



## Perbandingan Katalis Hijau ZnO, WO<sub>3</sub>, dan MOF: Sintesis, Aplikasi, dan Potensi Lingkungan

Cahaya Dinanti, Mama Faista, Nur Shofwa Al Barru

Program Studi Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta Jl. Marsda Adisucipto Yogyakarta 55281 Telp. +62-274-540971  
Email: cahyadinanti77@gmail.com

**Abstrak.** Katalis hijau seperti *Zinc Oxide* (ZnO), *Tungsten Oxide* (WO<sub>3</sub>), dan *Metal-Organic Frameworks* (MOFs) dikembangkan sebagai solusi inovatif untuk mengatasi tantangan lingkungan dan energi global. Kajian ini memberikan tinjauan komprehensif terhadap karakteristik fisiko-kimia, metode sintesis, dan aplikasi ketiga jenis katalis tersebut dengan berfokus pada efisiensi degradasi polutan dan produksi energi bersih. Kajian ini dilakukan melalui pendekatan naratif-komparatif terhadap literatur terkini (2019-2025) yang mencakup lebih dari 13 studi primer, menghasilkan empat faktor kunci yang mempengaruhi performa katalis: 1) metode sintesis berkelanjutan, 2) karakteristik partikel dan luas permukaan, 3) aplikasi dalam fotokatalisis dan energi terbarukan, serta 4) efisiensi dan tantangan teknis. Hasil penelitian mengungkapkan bahwa ZnO menunjukkan efisiensi tinggi dalam fotodegradasi polutan ( $\geq 90\%$ ). WO<sub>3</sub> memiliki keunggulan dalam reaksi fotokatalitik menggunakan cahaya tampak, sedangkan MOFs unggul dalam konversi CO<sub>2</sub> dan produksi biodiesel karena struktur berpori dan luas permukaan yang ekstensif. Temuan ini tidak hanya menegaskan peran strategis ketiga material dalam kimia hijau, tetapi juga menyoroti potensi sinergi melalui kombinasi sistem katalitik (seperti MOF-ZnO atau WO<sub>3</sub>-MOF) untuk menciptakan solusi yang lebih efektif. Studi ini memberikan kerangka konseptual untuk pengembangan katalis generasi berikutnya yang mengoptimalkan aspek kinerja, keberlanjutan, dan kelayakan ekonomi dalam aplikasi industri skala besar.

This publication is licensed under a



**Kata kunci:** Katalis hijau, ZnO, MOFs, WO<sub>3</sub>, fotodegradasi polutan, energi bersih, sintesis berkelanjutan

**Abstract.** *Green catalysts such as Zinc Oxide (ZnO), Tungsten Oxide (WO<sub>3</sub>), and Metal-Organic Frameworks (MOFs) are developed as innovative solutions to address global environmental and energy challenges. This review provides a comprehensive review of the physicochemical characteristics, synthesis methods, and applications of these three types of catalysts with a focus on pollutant degradation efficiency and clean energy production. This review was conducted through a narrative-comparative approach to the current literature (2019-2025) covering more than 13 primary studies, resulting in four key factors affecting catalyst performance: 1) sustainable synthesis method, 2) particle characteristics and surface area, 3) applications in photocatalysis and renewable energy, and 4) efficiency and technical challenges. The results revealed that ZnO exhibited high efficiency in pollutant photodegradation ( $\geq 90\%$ ). WO<sub>3</sub> has advantages in visible light photocatalytic reactions, while MOFs excel in CO<sub>2</sub> conversion and biodiesel production due to their porous structure and extensive surface area. These findings not only confirm the strategic role of the three materials in green chemistry, but also highlight the potential synergy through the combination of catalytic systems (such as MOF-ZnO or WO<sub>3</sub>-MOF) to create more effective solutions. This study provides a conceptual framework for the development of next-generation catalysts that optimize performance, sustainability, and economic feasibility in large-scale industrial applications.*

**Keyword:** *Green catalysts, ZnO, MOFs, WO<sub>3</sub>, pollutant photodegradation, clean energy, sustainable synthesis*

## Pendahuluan

Permasalahan lingkungan global seperti pencemaran air, emisi gas rumah kaca, dan ketergantungan terhadap energi fosil mendorong perkembangan teknologi yang ramah lingkungan, termasuk inovasi dalam bidang katalis. Katalis merupakan suatu zat yang dapat mempercepat laju reaksi kimia dengan cara menurunkan energi aktivasi yang diperlukan untuk memulai suatu reaksi tanpa terlibat langsung dalam produk akhir (Ramadhanti, 2023). Dalam konteks ini, perkembangan katalis hijau menjadi solusi penting karena memungkinkan efisiensi reaksi kimia meningkat, penggunaan energi lebih rendah, serta meminimalkan emisi yang dihasilkan. Penggunaan katalis hijau turut mendukung prinsip kimia berkelanjutan dengan memanfaatkan material yang lebih aman, terbarukan, dapat digunakan berulang, dan juga proses yang lebih ramah lingkungan. Oleh karena itu, tren pengembangan katalis hijau semakin meningkat dalam riset kimia lingkungan dan energi bersih (Desadria et al., 2016; Uli et al., 2025)

Katalis hijau *Zinc Oxide* (ZnO), *Metal-Organic Frameworks* (MOFs), dan *Tungsten Oxide* (WO<sub>3</sub>) menjadi jenis katalis yang paling banyak diteliti di antara jenis katalis yang berkembang. ZnO populer karena bersifat semikonduktor yang murah, mudah disintesis, dan memiliki sifat fotokatalitik yang kuat (Batmunkh, 2020). WO<sub>3</sub> memiliki keunggulan dalam menyerap cahaya tampak, sehingga efektif dalam fotodegradasi polutan di bawah sinar matahari (Xu et al., 2023). Sementara itu, MOFs memiliki material yang berpori tinggi dengan struktur yang dapat direkayasa secara presisi, memungkinkan penggunaannya dalam bidang spesifik reaksi kimia, contohnya dalam adsorpsi polutan dan konversi karbon dioksida (Hidayat et al, 2022). Ketiga katalis ini populer karena memiliki kombinasi sifat fisikokimia unik dan potensi aplikatif yang luas sebagai solusi masalah lingkungan dan energi (Adelia & Asri, 2021).

Kajian ini difokuskan pada pembahasan komprehensif sifat fisik dan kimia, performa katalitik, serta efisiensi dari ZnO, WO<sub>3</sub>, dan MOFs untuk berbagai aplikasi yang bertujuan pada

solusi lingkungan, khususnya degradasi polutan dan produksi energi bersih. Selain itu, diharapkan dapat memberikan wawasan tentang tantangan teknis dan peluang pengembangan untuk masa depan. Struktur artikel ini disusun menjadi beberapa bagian utama. Pertama, pembahasan mengenai metode sintesis dan karakterisasi dari masing-masing katalis. Selanjutnya, kajian aplikasi katalitik dalam konteks lingkungan, termasuk penggunaannya dalam reaksi sintesis organik, fotokatalisis dan degradasi polutan, serta pemanfaatannya dalam energi terbarukan dan pengolahan lingkungan. Bagian berikutnya berfokus pada aspek keberlanjutan dan tantangan aplikatif, serta ditutup dengan saran mengenai arah pengembangan katalis hijau untuk masa depan.

## Metode

### Metode Penelitian

Metode yang digunakan untuk mensintesis masing-masing katalis menjadi salah satu bagian penting dalam memahami performa katalis secara menyeluruh. Proses sintesis akan menentukan struktur morfologi, ukuran partikel, dan luas permukaan. Semua faktor ini akan berdampak langsung pada efisiensi reaksi kimia dalam berbagai aplikasi katalitik.

