

Pengaruh Luas Permukaan Material Fotokatalis Cu-TiO₂/ZnO dan Larutan HCl Terhadap Degradasi *Methylene Blue* dalam *Photocatalytic Fuel Cell*

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

¹Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang

²Program Studi Fisika, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang

*Koresponden email: sarah.dampang@staff.unsika.ac.id

Diterima: 2 Agustus 2025

Disetujui: 16 Agustus 2025

Abstract

Water pollution caused by industrial dye waste is a serious environmental issue due to the presence of synthetic dyes such as *methylene blue* (MB), which are difficult to degrade naturally. This study aims to evaluate the performance of Cu-doped TiO₂/ZnO photocatalysts in a Photocatalytic Fuel Cell (PFC) system for MB degradation. The photocatalyst was synthesized using the sol-gel method and characterized by SEM-EDX and UV-Vis DRS. Morphological analysis revealed spherical particles with signs of agglomeration, while EDX confirmed the presence of Cu, Ti, Zn, and O elements. Cu doping at 5% reduced the band gap from 3.18 eV to 2.29 eV, enhancing light absorption into the visible region. Performance tests in the PFC system showed that the optimal condition was achieved using a 7×3 cm glass plate with 15 mL of HCl, producing a maximum voltage of 0.66 V. The highest degradation efficiency of MB reached 58.10% after 120 minutes of irradiation. These results indicate that Cu-TiO₂/ZnO nanocomposites have strong potential as photocatalysts for colored wastewater treatment and simultaneous energy conversion in PFC systems.

Keywords: *band gap, photocatalyst, industrial waste, methylene blue*

Abstrak

Pencemaran air akibat limbah industri pewarna menjadi isu lingkungan yang serius karena keberadaan zat warna sintetik seperti *methylene blue* (MB) yang sulit terdegradasi secara alami. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja fotokatalis Cu-doped TiO₂/ZnO dalam sistem *Photocatalytic Fuel Cell* (PFC) untuk degradasi MB. Fotokatalis disintesis dengan metode sol-gel dan dikarakterisasi menggunakan SEM-EDX dan UV-Vis DRS. Hasil karakterisasi menunjukkan morfologi partikel berbentuk bulat dengan kecenderungan aglomerasi, serta keberadaan unsur Cu, Ti, Zn, dan O. Doping Cu sebesar 5% menurunkan nilai *band gap* dari 3,18 eV menjadi 2,29 eV dan memperluas penyerapan cahaya hingga ke wilayah tampak. Uji kinerja dalam sistem PFC menunjukkan bahwa kombinasi pelat kaca 7×3 cm dengan penambahan HCl 15 mL menghasilkan tegangan maksimum sebesar 0,66 V. Efisiensi degradasi MB tertinggi sebesar 58,10% dicapai setelah 120 menit penyinaran. Hasil ini menunjukkan bahwa nanokomposit Cu-TiO₂/ZnO memiliki potensi tinggi sebagai fotokatalis untuk pengolahan limbah berwarna dan konversi energi simultan dalam sistem PFC.

Kata Kunci: *band gap, fotokatalis, limbah industri, methylene blue*

1. Pendahuluan

Pencemaran lingkungan akibat aktivitas industri telah menjadi salah satu tantangan utama dalam pembangunan berkelanjutan di berbagai negara [1]. Pencemaran bisa terjadi akibat aktivitas kimia, biologis, maupun fisik, dan umumnya disebabkan oleh adanya zat-zat berlebih yang dapat membahayakan manusia serta lingkungan. Tingkat polusi udara sendiri berbeda-beda, tergantung pada seberapa banyak polutan yang terkandung di dalamnya [2]. Salah satu bentuk pencemaran yang paling krusial adalah pencemaran air, yang umumnya disebabkan oleh pembuangan limbah industri tanpa pengolahan memadai [3]. Di antara berbagai sektor industri, industri pewarna meliputi tekstil, kertas, kulit, percetakan, karet, hingga kosmetik menyumbang kontribusi signifikan terhadap beban pencemaran air. Limbah cair dari proses pewarnaan umumnya mengandung senyawa warna sintetik dalam konsentrasi tinggi, yang bersifat stabil secara kimia dan sulit terdegradasi secara biologis. Hal ini menyebabkan senyawa tersebut dapat bertahan lama di

lingkungan perairan, bahkan dalam konsentrasi sangat rendah (<1 ppm), dan memberikan dampak toksik serta karsinogenik terhadap organisme akuatik maupun manusia [4].

