



## Review: Fotokatalis Anorganik Berbasis TiO<sub>2</sub> dan ZnO untuk Degradasi Polutan

Laila Nur Asih, Agie Chairunnisa

Program Studi Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Negeri Sunan Kalijaga, Yogyakarta  
Email: lailanurasih@gmail.com

**Abstrak.** Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis berbagai metode sintesis dan mengkaji aplikasi fotokatalis anorganik berbasis TiO<sub>2</sub> dan ZnO dalam proses degradasi berbagai jenis polutan, serta memodifikasi material fotokatalis yang telah dikembangkan dalam literatur dan memberikan pengaruhnya terhadap efisiensi degradasi. Penelitian dilakukan melalui telaah sistematis terhadap 10 jurnal ilmiah relevan. Berbagai metode sintesis seperti sol-gel, reaksi solid-state, doping logam dan non-logam, dan pendekatan sintesis hijau menggunakan material alam telah digunakan untuk menghasilkan fotokatalis dengan karakteristik morfologi dan struktur kristal yang baik. Kombinasi material seperti TiO<sub>2</sub>-ZnO, TiO<sub>2</sub>/Zeolit, dan doping logam Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/Ni menunjukkan peningkatan efisiensi degradasi hingga >90%, tergantung pada jenis polutan dan kondisi reaksi seperti pH, intensitas cahaya, dan waktu penyinaran. Polutan yang berhasil didegradasi meliputi pewarna sintetis, logam berat, antibiotik, dan senyawa farmasi. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa modifikasi bahan struktural dapat meningkatkan kinerja fotokatalis secara signifikan dan memperluas penerapannya dalam pengolahan limbah ramah lingkungan.

**Kata kunci:** fotokatalis, TiO<sub>2</sub>, ZnO, degradasi polutan, sintesis, modifikasi, efisiensi

**Abstract.** This review aims to analyze various synthesis methods and evaluate the application of TiO<sub>2</sub> and ZnO-based inorganic photocatalysts for the degradation of various pollutants. This review also attempts to explore the modification strategies applied to TiO<sub>2</sub> and ZnO-based materials as reported in the literature, and to assess their impact on the degradation efficiency. A systematic literature review was conducted on ten relevant research articles. Synthesis approaches such as sol-gel, solid-state reactions, metal and non-metal doping, and green synthesis using plant extracts, were used to obtain photocatalysts with desired crystallinity and nanostructured morphology. Composite materials, including TiO<sub>2</sub>-ZnO, TiO<sub>2</sub>/zeolite, and Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/Ni-doped TiO<sub>2</sub>, showed enhanced photocatalytic performance, with degradation efficiencies exceeding 90% depending on the type of pollutant and reaction conditions (pH, irradiation time, and light source). Target pollutants include synthetic dyes, heavy metals, pharmaceutical compounds, and antibiotics. This study highlights the importance of structural modification in enhancing photocatalytic activity and expanding environmental applications of TiO<sub>2</sub> and ZnO-based materials.

**Keywords:** photocatalyst, TiO<sub>2</sub>, ZnO, pollutant degradation, synthesis method, material modification, efficiency

This publication is licensed under a



## Pendahuluan

Pencemaran udara oleh bahan organik seperti pewarna tekstil, antibiotik, dan logam berat merupakan ancaman serius bagi lingkungan dan kesehatan manusia (Gopinath *et al.*, 2020; Bai *et al.*, 2022). Zat-zat tersebut bersifat toksik, sulit terurai secara alami, dan dapat menimbulkan dampak jangka panjang terhadap ekosistem perairan (Mohamed *et al.*, 2018; Sanjeev Kumar *et al.*, 2020). Untuk mengatasi permasalahan tersebut, teknologi fotokatalisis telah banyak dikembangkan karena kemampuannya dalam mengubah polutan menjadi senyawa yang tidak berbahaya dengan bantuan cahaya dan katalis semikonduktor seperti TiO<sub>2</sub> dan ZnO (Rajendar *et al.*, 2017; Jamil *et al.*, 2023).

