

Ekstraksi ZnO Limbah Baterai Zn-C sebagai Katalis ZnO-Zeolit untuk Degradasi Air Limbah *Laundry* Berdasarkan Massa dan Waktu Kontak

Yuniar*, Yulianto Wasiran, Rizki Brilian Y, Erika Dwi O, Asri Safira, Sherly Fitria N

Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Sriwijaya, Palembang

*Koresponden email: yuniar@polsri.ac.id

Diterima: 20 Desember 2025

Disetujui: 3 Januari 2026

Abstract

By utilizing waste from Zn-C batteries, it is possible to produce ZnO semiconductor compounds from waste water laundry, which fall under the category of photocatalysts that can decompose harmful organic and inorganic compounds from waste laundry. The research method employed is coprecipitation, which involves synthesizing ZnO through a solution precipitation process, followed by mixing it with zeolite and testing the photocatalyst's activity with varying contact times of 30, 60, 90, and 120 minutes, as well as different weights of ZnO-Zeolite photocatalysts at 0.5, 0.75, and 1 gram. The characterization results of ZnO-Zeolite indicated a crystal size of 23.94 nm and a band gap energy of 2.98 eV. To evaluate the effectiveness of the ZnO-Zeolite photocatalyst, parameters such as pH, Chemical Oxygen Demand (COD), and the degradation of surfactant compounds in laundry waste were analyzed using UV-Vis Spectrophotometry. The findings revealed a decrease in pH from level of 9.18 to 7.25, and a reduction in COD from 269 mg/L to 64 mg/L, representing a percentage decrease of 76.21%. Additionally, the degradation of surfactant levels dropped from 2.817 mg/L to 0.035 mg/L, achieving a degradation percentage of 98.76% with a catalyst mass of 0.75 g and a contact time of 90 minutes.

Keywords: battery waste, laundry waste, zeolite, photocatalyst, degradation

Abstrak

Industri *laundry* di Indonesia memiliki peranan penting dalam perekonomian, namun berdampak terhadap pencemaran lingkungan. Dengan memanfaatkan limbah dari baterai Zn-C, dapat memperoleh senyawa semikonduktor ZnO yang termasuk dalam kategori fotokatalis untuk menguraikan senyawa organik dan anorganik yang berbahaya bagi lingkungan. Metode penelitian yang digunakan adalah kopresipitasi yang mencakup sintesis ZnO melalui proses pengendapan larutan, diikuti dengan pencampuran zeolit dan pengujian aktivitas fotokatalis dengan variasi waktu kontak selama 30, 60, 90, dan 120 menit serta variasi berat fotokatalis ZnO-Zeolit sebanyak 0,5; 0,75; dan 1 gram. Hasil karakteristik ZnO-Zeolit menunjukkan ukuran kristal sebesar 23,94 nm dengan energi celah pita 2,98 eV. Dalam mengevaluasi pengaruh fotokatalis ZnO-Zeolit dilakukan analisis pH, *Chemical Oxygen Demand* (COD), serta degradasi senyawa surfaktan yang terkandung dalam limbah *laundry* dengan analisis Spektrofotometri Uv-Vis. Hasil penelitian ini menunjukkan terjadi penurunan pH dari limbah awal sebesar 9,18 menjadi 7,25, penurunan nilai COD dari 269 mg/L menjadi 64 mg/L dengan persentase penurunan sebesar 76,21% dan hasil degradasi kadar surfaktan dari 2,817 mg/L menjadi 0,035 mg/L dengan persentase degradasi sebesar 98,76% pada variasi massa katalis 0,75 gr dan waktu kontak 90 menit.

Kata Kunci : limbah baterai, limbah laundry, zeolit, fotokatalis, degradasi

1. Pendahuluan

Indonesia merupakan salah satu negara penyumbang limbah terbesar dengan tingkat produksi yang tinggi (Hendar dkk., 2022). Setiap kegiatan produksi yang dilakukan, baik besar maupun kecil, pasti akan menghasilkan limbah yang berpotensi dalam pencemaran lingkungan. Salah satu jenis limbah yang banyak dihasilkan berupa limbah cair, yang sering kali mengandung zat-zat berbahaya yang dapat merusak ekosistem dan membahayakan kesehatan manusia sehingga menjadi salah satu isu permasalahan pencemaran lingkungan mendesak yang perlu segera ditangani (Haifa dkk., 2024).

Salah satu kegiatan produksi yang dapat dijadikan sebagai sumber limbah cair domestik adalah limbah *laundry*. Berdasarkan informasi dari Asosiasi Laundry Indonesia (ASLI), sektor perkembangan

usaha *laundry* di Indonesia berkembang pesat dan diakui di tingkat internasional. Bahkan dalam periode 2021-2022, jumlah usaha *laundry* di Indonesia mengalami peningkatan hingga 50% (Nurchayadi, 2023). Perkembangan ini memicu meningkatnya kebutuhan masyarakat terhadap layanan *laundry* untuk dijadikan solusi praktis dalam menjaga kebersihan dan kesehatan pakaian mereka. Namun, tidak selalu berdampak positif, usaha *laundry* juga membawa dampak negatif bagi lingkungan, terutama jika proses pembuangan air limbah *laundry* dibuang secara sembarangan tanpa melalui proses pengolahan yang memadai (Nanda dkk., 2024).