Salah satu jenis pewarna yang banyak digunakan dan dikenal sebagai kontaminan prioritas dalam limbah industri adalah *methylene blue* (MB). MB merupakan pewarna kationik dengan struktur aromatik heterosiklik dan rumus kimia $C_{16}H_{18}ClN_3S$. Pewarna ini bersifat sangat stabil terhadap cahaya dan oksidasi, serta sukar diuraikan dengan metode konvensional. Dalam bentuk teroksidasi, MB berwarna biru intens, sedangkan dalam bentuk tereduksi (*leucomethylene blue*) tidak berwarna. Stabilitas ini menjadi tantangan tersendiri dalam upaya remediasi air limbah yang mengandung MB, sehingga diperlukan metode pengolahan yang lebih inovatif dan efisien. Beragam teknologi telah dikembangkan untuk mengatasi limbah pewarna, antara lain teknik adsorpsi [5], osmosis balik [6], filtrasi membran [7], dan biodegradasi menggunakan mikroorganisme [8], [9]. Meskipun efektif dalam kondisi tertentu, metode-metode tersebut umumnya memiliki keterbatasan berupa biaya operasional yang tinggi, efisiensi degradasi yang rendah, serta potensi menghasilkan limbah sekunder. Oleh karena itu, pendekatan alternatif yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan diperlukan untuk meningkatkan efisiensi pengolahan limbah industri.

Salah satu solusi yang menjanjikan adalah teknologi fotokatalitik, yang menggabungkan sinar ultraviolet (UV) dengan material semikonduktor untuk menghasilkan reaksi redoks yang mampu mendekomposisi kontaminan organik [10]. Prinsip kerja fotokatalis berbasis semikonduktor melibatkan penyerapan energi foton yang memicu eksitasi elektron dari pita valensi (*valence band*) ke pita konduksi (*conduction band*), membentuk pasangan *electron-hole* (e^-/h^+). Pasangan ini kemudian berpartisipasi dalam reaksi oksidasi-reduksi yang mampu mendegradasi molekul polutan kompleks menjadi senyawa yang lebih sederhana atau tidak berbahaya. Salah satu semikonduktor yang paling banyak digunakan adalah titanium dioksida (TiO_2) karena sifatnya yang tidak toksik, stabil secara kimia, dan murah. Namun, TiO_2 memiliki keterbatasan dalam menyerap cahaya pada panjang gelombang tampak (*visible light*) karena nilai energi celah pita (*band gap*) yang relatif besar ($\sim 3,2$ eV) [11]. Untuk meningkatkan aktivitas fotokatalitik di bawah sinar tampak, modifikasi material melalui proses doping logam telah banyak diteliti. Doping tembaga (Cu) pada TiO_2 dan/atau ZnO terbukti mampu menurunkan energi celah pita, menciptakan tingkat energi baru dalam struktur pita, serta menghambat rekombinasi pasangan *electron-hole* [12], [13]. Dengan demikian, transfer muatan berlangsung lebih efisien dan meningkatkan reaktivitas terhadap senyawa organik. Kombinasi antara TiO_2 , ZnO, dan doping Cu dalam bentuk nanokomposit Cu- TiO_2 /ZnO diyakini dapat memperluas spektrum penyerapan cahaya sekaligus meningkatkan efisiensi fotokatalitik.

Dalam penelitian ini, nanokomposit Cu- TiO_2 /ZnO digunakan sebagai fotoanoda dalam sistem *Photocatalytic Fuel Cell* (PFC) tipe dua-ruang (*dual-chamber*). Sistem ini dirancang dengan dua ruang reaksi yang dipisahkan oleh jembatan garam dan dilengkapi elektroda masing-masing untuk mendukung proses redoks secara terintegrasi. Pendekatan ini tidak hanya memungkinkan degradasi polutan seperti *methylene blue* secara efektif, tetapi juga berpotensi menghasilkan energi listrik sebagai hasil samping reaksi. Dengan demikian, penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem PFC berbasis fotokatalis Cu- TiO_2 /ZnO yang efisien, berkelanjutan, dan aplikatif untuk pengolahan air limbah industri berwarna.

2. Metode Penelitian

2.1. Alat Dan Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu *methylene blue*, ZnO, TiO_2 , KCl dari Merck, Jerman. Tembaga (II) Asetat monohidrat dari Supelco, USA. *Isopropyl alcohol* 99%, *polyethylene glycol* 400, HCl 37%, NaClO 12%, agar, aquades dan plat grafit. Plat kaca ukuran 5x3 cm; 6x3 cm dan 7x3 cm dengan ketebalan 3 mm. Fotokatalis Cu- TiO_2 /ZnO diuji menggunakan SEM (model SU3500, Hitachi, Jepang). Sifat optik dianalisis menggunakan UV-Vis DRS (model Cary 60, China). Efisiensi degradasi *methylene blue* menggunakan spektrofotometer UV-Vis (model V-730, Jasco, Jepang).

2.2. Sintesis ZnO

Sintesis ZnO dilakukan dengan metode sol-gel. Sebanyak 2,743 gram ZnO dilarutkan dalam 50 mL isopropanol dalam gelas kimia 100 mL yang ditutup aluminium foil, lalu diaduk menggunakan pengaduk magnet selama 45 menit. Setelah itu ditambahkan 1,4 mL monoetanolamin, dan larutan kembali diaduk selama 45 menit hingga terbentuk sol. Sol tersebut diamkan selama satu malam, kemudian ditambahkan 4,4 mL PEG 400 dan diaduk hingga homogen. Campuran kemudian dipanaskan dalam oven pada suhu 150°C selama 2 jam. Setelah didinginkan, pasta ZnO yang terbentuk diaplikasikan secara merata pada pelat kaca.

