

**PENGARUH VARIASI MASSA Cu DAN SUHU KALSINASI PADA SINTESIS
FOTOKATALIS Cu-TiO₂/ZnO UNTUK DEGRADASI METHYLENE BLUE
DALAM PHOTOCATALYTIC FUEL CELL (PFC)**

**David Kevin¹, Sarah Dampang^{1*}, Muhammad Fahmi Hakim¹, Fitri Yuliasari², Tarishah
Setyowati Putri¹, Cicilia Putri Meylani¹**

¹ Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang
Jl. HS. Ronggowaluyo Telukjambe Timur Karawang 41361.

² Program Studi Fisika, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang
Jl. HS. Ronggowaluyo Telukjambe Timur Karawang 41361.

*Email: sarah.dampang@staff.unsika.ac.id

Abstrak

Perkembangan sektor industri, khususnya industri tekstil, menyebabkan peningkatan pencemaran lingkungan perairan. Salah satu komponen utama dalam industri tekstil adalah zat warna seperti Methylene blue, yang merupakan pewarna organik berbahaya dan dapat mencemari lingkungan. Degradasi Methylene blue dapat dilakukan melalui proses fotokatalisis menggunakan semikonduktor berbasis oksida logam. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakterisasi hasil sintesis komposit Cu-TiO₂/ZnO, menganalisis pengaruh perbedaan massa Cu pada komposit, dan mengkaji pengaruh variasi suhu kalsinasi pada pembuatan material fotokatalis. Dalam penelitian ini, sintesis nanokomposit Cu-TiO₂/ZnO dilakukan dengan variasi massa Cu 2%, 5%, dan 8%, serta variasi suhu kalsinasi 175°C, 200°C, dan 225°C, melalui metode sol-gel. Karakterisasi material dilakukan dengan Scanning Electron Microscope (SEM), UV-Vis spectrophotometer dan Ultraviolet-Visible Diffuse Reflectance Spectroscopy (UV-Vis DRS). Hasil karakterisasi SEM menunjukkan bahwa morfologi sampel adalah berbentuk bulat (sphere) dengan ukuran yang bervariasi dan tidak beraturan. Sementara itu, hasil karakterisasi menggunakan UV-Vis DRS mengindikasikan bahwa Cu-TiO₂/ZnO memberikan respon yang baik terhadap sinar tampak ($\lambda > 400$ nm). Aktivasi fotokatalitik Cu-TiO₂/ZnO diuji dalam degradasi Methylene blue selama 2 jam dibawah sinar UV, dengan hasil menunjukkan tingkat degradasi sebesar 83,575%. Selain itu, pengujian fuel cell menunjukkan bahwa tegangan yang dihasilkan oleh Cu(2%)-TiO₂/ZnO, Cu(5%)-TiO₂/ZnO, dan Cu(8%)-TiO₂/ZnO masing-masing sebesar 0,514V, 0,896V, dan 0,922V.

Kata kunci: Degradasi, Fotokatalis, Kalsinasi, Methylene blue

1. PENDAHULUAN

Kemajuan industri yang pesat telah menimbulkan berbagai permasalahan lingkungan, salah satunya adalah pencemaran air yang mengancam keberlanjutan sumber daya air bersih. Menurut (WHO/UNICEF, 2021), sekitar 3,5 miliar orang di dunia masih kekurangan akses terhadap sanitasi air yang aman, sebagian besar disebabkan oleh kontaminasi air limbah industri. Industri tekstil menjadi salah satu kontributor utama, memproduksi sekitar 80% dari pewarna azo sintetis global, di mana 10–15% dari total pewarna yang digunakan tidak terikat pada serat dan langsung terbuang ke lingkungan (Ikram et al., 2022; Mahmoud et al., 2009). *Methylene blue* salah satu pewarna tekstil yang paling umum digunakan, menyebabkan degradasi kualitas ekosistem perairan melalui pengurangan penetrasi cahaya dan kelarutan oksigen, serta berdampak negatif terhadap

fotosintesis organisme akuatik pewarna yang umum digunakan mengganggu ekosistem perairan dengan mengurangi kelarutan oksigen dan penetrasi cahaya, sehingga mempengaruhi fotosintesis dan kualitas air. Pencemaran air oleh zat pewarna ini membahayakan manusia, lingkungan, dan kehidupan akuatik (Ikram et al., 2022).

Berbagai teknologi telah dikembangkan untuk mengatasi limbah zat warna ini, antara lain adsorpsi (Kadam et al., 2013), osmosis balik (Saini et al., 2023), filtrasi ultrafine (Derouich et al., 2020), dan bioremediasi (Jamee & Siddique, 2019; Sharma et al., 2023). Namun, pendekatan-pendekatan tersebut masih memiliki keterbatasan dalam efisiensi, biaya, dan keberlanjutan, khususnya dalam menghilangkan pewarna azo dan produk dekomposisinya yang bersifat toksik dan persisten (Sarac et al., 2020; Wang et al., 2020). Dalam penelitian ini, *Photocatalytic*

Fuel Cell (PFC) muncul sebagai solusi inovatif yang tidak hanya mendegradasi kontaminan organik, tetapi juga memungkinkan pemulihan energi (Kee et al., 2020; Lam et al., 2020). Material fotokatalis seperti TiO_2 dan ZnO telah banyak diteliti karena stabilitas kimia, toksisitas rendah, dan efisiensi fotokatalitiknya (Babel et al., 2017; El-Shazly et al., 2021). Kombinasi keduanya dalam bentuk heterojungsi tipe II (TiO_2/ZnO) telah terbukti mampu menurunkan laju rekombinasi pasangan elektron-hole dan meningkatkan efisiensi reaksi (Ali et al., 2021; Suganthi et al., 2020). Lebih lanjut, strategi modifikasi struktur melalui doping logam transisi seperti tembaga (Cu) telah menunjukkan potensi dalam menurunkan energi celah pita (*band gap*) dan memperluas kemampuan penyerapan cahaya hingga ke wilayah tampak (Khalid et al., 2013; Tian et al., 2021). Meskipun heterojungsi TiO_2/ZnO dan doping logam telah banyak dieksplorasi secara terpisah, penelitian yang secara khusus menggabungkan doping logam Cu ke dalam sistem TiO_2/ZnO dalam penelitian aplikasi degradasi pewarna menggunakan metode sol-gel masih sangat terbatas. Belum banyak studi yang secara sistematis mengevaluasi pengaruh doping Cu terhadap perubahan struktur elektronik, fotoreaktivitas, dan efisiensi degradasi dalam sistem PFC berbasis Cu- TiO_2/ZnO . Pada penelitian ini modifikasi struktur heterojungsi TiO_2/ZnO dengan doping logam Cu dapat menurunkan energi celah pita dan memperluas penyerapan spektrum cahaya hingga wilayah tampak. Dengan demikian, aktivitas fotokatalitik sistem Cu- TiO_2/ZnO terhadap degradasi *Methylene blue* akan meningkat secara signifikan dibandingkan sistem tanpa dopan.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1. Bahan dan Reagen Kimia

Methylene blue ($\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{N}_3\text{SCl}$, Merck), ZnO (zink oksida, p.a), TiO_2 (titanium dioksida, p.a), KCl (kalium klorida, p.a), NaClO (natrium hipoklorit, p.a), Agar, Akuades, Pelat grafit, Kabel, Tembaga(II) asetat monohidrat ($\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$), Isopropil alkohol, Polietilen glikol (PEG) 400, Pelat kaca berukuran 5×3 cm dengan ketebalan 3 mm.

