Jurnal Serambi Engineering JSE
Volume XI, No.4, Oktober 2026 Hal 21640 - 21648
p-ISSN : 2528-3561
e-ISSN : 2541-1934

Penurunan Kadar Surfaktan Air Limbah *Laundry* Menggunakan Fotokatalis ZnO-$NiFe_2O_4$ dengan Variasi Massa Katalis dan Waktu Kontak

Anya Berlian Rahmadani, Yuniar, Mustain Zamhari

Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Sriwijaya, Palembang
*__Koresponden email__: yuniar@polsri.ac.id

Diterima: 15 Juni 2026 Disetujui: 05 Oktober 2026

Abstract
Wastewater Laundry wastewater is one of the sources of environmental pollution containing organic compounds, surfactants, and phosphates that can reduce water quality. One method that can be applied to treat laundry wastewater is photocatalysis using a ZnO-$NiFe_2O_4$ composite. This study aimed to determine the characteristics of the ZnO-$NiFe_2O_4$ photocatalyst and to investigate the effect of catalyst mass and contact time on the reduction of pollutants in laundry wastewater. The research method included the synthesis of ZnO-$NiFe_2O_4$ photocatalyst and photocatalytic activity testing using catalyst mass variations of 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, and 1.5 g, with contact times of 0, 60, 120, 180, and 240 minutes. The characterization results showed that the ZnO-$NiFe_2O_4$ photocatalyst had a crystallite size of 24.98 nm. FTIR analysis revealed absorption bands at 455 cm^{-1} associated with Zn–O/Ni–O bonds and at 580 cm^{-1} associated with Fe–O bonds, confirming the successful formation of the ZnO-$NiFe_2O_4$ composite. The photocatalytic activity was evaluated through Chemical Oxygen Demand (COD), surfactant, and phosphate analyses. The results indicated that the optimum condition was achieved at a catalyst mass of 1.5 g and a contact time of 180 minutes, resulting in COD removal of 68.97%, surfactant removal of 93.52%, and phosphate removal of 98.55%.
Keywords: *zno, nife2o4, photocatalyst, laundry wastewater, surfactant*

Abstrak
Limbah laundry merupakan salah satu sumber pencemaran lingkungan yang mengandung senyawa organik, surfaktan, dan fosfat yang dapat menurunkan kualitas perairan. Salah satu metode yang dapat digunakan untuk mengolah limbah laundry adalah fotokatalisis menggunakan komposit ZnO-$NiFe_2O_4$. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik fotokatalis ZnO-$NiFe_2O_4$ serta pengaruh variasi massa katalis dan waktu kontak terhadap penurunan kadar pencemar pada limbah laundry. Metode penelitian meliputi sintesis fotokatalis ZnO-$NiFe_2O_4$ dan pengujian aktivitas fotokatalitik menggunakan variasi massa katalis 0,5; 0,75; 1; 1,25; dan 1,5 gram serta waktu kontak 0, 60, 120, 180, dan 240 menit. Hasil karakterisasi ZnO-$NiFe_2O_4$ menunjukkan ukuran kristal sebesar 24,98 nm. Analisis FTIR menunjukkan adanya pita serapan pada bilangan gelombang 455 cm^{-1} yang berkaitan dengan ikatan Zn–O/Ni–O dan 580 cm^{-1} yang berkaitan dengan ikatan Fe–O, sehingga mengonfirmasi terbentuknya komposit ZnO-$NiFe_2O_4$. Evaluasi aktivitas fotokatalis dilakukan melalui analisis Chemical Oxygen Demand (COD), surfaktan, dan fosfat. Hasil penelitian menunjukkan kondisi optimum diperoleh pada massa katalis 1,5 gram dan waktu kontak 180 menit dengan persentase penurunan COD sebesar 68,97%, penurunan kadar surfaktan sebesar 93,52%, dan penurunan kadar fosfat sebesar 98,55%.
Kata Kunci: *zno, nife2o4, fotokatalis, limbah laundry, surfaktan*

1. Pendahuluan

Aktivitas usaha *laundry* yang terus meningkat berkontribusi terhadap bertambahnya volume limbah cair yang berpotensi mencemari lingkungan apabila tidak dikelola dengan baik. Data Asosiasi *Laundry* Indonesia (ASLI) menunjukkan bahwa jumlah usaha *laundry* meningkat hingga 50% pada periode 2021–2022 [1]. Limbah *laundry* umumnya mengandung berbagai senyawa kimia, seperti surfaktan, fosfat, zat pemutih, dan pewangi sintetis yang berasal dari deterjen. Surfaktan anionik, khususnya Linear Alkylbenzene Sulfonate (LAS), merupakan komponen utama deterjen yang sulit terdegradasi secara alami serta dapat menyebabkan pembentukan busa, menurunkan kadar oksigen terlarut, dan mengganggu kehidupan organisme akuatik [2]. Selain itu, banyak usaha *laundry* skala kecil yang masih membuang air limbah tanpa melalui proses pengolahan yang memadai sehingga berpotensi meningkatkan pencemaran

lingkungan [3].

Salah satu teknologi yang banyak dikembangkan dalam pengolahan limbah cair adalah fotokatalisis. Metode ini memanfaatkan material semikonduktor yang diaktivasi oleh energi cahaya untuk menghasilkan radikal aktif yang mampu menguraikan senyawa organik kompleks menjadi senyawa yang lebih sederhana dan ramah lingkungan [4]. Di antara berbagai material semikonduktor, ZnO banyak dipilih sebagai fotokatalis karena memiliki band gap sebesar 3,37 eV, stabilitas kimia yang baik, tidak beracun, serta biaya produksi yang relatif rendah. Ketika disinari, ZnO menghasilkan pasangan elektron-hole yang membentuk radikal hidroksil (OH) dan radikal superoksida (O_2^-) yang berperan dalam mengoksidasi molekul surfaktan hingga terdegradasi menjadi CO_2 dan H_2O [5].