### Sintesis ZnO

Katalis ZnO disintesis melalui metode biosintesis menggunakan ekstrak daun tanaman *P. austroarabica* oleh Alahdal et al. (2022). Daun dikeringkan, ditumbuk, dan diekstrak dengan air panas selama 30 menit. Ekstrak kemudian dicampur dengan larutan seng asetat ( $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) sebanyak 70 mL (10 mM), ditambahkan secara tetes ke dalam 30 mL ekstrak tanaman panas, dipanaskan pada 55 °C selama 10 menit dan diaduk selama 4 jam pada pH 11. Endapan ZnO yang terbentuk disentrifugasi (10000 rpm, 15 menit), dicuci dengan air deionisasi dan etanol, lalu dikeringkan dalam oven pada suhu 50 °C semalaman. Metode ini menghasilkan nanopartikel ZnO berukuran sekitar  $13.9 \pm 4.3$  nm, bersifat ramah lingkungan, dan tidak memerlukan bahan kimia berbahaya.

Berbeda dengan pendekatan berbasis ekstrak tanaman yang ramah lingkungan tersebut, sintesis ZnO yang dilakukan oleh Dhankar et al. (2024) dengan metode kopresipitasi menggunakan  $\text{ZnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  sebagai prekursor. Pertama, larutan  $\text{ZnCl}_2$  (0,136 g dalam 50 mL air) diaduk selama 20 menit, lalu larutan urea (0,006 g dalam 50 mL air) ditambahkan secara perlahan hingga pH mencapai 12. Campuran diaduk selama 2 jam hingga terbentuk presipitat putih. Endapan disentrifugasi, dicuci dengan air deionisasi dan etanol, kemudian dikalsinasi pada suhu 600 °C selama 6 jam dalam muffle furnace. ZnO yang dihasilkan digunakan sebagai nanokatalis dalam sintesis turunan tiazina, menunjukkan reaktivitas tinggi dan dapat digunakan kembali tanpa penurunan aktivitas.

Studi lain menggunakan pendekatan serupa dengan sumber hayati yang berbeda, seperti pada penelitian oleh Dormanesh et al. (2021) ekstrak bunga violet disiapkan dengan merebus 5 g bunga kering dalam 200 mL air suling pada suhu 70 °C selama

15 menit. Ekstrak disaring dan dicampurkan dengan 300 mL larutan  $\text{ZnSO}_4$  (0,4 M), lalu ditambahkan larutan NaOH (10 mL, 1 M) hingga pH 12. Campuran membentuk endapan kuning yang disentrifugasi (3500 rpm, 5 menit), dicuci dengan etanol dan air suling, lalu dikeringkan pada 100 °C selama 6 jam. ZnO yang diperoleh digunakan sebagai katalis hijau dalam reaksi pembukaan cincin epoksida, menunjukkan efisiensi tinggi dan regioselektivitas yang baik (Dormanesh et al., 2021). Metode ini menguatkan bahwa pendekatan berbasis biosintesis dapat diterapkan pada berbagai sumber hayati, sehingga memperluas potensi katalis hijau dari sumber-sumber alam.

Dalam studi oleh Matei et al. (2023), digunakan berbagai pendekatan, termasuk sonokimia, kopresipitasi, dan hidrotermal, tergantung pada jenis aplikasi yang diinginkan. *Co-precipitation* dilakukan dengan pengaturan pH 7–11 dan pengadukan atau sonikasi larutan prekursor untuk membentuk ZnO. Ukuran partikel bervariasi tergantung pada metode, mulai dari 2–140 nm. Metode ini dianggap sederhana dan efisien dalam menghasilkan ZnO dalam jumlah besar, meskipun beberapa teknik memiliki kelemahan seperti aglomerasi atau kebutuhan alat khusus.

Metode sintesis dilakukan oleh Trisunaryanti et al. (2021) melalui pencampuran fisik ZnO dan karbon aktif (AC) dalam perbandingan tertentu menggunakan teknik *solid-solid blending*. Campuran dikarakterisasi menggunakan XRD, FTIR, SEM-EDX, dan pengukuran luas permukaan. ZnO-AC menunjukkan peningkatan signifikan dalam luas permukaan ( $734,351 \text{ m}^2/\text{g}$ ) dan keasaman total ( $4,8780 \text{ mmol/g}$ ) dibandingkan masing-masing komponen tunggal. Katalis ini diaplikasikan pada reaksi oksidatif desulfurisasi (ODS) dibenzotiofena (DBT) menggunakan  $\text{H}_2\text{O}_2$  dan menunjukkan efisiensi hingga 93,83% dalam 120 menit reaksi.

Berdasarkan macam-macam metode tersebut, dapat dilihat bahwa pendekatan biosintesis menawarkan keuntungan dari sisi keberlanjutan, sedangkan metode kimia konvensional memungkinkan kontrol parameter yang lebih tepat. Tujuan aplikasi dan pertimbangan lingkungan menjadi faktor yang mempengaruhi pemilihan metode yang tepat.

### Sintesis $\text{WO}_3$

Seperti halnya ZnO, sintesis  $\text{WO}_3$  juga dapat dilakukan dengan berbagai pendekatan, mulai dari metode fisik hingga kimia basah (Wilsoma et al., 2019; Bairamis & Konstantinou, 2021). Perbedaan metode ini berpengaruh terhadap struktur kristal dan luas permukaan akhir yang menentukan tingkat efisiensi katalis. Pada penelitian Bairamis & Konstantinou (2021) katalis  $\text{WO}_3/\text{g-C}_3\text{N}_4$  disintesis melalui kombinasi metode electrospinning dan pencampuran basah (*wet mixing*). Pertama, serat  $\text{WO}_3$  disiapkan melalui proses electrospinning menggunakan polimer PVP dengan menghasilkan serat berdiameter sekitar 250–300 nm. Serat ini kemudian dikalsinasi untuk membentuk kristal  $\text{WO}_3$ . Selanjutnya, serat  $\text{WO}_3$  dicampur dengan bubuk  $\text{g-C}_3\text{N}_4$  dengan berbagai rasio berat  $\text{WO}_3$  (1–15%) untuk membentuk struktur heterojungsi Z-scheme. Campuran ini diaduk dan dikeringkan untuk menghasilkan komposit  $\text{WO}_3/\text{g-C}_3\text{N}_4$ . Hasil katalis kemudian

dikarakterisasi menggunakan XRD, FT-IR, SEM, BET, DRS UV-Vis, dan DLS, yang menunjukkan bahwa material bersifat mesopori dengan peningkatan luas permukaan dan penurunan celah pita. Sintesis ini bertujuan menghasilkan sistem fotokatalitik Z-scheme yang efisien untuk reaksi oksidasi fenol dan reduksi Cr(VI) secara simultan di bawah penyinaran cahaya tampak.

Dalam penelitian Nguyen et al. (2019), katalis WO<sub>3</sub> digunakan dalam bentuk bubuk komersial ( $\leq 0,20 \mu\text{m}$ ) tanpa tahapan sintesis kompleks. Namun, metode eksperimen tetap memerlukan persiapan sistem reaksi secara hati-hati. Sistem fotokatalitik terdiri dari reaktor kaca berjaket 250 mL yang dilengkapi dengan lampu xenon 300 W sebagai sumber sinar matahari buatan. Suspensi WO<sub>3</sub> (0,1–0,5 g/L) dicampurkan dengan larutan amoksisilin (1–2  $\mu\text{M}$ ) pada pH tertentu (4, 6, 8), kemudian diaduk terus menerus pada suhu konstan 25 °C selama 180 menit. Sampel diambil berkala dan disaring sebelum dianalisis menggunakan LC-MS/MS dan TOC analyzer. Meskipun tidak ada proses sintesis katalis baru, penelitian ini penting karena menguji performa WO<sub>3</sub> murni dalam sistem RSM Box-Behnken untuk optimasi degradasi senyawa farmasi.

Penelitian oleh Uli et al. (2025) katalis WO<sub>3</sub> disintesis menggunakan metode hidrotermal. Sebanyak 0,825 gram Na<sub>2</sub>WO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O dan 0,290 gram NaCl dilarutkan dalam campuran 13 mL akuades dan 4 mL HCl, diaduk selama 30 menit, lalu dipindahkan ke dalam autoklaf dan dipanaskan pada suhu 180°C selama 24 jam. Setelah didinginkan, larutan dicuci menggunakan air dan dikeringkan pada suhu 100°C selama 12 jam. Variasi suhu sintesis antara 180–240°C digunakan untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap struktur kristal (*orthorhombic* dan *monoclinic*) serta karakteristik mesopori. Katalis dikarakterisasi menggunakan XRD dan isotherm adsorpsi-desorpsi nitrogen. Aktivitas fotokatalitik diuji dengan reaktor xenon 500 W terhadap limbah POME, menunjukkan kemampuan penurunan COD hingga 48,05% dan degradasi warna hingga 36,22%.