2.2. Preparasi Fotoanoda Cu- TiO_2/ZnO

2.2.1. Sintesis ZnO

Sintesis ZnO dilakukan menggunakan metode sol-gel. Larutkan ZnO sebanyak 2,743

gram dalam 50 mL isopropil alkohol pada gelas beaker 100 mL. Tutup larutan dengan aluminium foil, kemudian aduk menggunakan magnetic stirrer selama ± 45 menit. Tambahkan monoetanolamina sebanyak 1,4 mL dan lanjutkan pengadukan selama ± 45 menit. Diamkan larutan semalam hingga terbentuk sol. Tambahkan PEG sebanyak 4,4 mL, lalu aduk hingga homogen. Panaskan oven hingga 150°C dan masukkan larutan sol ZnO selama 2 jam. Setelah selesai, biarkan larutan mendingin. Aplikasikan pasta ZnO homogen ke pelat kaca menggunakan metode *doctor blade*. Keringkan pelat di oven pada suhu 200°C selama 25 menit.

2.2.2. Sintesis Cu- TiO_2/ZnO

Sintesis TiO_2 yang didoping Cu, menggunakan metode sol-gel. Larutkan TiO_2 sebanyak 2,743 gram dalam 50 mL isopropil alkohol. Tutup larutan dengan aluminium foil dan aduk selama ± 45 menit. Tambahkan tembaga (II) asetat monohidrat sebagai dopan dalam konsentrasi 2% (Preda et al., 2022), 5% (Adamu et al., 2023), dan 10% terhadap massa TiO_2 , lalu aduk selama ± 45 menit. Tambahkan monoetanolamina sebanyak 1,4 mL, kemudian aduk kembali selama ± 45 menit hingga terbentuk larutan sol. Diamkan larutan semalaman. Tambahkan PEG sebanyak 4,4 mL, aduk hingga homogen. Ovenisasi larutan pada suhu 150°C selama 2 jam, kemudian biarkan dingin. Aplikasikan pasta Cu- TiO_2 yang telah homogen ke pelat kaca berlapis ZnO menggunakan metode *doctor blade*. Keringkan pelat dalam oven selama 2 jam dengan variasi suhu 175°C , 200°C , dan 225°C .

2.3. Preparasi Plat Anoda

Pelat grafit berukuran 5×4 cm dan ketebalan 3 mm digunakan sebagai katoda. Pelat ini direndam dalam larutan NaClO sebelum digunakan.

2.4. Preparasi Larutan Natrium Hipoklorit

Sebanyak 200 mL larutan NaClO dicampurkan dengan akuades hingga mencapai volume 800 mL. Konsentrasi akhir larutan adalah 250 mL/L.

2.5. Preparasi untuk Jembatan Garam

Jembatan garam dibuat dari larutan KCl 1 M dengan cara melarutkan 1,86 gram KCl dalam 25 mL air, lalu ditambahkan agar sebanyak 0,93 gram. Larutan diaduk sambil dipanaskan hingga mendidih. Setelah agak

dingin, larutan dimasukkan ke dalam pipa dan disimpan dalam lemari pendingin hingga mengental.

2.6. Preparasi Larutan Methylene blue

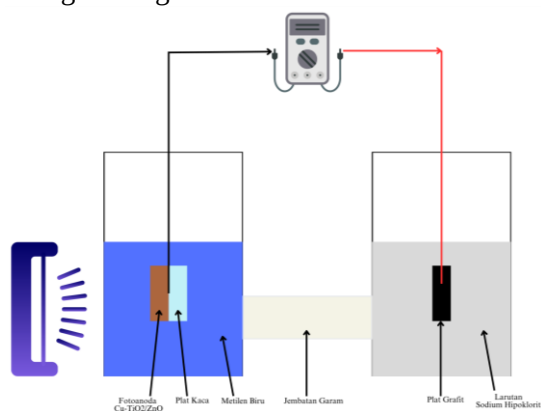
Larutan stok sebanyak 100 mL (1.000 ppm) disiapkan dengan melarutkan 0,10 gram *methylene blue* dalam 100 mL akuades. Untuk membuat larutan 10 ppm, ambil 10 mL larutan stok, tambahkan 15 mL HCl 10%, lalu tambahkan akuades hingga volume mencapai 1.000 mL.

2.7. Pembuatan PFC Ruang Ganda

Fotoreaktor terdiri atas dua ruang (anoda dan katoda) yang diisi masing-masing dengan 400 mL larutan *methylene blue* dan 400 mL larutan NaClO. Kedua ruang dihubungkan oleh jembatan garam berbahan KCl. Pelat Cu-TiO₂/ZnO ditempatkan di ruang anoda dan pelat grafit di ruang katoda, lalu dihubungkan ke multimeter. Pelat anoda disinari menggunakan lampu UV 100 W selama 2 jam. Sampel larutan diambil setiap 40 menit, disaring sekali menggunakan kertas saring, kemudian diukur pH-nya menggunakan pH meter. Sebanyak 5 mL larutan diukur absorbansinya menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang 300–700 nm. Efisiensi degradasi dihitung menggunakan Persamaan (1):

$$\text{Degradasi (\%)} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

dimana C_0 dan C_t adalah konsentrasi awal, dan konsentrasi setelah waktu penyinaran (t) masing-masing.



Gambar 1. Sistem Photocatalytic Fuel Cell (PFC) Ruang Ganda

2.8. Karakterisasi Fotokatalis

Karakterisasi morfologi permukaan fotokatalis Cu-TiO₂/ZnO dilakukan menggunakan Scanning Electron Microscopy

(SEM) untuk mengetahui bentuk, ukuran partikel, dan tingkat aglomerasi dari sampel yang disintesis dengan variasi massa Cu. Model SU3500 (Hitachi, Jepang), dengan resolusi 6.0 mm pada 7,00 kV dan perbesaran 10.0k. Sifat optik dari material fotokatalis Cu-TiO₂/ZnO hasil sintesis dikarakterisasi menggunakan metode UV-Vis Diffuse Reflectance Spectroscopy (DRS). Karakterisasi ini bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan penyerapan cahaya serta menentukan nilai energi celah pita dari material. Model Cary 60 (China), dengan rentang panjang gelombang 200-830 nm. Pengukuran absorbansi *methylene blue* untuk menghitung efisiensi degradasi menggunakan spektrofotometer UV-Visible model V-730 (Jasco, Jepang), dengan rentang panjang gelombang 300-700 nm.

3. HASIL DAN DISKUSI

3.1. Analisis dengan SEM

Gambar 2 hingga Gambar 4 menunjukkan citra SEM dari komposit Cu(2%)-TiO₂/ZnO, Cu(5%)-TiO₂/ZnO, dan Cu(8%)-TiO₂/ZnO yang masing-masing dilapisi pada substrat kaca

Pada Gambar 2, morfologi permukaan Cu(2%)-TiO₂/ZnO menunjukkan partikel berbentuk bulat dengan struktur yang tidak beraturan dan ukuran partikel yang bervariasi. Hasil pengukuran manual dari citra SEM menunjukkan bahwa diameter partikel berada dalam rentang 0,556 μm hingga 4,556 μm . Aglomerasi partikel pada sampel ini relatif rendah, menunjukkan bahwa partikel masih cukup terdispersi secara merata.

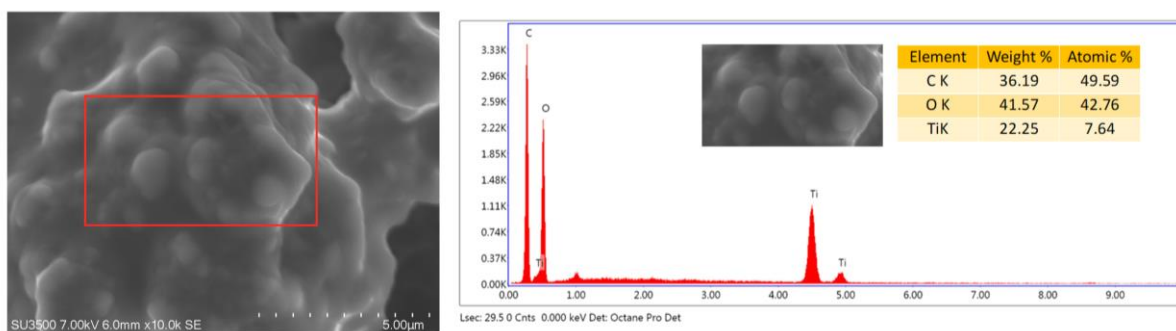
Gambar 3 memperlihatkan morfologi Cu(5%)-TiO₂/ZnO yang menunjukkan bentuk partikel serupa, yakni cenderung bulat namun tidak beraturan, dengan distribusi ukuran partikel antara 0,222 μm hingga 4,333 μm . Dibandingkan dengan Cu(2%), sampel ini menunjukkan tingkat aglomerasi yang lebih tinggi, yang mengindikasikan mulai terbentuknya partikel-partikel besar akibat proses penggumpalan.

