



## Sintesis $\text{ZrO}_2$ dan $\text{ZnO}$ Berbasis Template Metal-Organic Frameworks serta CQDs sebagai Fotokatalis untuk Degradasi Limbah Organik

Alvin Romadhoni Putra Hidayat<sup>1\*</sup>, Linda Suyati<sup>1</sup>, Pramastuti Adiar Rukmi<sup>1</sup>,  
Salsabila Salsabila<sup>1</sup> Chintami Aurora Wulandari<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departemen Kimia, Fakultas Sains dan Matematika, Universitas Diponegoro, Jl. Prof. Soedarto S.H, Tembalang, Semarang 50275

\*Corresponding author: [alvinromadhoniputrah@lecturer.undip.ac.id](mailto:alvinromadhoniputrah@lecturer.undip.ac.id)

Received: 17 Oktober 2025/ Accepted: 25 November 2025

Available online: 30 November 2025

### Abstrak

Pencemaran limbah organik, terutama dari zat warna sintetis, merupakan permasalahan lingkungan yang memerlukan metode efektif untuk degradasi. Fotokatalisis berbasis semikonduktor menawarkan solusi berkelanjutan karena mampu menguraikan polutan menjadi senyawa tidak berbahaya. Tujuan penelitian ini adalah sintesis dan karakterisasi fotokatalis berbasis  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ , serta CQDs yang diperoleh dari template MOFs serta mengevaluasi aktivitas fotokatalitiknya dalam degradasi metilen biru. Penelitian ini melaporkan sintesis material fotokatalis berbasis *Metal-Organic Frameworks* (MOFs) sebagai template untuk menghasilkan oksida logam  $\text{ZrO}_2$  dan  $\text{ZnO}$ , serta sintesis terpisah Carbon Quantum Dots (CQDs). CQDs disintesis menggunakan metode *microwave-assisted*, sedangkan  $\text{ZrO}_2$  diperoleh melalui kalsinasi material UiO-66 yang disintesis menggunakan metode solvothermal. Sementara itu,  $\text{ZnO}$  disintesis melalui kalsinasi material ZIF-8 yang diperoleh pada kondisi suhu ruang. Karakterisasi menggunakan XRD menunjukkan bahwa UiO-66 dan ZIF-8 berhasil terbentuk dengan pola difraksi khas masing-masing struktur kristalnya. Hasil FTIR memperlihatkan keberadaan gugus fungsi khas pada UiO-66, ZIF-8,  $\text{ZrO}_2$ , dan  $\text{ZnO}$  yang menandakan keberhasilan proses sintesis dan transformasi struktur MOF menjadi oksida logam. Uji fotokatalitik dilakukan menggunakan larutan metilen biru di bawah iradiasi UV dengan variasi waktu kontak 5–25 menit. Hasil degradasi menunjukkan bahwa  $\text{ZnO}$  memiliki aktivitas fotokatalitik lebih tinggi (efisiensi degradasi 66,4%) dibandingkan  $\text{ZrO}_2$  (7,5%). Penelitian ini mengonfirmasi potensi  $\text{ZnO}$  berbasis template MOF dan CQDs sebagai kandidat fotokatalis untuk pengolahan limbah organik.

**Kata Kunci:** Fotokatalis, Metal Organic Frameworks,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ , Carbon Quantum Dots, degradasi limbah

### 1. Pendahuluan

Industri yang terus mengalami peningkatan dapat memberikan efek negatif terhadap keseimbangan ekosistem melalui pencemaran lingkungan seperti keberadaan limbah organik dalam perairan. Pewarna merupakan penyumbang utama dalam proses pencemaran lingkungan [1]. Sekitar 15% limbah pewarna berada di perairan akibat kurang efisiennya proses penghilangan dalam industri tekstil [2]. Berbagai metode telah dilaporkan untuk menghilangkan limbah organik, seperti metode biologis, fisik, dan kimia. Proses degradasi dalam biodegradasi menghasilkan laju yang lambat, seringkali memerlukan beberapa hari untuk penyelesaiannya [3,4]. Metode fisik seperti adsorpsi melibatkan perpindahan limbah organik dari satu fase (adsorbat) ke fase lain (adsorben), tanpa mengalami degradasi molekul. Metode kimia seperti elektrokimia, dianggap mahal, sehingga kurang layak untuk mengatasi masalah ini [5]. Fotokatalitik merupakan *Advanced Oxidation Process* (AOP) merupakan metode efektif untuk menghilangkan limbah organik menjadi produk

tidak berbahaya melalui proses degradasi dengan bantuan sumber cahaya [6–8].

Semikonduktor digunakan dalam bidang fotokatalitik karena keunikan sifat optik yang dimilikinya, seperti kemampuan dalam penyerapan cahaya dan kemudahan migrasi muatan antar muka, yang dapat meningkatkan efektivitas dalam degradasi limbah organik [9–11].  $\text{ZnO}$  merupakan material semikonduktor tipe n yang sering digunakan sebagai fotokatalis karena kemampuannya yang baik untuk mendegradasi suatu limbah [12].

Metode templat melalui material berpori dapat digunakan untuk meningkatkan ukuran pori suatu semikonduktor. Terdapat beberapa jenis material berpori antara lain *Metal Organic Framework* (MOF), zeolit dan karbon aktif. Dibandingkan material berpori lainnya, MOF memiliki keunggulan antara lain luas permukaan yang tinggi, ukuran pori yang dapat disesuaikan, sisi aktif yang banyak serta persebaran elemen yang merata [13]. Salah satu sub kelas MOF yang sering digunakan sebagai template

oksida logam adalah ZIF-8. ZIF-8 merupakan jenis MOF yang dapat menjadi prekursor ZnO melalui proses kalsinasi adalah ZIF-8. Proses kalsinasi ZIF-8 akan menghasilkan ZnO yang memiliki luas permukaan serta ukuran pori yang lebih tinggi dibandingkan ZnO yang disintesis secara konvensional [14]. Selain itu, jenis MOF lain seperti UiO-66 yang tersusun atas atom Zr dan ligan benzen dikarboksilat (BDC) dapat menghasilkan oksida logam tipe p yang sering dikombinasikan dengan semikonduktor tipe n yaitu ZnO untuk menghasilkan kinerja degradasi yang tinggi [15].

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh [16], bahwa  $\text{ZrO}_2$  murni dalam bentuk thin film dapat mendegradasi metilen biru, meskipun efisiensinya rendah dimana degradasi MB sebesar 20–36% pada film  $\text{ZrO}_2$  [16]. Sementara itu, ZnO, telah banyak diteliti sebagai fotokatalis aktif misalnya menggunakan ZnO untuk degradasi MB di bawah penyinaran UV, menunjukkan penurunan konsentrasi MB secara signifikan [17].

*Carbon Quantum Dots* (CQDs) merupakan kelompok dari Carbon Dots (CDs). CQDs telah banyak dilaporkan sebagai mediator electron dalam proses fotokatalitik karena keunikannya seperti konstanta dielektrik yang tinggi sehingga menghasilkan pemisahan muatan yang baik [18]. Spektrum penyerapan cahaya yang luas pada CQDs menjadikannya semakin banyak diminati dalam bidang fotokatalitik. Luasnya jangkauan serapan dari transisi  $\pi$ - $\pi^*$  dan  $n$ - $\pi^*$  disebabkan oleh adanya hibridisasi  $sp^2$  pada gugus fungsinya [19]. Efektivitas fotodegradasi limbah organik dapat ditingkatkan dengan menggabungkan fotokatalis semikonduktor dengan CQDs untuk menghasilkan suatu sistem *ternary heterojunction*. Peningkatan kinerja degradasi terhadap limbah organik menggunakan menggunakan fotokatalis berbasis *ternary heterojunction* merupakan solusi yang tepat untuk mengatasi keberadaan limbah organik dalam perairan.