Penelitian sebelumnya telah memanfaatkan TiO<sub>2</sub> dan ZnO sebagai fotokatalis karena memiliki kestabilan dan efisiensi yang tinggi dalam kondisi laboratorium. Namun, penggunaannya masih terbatas karena aktivitasnya yang rendah di bawah cahaya tampak dan rekombinasi pasangan elektron-hole yang cepat (Aziz *et al.*, 2023; Devi & Maharani, 2023; Pradipta & Irunsa, 2022; Agustina *et al.*, 2023; Ramadhini *et al.*, 2023). Studi-studi ini juga umumnya masih berfokus pada satu jenis polutan atau

satu jenis teknik modifikasi. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa TiO<sub>2</sub> memiliki kelemahan berupa keterbatasan penyerapan cahaya hanya pada daerah UV dan rekombinasi pasangan elektron-hole yang cepat (Aziz *et al.*, 2023). Oleh karena itu, banyak penelitian yang berupaya memodifikasi struktur material tersebut, antara lain dengan mendoping logam, nonlogam, atau menggabungkan dengan material lain seperti zeolit dan karbon aktif (Pradipta & Irunsa, 2022; Agustina *et al.*, 2023).

Fokus utamanya tidak hanya pada efektivitas fotokatalitik, tetapi juga pada teknik karakterisasi material dan diversifikasi aplikasi terhadap berbagai jenis polutan. Bahan semikonduktor seperti TiO<sub>2</sub> dan ZnO banyak dipelajari karena stabil, murah, dan relatif mudah diperoleh. Tujuan dari kajian ini adalah untuk menganalisis berbagai metode sintesis dan mengkaji aplikasi fotokatalis TiO<sub>2</sub> dan ZnO dalam proses degradasi berbagai jenis polutan. Selain itu, untuk memodifikasi material fotokatalis anorganik berbasis TiO<sub>2</sub> dan ZnO yang telah dikembangkan dalam literatur, serta mengevaluasi pengaruhnya terhadap efisiensi degradasi polutan.

Kebaruan penelitian ini terletak pada pendekatan integratif terhadap 10 jurnal ilmiah yang tidak hanya mengulas modifikasi struktur semikonduktor tetapi juga mengeksplorasi material alam sebagai prekursor dan pendukung fotokatalis. Penelitian ini juga menekankan pentingnya karakterisasi tingkat lanjut seperti XRD, SEM, FTIR, dan UV-Vis dalam menentukan kualitas dan efektivitas fotokatalis (Maharani *et al.*, 2023; Pradipta & Irunsa, 2022; Aziz *et al.*, 2023; Agustina *et al.*, 2023; Ramadhini *et al.*, 2023). Penelitian ini mencakup berbagai pendekatan dalam pengembangan fotokatalis TiO<sub>2</sub> dan ZnO, meliputi doping logam, sintesis hijau menggunakan biomaterial, dan pembentukan komposit dengan bahan pendukung (Devi & Maharani, 2023; Pradipta & Irunsa, 2022; Aziz *et al.*, 2023; Maharani *et al.*, 2023; Agustina *et al.*, 2023). Pencemaran air akibat pewarna sintetis, logam berat, dan senyawa antibiotik merupakan masalah serius yang belum sepenuhnya teratasi secara efisien (Ramadhini *et al.*, 2023). Penggunaan metode fotokatalisis telah terbukti efektif sebagai solusi teknologi ramah lingkungan untuk mendegradasi senyawa berbahaya tersebut (Devi & Maharani, 2023).

## Metode Penelitian

Jenis penelitian yang digunakan adalah studi pustaka dengan pendekatan deskriptif-kualitatif. Sumber data berupa sepuluh artikel jurnal ilmiah yang diterbitkan dalam sepuluh tahun terakhir, baik dari jurnal nasional terakreditasi maupun jurnal internasional bereputasi. Artikel dipilih berdasarkan kriteria sebagai berikut: (1) fokus pada material fotokatalis TiO<sub>2</sub> dan ZnO, (2) adanya modifikasi atau variasi metode sintesis, (3) menyertakan hasil karakterisasi material seperti XRD, SEM, FTIR, atau UV-Vis DRS, dan (4) pengujian aktivitas katalis terhadap polutan organik, anorganik, atau mikroorganisme. Pengumpulan data dilakukan dengan menelusuri berbagai basis data ilmiah seperti *Google Scholar*, DOAJ, dan situs jurnal resmi. Setiap artikel dideskripsikan berdasarkan tujuan penelitian, metode sintesis dan modifikasi, hasil karakterisasi material, efisiensi fotokatalitik, dan jenis polutan yang digunakan sebagai objek uji.

Data dianalisis secara kualitatif melalui sintesis tematik hasil penelitian sejenis. Proses ini meliputi: (1) menganalisis berbagai metode sintesis, (2) mengkaji aplikasi fotokatalis TiO<sub>2</sub> dan ZnO dalam proses degradasi berbagai jenis polutan, (3) memodifikasi material fotokatalis anorganik berbasis TiO<sub>2</sub> dan ZnO yang telah dikembangkan dalam literatur, dan (4) mengevaluasi pengaruhnya terhadap efisiensi degradasi polutan. Hasil analisis digunakan untuk menyusun diskusi sistematis tentang tren, efektivitas, dan inovasi dalam pengembangan fotokatalis anorganik berbasis TiO<sub>2</sub> dan ZnO.

