mencapai 98,43% dan 88,97%, sedangkan penurunan berdasarkan nilai menit ke-0 mencapai 84,21% dan 65,48%. Nilai penurunan berdasarkan menit ke-0 lebih tepat digunakan untuk menggambarkan perubahan fenol dan COD selama periode pengamatan. Namun, kontribusi fotokatalisis belum dapat dipisahkan secara kuantitatif dari adsorpsi atau proses lain berdasarkan data yang tersedia.

Hasil karakterisasi XRD dan FTIR mendukung identifikasi komponen penyusun komposit ZnO–$NiFe_2O_4$, tetapi belum cukup untuk memastikan pembentukan antarmuka heterojunction secara langsung. Penurunan COD menunjukkan berkurangnya kebutuhan oksigen untuk mengoksidasi senyawa dalam sampel berdasarkan hasil pengukuran, tetapi tidak secara langsung membuktikan

mineralisasi sempurna menjadi CO_2 dan H_2O. Selain itu, penelitian ini belum mengevaluasi penggunaan ulang katalis (reusability), morfologi permukaan, maupun mineralisasi melalui analisis Total Organic Carbon (TOC). Oleh karena itu, mekanisme spesifik dan tingkat mineralisasi senyawa organik masih memerlukan pengujian lebih lanjut.

KESIMPULAN

Komposit ZnO–$NiFe_2O_4$ berhasil disintesis menggunakan metode kopresipitasi. Hasil karakterisasi XRD menunjukkan keberadaan fase kristal ZnO dan indikasi fase spinel $NiFe_2O_4$ dengan ukuran kristalit rata-rata sebesar 24,98 nm, sedangkan hasil FTIR menunjukkan pita serapan yang berkaitan dengan ikatan logam–oksigen pada komponen penyusun komposit. Hasil karakterisasi tersebut mendukung identifikasi komponen penyusun material, tetapi belum cukup untuk membuktikan pembentukan antarmuka heterojunction secara langsung.

Di antara variasi sumber cahaya dan waktu kontak yang diuji, penyinaran UV 20 W selama 180 menit menunjukkan kinerja terbaik dalam menurunkan konsentrasi fenol dan COD, dengan nilai akhir masing-masing sebesar 0,051 mg/L dan 46,6 mg/L. Pada perlakuan tersebut, pH dan TSS masing-masing tercatat sebesar 6,73 dan 25,18 mg/L, sesuai dengan data hasil pengujian yang perlu dipastikan konsistensinya. Berdasarkan konsentrasi awal limbah sebelum pengenceran dan preparasi, penurunan total fenol dan COD masing-masing mencapai 98,43% dan 88,97%. Namun, karena konsentrasi fenol dan COD telah menurun pada menit ke-0 setelah penambahan fotokatalis, persentase tersebut tidak dapat langsung diinterpretasikan sebagai efisiensi fotodegradasi. Dengan demikian, komposit ZnO–$NiFe_2O_4$ berpotensi digunakan dalam pengolahan air limbah tekstil, tetapi kontribusi spesifik fotokatalisis terhadap penurunan pencemar organik masih memerlukan evaluasi lebih lanjut.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Jurusan Teknik Kimia Politeknik Negeri Sriwijaya serta laboratorium pengujian yang mendukung pelaksanaan penelitian dan karakterisasi sampel.

REFERENSI

Adeleke, J. T., Theivasanthi, T., Thiruppathi, M., Swaminathan, M., Akomolafe, T., & Alabi, A. B. (2018). Photocatalytic degradation of methylene blue by ZnO/NiFe2O4 nanoparticles. *Applied Surface Science*, *455*, 195–200. https://doi.org/https://doi.org/10.48550/arXiv.1905.06934

Aderibigbe, F. A., Mustapha, S. I., Mohammed, I. A., Adewoye, T. L., Babatunde, E. O., Aminullah, H. I., & Muritala, K. B. (2024). Green synthesis of zinc oxide nanoparticles for the removal of phenol from textile wastewater. *Discover Chemical Engineering*, *4*(1). https://doi.org/10.1007/s43938-024-00061-w

Al-Sabahi, J., Bora, T., Al-Abri, M., & Dutta, J. (2016). Controlled defects of zinc oxide nanorods for efficient visible light photocatalytic degradation of phenol. *Materials*, *9*(4). https://doi.org/10.3390/ma9040238

Aprilia, A., Hanavi, D. P., Safriani, L., Bahtiar, A., Suryaningsih, S., & Agustini, R. R. D. (2020). Sifat fotokatalitik serbuk ZnO terdoping aluminium dalam mendegradasi larutan metil biru. *Jurnal Ilmu dan Inovasi Fisika*, *4*(1), 34-45.