Sintesis katalis WO<sub>3</sub>-SBE dilakukan dengan dua tahapan utama yaitu aktivasi SBE (*Spent Bleaching Earth*) dan impregnasi WO<sub>3</sub>. Aktivasi dilakukan dengan merendam SBE dalam larutan H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1 N dalam perbandingan 1:10 (b/v), kemudian diiradiasi ultrasonik pada suhu 50–60°C selama 60 menit, dicuci hingga pH netral, dikeringkan pada 110°C selama 3 jam, dan diayak 140 mesh. Tahap selanjutnya adalah impregnasi WO<sub>3</sub>: sebanyak 50 g SBE dicampur dengan 20 g WO<sub>3</sub> dan 400 mL NH<sub>4</sub>OH 7 M, direfluks selama 5 jam pada suhu 60–70°C. Produk dicuci, dikeringkan, digerus, diayak, dan dikalsinasi pada suhu 500°C selama 2 jam. Katalis diuji dalam sistem sonokatalitik terhadap methylene blue dengan efisiensi degradasi tertinggi mencapai 99,12% pada berat katalis 0,15 g dalam 15 menit penyinaran ultrasonik (Wilsoma et al., 2019).

### Sintesis MOF

Penelitian Liu et al. (2021) membahas berbagai pendekatan sintesis dan pemanfaatan *Metal-Organic Frameworks* (MOFs) sebagai katalis, khususnya melalui pemanfaatan pori-pori MOF

untuk mengisolasi dan menstabilkan situs katalitik. MOF dapat menginkorporasi katalis baik pada node (simpul logam), linker (ligan organik), maupun dalam pori-pori sebagai tempat aktif. Metode sintesis umumnya meliputi self-assembly dari logam transisi dan ligan polifungsional, dan dimodifikasi melalui strategi seperti post-synthetic metalation, atomic layer deposition (ALD), maupun solvothermal deposition (SIM) untuk mencangkok ion logam aktif ke node MOF. Selain itu, modifikasi bisa dilakukan pada linker untuk memperkenalkan gugus fungsional aktif secara kimiawi atau fotokatalitik. Tujuannya adalah menciptakan MOF yang tidak hanya berpori tinggi tetapi juga memiliki aktivitas dan selektivitas tinggi, serta tahan terhadap sintering atau pelindian dalam reaksi heterogen, terutama untuk reaksi oksidasi, reduksi, polimerisasi, dan fotoelektrokimia. Penelitian ini memberikan gambaran umum tentang fleksibilitas desain struktur MOF, yang akan tampak lebih nyata dalam studi-studi sintesis berikutnya dengan pendekatan solvothermal, maupun sintesis hijau (Jamila et al., 2020; Bagheri et al., 2024)

Jamila et al. (2020) mensintesis dua jenis MOF berbasis tembaga (Cu-MOF) dan kalsium (Ca-MOF) menggunakan pendekatan solvothermal dan hidrotermal yang dimodifikasi. Cu-MOF disintesis dari larutan CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O dan asam 1,4-benzenadikarboksilat (BDC) dalam campuran air deionisasi dan DMF dengan perbandingan 1:1 mol. Campuran tersebut dipanaskan sambil diaduk selama 24 jam pada 85°C, lalu dicuci, difiltrasi, dan dikeringkan dalam oven 110°C semalaman. Sedangkan untuk Ca-MOF, senyawa awalnya adalah CaCO<sub>3</sub> dan BDC (juga dengan rasio 1:1 mol), dilarutkan dalam air deionisasi dan DMF, lalu dimasukkan ke dalam autoklaf dan dipanaskan pada 110°C selama 48 jam. Produk yang dihasilkan disaring, dikeringkan dalam oven, dan juga divakum untuk menghilangkan sisa pelarut. MOF yang dihasilkan digunakan sebagai katalis heterogen untuk reaksi esterifikasi dan transesterifikasi dalam produksi biodiesel dari limbah minyak goreng, serta dikarakterisasi menggunakan XRD, SEM, BET, TGA, dan FTIR.

Bagheri et al. (2024) melaporkan sintesis hijau dari ZIF-8 dan ZIF-67 menggunakan metode *steam-assisted dry-gel conversion*. Dalam metode ini, campuran logam (zinc acetate untuk ZIF-8 dan cobalt acetate untuk ZIF-67) dengan 2-metilimidazol (sebagai ligan) diletakkan dalam wadah krus keramik lalu dimasukkan ke dalam autoklaf stainless steel yang bagian bawahnya berisi sejumlah air (2–30 mL). Autoklaf kemudian dipanaskan pada 120°C selama 3 jam. Uap air berperan sebagai pelarut untuk membentuk kristal MOF dalam bentuk kering, menghindari penggunaan pelarut organik berbahaya seperti DMF. Produk yang dihasilkan disentrifugasi, dicuci dengan air dan etanol, lalu dikeringkan pada 60°C dalam vakum. Metode ini menghasilkan ZIF-8 dan ZIF-67 dengan morfologi seragam dan distribusi ukuran partikel yang terkendali, serta diuji sebagai elektrokatalis dalam reaksi reduksi CO<sub>2</sub> menghasilkan gas sintesis (*syngas*).

Iqbal et al. (2023) mengembangkan metode *one-pot solvothermal* untuk mensintesis MOF bimetalik Fe/Co berdasarkan struktur

NH<sub>2</sub>-MIL-88B. Dalam sintesis ini, larutan FeCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O dan CoCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O dengan berbagai perbandingan molar (Fe:Co = 1:0 hingga 0:1) dicampur bersama larutan asam 2-aminotereftalat (NH<sub>2</sub>-BDC) dalam pelarut DMF. Campuran ini kemudian diaduk selama 15 menit dan dimasukkan ke dalam autoklaf Teflon, lalu dipanaskan pada 120°C selama 24 jam. Padatan yang dihasilkan disentrifugasi, dicuci dengan DMF dan etanol, lalu dikeringkan dalam oven vakum pada 110°C semalaman. Metode ini memungkinkan inkorporasi kobalt ke dalam struktur MOF secara seragam, membentuk material heterologam (Fe/Co-MOF) dengan morfologi spindel. Katalis yang dihasilkan diuji dalam tiga jenis reaksi: reduksi nitroarena, evolusi oksigen elektrokimia, dan dehidrogenasi natrium borohidrida, menunjukkan performa tinggi dan stabilitas yang baik. Dengan bermacamnya metode sintesis yang tersedia, MOF memberikan kemungkinan tak terbatas dalam pengembangan struktur yang tidak hanya berpori tinggi, namun juga memiliki aktivitas spesifik dan stabilitas tinggi di berbagai kondisi reaksi.

### Perbandingan Katalis Hijau

Katalis hijau merujuk pada jenis katalis yang disintesis dan digunakan dengan cara yang ramah lingkungan, meminimalkan dampak negatif terhadap ekosistem dan kesehatan manusia. Dalam studi tentang ZnO, pendekatan hijau tampak jelas dalam beberapa studi yang memanfaatkan ekstrak tanaman sebagai bahan alami dalam proses sintesis. Misalnya, Alahdal et al. (2022) menggunakan ekstrak daun *Pulicaria austroarabica* sebagai agen reduksi dan penstabil untuk membentuk nanopartikel ZnO. Demikian pula, Dormanesh et al. (2021) memanfaatkan ekstrak bunga violet dalam proses serupa. Pendekatan biosintesis ini menghindari penggunaan bahan kimia sintesis berbahaya dan menghasilkan ZnO yang tidak toksik serta efektif secara fotokatalitik dan antioksidan. Dengan memanfaatkan bahan-bahan hayati yang mudah terurai dan aman, ZnO yang disintesis secara biologis ini memenuhi kriteria sebagai katalis hijau.