## Hasil dan Pembahasan

### Metode Sintesis dan Aplikasi Fotokatalis TiO<sub>2</sub> dan ZnO

Setelah melakukan penelusuran literatur, ditemukan 10 jurnal yang memenuhi kriteria, yaitu fokus pada material fotokatalis TiO<sub>2</sub> dan ZnO serta adanya modifikasi atau variasi metode

sintesis. Berdasarkan data pada **Tabel 1**, jurnal-jurnal ini diterbitkan dalam rentang waktu 2016 - 2023.

**Tabel 1.** Informasi Umum

Tahun	Penulis	Metode	Aplikasi
2022	Pradipta & Irunsa	Sol-gel	Fotoreduksi
2016	Anggraini & Angeliasari	Fotokatalisis	Fotoreduksi, Degradasi Parsial
2023	Wibowo <i>et al</i>	Fotokatalisis	Fotodegradasi
2021	Apriani & Gunlazuardi	Fotokatalisis	Degradasi Rhodamin B
2023	Ramadhini <i>et al</i>	Fotokatalisis	Degradasi Logam Berat
2016	Ridho	Fotokatalisis	Fotoreduksi
2023	Ayunda & Maharani	Sol-gel	Sintesis Komposit Nanopartikel
2017	Anggraini & Pujilestari	Fotokatalisis	Fotodegradasi, Fotoreduksi
2023	Aziz <i>et al</i>	Reaksi Padatan	Degradasi Metilen Biru
2019	Listiani <i>et al</i>	Sol-gel	Fotokatalisis antibakteri

Berdasarkan **tabel 1**, berbagai metode sintesis telah digunakan untuk memodifikasi bahan fotokatalis berbasis TiO<sub>2</sub> dan ZnO guna meningkatkan efektivitas degradasi polutan. Metode yang paling umum adalah sol-gel dan fotokatalisis baik dengan atau tanpa doping logam/nonlogam serta sintesis hijau menggunakan bahan alami. Metode sol-gel merupakan proses yang melibatkan transisi dari larutan (sol) ke jaringan padat (gel), kemudian dikeringkan dan dikalsinasi menjadi bahan padat (Pradipta & Irunsa, 2022). Metode sol-gel merupakan teknik sintesis kimia basah yang didasarkan pada prinsip transformasi dari larutan (sol) menjadi jaringan padatan (gel), kemudian dikeringkan dan dikalsinasi untuk membentuk material anorganik. Proses ini diawali dengan pencampuran prekursor logam dengan pelarut dan udara, dilanjutkan dengan reaksi hidrolisis dan kondensasi yang menghasilkan partikel koloid, membentuk gel, kemudian dikeringkan dan dipanaskan untuk memperoleh struktur kristal yang stabil. Keunggulan metode ini antara lain kemampuannya menghasilkan partikel berukuran nano dengan kemurnian tinggi, kontrol komposisi yang tepat, proses yang dapat dilakukan pada suhu rendah, dan dikembangkan untuk dikembangkan secara ramah lingkungan melalui sintesis hijau. Sol-gel juga cocok untuk berbagai bentuk produk seperti serbuk, film tipis, dan pelapis, sehingga ideal untuk aplikasi fotokatalis (Ayunda & Maharani, 2023; Listiani *et al*, 2019).

Metode fotokatalisis merupakan teknik pengolahan polutan dengan menggunakan fotokatalis dan cahaya sebagai energi untuk mempercepat reaksi redoks, sehingga polutan dapat diurai

