

OPTIMASI FOTOREAKTOR ZnO UNTUK DEGRADASI METILEN BIRU SECARA FOTOKATALISIS

ANSHEL AYMAR RAHMAN^{1*}, EKO PRABOWO HADISANTOSO¹, RIZKA FITRIYANI S¹

¹Program Studi Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi, UIN Sunan Gunung Djati Bandung, Jalan
A.H Nasution No. 105, Cipadung, Cibiru, Kota Bandung, Jawa Barat 40614, Indonesia

*alamat korespondensi email: anshelaymar23@gmail.com

Informasi Artikel	Abstrak/Abstract
Kata kunci: metilen biru; fotokatalisis; fotodegradasi; fotoreaktor; ZnO.	Polusi air limbah pewarna, khususnya metilen biru (MB), merupakan masalah lingkungan karena senyawa tersebut relatif stabil dan sulit terurai secara biologis. Fotokatalisis menggunakan seng oksida (ZnO) merupakan pendekatan yang menjanjikan untuk mengurangi konsentrasi MB; namun, keefektifannya dipengaruhi oleh konfigurasi fotoreaktor dan kondisi pengoperasian. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh jenis wadah reaksi, jarak sumber cahaya, pengoperasian pengaduk magnetik dan kipas pembuangan, serta suhu dan kehilangan volume, terhadap kinerja fotoreaktor dan untuk menentukan kondisi operasi yang optimal. Percobaan menggunakan 50 mL larutan MB 10 ppm dengan ZnO sebesar 1 g/L (0,05 g) di bawah lampu UV-A 365 nm selama 60 menit. Wadah reaksi yang digunakan bervariasi antara gelas kimia, botol vial, dan tabung reaksi, sedangkan jarak sumber cahaya bervariasi pada 5, 10, dan 15 cm dengan kondisi pengaduk magnetik dan kipas pembuangan dalam keadaan ON/OFF. Sampel diambil setiap 15 menit dan dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang 664 nm. Kinerja fotokatalitik dievaluasi berdasarkan efisiensi degradasi, efisiensi penghilangan, rasio konsentrasi relatif (C/C_0), suhu, dan kehilangan volume. Hasil penelitian menunjukkan bahwa gelas kimia memberikan kinerja terbaik di antara wadah reaksi yang digunakan, sedangkan jarak 5 cm menghasilkan kinerja tertinggi di antara jarak-jarak yang diuji. Kondisi ON menghasilkan efektivitas yang lebih tinggi daripada kondisi OFF. Kondisi optimal diperoleh dengan menggunakan gelas kimia, jarak sumber cahaya 5 cm, serta pengaduk magnetik dan kipas pembuangan dalam kondisi ON, yang menghasilkan efisiensi degradasi sebesar 99,21%, efisiensi penghilangan sebesar 99,32%, dan C/C_0 sebesar 0,006778 setelah 60 menit.
Keyword: methylene blue; photocatalysis; photodegradation; photoreactor; ZnO.	<i>Dye wastewater pollution, particularly methylene blue (MB), is an environmental concern because the compound is relatively stable and difficult to degrade biologically. Photocatalysis using zinc oxide (ZnO) is a promising approach for reducing MB concentration; however, its effectiveness is affected by photoreactor configuration and operating conditions. This study aimed to analyse the effects of reaction vessel type,</i>

light-source distance, magnetic-stirrer and exhaust-fan operation, as well as temperature and volume loss, on photoreactor performance and to determine the optimum operating condition. The experiments used 50 mL of 10 ppm MB solution with ZnO at 1 g/L (0.05 g) under a 365 nm UV-A lamp for 60 min. Reaction vessels were varied among a beaker, vial bottle, and test tube, while the light-source distance was varied at 5, 10, and 15 cm under ON/OFF conditions for the magnetic stirrer and exhaust fan. Samples were collected every 15 min and analysed using a UV-Vis spectrophotometer at 664 nm. Photocatalytic performance was evaluated from degradation efficiency, removal efficiency, relative concentration ratio (C/C_0), temperature, and volume loss. The results showed that the beaker provided the best performance among the reaction vessels, while the 5 cm distance produced the highest performance among the tested distances. The ON condition produced higher effectiveness than the OFF condition. The optimum condition was obtained using a beaker, a 5 cm light-source distance, and both the magnetic stirrer and exhaust fan in the ON condition, giving a degradation efficiency of 99.21%, removal efficiency of 99.32%, and C/C_0 of 0.006778 after 60 min.