Pada sistem katalis WO<sub>3</sub>, pendekatan hijau terlihat pada beberapa metode sintesis yang menggunakan air sebagai pelarut utama, seperti metode hidrotermal oleh Uli et al. (2025) WO<sub>3</sub> yang dihasilkan digunakan dalam proses fotokatalitik untuk mendegradasi limbah cair industri sawit (POME), menunjukkan efisiensi tinggi dalam menurunkan kadar COD dan warna limbah. Selain itu, Bairamis dan Konstantinou (2021) menggabungkan WO<sub>3</sub> dengan g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> untuk membentuk struktur fotokatalitik Z-scheme, yang mampu mengoksidasi fenol dan mereduksi ion Cr(VI) secara simultan di bawah cahaya tampak. Kedua pendekatan ini menonjolkan penggunaan energi bersih (cahaya), pelarut air, dan minim bahan berbahaya, menjadikan katalis WO<sub>3</sub> tersebut sebagai contoh lain dari katalis hijau.

MOF (*Metal-Organic Frameworks*) menggunakan pendekatan hijau ditunjukkan oleh Bagheri et al. (2024) yang mengembangkan metode steam-assisted dry-gel conversion untuk sintesis ZIF-8 dan ZIF-67. Metode ini menggunakan uap air sebagai pelarut alami, menggantikan pelarut organik beracun seperti DMF yang biasa digunakan dalam sintesis MOF. Proses

ini tidak hanya mengurangi penggunaan bahan kimia berbahaya, tetapi juga menghasilkan katalis dengan morfologi terkontrol yang digunakan dalam reaksi reduksi CO<sub>2</sub>, mendukung upaya penurunan emisi gas rumah kaca. Oleh karena itu, MOF ini dikategorikan sebagai katalis hijau karena proses pembuatannya hemat energi, minim limbah, dan aplikasinya menunjang keberlanjutan.

### Karakterisasi Katalis

Karakterisasi katalis menjadi langkah penting berikutnya untuk mengevaluasi hasil sintesis dan mengaitkannya dengan performa katalitik. Karakterisasi meliputi ukuran luas partikel, luas permukaan, dan morfologi.

### Ukuran Partikel

Ukuran partikel ZnO nanopartikel (ZnONPs) yang disintesis secara hijau dari ekstrak daun *P. austroarabica* oleh Alahdal et al. (2022) mencapai rata-rata 13,9 ± 4,3 nm dengan bentuk sferis dan kristal FCC, sebagaimana dikonfirmasi melalui PXRD, SEM, dan TEM. Dormanesh et al. (2021) juga melaporkan ukuran partikel yang relatif kecil, sekitar 50–60 nm, melalui metode hijau menggunakan ekstrak bunga violet, dikarakterisasi dengan SEM dan XRD yang menunjukkan struktur heksagonal (Dormanesh & Mohseni, 2021). Sementara itu, menurut Dhankar et al. (2024) nanopartikel ZnO disintesis melalui metode kopresipitasi menghasilkan partikel dalam bentuk presipitat putih yang dikalsinasi pada suhu tinggi, meskipun ukuran partikelnya tidak disebutkan secara eksplisit dalam studi tersebut (Dhankar et al., 2024).

Ukuran partikel WO<sub>3</sub> bervariasi tergantung metode sintesis. Dalam studi oleh Bairamis & Konstantinou (2021), WO<sub>3</sub> disintesis dalam bentuk serat elektrospin dengan diameter sekitar 250–300 nm, sementara ukuran kristalnya berada pada rentang 12,4–15,3 nm berdasarkan perhitungan Scherrer (Bairamis & Konstantinou, 2021). Uli et al. (2025) melaporkan bahwa WO<sub>3</sub> yang disintesis secara hidrotermal membentuk kristal orthorhombik dan monoklinik, meskipun tidak disebutkan ukuran partikelnya secara eksplisit (Uli et al., 2025). Wilsoma et al. (2019) mengindikasikan adanya puncak difraksi WO<sub>3</sub> yang khas melalui XRD setelah impregnasi pada Spent Bleaching Earth (SBE), namun detail ukuran partikel tidak dijabarkan (Wilsoma et al., 2019).

Ukuran kristalit MOFs yang dihasilkan berdasarkan analisis XRD dan perhitungan dengan persamaan Scherrer adalah kurang dari 50 nm, menunjukkan bahwa material tersebut berada dalam skala nano (Jamila et al., 2020). Pada MOF ZIF-8 yang disintesis menggunakan metode steam-assisted dry gel, ukuran partikel berkisar antara 240–440 nm, tergantung pada volume uap air yang digunakan selama sintesis (Bagheri et al., 2024). Sementara itu, pada MOF bimetalik Fe/Co berbasis NH<sub>2</sub>-BDC (iqbal et al., 2024), ukuran partikel tidak dijelaskan secara numerik, namun SEM menunjukkan morfologi berbentuk spindel yang khas dari struktur MIL-88B, mengindikasikan kristal dengan ukuran mikro hingga sub-mikro. Pada Penelitian Liu et al. (2022), yang merupakan ulasan komprehensif, ukuran

partikel disebut sangat dipengaruhi oleh jenis kerangka dan strategi sintesis, namun tidak diberikan data angka spesifik. Ukuran partikel sangat mempengaruhi luas permukaan spesifik, yang pada gilirannya menentukan interaksi antara katalis dengan substrat reaksi. Oleh karena itu, pembahasan mengenai luas permukaan dari ketiga jenis katalis penting untuk diketahui selanjutnya.

#### Luas Permukaan

Luas permukaan spesifik ZnO-*activated carbon* (ZnO-AC) yang dikembangkan oleh Trisunaryanti et al. (2021) tercatat sebesar 734,351 m<sup>2</sup>/g berdasarkan hasil Surface Area Analyzer (SAA), nilai yang jauh lebih tinggi dibandingkan ZnO atau karbon aktif murni, yang memberikan kontribusi signifikan terhadap efisiensi katalitiknya dalam reaksi oksidatif desulfurisasi (Trisunaryanti et al., 2021). Luas permukaan tinggi tersebut menunjukkan kemampuan adsorpsi dan aktivitas permukaan yang lebih besar. Sementara itu, Alahdal et al. (2022) menyebutkan bahwa tingginya aktivitas katalitik ZnONPs mereka sebagian besar berasal dari luas permukaan spesifik yang tinggi, walaupun tidak menyebutkan nilai numeriknya secara langsung (Alahdal et al., 2022).

Luas permukaan spesifik WO<sub>3</sub> murni cenderung rendah, yakni sekitar 14,1 m<sup>2</sup>/g, namun meningkat signifikan dalam bentuk komposit. Bairamis & Konstantinou mencatat bahwa komposit WO<sub>3</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> memiliki luas permukaan hingga 67,7 m<sup>2</sup>/g, menunjukkan bahwa interkalasi WO<sub>3</sub> dengan g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> menciptakan struktur mesopori yang lebih terbuka dan meningkatkan efisiensi fotokatalitiknya (Bairamis & Konstantinou, 2021). Uli et al. (2025) juga melakukan karakterisasi luas permukaan menggunakan isotherm fisisorpsi nitrogen dan mengidentifikasi tipe mesopori Tipe V pada katalis WO<sub>3</sub>, namun nilai kuantitatif tidak dicantumkan (Uli et al., 2025).

Luas permukaan pada MOF oleh Bagheri et al. (2024) dihitung menggunakan metode BET dari adsorpsi nitrogen pada suhu -196 °C, meskipun nilai spesifik tidak disebutkan, namun disebutkan bahwa peningkatan luas permukaan terjadi saat penggunaan air dalam jumlah sedang selama sintesis. Pada penelitian Jamila et al. (2020), MOF menggunakan analisis BET untuk mengkarakterisasi luas permukaan dan porositas, sebagai bagian dari evaluasi efisiensi dalam reaksi transesterifikasi, namun juga tidak menyebutkan nilai numeriknya. Dalam penelitian Iqbal et al. (2024) mencatat bahwa luas permukaan ditentukan dengan analisis adsorpsi-desorpsi nitrogen setelah degassing, dan hasilnya menunjukkan variasi tergantung rasio Fe:Co, meski nilai eksplisit tidak disampaikan. Luas permukaan MOF dapat dimodifikasi secara signifikan melalui strategi seperti rekayasa defek, substitusi logam, dan fungsionalisasi ligan, memungkinkan kontrol tinggi terhadap kapasitas adsorpsi dan transport reaktan (Liu et al., 2022). Selain itu, karakterisasi morfologi seperti bentuk kristal dan keberadaan gugus fungsional turut memberikan wawasan mengenai kestabilan dan efektivitas katalis dalam reaksi kimia.