## 2. Metode Penelitian

### 2.1. Alat dan Bahan

**Alat:** Peralatan yang digunakan untuk sintesis material fotokatalis meliputi botol pereaksi duran, pipet ukur, gelas beker, spatula, kaca arloji, oven (Memmert), oven *microwave* (LG), pengaduk magnetik, *hot plate*, *sentrifuge* (Hettich Zentrifuge), termometer, tube sentrifuge, timbangan analitik (Ohaus Pioneer) dan *furnace muffle* (Thermolyne), Spektrofotometer UV-VIS (B-One), *Fourier Transform Infra Red Spectroscopy* (Shimadzu), *X-Ray Diffraction* (Shimadzu XRD-7000).

**Bahan:** Bahan-bahan yang digunakan untuk sintesis material fotokatalis: serbuk Zink Nitrate Tetrahydrate (Merck), Zirkonium tetraklorida Pro Analisis (Sigma-Aldrich), Asam 1,4-Benzendikarboksilat Pro Analisis (Sigma-Aldrich), N,N-dimetilformamida (Merck), 2-Metilimidazol 99% (Sigma-Aldrich), Asam sitrat Pro Analisis (Merck), Urea Pro Analisis (Merck), aquaDM (Onelab), Trietilamina for analysis (Merck), Methanol Anhydrous 99,8% (Merck), Etanol 95% (Onemed) dan Metilen biru (Merck).

## 2.2. Cara Kerja

### Persiapan Larutan Standar Metilen Biru

Larutan standar metilen biru 100 ppm dibuat dengan menimbang masing-masing 10 mg zat, kemudian dilarutkan dalam akuades hingga volume 100 mL pada labu ukur. Dari larutan induk tersebut, diambil 10 mL untuk diencerkan menjadi larutan 10 ppm dengan menambahkan akuades hingga tanda batas pada labu ukur 100 mL. Selanjutnya, larutan standar metilen biru 10 ppm kembali diencerkan menjadi konsentrasi 2, 3, 4, dan 4,5 ppm menggunakan labu ukur 25 mL dengan penambahan akuades hingga meniskus tercapai. Absorbansi setiap larutan diukur menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang 664 nm untuk metilen biru.

### Sintesis CQDs

Sintesis CQDs dilakukan berdasarkan penelitian yang telah dilaporkan sebelumnya dengan sedikit modifikasi [20]. Sebanyak 1 gram asam sitrat dan 3 gram urea dilarutkan dalam 10 mL air terdeionisasi sambil dilakukan pengadukan selama 30 menit. Campuran yang dihasilkan dimasukkan ke dalam oven *microwave* yang disinari pada daya 700 W selama 10 menit. Apabila sudah terbentuk, padatan hitam hasil sintesis CQDs dihaluskan.

### Sintesis $\text{ZrO}_2$

Sintesis  $\text{ZrO}_2$  didasarkan pada optimasi material UiO-66 ligan ganda [21,22]. Sebanyak 1,0487 g (0,0045 mol)  $\text{ZrCl}_4$  dilarutkan dalam 45 mL DMF. Pengadukan dilakukan selama 15 menit, lalu dicampurkan kedalam larutan 0,7483 g (0,0045 mol)  $\text{H}_2\text{BDC}$  dan 12 mL asam asetat dalam 45 mL DMF yang telah dihomogenkan terlebih dahulu selama 15 menit. Campuran dikeringkan pada 120 °C selama 24 jam dalam oven tertutup. Endapan yang diperoleh disentrifugasi, dicuci dengan 45 mL DMF dan 30 mL metanol (masing-masing direndam 24 jam), kemudian dikeringkan pada suhu 90 °C selama 12 jam. Padatan UiO-66 hasil sintesis selanjutnya dikalsinasi pada 600 °C selama 2 jam menggunakan furnace muffle untuk menghasilkan  $\text{ZrO}_2$ , untuk mengetahui gugus fungsi  $\text{ZrO}_2$  dikarakterisasi menggunakan FTIR.

### Sintesis ZnO

Sintesis ZnO didasarkan pada optimasi ZIF-8 ligan ganda [8]. Sebanyak 1,7848 g  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  dilarutkan dalam 20 mL aqua DM yang selanjutnya dihomogenkan selama 15 menit. Secara terpisah, ligan 2-metilimidazol dan asam tereftalat dilarutkan dalam 15 mL aqua DM yang mengandung 7,8 mL trietilamin (TEA), kemudian dilakukan pengadukan selama 30 menit hingga homogen. Larutan ligan ditambahkan perlahan ke dalam larutan logam hingga terbentuk campuran putih. Langkah selanjutnya dilakukan pengadukan selama 2 jam dan pendiaman 24 jam pada suhu ruang. Padatan yang diperoleh dipisahkan, dicuci berturut-turut dengan aqua DM (3 kali) dan metanol (2 kali, masing-masing perendaman 24 jam), kemudian dikeringkan pada 60 °C selama 12 jam sehingga diperoleh ZIF-8. Padatan ZIF-8 tersebut selanjutnya

Doi:

dikalsinasi pada 600 °C selama 2 jam menggunakan furnace muffle untuk menghasilkan ZnO.

### Uji Fotokatalitik

Uji kinerja fotokatalis dilakukan menggunakan larutan metilen biru sebagai senyawa target dengan iradiasi lampu UV-LED berpanjang gelombang 365 nm dalam reaktor tertutup. Sebanyak 25 mg material fotokatalis, baik  $\text{ZrO}_2$  maupun ZnO, didispersikan ke dalam 50 mL larutan metilen biru, kemudian dilakukan variasi waktu kontak selama 5, 10, 15, 20, dan 25 menit dalam kondisi terang. Setelah proses fotokatalitik, larutan disentrifugasi selama 30 menit pada kecepatan 4000 rpm untuk memisahkan fotokatalis. Filtrat yang diperoleh selanjutnya dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang 664 nm.

## 3. Hasil dan Pembahasan

### 3.1. Hasil Sintesis dan Karakterisasi

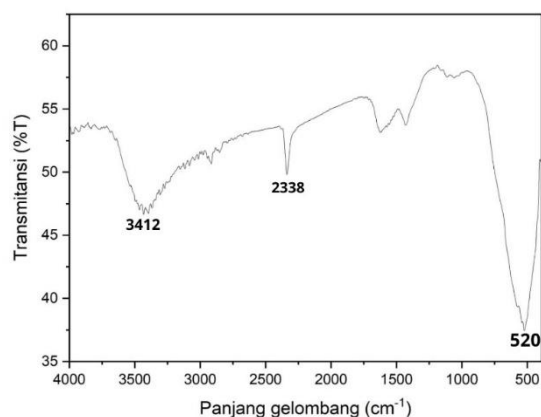
#### 3.1.1. CQDs

CQDs berhasil disintesis menggunakan metode *microwave-assisted synthesis* dengan mencampurkan asam sitrat dan urea yang dilarutkan dalam air terdeionisasi. Kedua bahan tersebut masing-masing berfungsi sebagai sumber karbon dan nitrogen. Asam sitrat memberikan struktur karbon pada CQD, sementara nitrogen pada urea dapat meningkatkan fotoluminesensinya serta sifat optiknya [23]. Campuran asam sitrat dan urea dihomogenkan dengan cara pengadukan selama 30 menit, agar semua material dapat homogen atau tercampur secara merata. Campuran tersebut dimasukkan dalam oven microwave selama 10 menit dengan daya 700 W. Kondisi ini dipilih karena munculnya warna hitam pada waktu dan daya yang menandakan sintesis CQDs berhasil.