Berbagai penelitian telah membuktikan bahwa ZnO memiliki aktivitas fotokatalitik yang baik dalam mendegradasi surfaktan. Nanopartikel ZnO dilaporkan mampu mendegradasi surfaktan non-ionik Triton X-100 dan C12E10 dengan efisiensi masing-masing sebesar 82% dan 92% setelah penyinaran UV selama 60 menit [6]. Selain itu, surfaktan anionik LAS juga berhasil didegradasi menggunakan ZnO melalui pembentukan radikal hidroksil [7]. Namun demikian, ZnO masih memiliki kelemahan berupa tingginya laju rekombinasi elektron-hole yang dapat menurunkan efisiensi fotokatalitiknya.

Untuk meningkatkan kinerja ZnO, dilakukan pengembangan material komposit menggunakan $NiFe_2O_4$ yang memiliki sifat magnetik, stabilitas kimia yang baik, serta mampu meningkatkan pemisahan elektron-hole melalui pembentukan heterojunction [8]. Selain meningkatkan aktivitas fotokatalitik, keberadaan $NiFe_2O_4$ juga memudahkan proses pemisahan kembali katalis setelah proses pengolahan limbah. Komposit ZnO–$NiFe_2O_4$ dilaporkan mampu meningkatkan efisiensi fotodegradasi hingga 98,71%, lebih tinggi dibandingkan penggunaan ZnO tunggal [9].

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan fotokatalis komposit ZnO–$NiFe_2O_4$ dalam menurunkan kadar surfaktan pada limbah cair *laundry*. Pengaruh variasi massa fotokatalis dan waktu kontak dikaji untuk memperoleh kondisi operasi yang paling efektif sehingga diharapkan dapat menjadi alternatif teknologi pengolahan limbah *laundry* yang efisien dan ramah lingkungan.

2. Metode Penelitian

Sintesis Nanopartikel ZnO

Sintesis nanopartikel ZnO dilakukan menggunakan metode kopresipitasi. Sebanyak 10 g seng asetat dihidrat dilarutkan dalam 50 mL aquadest, kemudian diaduk menggunakan magnetic stirrer pada kecepatan 300 rpm selama 1 jam pada suhu 25 °C hingga diperoleh larutan homogen. Secara terpisah, larutan NaOH disiapkan dengan melarutkan 4 g NaOH ke dalam 50 mL aquadest. Larutan NaOH kemudian ditambahkan secara bertahap ke dalam larutan seng asetat sambil terus diaduk hingga pH campuran mencapai 14. Selanjutnya, campuran diaduk kembali menggunakan magnetic stirrer pada kecepatan 300 rpm selama 2 jam hingga endapan. Campuran tersebut kemudian didiamkan (aging) selama 12 jam pada suhu ruang (25 °C) untuk menyempurnakan proses pembentukan partikel. Endapan yang terbentuk dipisahkan dan dicuci menggunakan aquadest hingga mencapai pH netral. Endapan selanjutnya dikeringkan dalam oven pada suhu 120 °C selama 2 jam, kemudian dihaluskan menggunakan mortar hingga diperoleh serbuk halus. Serbuk tersebut dikalsinasi menggunakan furnace pada suhu 500 °C selama 2 jam untuk menghasilkan nanopartikel ZnO kristalin Seng asetat dihidrat 10 gram dilarutkan dalam 50 mL aquadest sambil ditambahkan NaOH bertahap hingga pH 14 dengan kecepatan 300 rpm selama 1 jam pada suhu 25 0C Endapan yang terbentuk kemudian dicuci hingga pH netral hingga menghasilkan nanopartikel ZnO.

Sintesis Nanokomposit ZnO- $NiFe_2O_4$.

Sebanyak 2 g ZnO hasil sintesis dan 1 g PEG-4000 dicampurkan, kemudian dilarutkan dalam 50 mL aquadest dan diaduk menggunakan magnetic stirrer pada kecepatan 300 rpm pada suhu 80 °C selama 1 jam hingga diperoleh suspensi yang homogen. Selanjutnya, larutan prekursor logam disiapkan dengan melarutkan 0,6758 g $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ dan 0,2852 g $NiCl_2 \cdot 6H_2O$ ke dalam 50 mL aquadest, kemudian ditambahkan ke dalam suspensi ZnO secara perlahan sambil terus diaduk. Setelah itu, larutan NaOH 2 M ditambahkan bertahap hingga pH campuran mencapai 12, sehingga terbentuk endapan berwarna cokelat. Suspensi yang terbentuk kemudian disaring, dan endapan yang diperoleh dicuci menggunakan aquadest hingga pencucian terakhir mencapai pH netral. Endapan ZnO-$NiFe_2O_4$ selanjutnya dikeringkan menggunakan oven pada suhu 100 °C selama 6 jam. Padatan yang telah kering kemudian dihaluskan dan diayak menggunakan ayakan 200 mesh. Serbuk hasil pengayakan selanjutnya dikalsinasi menggunakan furnace pada suhu 500 °C selama 2 jam sehingga diperoleh nanokomposit ZnO-$NiFe_2O_4$. hingga diperoleh serbuk ZnO-$NiFe_2O_4$ yang ditunjukkan pada **Gambar 1**.



Gambar 1. ZnO- $NiFe_2O_4$. Sintesis

Karakteristik Hasil Sintesis

Serbuk ZnO- $NiFe_2O_4$ hasil sintesis dilakukan karakterisasi menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) yang bertujuan untuk mengetahui ukuran kristal yang terbentuk dan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) yang bertujuan untuk mengidentifikasi gugus fungsi dan ikatan kimia yang terdapat pada material komposit ZnO–$NiFe_2O_4$.