Pada Gambar 4, morfologi Cu(8%)-TiO₂/ZnO memperlihatkan bentuk partikel yang juga cenderung bulat namun tidak beraturan, dengan rentang ukuran partikel lebih kecil, yaitu 0,167 μm hingga 2,222 μm . Meskipun ukuran partikel tampak mengecil, aglomerasi partikel terjadi lebih signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi Cu berpengaruh terhadap pembentukan

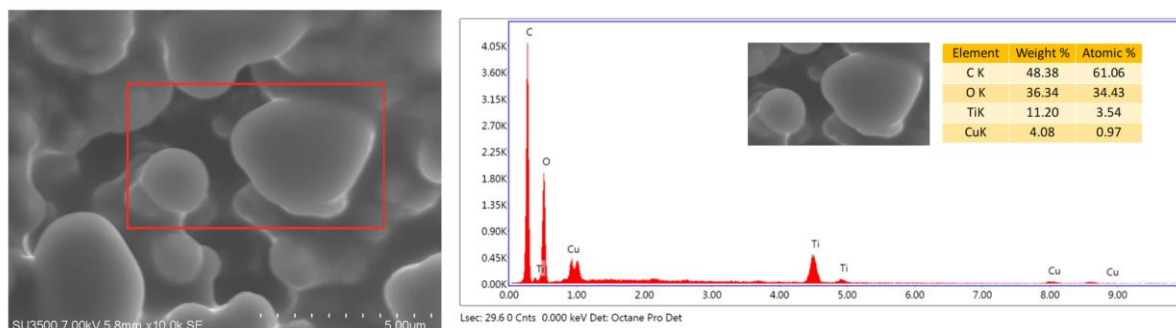
aglomerat yang lebih besar, akibat meningkatnya interaksi antar partikel.

Tingkat aglomerasi yang meningkat seiring bertambahnya massa Cu dapat dijelaskan oleh kecenderungan nanopartikel TiO_2 untuk tidak stabil dalam bentuk terdispersi, sehingga partikel cenderung berkumpul untuk mencapai kestabilan termodinamika (Nasikhudin et al., 2018). Aglomerasi ini berpotensi menurunkan luas permukaan aktif dan mengurangi ketersediaan situs aktif untuk proses fotokatalitik, serta menghambat penyerapan cahaya dan molekul *methylene blue* (MB) selama proses degradasi (Pellegrino et al., 2017; Sugandi et al., 2024). Doping ion Cu^{2+} ke dalam struktur TiO_2 menyebabkan perubahan morfologi dan struktur kristal. Substitusi sebagian ion Ti^{4+} oleh Cu^{2+} menyebabkan deformasi kisi kristal akibat perbedaan muatan dan ukuran ion, yang menghasilkan kompensasi muatan berupa pembentukan kekosongan oksigen (Sahu & Biswas, 2011). Kekosongan ini berperan dalam peningkatan aktivitas fotokatalitik melalui

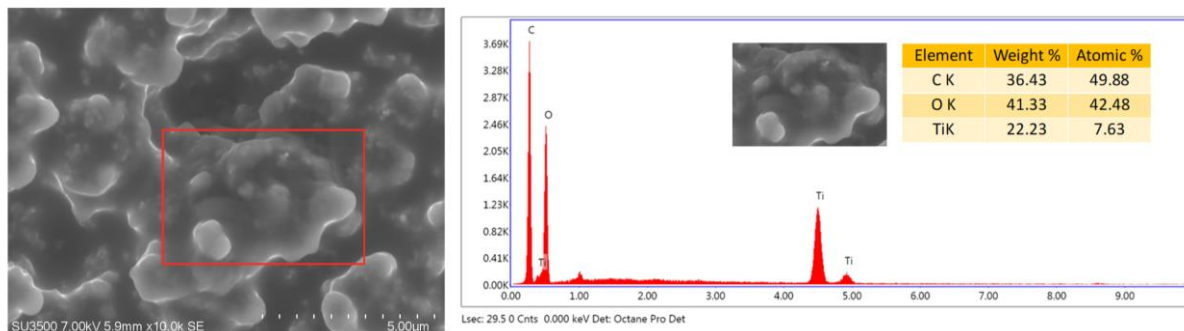
pergeseran celah pita (bandgap) dan perubahan struktur elektronik material (Delsouz Khaki et al., 2018a; L. Li et al., 2009). Menariknya, struktur khas ZnO berupa bentuk heksagonal (wurtzite), yang umumnya stabil pada suhu ruang, tidak teramati secara eksplisit pada citra SEM dari ketiga variasi massa Cu. Ketidakterlihatan struktur ZnO ini kemungkinan disebabkan oleh keberadaan lapisan Cu-TiO_2 yang cukup tebal, sehingga menutupi morfologi khas ZnO. Selain itu, interaksi antara ion Cu dan permukaan ZnO dapat memengaruhi struktur kristalnya, mengganggu keteraturan bentuk wurtzite yang seharusnya terlihat (Abdel-Fattah et al., 2014). Struktur wurtzite ZnO umumnya memberikan kestabilan morfologi melalui distribusi partikel yang seragam serta peningkatan luas permukaan spesifik. Oleh karena itu, hilangnya fitur struktural khas ZnO dapat berimplikasi terhadap kinerja fotokatalitik, terutama jika lapisan penutup menghambat transfer muatan atau mengurangi eksposur permukaan aktif ZnO.