Gambar 1: Hasil Sintesis CQDs

Spektrum IR CQDs dapat dilihat pada Gambar 2. dimana pada pita serapan getaran ulur O-H, N-H dan C-H di kisaran 3500-2800  $\text{cm}^{-1}$ , sedangkan pita pada 1718  $\text{cm}^{-1}$  berkaitan dengan getaran ulur gugus karboksil C=O. Pita tambahan pada 1400  $\text{cm}^{-1}$  dan 1220  $\text{cm}^{-1}$  masing-masing menunjukkan getaran tekuk C-H, getaran ulur gugus asil R-C=O [20]. Hasil ini menegaskan bahwa CQDs memiliki banyak gugus fungsi polar di permukaannya, yang membuatnya sangat terdispersi dalam air.



Gambar 2. Spektra FTIR CQDs

#### 3.1.2. $\text{ZrO}_2$

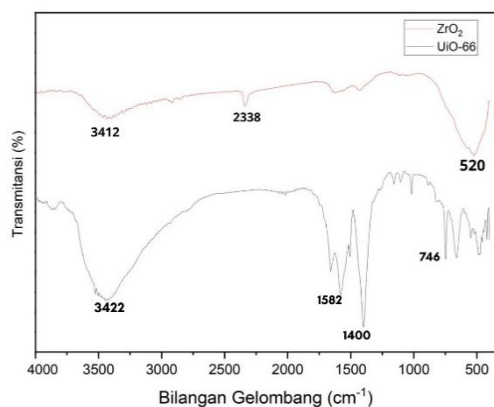
Sintesis  $\text{ZrO}_2$  dilakukan melalui optimasi material UiO-66. Sebanyak 1,0487 g  $\text{ZrCl}_4$  dilarutkan dalam DMF hingga homogen selama 15 menit sebagai sumber  $\text{Zr}^{4+}$ . Ligan  $\text{H}_2\text{BDC}$  dan asam asetat dilarutkan secara terpisah dalam DMF hingga tercampur merata. Kedua larutan tersebut dicampurkan, kemudian dipanaskan pada 120 °C selama 24 jam. Pembentukan gugus okso-zirkonium memerlukan sumber oksigen yang berasal dari DMF [24].  $\text{H}_2\text{BDC}$  sebagai ligan multikarboksilat digunakan dalam sistem sintesis karena dapat berperan sebagai jembatan melalui satu gugus karboksilat atau melalui cincin benzena [25]. Endapan yang diperoleh dicuci dengan DMF dan metanol, disentrifugasi, lalu dikeringkan pada 90 °C selama 12 jam. Padatan hasil pengeringan selanjutnya dikalsinasi pada 600 °C selama 2 jam untuk menghasilkan  $\text{ZrO}_2$ .



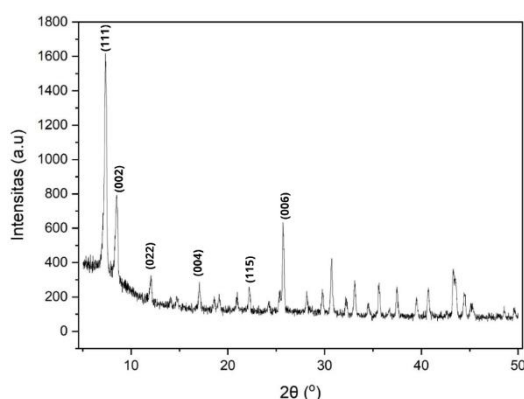
Gambar 3: Hasil Sintesis  $\text{ZrO}_2$

Karakterisasi FTIR UiO-66 dapat dilihat pada Gambar 4, dimana pita serapan pada 3422  $\text{cm}^{-1}$  berkaitan dengan getaran ulur O-H. Pada pita di sekitar 1582-1400  $\text{cm}^{-1}$  dikaitkan dengan getaran ulur gugus  $-\text{COO}^-$  dari struktur asam tereftalat, sedangkan pada 746  $\text{cm}^{-1}$  berasal dari getaran Zr-O [26].

Doi:

Gambar 4: Spektra FTIR dari UiO-66 ZrO<sub>2</sub>

Pada gambar 4. menunjukkan spektrum FTIR ZrO<sub>2</sub>, dengan pita serapan 3412 cm<sup>-1</sup> dikaitkan dengan getaran uur (stretching) gugus O-H dari molekul air yang teradsorpsi pada permukaan ZrO<sub>2</sub>, sedangkan pada 2338 cm<sup>-1</sup> berhubungan dengan getaran ulur ikatan Zr-OH. Selanjutnya pada puncak tajam pada 520 cm<sup>-1</sup> dikaitkan dengan getaran ulur Zr-O dari fasa ZrO<sub>2</sub> [27]. Hasil IR ini sesuai dengan data yang telah dilaporkan sebelumnya, sekaligus hasil analisis XRD yang mengonfirmasi struktur tersebut sebagaimana dibahas lebih lanjut.



Gambar 5: Difraktogram XRD dari UiO-66

Analisis XRD dilakukan untuk memastikan sintesis UiO-66, yang ditunjukkan pada Gambar 5, pola XRD membuktikan keberhasilan pembentukan UiO-66 dengan struktur topologi yang sama seperti penelitian sebelumnya [28]. Terdapat intensitas yang meningkat dikareakan terdapat penambahan asam asetat, dimana asam asetat membuktikan kemampuannya dalam meningkatkan kristalinitas UiO-66.

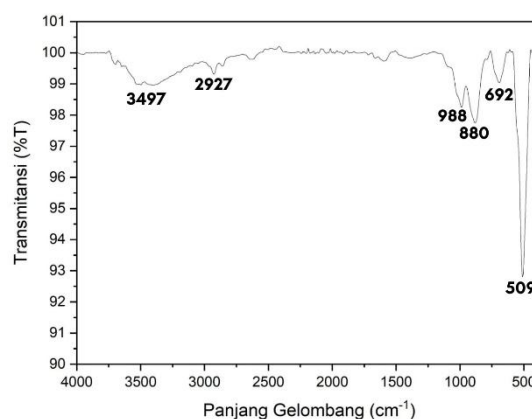
### 3.1.3. ZnO

ZnO disintesis melalui optimasi material ZIF-8. Pada sintesis ZIF-8, Zn(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O berfungsi sebagai sumber ion Zn<sup>2+</sup>, sedangkan 2-metilimidazol (Hmim) berperan sebagai ligan organik yang dapat berkoordinasi dengan Zn<sup>2+</sup> untuk membentuk kerangka berpori. Penambahan asam tereftalat digunakan sebagai ligan tambahan untuk meningkatkan kestabilan struktur, sementara trietilamin (TEA) bertindak sebagai agen deprotonasi yang memfasilitasi pembentukan kerangka [8].

Padatan ZIF-8 yang terbentuk, dikalsinasi pada suhu 600 °C selama 2 jam sehingga ligan organik terdekomposisi dan terbentuk ZnO sebagai material anorganik yang memiliki potensi tinggi sebagai fotokatalis.

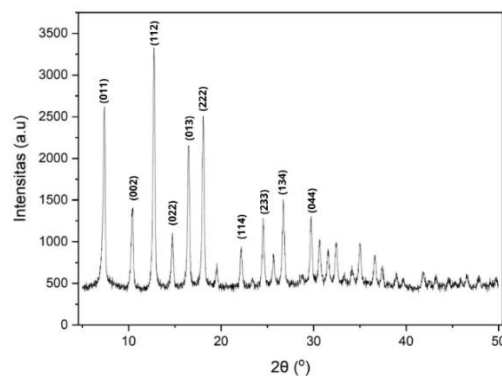


Gambar 6. Hasil sintesis ZnO



Gambar 7: Spektra FTIR dari ZnO

Berdasarkan spektrum FTIR pada Gambar 7, terbentuknya ZnO terkonfirmasi oleh pita tajam sekitar 509 cm<sup>-1</sup> yang menunjukkan regangan Zn-O khas kristal ZnO. Pita lebar di sekitar 3497 cm<sup>-1</sup> menandakan adanya gugus O-H dari air atau hidroksil teradsorpsi di permukaan, sedangkan pita pada 2927 cm<sup>-1</sup> mengindikasikan keberadaan gugus C-H dari residu organik atau pelarut. Beberapa pita di rentang 988–692 cm<sup>-1</sup> menunjukkan kemungkinan adanya impuritas anorganik atau gugus permukaan tambahan. Secara keseluruhan, hasil ini menegaskan bahwa ZnO berhasil terbentuk dengan fase dominan Zn-O serta mengandung sedikit gugus hidroksil dan residu organik pada permukaannya.