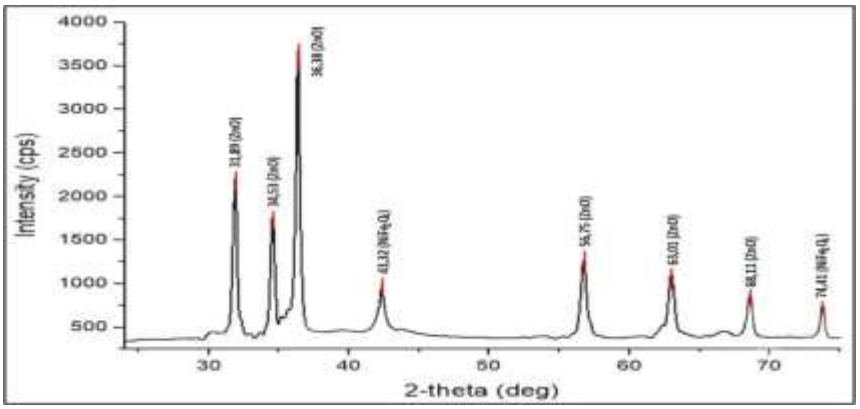
Uji Aktivitas Fotokatalis ZnO- $NiFe_2O_4$. pada Air Limbah *Laundry*

Sebanyak 750 mL sampel air limbah *laundry* yang mengandung surfaktan Linear Alkylbenzene Sulfonate (LAS) diambil, kemudian ditambahkan fotokatalis ZnO-$NiFe_2O_4$ dengan variasi massa 0,5 g; 0,75 g; 1 g; 1,25 g; dan 1,5 g. Campuran selanjutnya diaduk menggunakan magnetic stirrer dengan kecepatan 1200 rpm dan disinari menggunakan lampu UV 20 watt sebagai sumber cahaya fotokatalisis. Proses penurunan kadar surfaktan dilakukan dengan variasi waktu kontak selama 0, 60, 120, 180, dan 240 menit. Setelah Proses fotodegradasi, sampel disaring dan dilakukan pengukuran parameter kualitas air seperti pH dan COD. Sampel dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis untuk mengukur penurunan konsentrasi kadar surfaktan dan fosfat.

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil Karakterisasi Fotokatalis

Hasil analisis karakteristik fotokatalis ZnO- $NiFe_2O_4$ yang dilakukan dengan menggunakan XRD dan FTIR dapat dilihat pada **Gambar 2** di bawah ini.



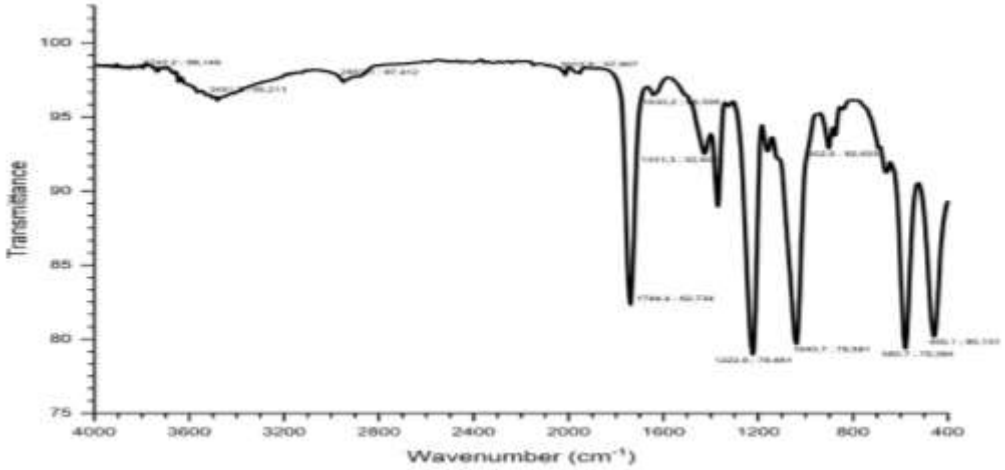
Gambar 2. Hasil Uji Karakteristik XRD

Hasil karakteristik XRD pada **Gambar 2** menunjukkan adanya peaks atau puncak-puncak difraksi dominan yang berasal dari komponen ZnO dan $NiFe_2O_4$. Puncak-puncak utama terlihat pada sudut 2θ (31,89°; 34,53°; 36,38°; 56,75°; 63,01°; dan 68,11°) berdasarkan standar ICDD PDF No. 36-1451, yang merupakan bentuk struktur heksagonal wurtzite [10]. Selain itu, terdapat puncak kecil lain pada sudut 2θ (43,32° dan 74,41°) yang terdeteksi sebagai ciri khas puncak $NiFe_2O_4$. struktur spinel kubik berdasarkan standar ICDD PDF No. 10-0325 [11]. Keberadaan kedua fasa tersebut menunjukkan bahwa proses sintesis komposit ZnO-$NiFe_2O_4$ telah berhasil menggabungkan ZnO dan $NiFe_2O_4$ tanpa menghasilkan fasa pengotor yang dominan, sehingga struktur kristal masing-masing material tetap terjaga dan berpotensi meningkatkan aktivitas fotokatalitik secara sinergis [12].

Ukuran kristal ZnO-$NiFe_2O_4$ hasil sintesis dihitung menggunakan persamaan *Debye-Scherrer* dan diperoleh ukuran kristal rata-rata sebesar 24,98 nm. Hasil tersebut sejalan dengan penelitian Hemaida dkk. yang melaporkan bahwa nanopartikel $NiFe_2O_4$ memiliki ukuran kristalit pada rentang 12,71–30,59 nm [13]. Dengan demikian, ukuran kristal yang diperoleh pada penelitian ini menunjukkan bahwa komposit ZnO-$NiFe_2O_4$ berhasil disintesis dalam skala nanokristal dengan tingkat kristalinitas yang baik.

Karakterisasi ZnO- $NiFe_2O_4$ Menggunakan FTIR

Analisa menggunakan FTIR ZnO- $NiFe_2O_4$. dilakukan untuk mengidentifikasi gugus fungsi dan ikatan kimia yang terdapat pada material komposit ZnO–$NiFe_2O_4$ yang dapat dilihat pada **Gambar 5** dibawah ini.