Gambar 2. SEM dari $\text{Cu}(2\%)\text{-TiO}_2/\text{ZnO}$

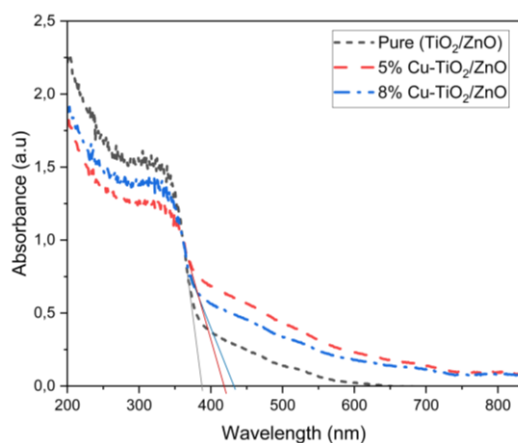


Gambar 3. SEM dari $\text{Cu}(5\%)\text{-TiO}_2/\text{ZnO}$

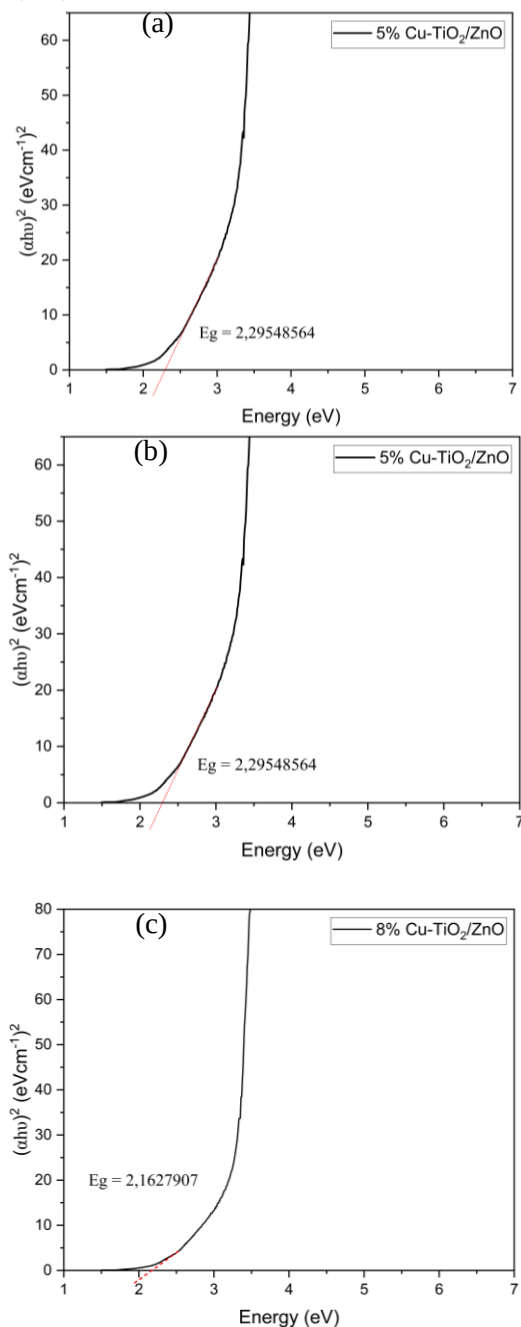
Gambar 4. SEM dari Cu(8%)-TiO₂/ZnO

3.2. Analisis UV-Vis DRS

Gambar 5, dengan rentang panjang gelombang 200–830 nm. Berdasarkan hasil spektrum, TiO₂/ZnO menunjukkan penyerapan maksimum pada panjang gelombang 387,89 nm, yang termasuk dalam wilayah ultraviolet (UV). Penambahan Cu pada struktur menghasilkan pergeseran panjang gelombang maksimum ke arah cahaya tampak, yaitu 418,534 nm untuk Cu(5%)-TiO₂/ZnO dan 432,44 nm untuk Cu(8%)-TiO₂/ZnO. Pergeseran ini dikenal sebagai pergeseran merah (*red shift*) dan menunjukkan peningkatan kemampuan material dalam menyerap cahaya pada spektrum tampak.

Gambar 5. Spektra UV-Vis DRS dari TiO₂/ZnO dan Cu-TiO₂/ZnO

Selanjutnya, nilai energi celah pita (E_g) dihitung melalui metode Tauc plot berdasarkan pendekatan Kubelka-Munk (Gambar 6). Nilai E_g yang diperoleh adalah 3,186 eV untuk TiO₂/ZnO, 2,296 eV untuk Cu(5%)-TiO₂/ZnO, dan 2,162 eV untuk Cu(8%)-TiO₂/ZnO. Hasil ini mengindikasikan bahwa doping Cu secara signifikan menurunkan nilai celah pita dari sistem fotokatalis yang dikembangkan.



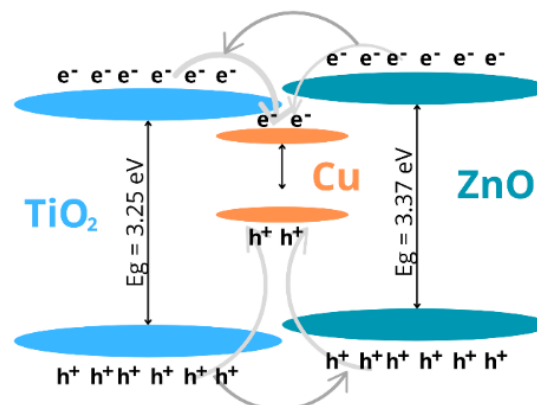
Gambar 6. Plot Tauc untuk $(\alpha h\nu)^2$ versus energy ($h\nu$) untuk preparasi (a) TiO₂/ZnO, (b) Cu(5%)-TiO₂/ZnO, dan (c) Cu(8%)-TiO₂/ZnO

Dari plot Tauc dan analisis dengan pendekatan Kubelka-Munk, diperoleh nilai energi celah pita terdapat pada Tabel 1.

Tabel 1. Nilai Energi Celah Pita

Sampel	Panjang Gelombang (nm)	Energi Celah Pita (eV)
TiO ₂ /ZnO	387,89	3,186 eV
Cu(5%)-TiO ₂ /ZnO	418,534	2,296 eV
Cu(8%)-TiO ₂ /ZnO	432,44	2,162 eV

Dari Tabel 1 menunjukkan bahwa penurunan nilai celah pita menunjukkan keberhasilan penggabungan ion Cu ke dalam kisi semikonduktor TiO₂/ZnO. Cu berperan sebagai dopan yang memperkenalkan tingkat energi antara pita valensi dan pita konduksi, serta menghasilkan kekosongan oksigen, sehingga meningkatkan penyerapan cahaya tampak. Selain itu, Cu²⁺ juga berperan sebagai mediator elektron yang mampu menangkap elektron yang tereksitasi, memperpanjang umur hole, serta menurunkan laju rekombinasi pasangan elektron-hole. Hal ini menghasilkan peningkatan aktivitas fotokatalitik sistem Cu-TiO₂/ZnO. Fenomena pergeseran merah dan penurunan celah pita ini sejalan dengan temuan Sahu dan Biswas (Sahu & Biswas, 2011), yang melaporkan penurunan energi celah pita TiO₂ dari 3,3 eV menjadi 2,51 eV dengan doping Cu hingga 15 wt%. Selain itu, mekanisme transfer muatan pada struktur heterojunction TiO₂/ZnO yang disempurnakan oleh doping Cu memperlihatkan skema Z-scheme, di mana elektron dari pita konduksi TiO₂ ditransfer ke hole di pita valensi ZnO, memungkinkan separasi muatan yang lebih baik. Cu memperkuat mekanisme ini dengan menyediakan jalur transfer elektron yang efisien, seperti ditunjukkan secara skematik pada Gambar 7.



Gambar 7. Diagram skematik yang mengilustrasikan proses transfer muatan dalam Cu-TiO₂/ZnO di bawah penyinaran

Dalam penelitian ini aplikasi Photocatalytic Fuel Cell (PFC), nilai celah pita yang lebih sempit memungkinkan fotokatalis untuk memanfaatkan cahaya tampak secara lebih efektif, sehingga meningkatkan efisiensi sistem dalam proses fotodegradasi *methylene blue*. Cu-TiO₂/ZnO dengan doping optimal tidak hanya memperluas spektrum absorpsi, tetapi juga meningkatkan transfer muatan dan mengurangi rekombinasi, yang sangat krusial dalam meningkatkan kinerja fotokatalis dalam PFC.

3.3. Analisis Kinerja Fotokatalis untuk Photocatalytic Fuel Cell (PFC)

Uji kinerja fotokatalis dilakukan untuk menilai kemampuan material Cu-TiO₂/ZnO dalam menghasilkan tegangan listrik saat digunakan dalam sistem Photocatalytic Fuel Cell (PFC). Tegangan diukur selama 120 menit setiap 40 menit interval menggunakan multimeter. Pengujian dilakukan terhadap variasi massa Cu (2%, 5%, dan 8%) dan suhu kalsinasi (175°C, 200°C, dan 225°C). Hasil pengukuran tegangan disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Data tegangan tiap variasi sampel dan suhu kalsinasi

Sampel	Suhu	Tegangan (Voltage)			
		0 menit	40 menit	80 menit	120 menit
Cu(2%)-TiO ₂ /ZnO	175°C	0,866	0,156	0,222	0,150
	200°C	0,027	0,441	0,474	0,514
	225°C	0,030	0,154	0,170	0,184
Cu(5%)-TiO ₂ /ZnO	175°C	0,250	0,383	0,384	0,404
	200°C	0,400	0,833	0,879	0,896
	225°C	0,16	0,266	0,248	0,218
Cu(8%)-TiO ₂ /ZnO	175°C	0,366	0,539	0,418	0,455
	200°C	0,389	0,826	0,843	0,922
	225°C	0,015	0,228	0,240	0,255

Pengaruh Suhu Kalsinasi terhadap Aktivitas Fotokatalitik

Berdasarkan data, suhu kalsinasi 200°C memberikan hasil tegangan tertinggi untuk seluruh variasi massa Cu. Hal ini menunjukkan bahwa suhu 200°C merupakan suhu optimum untuk pembentukan struktur anatase pada material Cu-TiO₂/ZnO. Fasa anatase dikenal memiliki aktivitas fotokatalitik tertinggi karena memiliki energi celah pita yang besar, yang memungkinkan penyerapan cahaya UV secara lebih efisien dan menghasilkan pasangan elektron-hole lebih banyak (Triandi & Gunlazuardi, 2001). Selain itu, suhu 200°C juga memungkinkan daya lekat material terhadap substrat kaca menjadi optimal, penting untuk menjaga stabilitas fotokatalis selama proses berlangsung. Sebaliknya, suhu yang lebih tinggi seperti 225°C cenderung menyebabkan aglomerasi partikel, mengurangi luas permukaan aktif dan jumlah situs aktif (Mornani et al., 2016; Saidani et al., 2025).