Gambar 8. Difraktogram XRD dari ZIF-8

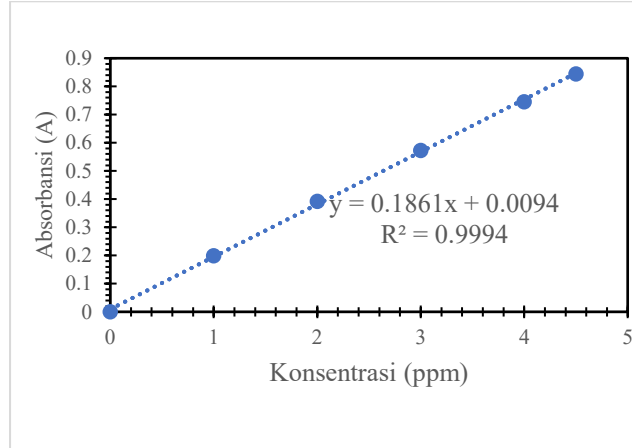
Doi:

Analisis XRD dilakukan untuk memastikan kemurnian fasa sekaligus mengidentifikasi tingkat kristalinitas ZIF-8, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 8. Difraktogram ZIF-8 memperlihatkan puncak difraksi tajam pada posisi  $2\theta$  sekitar  $7,3^\circ$  (011),  $10,4^\circ$  (002),  $12,7^\circ$  (112),  $14,7^\circ$  (022),  $16,4^\circ$  (013), serta beberapa puncak tambahan pada bidang (222), (114), (233), (134), (044). Dari analisis XRD menegaskan bahwa material yang diperoleh adalah ZIF-8 dengan kristalinitas yang tinggi. Intensitas puncak yang jelas menunjukkan bahwa struktur kerangka ZIF-8 berhasil terbentuk dengan baik.

### 3.2. Uji Kinerja Degradasi

#### 3.2.1. Kurva Standar Metilen Biru

Kurva standar digunakan untuk mengetahui hubungan antara konsentrasi larutan dengan nilai absorbansinya sehingga dapat menjadi acuan dalam analisis kuantitatif. Kurva ini dibuat dengan mengukur serapan dari larutan standar yang diencerkan ke berbagai konsentrasi, kemudian ditentukan persamaan regresi liniernya ( $Y = a + bx$  atau  $A = a + bc$ ). Larutan standar metilen biru 100 ppm dibuat dengan melarutkan 10 mg zat ke dalam 100 mL akuades, diikuti pengenceran menjadi 10 ppm, selanjutnya disiapkan larutan 2, 3, 4, serta 4,5 ppm. Absorbansi diukur menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang 664 nm. Hasilnya diperoleh persamaan regresi linier  $y = 0,1861x + 0,0094$  dengan  $R^2 = 0,9994$ , yang menunjukkan hubungan sangat baik antara konsentrasi dengan absorbansi sesuai hukum Lambert-Beer. Berikut ini merupakan hasil kurva standar metilen biru:



Gambar 9. Hasil pengukuran kurva standar metilen biru.

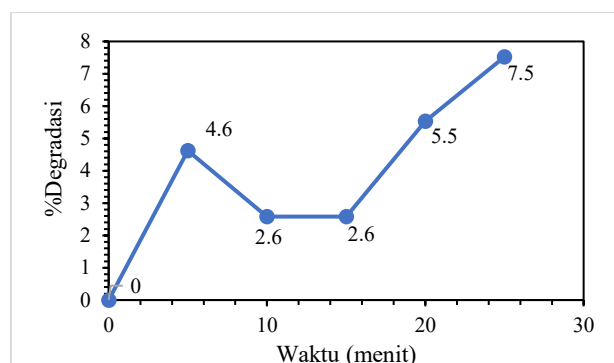
#### 3.2.2. Kinerja Fotokatalitik CQDs

Pengujian fotokatalitik metilen biru (MB) menggunakan Carbon Quantum Dots (CQDs) dilakukan pada variasi waktu penyinaran 5, 10, 15, 20, serta 25 menit. Absorbansi awal larutan MB sebesar 1,452. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa pada menit ke-5 nilai absorbansi turun menjadi 0,408, kemudian terus menurun menjadi 0,338 pada menit ke-10, 0,326 pada menit ke-15, dan 0,320 pada menit ke-20. Hal ini menunjukkan bahwa konsentrasi metilen biru berkurang secara

bertahap akibat proses degradasi fotokatalitik yang berlangsung.

Tabel 1. Hasil absorbansi fotokatalis CQDs oleh Metilen Biru

| Variasi waktu (menit) | Absorbansi |
|-----------------------|------------|
| MB awal               | 1,452      |
| 5                     | 0,408      |
| 10                    | 0,338      |
| 15                    | 0,326      |
| 20                    | 0,320      |
| 25                    | 0,300      |



Gambar 10. Hasil kurva degradasi metilen biru oleh CQDs

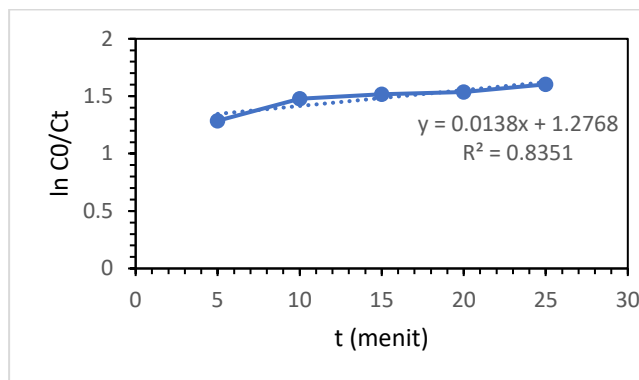
Hasil uji fotodegradasi metilen biru (MB) menggunakan katalis CQDs yang ditunjukkan pada Gambar 10, dimana pada menit ke-5 persen degradasi mencapai 56,1% dan terus meningkat seiring bertambahnya waktu penyinaran menjadi 59,9% pada menit ke-10, 60,5% pada menit ke-15, 60,8% pada menit ke-20, dan mencapai 61,9% pada menit ke-25. Peningkatan efisiensi degradasi yang relatif stabil setelah menit ke-15 mengindikasikan bahwa sebagian besar molekul MB telah terdegradasi oleh radikal aktif yang terbentuk selama proses fotokatalisis.

Mekanisme degradasi ini terjadi ketika elektron pada CQDs pada pita valensi tereksitasi menuju pita konduksi dan meninggalkan hole ( $h^+$ ) pada pita valensi. Elektron yang tereksitasi akan berinteraksi dengan molekul oksigen terlarut ( $O_2$ ) membentuk radikal superoksida ( $O_2^{\cdot-}$ ), sedangkan hole mengoksidasi molekul air atau ion  $OH^-$  di permukaan menjadi radikal hidroksil ( $\cdot OH$ ). Kedua radikal ini sangat reaktif dan mampu menguraikan molekul organik kompleks seperti MB menjadi senyawa sederhana seperti  $CO_2$  dan  $H_2O$ . Efisiensi degradasi yang mencapai 61,9% pada menit ke-25 menunjukkan bahwa CQDs efektif sebagai fotokatalis, meskipun laju peningkatan degradasi mulai melambat setelah menit ke-15 karena sistem mendekati kondisi jenuh.