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa air limbah dari kegiatan *laundry* mengandung berbagai bahan kimia, seperti surfaktan, fosfat, zat pemutih, dan pewangi sintetis. Zat-zat ini dapat memicu terjadinya eutrofikasi, menurunkan kualitas air, serta berpotensi menjadi media penyebaran patogen berbahaya. Jika terkontaminasi dan masuk ke tubuh manusia, air tersebut dapat menimbulkan masalah kesehatan, seperti diare (Apriyani, 2017). Oleh karena itu, diperlukan pengelolaan limbah yang tepat dengan pengembangan teknologi yang efisien untuk mengurangi dampak buruk terhadap lingkungan dan kesehatan masyarakat. Salah satu solusi teknologi inovatif dalam pengolahan limbah adalah penggunaan fotokatalis yang memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan metode pengolahan limbah konvensional berupa dapat mendegradasi polutan dalam efisiensi tinggi dan memiliki potensi aplikasi yang luas dalam berbagai jenis limbah cair industri dan domestik (Canciani dkk., 2024).

Fotokatalis merupakan material berdasar semikonduktor yang memiliki sifat konduktivitas listrik berada di antara konduktor dan isolator. Material ini mampu menghantarkan listrik ketika dipanaskan atau diberi arus listrik. Proses yang terjadi disebut fotodegradasi, yaitu penguraian suatu bahan dengan memanfaatkan energi foton dari sinar. Beberapa bahan fotokatalis yang umum digunakan adalah titanium dioksida (TiO_2) dan seng oksida (ZnO). Berdasarkan penelitian terbaru telah mengungkapkan bahwa nanopartikel ZnO memiliki keunggulan sebagai fotokatalis dibandingkan TiO_2 karena menyerap lebih banyak spektrum cahaya dan foton (Mawarni dkk., 2021).

Inovasi dalam teknologi fotokatalis menggunakan ZnO tidak hanya memberikan solusi bagi masalah pencemaran limbah *laundry* tetapi juga mendukung upaya pengelolaan limbah baterai secara efisien (Sherly dkk., 2025). Fotokatalis ZnO mampu menguraikan senyawa organik berbahaya, di mana paparan cahaya memicu pembentukan radikal hidroksil (OH) yang berfungsi untuk mengoksidasi polutan menjadi molekul yang lebih sederhana dan tidak berbahaya (Haryo Putro, 2019). Senyawa ZnO dapat menguraikan berbagai senyawa organik dalam limbah *laundry*. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa penggunaan ZnO dapat secara signifikan menurunkan kadar *Chemical Oxygen Demand* (COD) yang menandakan kemampuannya dalam mengurangi polutan organik (Anwar dkk., 2024).

Bahan baku utama dari ZnO dapat diperoleh dari limbah baterai Zn-C , yang sering kali dibuang tanpa pengolahan yang tepat. Limbah baterai ini mengandung zinc (Zn) yang dapat dimanfaatkan kembali untuk menghasilkan fotokatalis yang efektif dalam pemurnian air limbah (Diyanthi dkk., 2023). Dengan demikian, pengembangan metode pengolahan limbah yang mengintegrasikan penggunaan fotokatalis ZnO dari limbah *laundry* dan baterai Zn-C menjadi langkah strategis dalam mencapai tujuan keberlanjutan lingkungan dan kesehatan masyarakat.

Karakteristik dari senyawa ZnO memiliki energi celah pita yang cukup lebar sekitar 3,37 eV dan energi pengikat eksiton yang tinggi, yaitu 60 meV (Nursalam dkk., 2023). Anggita & Sutanto (2018) menyatakan dengan penambahan modifikasi pada material ZnO dapat membantu kinerja fotokatalis agar lebih efektif dalam pengolahan limbah dan pemurnian air melalui peningkatan sifat optik, pengurangan laju rekombinasi electron-hole, serta penurunan energi celah pita. Modifikasi dengan logam dapat menghasilkan limbah logam berat. Oleh karena itu, modifikasi dengan non-logam diperlukan sebagai alternatif yang lebih aman seperti zeolit (Wardhani dkk., 2016).

Zeolit secara umum terdiri dari dua jenis, yaitu zeolit alami dan zeolit sintesis yang sering digunakan sebagai pendukung karena merupakan alumina silika dengan pori-pori dan luas permukaan yang besar. Material ini mampu menyerap zat organik maupun anorganik serta berfungsi sebagai penukar kation (Fikriandini & Khair, 2023). Tetapi, zeolit alami terkadang masih mengandung impurities yang dapat menghambat proses adsorpsi (Ramadhini, 2024). Oleh karena itu, penelitian ini akan menggunakan zeolit sintesis karena ukurannya lebih seragam, distribusinya lebih merata, dan tidak mengandung pengotor. Hal ini memungkinkan proses adsorpsi berlangsung secara lebih optimal.

Berdasarkan uraian diatas, penelitian ini bertujuan untuk membuat inovasi material fotokatalis dari limbah baterai Zn-C sebagai pengganti bahan baku senyawa ZnO dengan penambahan zeolit sintesis dalam aplikasi pengolahan air limbah *laundry*.

2. Metode Penelitian

Sintesis ZnO dari Limbah Baterai

Limbah baterai dipreparasi untuk mengambil lempeng seng (Zn) di dalam lapisan kedua baterai. Lempeng seng dibersihkan dari kotoran menggunakan air de-ionisasi dan direndam menggunakan HCl 1 M dalam 250 ml selama 10-15 menit. Lempeng Zn dipotong menjadi potongan kecil sebanyak 36 gr dan dilarutkan dengan HCl pekat 37% sebanyak 250 ml, dapat dilihat pada **Gambar 1**.