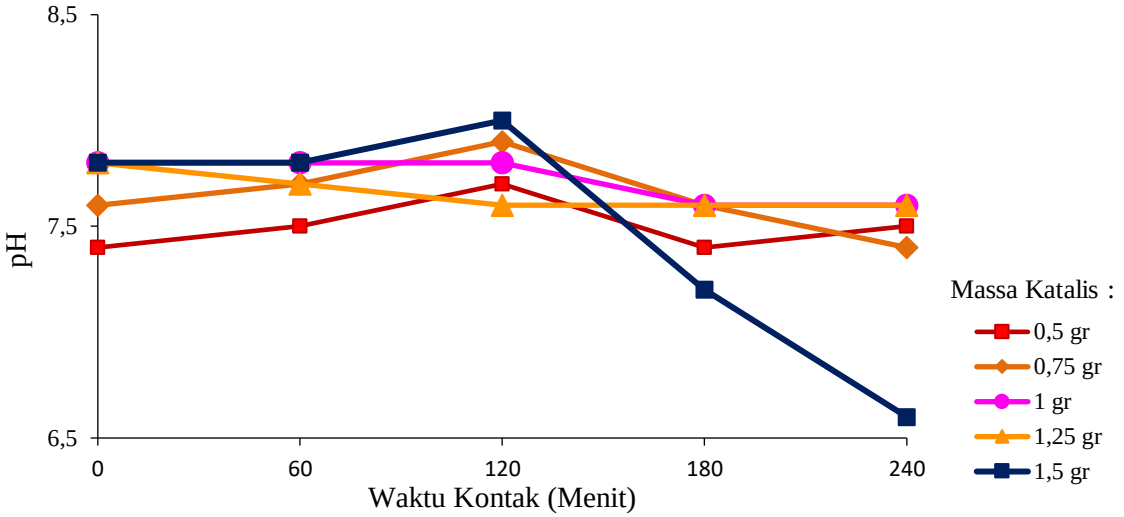


Gambar 3. Hasil Uji Karakterisasi FTIR ZnO- $NiFe_2O_4$

Gambar 3 menunjukkan spektrum hasil karakterisasi FTIR komposit ZnO-$NiFe_2O_4$. Spektrum FTIR memperlihatkan pita serapan pada bilangan gelombang sekitar 580 cm^{-1} yang merupakan vibrasi regangan ikatan Fe–O, sebagai karakteristik material $NiFe_2O_4$. Pita serapan tersebut sesuai dengan rentang vibrasi ikatan Fe–O pada material ferrite, yaitu 550–600 cm^{-1}, sehingga mengonfirmasi terbentuknya fase $NiFe_2O_4$ pada material komposit [14]. Selain itu, pita serapan pada bilangan gelombang sekitar 455 cm^{-1} menunjukkan vibrasi regangan ikatan Zn–O yang merupakan karakteristik fase ZnO. Vibrasi Zn–O umumnya terdeteksi pada rentang 400–500 cm^{-1}, sehingga mengindikasikan bahwa struktur ZnO tetap terjaga setelah proses pembentukan komposit [15]. Keberadaan pita serapan Fe–O dan Zn–O secara bersamaan mengonfirmasi keberhasilan sintesis komposit ZnO–$NiFe_2O_4$.

Pengaruh Massa Katalis dan Waktu Kontak terhadap pH pada Air Limbah *Laundry*

pH merupakan parameter penting dalam penilaian kualitas air limbah karena pH mencerminkan kondisi asam-basa. **Gambar 4** menunjukkan perubahan nilai pH selama proses fotokatalis dan memperlihatkan pengaruh variasi massa fotokatalis ZnO-$NiFe_2O_4$ (0,5; 0,75; 1; 1,25; dan 1,5 g) serta waktu kontak (0, 60, 120, 180, dan 240 menit) terhadap nilai pH air limbah *laundry*. Sebelum perlakuan, limbah memiliki pH sebesar 9, sedangkan setelah proses fotokatalisis nilai pH berada pada rentang 6,6–8,0, sehingga telah memenuhi baku mutu air limbah berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 5 Tahun 2014, yaitu pH 6–9 [16]. Massa katalis 1 g dan 1,25 g menunjukkan nilai pH yang relatif stabil selama proses fotokatalisis, sedangkan massa 1,5 g mengalami penurunan pH yang lebih besar hingga mencapai 6,6 pada menit ke-240. Hal ini menunjukkan bahwa variasi massa fotokatalis memengaruhi perubahan pH selama proses degradasi surfaktan.

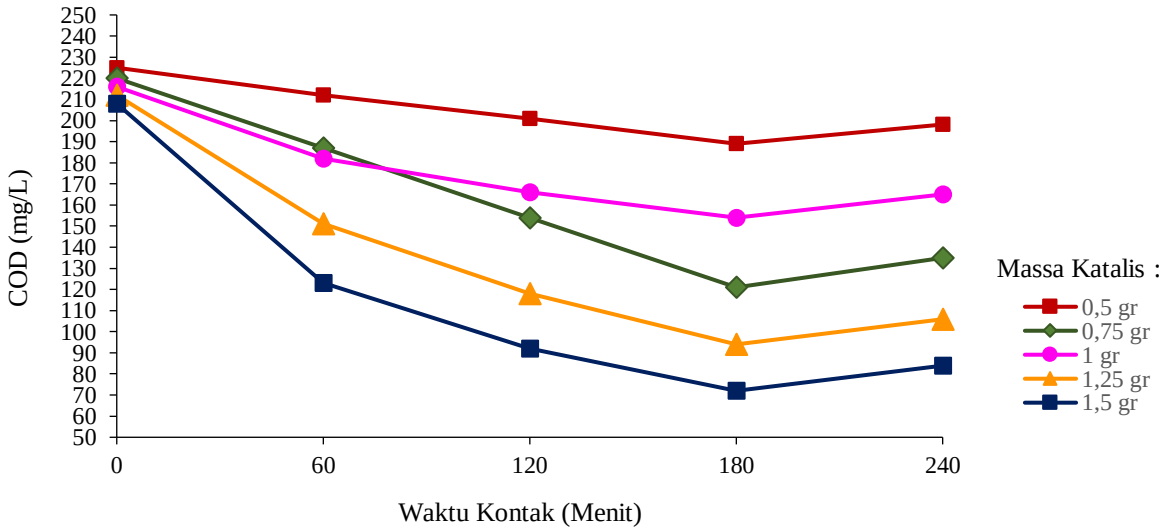


Gambar 4. Grafik Pengaruh Massa Katalis dan Waktu Kontak terhadap pH Air Limbah *Laundry*