Kinetika fotokatalitik CQDs dihitung menggunakan model zero-order fotokatalitik, pseudo-first order (orde satu), serta pseudo-second-order (orde dua). Dari hasil plot yang diperoleh grafik kinetika fotokatalitik model pseudo-first orde atau orde satu yang menghasilkan grafik linear dengan

Doi:

nila  $R^2$  yang paling tinggi di antara kinetika orde lainnya.



Gambar 11. Grafik Kinetika Fotokatalitik CQDs Model Pseudo-first orde

Untuk reaksi fotokatalitik, kinetika umumnya dianalisis menggunakan model pseudo-first order yang mengikuti persamaan  $\ln(C_0/C_t) = kt$ . Linearitas antara  $\ln(C_0/C_t)$  dengan waktu menunjukkan bahwa degradasi zat mengikuti orde satu semu, di mana  $k$  merupakan konstanta laju fotodegradasi. Berdasarkan grafik pada Gambar 11 hubungan linear antara  $\ln(C_0/C_t)$  dengan waktu mengindikasikan bahwa mekanisme degradasi mengikuti kinetika pseudo-first order. Hasil plot antara  $\ln(C_0/C_t)$  dengan waktu menghasilkan linearitas terbaik dengan nilai  $R^2 = 0,8531$ .

### 3.2.3. Kinerja Fotokatalitik ZrO<sub>2</sub>

Fotokatalisis merupakan salah satu metode yang sering digunakan dalam mendegradasi suatu molekul yang besar. Fotokatalisis menggunakan prinsip dengan memanfaatkan energi yang dihasilkan oleh cahaya matahari atau cahaya dari sumber radiasi untuk memecah rantai molekul senyawa menjadi suatu fragmen yang lebih kecil. Tujuan pengujian ini adalah untuk mengetahui aktivitas material ZrO<sub>2</sub>, dalam mengdegrasi metilen biru, dimana ZrO<sub>2</sub> sebagai adsorben yang dapat mengadsorpsi zat warna metilen biru. Adapun konsentrasi yang digunakan dalam zat warna metilen biru adalah sebesar 10 ppm. Variasi waktu yang digunakan yakni 5 menit; 10 menit; 15 menit; 20 menit; serta 25 menit. Tujuannya untuk serta seiring berjalannya waktu kinerja degradasi yang dihasilkan metilen biru oleh ZrO<sub>2</sub> menggunakan sinar UV.

Pengujian aktivitas fotokatalitik dimulai dengan penambahan material ZrO<sub>2</sub> secara konstan dengan jumlah 0,01 gram ke dalam beaker glass yang berisikan 50 mL larutan metilen biru yang telah diencerkan konsentrasinya menjadi 10 ppm. Selanjutnya di dalam reaktor fotokatalitik, dilakukan pengadukan menggunakan magnetik stirer dengan kecepatan 300 rpm serta reaksi dilakukan berdasarkan variasi waktu (5 menit; 10 menit; 15 menit; 20 menit; 25 menit). Pengadukan dilakukan untuk mempercepat reaksi degradasi dengan meningkatkan tumbukan antar partikel. Setelah itu, larutan metilen biru yang telah ditambahkan ZrO<sub>2</sub> dikeluarkan dari reaktor kemudian dilakukan sentrifugasi untuk

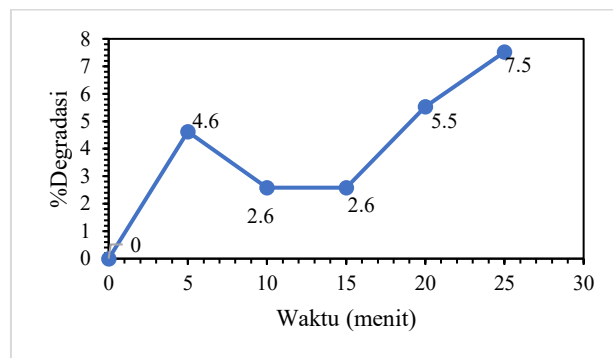
memisahkan ZrO<sub>2</sub> dari larutan, agar larutan dapat bebas dari partikel sehingga tidak mengganggu proses perhitungan absorbansi. Proses pemisahan ZrO<sub>2</sub> dengan larutan metilen biru dilakukan dengan sentrifugasi selama 10 menit dengan kecepatan 4000 rpm. Setelah larutan terpisah dilakukan perhitungan absorbansi.

Dekomposisi fotokatalitik metilen biru (MB) menggunakan ZrO<sub>2</sub> yang dipantau dengan mengukur absorbansi dalam spektroskopi UV-VIS. Pita serapan metilen biru umumnya muncul pada rentang panjang gelombang 400-800 nm, dengan puncak serapan khas pada 664 nm yang digunakan dalam penelitian ini. Hasil yang diperoleh dari variasi waktu 5 menit; 10 menit; 15 menit; 20 menit; 25 menit secara berturut turut dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil absorbansi fotokatalis ZrO<sub>2</sub> oleh Metilen Biru

| Variasi waktu (menit) | Absorbansi |
|-----------------------|------------|
| MB awal               | 1,409      |
| 5                     | 1,323      |
| 10                    | 1,361      |
| 15                    | 1,361      |
| 20                    | 1,306      |
| 25                    | 1,269      |

Hasil pengujian menunjukkan bahwa hasil absorbansi menurun pada 5 menit pertama dari metilen biru awal, yang mengindikasikan bahwa konsentrasi metilen biru semakin berkurang akibat proses degradasi fotokatalitik yang berlangsung. Hal ini disebabkan karena saat ZrO<sub>2</sub> disinari cahaya dengan energi lebih besar dari pada gap-nya elektron (e<sup>-</sup>) dari pita valensi terangsang ke pita konduksi, meninggalkan lubang positif hole (h<sup>+</sup>) di pita valensi. Elektron dari lubang inni bereaksi dengan molekul permukaan ZrO<sub>2</sub>. Elektron bisa mereduksi oksigen menjadi radikal superoksida (O<sub>2</sub><sup>-</sup>), sedangkan lubang bisa mengoksidasi molekul air menjadi radikal hidroksil (·OH). Radikal ini sangat reaktif sehingga mampu memecah molekul organik seperti metilen biru menjadi produk yang lebih sederhana seperti CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O. Proses ini menyebabkan penurunan konsentrasi metilen biru secara signifikan. Hasil perhitungan persentase efisiensi degradasi dapat dilihat dari Gambar 12.

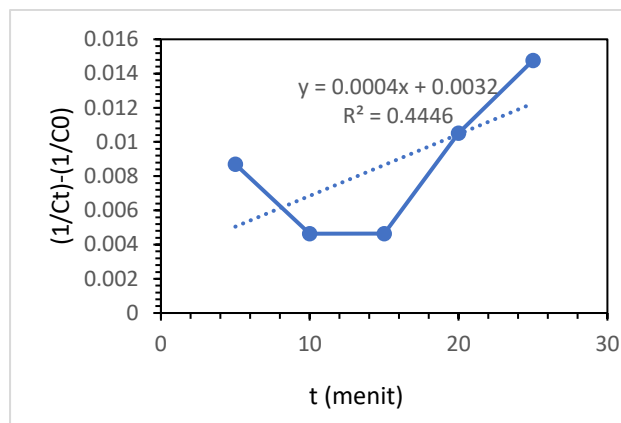


Gambar 12. Hasil kurva degradasi metilen biru oleh ZrO<sub>2</sub>



Gambar 13. Hasil degradasi fotokatalitik  $ZnO$  dalam metilen biru.