menjadi senyawa yang aman bagi lingkungan. Metode-metode tersebut sering diaplikasikan untuk fotoreduksi maupun fotodegradasi. (Anggraini & Angliasari, 2016; Wibowo *et al*, 2023; Apriani & Gunlazuardi, 2021). Metode fotokatalisis didasarkan pada prinsip dasar reaksi kimia yang dipercepat oleh fotokatalis dengan bantuan cahaya (biasanya UV atau tampak). Ketika cahaya diserap oleh fotokatalis seperti TiO<sub>2</sub> atau ZnO, terjadi eksitasi elektron dari pita valensi ke pita konduksi, membentuk pasangan elektron-hole (e<sup>-</sup>/h<sup>+</sup>). Pasangan ini memicu pembentukan radikal bebas (seperti OH dan O<sub>2</sub><sup>-</sup>) yang sangat reaktif dan mampu mengoksidasi atau mereduksi berbagai polutan organik, anorganik, dan bahkan mikroorganisme menjadi senyawa yang tidak berbahaya seperti CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O. Keunggulan metode ini antara lain: efisiensi tinggi dalam menguraikan polutan tanpa memerlukan bahan kimia tambahan, ramah lingkungan, dan dapat digunakan untuk berbagai jenis polutan seperti zat warna, logam berat, antibiotik, dan bakteri. Selain itu, fotokatalisis tidak menghasilkan residu yang berbahaya dan dapat dilakukan pada kondisi lingkungan yang relatif ringan (suhu dan tekanan atmosfer). Oleh karena itu, metode ini banyak digunakan dalam pengolahan limbah udara dan teknologi konservasi lingkungan berbasis energi cahaya Ramadhini *et al*, 2023; Ridho, 2016; Anggraini & Pujilestari, 2017).

Contohnya, penelitian oleh Pradipta & Irunsa (2022), nanokomposit dibuat melalui teknik sol-gel. Pemanfaatan nanokomposit TiO<sub>2</sub> yang dimodifikasi dengan doping Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> dan Ni untuk fotoreduksi ion perak telah berhasil dilakukan. Analisis struktur, sifat optik, dan sifat magnetik dilakukan dengan menggunakan analisis XRD, DRUV-Vis, FTIR, dan VSM. Sementara penelitian oleh Wibowo *et al* (2023), menggunakan metode fotokatalisis untuk pengolahan air limbah yang mengandung senyawa organik. Dalam penelitian ini, TiO<sub>2</sub> digunakan dalam kombinasi dengan zeolit (TiO<sub>2</sub>/Zeolit) sebagai fotokatalis dalam proses degradasi senyawa organik metilen biru (MB). Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan variasi perbandingan TiO<sub>2</sub> dan zeolit, baik zeolit tanpa dan dengan aktivasi serta perbandingannya dengan karbon aktif.

Metode sol-gel dan fotokatalisis merupakan dua pendekatan utama dalam pengembangan fotokatalis berbasis TiO<sub>2</sub> dan ZnO untuk degradasi polutan. Sol-gel memungkinkan sintesis material dengan ukuran nano, kemurnian tinggi, dan kontrol komposisi yang baik, sedangkan fotokatalisis secara efektif menguraikan berbagai jenis polutan menggunakan cahaya tanpa menghasilkan residu yang berbahaya. Kedua metode ini telah terbukti berhasil, seperti pada penelitian Pradipta & Irunsa (2022) dan Wibowo *et al*. (2023), sehingga menunjukkan potensi besar untuk aplikasi ramah lingkungan dalam pengolahan limbah.

Secara keseluruhan, metode sintesis yang tepat dan kombinasi material yang optimal sangat penting untuk keberhasilan aplikasi fotokatalis dalam pengolahan air limbah. Komposit berbasis TiO<sub>2</sub> dan ZnO tetap menjadi kandidat utama untuk pengembangan teknologi fotokatalis di masa mendatang karena stabilitas, efisiensi, dan potensi aplikasinya yang tinggi di berbagai bidang pencemaran lingkungan.

### Modifikasi Material Fotokatalis TiO<sub>2</sub> dan ZnO

Berbagai upaya modifikasi telah dilakukan untuk meningkatkan kinerja fotokatalis berbasis TiO<sub>2</sub> dan ZnO, mengingat keterbatasan bahan tersebut dalam menyerap cahaya tampak dan kecenderungannya mengalami rekombinasi cepat antara elektron dan lubang. Penulis mengumpulkan informasi terkait penggunaan bahan dalam sintesis yang dapat dilihat pada **tabel 2**.