Larutan diaduk pada kecepatan 700 rpm dengan pemanasan pada suhu 80°C selama 2 jam hingga membentuk larutan Seng Klorida (ZnCl₂). Larutan ZnCl₂ disaring menggunakan kertas saring agar larutan ZnCl₂ terpisah dari partikel Mn yang masih terikut yang berasal dari limbah baterai. Kemudian larutan diendapkan menggunakan larutan NaOH 6 M mencapai pH maksimal 10 dan perlahan diaduk hingga membentuk endapan/filtrat berwarna putih. Filtrat terbentuk, kemudian disaring dan dicuci dengan air deionisasi hingga pH mencapai 7. Filtrat dikeringkan dengan pemanasan pada suhu 110°C selama 3 jam. Kemudian dilakukan proses kalsinasi pada suhu 400°C selama 3 jam.



Gambar 1. (a) Limbah Baterai; (b) Lempeng Zn; (c) Potongan Lempeng Zn

Sintesis ZnO-Zeolit dari Limbah Baterai

Timbang ZnO hasil sintesis dan Zeolit dalam jumlah yang sama sebanyak 28,99 gr menggunakan neraca analitik. Siapkan larutan asam klorida (HCl) 0,5 M sebanyak 350 ml. Masukkan ZnO ke dalam larutan HCl dan dilakukan pengadukan selama 15 menit agar permukaan aktif. Tambahkan zeolit sedikit demi sedikit sambil diaduk hingga homogen. (Pastikan pH tidak terlalu rendah (< 4) karena dapat merusak struktur kristal zeolit). Tambahkan NaOH 2 M dalam 250 ml sedikit demi sedikit hingga pH mencapai maksimal 10 untuk netralisasi. Larutan dilakukan proses pengendapan selama 24 jam untuk distribusi ZnO yang merata pada Zeolit. Filtrat terbentuk, kemudian disaring dan dicuci dengan air de-ionisasi hingga pH mencapai 7. Filtrat dikeringkan dengan pemanasan pada suhu 110°C selama 3 jam. Kemudian dilakukan proses kalsinasi pada suhu 400°C selama 3 jam. Hasil kalsinasi dikarakterisasi dengan XRD dan UV-DRS

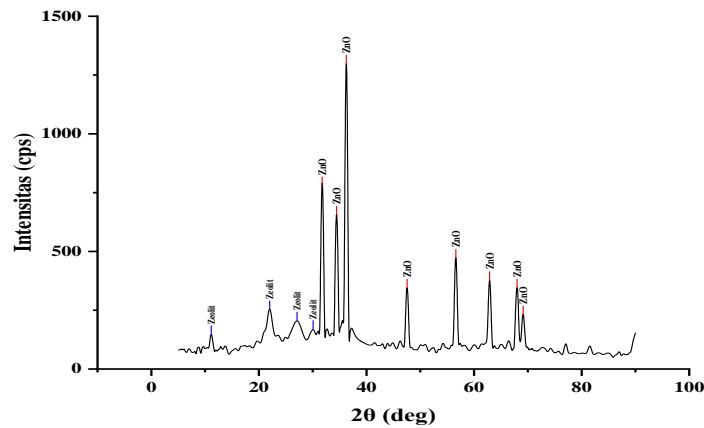
Pengujian Efisiensi Fotokatalitik

Air limbah *laundry* sebanyak 250 ml dimasukkan ke dalam masing-masing gelas kimia sebanyak 4 buah. Fotokatalis ZnO-Zeolit ditambahkan ke dalam 250 mL sampel air limbah dengan variasi massa (0,5 gr ; 0,75 gr ; 1 gr). Sampel disinari menggunakan lampu UV 15 watt dengan variasi waktu (30, 60, 90, 120 menit) sambil diaduk menggunakan magnetic stirrer dengan kecepatan 600 rpm, gambar 2. 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.

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil Karakterisasi Fotokatalis

Dilakukan studi karakteristik menggunakan XRD untuk mengenali struktur kristal dan ukuran partikel dari material yang disintesis ZnO-Zeolit, yang dapat dilihat pada **Gambar 2**.

