

## Sintesis dan Aplikasi fotokatalis ZnO/NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> untuk Degradasi Lignin pada Air Limbah Pulp

<sup>1</sup>Vita Rahmawati\*, <sup>1</sup>Yuniar, <sup>2</sup>Erika Dwi Oktaviani

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Kimia, Politeknik Negeri Sriwijaya, Indonesia

\*Penulis korespondensi: yuniar@polsri.ac.id

**Abstrak.** Limbah cair industri pulp dan kertas mengandung lignin dan senyawa organik kompleks yang berpotensi mencemari lingkungan. Penelitian ini bertujuan menyintesis dan mengevaluasi aktivitas fotokatalis ZnO/NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> dalam menurunkan kadar lignin melalui variasi massa katalis dan waktu kontak. Nanokomposit disintesis menggunakan metode kopresipitasi dan dikarakterisasi menggunakan X-Ray Diffraction (XRD) dan Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). Pengujian dilakukan dengan variasi massa katalis 1; 1,25; dan 1,5 g serta waktu kontak 0–180 menit. Parameter yang dianalisis meliputi konsentrasi lignin sebelum dan sesudah perlakuan fotokatalisis, serta COD, TSS, kekeruhan, dan pH untuk mengevaluasi perubahan kualitas limbah. Hasil XRD menunjukkan ukuran kristalit sebesar 24,98 nm, sedangkan analisis FTIR mengidentifikasi pita serapan Fe–O pada 580 cm<sup>-1</sup> dan Zn–O/Ni–O pada 455 cm<sup>-1</sup>. Kondisi optimum diperoleh pada massa katalis 1 g dan waktu kontak 120 menit, dengan penurunan konsentrasi lignin dari 7,95 menjadi 0,64 ppm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nanokomposit ZnO/NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> berpotensi digunakan sebagai fotokatalis untuk menurunkan kadar lignin dalam limbah cair industri pulp dan kertas.

**Kata kunci:** ZnO/NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, fotokatalis, lignin, limbah cair pulp dan kertas, degradasi, waktu kontak.

**Abstract.** Pulp and paper industry wastewater contains lignin and complex organic compounds that pose a risk of environmental pollution. This study aimed to synthesize and evaluate the photocatalytic activity of ZnO/NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> for lignin reduction, varying the catalyst mass and contact time. The nanocomposite was synthesized via the co-precipitation method and characterized using XRD and FTIR. Testing was conducted using catalyst masses of 1.0, 1.25, and 1.5 g over contact times ranging from 0 to 180 minutes. Analyzed parameters included lignin concentration, COD, TSS, turbidity, and pH. XRD results indicated a crystallite size of 24.98 nm, while FTIR analysis identified Fe–O bonds at 580 cm<sup>-1</sup> and Zn–O/Ni–O bonds at 455 cm<sup>-1</sup>. Optimal conditions were achieved with a catalyst mass of 1 g and a contact time of 120 minutes, resulting in a reduction of lignin concentration from 7.95 ppm to 0.64 ppm. These results demonstrate the effectiveness of ZnO/NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> in reducing lignin content in pulp and paper wastewater.

**Keywords:** ZnO/NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, photocatalyst, lignin, pulp and paper wastewater, degradation, contact time.

### 1. Pendahuluan

Industri pulp dan kertas menghasilkan air limbah dengan kandungan senyawa organik yang tinggi, terutama lignin. Pada lindi hitam, lignin dapat mencapai sekitar 47% dari total senyawa organik. Keberadaan lignin perlu dikendalikan karena dapat berkontribusi terhadap terbentuknya senyawa organik terklorinasi yang bersifat toksik, mutagenik, dan karsinogenik (Liang dkk., 2023). Selain lignin, limbah cair pulp dan kertas umumnya memiliki nilai Chemical Oxygen Demand (COD), Total Suspended Solids (TSS),

dan kekeruhan yang tinggi sehingga memerlukan pengolahan sebelum dilepaskan ke lingkungan (Mawarni dkk., 2021).

Fotokatalisis merupakan salah satu metode yang dapat digunakan untuk menguraikan senyawa organik dalam air limbah. Proses ini memanfaatkan semikonduktor yang diaktifkan oleh cahaya untuk menghasilkan pasangan elektron-hole dan spesies reaktif yang mampu memecah senyawa organik kompleks menjadi senyawa yang lebih sederhana (Amanda dkk., 2022). Zinc Oxide (ZnO) banyak digunakan sebagai material fotokatalitik karena memiliki stabilitas kimia yang baik, toksisitas relatif rendah, dan harga yang ekonomis (Mawarni dkk., 2021). Namun, ZnO memiliki band gap sekitar 3,2–3,37 eV sehingga aktivitasnya lebih dominan pada sinar ultraviolet dan berpotensi mengalami rekombinasi elektron-hole yang dapat menurunkan efektivitas fotokatalisis (Supin dkk., 2023).

Keterbatasan tersebut dapat diminimalkan dengan mengombinasikan ZnO dan  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ .  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  merupakan ferrit berstruktur spinel yang memiliki stabilitas kimia dan sifat magnetik yang baik serta celah pita lebih rendah. Kombinasi kedua material melalui pembentukan heterojunction berpotensi meningkatkan pemanfaatan cahaya dan menghambat rekombinasi elektron-hole, sehingga pembentukan spesies reaktif untuk degradasi polutan dapat berlangsung lebih efektif (Nurmayansih dkk., 2020). Sifat magnetik  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  juga memudahkan proses pemisahan katalis setelah digunakan (Nguyen dkk., 2025).