2.3. Sintesis TiO₂ Yang Didoping Cu

Sintesis fotokatalis TiO₂ yang didoping Cu dilakukan dengan metode sol-gel. Sebanyak 2,743 gram TiO₂ dilarutkan dalam 50 mL isopropanol dan diaduk menggunakan pengaduk magnet selama 45 menit. Selanjutnya ditambahkan Cu(CH₃COO)₂·H₂O sebanyak 5% dari massa TiO₂, kemudian pencampuran diaduk kembali selama 45 menit hingga homogen.

2.4. Katoda Dan Larutan HCl

Pelat grafit dengan ukuran 5×4 cm dan ketebalan 3 mm digunakan sebagai katoda. Katoda dicelupkan ke dalam larutan NaClO yang berfungsi sebagai elektrolit. Larutan HCl 10% sebanyak 100 mL disiapkan dengan mencampurkan 27 mL HCl 37% dengan 73 mL aquades. Untuk variasi degradasi metilen biru, HCl 10% ditambahkan sebanyak 15 mL, 20 mL, dan 25 mL ke dalam larutan.

2.5. Jembatan Garam Dan Larutan Katoda

Jembatan garam dibuat dengan melarutkan 1,86 gram KCl dan 0,93 gram agar-agar ke dalam 25 mL aquades. Campuran dipanaskan sambil diaduk hingga mendidih dan mengental, kemudian dimasukkan ke dalam pipa jembatan dan disimpan di lemari pendingin hingga mengeras. Untuk larutan katoda, 200 mL NaClO diencerkan dengan aquades hingga volume total 800 mL, sehingga diperoleh konsentrasi akhir sebesar 250 mL·L⁻¹.

2.6. Larutan Methylene Blue

Larutan stok *methylene blue* 1000 ppm disiapkan dengan melarutkan 0,10 gram *methylene blue* dalam 100 mL aquades. Selanjutnya untuk mendapatkan larutan kerja 10 ppm, sebanyak 10 mL larutan stok diencerkan dan ditambahkan HCl 10% sebanyak 15 mL, 20 mL, atau 25 mL, kemudian diencerkan dengan aquades hingga mencapai volume akhir 1000 mL.

2.7. Fotokatalitik Menggunakan Reaktor Dual-Chamber

Reaksi fotokatalitik dilakukan dalam sistem *Photocatalytic Fuel Cell* (PFC) dua-ruang (*dual-chamber*). Sebanyak 400 mL larutan *methylene blue* (anoda) dan 400 mL larutan NaClO (katoda) masing-masing dimasukkan ke dalam ruang reaksi yang terpisah, lalu dihubungkan dengan jembatan garam padat berbasis KCl-agar. Pelat kaca berlapis Cu-TiO₂/ZnO digunakan sebagai elektroda anoda dan pelat grafit sebagai katoda. Kedua elektroda disambungkan ke multimeter menggunakan kabel: kabel anoda (negatif) disambungkan ke pelat kaca dan kabel katoda (positif) ke pelat grafit. Sistem diberi penyalinan menggunakan lampu UV 100 watt selama 2 jam. Sampel diambil setiap 40 menit, disaring menggunakan kertas saring, dan dianalisis pH-nya menggunakan pH meter.

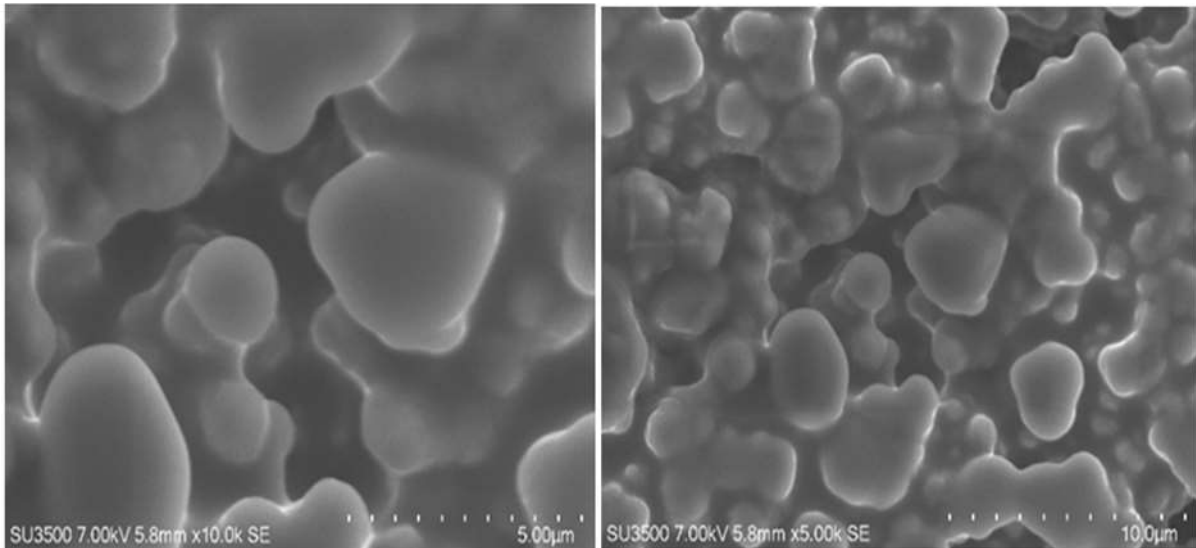
3. Hasil Dan Pembahasan

Karakterisasi morfologi dan komposisi unsur fotokatalis Cu-TiO₂/ZnO dilakukan menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM) yang dikombinasikan dengan Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX). Pengujian ini bertujuan untuk mengamati struktur permukaan, ukuran dan distribusi partikel, kecenderungan aglomerasi, serta memastikan keberadaan unsur penyusun dalam material yang telah disintesis.