PENDAHULUAN

Industri tekstil merupakan salah satu sektor dengan kontribusi besar terhadap pencemaran air. Hal ini ditunjukkan dari penelitian oleh Katheresan yang menunjukkan industri tekstil merupakan penghasil limbah zat warna terbesar, yaitu sebesar 54% dari total limbah zat warna yang dilepaskan ke lingkungan, sehingga menjadikannya sebagai sumber utama pencemaran oleh senyawa zat warna [1].

Dalam proses pewarnaan, tidak semua pewarna terserap ke serat kain; hasil eksperimen menunjukkan bahwa sekitar 10–15% dari total pewarna yang digunakan terlepas ke dalam limbah industri, menghasilkan air limbah dengan intensitas warna tinggi [2].

Metilen biru merupakan pewarna kationik dengan struktur heterosiklik aromatik yang sangat stabil, sulit terdegradasi secara biologis, dan memiliki efek toksisitas yang tinggi. Karakteristik tersebut menyebabkan metilen biru berpotensi bertahan di lingkungan dan menimbulkan dampak terhadap organisme perairan [3].

Uji toksisitas terhadap mikroalga air tawar *Chlorella vulgaris* dan *Spirulina platensis* menunjukkan efek penghambatan pertumbuhan yang kuat dengan nilai EC_{50} masing-masing 61,81 mg/L dan 5,43 mg/L [4].

Paparan metilen biru pada organisme *Daphnia magna* pada konsentrasi sekitar 4,7 $\mu\text{g/L}$ juga dilaporkan dapat menurunkan laju jantung serta kemampuan reproduksi, yang mengindikasikan bahwa efek ekologis metilen biru dapat terjadi pada tingkat rendah di ekosistem akuatik [5].

Salah satu metode yang banyak digunakan untuk mengurangi pencemaran zat berwarna metilen biru adalah fotokatalisis. Metode ini terjadi ketika material katalis menyerap foton dengan energi yang sama atau lebih besar dari band gap sehingga elektron tereksitasi dari pita valensi ke pita konduksi [6].

Zinc oxide (ZnO) banyak digunakan sebagai fotokatalis karena memiliki band gap sekitar 3,2 eV dan energi eksitasi yang tinggi sehingga dapat aktif di bawah penyinaran UV [7].

ZnO memiliki struktur kristal yang stabil, luas permukaan yang besar, dan kemampuan menghasilkan radikal oksigen reaktif yang tinggi sehingga dapat digunakan sebagai fotokatalis [8].

Dalam perbandingan TiO_2 dan ZnO, ZnO dilaporkan memberikan efisiensi degradasi hingga 99,2% dalam waktu 2 jam, sedangkan TiO_2 mencapai 91,6% setelah 6 jam penyinaran [8].

ZnO juga menunjukkan hasil yang baik ketika digunakan dalam sistem fotoreaktor berulang tanpa degradasi yang signifikan pada permukaan katalis [9].

Kinerja fotokatalisis juga dipengaruhi oleh desain fotoreaktor karena parameter seperti bentuk reaktor, wadah reaksi, volume, waktu, pengadukan, suhu, *exhaust fan*, jarak sumber cahaya, dan permukaan larutan dapat memengaruhi efisiensi penyerapan foton oleh katalis [10] [11].

Material transparan seperti kaca memiliki transmitansi tinggi terhadap radiasi UV sehingga memungkinkan cahaya lebih optimal menuju permukaan fotokatalis dan dapat meningkatkan penyerapan foton serta mempercepat degradasi senyawa organik [12].