Perubahan nilai pH mengindikasikan bahwa proses fotokatalitik berlangsung melalui pembentukan pasangan elektron–hole pada permukaan ZnO-$NiFe_2O_4$ setelah menyerap energi cahaya UV. Hole (h^+) bereaksi dengan molekul air atau ion OH^- membentuk radikal hidroksil (OH), sedangkan elektron (e^-) bereaksi dengan oksigen terlarut membentuk radikal superoksida (O_2^-). Kedua spesies reaktif tersebut mengoksidasi senyawa organik dan surfaktan menjadi produk yang lebih sederhana seperti CO_2, H_2O, serta senyawa antara berupa asam organik yang menyebabkan peningkatan konsentrasi ion H^+ sehingga pH larutan menurun [17]. Penurunan pH yang lebih besar pada massa katalis 1,5 g diduga disebabkan oleh pembentukan produk antara yang lebih banyak selama proses degradasi. Di sisi lain, penggunaan massa katalis yang terlalu tinggi dapat menyebabkan aglomerasi partikel sehingga mengurangi distribusi cahaya pada permukaan fotokatalis dan memengaruhi efisiensi proses fotokatalitik [18]. Meskipun demikian, keberadaan $NiFe_2O_4$ dalam komposit mampu menghambat rekombinasi pasangan elektron–hole sehingga pembentukan spesies reaktif tetap berlangsung dan mendukung degradasi polutan.

Pengaruh Massa Katalis dan Waktu Kontak terhadap Nilai COD Air Limbah *Laundry*

Chemical Oxygen Demand (COD) merupakan parameter penting dalam penilaian kualitas air limbah karena mencerminkan total kandungan senyawa organik. **Gambar 7** menunjukkan perubahan nilai COD selama proses fotokatalis sebagai berikut.



Gambar 5. Grafik Pengaruh Massa Katalis dan Waktu Kontak terhadap Nilai COD Air Limbah *Laundry*

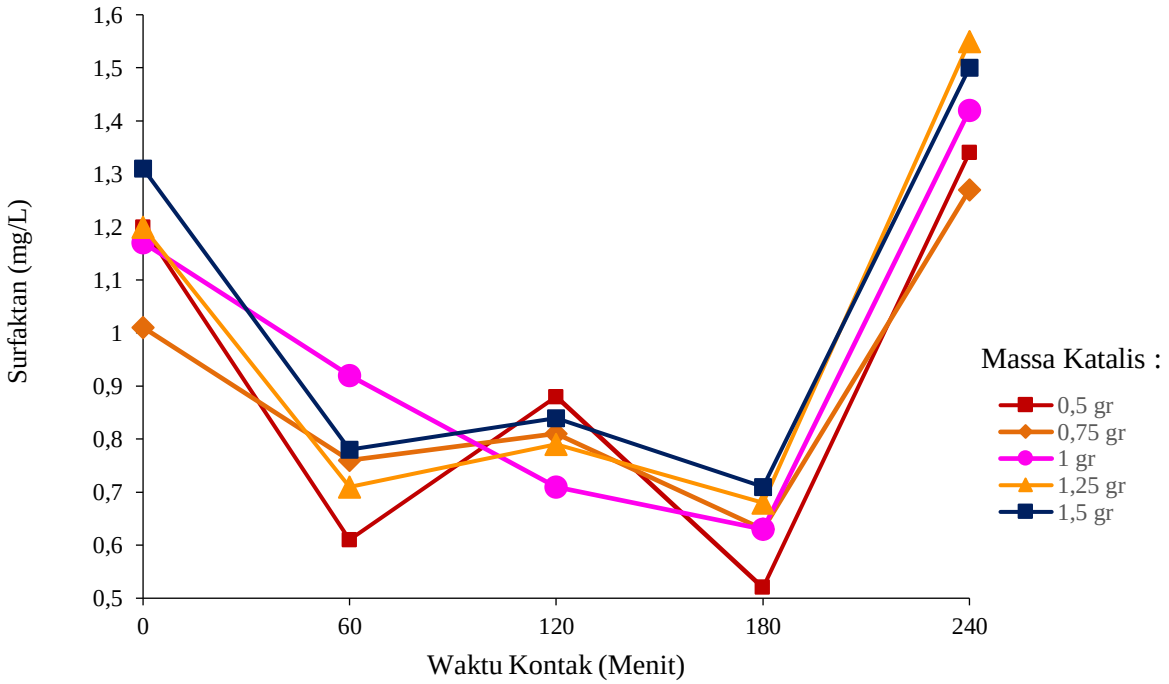
Gambar 5 memperlihatkan pengaruh variasi massa fotokatalis ZnO-$NiFe_2O_4$ (0,5; 0,75; 1; 1,25; dan 1,5 g) serta waktu kontak (0, 60, 120, 180, dan 240 menit) terhadap nilai *Chemical Oxygen Demand* (COD)

air limbah *laundry*. Sebelum perlakuan, limbah memiliki nilai COD sebesar 232 mg/L, sedangkan setelah penambahan fotokatalis nilai COD awal berada pada rentang 208–225 mg/L. Selama proses fotokatalisis, nilai COD mengalami penurunan pada seluruh variasi massa katalis hingga menit ke-180, kemudian sedikit meningkat pada menit ke-240. Penurunan COD terbesar diperoleh pada massa katalis 1,5 g dengan nilai COD akhir sebesar 72 mg/L pada menit ke-180 atau efisiensi penurunan sebesar 68,97%, sedangkan peningkatan kembali pada menit ke-240 menunjukkan berkurangnya efisiensi degradasi setelah waktu kontak optimum tercapai. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan massa katalis mampu meningkatkan efektivitas penurunan kandungan senyawa organik dalam limbah *laundry* [19].