**Tabel 2.** Modifikasi material TiO<sub>2</sub> dan ZnO

Bahan Utama	Katalis	Polutan
TiO <sub>2</sub> (titanium dioksida)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> dan doping Ni	Ion Ag <sup>+</sup> (perak)
Larutan Cu(II), parasetamol, dan air	TiO <sub>2</sub>	Ion Cu (II) dan parasetamol
Larutan logam berat Cd <sup>2+</sup> , Cu <sup>2+</sup> , Fe <sup>2+</sup> , dan Pb <sup>2+</sup>	Nanokomposit ZnO-Zeoli	<b>Ion logam berat:</b> Cd, Cu, Fe, dan Pb
Ekstrak daun pepaya, prekursor ZnO dan TiO <sub>2</sub>	Nanopartikel ZnO/TiO <sub>2</sub>	-
TiO <sub>2</sub> dan ZnO	TiO <sub>2</sub> -ZnO (doping)	Metilen biru
TiO <sub>2</sub> dan ammonium nitrat (NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> )	N/TiO <sub>2</sub> nanotube	Rhodamin B
Larutan amoksisilin, ion Ag(I), dan TiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Amoksisilin dan Ag(I)
Larutan ion Hg(II), resin, zeolit, karbon aktif	TiO <sub>2</sub> /zeolit, TiO <sub>2</sub> /resin, dan TiO <sub>2</sub> /karbon aktif	Ion Hg(II)
Titanium tetraisopropoksida (TTIP), kaolin	TiO <sub>2</sub> -kaolin	Bakteri E. coli dan S. aureus
TiO <sub>2</sub> dan zeolit	Komposit TiO <sub>2</sub> /Zeolit	Metilen biru (MB)

Modifikasi fotokatalis berbasis TiO<sub>2</sub> dan ZnO telah banyak dilakukan untuk mengatasi keterbatasan seperti respons yang

rendah terhadap cahaya tampak dan rekombinasi pasangan elektron-hole yang cepat. Salah satu strategi yang digunakan adalah doping logam/nonlogam, pembentukan komposit dengan bahan pendukung, dan penerapan sintesis hijau. Setiap pendekatan memiliki efek yang berbeda pada struktur kristal, luas permukaan, celah pita, dan efisiensi degradasi polutan.

Sebagai contoh, doping nitrogen pada nanotube TiO<sub>2</sub> oleh Apriani & Gunlazuardi (2021), berhasil menurunkan nilai band gap, sehingga aktivitas fotokatalitik terhadap Rhodamine B meningkat hingga 47,86% pada cahaya tampak. Sementara itu, Pradipta & Irunsa (2022), menggunakan doping logam Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> dan Ni pada TiO<sub>2</sub> yang menghasilkan nanokomposit dengan sifat magnetik, memudahkan pemisahan setelah reaksi, dan meningkatkan efisiensi fotoreduksi ion Ag<sup>+</sup> hingga 90,72%.

Pendekatan lain adalah pembentukan komposit TiO<sub>2</sub> dan ZnO. Aziz *et al.* (2023), melaporkan sintesis TiO<sub>2</sub>-ZnO dengan metode reaksi solid-state yang memberikan efisiensi degradasi metilen biru hingga 94,73% di bawah sinar matahari. Struktur anatase dari TiO<sub>2</sub> dan ZnO heksagonal memberikan sinergi dalam meningkatkan penyerapan cahaya dan pemisahan muatan. Ayunda & Maharani (2023), juga menerapkan sintesis hijau menggunakan ekstrak daun pepaya sebagai agen pereduksi untuk menghasilkan ZnO/TiO<sub>2</sub> berukuran nano (±10–11 nm) dengan aktivitas tinggi terhadap pewarna.

Selain itu, penambahan bahan pendukung seperti zeolit, kaolin, dan karbon aktif juga turut meningkatkan efisiensi. Kombinasi TiO<sub>2</sub>/zeolit yang diaktivasi dengan pemanasan (Wibowo *et al.*, 2023) terbukti mampu mendegradasi metilen biru hingga 96% dalam waktu 30 menit penyinaran matahari. Listiani *et al.* (2019) mensintesis TiO<sub>2</sub>-kaolin yang menunjukkan sifat antibakteri terhadap *E. coli* dan *S. aureus*, yang menunjukkan potensi fotokatalis tidak hanya untuk senyawa kimia tetapi juga mikroorganisme.

Secara umum, hasil modifikasi menunjukkan bahwa strategi peningkatan aktivitas fotokatalitik sangat dipengaruhi oleh jenis modifikasi, struktur kristal yang terbentuk, dan kondisi reaksi. Modifikasi tidak hanya meningkatkan efisiensi degradasi, tetapi juga memperluas aplikasi fotokatalis untuk limbah udara yang mengandung zat warna, logam berat, antibiotik, dan bahkan bakteri. Di masa mendatang, kombinasi sintesis hijau dengan doping logam atau non-logam serta integrasi bahan pendukung akan menjadi arah penting dalam pengembangan teknologi fotokatalitik berkelanjutan.

**Evaluasi Efisiensi Degradasi Polutan**

Efisiensi degradasi polutan menjadi salah satu parameter utama dalam menilai kinerja fotokatalis. Berdasarkan hasil tinjauan terhadap 10 jurnal, dapat dilihat tabel 3.