Efektivitas fotokatalisis dipengaruhi oleh kondisi operasi, khususnya massa katalis dan waktu kontak. Massa katalis berkaitan dengan jumlah situs aktif yang tersedia, sedangkan waktu kontak menentukan lama interaksi antara katalis dan polutan (Varghese dkk., 2025). Penelitian ZnO/ $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  sebelumnya lebih banyak digunakan untuk degradasi Rhodamine B dengan prekursor  $\text{ZnCl}_2$ . Sementara itu, penerapan zinc acetate dihydrate sebagai prekursor ZnO untuk degradasi lignin pada limbah cair pulp dan kertas masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini mengkaji pengaruh massa ZnO/ $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  dan waktu kontak terhadap penurunan lignin serta perubahan parameter TSS, pH, kekeruhan, dan COD pada air limbah industri pulp dan kertas.

## **2. Alat dan Metode**

### **2.1 Alat yang digunakan**

Alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi gelas kimia, labu ukur, erlenmeyer, pipet ukur, pipet tetes, gelas kaca, kertas saring, membran filter, hot plate magnetic stirrer, furnace, cawan krusibel, neraca analitik, serta lampu UV. Karakterisasi material dilakukan menggunakan instrumen X-Ray Diffraction (XRD) dan Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). Bahan yang digunakan meliputi zinc acetate dihydrate ( $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), ferric chloride ( $\text{FeCl}_3$ ), nikel klorida ( $\text{NiCl}_2$ ), polietilen glikol (PEG-4000), natrium hidroksida ( $\text{NaOH}$ ), air deionisasi, dan sampel limbah cair industri pulp dan kertas.

### **2.2 Metode Penelitian**

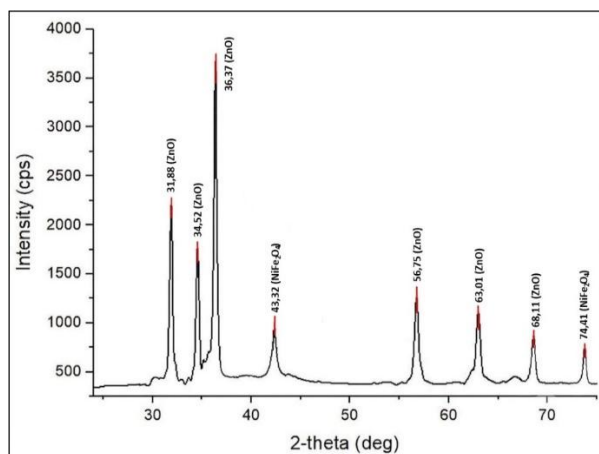
Penelitian ini dilakukan secara eksperimental melalui sintesis nanokomposit ZnO/ $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  menggunakan metode kopresipitasi. Proses sintesis dilakukan dengan

mencampurkan prekursor zinc acetate dihydrate, ferric chloride, dan nikel klorida, disertai penambahan PEG-4000 sebagai bahan pendukung dan NaOH sebagai agen pengendap. Endapan yang terbentuk kemudian disaring, dicuci menggunakan air deionisasi, dikeringkan, dan dikalsinasi untuk memperoleh nanokomposit. Material yang dihasilkan dikarakterisasi menggunakan XRD untuk mengidentifikasi fase kristalin berdasarkan kesesuaian puncak difraksi dengan pola standar ZnO dan NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> serta menentukan ukuran kristalit. Analisis FTIR dilakukan untuk mengidentifikasi ikatan logam–oksigen, khususnya Zn–O, Ni–O, dan Fe–O. Selanjutnya, pengujian aktivitas fotokatalitik dilakukan terhadap limbah cair industri pulp dan kertas menggunakan variasi massa katalis 1; 1,25; dan 1,5 g serta waktu kontak 0–180 menit di bawah penyinaran lampu UV. Setelah perlakuan, sampel dipisahkan dari partikel katalis melalui penyaringan. Parameter yang dianalisis meliputi konsentrasi lignin sebelum dan sesudah perlakuan sebagai indikator utama penurunan lignin, serta Chemical Oxygen Demand (COD), Total Suspended Solids (TSS), kekeruhan, dan pH sebagai parameter pendukung untuk mengevaluasi perubahan kualitas limbah. Kondisi optimum ditentukan berdasarkan penurunan konsentrasi lignin pada variasi massa katalis dan waktu kontak.

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1 Analisis Karakteristik ZnO/NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Menggunakan X-Ray Diffraction (XRD)

Karakterisasi XRD dilakukan untuk mengidentifikasi fase kristal dan menentukan ukuran kristalit nanokomposit ZnO/NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>. Hasil pola difraksi menunjukkan terbentuknya dua fase kristalin utama, yaitu ZnO dan NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.



**Gambar 1.** Hasil Uji XRD ZnO/ NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>

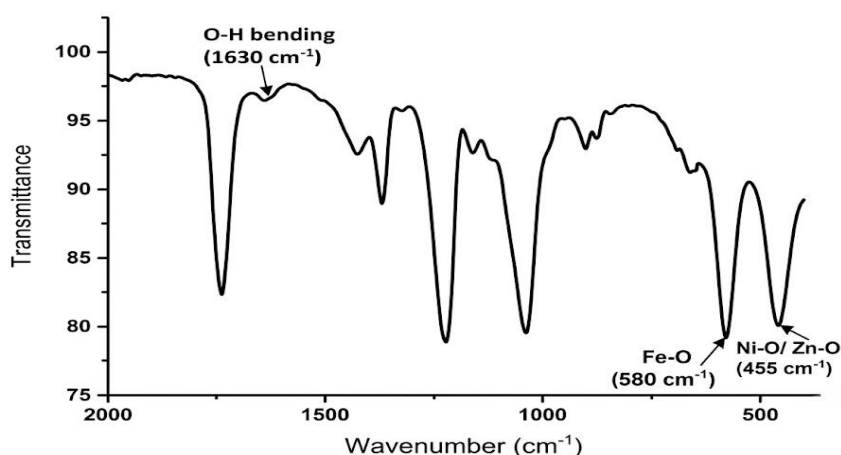
Berdasarkan Gambar 1, pola difraksi XRD menunjukkan terbentuknya dua fase kristalin utama, yaitu ZnO dan NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>. Puncak difraksi ZnO muncul pada sudut 2 $\theta$  31,89°; 34,53°; 36,38°; 56,75°; 63,01°; dan 68,11° yang sesuai dengan struktur heksagonal wurtzite (JCPDS No. 36-1451). Puncak difraksi pada 2 $\theta$  = 36,38° diidentifikasi sebagai salah satu puncak karakteristik ZnO berdasarkan kesesuaiannya dengan pola difraksi standar. Intensitas relatif yang tinggi pada posisi tersebut menunjukkan refleksi kristal yang kuat, tetapi tidak dapat dijadikan satu-satunya dasar untuk menyatakan bahwa ZnO merupakan fase dominan dengan kristalinitas yang baik (Tijani dkk., 2025a). Sementara itu, puncak