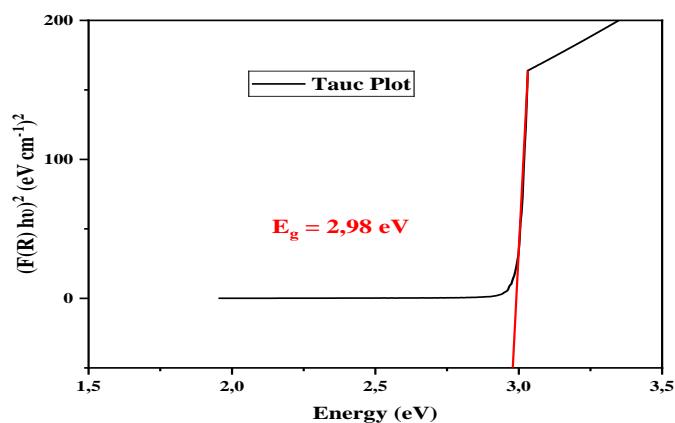


Gambar 2. Hasil Uji XRD

Hasil analisis XRD pada **Gambar 2** menunjukkan adanya puncak difraksi utama yang berasal dari ZnO dan zeolit. Puncak-puncak utama tampak pada sudut 2θ ($31,8^\circ$; $34,4^\circ$; $36,3^\circ$; $47,5^\circ$; $56,6^\circ$; $62,9^\circ$) berdasarkan JCPDS No. 36-1451, yang menunjukkan struktur heksagonal wurtzite. Selain itu, ada juga puncak kecil yang terdeteksi pada sudut 2θ ($11,14^\circ$; 22° ; $27,08^\circ$; $30,08^\circ$) sebagai ciri khas dari zeolit dengan struktur faujasit (FAU) berdasarkan data JCPDS No. 39-1380. Ukuran kristal dari ZnO yang disintesis dihitung menggunakan rumus Debye-Scherrer yang menghasilkan nilai rata-rata 16,19 nm. Sementara itu, penelitian yang dilakukan oleh Diyanthi menemukan ukuran kristal ZnO rata-rata 17,05 nm [9]. Ini menunjukkan bahwa penambahan zeolit sebagai matriks pendukung dapat menghambat pertumbuhan kristal ZnO, sehingga menghasilkan ukuran yang lebih kecil dibandingkan dengan ZnO murni yang umumnya memiliki ukuran kristal lebih dari 20 nm [13].

Untuk menentukan nilai energi celah pita dari bahan semikonduktor seperti ZnO-Zeolit, dilakukan penelitian dengan menggunakan Teknik Spektroskopi Reflektan Difus (DRS) UV-Vis. Nilai celah energi memiliki peranan krusial dalam menentukan seberapa efektif suatu material dapat menangkap energi cahaya serta menghasilkan pasangan elektron dan kekosongan untuk mendukung proses fotokatalis.

Menurut analisis yang dilakukan menggunakan DRS UV-Vis seperti yang terlihat pada **Gambar 3**, nilai energi celah pita (band gap) untuk material yang dihasilkan dari sintesis ZnO-Zeolit adalah 2,98 eV. Penurunan band gap ini dibandingkan dengan ZnO murni yang biasanya memiliki band gap sekitar 3,2 eV (Aprilia dkk. , 2020).



Gambar 3. Hasil Uji DRS Uv-Vis

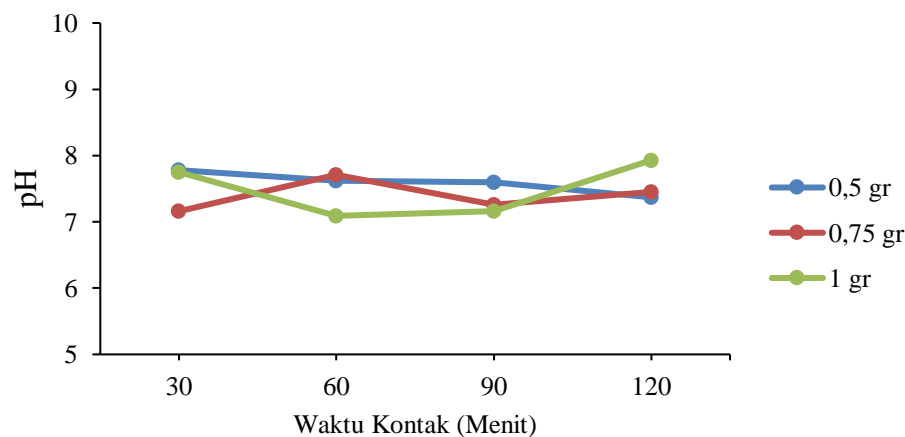
Penurunan nilai celah energi ini menunjukkan bahwa kombinasi ZnO dengan zeolit berhasil mengubah karakteristik optiknya. Zeolit, yang merupakan bahan berpori dengan permukaan yang luas, dapat memengaruhi keadaan elektronik ZnO dan meningkatkan kemampuan penyerapan cahaya pada

spektrum terlihat. Oleh karena itu, material komposit ZnO-Zeolit memiliki peluang yang lebih besar untuk digunakan dalam aplikasi fotokatalitik. Dengan celah energi yang lebih kecil, material ini menjadi lebih efektif dalam menyerap energi cahaya dan mendukung eksitasi elektron, yang sangat diperlukan untuk meningkatkan performa fotokatalis. Namun, penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh (Fikriandini dan Khair, 2023b) menunjukkan penurunan energi celah pita dari ZnO-Zeolit hingga mencapai 2,13 eV. Hal ini disebabkan oleh dominasi zeolit yang lebih besar dibandingkan ZnO, sehingga mampu meningkatkan kemampuan fotokatalis dalam menangkap lebih banyak foton akibatnya lebih banyak elektron dan lubang yang terbentuk selama proses fotodegradasi.

Pengaruh Massa Katalis dan Waktu Kontak terhadap pH Air Limbah

Metode fotokatalis semakin banyak dimanfaatkan dalam pengolahan air limbah karena kemampuannya yang tinggi dalam mereduksi senyawa organik kompleks dengan bantuan cahaya. Selama reaksi berlangsung, tidak hanya terjadi degradasi polutan seperti COD dan surfaktan, tetapi juga perubahan pada parameter penting air seperti pH. Karena pH mencerminkan kondisi asam-basa dan berhubungan dengan kualitas air, maka pemantauan terhadap perubahan pH selama proses fotokatalis diperlukan sebagai bagian dari evaluasi keberhasilan proses pengolahan tersebut. Adapun pengaruh massa katalis dan waktu kontak terhadap pH yang dapat dilihat pada **Gambar 4**.