**Tabel 3.** Fotokatalisis

Fotokatalis	Jenis Fotokatalis	Cahaya Digunakan	Efisiensi Degradasi
TiO <sub>2</sub> /Zeolit	Komposit anorganik	Cahaya matahari	96%

	(semikonduktor + adsorben)		
TiO <sub>2</sub> (dengan keberadaan ion Ag(I))	Semikonduktor logam oksida	Cahaya UV	32,40% (degradasi amoksilin), 70,40% (reduksi Ag (I))
TiO <sub>2</sub> /Zeolit, TiO <sub>2</sub> /Resin, TiO <sub>2</sub> /Karbon Aktif	Komposit berbasis TiO <sub>2</sub> (semikonduktor + material pendukung)	Cahaya matahari (metode SODIS)	98,5%
N/TiO <sub>2</sub> berbentuk nanotube (doping nitrogen)	Semikonduktor anorganik termodifikasi (TiO <sub>2</sub> nanotube doped N)	Cahaya tampak	47,86%
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /TiO <sub>2</sub> -Ni (TiO <sub>2</sub> dimodifikasi dengan Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> dan dopan Ni)	Nanokomposit semikonduktor termodifikasi logam	UV dan cahaya tampak	90,72% (cahaya tampak), 80,93% (UV)
ZnO-Zeolit nanokomposit	Komposit semikonduktor – adsorben (ZnO + Zeolit)	Cahaya UV	98,96%
TiO <sub>2</sub> (hasil sintesis sol-gel)	Semikonduktor anorganik murni	UVA dan UVC	UVC: 38,52%; pH 3: 56,18%; konsentrasi 15 ppm: efisien
TiO <sub>2</sub> -ZnO (doping ZnO pada TiO <sub>2</sub> )	Nanopartikel semikonduktor termodifikasi (reaksi padatan)	UV, visible, matahari	Maksimal 94,73% (TiO <sub>2</sub> murni) – 93,15% (doping 10%)
TiO <sub>2</sub> (tanpa doping)	TiO <sub>2</sub> (tanpa doping)	UV (Black Light Blue)	98,70% (fotoreduksi Cu), 14,61% (degradasi paracetamol)
TiO <sub>2</sub> -Kaolin (komposit)	Semikonduktor anorganik komposit (anatase)	UV	<i>E. coli</i> terbunuh dalam 60 menit, <i>S. aureus</i>

			dalam 100 menit
--	--	--	-----------------

Efisiensi degradasi polutan oleh fotokatalis sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor utama, yaitu jenis fotokatalis, kondisi reaksi (pH, jenis cahaya, konsentrasi awal polutan), dan keberadaan bahan doping atau pendukung. Berdasarkan pengamatan terhadap 10 jurnal, efisiensi degradasi polutan berkisar antara 25% hingga hampir 100%, tergantung pada jenis material dan susunannya. Modifikasi material fotokatalis seperti doping logam (Ni, Ag), paduan material (TiO<sub>2</sub>/ZnO, TiO<sub>2</sub>/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), serta penggunaan bahan pendukung seperti zeolit dan kaolin terbukti mampu meningkatkan efisiensi degradasi. Misalnya, fotokatalis Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/TiO<sub>2</sub>-Ni menunjukkan efisiensi fotoreduksi ion Ag<sup>+</sup> hingga 90,72% di bawah cahaya tampak, jauh lebih tinggi dibandingkan TiO<sub>2</sub> biasa yang hanya 21,43% (Apriani & Gunlazuardi, 2021). Kombinasi ini memperluas spektrum penyerapan cahaya serta menekan rekombinasi pasangan elektron-hole.

Fotokatalis berbasis TiO<sub>2</sub>/Zeolit menunjukkan efisiensi degradasi 96% terhadap methylene blue dalam waktu 30 menit (Wibowo *et al.*, 2023). Sementara itu, pada kasus logam berat seperti Hg(II), efisiensi tertinggi diperoleh oleh TiO<sub>2</sub>/Zeolit sebesar 98,5% setelah 6 jam penyinaran matahari (Ridho, 2016). Untuk polutan farmasi, seperti amoksisilin, efisiensi degradasi tercatat hanya 32,4% dengan bantuan ion Ag<sup>+</sup> dan TiO<sub>2</sub>, menunjukkan bahwa senyawa kompleks seperti antibiotik memerlukan perlakuan khusus untuk hasil optimal.