pada  $2\theta = 43,32^\circ$  dan  $74,41^\circ$  dianalisis untuk mengidentifikasi keberadaan fase spinel kubik  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  berdasarkan kesesuaiannya dengan pola standar. Intensitas puncak yang relatif lebih rendah dapat dipengaruhi oleh proporsi fase dan karakteristik difraksi material, sedangkan kemungkinan tumpang tindih puncak perlu dikonfirmasi melalui pencocokan pola difraksi secara menyeluruh (Stiadi dkk., 2022).

Tidak ditemukannya puncak pengotor yang signifikan menunjukkan bahwa sintesis  $\text{ZnO/NiFe}_2\text{O}_4$  berhasil menghasilkan komposit dengan kemurnian fase yang baik. Perhitungan menggunakan persamaan Debye-Scherrer menghasilkan ukuran kristalit sebesar 24,98 nm, yang mengindikasikan bahwa material berada pada skala nanometer. Pembentukan heterostruktur  $\text{ZnO/NiFe}_2\text{O}_4$  juga berkontribusi terhadap kestabilan struktur serta berpotensi meningkatkan pemisahan muatan dan aktivitas fotokatalitik material (Stiadi dkk., 2022).

### 3.2 Analisis Karakteristik $\text{ZnO/NiFe}_2\text{O}_4$ Menggunakan Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

Karakterisasi FTIR dilakukan untuk mengidentifikasi gugus fungsi dan mengonfirmasi terbentuknya ikatan logam-oksigen pada nanokomposit  $\text{ZnO/NiFe}_2\text{O}_4$ . Hasil spektrum FTIR ditunjukkan pada Gambar 2.



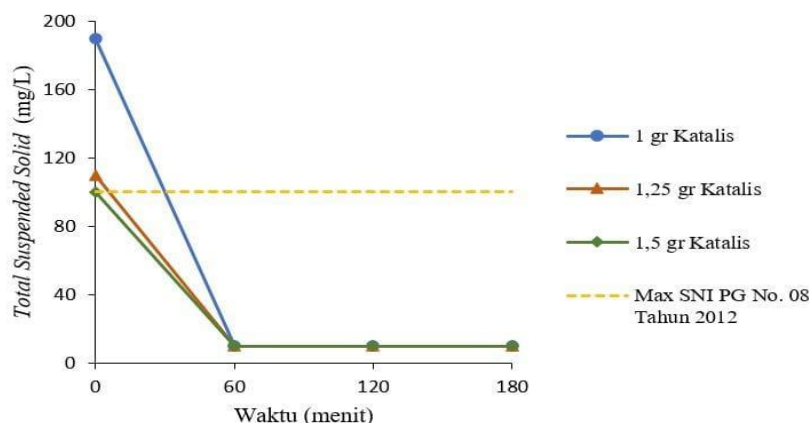
**Gambar 2.** Hasil Uji FTIR  $\text{ZnO/NiFe}_2\text{O}_4$

Spektrum FTIR menunjukkan pita serapan utama pada bilangan gelombang sekitar  $580\text{ cm}^{-1}$  yang merupakan vibrasi ikatan Fe-O dari struktur spinel  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ , serta pita serapan sekitar  $455\text{ cm}^{-1}$  yang berkaitan dengan vibrasi Zn-O dan Ni-O. Munculnya pita-pita serapan tersebut mengonfirmasi keberhasilan pembentukan komposit  $\text{ZnO/NiFe}_2\text{O}_4$  (Stiadi dkk., 2022). Selain itu, pita serapan pada sekitar  $1600\text{ cm}^{-1}$  menunjukkan vibrasi gugus hidroksil (O-H), sedangkan pita pada rentang  $1000\text{--}1400\text{ cm}^{-1}$  diduga berasal dari sisa gugus organik hasil proses sintesis. Keberadaan gugus hidroksil diketahui dapat mendukung pembentukan radikal aktif selama proses fotokatalitik (Tijani dkk., 2025b).

Hasil FTIR mendukung karakterisasi XRD yang menunjukkan terbentuknya fase ZnO berstruktur wurtzite dan  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  berstruktur spinel tanpa adanya pita pengotor yang dominan. Kombinasi kedua material tersebut menghasilkan heterostruktur yang stabil dan berpotensi meningkatkan aktivitas fotokatalitik melalui pemisahan muatan yang lebih baik (Stiadi dkk., 2022).

### 3.3 Pengaruh Massa Fotokatalis dan Waktu Kontak Terhadap Nilai TSS

TSS merupakan parameter yang menunjukkan jumlah padatan tersuspensi dalam air limbah. Penurunan nilai TSS digunakan untuk mengevaluasi efektivitas fotokatalis ZnO/NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> dalam mengurangi kandungan padatan pada limbah pulp dan kertas. Hasil pengaruh variasi massa katalis dan waktu kontak terhadap nilai TSS ditunjukkan pada Gambar 3.