Pengaruh Variasi Massa Cu terhadap Tegangan yang Dihasilkan

Peningkatan massa Cu dari 2% hingga 8% menunjukkan tren peningkatan tegangan yang signifikan. Tegangan maksimum yang dihasilkan masing-masing komposisi adalah:

- 1) Cu(2%)-TiO₂/ZnO: 0,514 V
- 2) Cu(5%)-TiO₂/ZnO: 0,896 V
- 3) Cu(8%)-TiO₂/ZnO: 0,922 V

Hal ini mengindikasikan bahwa doping Cu²⁺ dalam TiO₂ mampu meningkatkan efisiensi transfer elektron. Cu²⁺ yang berada di permukaan TiO₂ menyebabkan deformasi kisi lokal dan menciptakan keadaan perangkap dalam celah pita, memperluas spektrum serapan cahaya dan menghambat rekombinasi pasangan elektron-hole (Chahid et al., 2018). Dengan demikian, fotokatalis lebih efisien dalam mengonversi energi cahaya menjadi energi Listrik.

Korelasi Tegangan dan Efektivitas Degradasi *Methylene blue*

Dalam sistem PFC, tegangan listrik yang terbentuk berhubungan langsung dengan efisiensi degradasi *methylene blue* (MB). Tegangan menjadi indikator jumlah elektron bebas yang dihasilkan dan berhasil ditransfer dari fotoanoda ke katoda. Semakin tinggi tegangan, maka semakin efisien pemisahan elektron-hole dan semakin rendah tingkat

rekombinasinya, yang pada akhirnya meningkatkan efektivitas fotodegradasi polutan.

Fotokatalis Cu-TiO₂/ZnO dalam sistem PFC bekerja dengan prinsip dasar sel volta, di mana elektron yang tereksitasi akibat radiasi non-pengion (seperti cahaya UV) mengalir dari anoda menuju katoda melalui rangkaian eksternal, menghasilkan tegangan yang terukur

3.4. Aktivitas Fotokatalitik

Gambar 8 dan Gambar 9 dapat dijelaskan seperti berikut;

1. Spektrum Serapan dan Penentuan Panjang Gelombang Maksimum

Penentuan panjang gelombang maksimum (λ_{maks}) dari *Methylene blue* (MB) dilakukan dengan spektrofotometer UV-Vis untuk memperoleh kepekaan tinggi dan kesalahan minimal dalam analisis konsentrasi. MB merupakan zat warna kationik yang mengandung gugus kromofor -N=N-, yang bertanggung jawab terhadap warna biru khas senyawa ini. Hasil analisis menunjukkan bahwa λ_{maks} MB berada pada 663 nm, yang ditandai dengan puncak serapan tertinggi pada spektrum UV-Vis. Selama proses fotodegradasi, intensitas serapan pada $\lambda = 663$ nm mengalami penurunan bertahap, menunjukkan terjadinya degradasi molekul MB. Penurunan ini juga diiringi oleh perubahan warna larutan dari biru menjadi tidak berwarna, sebagaimana dilaporkan oleh (Janani et al., 2020).

2. Uji Aktivitas Fotokatalitik Komposit Cu-TiO₂/ZnO

Aktivitas fotokatalitik diuji dengan mengevaluasi degradasi MB selama penyinaran sinar UV hingga 120 menit. Berdasarkan data spektrum UV-Vis (Gambar 8), terlihat bahwa absorbansi MB menurun signifikan dari menit ke-40 hingga menit ke-120. Grafik aktivitas fotokatalitik (Gambar 9) menunjukkan bahwa degradasi MB tertinggi sebesar 83,575% terjadi pada menit ke-80. Setelahnya, efisiensi degradasi menurun menjadi 61,659% pada menit ke-120 dengan konsentrasi terdegradasi sebesar 3,83 ppm. Efisiensi degradasi tinggi pada menit ke-80 menunjukkan bahwa fotokatalis Cu-TiO₂/ZnO bekerja optimal pada rentang waktu tersebut. Hal ini disebabkan oleh transisi elektron yang efisien dari pita valensi ke pita konduksi akibat penyinaran UV, yang menghasilkan pasangan elektron-hole (e⁻/h⁺) dan membentuk spesies reaktif seperti radikal hidroksil (•OH) yang berperan dalam degradasi MB. Namun, setelah 80 menit, efisiensi

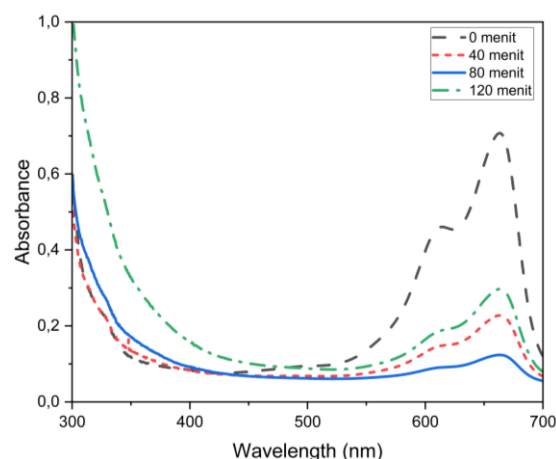
degradasi menurun akibat aglomerasi partikel, sebagaimana terkonfirmasi melalui karakterisasi SEM. Aglomerasi menyebabkan penurunan luas permukaan aktif dan jumlah situs aktif untuk reaksi fotokatalitik (Degabriel et al., 2023). Fenomena ini juga memperburuk produksi radikal bebas yang penting dalam reaksi degradasi (Degabriel et al., 2018). Penurunan luas permukaan akibat peningkatan jumlah fotokatalis telah dilaporkan menyebabkan menurunnya kemampuan adsorpsi zat warna (E, 2019).

3. Dinamika Adsorpsi dan Kinetika Degradasi

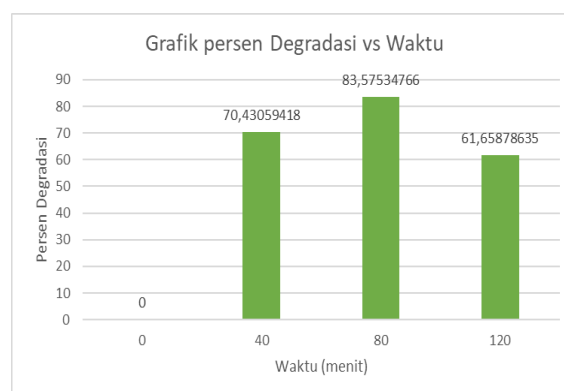
Efisiensi degradasi yang tinggi pada awal reaksi juga dapat dikaitkan dengan ketersediaan situs adsorpsi yang masih cukup pada permukaan katalis. Pada tahap awal (hingga 80 menit), fotokatalis masih terdispersi dengan baik sehingga luas permukaan aktif maksimal. Namun, pada waktu penyinaran yang lebih panjang, sebagian besar situs telah terisi MB, sehingga laju adsorpsi dan degradasi menurun. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian Vifta et al. (2016) (Vifta et al., 2016) yang menyatakan waktu optimum degradasi terjadi pada 60 menit. Menurunnya laju adsorpsi pada tahap akhir menunjukkan kemungkinan pembentukan lapisan tunggal MB pada permukaan adsorben (Jain et al., 2016).