3.1. Analisis SEM

SEM pada pembesaran 5.000× dan 10.000× (**Gambar 1**) menunjukkan bahwa fotokatalis Cu-TiO₂/ZnO memiliki morfologi partikel dengan bentuk dominan bulat (sferis) dan ukuran yang bervariasi antara 0,22 μm hingga 4,33 μm. Teramati pula distribusi partikel yang tidak seragam dan adanya aglomerasi antar partikel. Aglomerasi ini disebabkan oleh gaya van der Waals antarpartikel nano yang tinggi, sehingga menyebabkan partikel kecil bergumpal membentuk agregat yang lebih besar (Sondezi et al., 2024). Fenomena ini dapat mengurangi luas permukaan aktif, yang berimplikasi langsung pada menurunnya efisiensi reaksi fotokatalitik karena berkurangnya titik kontak antara fotokatalis dan molekul zat warna.

Pada **Gambar 2** memperlihatkan morfologi permukaan nanokomposit Cu-TiO₂/ZnO setelah dilapiskan pada substrat kaca. Teramati permukaan yang tidak homogen, dengan partikel bulat menyebar secara tidak merata dan membentuk lapisan yang relatif padat. Tidak tampaknya struktur kristal heksagonal khas ZnO menunjukkan bahwa lapisan Cu-TiO₂ yang terbentuk cukup tebal dan menutupi morfologi asli ZnO. Selain itu, interaksi ion Cu²⁺ selama proses sintesis dapat mengganggu pertumbuhan kristal ZnO, sehingga menghasilkan perubahan morfologi yang signifikan.



Gambar 1. Hasil Uji SEM-EDX 5.000x dan 10.000x



Gambar 2. Komposit Cu-TiO₂/ZnO

3.2. Analisis EDX

Hasil analisis EDX digunakan untuk mengkonfirmasi keberadaan unsur penyusun utama dalam material, yaitu Cu, Ti, Zn, dan O. Spektrum EDX memperlihatkan puncak intensitas kuat pada panjang gelombang yang sesuai dengan unsur-unsur tersebut (**Gambar 3**). Keberadaan unsur tembaga (Cu) menunjukkan bahwa proses doping Cu berhasil dilakukan pada struktur TiO₂/ZnO. Sinyal titanium (Ti) dan zinc (Zn) mengindikasikan bahwa komposit mengandung kedua semikonduktor tersebut, sedangkan sinyal oksigen (O) berasal dari gugus oksida dari ketiga logam.

Komposisi atomik dan berat yang terukur dari hasil EDX (**Tabel 1**) menunjukkan bahwa unsur Zn dan Ti memiliki rasio dominan, sedangkan Cu terdeteksi dalam konsentrasi relatif rendah, sesuai dengan dosis doping. Distribusi unsur yang merata mengindikasikan bahwa proses pencampuran selama sintesis berlangsung homogen, yang penting untuk menjamin efektivitas reaksi fotokatalitik pada seluruh permukaan material.

Tabel 1. Komposisi Unsur Berdasarkan Analisis EDX

Unsur	Komposisi Berat (%)	Komposisi Atom (%)
O	38,25	60,12
Ti	27,80	15,40
Zn	30,10	23,95
Cu	3,85	0,53

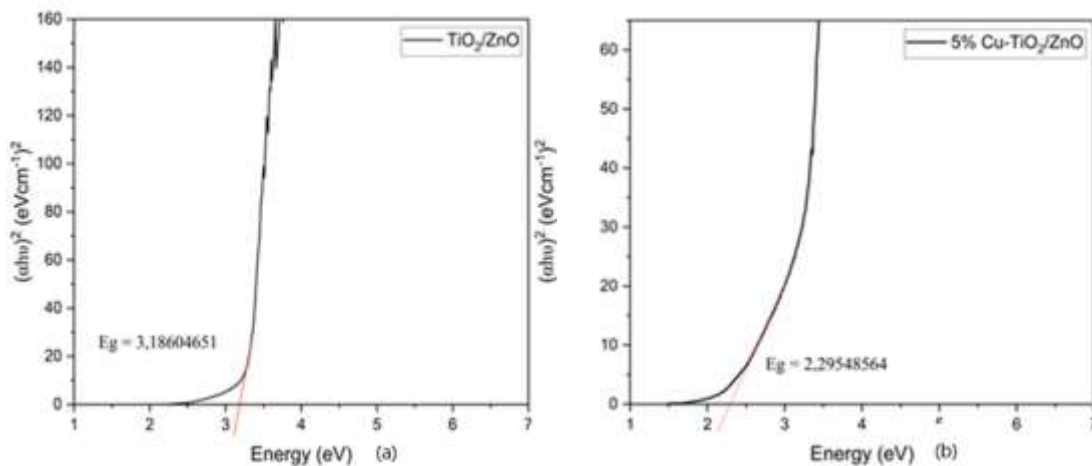
Nilai komposisi Cu yang rendah tetapi terdeteksi cukup signifikan memperkuat asumsi bahwa doping Cu tidak membentuk fase terpisah, melainkan terdispersi dalam struktur kristal TiO₂ atau ZnO. Doping Cu pada tingkat tertentu diketahui dapat menciptakan tingkat energi pertengahan (*intermediate levels*) dalam celah pita, yang memperpanjang waktu hidup pasangan electron-hole serta menurunkan energi celah pita, sehingga meningkatkan respons terhadap cahaya tampak [13].