Jarak antara sumber cahaya dan permukaan larutan menentukan intensitas radiasi yang diterima katalis; jarak yang terlalu jauh dapat menurunkan jumlah foton yang mencapai permukaan katalis, sedangkan jarak yang terlalu dekat berpotensi meningkatkan suhu lokal sehingga diperlukan jarak optimum [13].

Suhu sistem, sirkulasi udara, volume larutan, dan pengadukan juga merupakan parameter penting karena dapat memengaruhi kinetika reaksi, distribusi foton, kestabilan suhu, penguapan, dan homogenitas partikel fotokatalis [12] [14].

Analisis degradasi dilakukan menggunakan spektrofotometer UV-Vis untuk mengamati penurunan intensitas absorbansi larutan metilen biru pada panjang gelombang maksimum sekitar 664 nm [15].

Penurunan absorbansi selanjutnya digunakan untuk menghitung efisiensi persen degradasi, persen removal, dan rasio konsentrasi melalui perbandingan konsentrasi awal (C_0) dan konsentrasi akhir (C_t) [16].

Meskipun berbagai penelitian menunjukkan bahwa parameter fotoreaktor memengaruhi efisiensi proses fotokatalisis, penelitian yang mengkaji beberapa parameter tersebut dalam satu sistem fotoreaktor masih relatif terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengoptimasi parameter fotoreaktor yang meliputi jenis wadah reaksi, jarak sumber cahaya UV, penggunaan *exhaust fan*, dan sistem pengadukan guna memperoleh konfigurasi sistem yang lebih efektif dalam meningkatkan efisiensi degradasi metilen biru menggunakan fotokatalis ZnO.

EKSPERIMEN

Material

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi serbuk ZnO komersial laboratorium sebagai fotokatalis, metilen biru sebagai zat molekul uji, dan akuades sebagai pelarut. Larutan metilen biru yang digunakan untuk pengujian memiliki konsentrasi 10 ppm dengan volume 50 mL, sedangkan ZnO digunakan pada konsentrasi 1 g/L atau setara dengan 0,05 g.

Alat dan Instrumentasi

Peralatan yang digunakan meliputi gelas kimia 50 dan 100 mL, labu ukur 50, 100, dan 1000 mL, pipet ukur 5 dan 10 mL, pipet tetes, botol semprot, neraca analitik, dan fotoreaktor. Fotoreaktor dilengkapi lampu UV-A 365 nm merek GEN.STAR 220 V, lampu UV-B, lampu HPLN, *jack stand*, *magnetic stirrer*, *power supply* merek OSKA, *ballast* merek Phillips, dan *exhaust fan* berdiameter 15 cm. Instrumen analisis yang digunakan adalah spektrofotometer UV-Vis.

PROSEDUR

Rancangan dan Pembuatan Fotoreaktor

Fotoreaktor dirancang dalam bentuk kotak tertutup berbahan kayu tanpa lapisan dengan panjang 80 cm, lebar 50 cm, tinggi 70 cm, dan ketebalan kayu 20 mm. Komponen utama di dalam fotoreaktor terdiri atas sumber cahaya UV-A 365 nm yang ditempatkan pada bagian atas tengah, dua buah kipas berdiameter 15 cm pada bagian belakang sebagai sistem sirkulasi udara, serta dua buah *magnetic stirrer* dengan rentang 0-1000 rpm untuk menjaga homogenitas larutan. Sistem kelistrikan seperti *power supply*, *ballast*, dan *stop kontak* ditempatkan pada bagian samping untuk memudahkan pengoperasian.

Pengujian Fotokatalisis

Larutan induk metilen biru 1000 ppm dibuat dengan menimbang 0,1 g serbuk metilen biru, kemudian dilarutkan dalam labu ukur 1000 mL hingga tanda batas. Larutan 100 ppm dibuat dengan mengambil 10 mL larutan 1000 ppm ke dalam labu ukur 100 mL, sedangkan larutan 10 ppm dibuat dengan mengambil 5 mL larutan 100 ppm ke dalam labu ukur 50 mL dan mengencerkan masing-masing menggunakan akuades.