Bilbao-García, E., Duoandicoechea, U., & Villota, N. (2025). Dissolved Oxygen Changes in Wastewater During Sulfamethoxazole Degradation by Photo-Fenton Treatment. *Sustainability*, *17*(8), 3333. https://doi.org/10.3390/su17083333

Ghaffar, D. N., Arman, M. M., El-Dek, S. I., & Ramadan, R. (2024). Studying the preparation, characterization, and physical properties of NiFe2O4, TiO2, and NiFe2O4/TiO2 nanocomposite. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, *130*(4). https://doi.org/10.1007/s00339-024-07397-8

Güell, F., Galdámez-Martínez, A., Martínez-Alanis, P. R., Catto, A. C., da Silva, L. F., Mastelaro, V. R., Santana, G., & Dutt, A. (2023). ZnO-based nanomaterials approach for photocatalytic and sensing applications: recent progress and trends. *Materials Advances*, *4*(17), 3685–3707. https://doi.org/10.1039/D3MA00227F

Hariani, P. L., Said, M., Rachmat, A., Riyanti, F., Pratiwi, H. C., & Rizki, W. T. (2021). Preparation of NiFe2O4 Nanoparticles by Solution Combustion Method as Photocatalyst of Congo red. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, *16*(3), 481–490. https://doi.org/10.9767/bcrec.16.3.10848.481-490

Huszla, K., Wysokowski, M., Zgoła-Grześkowiak, A., Staszak, M., Janczarek, M., Jesionowski, T., & Wyrwas, B. (2022). UV-light photocatalytic degradation of non-ionic surfactants using ZnO nanoparticles. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *19*(1), 173–188. https://doi.org/10.1007/s13762-021-03160-1

Khofifah, K., & Utami, M. (2022). Analisis Kadar Total Dissolved Solid (TDS) dan Total Suspended Solid (TSS) Pada Limbah Cair Dari Industri Gula Tebu. *Indonesian Journal of Chemical Research*, 43-49.

Lopez Medina, J. A., Domínguez, D., Pizá, P., Liu, G., Velez, C., Reyes Gómez, F., Farías, M. H., Caudillo-Flores, U., Soto Herrera, G., Tiznado, H., & Mejía-Salazar, J. R. (2025). Magnetic Photocatalyst Nanocomposite Based on $MnFe_2O_4$ ZnO for AZO Dye Degradation. *ACS Omega*, *10*(17), 17595–17610. https://doi.org/10.1021/acsomega.4c11468

Mawarni T, H. C. F. A. M. T. (2021). Degradasi Zat Warna Rhodamin B Menggunakan Sintesis Fotokatalis Zno/Nife2o4 Dan Diaplikasikan Pada Limbah Cair Industri Pulp Dan Kertas. *Jurnal Kinetika Vol. 12, No. 03 (November 2021) : 44-50*.

Mishra, R. K., Chianella, I., Sarkar, J., Yazdani Nezhad, H., & Goel, S. (2024). Nanostructured ZnO-CQD Hybrid Heterostructure Nanocomposites: Synergistic Engineering for Sustainable Design, Functional Properties, and High-Performance Applications. In *ChemNanoMat* (Vol. 10, Number 7). John Wiley and Sons Inc. https://doi.org/10.1002/cnma.202400020

Prayitno, J. (2016). Penghilangan senyawa fenol oleh bakteri yang diisolasi dari area pertambangan minyak bumi. *Jurnal Teknologi Lingkungan*.

Roustaei, F., Baghdadi, M., Marjani, A., & Alimoradi, M. (2024). Spectrophotometric determination of phenol impurity in phenoxyethanol and phenol index of drinking water and municipal wastewater effluent after salting-out assisted liquid phase microextraction (SA-LPME). *Heliyon*, *10*(5).

Salam M A, A. W. S. M. S. I. B. (2025). Sintesis dan Karakterisasi Nanopartikel ZnO melalui Ko Metode Presipitasi. *Metho*. http://amresearchreview.com/index.php/Journal/about

Shihab F, H. E. S. S. (2022). Sintesis dan Karakterisasi Komposit ZnO/NiFe2O4dari Limbah Baterai menggunakan Metode Solid State sebagai Fotokatalis Zat WarnaMetilen Biru. *Gunung Djati Conference Series, Volume 15(2022)*, (https://conferences.uinsgd.ac.id/index.php/gdcs/issue/view/18).

Stiadi, Y., Wendari, T. P., Zilfa, Zulhadjri, & Rahmayeni. (2023). Tuning the structural, magnetic, and optical properties of ZnO/NiFe2O4 heterojunction photocatalyst for simultaneous photodegradation of Rhodamine B and Methylene Blue under natural sunlight. In *Environmental Engineering Research* (Vol. 28, Number 3). Korean Society of Environmental Engineers. https://doi.org/10.4491/eer.2022.074

Yaseen, D. A., & Scholz, M. (2019). Textile dye wastewater characteristics and constituents of synthetic effluents: a critical review. In *International Journal of Environmental Science and Technology* (Vol. 16, Number 2, pp. 1193–1226). Center for Environmental and Energy Research and Studies. https://doi.org/10.1007/s13762-018-2130-z

Zhang, Y., Shaad, K., Vollmer, D., & Ma, C. (2021). Treatment of Textile Wastewater Using Advanced Oxidation Processes—A Critical Review. *Water*, *13*(24), 3515. https://doi.org/10.3390/w13243515