**Gambar 3.** Pengaruh Massa dan Waktu Kontak Terhadap Nilai TSS

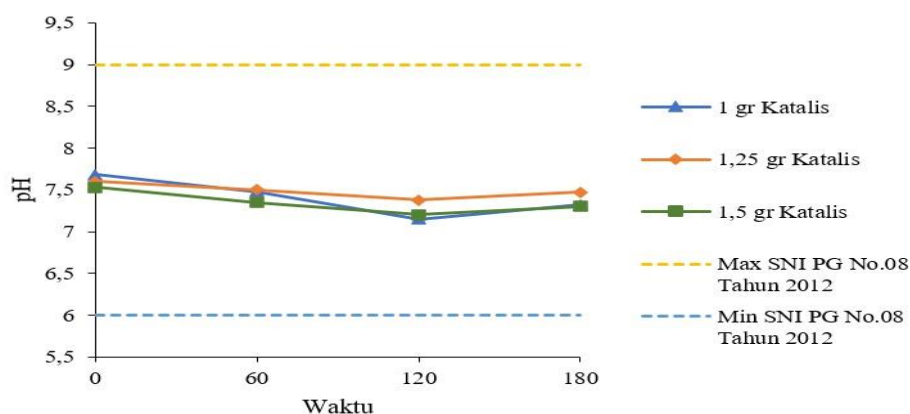
Berdasarkan Gambar 3, nilai TSS menurun seiring bertambahnya waktu penyinaran pada seluruh variasi massa katalis. Pada waktu kontak 0 menit, nilai TSS masih relatif tinggi, yaitu 190 mg/L (1 g), 110 mg/L (1,25 g), dan 100 mg/L (1,5 g). Setelah penyinaran selama 60 menit, nilai TSS turun menjadi 10 mg/L dan cenderung tetap hingga 180 menit. Hal ini menunjukkan bahwa proses fotokatalitik telah mencapai kondisi optimum pada waktu kontak 60 menit.

Penurunan TSS terjadi karena aktivasi ZnO/NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> oleh cahaya menghasilkan pasangan elektron-hole yang membentuk spesies reaktif untuk mendegradasi zat pencemar, sementara permukaan katalis berperan sebagai media adsorpsi partikel tersuspensi (Stiadi dkk., 2022). Hasil akhir yang relatif sama pada seluruh variasi massa katalis menunjukkan bahwa penambahan massa di atas 1 g tidak memberikan pengaruh yang signifikan karena jumlah sisi aktif katalis telah mencukupi untuk berinteraksi dengan partikel tersuspensi (Doosti dkk., 2022).

Berdasarkan Peraturan Gubernur Sumatera Selatan Nomor 8 Tahun 2012, kadar TSS limbah cair yang diperbolehkan berada pada rentang 45–100 mg/L. Seluruh perlakuan menghasilkan nilai TSS sebesar 10 mg/L, sehingga telah memenuhi baku mutu yang ditetapkan.

### 3.4 Pengaruh Massa Fotokatalis dan Waktu Kontak Terhadap pH

pH merupakan parameter yang menunjukkan tingkat keasaman atau kebasaan larutan. Pada proses fotokatalitik, pH berpengaruh terhadap aktivitas katalis dan pembentukan spesies aktif yang berperan dalam degradasi senyawa organik.



**Gambar 4.** Pengaruh Massa dan Waktu Kontak Terhadap pH

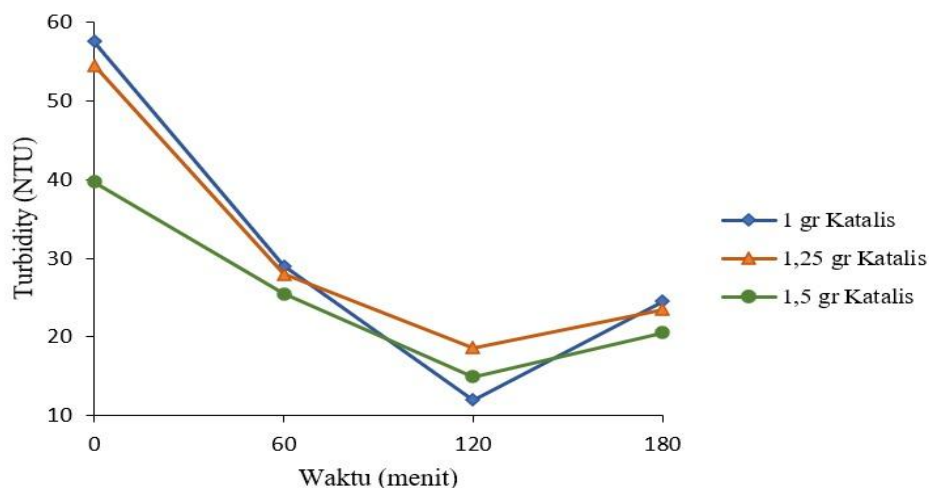
Berdasarkan Gambar 4, nilai pH mengalami perubahan yang relatif kecil selama proses penyinaran. Pada waktu kontak 0 menit, pH berada pada kisaran 7,53–7,68. Setelah penyinaran selama 60 hingga 120 menit, pH menurun hingga mencapai kisaran 7,15–7,38, kemudian meningkat kembali pada 180 menit menjadi 7,30–7,47. Penurunan pH selama proses fotokatalitik diduga berkaitan dengan terbentuknya senyawa antara yang bersifat asam akibat oksidasi lignin dan senyawa organik lainnya dalam limbah. Ketika nanokomposit  $\text{ZnO/NiFe}_2\text{O}_4$  disinari sinar UV, terbentuk pasangan elektron–lubang (electron–hole pairs) yang berperan dalam menghasilkan spesies oksidatif, seperti radikal hidroksil ( $\bullet\text{OH}$ ) dan radikal superoksida ( $\bullet\text{O}_2^-$ ).