3.3. Uji Material Dengan UV-Vis DRS

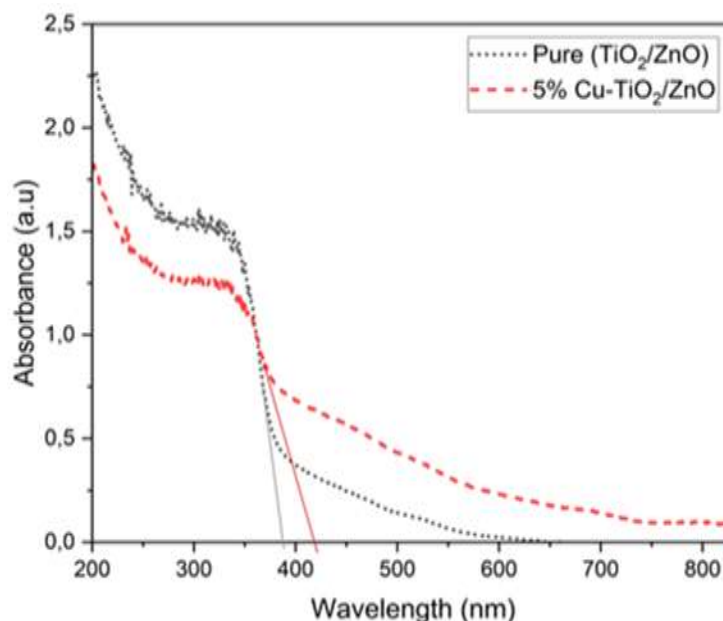
Karakteristik optik dari fotokatalis TiO_2/ZnO murni dan *Cu-doped* TiO_2/ZnO (5%) dikaji menggunakan *UV-Visible Diffuse Reflectance Spectroscopy* (UV-Vis DRS) pada rentang panjang gelombang 200–830 nm. Tujuan pengujian ini adalah untuk mengidentifikasi rentang serapan cahaya dan menghitung nilai *band gap* material, yang sangat menentukan efektivitas fotokatalis dalam memanfaatkan energi cahaya.

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3, TiO_2/ZnO murni menunjukkan serapan tajam pada panjang gelombang 387,45 nm, yang masih berada dalam wilayah ultraviolet (UV). Sementara itu, fotokatalis yang didoping dengan 5% Cu mengalami pergeseran merah (*red-shift*), dengan absorbansi maksimum bergeser ke 418,53 nm, yang berada dalam rentang cahaya tampak (*visible light*). Pergeseran ini menunjukkan bahwa doping Cu mampu menurunkan energi celah pita, sehingga memperluas rentang panjang gelombang yang dapat diserap dan memungkinkan pemanfaatan cahaya tampak secara lebih efektif dalam proses fotokatalitik.

Nilai *band gap* dihitung dengan menggunakan plot Tauc, yaitu grafik antara $(\alpha h\nu)^2$ terhadap energi foton ($h\nu$), sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 4**. Dari grafik tersebut, diperoleh bahwa TiO_2/ZnO murni memiliki band gap sebesar 3,18 eV, sedangkan *Cu-doped* TiO_2/ZnO (5%) menunjukkan band gap lebih rendah, yaitu 2,29 eV. Penurunan nilai band gap ini memungkinkan eksitasi elektron dari pita valensi ke pita konduksi dengan energi foton yang lebih rendah.



Gambar 3. Hasil Uji Spektra UV-Vis DRS



Gambar 4. Plot Tauc $(\alpha h\nu)^2$ vs Energy ($h\nu$) TiO_2/ZnO Murni (a) dan 5% TiO_2/ZnO (b)

Penurunan *band gap* akibat doping Cu berimplikasi pada peningkatan efisiensi fotokatalitik, karena menghasilkan lebih banyak pasangan *electron-hole* yang dapat terlibat dalam reaksi redoks. Selain itu, Cu^{2+} berperan sebagai perangkap muatan sementara, yang membantu menekan laju rekombinasi pasangan *electron-hole* [14], [15]. Namun demikian, kestabilan material juga menjadi faktor penting yang perlu diperhatikan agar sistem tetap efektif dalam jangka panjang [16].