4. Pengaruh pH terhadap Efisiensi Fotokatalitik

Penambahan larutan HCl dalam sistem PFC menyebabkan kondisi larutan menjadi asam. Nilai pH mempengaruhi muatan permukaan katalis, ukuran partikel, dan struktur pita energi, yang secara langsung mempengaruhi aktivitas fotokatalitik (Chen et al., 2018; Fotiou et al., 2015). Dalam kondisi asam, kelebihan ion H^+ bersaing dengan molekul MB dalam proses adsorpsi, sehingga efisiensi degradasi menurun. MB sebagai zat warna kationik akan mengalami penurunan adsorpsi dalam lingkungan asam, terutama ketika pH lebih rendah dari pHpzc dari permukaan katalis (Oladoye et al., 2022). Hal ini menyebabkan saturasi permukaan katalis dan menghambat penetrasi cahaya UV, sehingga mengganggu pembentukan pasangan elektron-hole (Delsouz Khaki et al., 2018b; Fotiou et al., 2015).



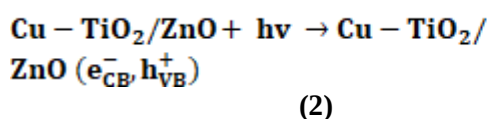
Gambar 8. Grafik Spektrum Serapan UV-Vis untuk degradasi waktu



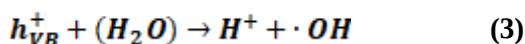
Gambar 9. Grafik Uji Aktivitas Fotokatalitik

3.5. Mekanisme Fotokatalitik

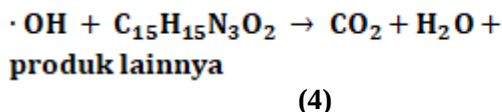
Mekanisme fotokatalitik pada sistem Cu-TiO₂/ZnO untuk pendegradasian senyawa organik seperti *Methylene blue* (MB) berlangsung melalui serangkaian proses eksitasi elektron, transfer muatan, serta reaksi redoks di permukaan fotokatalis. Ketika fotokatalis Cu-TiO₂/ZnO terpapar cahaya UV dengan energi foton ($h\nu$) yang setara atau lebih besar dari celah pita-nya, terjadi eksitasi elektron dari pita valensi (VB) ke pita konduksi (CB), meninggalkan lubang (*hole*, h^+) di VB (Lee et al., 2018b; P. Li et al., 2024; Mukkavilli et al., 2024; Rajamanickam & Shanthi, 2016; Sehar et al., 2020; Tang et al., 2020):



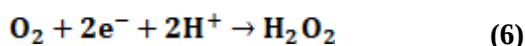
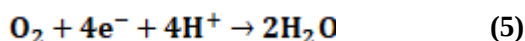
Pasangan muatan yang terbentuk ini (e^- dan h^+) selanjutnya berperan sebagai agen reduksi dan oksidasi. Hole (h^+) pada VB berpotensi tinggi untuk mengoksidasi molekul air atau ion hidroksida menjadi radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$), suatu spesies oksidator yang sangat reaktif



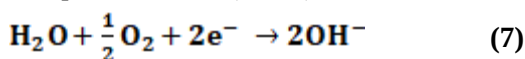
Radikal $\cdot OH$ tersebut berperan utama dalam mendegradasi molekul MB menjadi senyawa yang lebih sederhana seperti CO_2 dan H_2O (Lee et al., 2018a; Rauf & Ashraf, 2009), melalui reaksi oksidasi bertingkat:



Di sisi lain, elektron tereksitasi (e^-) pada CB dapat berpindah ke permukaan atau ke elektroda (jika menggunakan sistem elektrokimia) dan mereduksi oksigen terlarut (O_2). Dalam kondisi netral atau asam, oksigen mengalami reaksi reduksi (Oxygen Reduction Reaction/ORR) (Houas et al., 2001; Kee et al., 2018; Lee et al., 2018b; Ong et al., 2018; Zhao et al., 2017), membentuk H_2O atau H_2O_2 yang juga berkontribusi dalam menghasilkan radikal hidroksil tambahan:



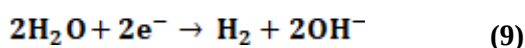
Sementara dalam media basa, reaksi dominan berupa reduksi air (WRR).



Apabila tidak tersedia O_2 , maka ion H^+ dapat direduksi menjadi gas hydrogen



Dalam media basa, WRR menghasilkan hydrogen melalui



Peran kunci dari doping Cu dalam sistem ini adalah meningkatkan efisiensi pemisahan muatan. Ion Cu^{2+} dapat bertindak sebagai pusat penangkap elektron sementara, yang menurunkan laju rekombinasi $e^- - h^+$. Selain itu, Cu juga memperluas serapan spektrum cahaya ke arah panjang gelombang yang lebih besar (cahaya tampak), serta berpotensi menciptakan efek plasmonik jika sebagian Cu berada dalam bentuk Cu^0 . Keberadaan struktur heterojunction antara TiO_2 dan ZnO memfasilitasi transfer muatan yang lebih efisien. ZnO , yang memiliki pita konduksi lebih tinggi, mendorong elektron ke arah TiO_2 , sedangkan hole cenderung tetap di VB ZnO . Hal ini memperpanjang waktu hidup pasangan muatan, memperkuat reaktivitas redoks, dan meningkatkan efisiensi fotokatalitik secara keseluruhan. Bila sistem ini

membentuk type-II heterojunction atau bahkan Z-scheme, transfer muatan dapat terjadi secara terarah dan selektif, mempertahankan potensi redoks kuat dari masing-masing semikonduktor.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan keberhasilan sintesis material Cu- TiO_2/ZnO sebagai material elektroda dalam aplikasi fotokatalis untuk proses degradasi *methylene blue* dengan teknologi fotokatalitik fuel cell. Material Cu- TiO_2/ZnO disintesis dengan metode sol-gel dan dikarakterisasi dengan SEM dan UV-Vis DRS. Karakterisasi SEM menunjukkan bahwa partikel Cu- TiO_2/ZnO berbentuk bulat dengan ukuran bervariasi. Analisis UV-Vis DRS menunjukkan penurunan celah pita energi seiring dengan peningkatan kadar Cu, serta pergeseran panjang gelombang absorpsi. Penambahan Cu meningkatkan tegangan yang dihasilkan, dengan nilai tertinggi pada Cu(8%)- TiO_2/ZnO sebesar 0,922V. Suhu kalsinasi optimal adalah 200°C. Aktivitas fotokatalitik terbaik diperoleh pada Cu(8%)- TiO_2/ZnO , dengan degradasi *Methylene blue* mencapai 83,57% dalam 80 menit, dan konsentrasi akhir 1,64 ppm dari 10 ppm. Dengan demikian, doping Cu pada sistem heterojungsi TiO_2/ZnO terbukti meningkatkan efisiensi fotokatalitik, menjadikannya kandidat potensial untuk aplikasi PFC dalam pengolahan air limbah industri tekstil. Diperlukan penelitian lanjutan untuk menentukan rasio doping Cu yang paling optimal serta mengevaluasi stabilitas fotokatalis dalam kondisi operasi jangka panjang. Selain itu, pengujian terhadap berbagai jenis polutan dan kondisi reaksi yang lebih kompleks penting dilakukan guna memperluas potensi aplikasi material ini dalam pengolahan air limbah yang beragam.