Radikal hidroksil yang terbentuk selama proses fotokatalitik dapat mengoksidasi senyawa organik menjadi senyawa dengan struktur yang lebih sederhana hingga produk akhir, seperti karbon dioksida dan air (Bekele dan Alamnie, 2025). Penurunan pH pada penelitian ini diduga berkaitan dengan pembentukan senyawa antara yang bersifat asam selama degradasi senyawa organik. Sementara itu, peningkatan pH pada waktu kontak 180 menit diduga menunjukkan perubahan komposisi senyawa antara dan keseimbangan kimia larutan selama reaksi berlangsung. Namun, mekanisme perubahan pH tersebut belum dapat dipastikan karena senyawa antara hasil degradasi belum diidentifikasi secara langsung.

Berdasarkan Peraturan Gubernur Sumatera Selatan Nomor 8 Tahun 2012, baku mutu pH limbah cair berada pada rentang 6–9. Seluruh hasil penelitian menunjukkan nilai pH berada pada kisaran 7,15–7,68, sehingga telah memenuhi baku mutu yang ditetapkan. Hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan fotokatalis  $\text{ZnO/NiFe}_2\text{O}_4$  mampu mendegradasi zat pencemar tanpa menyebabkan perubahan pH yang signifikan.

### 3.5 Pengaruh Massa Fotokatalis dan Waktu Kontak Terhadap Nilai Turbiditas

Turbiditas merupakan parameter yang menunjukkan tingkat kekeruhan air akibat keberadaan partikel tersuspensi, koloid, serta senyawa organik dan anorganik di dalam limbah. Pada limbah pulp dan kertas, tingginya nilai turbiditas terutama disebabkan oleh serat selulosa, lignin, dan partikel halus kayu. Pengaruh variasi massa katalis  $\text{ZnO/NiFe}_2\text{O}_4$  dan waktu kontak terhadap nilai turbiditas ditunjukkan pada Gambar 5.



**Gambar 5.** Pengaruh Massa dan Waktu Kontak Terhadap Nilai Turbiditas

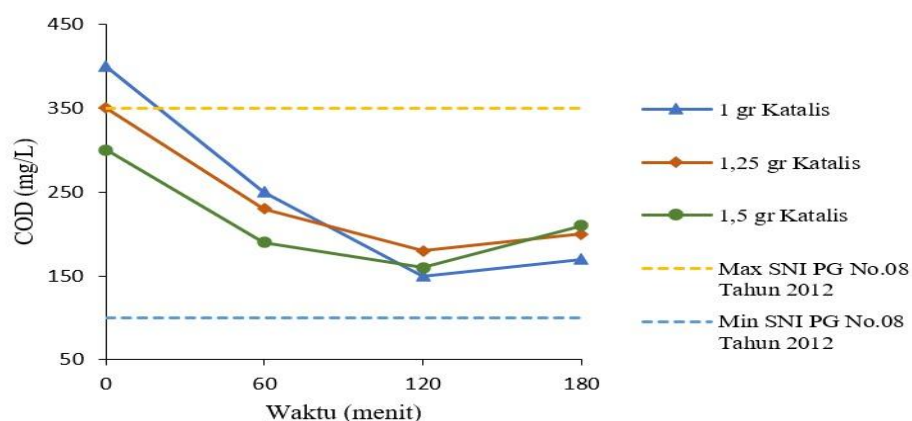
Berdasarkan Gambar 5, nilai turbiditas menurun seiring bertambahnya waktu penyinaran pada seluruh variasi massa fotokatalis. Pada waktu kontak 0 menit, nilai turbiditas masih relatif tinggi, yaitu 57,5 NTU (1 g), 54,5 NTU (1,25 g), dan 39,7 NTU (1,5 g). Setelah penyinaran selama 60 menit, nilai turbiditas menurun dan mencapai kondisi optimum pada waktu kontak 120 menit, yaitu 12 NTU (1 g), 18,6 NTU (1,25 g), dan 14,9 NTU (1,5 g). Penurunan turbiditas diduga terjadi akibat aktivitas fotokatalitik nanokomposit ZnO/NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> yang menghasilkan spesies oksidatif untuk menguraikan senyawa organik dalam limbah. Ketika fotokatalis menyerap energi sinar UV, elektron tereksitasi dari pita valensi ke pita konduksi sehingga terbentuk pasangan elektron–lubang (electron–hole pairs). Lubang ( $h^+$ ) dapat bereaksi dengan molekul air atau ion hidoksida untuk menghasilkan radikal hidroksil ( $\bullet OH$ ), sedangkan elektron ( $e^-$ ) dapat bereaksi dengan oksigen terlarut membentuk radikal superoksida ( $\bullet O_2^-$ ). Spesies reaktif tersebut mengoksidasi senyawa organik kompleks, termasuk lignin dan produk turunannya, menjadi senyawa yang lebih sederhana sehingga kandungan zat penyebab kekeruhan berpotensi berkurang (Stiadi dkk., 2022).

Pada waktu kontak 180 menit, nilai turbiditas kembali meningkat menjadi 24,5 NTU (1 g), 23,5 NTU (1,25 g), dan 20,5 NTU (1,5 g). Peningkatan ini diduga berkaitan dengan terbentuknya produk antara selama degradasi senyawa organik atau tersuspensinya kembali partikel dalam larutan. Selain itu, perubahan karakteristik partikel dan agregasi material dapat memengaruhi nilai turbiditas yang terukur. Oleh karena itu, peningkatan turbiditas pada waktu kontak yang lebih lama tidak secara langsung membuktikan penurunan aktivitas fotokatalis, tetapi menunjukkan bahwa kondisi larutan dan partikel yang tersuspensi turut memengaruhi hasil pengukuran (Derakhshani & Naghizadeh, 2023).