#### Morfologi (XRD, SEM, BET, FTIR)

XRD dari ZnONPs yang disintesis oleh Alahdal et al. (2022) menunjukkan pola difraksi yang khas dari struktur kristal FCC, sedangkan hasil FTIR mengindikasikan adanya gugus fungsional dari senyawa bioaktif yang berperan sebagai penstabil nanopartikel (Alahdal et al., 2022). Dormanesh et al. menunjukkan melalui XRD bahwa partikel ZnO mereka memiliki kristalinitas tinggi dan struktur heksagonal, serta SEM yang menunjukkan morfologi seragam dengan ukuran partikel 50–60 nm (Dormanesh & Mohseni, 2021). FTIR juga memperlihatkan puncak khas ikatan Zn–O pada ~500 cm<sup>-1</sup>. Dalam penelitian Dhankar et al., verifikasi struktur dilakukan dengan FTIR dan GC-MS, namun gambaran morfologi partikel tidak dijelaskan secara detail (Dhankar et al., 2024). Trisunaryanti et al. menampilkan hasil XRD yang mengonfirmasi adanya kristal Zn dalam matriks karbon aktif, serta FTIR yang digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsional katalis hasil blending (Trisunaryanti et al., 2021).

Karakterisasi morfologi WO<sub>3</sub> dilakukan melalui XRD, SEM, BET, dan FTIR. Studi Bairamis & Konstantinou menunjukkan bahwa WO<sub>3</sub> memiliki struktur kristal triklinik dengan pola difraksi khas, dan FTIR mengonfirmasi keberadaan gugus W–O–W pada rentang 500–900 cm<sup>-1</sup>. SEM menunjukkan morfologi serat WO<sub>3</sub> dengan diameter 250–300 nm yang terdispersi pada lapisan g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (Bairamis & Konstantinou, 2021). Uli et al. (2025) mengamati struktur kristal orthorhombik dan monoklinik pada WO<sub>3</sub> berdasarkan pola XRD dan menyatakan bahwa suhu sintesis hidrotermal mempengaruhi kristalinitas, dengan suhu 200–220°C menghasilkan kristalinitas terbaik. BET digunakan untuk klasifikasi pori, namun hasilnya tidak dijabarkan secara numerik (Uli et al., 2025). Sementara itu, Wilsoma et al. memverifikasi kehadiran WO<sub>3</sub> pada matriks SBE menggunakan XRD dan menyatakan keberhasilan impregnasi WO<sub>3</sub> pada substrat montmorillonite (Wilsoma et al., 2019).

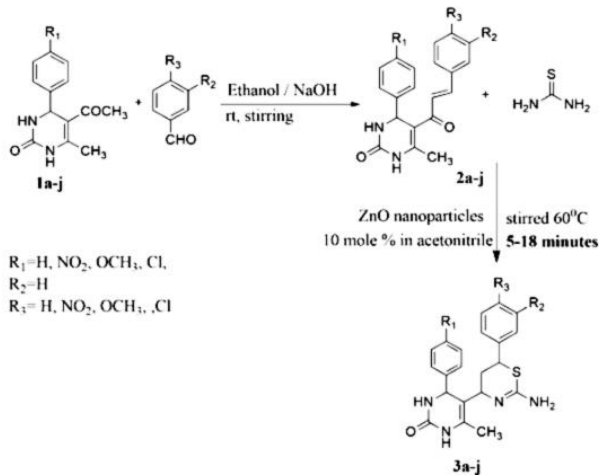
MOF yang disintesis oleh Jamila et al. (2020) menampilkan struktur kristalin seragam berdasarkan citra SEM beresolusi tinggi, dan distribusi partikel yang homogen sangat dipengaruhi oleh kadar uap air selama sintesis (Bagheri et al., 2024). Pada MOF yang disintesis oleh Iqbal et al. (2024), SEM memperlihatkan morfologi spindel yang identik dengan struktur MIL-88B, dengan EDX yang mengonfirmasi keberadaan logam Fe dan Co dalam proporsi yang diinginkan (Iqbal et al., 2024). XRD pada keempat MOF menunjukkan kristalinitas tinggi dan pola difraksi yang sesuai dengan struktur masing-masing (ZIF, MIL-88B, atau MOF berbasis BDC). BET digunakan pada semua studi untuk mengkaji luas permukaan dan volume pori. FTIR dalam MOF mengidentifikasi gugus –COO<sup>-</sup> dan –NH<sub>2</sub> dari ligan BDC yang berikatan dengan logam (Jamila et al., 2020), sementara pada MOF dengan FTIR mendeteksi gugus imidazolat khas dari struktur ZIF (Bagheri et al., 2024). Secara umum, keberadaan gugus fungsional seperti –NH<sub>2</sub>, –OH, dan –COO<sup>-</sup> turut berperan dalam meningkatkan interaksi dengan reaktan dan kestabilan struktur MOF (Iqbal et al., 2024).

## Aplikasi Katalitik

Bagian ini menjadi pembahasan tentang bagaimana hubungan karakterisasi tersebut dengan performa reaksi kimia, baik dalam sintesis organik, degradasi polutan, maupun konversi energi.

## Reaksi Sintesis Organik

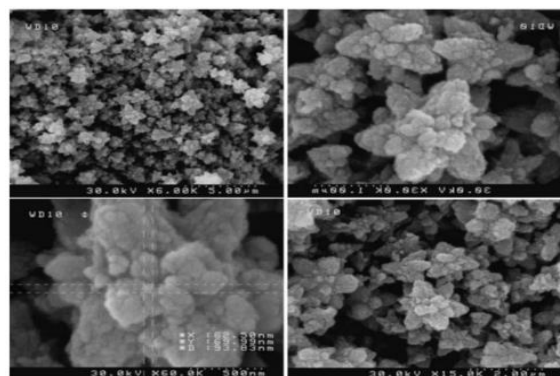
Penggunaan katalis ZnO memperlihatkan performa tinggi untuk sintesis senyawa heterosiklik. Reaksi pembentukan thiazine yang melibatkan ZnO berlangsung hanya selama 5–15 menit dan mampu menghasilkan rendemen hingga 91% pada kondisi optimal. Mekanisme reaksi berjalan secara efisien melalui aktivasi gugus karbonil oleh situs aktif permukaan ZnO, yang kemudian mempercepat pembentukan ikatan C–S dan C=N secara selektif. Hal ini menunjukkan bahwa ZnO tidak hanya efektif dalam mempercepat reaksi tetapi juga selektif dalam mengarahkan produk ke hasil yang diinginkan dengan efisiensi tinggi, menjadikannya sangat berguna untuk sintesis cepat senyawa bioaktif yang kompleks (Dhankar et al., 2024).



**Gambar 1.** Skema sintesis thiazine menggunakan ZnO

Skema ini menggambarkan jalur reaksi multikomponen antara aldehida, anilin, dan merkaptoasetat dalam pembentukan cincin thiazine dengan bantuan katalis ZnO. ZnO berperan sebagai asam Lewis yang mengaktivasi gugus karbonil, mempercepat pembentukan ikatan C–S dan C=N secara selektif. Proses ini berlangsung cepat pada suhu ruang, menunjukkan efisiensi tinggi dan kesesuaian metode dengan prinsip kimia hijau.