DAFTAR PUSTAKA

- Adamu, A., Isaacs, M., Boodhoo, K., & Abegão, F. R. (2023). Investigation of Cu/TiO₂ synthesis methods and conditions for CO₂ photocatalytic reduction via conversion of bicarbonate/carbonate to formate. *Journal of CO₂ Utilization*, 70. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2023.102428>
- Ali, M. M., Haque, M. J., Kabir, M. H., Kaiyum, M. A., & Rahman, M. S. (2021). Nano synthesis of ZnO-TiO₂ composites by sol-gel method and evaluation of their

- antibacterial, optical and photocatalytic activities. *Results in Materials*, 11, 100199.
<https://doi.org/10.1016/j.rinma.2021.100199>
- Babel, S., Sekartaji, P. A., & Sudrajat, H. (2017). TiO₂ as an effective nanocatalyst for photocatalytic degradation of humic acid in water environment. *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA*, 66(1).
<https://doi.org/10.2166/aqua.2016.102>
- Chahid, S., de los Santos, D. M., & Alcántara, R. (2018). The effect of Cu-doped TiO₂ photoanode on photovoltaic performance of dye-sensitized solar cells. *ACM International Conference Proceeding Series*.
<https://doi.org/10.1145/3286606.3286854>
- Chen, H., Chen, N., Gao, Y., & Feng, C. (2018). Photocatalytic degradation of methylene blue by magnetically recoverable Fe₃O₄/Ag₆Si₂O₇ under simulated visible light. *Powder Technology*, 326.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.12.029>
- Degabriel, T., Colaço, E., Domingos, R. F., El Kirat, K., Brouri, D., Casale, S., Landoulsi, J., & Spadavecchia, J. (2018). Factors impacting the aggregation/agglomeration and photocatalytic activity of highly crystalline spheroid- and rod-shaped TiO₂ nanoparticles in aqueous solutions. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 20(18).
<https://doi.org/10.1039/c7cp08054a>
- Degabriel, T., Colaço, E., Domingos, R. F., El Kirat, K., Brouri, D., Casale, S., Landoulsi, J., & Spadavecchia, J. (2023). Correction: Factors impacting the aggregation/agglomeration and photocatalytic activity of highly crystalline spheroid- and rod-shaped TiO₂ nanoparticles in aqueous solutions. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 25(5).
<https://doi.org/10.1039/d2cp90106d>
- Delsouz Khaki, M. R., Shafeeyan, M. S., Raman, A. A. A., & Daud, W. M. A. W. (2018a). Enhanced UV-Visible photocatalytic activity of Cu-doped ZnO/TiO₂ nanoparticles. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 29(7).
<https://doi.org/10.1007/s10854-017-8515-9>
- Delsouz Khaki, M. R., Shafeeyan, M. S., Raman, A. A. A., & Daud, W. M. A. W. (2018b). Evaluating the efficiency of nano-sized Cu doped TiO₂/ZnO photocatalyst under visible light irradiation. *Journal of Molecular Liquids*, 258.
<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.11.030>
- Derouich, G., Alami Younssi, S., Bennazha, J., Cody, J. A., Ouammou, M., & El Rhazi, M. (2020). Development of low-cost polypyrrole/sintered pozzolan ultrafiltration membrane and its highly efficient performance for congo red dye removal. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(3).
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103809>
- E, D. (2019). Photocatalytic Degradation of Methylene Blue Using Silver Nanoparticles Synthesized from Gymnema Sylvestre and Antimicrobial Assay. *Novel Research in Sciences*, 2(2).
<https://doi.org/10.31031/nrs.2019.02.000532>
- El-Shazly, A. N., Hegazy, A. H., El Shenawy, E. T., Hamza, M. A., & Allam, N. K. (2021). Novel facet-engineered multi-doped TiO₂ mesocrystals with unprecedented visible light photocatalytic hydrogen production. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 220.
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110825>
- Fotiou, T., Triantis, T. M., Kaloudis, T., & Hiskia, A. (2015). Evaluation of the photocatalytic activity of TiO₂ based catalysts for the degradation and mineralization of cyanobacterial toxins and water off-odor compounds under UV-A, solar and visible light. *Chemical Engineering Journal*, 261.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.03.095>
- Houas, A., Lachheb, H., Ksibi, M., Elaloui, E., Guillard, C., & Herrmann, J. M. (2001). Photocatalytic degradation pathway of methylene blue in water. *Applied Catalysis B: Environmental*, 31(2).
[https://doi.org/10.1016/S0926-3373\(00\)00276-9](https://doi.org/10.1016/S0926-3373(00)00276-9)
- Ikram, M., Naeem, M., Zahoor, M., Rahim, A., Hanafiah, M. M., Oyekanmi, A. A., Shah, A. B., Mahnashi, M. H., Al Ali, A., Jalal,

- N. A., Bantun, F., & Sadiq, A. (2022). Biodegradation of Azo Dye Methyl Red by *Pseudomonas aeruginosa*: Optimization of Process Conditions. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(16). <https://doi.org/10.3390/ijerph19169962>
- Jain, N., Dwivedi, M. K., & Waskle, A. (2016). Adsorption of Methylene Blue Dye from Industrial Effluents Using Coal Fly Ash. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS)*, 3(4).
- Jamee, R., & Siddique, R. (2019). Biodegradation of synthetic dyes of textile effluent by microorganisms: An environmentally and economically sustainable approach. *European Journal of Microbiology and Immunology*, 9(4). <https://doi.org/10.1556/1886.2019.00018>
- Janani, B., Gayathri, G., Syed, A., Raju, L. L., Marraiki, N., Elgorban, A. M., Thomas, A. M., & Khan, S. S. (2020). The Effect of Various Capping Agents on Surface Modifications of CdO NPs and the Investigation of Photocatalytic Performance, Antibacterial and Antibiofilm Activities. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 30(5), 1865–1876. <https://doi.org/10.1007/s10904-020-01440-w>
- Kadam, A. A., Lade, H. S., Patil, S. M., & Govindwar, S. P. (2013). Low cost CaCl₂ pretreatment of sugarcane bagasse for enhancement of textile dyes adsorption and subsequent biodegradation of adsorbed dyes under solid state fermentation. *Bioresource Technology*, 132. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.01.059>
- Kee, M. W., Lam, S. M., Sin, J. C., Zeng, H., & Mohamed, A. R. (2020). Explicating charge transfer dynamics in anodic TiO₂/ZnO/Zn photocatalytic fuel cell for ameliorated palm oil mill effluent treatment and synchronized energy generation. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 391. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2019.112353>
- Kee, M. W., Soo, J. W., Lam, S. M., Sin, J. C., & Mohamed, A. R. (2018). Evaluation of photocatalytic fuel cell (PFC) for electricity production and simultaneous degradation of methyl green in synthetic and real greywater effluents. *Journal of Environmental Management*, 228. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.09.038>
- Khalid, N. R., Ahmed, E., Hong, Z., Ahmad, M., Zhang, Y., & Khalid, S. (2013). Cu-doped TiO₂ nanoparticles/graphene composites for efficient visible-light photocatalysis. *Ceramics International*, 39(6). <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2013.02.051>
- Lam, S. M., Sin, J. C., Lin, H., Li, H., & Zeng, H. (2020). Greywater and bacteria removal with synchronized energy production in photocatalytic fuel cell based on anodic TiO₂/ZnO/Zn and cathodic CuO/Cu. *Chemosphere*, 245. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125565>
- Lee, S. L., Ho, L. N., Ong, S. A., Wong, Y. S., Voon, C. H., Khalik, W. F., Yusoff, N. A., & Nordin, N. (2018a). Exploring the relationship between molecular structure of dyes and light sources for photodegradation and electricity generation in photocatalytic fuel cell. *Chemosphere*, 209. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.06.157>
- Lee, S. L., Ho, L. N., Ong, S. A., Wong, Y. S., Voon, C. H., Khalik, W. F., Yusoff, N. A., & Nordin, N. (2018b). Role of dissolved oxygen on the degradation mechanism of Reactive Green 19 and electricity generation in photocatalytic fuel cell. *Chemosphere*, 194. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.11.166>
- Li, L., Liu, J., Su, Y., Li, G., Chen, X., Qiu, X., & Yan, T. (2009). Surface doping for photocatalytic purposes: Relations between particle size, surface modifications, and photoactivity of SnO₂:Zn²⁺ nanocrystals. *Nanotechnology*, 20(15). <https://doi.org/10.1088/0957-4484/20/15/155706>
- Li, P., Zhou, X., Yang, H., He, Y., Kan, Y., Zhang, Y., Shang, Y., Zhang, Y., Cao, X., & Leung, M. K. H. (2024). Approaches for Enhancing Wastewater Treatment of Photocatalytic Fuel Cells: A Review.