Larutan deret standar 2, 3, 4, 5, 7, 9, dan 11 ppm dibuat dari larutan stok 100 ppm dengan memipet masing-masing 1; 1,5; 2; 2,5; 3,5; 4,5; dan 5,5 mL ke dalam labu ukur 50 mL, kemudian diencerkan dengan akuades hingga tanda batas.

Variabel bebas meliputi jenis wadah reaksi, yaitu gelas kimia, botol vial, dan tabung reaksi; kondisi *magnetic stirrer* dan *exhaust fan ON/OFF*; serta jarak sumber cahaya 5, 10, dan 15 cm. Variabel terikat berupa persen degradasi, persen *removal*, dan rasio konsentrasi relatif (C/C_0). Variabel tetap meliputi konsentrasi metilen biru 10 ppm, volume 50 mL, dosis ZnO 1 g/L, sumber cahaya UV-A 365 nm, waktu penyinaran 60 menit, interval pengambilan sampel 15 menit, dan analisis UV-Vis pada 664 nm.

Pengujian dilakukan dengan menambahkan 0,05 g ZnO ke dalam 50 mL larutan metilen biru 10 ppm. Sampel diambil setiap 15 menit selama 60 menit. Sampel kemudian disentrifugasi selama 10 menit agar fotokatalis ZnO mengendap dan supernatan dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum 664 nm.

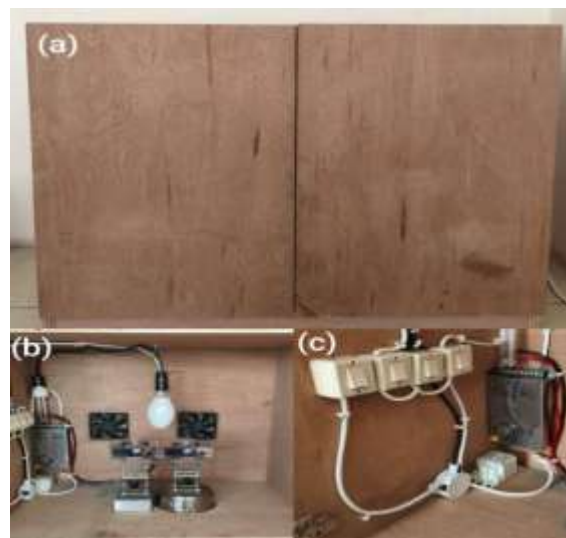
Setelah kondisi optimum diperoleh, pengujian perbandingan dilakukan menggunakan lampu UV-B dan HPLN untuk mengevaluasi pengaruh jenis sumber cahaya terhadap efisiensi fotodegradasi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Desain Fotoreaktor

Fotoreaktor yang digunakan merupakan hasil rancangan yang disesuaikan dengan kebutuhan proses fotokatalisis menggunakan ZnO. Fotoreaktor berbentuk ruang tertutup sehingga gangguan cahaya dari lingkungan luar dapat

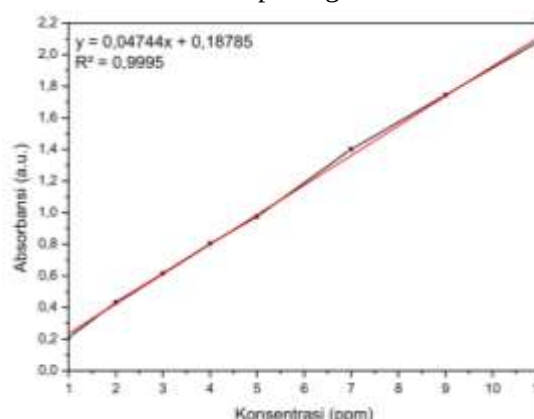
diminimalkan, serta dilengkapi sistem pencahayaan, pengadukan, dan sirkulasi udara yang dapat dilihat pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Fotoreaktor yang digunakan pada penelitian: (a) fotoreaktor tampak luar; (b) fotoreaktor tampak dalam; (c) sistem kelistrikan dalam fotoreaktor

Lampu UV-A ditempatkan pada bagian tengah atas ruang reaksi agar distribusi radiasi menuju permukaan larutan lebih merata. Sistem pengadukan menggunakan dua *magnetic stirrer* yang ditempatkan berdampingan pada bagian bawah ruang reaktor, sedangkan dua *exhaust fan* digunakan untuk mengurangi akumulasi panas dari lampu UV-A dan menjaga kondisi suhu sistem tetap stabil.