Analisis menggunakan DRS UV-Vis ZnO-Zeolit dilakukan untuk mengukur energi celah pita pada material fotokatalis yang dapat dilihat pada **Gambar 5**. Gambar ini menunjukkan grafik hasil karakterisasi DRS UV-Vis ZnO-Zeolit. Dalam penelitian ini, diperoleh nilai bandgap sebesar 2,98 eV, yang lebih rendah dibandingkan dengan nilai bandgap ZnO murni yang biasanya sekitar 3,20 eV [14]. Penurunan ini menunjukkan bahwa fotokatalis ZnO-Zeolit mampu menyerap cahaya dengan panjang gelombang yang lebih panjang (energi lebih rendah), sehingga menjadi lebih sensitif terhadap cahaya tampak. Pengurangan nilai bandgap pada material semikonduktor seperti ZnO-Zeolit memberikan pengaruh yang signifikan terhadap efisiensi fotokatalitiknya. Semakin kecil nilai bandgap, semakin rendah energi cahaya yang diperlukan untuk mengexcite elektron dari pita valensi ke pita konduksi. Ini memungkinkan material untuk menyerap foton dari spektrum cahaya tampak, sehingga memperluas jangkauan kerja fotokatalis tidak hanya di sinar ultraviolet, tetapi juga di cahaya matahari secara langsung.



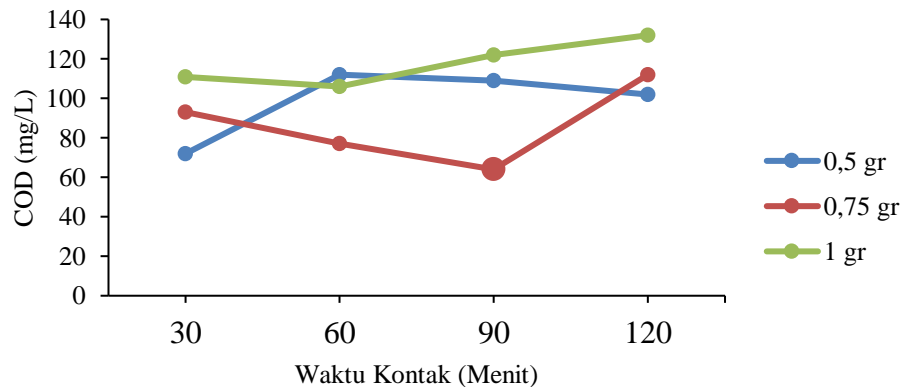
Gambar 4. Pengaruh Massa Katalis dan Waktu Kontak terhadap pH Air Limbah

Gambar 4 menunjukkan pengaruh variasi massa fotokatalis ZnO-Zeolit (0,5 gr; 0,75 gr; dan 1 gr) serta waktu kontak (30, 60, 90, dan 120 menit) terhadap nilai pH air limbah laundry yang awalnya berada pada pH 9,18. Secara umum, nilai pH cenderung mendekati pH netral (sekitar 7). Hal ini menandakan bahwa fotokatalis ZnO-Zeolit memiliki kemampuan menurunkan sifat basa dari air limbah laundry. Pada massa katalis 0,5 gr, pH menurun secara bertahap dari 7,8 ke sekitar 7,35 dalam waktu 30 hingga 120 menit, menunjukkan kestabilan yang relatif baik. Namun, pada massa 0,75 gr, terjadi ketidakstabilan pH dari 7,15 menjadi 7,65 pada menit ke-60, kemudian turun kembali ke 7,25 di menit ke-90, dan naik sedikit di menit ke-120. Hal serupa juga terlihat pada massa 1 gr, dengan penurunan dari 7,75 ke 7,05 di menit ke-60, namun kembali naik menjadi 7,85 pada menit ke-120. Ketidakstabilan ini disebabkan oleh adanya aglomerasi katalis yang mengurangi efisiensi proses (Suryandari dkk., 2019). Namun, pengukuran pH saja belum

cukup untuk melihat efektivitas proses fotokatalitik. Oleh karena itu, perlu adanya pengukuran parameter lain seperti COD dan kadar surfaktan untuk menilai efektivitas fotokatalis.

Pengaruh Massa Katalis dan Waktu Kontak terhadap Nilai COD

Chemical Oxygen Demand (COD) merupakan parameter penting dalam penilaian kualitas air limbah karena mencerminkan total kandungan senyawa organik. Nilai COD sering dijadikan tolak ukur untuk mengetahui seberapa tercemarnya air, terutama jika mengandung zat organik yang sulit diurai secara alami. Dalam hal ini, proses fotokatalis menjadi salah satu cara yang efektif untuk menurunkan nilai COD karena mampu memicu reaksi oksidasi yang kuat dengan bantuan cahaya, seperti sinar UV. Oleh karena itu, pada **Gambar 5** menunjukkan perubahan nilai COD selama proses fotokatalis dilakukan untuk melihat sejauh mana senyawa pencemar berhasil diuraikan.