Dalam grafik menunjukkan proses degradasi metilen biru (MB) menggunakan  $ZnO$  berdasarkan grafik hubungan antara waktu dan persentase degradasi. Dimana pada 5 menit pertama persentase mencapai 4,6 % dan pada menit ke 10 dan 15 mengalami penurunan sebesar 2,6 %, hal ini mengalami perlambatan yang kemungkinan disebabkan oleh berkurangnya konsentrasi MB atau mengalami kejenuhan situs aktif, dan meningkat pada menit ke 20 dan 25 menit yaitu sebesar 5,5% dan 7,5 %. Secara keseluruhan, degradasi metilen biru menggunakan  $ZnO$  menghasilkan efisiensi yang kurang baik karena  $ZnO$  hanya dapat menyerap cahaya UV-C dengan panjang gelombang sangat pendek ( $<280\text{ nm}$ ) akibat *band gap* yang lebar sekitar 5,0 hingga 5,5 eV. Sehingga,  $ZnO$  memiliki keterbatasan dalam memanfaatkan spektrum cahaya yang lebih luas. Selain itu, rekombinasi elektron-lubang yang cepat pada  $ZnO$  mengurangi efisiensi penguraian metilen biru secara fotokatalitik [29]. Meskipun  $ZnO$  murni memiliki *band gap* lebar material ini tetap unggul untuk pewarna kationik secara keseluruhan seperti metilen biru dan metil jingga [30]



Gambar 14 : Grafik Kinetika Fotokatalitik  $ZnO$  pada model Pseudo-second orde

Kinetika fotokatalitik  $ZnO$  dihitung menggunakan model zero-order untuk menghasilkan grafik model zero-order pseudo-first order (orde satu), serta pseudo-second-order (orde dua). Dari hasil plot yang diperoleh grafik kinetika fotokatalitik model pseudo-second orde atau orde dua yang menghasilkan grafik linear dengan nilai  $R^2$  yang paling tinggi di antara kinetika orde lainnya. Model orde dua menunjukkan hubungan  $\frac{1}{C_t} - \frac{1}{C_0} = kt$ . Berdasarkan hasil regresi linear yang diperoleh dengan nilai  $R^2 = 0.4446$ , sesuai dengan data yang disajikan pada Gambar 14.

### 3.2.3. Kinerja Fotokatalitik $ZnO$

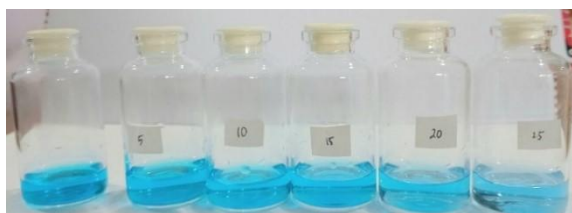
Reaksi fotokatalisis atau fotokatalitik merupakan proses kimia yang mengalami percepatan akibat adanya material fotokatalis yang diaktifkan oleh energi cahaya atau foton. Proses ini bekerja melalui beberapa tahapan, yaitu ketika foton dengan energi yang sesuai dengan celah pita energi memicu eksitasi elektron dari pita valensi ke pita konduksi pada material fotokatalis, sehingga terbentuk hole (lubang elektron) di pita valensi. Tujuan pengujian ini adalah untuk mengetahui aktivitas material  $ZnO$  dalam mendegradasi metil jingga, dimana  $ZnO$  sebagai adsorben yang dapat mengadsorpsi zat warna metil jingga.

Konsentrasi zat warna metilen biru yang digunakan dalam percobaan ini adalah 10 ppm, dengan variasi waktu reaksi selama 5, 10, 15, 20, serta 25 menit bertujuan mengevaluasi efektivitas degradasi metilen biru oleh  $ZnO$  di bawah paparan sinar UV seiring dengan bertambahnya waktu. Uji aktivitas fotokatalitik dilakukan dengan menambahkan secara tetap 0,01 gram  $ZnO$  ke dalam beaker glass yang telah diisi 50 mL larutan metilen biru berkonsentrasi 10 ppm. Campuran ini ditempatkan dalam reaktor fotokatalitik, kemudian dilakukan pengadukan menggunakan *magnetic stirrer* pada 300 rpm selama waktu sesuai variasi. Pengadukan berfungsi untuk mempercepat reaksi dengan meningkatkan frekuensi tumbukan antar partikel. Setelah waktu reaksi selesai, campuran dikeluarkan dari reaktor dan dilakukan proses pemisahan partikel  $ZnO$  dari larutan menggunakan metode sentrifugasi. Sentrifugasi dilakukan selama 10 menit dengan kecepatan 4000 rpm, bertujuan agar larutan yang dihasilkan bersih dari partikel padat dan tidak mengganggu dalam pengukuran absorbansi. Setelah pemisahan selesai, larutan jernih digunakan untuk analisis absorbansi guna mengevaluasi tingkat degradasi metil jingga.

Proses dekomposisi fotokatalitik metil biru (MB) dengan bantuan  $ZnO$  dipantau melalui pengukuran absorbansi menggunakan spektroskopi UV-VIS. Umumnya, metilen biru memiliki pita serapan dalam rentang panjang gelombang sekitar 664 nm, dengan puncak serapan karakteristik berada pada 646 nm, yang menjadi acuan dalam penelitian ini. Nilai absorbansi yang diperoleh dari masing-masing variasi waktu reaksi, yaitu 5 menit, 10 menit, 15 menit, 20 menit, dan 25 menit secara berturut-turut adalah  $0,995\text{ cm}^{-1}$ ;  $0,691\text{ cm}^{-1}$ ;  $0,450\text{ cm}^{-1}$ ;  $0,287\text{ cm}^{-1}$ ; dan  $0,173\text{ cm}^{-1}$ , sebagaimana ditampilkan pada Tabel 4.2 berikut.

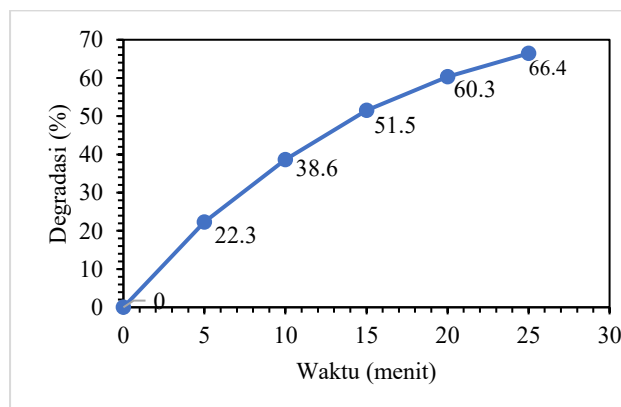
Tabel 3. Hasil kurva degradasi metilen biru oleh  $ZnO$

| Variasi waktu (menit) | Absorbansi |
|-----------------------|------------|
| MB awal               | 1,409      |
| 5                     | 0,995      |
| 10                    | 0,691      |
| 15                    | 0,450      |
| 20                    | 0,287      |
| 25                    | 0,173      |



Gambar 15. Hasil degradasi fotokatalitik ZnO dalam metilen biru.

Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa nilai absorbansi berbanding lurus dengan seiring bertambahnya waktu, yang artinya semakin lama waktu berlangsung akan menyebabkan metilen biru terdegradasi oleh ZnO. Sesuai dengan prinsip fotokatalisis dimana suatu proses dengan memanfaatkan foton atau cahaya tampak (UV) untuk mengaktifkan katalis yang kemudian bereaksi dengan senyawa kimia yang terletak pada permukaan katalis. Berikut merupakan hasil kurva degradasi fotokatalis ZnO dalam metilen biru.

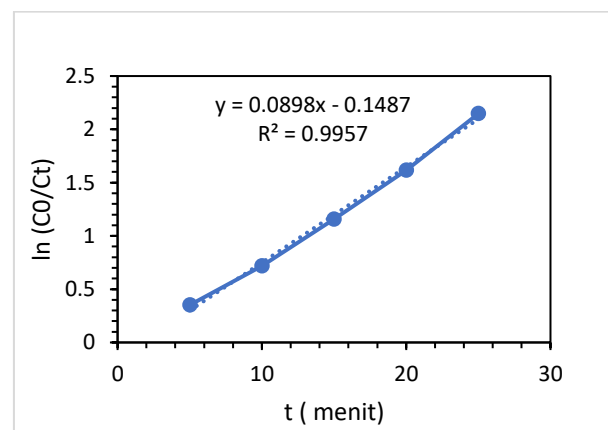


Gambar 16. Hasil kurva degradasi metilen biru oleh ZnO.