Efisiensi degradasi juga bergantung pada pH larutan. Misalnya, degradasi asam humat oleh TiO<sub>2</sub> dari sintesis sol-gel optimal pada pH 3, dengan efisiensi sebesar 56,18%, sedangkan penggunaan sinar UVC memberikan degradasi sebesar 38,52% (Adnan *et al.*, 2021). Sementara itu, untuk logam Cu(II), efisiensi fotoreduksi tertinggi sebesar 98,7% dicapai pada pH 5 (Anggraini & Angeliasari, 2016). Nilai ini menunjukkan bahwa lingkungan yang terlalu asam atau terlalu basa dapat menurunkan efektivitas fotokatalis. Cahaya yang digunakan juga mempengaruhi efisiensi degradasi. Beberapa jurnal menunjukkan bahwa cahaya tampak atau penyinaran UV-C memberikan hasil yang lebih baik daripada UV-A. Misalnya, fotokatalis TiO<sub>2</sub> nanotube N-doped mampu mendegradasi Rhodamine B sebesar 47,86% di bawah cahaya tampak, dibandingkan dengan hanya 25,49% oleh TiO<sub>2</sub> biasa (Apriani & Gunlazuardi, 2021). Hal ini menunjukkan bahwa doping nitrogen mampu mengaktifkan TiO<sub>2</sub> di bawah spektrum cahaya tampak.

Berdasarkan hasil kajian berbagai penelitian, dapat disimpulkan bahwa efisiensi degradasi polutan menggunakan fotokatalis berbasis TiO<sub>2</sub> dan ZnO sangat dipengaruhi oleh material modifikasi, kondisi kecepatan, dan jenis polutan yang dituju. Kombinasi dengan material pendukung seperti zeolit, doping logam atau non logam (misalnya Ni, Ag, N), dan penggunaan teknik sintesis seperti reaksi sol-gel dan padat terbukti dapat meningkatkan aktivitas fotokatalitik. Fotokatalis TiO<sub>2</sub>/Zeolit dan ZnO/Zeolit menunjukkan hasil yang paling

efektif untuk logam berat, dengan efisiensi mencapai hampir 100%. Sementara itu, untuk senyawa organik kompleks seperti amoksisilin dan asam humat, efisiensinya lebih rendah, yang menunjukkan perlunya optimasi lebih lanjut. Selain itu, faktor-faktor seperti pH lingkungan, jenis cahaya (UV-A, UV-C, cahaya tampak), lama penyalinan, dan konsentrasi awal polutan sangat menentukan kinerja degradasi. Modifikasi struktur material seperti doping nitrogen atau penggunaan material komposit memungkinkan fotokatalis menjadi aktif dalam cahaya tampak, sehingga lebih sesuai untuk kondisi lingkungan alami. Secara keseluruhan, fotokatalis merupakan metode yang menjanjikan dan ramah lingkungan untuk degradasi polutan, dengan efisiensi yang dapat ditingkatkan melalui rekayasa material dan optimalisasi kondisi reaksi.

## Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan :

1. Berbagai metode sintesis seperti sol-gel, reaksi solid-state, dan sintesis hijau telah berhasil diterapkan untuk memodifikasi fotokatalis anorganik berbasis TiO<sub>2</sub> dan ZnO, dengan tujuan meningkatkan struktur, luas permukaan, dan stabilitas fotokatalis. Metode-metode ini telah memberikan kontribusi signifikan dalam membentuk karakteristik material yang lebih reaktif, efisien, dan ramah lingkungan untuk aplikasi pengolahan air limbah.
2. Aplikasi fotokatalis TiO<sub>2</sub> dan ZnO telah menunjukkan efisiensi tinggi dalam degradasi berbagai jenis polutan, termasuk logam berat, senyawa organik, dan mikroorganisme. Modifikasi melalui doping logam atau non-logam, pembentukan komposit, dan penggunaan bahan pendukung seperti zeolit dan kaolin telah terbukti meningkatkan efisiensi degradasi hingga hampir 100%, menjadikan fotokatalis ini sebagai solusi potensial dalam teknologi pengolahan air limbah berkelanjutan.

## Daftar Pustaka

- Adnan, F., Reza K. H., Ika M. (2021). PENGARUH pH, UV DAN TiO<sub>2</sub> UNTUK MENDEGRADASI VARIASI ASAM HUMAT BERBASIS FOTOKATALIS. *Jurnal Teknologi Lingkungan UNMUL*, 5(2), 9-16.
- Anggraini, D. I. & Angleasari, S. (2016). PENGARUH TiO<sub>2</sub> DAN pH PADA FOTOREDUKSI ION Cu(II) DALAM LARUTAN YANG MENGANDUNG PARACETAMOL. *Journal of Pharmacy*, 5(1), 13-18.
- Anggraini, D. I. & Pujilestari, I. (2017). Efektivitas Fotodegradasi Amoksisilin yang Dikatalisis dengan TiO<sub>2</sub> dengan Keberadaan Ion Ag(I). *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*, 20(3), 105-109.
- Apriani, I. N., & Gunlazuardi, J. (2021). Sintesis dan karakterisasi N doped TiO<sub>2</sub> (N/TiO<sub>2</sub>) nanotube serta uji aktivitas fotokatalisis terhadap zat warna rhodamin B. *Jurnal Teknologi dan Manajemen*, 19(1), 27-32.