Gambar 5. Pengaruh Massa Katalis dan Waktu Kontak terhadap Nilai COD

Gambar 5 menunjukkan pengaruh variasi massa fotokatalis ZnO-Zeolit (0,5 gr, 0,75 gr, dan 1 gr) serta waktu kontak (30, 60, 90, dan 120 menit) terhadap nilai Chemical Oxygen Demand (COD) air limbah *laundry*. Semakin rendah nilai COD, maka semakin baik kualitas air dan semakin tinggi efektivitas proses fotokatalitik dalam menguraikan senyawa pencemar (Anwar & Fitra, 2024). Berdasarkan **Gambar 5**, massa katalis 0,5 gr terjadi peningkatan terhadap nilai COD dari 72 pada menit ke-30 ke 112 pada menit ke-60, lalu sedikit menurun ke 109–102 pada menit ke-90 dan 120. Hal ini menunjukkan bahwa pada awal proses, terjadi pelepasan senyawa organik dari permukaan katalis atau belum optimalnya reaksi degradasi, sehingga kandungan COD meningkat sementara. Pada massa 0,75 gr, COD justru menunjukkan penurunan yang signifikan dari 93 ke 64 pada menit ke-90, lalu meningkat kembali ke 112 pada 120 menit. Sementara itu, pada massa 1 gr, nilai COD mengalami fluktuasi, yaitu turun di menit ke-60, meningkat ke puncak pada 90 menit sebesar 122 dan 132 pada 120 menit.

Menurut (Zilfa dkk., 2021) kenaikan ini dapat terjadi karena kelebihan massa katalis menyebabkan aglomerasi partikel ZnO-Zeolit, sehingga menurunkan ketersediaan permukaan aktif dan efisiensi fotodegradasi. Dari **Gambar 5** diatas, didapatkan penurunan nilai COD yaitu dari 269 mg/L menjadi 64 mg/L dengan persentase penurunan sebesar 76% pada variasi massa katalis 0,75 gr dan waktu kontak 90 menit. Hal ini menunjukkan bahwa sistem fotokatalis yang digunakan memiliki potensi yang baik dalam pengolahan air limbah *laundry*. Namun, masih terdapat sisa nilai COD yang belum terdegradasi. Hal ini dapat disebabkan oleh keberadaan senyawa organik lain yang sulit terdegradasi sehingga membatasi terbentuknya radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$) sebagai agen pengoksidasi utama dalam sistem fotokatalitik.

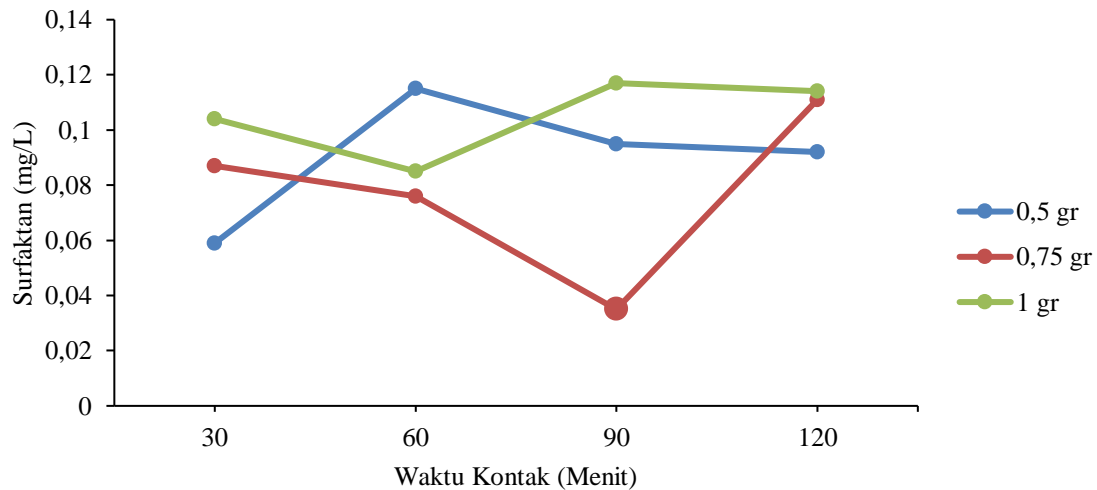
Pengaruh Massa Katalis dan Waktu Kontak terhadap Kadar Surfaktan

Efektivitas fotokatalis dalam menguraikan surfaktan tidak hanya bergantung pada jenis material yang digunakan, tetapi juga pada jumlah katalis dan lama waktu reaksi. **Gambar 6** menunjukkan kombinasi dari kedua faktor ini dapat menentukan sejauh mana senyawa surfaktan dapat dipecah selama proses fotokatalitik berlangsung.

Gambar 6 menunjukkan bahwa pengaruh variasi massa fotokatalis ZnO-Zeolit (0,5 gr, 0,75 gr, dan 1 gr) serta waktu kontak (30, 60, 90, dan 120 menit) terhadap penurunan kadar surfaktan dalam air limbah *laundry*. Secara umum, terlihat bahwa kinerja fotokatalitik sangat dipengaruhi oleh kombinasi antara massa katalis dan waktu kontak. Pada massa 0,5 gr, kadar surfaktan mengalami peningkatan dari menit ke-30

hingga menit ke-60, kemudian menurun dan cenderung stabil hingga menit ke-120. Hal ini menunjukkan bahwa degradasi belum berjalan optimal pada waktu kontak awal, dan peningkatan kadar surfaktan pada menit ke-60 disebabkan oleh pelepasan sementara senyawa organik yang teradsorpsi di permukaan katalis (Zilfa dkk., 2021).