Penurunan nilai COD menunjukkan bahwa proses fotokatalisis berlangsung melalui pembentukan pasangan elektron–hole pada permukaan ZnO-$NiFe_2O_4$ setelah menyerap energi cahaya UV. Hole (h^+) bereaksi dengan molekul air atau ion OH^- membentuk radikal hidroksil (OH), sedangkan elektron (e^-) bereaksi dengan oksigen terlarut membentuk radikal superoksida (O_2^-). Kedua spesies reaktif tersebut mengoksidasi senyawa organik dan surfaktan menjadi senyawa yang lebih sederhana hingga termineralisasi menjadi CO_2 dan H_2O, sehingga kebutuhan oksigen untuk mengoksidasi bahan organik menurun dan nilai COD menjadi lebih rendah [20]. Peningkatan penurunan COD seiring bertambahnya massa katalis disebabkan oleh semakin besarnya luas permukaan dan jumlah situs aktif yang tersedia untuk menghasilkan radikal oksidatif. Selain itu, keberadaan $NiFe_2O_4$ dalam komposit mampu meningkatkan pemisahan pasangan elektron–hole sehingga mengurangi rekombinasi dan meningkatkan efisiensi fotokatalitik [21]. Namun, peningkatan nilai COD pada menit ke-240 diduga disebabkan oleh terbentuknya senyawa antara (intermediate compounds) yang belum termineralisasi sempurna serta meningkatnya peluang rekombinasi elektron–hole akibat waktu kontak yang terlalu lama, sehingga efisiensi fotodegradasi menurun. Hasil ini menunjukkan bahwa kondisi optimum proses fotokatalisis diperoleh pada massa katalis 1,5 g dengan waktu kontak 180 menit, yang menghasilkan penurunan COD paling tinggi melalui degradasi senyawa organik secara efektif [22].

Pengaruh Massa Katalis dan Waktu Kontak terhadap Kadar Surfaktan Air Limbah *Laundry*

Nilai Efektivitas fotokatalis dalam menguraikan surfaktan tidak hanya bergantung pada jenis material yang digunakan, tetapi juga pada jumlah katalis dan lama waktu reaksi. Oleh karena itu, pada **Gambar 6** menunjukkan perubahan nilai surfaktan selama proses fotokatalis sebagai berikut.



Gambar 6. Grafik Pengaruh Massa Katalis dan Waktu Kontak terhadap Kadar Surfaktan Air Limbah *Laundry*

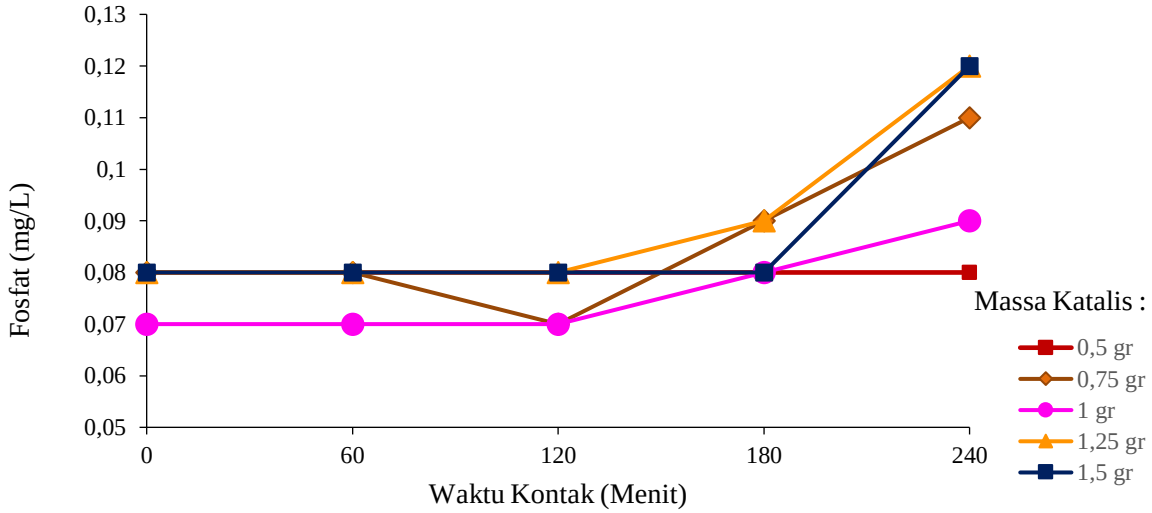
Gambar 6 memperlihatkan pengaruh variasi massa fotokatalis ZnO-$NiFe_2O_4$ (0,5; 0,75; 1; 1,25; dan 1,5 g) serta waktu kontak (0, 60, 120, 180, dan 240 menit) terhadap kadar surfaktan Linear Alkylbenzene Sulfonate (LAS) pada air limbah *laundry*. Sebelum perlakuan, limbah memiliki kadar surfaktan sebesar

10,95 mg/L, sedangkan setelah penambahan fotokatalis kadar surfaktan awal berada pada rentang 1,01–1,31 mg/L. Selama proses fotokatalisis, kadar surfaktan mengalami penurunan pada seluruh variasi massa katalis hingga menit ke-180, kemudian meningkat kembali pada menit ke-240. Kondisi optimum diperoleh pada massa katalis 0,5 g dengan waktu kontak 180 menit, yang menghasilkan kadar surfaktan sebesar 0,52 mg/L atau efisiensi penurunan sebesar 95,25%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa fotokatalis ZnO-$NiFe_2O_4$ memiliki kemampuan yang sangat baik dalam menurunkan kadar surfaktan pada limbah *laundry* melalui proses fotokatalisis [23].

Penurunan kadar surfaktan menunjukkan bahwa proses fotokatalisis berlangsung melalui pembentukan pasangan elektron–hole pada permukaan ZnO-$NiFe_2O_4$ setelah menyerap energi cahaya UV. Hole (h^+) bereaksi dengan molekul air atau ion OH^- membentuk radikal hidroksil (OH), sedangkan elektron (e^-) bereaksi dengan oksigen terlarut membentuk radikal superoksida (O_2^-). Kedua spesies reaktif tersebut mengoksidasi molekul Linear Alkylbenzene Sulfonate (LAS) dengan memutus rantai alkil dan cincin aromatik sehingga menghasilkan senyawa antara yang selanjutnya termineralisasi menjadi CO_2, H_2O, dan ion sulfat (SO_4^{2-}), sehingga konsentrasi surfaktan terus menurun. Massa katalis 0,5 g menghasilkan efisiensi degradasi tertinggi karena jumlah situs aktif dan penetrasi cahaya berada pada kondisi optimum. Sebaliknya, penambahan massa katalis yang terlalu besar dapat meningkatkan kekeruhan suspensi dan menyebabkan aglomerasi partikel sehingga mengurangi penetrasi cahaya ke permukaan fotokatalis dan menurunkan efisiensi degradasi surfaktan. Peningkatan kembali kadar surfaktan pada menit ke-240 diduga disebabkan oleh terbentuknya senyawa antara (intermediate products) yang belum termineralisasi sempurna atau akibat meningkatnya rekombinasi pasangan elektron–hole selama proses fotokatalisis, sehingga aktivitas degradasi mulai menurun. Hasil ini menunjukkan bahwa waktu kontak 180 menit merupakan kondisi optimum proses fotokatalisis ZnO-$NiFe_2O_4$ dalam menurunkan kadar surfaktan pada limbah *laundry* .