- Ayunda, D & Maharani, D. K. (2023). Preparasi dan karakterisasi nanopartikel ZnO/TiO<sub>2</sub> dengan ekstrak daun pepaya (*Carica papaya L.*). *UNESA Journal of Chemistry*, 12(3), 100–105.
- Aziz, I., Nanda S., Revanandita, & Adawiah. (2023). Sintesis TiO<sub>2</sub> terdoping ZnO dengan metode reaksi padatan serta aplikasinya sebagai fotokatalis. *Journal of Chemistry and Chemistry Education in Muslim Society (JOCCEMS)*, 9(2), 9–16.
- Bai, X., Chen, W., Wang, B., Sun, T., Wu, B., & Wang, Y. (2022). Photocatalytic degradation of some typical antibiotics: Recent advances and future outlooks. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(15), 8130.
- Gopinath, K. P., Madhav, N. V., Krishnan, A., Malolan, R., & Rangarajan, G. (2020). Present applications of titanium dioxide for the photocatalytic removal of pollutants from water: A review. *Journal of Environmental Management*, 270, 110906.
- Jamil, T., Yasin, S., Ramzan, N., Aslam, Z., Ikhlqa, A., Qazi, U. Y., & Javaid, R. (2023). Treatment of Textile Wastewater by a Novel Clay/TiO<sub>2</sub>/ZnO-Based Catalyst, Applying a Synergic Catalytic Ozonation–Electroflocculation Process. *Catalysts*, 13(9), 1315.
- Listiani, D., Ajuk S., Anthoni B. A. (2019). Sintesis TiO<sub>2</sub>-Kaolin dan Uji Aktivitas Fotokatalisis untuk Antibakteri *Escherichia Coli* dan *staphylococcus Aureus*. *Indonesian Journal of Pure and Applied Chemistry*, 9(4), 130–139.
- Mohamed, R. M., Ismail, A. A., Kadi, M. W., & Bahnemann, D. W. (2018). A comparative study on mesoporous and commercial TiO<sub>2</sub> photocatalysts for photodegradation of organic pollutants. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 367, 66–73.
- Pradipta, A. R., & Irunsa, A. (2022). Synthesis of Modified TiO<sub>2</sub> Nanocomposite using Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> and Nickel as Photocatalyst in Reduction of Silver. *Indonesian Journal of Chemical studies*, 1(1), 8–12.
- Rajendar, V., Raghu, Y., Rajitha, B., Chakra, C. S., Rao, K. V., & Park, S. H. (2017). Synthesis, characterization, and photocatalytic behaviour of nanocrystalline ZnO, TiO<sub>2</sub> and ZnO/TiO<sub>2</sub> nanocomposites. *Journal of Ovonic Research*, 13(3), 101–111.
- Ramadhini, T. K., Tuty E. A., Elda M., & Maria S. M. (2023). Photocatalytic degradation of heavy metals Cd, Cu, Fe and Pb using ZnO-zeolite nanocomposite. *Indonesian Journal of Environmental Management and Sustainability*, 7(4), 147–152.
- Ridho, R. (2016). Pengaruh penggunaan fotokatalis TiO<sub>2</sub>/resin, TiO<sub>2</sub>/zeolit dan TiO<sub>2</sub>/karbon aktif dalam proses fotoreduksi ion Hg(II) dengan metode SODIS (*Solar Disinfection Water*). *Jurnal Rekayasa Kimia dan Lingkungan*, 11(1), 39–45.
- Sanjeev Kumar, S., Rajput, P., Nigam, S., & Joshi, M. (2020). Assessment of GO/ZnO nanocomposite for solar-assisted photocatalytic degradation of industrial dye and textile effluent. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 32076–32087.
- Wibowo, S., Kheiza N. A. A., & Dewi A. S. (2023). Fotodegradasi Methylene Blue menggunakan Fotokatalis TiO<sub>2</sub>/Zeolit. *WARTA AKAB*, 47(1), 17–21.