Pemanfaatan ZnO hasil biosintesis dari bunga violet untuk reaksi pembukaan cincin epoksida juga menunjukkan hasil regioselektif yang dominan. Efektivitas permukaan ZnO sebagai pusat asam Lewis mendukung terjadinya serangan nukleofilik oleh alkohol atau amina pada posisi yang tepat. Struktur morfologi ZnO berbentuk heksagonal berukuran nano ikut memperkuat kinerja katalitik dengan memberikan eksposur situs aktif yang optimal. Reaksi berlangsung dalam kondisi ringan dan ramah lingkungan, sehingga sesuai dengan prinsip kimia hijau. Hal ini menjadikan ZnO sebagai alternatif katalis anorganik yang



sangat menarik dalam pengembangan teknologi katalitik berkelanjutan (Dormanesh & Mohseni, 2021).

**Gambar 2.** Citra SEM morfologi ZnO hasil biosintesis menggunakan ekstrak bunga violet

Citra SEM memperlihatkan struktur ZnO berbentuk kristal bunga berduri (*flower-like*) dengan permukaan teratur dan ukuran partikel berkisar pada skala nanometer. Morfologi ini mendukung luas permukaan aktif tinggi dan eksposur situs katalitik yang optimal, menjadikan ZnO ideal untuk aplikasi fotokatalisis dan sintesis organik ringan. Partikel hasil biosintesis menggunakan ekstrak *Viola odorata* ini menunjukkan distribusi merata dan struktur kristalin yang baik.

Penelitian lain, aplikasi ZnO dalam reaksi antioksidan dan antimikroba dari senyawa turunan *pyrazole* juga diperlihatkan. Aktivitas ZnO yang tinggi dalam kondisi suhu ruang serta kemampuan untuk digunakan ulang hingga empat kali menunjukkan kestabilan dan efisiensi yang unggul dalam sintesis organik ringan (Alahdal et al., 2022). Selain itu, Matei juga menunjukkan ZnO yang dikombinasikan dengan  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  menghasilkan interaksi sinergis yang sangat mendukung aktivitas katalitiknya untuk sintesis senyawa heterosiklik pada kondisi pencahayaan rendah (Matei et al., 2023).

Penerapan MOF berbasis Zr seperti MOF-808 memberikan kontribusi besar dalam reaksi polimerisasi etilena. Gugus Zr-alkil yang tertanam di dalam node MOF menciptakan lingkungan katalitik yang terlindungi, memungkinkan kontrol spasial terhadap molekul reaktan. Pori-pori yang terdistribusi merata mendukung laju difusi monomer dan meningkatkan efisiensi reaksi secara keseluruhan. Keunggulan ini membuktikan bahwa MOF tidak hanya berfungsi sebagai penyangga, tetapi juga berperan aktif dalam proses katalitik kompleks. Selain itu, keberadaan situs aktif yang terstruktur secara presisi di dalam MOF juga memungkinkan reaksi berjalan dengan selektivitas tinggi terhadap produk tertentu (Liu et al., 2022).

MOF juga menunjukkan potensi besar dalam produksi biodiesel. MOF berbasis logam kalsium dan tembaga digunakan dalam reaksi esterifikasi dan transesterifikasi minyak limbah, dengan hasil konversi mencapai lebih dari 84%. Ketahanan struktural MOF yang tinggi menjadikannya katalis yang bisa digunakan berulang tanpa kehilangan aktivitas yang signifikan (Jamila et al., 2020). Lebih jauh, MOF dalam penelitian Iqbal et al. (2024) menunjukkan bahwa modifikasi permukaan dan

penambahan ion logam dapat meningkatkan performa katalitik MOF untuk reaksi-reaksi organik, termasuk transformasi gugus fungsi pada substrat aromatik.

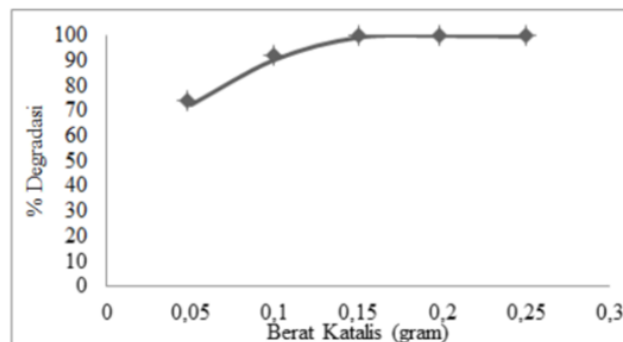
Penggunaan WO<sub>3</sub> belum banyak dilaporkan dalam pembentukan ikatan karbon baru, namun potensinya tampak dari kemampuannya mengoksidasi fenol melalui jalur fotokatalitik. Oksidasi ini berjalan melalui pembentukan spesies radikal aktif yang dapat menyerang cincin aromatik, dan menjadi dasar untuk eksplorasi lebih lanjut reaksi redoks organik. Aktivitas ini menjadikan WO<sub>3</sub> sebagai kandidat kuat dalam pengembangan katalis oksidasi selektif di masa mendatang, terutama untuk senyawa aromatik sederhana hingga kompleks (Bairamis & Konstantinou, 2021).

### Fotokatalisis dan Degradasi Polutan

Selain untuk reaksi organik, pemanfaatan katalis hijau banyak dimanfaatkan dalam proses fotokatalitik yang berperan dalam pemurnian air dan pengolahan limbah. Pemanfaatan ZnO biosintetik dari daun *P. austroarabica* menunjukkan kemampuan tinggi untuk mendegradasi metilen biru (MB) dengan efisiensi lebih dari 90% dalam waktu di bawah 15 menit. Ukuran partikel ZnO yang kecil (sekitar  $13,9 \pm 4,3$  nm) berkontribusi besar terhadap luas permukaan spesifik dan mempermudah penyerapan cahaya, meningkatkan pembentukan pasangan elektron-hole. Selain sebagai fotokatalis, ZnO juga sensitif terhadap Cr(VI), dengan batas deteksi sangat rendah hingga 1,3 nM. Keunggulan ini menunjukkan bahwa ZnO bersifat multifungsi, baik sebagai agen fotokatalitik maupun material sensorik. Oleh karena itu, ZnO memiliki potensi luas dalam pemurnian air, deteksi logam berat, dan sistem fotodegradasi limbah industri (Alahdal et al., 2022).

ZnO juga digunakan dalam degradasi senyawa DBT dalam proses oksidatif yang ramah lingkungan. Trisunaryanti melaporkan penggunaan ZnO yang didukung karbon aktif menghasilkan efisiensi degradasi sulfur lebih dari 93%, menjadikan sistem ini sebagai alternatif yang baik dari proses hidrotreating konvensional (Trisunaryanti et al., 2021). Penerapan WO<sub>3</sub> yang dikombinasikan dengan tanah pemucat bekas (SBE) menunjukkan performa luar biasa dalam degradasi MB. Grafik waktu reaksi menunjukkan efisiensi degradasi meningkat drastis seiring peningkatan dosis katalis hingga mencapai 0,15 g, di mana efisiensi maksimum tercapai pada 99,12% dalam 15 menit. Grafik ini memperlihatkan bahwa WO<sub>3</sub>-SBE tidak hanya aktif, tetapi juga cepat dalam memfasilitasi pemutusan ikatan senyawa pewarna, dengan menunjukkan bahwa titik optimum efisiensi dicapai tanpa memerlukan dosis berlebih (Wilsoma et al., 2019).

**Gambar 3.** Grafik degradasi MB vs berat katalis WO<sub>3</sub>-SBE



Grafik terlihat bahwa saat massa katalis WO<sub>3</sub>-SBE ditingkatkan dari 0,05 g sampai 0,15 g, kemampuan untuk menguraikan metilen biru juga meningkat dan mencapai efisiensi hampir sempurna (mendekati 100%). Namun, ketika massa katalis ditambah lebih dari 0,15 g, tidak terjadi peningkatan kinerja yang berarti lagi. Hal ini mengindikasikan bahwa kondisi terbaik sudah diperoleh pada massa 0,15 g dan telah terjadi kejenuhan dalam proses fotokatalisis.

Pemakaian WO<sub>3</sub> untuk penguraian antibiotik amoksisilin juga menunjukkan efisiensi tinggi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa hampir seluruh senyawa amoksisilin berhasil terdegradasi (99,99%), meskipun hanya sekitar 35,82% karbon organik terlarut yang termineralisasi. Skema reaksi menjelaskan pembentukan radikal hidroksil dan superoksida sebagai jalur utama fotodegradasi senyawa, memperlihatkan mekanisme pembangkitan dan transfer muatan yang mendukung reaksi oksidatif selektif (Nguyen et al., 2019).