3.4. Uji Kinerja Fotokatalis dalam *Photocatalytic Fuel Cell* (PFC)

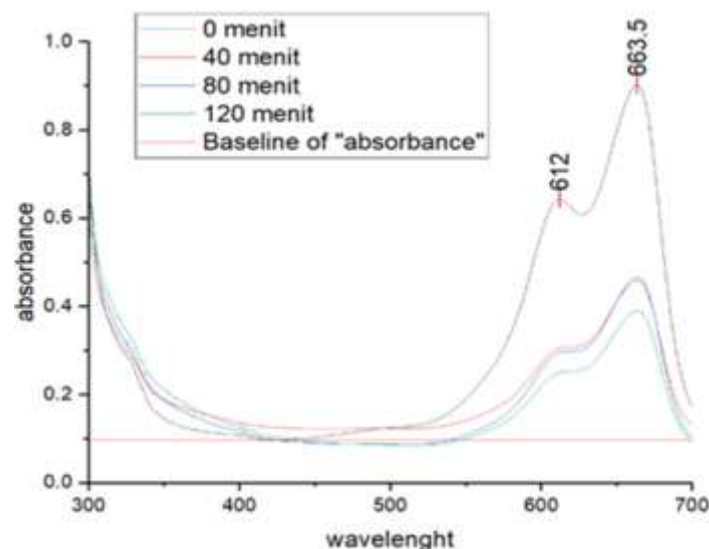
Kinerja fotokatalis Cu-TiO₂/ZnO dievaluasi dalam sistem *Photocatalytic Fuel Cell* (PFC) yang terdiri dari dua ruang reaksi (*dual-chamber*) dengan variasi volume larutan HCl (15, 20, dan 25 mL) serta luas pelat kaca (5×3 cm, 6×3 cm, dan 7×3 cm). Tegangan listrik yang dihasilkan diukur menggunakan multimeter untuk menilai kemampuan fotokatalis dalam mengonversi energi cahaya menjadi energi listrik melalui reaksi redoks.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa kombinasi optimum diperoleh pada pelat kaca berukuran 7×3 cm dengan penambahan HCl sebanyak 15 mL, yang menghasilkan tegangan maksimum sebesar 0,66 V. Peningkatan volume HCl justru menurunkan output tegangan menjadi 0,55 V (20 mL) dan 0,50 V (25 mL). Hal ini disebabkan oleh tingginya konsentrasi ion H⁺ yang dapat mengganggu transfer muatan pada permukaan fotokatalis.

Selain itu, luas permukaan pelat kaca memengaruhi persebaran partikel katalis dan area serapan cahaya. Semakin besar luas permukaan, semakin banyak zona aktif yang tersedia untuk generasi pasangan *electron-hole* dan reaksi redoks, yang pada akhirnya meningkatkan arus dan tegangan keluaran sistem [17]. Penurunan konsentrasi *methylene blue* selama proses juga memperbaiki transparansi larutan, memungkinkan penetrasi cahaya lebih dalam dan meningkatkan aktivitas sistem PFC secara keseluruhan.

3.5 Aktivitas Fotokatalis terhadap Degradasi *Methylene Blue*

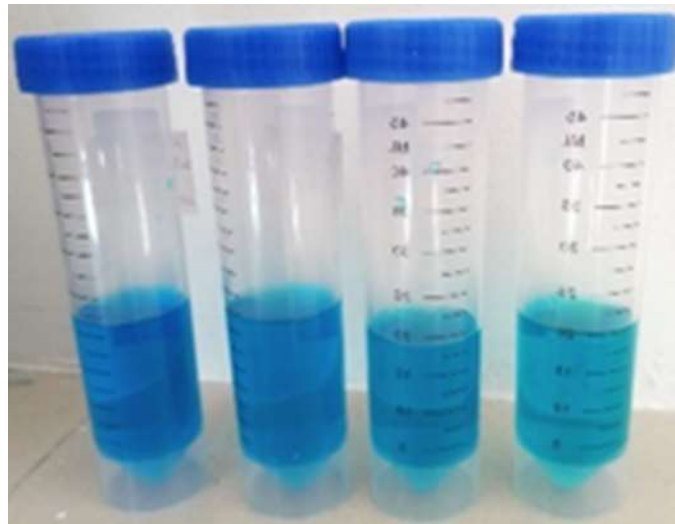
Aktivitas degradasi fotokatalis diuji terhadap larutan *methylene blue* (MB) 10 ppm, dengan pengamatan pada panjang gelombang maksimum 663,5 nm, yang ditentukan berdasarkan hasil spektrum UV-Vis dalam rentang 300–700 nm (Gambar 5). Panjang gelombang ini menjadi acuan untuk memantau perubahan konsentrasi zat warna seiring waktu.