- Materials*, 17(9), 1–17.
<https://doi.org/10.3390/ma17092139>
- Mahmoud, M. A., Poncheri, A., Badr, Y., & Abd El Waned, M. G. (2009). Photocatalytic degradation of methyl red dye. *South African Journal of Science*, 105(7–8).
<https://doi.org/10.4102/sajs.v105i7/8.86>
- Mornani, E. G., Mosayebian, P., Dorrani, D., & Behzad, K. (2016). Effect of calcination temperature on the size and optical properties of synthesized ZnO nanoparticles. *Journal of Ovonic Research*, 12(2), 75–80.
- Mukkavilli, R. S., Moharana, N., Singh, B., Fischer, T., Vollnhals, F., Ichangi, A., Kumar, K. C. H., Christiansen, S., Kim, K. H., Kwon, S., Kumar, R., & Mathur, S. (2024). Electrocatalytic activity, phase kinetics, spectroscopic advancements, and photocorrosion behaviour in tantalum nitride phases. *Nano Energy*, 129(May).
<https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2024.110046>
- Nasikhudin, Diantoro, M., Kusumaatmaja, A., & Triyana, K. (2018). Study on Photocatalytic Properties of TiO₂ Nanoparticle in various pH condition. *Journal of Physics: Conference Series*, 1011(1).
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1011/1/012069>
- Oladoye, P. O., Ajiboye, T. O., Omotola, E. O., & Oyewola, O. J. (2022). Methylene blue dye: Toxicity and potential elimination technology from wastewater. In *Results in Engineering* (Vol. 16).
<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100678>
- Ong, C. B., Ng, L. Y., & Mohammad, A. W. (2018). A review of ZnO nanoparticles as solar photocatalysts: Synthesis, mechanisms and applications. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 81).
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.020>
- Pellegrino, F., Pellutiè, L., Sordello, F., Minero, C., Ortel, E., Hodoroaba, V. D., & Maurino, V. (2017). Influence of agglomeration and aggregation on the photocatalytic activity of TiO₂ nanoparticles. *Applied Catalysis B: Environmental*, 216.
<https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.05.046>
- Preda, S., Pandele-Cuşu, J., Petrescu, S. V., Ciobanu, E. M., Petcu, G., Culiţă, D. C., Apostol, N. G., Costescu, R. M., Raut, I., Constantin, M., & Predoană, L. (2022). Photocatalytic and Antibacterial Properties of Doped TiO₂ Nanopowders Synthesized by Sol–Gel Method. *Gels*, 8(10), 1–20.
<https://doi.org/10.3390/gels8100673>
- Rajamanickam, D., & Shanthi, M. (2016). Photocatalytic degradation of an organic pollutant by zinc oxide – solar process. *Arabian Journal of Chemistry*, 9.
<https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2012.05.006>
- Rauf, M. A., & Ashraf, S. S. (2009). Fundamental principles and application of heterogeneous photocatalytic degradation of dyes in solution. In *Chemical Engineering Journal* (Vol. 151, Issues 1–3).
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.02.026>
- Sahu, M., & Biswas, P. (2011). Single-step processing of copper-doped titania nanomaterials in a flame aerosol reactor. *Nanoscale Research Letters*, 6.
<https://doi.org/10.1186/1556-276X-6-441>
- Saidani, A., Boudraa, R., Fendi, K., Benouadah, L., Benabbas, A., Djermoune, A., Salvestrini, S., Bollinger, J. C., Alayyaf, A. A., & Mouni, L. (2025). Effect of Calcination Temperature on the Photocatalytic Activity of Precipitated ZnO Nanoparticles for the Degradation of Rhodamine B Under Different Light Sources. *Water (Switzerland)*, 17(1).
<https://doi.org/10.3390/w17010032>
- Saini, K., Sahoo, A., Kumar, J., Kumari, A., Pant, K. K., Bhatnagar, A., & Bhaskar, T. (2023). Effective utilization of discarded reverse osmosis post-carbon for adsorption of dyes from wastewater. *Environmental Research*, 231.
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116165>
- Sarac, M. F., Ozturk, K., & Yatmaz, H. C. (2020). A facile two-step fabrication of titanium dioxide coated copper oxide nanowires with enhanced photocatalytic performance. *Materials Characterization*, 159.
<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2019.110042>
- Sehar, S., Sher, F., Zhang, S., Khalid, U., Sulejmanović, J., & Lima, E. C. (2020). Thermodynamic and kinetic study of

- synthesised graphene oxide-CuO nanocomposites: A way forward to fuel additive and photocatalytic potentials. *Journal of Molecular Liquids*, 313. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.113494>
- Sharma, K., Pandit, S., Mathuriya, A. S., Gupta, P. K., Pant, K., & Jadhav, D. A. (2023). Microbial Electrochemical Treatment of Methyl Red Dye Degradation Using Co-Culture Method. *Water (Switzerland)*, 15(1). <https://doi.org/10.3390/w15010056>
- Sugandi, D., Wahyuni, N., & Rahmalia, W. (2024). Fotocatalytic degradation of methylene blue by floating TiO₂-coconut fiber. *Acta Chimica Asiana*, 7(1), 437–442. <https://doi.org/10.29303/aca.v7i1.183>
- Suganthi, N., Thangavel, S., & Kannan, K. (2020). Hibiscus subdariffa leaf extract mediated 2-D fern-like ZnO/TiO₂ hierarchical nanoleaf for photocatalytic degradation. *FlatChem*, 24(July), 100197. <https://doi.org/10.1016/j.flatc.2020.100197>
- Tang, H., Geng, K., Hu, Y., & Li, N. (2020). Synthesis and properties of phosphonated polysulfones for durable high-temperature proton exchange membranes fuel cell. *Journal of Membrane Science*, 605. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.118107>
- Tian, L., Li, Z., Xu, X., & Zhang, C. (2021). Advances in noble metal (Ru, Rh, and Ir) doping for boosting water splitting electrocatalysis. In *Journal of Materials Chemistry A* (Vol. 9, Issue 23). <https://doi.org/10.1039/d1ta01108a>
- Triandi, R., & Gunlazuardi, J. (2001). Preparasi Lapisan Tipis TiO₂ sebagai Fotokatalis : Keterkaitan antara Ketebalan dan Aktivitas Fotokatalisis. *Jurnal Penelitian Universitas Indonesia*, 5.
- Vifta, R. L., Sutarno, & Suyanta. (2016). Studi Aktifitas Fotokatalik MCM-41 Teremban Zn pada Zat Warna Metilen Biru. *Jurnal MIPA*, 39(1).
- Wang, Y., Lan, Y., Bu, D., Qian, B., Wang, Y., Wang, B., Wu, Q., Li, S., Zhang, Y., & Song, X. M. (2020). A study on tandem photoanode and photocathode for photocatalytic formaldehyde fuel cell. *Electrochimica Acta*, 352. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2020.136476>
- WHO/UNICEF. (2021). WHO/UNICEF Joint Monitoring Program for Water Supply, Sanitation and Hygiene (JMP) – Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000 – 2020. In *Imi-Sdg6 Sdg 6 Progress Reports*.
- Zhao, K., Bai, J., Zeng, Q., Zhang, Y., Li, J., Li, L., Xia, L., & Zhou, B. (2017). Efficient wastewater treatment and simultaneously electricity production using a photocatalytic fuel cell based on the radical chain reactions initiated by dual photoelectrodes. *Journal of Hazardous Materials*, 337. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.05.004>