Lampu UV-A 365 nm dipilih karena menghasilkan energi foton sekitar 3,40 eV yang lebih besar daripada energi *band gap* ZnO pada kisaran 3,2–3,37 eV, sehingga dapat mengaktivasi ZnO dan membentuk pasangan elektron-hole [17].



Gambar 2. Kurva deret standar metilen biru

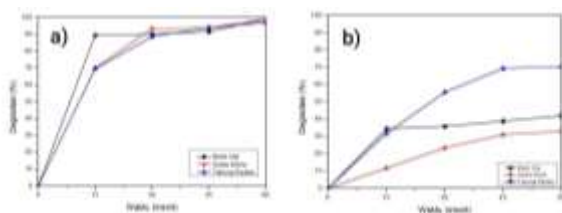
Kurva deret standar metilen biru pada **Gambar 2** menghasilkan persamaan regresi $y = 0,04744x + 0,18785$ dengan koefisien determinasi $R^2 = 0,9995$. Nilai R^2 yang sangat mendekati 1 menunjukkan hubungan yang sangat baik antara konsentrasi metilen biru dan absorbansi, sehingga persamaan regresi layak digunakan sebagai kurva kalibrasi untuk menentukan konsentrasi sampel.

Pengaruh Jenis Wadah Reaksi

Pengujian dilakukan menggunakan gelas kimia, botol vial, dan tabung reaksi. Perbedaan bentuk dan dimensi wadah dapat menyebabkan perbedaan penyerapan dan intensitas cahaya UV yang diterima larutan sehingga memengaruhi laju degradasi.

Tabel 1. Persentase degradasi metilen biru pada variasi wadah

Wadah	ON (%)	OFF (%)
Botol vial	98,90	42,00
Gelas kimia	99,15	33,00
Tabung reaksi	96,91	70,48



Gambar 3. Persentase degradasi metilen biru pada variasi wadah: (a) kondisi ON; (b) kondisi OFF

Pada kondisi ON, degradasi akhir untuk botol vial, gelas kimia, dan tabung reaksi berturut-turut sebesar 98,90%, 99,15%, dan 96,91% yang dapat dilihat pada **Gambar 3** dan **Tabel 1**. Gelas kimia menghasilkan persen degradasi tertinggi, diikuti dengan variasi wadah botol vial dan tabung reaksi.

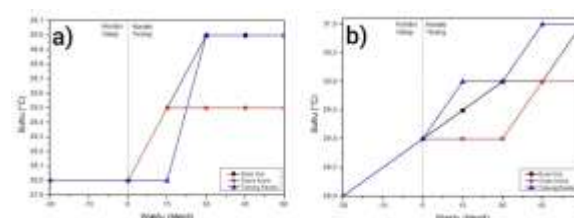
Gelas kimia memiliki ruang reaksi yang lebih luas sehingga selama pengadukan partikel ZnO dapat terdispersi lebih homogen. Homogenitas suspensi meningkatkan perpindahan massa antara molekul metilen biru dan permukaan fotokatalis sehingga lebih banyak permukaan aktif ZnO memperoleh kontak dengan polutan [18].

Pada kondisi OFF, seluruh wadah menunjukkan efisiensi degradasi yang lebih rendah dibandingkan kondisi ON. Tanpa pengadukan, partikel ZnO cenderung mengalami pengendapan sehingga sebagian permukaan aktif fotokatalis kurang memperoleh cahaya UV.