### Energi dan Lingkungan

Tidak hanya berfungsi dalam skala laboratorium, ketiga katalis juga berpotensi besar dalam teknologi energi bersih dan pengolahan limbah industri secara berkelanjutan. MOF digunakan dalam produksi biodiesel dari minyak bekas dan konversi CO<sub>2</sub> menjadi bahan bakar sintetis. Katalis ini tidak hanya menunjukkan konversi tinggi, tetapi juga stabil setelah beberapa siklus penggunaan (Jamila et al., 2020). Model statistik tiga dimensi menunjukkan keterkaitan signifikan antara suhu, rasio reaktan, dan efisiensi reaksi. Selain itu, struktur MOF yang dapat disesuaikan memungkinkan penggabungan logam aktif untuk memperluas aplikasi pada penyimpanan dan konversi energi.

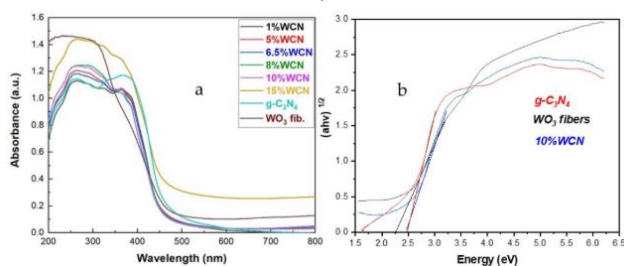
Salah satu tipe MOF, yaitu ZIF-8 telah digunakan secara luas untuk elektroreduksi CO<sub>2</sub> menjadi gas sintetis seperti CO dan H<sub>2</sub>. Struktur nanosheet-nya meningkatkan eksposur situs aktif, mempercepat transfer muatan dan meningkatkan efisiensi produksi gas. Dalam kondisi potensial listrik yang optimal, rasio CO/H<sub>2</sub> yang dihasilkan dapat dikendalikan dengan baik (Bagheri et al., 2024).

MOF juga digunakan untuk aplikasi penyimpanan energi, seperti superkapasitor dan baterai, karena sifat konduktivitasnya yang dapat ditingkatkan melalui modifikasi ligan atau doping logam. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa MOF dengan struktur konjugasi  $\pi$  yang diperluas memiliki kemampuan

kapasitas penyimpanan yang menjanjikan untuk aplikasi energi berkelanjutan.

ZnO menunjukkan kinerja tinggi dalam desulfurisasi bahan bakar melalui ODS menggunakan  $H_2O_2$ , dengan efisiensi hingga 93% dalam 2 jam (Trisunaryanti et al., 2021). Dalam sistem ini, ZnO yang didukung karbon aktif tidak hanya berfungsi sebagai pusat oksidatif tetapi juga sebagai penopang untuk stabilitas jangka panjang. Selain itu, ZnO juga telah digunakan sebagai elektrode aktif dalam aplikasi sel surya berbasis dye-sensitized solar cell (DSSC), yang mendemonstrasikan efisiensi konversi cahaya cukup tinggi karena sifat semikonduktornya.

$WO_3$  digunakan untuk pengolahan limbah industri seperti POME. Katalis ini menunjukkan hasil terbaik pada suhu sintesis  $220^\circ C$  dengan penurunan COD dan warna secara signifikan (Uli et al., 2025). Selain itu,  $WO_3$  dalam struktur heterojunction dengan  $g-C_3N_4$  mampu meningkatkan pemisahan muatan dan memperpanjang waktu hidup pasangan elektron-hole, yang menguntungkan dalam proses fotokatalitik pemurnian air dan produksi hidrogen. Dengan memanfaatkan cahaya tampak,  $WO_3$  juga dapat digunakan dalam sistem fotolisis air untuk menghasilkan gas hidrogen sebagai bentuk energi bersih (Bairamis & Konstantinou, 2021).



**Gambar 4.** Spektrum UV-Vis dan Grafik Tauc Plot  $WO_3/g-C_3N_4$  dengan Variasi Komposisi WCN

Grafik (a) memperlihatkan spektrum absorpsi UV-Vis dari campuran  $WO_3/g-C_3N_4$  dengan berbagai perbandingan (disebut WCN). Terlihat bahwa semakin banyak  $g-C_3N_4$  yang ditambahkan, material tersebut semakin mampu menyerap cahaya tampak. Sementara itu, grafik (b) berupa *Tauc plot* yang memperlihatkan bagaimana celah pita energi mengecil dari  $WO_3$  asli hingga mencapai nilai yang lebih kecil pada material gabungan 10%WCN (sekitar 2,3 eV). Penurunan celah pita ini mengindikasikan bahwa material gabungan tersebut lebih efektif dalam menggunakan cahaya tampak untuk proses fotokatalisis.

Secara keseluruhan, kontribusi ketiga jenis katalis dalam bidang energi terbarukan semakin berkembang. MOF menunjukkan fleksibilitas paling baik untuk reaksi kimia konversi maupun penyimpanan energi. ZnO, karena sifat semikonduktor dan stabilitasnya, sangat cocok untuk aplikasi energi surya dan pengolahan bahan bakar.  $WO_3$  unggul dalam reaksi fotokatalitik berbasis cahaya tampak untuk konversi energi dan pengolahan air limbah yang menghasilkan sumber energi alternatif.

## Efisiensi, Keunggulan, dan Tantangan

Berdasarkan aplikasi katalisis yang telah dibahas, performa ZnO sebagai katalis menonjol dari segi efisiensi reaksi, kecepatan, serta kestabilan penggunaan ulang. Reaksi pembentukan thiazine dan pembukaan epoksida berlangsung dalam waktu singkat dengan hasil tinggi, menunjukkan aktivitas yang kuat dalam kondisi ringan. Katalis ini juga dapat digunakan kembali beberapa kali tanpa penurunan performa berarti, seperti terlihat dalam reaksi sintesis turunan pyrazole. Ukuran partikel kecil dan luas permukaan tinggi memberikan aksesibilitas terhadap situs aktif, sementara pendekatan biosintetik seperti penggunaan ekstrak tanaman menambah nilai ramah lingkungan. Tantangan utama ZnO terletak pada kecenderungan aglomerasi selama siklus reaksi, yang dapat mengurangi efisiensi permukaan aktif (Alahdal et al., 2022; Dhankar et al., 2024; dan Dormanesh & Mohseni, 2021).

MOF menunjukkan fleksibilitas luar biasa baik dalam pilihan logam pusat maupun desain pori. Katalis ini efektif dalam berbagai aplikasi seperti sintesis biodiesel, polimerisasi, serta konversi  $CO_2$ . Struktur nanosheet pada ZIF-8 misalnya, memperlihatkan performa tinggi dalam elektrokatalisis karena eksposur permukaan besar dan jalur difusi pendek. Selain multifungsi, MOF juga cukup stabil selama beberapa kali siklus. Meskipun demikian, kestabilan terhadap kelembaban dan suhu tinggi masih menjadi isu utama. Pengembangan MOF tahan air dan termal menjadi fokus utama dalam aplikasi industri skala besar (Bagheri et al., 2024; Iqbal et al., 2024).

$WO_3$  memiliki keunggulan dalam fotodegradasi karena mampu menyerap cahaya tampak. Sistem  $WO_3$ -SBE dan  $WO_3$ - $g-C_3N_4$  memperlihatkan efisiensi degradasi tinggi dan waktu reaksi cepat. Katalis ini tetap stabil dalam lingkungan kompleks seperti air limbah, sehingga cocok untuk aplikasi skala besar. Namun, jika suhu sintesis terlalu tinggi, terjadi sintering yang menurunkan luas permukaan dan aktivitas fotokatalitik (Wilsoma et al., 2019; Uli et al., 2025).