Proses degradasi metilen biru (MB) menggunakan ZnO menunjukkan efisiensi yang tinggi dalam waktu reaksi yang relatif singkat. Berdasarkan grafik hubungan antara waktu dengan persentase degradasi meningkat pada 5 menit pertama, dengan persentase mencapai 22,3 %. Hal ini menunjukkan bahwa ZnO memiliki aktivitas fotokatalitik yang sangat efektif pada awal reaksi, yang disebabkan oleh konsentrasi MB yang masih tinggi serta ketersediaan situs aktif pada permukaan katalis. Setelah 5 menit, terlihat dalam grafik pada 10 menit; 15 menit; 20 menit; serta 25 menit menunjukkan persentase berturut turut adalah 38,6 %; 51,5 %; 60,3%; 66,4%, Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa ZnO mampu mendegradasi metilen biru secara signifikan dalam waktu singkat. Hal ini dikarenakan ZnO memiliki bandgap sekitar 3,2 hingga 3,4 eV, yang memungkinkan material ini menyerap cahaya ultraviolet dalam rentang yang lebih luas dibandingkan dengan beberapa semikonduktor lain seperti  $ZrO_2$ . Bandgap dengan nilai ini sangat ideal untuk fotokatalisis karena mampu menghasilkan pasangan elektron-lubang yang cukup banyak saat tereksitasi cahaya ultraviolet (Jafarova & Orudzhev, 2021).. ZnO juga memiliki kemampuan adsorpsi yang baik terhadap molekul metilen biru, yang memperkuat interaksi antara fotokatalis dengan zat

warna sehingga mempercepat proses degradasi dikarenakan ZnO sebagai fotokatalis menunjukkan ZnO lebih unggul untuk pewarna kationik (Jafarova & Orudzhev, 2021). Selain itu, dilakukannya proses adsorpsi-desorpsi samapi menuju kesetimbangan sebelum dilakukannya uji fotokatalisis mampu meningkatkan efisiensi fotodegradasi, dikarenakan semakin besar jumlah metilen biru yang teradsorpsi semakin cepat proses fotodegradasi berlangsung. Hal ini karena pada proses adsorpsi sejumlah molekul metilen biru sudah terikat pada permukaan katalis, sehingga ketika proses fotokatalisis molekul metilen biru yang sudah berada sangat dekat atau sudah menempel pada permukaan katalis dapat langsung bereaksi dengan spesies radikal bebas [32]

Kinetika fotokatalitik ZnO dihitung menggunakan model zero-order untuk menghasilkan grafik model zero-order pseudo-first order (orde satu), serta pseudo-second-order (orde dua). Dari hasil yang diperoleh dari ketiga model grafik kinetik dihasilkan bahwa kinetika orde satu yang paling linear.



Gambar 17. Grafik Kinetika Fotokatalitik ZnO Model Pseudo-first orde

Hubungan antara  $\ln(C_0/C_t)$  dengan waktu (t) dijelaskan melalui persamaan  $\ln(C_0/C_t) = kt$ . Dari hasil regresi diperoleh nilai  $R^2 = 0.9957$ . Nilai  $R^2$  di antara ketiga model menunjukkan bahwa mekanisme degradasi MB dengan fotokatalis ZnO mengikuti kinetika pseudo-first orde. Hal ini menunjukkan bahwa laju reaksi dikendalikan oleh proses fotokatalitik yang bergantung pada konsentrasi MB

#### 4. Kesimpulan

Material fotokatalis  $ZrO_2$ , ZnO, dan Carbon Quantum Dots (CQDs) berhasil disintesis melalui metode kalsinasi dan *microwave-assisted synthesis* menggunakan template *Metal-Organic Frameworks* (UiO-66 dan ZIF-8). Hasil karakterisasi FTIR serta XRD menunjukkan bahwa transformasi struktur MOF menjadi oksida logam berlangsung dengan baik. Uji fotokatalitik terhadap metilen biru menunjukkan bahwa ZnO memiliki efisiensi degradasi tertinggi sebesar 66,4%, diikuti oleh CQDs sebesar 61,9%, dan  $ZrO_2$  sebesar 7,5%. Secara keseluruhan, penelitian ini membuktikan bahwa ZnO berbasis template MOF memiliki potensi tinggi

## Doi:

sebagai fotokatalis ramah lingkungan untuk pengolahan limbah organik.

### Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Fakultas Sains dan Matematika Universitas Diponegoro atas hibah penelitian yang diberikan dengan Surat Penugasan Pelaksanaan Penelitian Nomor: 744/UN7.8/PP/V/2025.

### Daftar Pustaka

- [1] Lu F., dan Astruc D., 2020, Nanocatalysts and Other Nanomaterials for Water Remediation from Organic Pollutants, *Coordination Chemistry Reviews*, 408, 213180. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2020.213180>
- [2] Houas A., Lachheb H., Ksibi M., Elaloui E., Guillard C., dan Herrmann J.M., 2001, Photocatalytic Degradation Pathway of Methylene Blue in Water, *Applied Catalysis B*, 31, 145–157. [https://doi.org/10.1016/S0926-3373\(00\)00276-9](https://doi.org/10.1016/S0926-3373(00)00276-9)
- [3] Rizqi H.D., dan Purnomo A.S., 2017, The Ability of Brown-Rot Fungus *Daedalea dickinsii* to Decolorize and Transform Methylene Blue Dye, *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 33, 1–7. <https://doi.org/10.1007/s11274-017-2256-z>
- [4] Adewuyi A., 2020, Chemically Modified Biosorbents and Their Role in the Removal of Emerging Pharmaceutical Waste in the Water System, *Water*, 12, 1–31. <https://doi.org/10.3390/w12061551>
- [5] Tan T.Y., Zeng Z.T., Zeng G.M., Gong J.L., Xiao R., Zhang P., Song B., Tang W.W., dan Ren X.Y., 2020, Electrochemically Enhanced Simultaneous Degradation of Sulfamethoxazole, Ciprofloxacin and Amoxicillin from Aqueous Solution by Multi-Walled Carbon Nanotube Filter, *Separation and Purification Technology*, 235, 116167. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116167>
- [6] Abdollahi B., Najafidoust A., Abbasi Asl E., dan Sillanpaa M., 2021, Fabrication of ZIF-8 MOF-Based CuO–ZnO Photocatalyst with Enhanced Solar-Light-Driven Property for Degradation of Organic Dyes, *Arabian Journal of Chemistry*, 14, 103444. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103444>
- [7] Gholizadeh Khasevani S., Faroughi N., dan Gholami M.R., 2020, MOF-Templated Synthesis of t-ZrO<sub>2</sub>/γ-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Supported AgPt Nanoparticles with Enhanced Catalytic and Photocatalytic Properties, *Materials Research Bulletin*, 126, 110838. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2020.110838>
- [8] Zulfa L.L., Ediati R., Hidayat A.R.P., Subagyo R., Faaizatunnisa N., Kusumawati Y., Hartanto D., Widiastuti N., Utomo W.P., dan Santoso M., 2023, Synergistic Effect of Modified Pore and Heterojunction of MOF-Derived α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZnO for Superior Photocatalytic Degradation of Methylene Blue, *RSC Advances*, 13, 3818–3834. <https://doi.org/10.1039/d2ra07946a>
- [9] Cai M., Wang C., Liu Y., Yan R., dan Li S., 2022, Boosted Photocatalytic Antibiotic Degradation Performance of Cd<sub>0.5</sub>Zn<sub>0.5</sub>S/Carbon Dots/Bi<sub>2</sub>WO<sub>6</sub> S-Scheme Heterojunction with Carbon Dots as the Electron Bridge, *Separation and Purification Technology*, 300, 121892. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121892>
- [10] Xiaobo M., Xinyu L., Jie Z., Xiaoxian H., dan Weichun Y., 2020, Heterostructured TiO<sub>2</sub>@HKUST-1 for Enhanced Removal of Methylene Blue by Integrated Adsorption and Photocatalytic Degradation, *Environmental Technology*, 1–32. <https://doi.org/10.1080/09593330.2020.1745295>
- [11] Zheng J., Sun L., Jiao C., Shao Q., Lin J., Pan D., Naik N., dan Guo Z., 2021, Hydrothermally Synthesized Ti/Zr Bimetallic MOF-Derived N Self-Doped TiO<sub>2</sub>/ZrO<sub>2</sub> Composite Catalysts with Enhanced Photocatalytic Degradation of Methylene Blue, *Colloids and Surfaces A*, 623, 126629. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.126629>
- [12] Shu H.Y., Chang M.C., dan Tseng T.H., 2017, Solar and Visible Light Illumination on Immobilized Nano ZnO for Degradation and Mineralization of Orange G in Wastewater, *Catalysts*, 7, 164. <https://doi.org/10.3390/catal7050164>
- [13] Lei X., Cao Y., Chen Q., Ao X., Fang Y., dan Liu B., 2019, ZIF-8 Derived Hollow CuO/ZnO Material for Enhanced Photocatalytic Performance, *Colloids and Surfaces A*, 568, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.01.072>
- [14] Sun L., Shao Q., Zhang Y., Jiang H., Ge S., Lou S., Lin J., Zhang J., Wu S., dan Dong M., 2020, N Self-Doped ZnO Derived from Microwave Hydrothermal Synthesized ZIF-8 toward Enhanced Photocatalytic Degradation of Methylene Blue, *Journal of Colloid and Interface Science*, 565, 142–155. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.12.107>
- [15] Chen Z., Dedova T., Spalatu N., Maticiu N., Rusu M., Katerski A., Acik I.O., Unold T., dan Krunk M., 2022, ZnO/NiO Heterostructures with Enhanced Photocatalytic Activity Obtained by Ultrasonic Spraying, *Colloids and Surfaces A*, 648, 129366. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.129366>
- [16] Acosta-Silva Y. de J., Gallardo-Hernández S., Rivas S., Espejel-Ayala F., dan Méndez-López A., 2024, Photocatalytic Activities of Methylene Blue Using ZrO<sub>2</sub> Thin Films at Different Annealing Temperatures, *Coatings*, 14, 537. <https://doi.org/10.3390/coatings14050537>