Berdasarkan hasil tersebut, kondisi optimum diperoleh pada massa fotokatalis 1 g dan waktu kontak 120 menit, dengan nilai turbiditas terendah sebesar 12 NTU. Hasil ini menunjukkan bahwa waktu penyinaran yang sesuai memungkinkan pembentukan spesies oksidatif berlangsung efektif dalam menguraikan senyawa organik penyebab kekeruhan. Penggunaan massa katalis yang lebih besar tidak selalu menghasilkan penurunan turbiditas yang lebih tinggi karena efektivitas fotokatalisis juga dipengaruhi oleh distribusi partikel, penetrasi cahaya, dan ketersediaan permukaan aktif katalis (Doosti dkk., 2022).

### 3.6 Pengaruh Massa Fotokatalis dan Waktu Kontak Terhadap Nilai COD

COD merupakan parameter yang menunjukkan jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk mengoksidasi senyawa organik maupun anorganik dalam air limbah. Nilai COD awal limbah pulp dan kertas yang digunakan dalam penelitian ini sebesar 460 mg/L, yang menunjukkan tingginya kandungan senyawa organik seperti lignin, selulosa, hemiselulosa, dan turunannya. Pengaruh variasi massa fotokatalis  $\text{ZnO/NiFe}_2\text{O}_4$  dan waktu kontak terhadap penurunan COD ditunjukkan pada Gambar 6.



**Gambar 6.** Pengaruh Massa dan Waktu Kontak Terhadap Nilai COD

Berdasarkan Gambar 6, nilai COD menurun seiring bertambahnya waktu penyinaran pada seluruh variasi massa fotokatalis. Pada waktu kontak 0 menit, nilai COD masih relatif tinggi, yaitu 400 mg/L (1 g), 350 mg/L (1,25 g), dan 300 mg/L (1,5 g). Setelah penyinaran 60 menit, nilai COD terus menurun dan mencapai kondisi optimum pada 120 menit, yaitu 150 mg/L (1 g), 180 mg/L (1,25 g), dan 160 mg/L (1,5 g). Penurunan ini terjadi karena komposit  $\text{ZnO/NiFe}_2\text{O}_4$  menyerap energi sinar UV sehingga elektron tereksitasi dari pita valensi ke pita konduksi dan menghasilkan pasangan elektron–lubang (electron–hole pairs). Lubang ( $\text{h}^+$ ) bereaksi dengan molekul air ( $\text{H}_2\text{O}$ ) atau ion hidroksida ( $\text{OH}^-$ ) untuk membentuk radikal hidroksil ( $\bullet\text{OH}$ ), sedangkan elektron ( $\text{e}^-$ ) bereaksi dengan oksigen terlarut ( $\text{O}_2$ ) membentuk radikal superoksida ( $\bullet\text{O}_2^-$ ). Kedua spesies reaktif tersebut berperan dalam mengoksidasi senyawa organik kompleks menjadi senyawa yang lebih sederhana. Keberadaan  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  berpotensi membantu pemisahan muatan dan menghambat rekombinasi elektron–lubang, sehingga ketersediaan spesies reaktif untuk proses degradasi dapat meningkat. Mekanisme tersebut mendukung berlangsungnya proses fotokatalitik secara lebih efektif (Stiadi dkk., 2022).

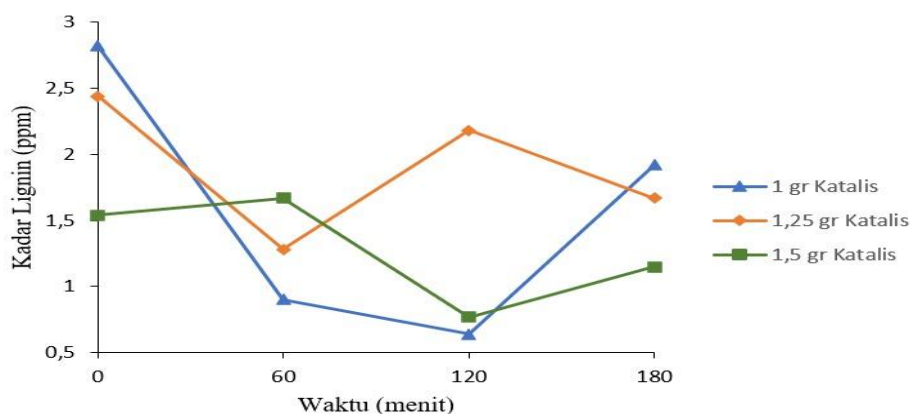
Pada waktu kontak 180 menit, nilai COD kembali meningkat menjadi 170 mg/L (1 g), 200 mg/L (1,25 g), dan 210 mg/L (1,5 g). Kondisi ini menunjukkan bahwa proses telah melewati waktu optimum sehingga efektivitas degradasi mulai menurun akibat terbentuknya produk antara maupun menurunnya aktivitas fotokatalis (Hariani dkk., 2022).

Berdasarkan Peraturan Gubernur Sumatera Selatan Nomor 8 Tahun 2012, seluruh hasil pengolahan telah memenuhi baku mutu COD limbah cair industri pulp dan kertas (100–350 mg/L). Kondisi terbaik diperoleh pada massa fotokatalis 1 g dengan waktu kontak 120 menit yang menghasilkan nilai COD terendah sebesar 150 mg/L. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan waktu kontak hingga kondisi optimum mampu

meningkatkan degradasi senyawa organik dalam limbah (Doosti dkk., 2022).

### 3.7 Pengaruh Massa Fotokatalis dan Waktu Kontak Terhadap Kadar Lignin

Lignin merupakan senyawa organik kompleks yang banyak terkandung dalam limbah pulp dan kertas serta sulit terdegradasi secara alami karena memiliki struktur aromatik yang stabil. Kandungan lignin yang tinggi menyebabkan warna gelap pada air limbah dan meningkatkan beban pencemar organik. Oleh karena itu, penurunan kadar lignin menjadi salah satu indikator penting dalam mengevaluasi kinerja fotokatalis ZnO/NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 7.