Pada massa 0,75 gr menunjukkan hasil yang optimal, karena konsentrasi surfaktan mengalami penurunan bertahap dari menit ke-30 hingga mencapai titik terendah pada menit ke-90, yaitu 0,035 mg/L. Hal ini membuktikan bahwa pada massa 0,75 gr dan waktu kontak 90 menit, pembentukan radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$) yang aktif dalam menghancurkan senyawa organik berlangsung maksimal. Namun terjadi peningkatan kembali pada menit ke-120, yang menunjukkan bahwa material katalis sudah jenuh atau berkurangnya aktivitas permukaan.



Gambar 6. Pengaruh Massa Katalis dan Waktu Kontak terhadap Kadar Surfaktan

Sementara itu, pada massa fotokatalis 1 gr, kadar surfaktan cenderung stabil dan tetap tinggi sepanjang waktu kontak. Hal ini dapat dihubungkan dengan aglomerasi partikel katalis akibat kelebihan massa, sehingga luas permukaan aktif yang tersedia untuk reaksi menurun dan penetrasi cahaya UV menjadi tidak merata, sehingga efisiensi degradasi surfaktan menjadi rendah meskipun jumlah katalis lebih banyak (Bemis dkk., 2019). Dari **Gambar 6**, dapat disimpulkan bahwa hasil degradasi surfaktan yang optimal berada pada variasi massa katalis 0,75 gr dan waktu kontak 90 menit yaitu dari 2,819 mg/L menjadi 0,035 mg/L 98% dengan persentase degradasi sebesar 98%. Hal ini menunjukkan bahwa proses fotokatalis yang digunakan sangat efektif dalam menurunkan konsentrasi surfaktan dalam air limbah *laundry*. Nilai ini mengindikasikan bahwa hampir seluruh kandungan surfaktan berhasil diuraikan menjadi senyawa yang lebih sederhana atau bahkan terdegradasi sempurna menjadi CO_2 dan H_2O . Efisiensi sebesar ini umumnya dicapai ketika kombinasi antara massa fotokatalis dan waktu kontak berada pada kondisi optimum, sehingga pembentukan radikal hidroksil berlangsung secara maksimal. Hasil ini juga menunjukkan bahwa material fotokatalis yang digunakan, seperti ZnO-Zeolit memiliki kemampuan adsorpsi dan aktivitas fotokatalitik yang tinggi sehingga saling bersinergi dalam mempercepat proses degradasi.

Jika dibandingkan dengan **Gambar 6** dan **Gambar 5** kondisi 0,75 gr pada 90 menit juga menunjukkan penurunan pH mendekati netral yaitu 7,25, serta nilai COD paling rendah sebesar 64 mg/L, yang memperkuat bahwa kondisi tersebut merupakan titik optimal dari proses fotokatalisis. Artinya, kombinasi massa katalis dan waktu kontak ini tidak hanya efektif dalam menurunkan pH dan nilai COD, tetapi juga dalam menurunkan konsentrasi surfaktan yang merupakan salah satu senyawa aktif dalam deterjen dan berfungsi sebagai pencemar utama dalam air limbah *laundry*. Namun, dapat diketahui bahwa kenaikan parameter di menit ke-120 pada semua variasi massa katalis menunjukkan potensi reaksi balik atau pelepasan produk antara yang lebih sulit terdegradasi. Hal ini menandakan bahwa waktu kontak yang terlalu lama dan massa katalis yang terlalu banyak juga tidak selalu menguntungkan sehingga diperlukan penentuan waktu reaksi optimum.

Dari pembahasan diatas, dapat disimpulkan bahwa proses fotokatalis menggunakan ZnO-Zeolit terbukti efektif. Hal ini terlihat dari perubahan fisik limbah yang berubah dari keruh menjadi jernih, serta kemampuannya dalam menurunkan parameter air limbah laundry seperti pH, COD, dan kadar surfaktan.

Kondisi optimal tercapai dengan penggunaan massa katalis sebesar 0,75 gram dan waktu kontak selama 90 menit

4. Kesimpulan

Hasil karakteristik material ZnO-Zeolit yang diperoleh melalui analisis *X-Ray Diffraction* (XRD) menunjukkan bahwa ukuran kristal nanopartikel berada pada rentang 23,94 nm, mengindikasikan pembentukan struktur nanokristal yang baik dengan tingkat kristalinitas tinggi. Sementara itu, hasil analisis *Diffuse Reflectance Spectroscopy UV-Visible* (DRS UV-Vis) memperlihatkan nilai energi celah pita (bandgap) sebesar 2,98 eV, yang berada pada rentang optimal untuk aktivasi fotokatalitik di bawah radiasi sinar tampak. Kombinasi ukuran kristal nanometer dan nilai bandgap yang sesuai membuktikan bahwa nanopartikel ZnO-Zeolit yang disintesis memiliki struktur kristal yang teratur serta kemampuan penyerapan cahaya yang maksimal, sehingga mendukung efektivitas proses degradasi fotokatalitik.

Evaluasi pengaruh parameter operasional menunjukkan bahwa kondisi optimal dicapai pada massa katalis 0,75 gram dengan waktu kontak 90 menit. Pada kondisi tersebut, efisiensi penurunan nilai Chemical Oxygen Demand (COD) mencapai 76,21%, sedangkan degradasi kadar surfaktan mencapai 98,76%, menunjukkan kinerja fotokatalitik yang sangat baik dalam pengolahan limbah cair.