Doi:

- [17] Bueno C., Luna A., Flores G., Juárez H., Pacio M., Pérez R., Flores-Méndez J., Maestre D., dan Cortés-Maldonado R., 2024, Structural, Morphological, and Optical Properties of ZnO Nano- and Micro-Structures Obtained by Vapor-Solid Method and Photocatalytic Activity, *Crystals*, 14, 941. <https://doi.org/10.3390/cryst14110941>
- [18] Shukla R.K., Mirzaei J., Sharma A., Hofmann D., Hegmann T., dan Haase W., 2015, Electro-Optic and Dielectric Properties of a Ferroelectric Liquid Crystal Doped with Stable Emissive Carbon Dots, *RSC Advances*, 5, 34491–34496. <https://doi.org/10.1039/c5ra01257k>
- [19] Chung Hui K., Lun Ang W., dan Soraya Sambudi N., 2021, Nitrogen and Bismuth-Doped Rice Husk-Derived Carbon Quantum Dots for Dye Degradation and Heavy Metal Removal, *Journal of Photochemistry and Photobiology A*, 418, 113411. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2021.113411>
- [20] Ishak N., Galār P., Mekkat R., Grandcolas M., dan Šoóš M., 2025, Fine-Tuning Photoluminescence and Photocatalysis: Effects of Carbon Quantum Dots Synthesis and Purification on g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, *Colloids and Surfaces A*, 706, 135789. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.135789>
- [21] Hidayat A.R.P., Zulfa L.L., Faaizatunnisa N., Prasetyoko D., Hartanto D., Widiastuti N., Purnomo A.S., Jannah M., Kusumawati E.N., dan Bahruji H., 2024, Properties and Performance of Ni(II)-Doped Magnetic Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@Mesoporous SiO<sub>2</sub>/UiO-66 as Adsorbent for Methyl Orange, *Nano-Structures and Nano-Objects*, 37, 101077. <https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2023.101077>
- [22] Hidayat A.R.P., Sulistiono D.O., Murwani I.K., Endrawati B.F., Fansuri H., Zulfa L.L., dan Ediaty R., 2021, Linear and Nonlinear Isotherm, Kinetic and Thermodynamic Behavior of Methyl Orange Adsorption Using Modulated Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>@UiO-66, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9, 106675. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106675>
- [23] Wang C., Yang M., Shi H., Yao Z., Liu E., Hu X., Guo P., Xue W., dan Fan J., 2022, Carbon Quantum Dots Prepared by Pyrolysis: Luminescence Mechanism and Application as Fluorescent Probes, *Dyes and Pigments*, 204, 110431. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2022.110431>
- [24] Venturi D.M., Campana F., Marmottini F., Costantino F., dan Vaccaro L., 2020, Screening of Green Solvents for Sustainable UiO-66 Synthesis, *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8, 17154–17164. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c05587>
- [25] Bagherzadeh M., Ashouri F., dan Daković M., 2015, Synthesis, Characterizations and Catalytic Studies of a New Two-Dimensional MOF Based on Co-Carboxylate SBUs, *Journal of Solid State Chemistry*, 223, 32–37. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2014.05.011>
- [26] Sun X., Hu D., Yang L.Y., Wang N., Wang Y.G., dan Ouyang X.K., 2019, Efficient Adsorption of Levofloxacin Using Calcium Alginate/MOF Composite Beads, *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 91, 353–363. <https://doi.org/10.1007/s10971-019-05001-7>
- [27] Horti N.C., Kamatagi M.D., Nataraj S.K., Wari M.N., dan Inamdar S.R., 2020, Structural and Optical Properties of ZrO<sub>2</sub> Nanoparticles: Effect of Calcination Temperature, *Nano Express*, 1, 1–12. <https://doi.org/10.1088/2632-959X/ab8684>
- [28] Qiu J., Feng Y., Zhang X., Jia M., dan Yao J., 2017, Acid-Promoted UiO-66 Synthesis for Selective Adsorption of Anionic Dyes, *Journal of Colloid and Interface Science*, 499, 151–158. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2017.03.101>
- [29] Sathisha H.C., Anitha, Krishnamurthy G., dan Nagaraju G., 2025, Green Synthesis of ZnO/ZrO<sub>2</sub> Nanocomposite for Photocatalytic Degradation and Chromium(VI) Reduction, *Journal of Crystal Growth*, 651, 128009. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2024.128009>
- [30] Boran F., dan Okutan M., 2023, Synthesis Optimization of ZrO<sub>2</sub> Nanostructures for Photocatalytic Applications, *Turkish Journal of Chemistry*, 47, 448–464. <https://doi.org/10.55730/1300-0527.3551>
- [31] Jafarova V.N., dan Orudzhev G.S., 2021, Structural and Electronic Properties of ZnO: A First-Principles DFT Study within LDA/GGA and LDA/GGA+U, *Solid State Communications*, 325, 114166. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2020.114166>
- [32] Długosz O., Staroń A., Brzoza P., dan Banach M., 2022, Synergistic Effect of Sorption and Photocatalysis on Dye Removal in Single and Multicomponent Systems on ZnO–SnO<sub>2</sub>, *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 1–15. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-18044-7>