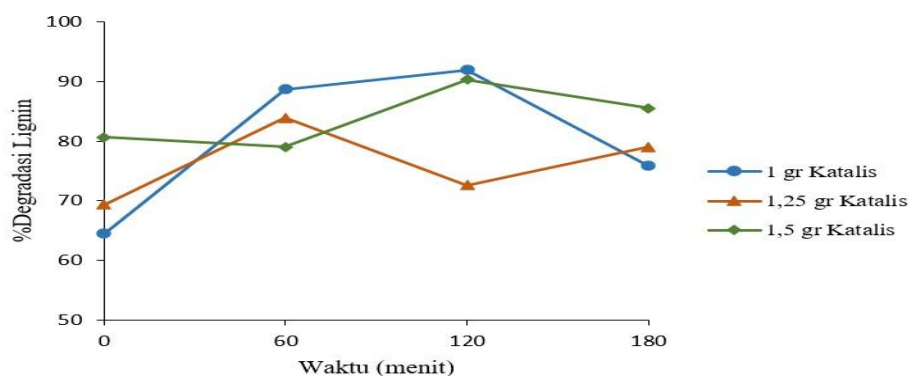
**Gambar 7.** Pengaruh Massa dan Waktu Kontak Terhadap Kadar Lignin

Berdasarkan Gambar 7, kadar lignin cenderung menurun hingga waktu kontak 120 menit pada seluruh variasi massa fotokatalis. Kondisi optimum diperoleh pada massa 1 g dan waktu kontak 120 menit dengan kadar lignin terendah sebesar 0,64 ppm. Penurunan ini berkaitan dengan pembentukan pasangan elektron-hole dan radikal hidroksil ( $\bullet\text{OH}$ ) dari ZnO, sementara NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> membantu menghambat rekombinasi muatan (Doosti dkk., 2022).

Pada 180 menit, kadar lignin meningkat menjadi 1,92 ppm (1 g), 1,67 ppm (1,25 g), dan 1,15 ppm (1,5 g). Hal ini menunjukkan bahwa waktu penyinaran telah melewati kondisi optimum dan masih terdapat produk antara yang belum terdegradasi sempurna (Vera dkk., 2025). Dengan demikian, kombinasi ZnO/NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> paling efektif diperoleh pada massa 1 g dengan waktu kontak 120 menit.

### 3.8 Efektivitas Proses Fotokatalis Terhadap Degradasi Lignin

Efektivitas fotokatalis ZnO/NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> dalam mendegradasi lignin dievaluasi berdasarkan persentase degradasi lignin. Nilai ini menunjukkan kemampuan fotokatalis dalam menguraikan senyawa lignin selama proses fotokatalitik, yang dipengaruhi oleh massa fotokatalis dan waktu kontak karena kedua faktor tersebut menentukan jumlah sisi aktif serta lamanya interaksi antara fotokatalis dan senyawa lignin. Pengaruh variasi massa fotokatalis dan waktu kontak terhadap persentase degradasi lignin ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Persentase Degradasi Lignin Pada Variasi Massa Fotokatalis Dan Waktu Kontak

Berdasarkan Gambar 8, degradasi lignin meningkat seiring bertambahnya waktu kontak dan mencapai kondisi optimum pada 120 menit. Degradasi tertinggi diperoleh pada massa fotokatalis 1 g sebesar 91,94%, sedangkan massa 1,5 g mencapai 90,32%. Peningkatan ini dipengaruhi oleh terbentuknya spesies oksidatif, seperti radikal hidroksil ( $\bullet\text{OH}$ ) dan superoksida ( $\bullet\text{O}_2^-$ ), yang membantu menguraikan lignin menjadi senyawa lebih sederhana (Balu dkk., 2024).

Setelah melewati waktu optimum, persentase degradasi cenderung menurun akibat berkurangnya aktivitas permukaan katalis, tertutupnya situs aktif oleh produk antara, dan meningkatnya rekombinasi elektron-hole (YarAhmadi & Keramati, 2023). Fluktuasi pada massa 1,25 g juga menunjukkan bahwa penambahan katalis berlebih tidak selalu meningkatkan degradasi karena dapat mengurangi penetrasi cahaya ke permukaan katalis (Al Miad dkk., 2024). Dengan demikian, kondisi terbaik diperoleh pada massa 1 g dan waktu kontak 120 menit dengan degradasi lignin sebesar 91,94%.

#### 4. Kesimpulan

Hasil pengujian menunjukkan bahwa perubahan jumlah fotokatalis  $\text{ZnO}/\text{NiFe}_2\text{O}_4$  serta durasi kontak memberikan pengaruh terhadap karakteristik limbah cair industri pulp dan kertas, khususnya dalam menurunkan konsentrasi TSS, turbiditas, COD, dan lignin. Kondisi proses yang memberikan hasil terbaik dicapai dengan penambahan fotokatalis sebanyak 1 gram dan waktu kontak selama 120 menit. Pada kondisi tersebut, diperoleh konsentrasi COD sebesar 150 mg/L, TSS 10 mg/L, turbiditas 12,0 NTU, pH 7,15, serta kadar lignin sebesar 0,64 ppm. Penurunan lignin yang dicapai mencapai 91,94%, sehingga  $\text{ZnO}/\text{NiFe}_2\text{O}_4$  menunjukkan potensi sebagai material fotokatalitik dalam menguraikan senyawa organik kompleks yang terdapat pada limbah cair industri pulp dan kertas.