## Arah Penelitian Selanjutnya

Berdasarkan pada hasil studi dan tantangan yang masih ada, sebagai inovasi dalam pengembangan katalis hijau di masa depan kombinasi jenis katalis menjadi sasaran yang menjanjikan, seperti kombinasi MOF-ZnO dan  $WO_3$ -MOF. Pendekatan inovatif ini mampu meningkatkan kinerja katalitik dengan memanfaatkan efek sinergis dari karakteristik kimia masing-masing bahan. Di samping itu, implementasi dalam skala besar dan pertimbangan ekonomis merupakan aspek krusial dalam menciptakan katalis hijau yang dapat diterapkan secara nyata dan berkelanjutan. Berbagai terobosan juga difokuskan untuk menggunakan katalis dalam bidang pengolahan air bersih, teknologi energi terbarukan, dan aplikasi dalam nanomedicine, yang merupakan tantangan sekaligus peluang strategis ke depan. Penggabungan material dan penyempurnaan prosesnya diharapkan dapat menciptakan sistem katalitik yang lebih optimal.

## Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan :

1. Kajian komprehensif terhadap ZnO, WO<sub>3</sub>, dan MOFs mengungkap bahwa ketiga katalis hijau ini memiliki sifat fisiko-kimia unik dan performa katalitik yang menjanjikan dalam aplikasi lingkungan dan energi. ZnO menunjukkan efisiensi tinggi dalam fotodegradasi polutan (≥90%), WO<sub>3</sub> unggul dalam reaksi berbasis cahaya tampak, sementara MOFs berperan strategis dalam konversi CO<sub>2</sub> dan produksi biodiesel berkat struktur berpori dan luas permukaannya.

2. Kombinasi material (MOF-ZnO/WO<sub>3</sub>-MOF) dan optimasi metode sintesis berkelanjutan menjadi solusi inovatif dalam menyelesaikan tantangan utama seperti aglomerasi (ZnO), stabilitas (MOFs), dan sintering (WO<sub>3</sub>) dan menjadi inovasi pengembangan katalis hijau yang lebih efisien, stabil, dan ramah lingkungan untuk aplikasi industri skala besar. Dengan demikian, sintesis yang berkelanjutan, karakterisasi menyeluruh, dan pemanfaatan sinergis antar material menjadi kunci dalam mewujudkan sistem katalitik hijau yang efektif untuk masa depan

## Daftar Pustaka

- Adelia, A., & Asri, N. P., 2021, Sintesis Katalis Komposit ZnO / Multi-Walled Carbon Nanotubes (MWCNTs) Tersulfonasi Untuk Transesterifikasi Minyak Kesambi (*Schleichera oleosa*). *Seminar Nasional Sains Dan Teknologi Terapan IX*, 443–445.
- Alahdal, F. A. M., Qashqoosh, M. T. A., Manea, Y. K., Salem, M. A. S., Khan, A. M. T., & Naqvi, S., 2022, Eco-friendly Synthesis of Zinc Oxide Nanoparticles as Nanosensor, Nanocatalyst and Antioxidant Agent Using Leaf Extract of *P. Austroarabica*. *OpenNano*, 8, 100067. <https://doi.org/10.1016/j.onano.2022.100067>
- Ariyanti, D. S., 2012, *Pengaruh Penambahan Oksidator H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> terhadap Degradasi Zat Warna Methyl Orange dengan Fotokatalis ZnO-Zeolit*. Universitas Negeri Semarang.
- Bagheri, M., Lourenço, M. A. O., Dangbegnon, J. K., Monti, N. B. D., Mafra, L., Pirri, F., & Zeng, J., 2024, Green Synthesis of MOF-Based Materials for Electrochemical Reduction of Carbon Dioxide. *ChemSusChem*, 18, e202400684. <https://doi.org/10.1002/cssc.202400684>
- Bairamis, F., & Konstantinou, I., 2021, WO<sub>3</sub> Fibers/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Z-Scheme Heterostructure Photocatalysts for Simultaneous Oxidation/Reduction of Phenol/Cr(VI) in Aquatic Media. *Catalysts*, 11(7), 792. <https://doi.org/10.3390/catal11070792>
- Desadria, R., Yusnimar, & Helianty, S., 2016, Pengujian Katalis ZnO Presipitan Zink Karbonat pada Transesterifikasi CPO FFA Tinggi. *JOM FTEKNIK*, 3(2).
- Dhankar, R. P., Bankar, V. V., & Aswale, M. S., 2024, A Rapid and Effective Catalytic Pathway for the Synthesis of Thiazine Derivatives Employing ZnO Nanoparticles. *Environment Conservation Journal*, 25(2), 493–499.
- Dormanesh, R., & Mohseni, S., 2021, Green Synthesis of Zinc Oxide Nanoparticles and Their Application in Ring Opening of Epoxides. *Progress in Chemical and Biochemical Research*, 4(4), 381–392.
- Hidayat, R., Saputra, A., & Fitria, M., 2022, Material MOFs (Metal Organic Frameworks) dalam Aplikasi Fotokatalisis: Mini Review. *Indonesian Journal of Chemical Analysis*, 5(2), 120–137. <https://doi.org/10.20885/ijca.vol5.iss2.art7>
- Iqbal, B., Saleem, M., Arshad, S. N., Rashid, J., Hussain, N., & Zaheer, M., 2024, One-pot Synthesis of Heterobimetallic Metal-Organic Frameworks (MOF) for Multifunctional Catalysis. *Chemistry - A European Journal*. <https://doi.org/10.1002/chem.201901939>
- Jamila, U., Khoja, A. H., Liaquat, R., Naqvi, S. R., Wan Omar, W. N. N., & Amin, N. A. S., 2020, Copper and Calcium-Based Metal Organic Framework (MOF) Catalyst for Biodiesel Production from Waste Cooking Oil: A Process Optimization Study. *Energy Conversion and Management*, 215, 112934. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112934>
- Liu, J., Goetjen, T. A., Wang, Q., Knapp, J. G., Wasson, M. C., Yang, Y., Syed, Z. H., Delferro, M., Notestein, J. M., Farha, O. K., & Hupp, J. T., 2022, MOF-Enabled Confinement and Related Effects for Chemical Catalyst Presentation and Utilization. *Chemical Society Reviews*. <https://doi.org/10.1039/x0xx00000x>
- Matei, E., Șăulean, A. A., Râpă, M., Constandache, A., Predescu, A. M., Coman, G., Berbecaru, A. C., & Predescu, C., 2023, ZnO nanostructured matrix as nexus catalysts for the removal of emerging pollutants. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 114779–114821. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-30713-3>
- Nguyen, T. T., Nam, S. N., Son, J., & Oh, J., 2019, Tungsten Trioxide (WO<sub>3</sub>)-Assisted Photocatalytic Degradation of Amoxicillin by Simulated Solar Irradiation. *Scientific Reports*, 9, 9349. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45703-1>
- Ramadhanti, Y., 2023, Peran Katalis Dalam Reaksi Kimia: Mekanisme Dan Aplikasi. *Hexatech: Jurnal Ilmiah Teknik*, 2(2).
- Trisunaryanti, W., Sumbogo, S. D., Novianti, S. A., Fatmawati, D. A., Ulfa, M., & Nikmah, Y. L., 2021, ZnO-Activated Carbon Blended as a Catalyst for Oxidative Desulfurization of Dibenzothiophene. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 16(4), 881–887. <https://doi.org/10.9767/brec.16.4.11797.881-887>
- Uli, R., Saputera, W. H., Sasongko, D., & Devianto, H., 2025, Pengembangan Katalis Berbasis Tungsten Oksida (WO<sub>3</sub>) untuk Degradasi Limbah Palm Oil Mill Effluent (POME) dengan Teknologi Fotokatalitik. *Jurnal Teknik*, 24(1), 34–42.
- Wilsoma, Hindryawati, N., & Subagyono, R. D. J. N., 2019, Studi Variasi Berat Katalis WO<sub>3</sub>-SBE dalam Proses

Sonokatalitik Methylene Blue. *Jurnal Atomik*, 4(2), 102–106.

Xu, Y., Yan, H., & Chen, T., 2023, Application of ZnO/WO<sub>3</sub> Composite Nanofiber Photocatalysts in Textile

Wastewater Treatment. *Separations*, 10(6), 339.  
<https://doi.org/10.3390/separations10060339>