Pengaruh Pengaruh Massa Katalis dan Waktu Kontak terhadap Kadar Fosfat Air Limbah *Laundry*

Fosfat merupakan salah satu parameter penting dalam penilaian kualitas air limbah karena berperan sebagai nutrien yang dapat memicu pertumbuhan alga dan tumbuhan air secara berlebihan Oleh karena itu, pada **Gambar 7** menunjukkan perubahan nilai fosfat selama proses fotokatalis sebagai berikut.



Gambar 7. Grafik Pengaruh Massa Katalis dan Waktu Kontak terhadap Kadar Fosfat Air Limbah *Laundry*

Gambar 7 memperlihatkan pengaruh variasi massa fotokatalis ZnO-$NiFe_2O_4$ (0,5; 0,75; 1; 1,25; dan 1,5 g) serta waktu kontak (0, 60, 120, 180, dan 240 menit) terhadap kadar fosfat air limbah *laundry*. Sebelum perlakuan, limbah memiliki kadar fosfat sebesar 5,5 mg/L, sedangkan setelah penambahan fotokatalis kadar fosfat berada pada rentang 0,07–0,12 mg/L. Selama proses pengolahan, perubahan kadar fosfat relatif kecil dibandingkan parameter COD dan surfaktan, yang menunjukkan bahwa komposit ZnO-$NiFe_2O_4$ lebih efektif mendegradasi senyawa organik dibandingkan menghilangkan ion fosfat terlarut [24]. Kondisi optimum diperoleh pada massa katalis 0,75 g dan 1 g dengan waktu kontak 120 menit, yang menghasilkan kadar fosfat sebesar 0,07 mg/L atau efisiensi penurunan sebesar 98,73%. Setelah waktu

kontak melebihi 120 menit, kadar fosfat cenderung meningkat kembali sehingga menunjukkan berkurangnya efektivitas proses penghilangan fosfat.

Penurunan kadar fosfat diduga terjadi melalui kombinasi mekanisme adsorpsi dan fotokatalisis. Gugus hidroksil pada permukaan ZnO-$NiFe_2O_4$ berinteraksi dengan ion fosfat melalui mekanisme pertukaran ligan (ligand exchange) dan pembentukan kompleks pada situs aktif material. Selain itu, ion logam Zn^{2+}, Fe^{3+}, dan Ni^{2+} pada permukaan komposit dapat mengikat ion fosfat membentuk kompleks atau endapan yang stabil sehingga konsentrasi fosfat terlarut berkurang. Peningkatan kembali kadar fosfat setelah waktu kontak 120 menit diduga disebabkan oleh proses desorpsi atau tercapainya kesetimbangan adsorpsi, sehingga sebagian ion fosfat yang telah terikat kembali terlepas ke dalam larutan. Kejenuhan situs aktif pada permukaan fotokatalis juga dapat menurunkan kemampuan adsorpsi selama proses berlangsung. Hasil ini menunjukkan bahwa mekanisme utama penyisihan fosfat pada komposit ZnO-$NiFe_2O_4$ lebih didominasi oleh proses adsorpsi dibandingkan fotodegradasi, meskipun secara keseluruhan fotokatalis tetap mampu menurunkan kadar fosfat limbah *laundry* secara efektif .

4. Kesimpulan

Material fotokatalis ZnO-$NiFe_2O_4$ berhasil disintesis melalui metode kopresipitasi. Hasil karakterisasi menggunakan XRD menunjukkan ukuran kristal sebesar 24,98 nm, sedangkan analisis FTIR mengidentifikasi terbentuknya ikatan Zn–O/Ni–O pada bilangan gelombang 455 cm^{-1} dan Fe–O pada 580 cm^{-1}. Karakteristik tersebut mengonfirmasi keberhasilan pembentukan komposit ZnO-$NiFe_2O_4$ sebagai material fotokatalis.

Variasi massa katalis dan waktu kontak berpengaruh terhadap efektivitas fotokatalis ZnO-$NiFe_2O_4$ dalam menurunkan kadar pencemar limbah *laundry*. Kondisi optimum untuk setiap parameter diperoleh pada pH sebesar 7,2 dengan massa katalis 1,5 g dan waktu kontak 180 menit, penurunan surfaktan (LAS) sebesar 93,52% pada massa katalis 0,5 g dan waktu kontak 180 menit, penurunan fosfat sebesar 98,55% pada massa katalis 1 g dan waktu kontak 120 menit, serta penurunan COD sebesar 68,97% pada massa katalis 1,5 g dan waktu kontak 180 menit

5. Daftar Singkatan

ZnO	Zinc Oxide
UV	Ultraviolet
COD	Chemical Oxygen Demand
XRD	X-Ray Diffraction
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy
ICDD	International Centre for Diffraction Data
LAS	Linear Alkylbenzene Sulfonate

6. Referensi

[1] Nurcahyadi, G. (2023). ASLI gelar edukasi soal ekosistem laundry lewat Expo laundry Internasional 2023. MediaIndonesia.com.J. Arora, A. Ranjan, A. Chauhan, R. Biswas, V. D. Rajput, and S. Sushkova, “Surfactant pollution, an emerging threat to ecosystem: Approaches for effective bacterial degradation,” *Journal of Applied Microbiology*, vol. 133, pp. 1229–1244, 2022

[2] Apriyani, N. (2017). Penurunan kadar surfaktan dan sulfat dalam limbah laundry. Media Ilmiah Teknik Lingkungan, 2(1), 37–44. https://doi.org/10.33084/mitl.v2i1.132

[3] Nanda, M. F., Maulanah, S., Hidayah, T. N., Taufiqurrahman, A. M., & Radianto, D. O. (2024). Analisis pentingnya pengelolaan limbah terhadap kehidupan sosial bermasyarakat. *Venus: Jurnal Publikasi Rumpun Ilmu Teknik*, 2(2), 97–107.