5. Ucapan Terima kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Politeknik Negeri Sriwijaya atas dukungan pendanaan PNPB Tahun 2025, sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik. Penulis juga menyampaikan apresiasi kepada mitra Harald Laundry yang telah memberikan izin dan fasilitas serta membantu dalam penyediaan sampel limbah laundry yang diperlukan selama proses penelitian. Bantuan dan kerja sama dari semua pihak sangat berarti dalam penyelesaian penelitian ini.

6. Daftar Singkatan

ZnO	Zinc Oxide
UV	Ultra Violet
COD	Chemical Oxygen Demand
DRS	Diffuse Reflectance Spectroscopy
XRD	X-Ray Diffraction
JCPDS	Joint Committee on Powder Diffraction Standards
eV	electron Volt

7. Referensi

- [1] Anggita, S. R., & Sutanto, H, "Pengaruh dopan Ag pada ZnO terhadap kekasaran permukaan dan aktivitas fotokatalitiknya," *Prosiding Seminar Nasional Quantum*, vol 25, hal 590–596, 2018
- [2] Anwar, H., & Fitra, P. A, "Fotodegradasi Senyawa Surfaktan dengan Menambahkan Katalis (ZnO) pada Limbah Cair Laundry," *Ekasakti Engineering Journal*, vol. 4(2), hal 62-68, 2024.
- [3] Apriyani, N, "Penurunan Kadar Surfaktan dan Sulfat dalam Limbah Laundry," *Media Ilmiah Teknik Lingkungan*, vol 2(1), 37-44, 2017.
- [4] Canciani, C., Sarvothaman, V. P., Alkhayat, K., Pang, X., Raji, M., Dhanasekaran, M., Aodah, R., Alrabea, R., Guida, P., Prabhudharwadkar, D. M., & Roberts, W. L, "Advanced Oxidation Based Treatment of Petroleum Industry Effluent. Society of Petroleum Engineers," *ADIPEC*, 2024.
- [5] Fikriandini, N., & Khair, M, "Penentuan Celah Pita Katalis ZnO/Zeolit yang Disintesis dengan Metoda Sonikasi," *Journal of Chemistry, Education, and Science*, vol. 7(1), 40–44, 2023
- [6] Haifa, A. H., Oktaviana, A. Y., & Kamal, U, "Tantangan dan Solusi Pengelolaan Limbah Industri : Upaya Menuju Lingkungan yang Bersih dan Berkelanjutan," *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan*, vol. 10(23), hal 1133-1139, 2024.
- [7] Haryo Putro, R. K, "Degradasi Surfaktan (*Linear Alkyl Benzene*) pada Limbah Laundry dengan Metode Fotokatalis ZnO," *Jurnal Envirotek*, vol 11(1), hal 25–30, 2019.
- [8] Mawarni, T., Fadarina, H. C., Aznury, M., Taufik, M, "Degradasi Zat Warna Rhodamin B Menggunakan Sintesis Fotokatalis ZnO/NiFe₂O₄ dan Diaplikasikan pada Limbah Cair Industri Pulp Dan Kertas," *Jurnal Kinetika*, vol 12(03), hal 44-50, 2021.

- [9] Nanda, M. F., Maulanah, S., Hidayah, T. N., Taufiqurrahman, A. M., & Radianto, D. O, "Analisis Pentingnya Pengelolaan Limbah terhadap Kehidupan Sosial Bermasyarakat," Venus: Jurnal Publikasi Rumpun Ilmu Teknik, vol. 2, hal 97–107, 2024
- [10] Nurcahyadi, G, "ASLI Gelar Edukasi Soal Ekosistem *Laundry* lewat Expo *Laundry* Internasional", Media Indonesia.com, 2023.
- [11] Nursalam, W. F., Momuat, L. I., & Aritonang, H. F. (2023). Synthesis of Zinc Oxide (ZnO) Nanoparticles Using Microwave Assistance and Its Application as Photocatalyst in Degrading Methylene Blue. *Jurnal Kimia Sains Dan Aplikasi*, 26(1), 28–33. Kementerian Pekerjaan Umum, Materi Bidang Sampah I, Diseminasi dan Sosialisasi Keteknikan Bidang PLP. Jakarta, Indonesia: Ditjen Cipta Karya, 2013.
- [12] Ramadhani, S., Sanjaya, H., & Yohandri, Y, "Degradasi Zat Warna *Methyl Orange* dengan Katalis TiO_2 Menggunakan Metode Fotosonolisis," *Jurnal Periodic Jurusan Kimia UNP*, vol 12(1), hal 17-23, 2023.
- [13] Sherly, F.N., Yuniar. Yulianto, W., Asri, S., Rizky, B.Y. (2025), Pengaruh Intensitas Cahaya dan Kecepatan Pengadukan Terhadap Degradasi Limbah *Laundry* Menggunakan Fotokatalis ZnO-Zeolit dari Limbah Baterai Zn-C, "*Jurnal Serambi Engineering*, Volume X, No.4, hal 15283 - 15290, Oktober 2025.
- [14] Suryandari, A. S., Mustain, A., Pratama, D. W., & Maula, I, "Studi Aktivitas Reaksi Fotokatalisis Berbasis Katalis TiO_2 -Karbon Aktif Terhadap Mutu Air Limbah Power Plant," *Jurnal Teknik Kimia Dan Lingkungan*, 3(2), hal 95-101, 2019.
- [15] Zilfa, Z., Safni, S., & Rahmi, F, "Penggunaan ZnO/Zeolit sebagai Katalis dalam Degradasi Tartrazin Secara Ozonolisis," *Jurnal Riset Kimia*, vol 12(1), 53–64, 2021.