Analisis C/C_0 memperkuat hasil tersebut. Pada kondisi ON, nilai C/C_0 akhir botol vial, gelas kimia, dan tabung reaksi masing-masing 0,010474; 0,007394; dan 0,025262, dengan gelas kimia menghasilkan nilai terendah.

Tabel 2. Tabel Penyusutan Volume Variasi Wadah Reaksi

Sampel	Volume Awal (mL)	Volume Sampling (mL)	Volume Akhir (mL)	Susut Volume (mL)
Botol Vial (ON)	50	7,5	42,5	0
Gelas Kimia (ON)	50	7,5	41	1,5
Tabung Reaksi (ON)	50	7,5	40	2,5
Botol Vial (OFF)	50	7,5	40	2,5
Gelas Kimia (OFF)	50	7,5	40	2,5
Tabung Reaksi (OFF)	50	7,5	40	2,5



Gambar 4. Gambar Kurva Suhu Terhadap Volume Variasi Wadah: a) Kondisi ON; b) Kondisi OFF

Pengaruh suhu pada seluruh variasi wadah yang dapat dilihat pada **Gambar 4** dan **Tabel 2** menunjukkan bahwa kondisi ON mengalami kenaikan suhu relatif kecil, yaitu 28-29°C, sehingga kondisi operasi fotoreaktor tetap stabil. Kenaikan suhu terutama berasal dari energi panas lampu UV-A, sedangkan *exhaust fan* dan *magnetic*

stirrer membantu mengendalikan serta meratakan distribusi panas.

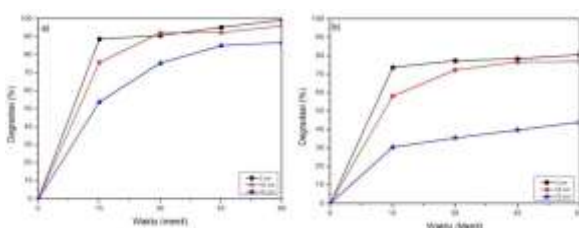
Volume akhir pada kondisi *ON* menunjukkan bahwa vial mengalami susut volume paling kecil (42,5 mL), sedangkan tabung reaksi paling besar (40 mL). Perbedaan tersebut dipengaruhi oleh geometri wadah dan luas permukaan larutan yang memengaruhi laju penguapan. Pada kondisi *OFF*, suhu meningkat hingga 29-31°C dan seluruh wadah memiliki volume akhir yang sama, yaitu 40 mL.

Pengaruh Jarak Sumber Cahaya

Variasi jarak sumber cahaya dilakukan pada 5, 10, dan 15 cm menggunakan gelas kimia sebagai wadah reaksi. Jarak sumber cahaya memengaruhi intensitas radiasi UV yang diterima ZnO selama proses penyinaran.

Tabel 3. Persentase degradasi metilen biru pada variasi jarak

Jarak	Degradasi ON (%)	Degradasi OFF (%)
5 cm	99,21	80,64
10 cm	95,98	77,03
15 cm	86,81	44,11



Gambar 5. Persentase degradasi metilen biru pada variasi jarak: (a) kondisi ON; (b) kondisi OFF

Pada kondisi *ON*, persen degradasi akhir pada jarak 5, 10, dan 15 cm berturut-turut sebesar 99,21%, 95,98%, dan 86,81% yang dapat dilihat pada **Gambar 5** dan **Tabel 3**. Jarak 5 cm menghasilkan degradasi tertinggi karena intensitas energi radiasi UV yang diterima fotokatalis lebih besar ketika sumber cahaya ditempatkan lebih dekat [17].

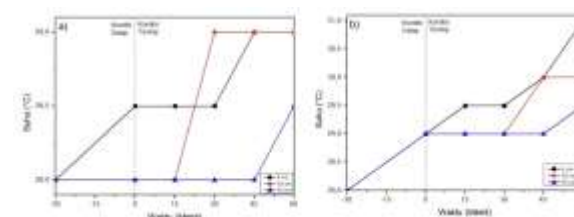
Pada kondisi *OFF*, persen degradasi masing-masing sebesar 80,64%, 77,03%, dan 44,11%. Kecenderungan tetap menunjukkan bahwa peningkatan jarak sumber cahaya menurunkan efektivitas degradasi.