Gambar 5. Spektrum UV-Vis Methylene Blue

Perubahan warna larutan MB secara visual dapat diamati pada Gambar 6, yang menunjukkan bahwa warna biru pekat berubah menjadi toska, kemudian bening setelah penyinaran selama 120 menit, menandakan terjadinya degradasi. Sampel pada gambar ini merupakan pelat katalis Cu-TiO₂/ZnO ukuran 7×3 cm dengan penambahan HCl 25 mL.

Hasil pengukuran absorbansi selama proses penyinaran disajikan pada Tabel 2, dengan nilai tertinggi pada 80 menit (0,46) dan penurunan signifikan pada 120 menit (0,38). Penurunan absorbansi mencerminkan berkurangnya konsentrasi *methylene blue* akibat degradasi oleh fotokatalis.



Gambar 6. Sampel Larutan Methylene Blue (7×3 cm, HCl 25 mL)

Tabel 2. Absorbansi Methylene Blue 10 ppm

Waktu	Absorbansi
40 menit	0,45
80 menit	0,46
120 menit	0,38

Efisiensi degradasi dihitung berdasarkan perbedaan konsentrasi awal dan akhir, seperti ditunjukkan dalam Tabel 3. Hasilnya menunjukkan peningkatan efisiensi degradasi seiring waktu, dengan nilai tertinggi sebesar 58,10% pada menit ke-120. Efisiensi ini mencerminkan keberhasilan Cu-TiO₂/ZnO dalam menghasilkan radikal hidroksil (\bullet OH) yang reaktif terhadap molekul MB [18].

Tabel 3. Efisiensi Degradasi Methylene Blue Menggunakan Cu-TiO₂/ZnO

Waktu Degradasi	Konsentrasi Methylene Blue (ppm)		% Degradasi
	Sebelum Degradasi	Setelah Degradasi	
40 menit	10	5,05	49,43%
80 menit	10	5,14	48,51%
120 menit	10	4,18	58,10%

Penambahan HCl menyebabkan pH awal larutan berada di sekitar 4 dan meningkat menjadi 5 setelah penyinaran. Dalam kondisi asam, ion H⁺ dapat bersaing dengan molekul MB untuk menempati situs aktif pada fotokatalis, yang dapat menghambat adsorpsi. Namun, keseimbangan pH tetap krusial untuk mencapai efisiensi degradasi yang optimal, bergantung pada sifat muatan dari polutan dan permukaan material [19].

Dengan demikian, Cu-TiO₂/ZnO menunjukkan potensi tinggi sebagai fotokatalis dalam sistem PFC untuk mendegradasi *methylene blue* secara efisien, baik dari sisi penyerapan cahaya tampak, stabilitas struktur, maupun efisiensi fotodegradasi.

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil menunjukkan bahwa modifikasi fotokatalis TiO₂/ZnO dengan doping Cu sebesar 5% mampu meningkatkan kinerja fotokatalitik dalam sistem *Photocatalytic Fuel Cell* (PFC) untuk degradasi *methylene blue*. Karakterisasi morfologi menggunakan SEM mengungkapkan bahwa fotokatalis memiliki partikel berbentuk sferis dengan kecenderungan aglomerasi, sementara analisis EDX memastikan keberadaan unsur Cu, Ti, Zn, dan O dalam komposit. Pengujian UV-Vis DRS menunjukkan bahwa doping Cu menurunkan nilai *band gap* dari 3,18 eV menjadi 2,29 eV dan memperluas spektrum serapan hingga ke wilayah cahaya tampak, yang berimplikasi pada peningkatan aktivitas fotokatalis. Dalam sistem PFC, kombinasi pelat kaca berukuran 7×3 cm dan penambahan HCl 15 mL menghasilkan tegangan tertinggi sebesar 0,66 V. Uji degradasi terhadap *methylene blue* menunjukkan bahwa efisiensi degradasi tertinggi sebesar 58,10% dicapai pada menit ke-120. Penelitian ini membuktikan bahwa nanokomposit Cu-TiO₂/ZnO memiliki potensi yang baik untuk aplikasi pengolahan air limbah industri berwarna secara berkelanjutan, dengan pemanfaatan energi cahaya tampak dan konversi energi simultan dalam sistem PFC.