#### Referensi

- Al Miad, A., Saikat, S. P., Alam, Md. K., Sahadat Hossain, Md., Bahadur, N. M., & Ahmed, S. (2024). Metal oxide-based Photocatalysts for the Efficient Degradation of Organic Pollutants for a Sustainable Environment: a review. *Nanoscale Advances*, 6(19), 4781–4803. <https://doi.org/10.1039/D4NA00517A>
- Amanda, N. A., Ramadhika, L. N., Bahtiar, A., Safriani, L., & Aprilia, A. (2022). Pengaruh Jenis Prekursor terhadap Karakteristik Partikel  $\text{ZnO}$  Beserta Pengujian Sifat

- Fotokatalitiknya. *Jurnal Material dan Energi Indonesia*, 12(01), 08.  
<https://doi.org/10.24198/jme.v12i01.40511>
- Balu, S., Ganapathy, D., Arya, S., Atchudan, R., & Sundramoorthy, A. K. (2024). Advanced Photocatalytic Materials Based Degradation of Micropollutants and Their Use in Hydrogen Production – a review. *RSC Advances*, 14(20), 14392–14424.  
<https://doi.org/10.1039/D4RA01307G>
- Bekele, T., and G. Alamnie, “The photocatalytic degradation of organic pollutants—a comprehensive overview,” *Results in Chemistry*, vol. 18, Art. no. 102758, 2025, [doi: 10.1016/j.rechem.2025.102758](https://doi.org/10.1016/j.rechem.2025.102758)
- Derakhshani, E., & Naghizadeh, A. (2023). Recent Advancement in NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-based Nanocomposites for the Photocatalytic Degradation of Pollutants in Aqueous Solutions: a Comprehensive Systematic Review. *AQUA — Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 72(8), 1629–1645.  
<https://doi.org/10.2166/aqua.2023.316>
- Doosti, M., Jahanshahi, R., Laleh, S., Sobhani, S., & Sansano, J. M. (2022). Solar Light Induced Photocatalytic Degradation of Tetracycline in the Presence of ZnO/NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> as a New and Highly Efficient Magnetically separable Photocatalyst. *Frontiers in Chemistry*, 10. <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.1013349>
- Hariani, P. L., Said, M., Rachmat, A., Salni, S., Aprianti, N., & Amatullah, A. F. (2022). Synthesis of NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub>/NiO Magnetic and Application for the Photocatalytic Degradation of Methyl Orange Dye under UV Irradiation. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 17(4), 699–711.  
<https://doi.org/10.9767/bcrec.17.4.15788.699-711>
- Liang, X., Xu, Y., Yin, L., Wang, R., Li, P., Wang, J., & Liu, K. (2023). Sustainable Utilization of Pulp and Paper Wastewater. *Water*, 15(23), 4135.  
<https://doi.org/10.3390/w15234135>
- Mawarni, T., Fadarina, H. C., Aznury, M., Taufik, M., Kimia, T., Jurusan, I. /, Kimia, T., Sriwijaya, N., Srijaya, J., Bukit, N., & Palembang, B. (2021). Degradasi Zat Warna Rhodamin B Menggunakan Sintesis Fotokatalis ZnO/NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> dan Diaplikasikan pada Limbah Cair Industri Pulp an Paper. *Jurnal Kinetika*, 12(03), 44–50.  
<https://jurnal.polsri.ac.id/index.php/kimia/indexTelp>
- Nguyen, L. T. T., Duong, A. T. T., Bui, N. D., Ngo, V. T. M., Nguyen, H. Q., Nguyen, H. T. T., Tran, G. T., & Tran, T. Van. (2025). Synthesis of magnetic NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> /g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Heterojunction Photocatalysts for Boosting Dye Degradation Performance Under Visible-Light Irradiation. *Nanoscale Advances*, 7(2), 536–548.  
<https://doi.org/10.1039/D4NA00694A>
- Nurmayansih, A., Hariani, P. L., & Said, M. (2020). Synthesis NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Nanoparticles by co-Precipitation Method for Degradation of Congo Red Dye. *Indonesian Journal of Fundamental and Applied Chemistry*, 6(3), 115–121.  
<https://doi.org/10.24845/ijfac.v6.i3.115>
- Stiadi, Y., Wendari, T. P., Zilfa, Zulhadjri, & Rahmayeni. (2022). Tuning the Structural, Magnetic, and Optical Properties of ZnO/NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Heterojunction Photocatalyst for Simultaneous Photodegradation of Rhodamine B and Methylene Blue Under Natural

- Sunlight. *Environmental Engineering Research*, 28(3), 220074–0. <https://doi.org/10.4491/eer.2022.074>
- Supin, K. K., Namboothiri, P. P. M., & Vasundhara, M. (2023). Enhanced Photocatalytic Activity in ZnO Nanoparticles Developed Using Novel *Lepidagathis ananthapuramensis* Leaf Extract. *RSC Advances*, 13(3), 1497–1515. <https://doi.org/10.1039/D2RA06967A>
- Tijani, J. O., Daniel, A. I., Onogwu, S. U., Abdulkareem, A. S., Aminu, U. A., Keyster, M., & Klein, A. (2025a). Effects of ZnO Nanoparticles Concentration on the Morphology and Textural Properties of ZnO/NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Nanocomposite. *MethodsX*, 14, 103199. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2025.103199>
- Varghese, D., S. R, N., P, J. S. J., S, M., J, M., & M, V. A. R. (2025). Synergistic design of CuO/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/MWCNTs Ternary Nanocomposite for Enhanced Photocatalytic Degradation of Tetracycline Under Visible Light. *Scientific Reports*, 15(1), 320. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-82926->
- Vera, J., Herrera, W., Hermosilla, E., Schalchli, H., Díaz, R., Fincheira, P., Seabra, A. B., Quiroz, A., Tortella, G., & Rubilar, O. (2025). Photodegradation of Lignin Biowaste Catalyzed by Biosynthesized Zinc Oxide Nanoparticles Using the Leaf extract of *Aristotelia Chilensis*. *Results in Engineering*, 25, 103866. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103866>
- YarAhmadi, G., & Keramati, N. (2023). Reduced Electron/Hole Recombination in Z-scheme Nanostructure of Zeolitic Imidazolate Framework-11/graphitic Carbon Nitride as Photocatalyst Under Visible Light. *Scientific Reports*, 13(1), 22547. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-49315-7>