[4] Deka, M. J. (2019). Photocatalytic degradation of organic pollutants using metal oxide semiconductor catalysts. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(5), 103142.

[5] Kumari, P., Singh, R., & Kumar, A. (2019). Photocatalytic degradation of organic pollutants using ZnO based nanomaterials. *Materials Science for Energy Technologies*, 2(3), 573–578.

[6] Huszla, S., Lisowski, W., & Kaczmarek, H. (2021). UV-light photocatalytic degradation of non-ionic surfactants using ZnO nanoparticles. *International Journal of Environmental Science and Technology*. https://link.springer.com/article/10.1007/s13762-021-03160-1

[7] Zainul, R., Effendi, J., & Mashuri, M. (2019). Phototransformation of Linear Alkylbenzene Sulphonate (LAS) Surfactant Using ZnO-CuO Composite Photocatalyst. *KnE Engineering*, 235-247.

[8] Moradi, M., Ghanbari, F., & Rahimi, S. (2025). Synthesis and photocatalytic activity of

ZnO/$NiFe_2O_4$ nanocomposite for degradation of organic pollutants. Journal of Environmental Chemical Engineering, 13(1), 109876.

[9] Mawarni, T., Fadarina, H. C., Aznury, M., & Taufik, M. (2021). Degradasi zat warna Rhodamin B menggunakan sintesis fotokatalis ZnO/$NiFe_2O_4$ dan diaplikasikan pada limbah cair industri pulp dan kertas. *Jurnal Kinetika*, 12(03), 44–50.

[10] Rhamdiyah, S., & Maharani, D. (2022). Sintesis dan karakterisasi ZnO menggunakan metode presipitasi. Jurnal Kimia dan Pendidikan Kimia.

[11] Narasimhan, A., Manikandan, A., & Kennedy, L. J. (2019). Structural, magnetic and photocatalytic properties of spinel $NiFe_2O_4$ nanoparticles. Journal of Magnetism and Magnetic Materials.

[12] Mote, V. D., et al. (2022). Synthesis and characterization of ZnO-$NiFe_2O_4$ nanocomposites for photocatalytic applications. Ceramics International.

[13] Hemaida TA, Azab A, Sebak MA. Glycerol-assisted sol-gel synthesis, optical, and magnetic properties of $NiFe_2O_4$ nanoparticles. Journal of Molecular Structure. 2019;1181:14–18. doi:10.1016/j.molstruc.2018.12.075.

[14] Agboola, P. O., Haider, S., & Shakir, I. (2022). The impact of rare earth Nd^{3+} cations on structural, spectral, magnetic and dielectric parameters of $NiFe_2O_4$ nanoparticles. Journal of Taibah University for Science, 16(1), 392–400. https://doi.org/10.1080/16583655.2022.2059953

[15] Sarkar, M., Das, S., Saha, T., Chakraborty, S., Chattopadhyay, K. K., & Chattopadhyay, S. (2021). Synthesis and comparative study on the structural and optical properties of ZnO doped with Ni and Ag nanopowders fabricated by sol–gel technique. Scientific Reports, 11, 12920. https://doi.org/10.1038/s41598-021-91439-1

[16] Kementerian Lingkungan Hidup Republik Indonesia. Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah. Jakarta: Kementerian Lingkungan Hidup Republik Indonesia; 2014.

[17] Fatimah, H. (2020). Aktivitas degradasi zat warna indigosol biru menggunakan fotokatalis TiO_2/zeolit alam. *Kaos GL Dergisi*, 8(75), 147–154. Fujishima, A., Zhang, X., & Tryk, D. A. (2008). TiO_2 photocatalysis and related surface phenomena. *Surface Science Reports*, 63(12), 515–582. https://doi.org/10.1016/j.surfrep.2008.10.001Goldman, A. (2006). *Modern ferrite technology* (2nd ed.). Springer Science & Business Media.

[18] Suryandari, E., dkk. (2019). Pengaruh massa katalis terhadap aktivitas fotokatalitik komposit semikonduktor. Jurnal Kimia dan Kemasan, 41(2), 89–96.

[19] Aguilar-Torrejón, J. A., Balderas-Hernández, P., Roa-Morales, G., Barrera-Díaz, C. E., Rodríguez-Torres, I., & Torres-Blancas, T. (2023). Relationship, importance, and development of analytical techniques: COD, BOD, and TOC in water—An overview through time. Discover Applied Sciences, 5, 118.

[20] Abou Zeid, S., & Leprince-Wang, Y. (2024). Advancements in ZnO-Based Photocatalysts for Water Treatment: A Comprehensive Review. Crystals, 14(7), 611.

[21] Derakhshani, R., & Naghizadeh, A. (2023). Magnetic $NiFe_2O_4$ nanoparticles as efficient catalysts for environmental remediation and wastewater treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(2), 109234.

[22] Kohantorabi, M., et al. (2021). Photocatalytic Activation of Peroxymonosulfate by Novel Mesoporous Ag/ZnO-$NiFe_2O_4$ Nanorods. Chemosphere, 278, 130381.

[23] Ariyani, F., Sari, D. P., & Nugroho, A. (2022). Pengaruh kandungan surfaktan terhadap kualitas air limbah domestik dan laundry. Jurnal Rekayasa Lingkungan, 15(2), 87–95.

[24] Prasasti, A. R., Widiyanto, A. F., & Nugraheni, I. L. (2022). Pengaruh kandungan fosfat pada limbah domestik terhadap kualitas perairan dan potensi eutrofikasi. Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia, 21(2), 134–141.