6. Referensi

- [1] L. N. Ramadhika, S. Suryaningsih, and A. Aprilia, "Photoactivity Enhancement of TiO₂Nanoparticle-decorated ZnO as a Photocatalyst in Methylene Blue Degradation," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2376, no. 1, 2022, doi: 10.1088/1742-6596/2376/1/012003.
- [2] J. Singh, P. Yadav, A. K. Pal, and V. Mishra, "Water Pollutants: Origin and Status," no. January, pp. 5–20, 2020, doi: 10.1007/978-981-15-0671-0_2.
- [3] M. Pérez-González and S. A. Tomás, "Surface chemistry of TiO₂-ZnO thin films doped with Ag. Its role on the photocatalytic degradation of methylene blue," *Catal. Today*, vol. 360, no. July, pp. 129–137, 2021, doi: 10.1016/j.cattod.2019.08.009.
- [4] M. Ikram *et al.*, "Biodegradation of Azo Dye Methyl Red by *Pseudomonas aeruginosa*: Optimization of Process Conditions," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 19, no. 16, pp. 1–28, 2022, doi: 10.3390/ijerph19169962.
- [5] A. A. Kadam, H. S. Lade, S. M. Patil, and S. P. Govindwar, "Low cost CaCl₂ pretreatment of sugarcane bagasse for enhancement of textile dyes adsorption and subsequent biodegradation of adsorbed dyes under solid state fermentation," *Bioresour. Technol.*, vol. 132, pp. 276–284, 2013, doi: 10.1016/j.biortech.2013.01.059.
- [6] K. Saini *et al.*, "Effective utilization of discarded reverse osmosis post-carbon for adsorption of dyes from wastewater," *Environ. Res.*, vol. 231, no. P2, p. 116165, 2023, doi: 10.1016/j.envres.2023.116165.
- [7] D. A. Daratika, M. A. Baqiya, and Darminto, "Synthesis of Zn_{1-x}Cu_xO Nanoparticles by Coprecipitation and Their Structure and Electrical Property," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 196, no. 1, pp. 1–5, 2017, doi: 10.1088/1757-899X/196/1/012009.
- [8] R. Jamee and R. Siddique, "Biodegradation of synthetic dyes of textile effluent by microorganisms: An environmentally and economically sustainable approach," *Eur. J. Microbiol. Immunol.*, vol. 9, no. 4, pp. 114–118, 2019, doi: 10.1556/1886.2019.00018.
- [9] K. Sharma, S. Pandit, A. S. Mathuriya, P. K. Gupta, K. Pant, and D. A. Jadhav, "Microbial Electrochemical Treatment of Methyl Red Dye Degradation Using Co-Culture Method," *Water (Switzerland)*, vol. 15, no. 1, pp. 1–17, 2023, doi: 10.3390/w15010056.
- [10] K. Zhao *et al.*, "Efficient wastewater treatment and simultaneously electricity production using a photocatalytic fuel cell based on the radical chain reactions initiated by dual photoelectrodes," *J. Hazard. Mater.*, vol. 337, pp. 47–54, 2017, doi: 10.1016/j.jhazmat.2017.05.004.
- [11] T. Marimuthu, N. Anandhan, R. Thangamuthu, and S. Surya, "Facile growth of ZnO nanowire arrays and nanoneedle arrays with flower structure on ZnO-TiO₂seed layer for DSSC applications," *J. Alloys Compd.*, vol. 693, 2017, doi: 10.1016/j.jallcom.2016.09.260.
- [12] P. Kumar, V. S. Kundu, S. Kumar, B. Saharan, V. Kumar, and N. Chauhan, "Hydrothermal Synthesis of Cu-ZnO-/TiO₂-Based Engineered Nanomaterials for the Efficient Removal of Organic Pollutants and Bacteria from Water," *Bionanoscience*, vol. 7, no. 4, 2017, doi: 10.1007/s12668-017-0452-9.
- [13] X. Zhu *et al.*, "Preparation and characterization of Cu-doped TiO₂ nanomaterials with anatase/rutile/brookite triphasic structure and their photocatalytic activity," *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, vol. 32, no. 16, pp. 21511–21524, 2021, doi: 10.1007/s10854-021-06660-5.
- [14] R. Zila and R. Zainul, "Phototransformator Humic Acid Using Cu Doping Tio₂ Semiconductors Fototransformator Asam Humat Menggunakan Semikonduktor Tio₂ Doping Cu," *Chem. J.*, vol. 8, no. 1, pp. 37–40, 2019, [Online]. Available: <http://ejournal.unp.ac.id/index.php/kimia>
- [15] S. Priatmoko and S. Wahyuni, "Fotokatalis Ni-N-TiO₂ untuk Degradasi Metilen Biru," *Inov. Sains dan Kesehat.*, vol. 5, pp. 120–165, 2021.
- [16] M. A. Bhatti *et al.*, "TiO₂/ZnO Nanocomposite Material for Efficient Degradation of Methylene Blue," *J. Nanosci. Nanotechnol.*, vol. 21, no. 4, pp. 2511–2519, 2021, doi: 10.1166/jnn.2021.19107.
- [17] Q. Ayun, R. Ridho, and E. Malis, "Pengaruh Pelapisan Titanium Dioksida (TiO₂) Pada Plat Kaca Terhadap Efektivitas Fotodegradasi Methyl Orange Menggunakan Metode Sodis (Solar Disinfection Water)," *J. Cryst. Publ. Penelit. Kim. dan Ter.*, vol. 2, no. 1, pp. 37–50, 2020, doi: 10.36526/jc.v2i1.924.
- [18] N. D. Andari and S. Wardhani, "Fotokatalis TiO₂-Zeolit untuk Degradasi Metilen Biru," *Chem. Prog.*, vol. 7, no. 1, pp. 9–14, 2018.
- [19] H. Chen, N. Chen, Y. Gao, and C. Feng, "Photocatalytic degradation of methylene blue by magnetically recoverable Fe₃O₄/Ag₆Si₂O₇ under simulated visible light," *Powder Technol.*, vol. 326, 2018, doi: 10.1016/j.powtec.2017.12.029.