Nilai C/C_0 akhir pada kondisi *ON* untuk jarak 5, 10, dan 15 cm berturut-turut sebesar 0,006778; 0,033272; dan 0,106593. Nilai C/C_0 yang semakin mendekati nol menunjukkan penurunan konsentrasi metilen biru yang semakin besar.

Hasil persen *removal* juga menunjukkan kecenderungan yang sama, dengan nilai 99,32%, 96,67%, dan 89,34% pada jarak 5, 10, dan 15 cm dalam kondisi *ON*.

Tabel 4. Tabel Penyusutan Volume Variasi Jarak Sumber Cahaya

Sampel	Volume Awal (mL)	Volume Sampling (mL)	Volume Akhir (mL)	Susut Volume (mL)
Wadah Optimal (5) (ON)	50	7,5	40	2,5
Wadah Optimal (10) (ON)	50	7,5	40	2,5
Wadah Optimal (15) (ON)	50	7,5	40	2,5
Wadah Optimal (5) (OFF)	50	7,5	40	2,5
Wadah Optimal (10) (OFF)	50	7,5	40	2,5
Wadah Optimal (15) (OFF)	50	7,5	40	2,5



Gambar 6. Gambar Kurva Suhu Terhadap Volume Variasi Jarak: a) Kondisi ON; b) Kondisi OFF

Variasi jarak sumber cahaya pada kondisi *ON* yang dapat dilihat pada **Gambar 6** dan **Tabel 4** menunjukkan kenaikan suhu relatif kecil, yaitu 28,5-29°C, dengan suhu tertinggi pada jarak 5 cm

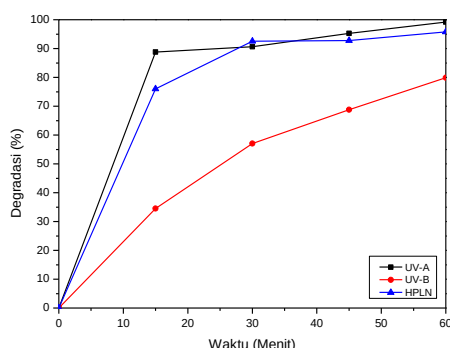
dan terendah pada 15 cm. Hal ini menunjukkan bahwa jarak sumber cahaya memengaruhi intensitas radiasi yang diterima larutan, meskipun kenaikan suhu tetap terkendali oleh *exhaust fan* dan *magnetic stirrer*. Seluruh variasi jarak menghasilkan volume akhir yang sama, yaitu 40 mL, sehingga perbedaan suhu tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap susut volume. Pada kondisi OFF, suhu meningkat hingga 29,5-31°C, dengan pola yang sama, sedangkan volume akhir seluruh variasi tetap 40 mL. Dengan demikian, variasi jarak sumber cahaya lebih berpengaruh terhadap efektivitas fotodegradasi dibandingkan perubahan suhu dan volume larutan.

Perbandingan Sumber Cahaya

Pada kondisi optimum, dilakukan perbandingan menggunakan lampu UV-A, UV-B, dan HPLN. Hasil pada menit ke-60 menunjukkan bahwa UV-A menghasilkan persen degradasi tertinggi, diikuti HPLN dan UV-B yang dapat dilihat pada **Gambar 7** dan **Tabel 5**.

Tabel 5. Persentase degradasi metilen biru menggunakan lampu UV-A, UV-B, dan HPLN

Jenis lampu	Degradasi (%)
UV-A	99,21
UV-B	79,89
HPLN	95,78



Gambar 7. Persentase degradasi metilen biru menggunakan lampu UV-A, UV-B, dan HPLN

Lampu UV-A menghasilkan persen degradasi tertinggi sebesar 99,21%, diikuti HPLN sebesar 95,78%, sedangkan UV-B menghasilkan 79,89% pada menit ke-60.

Lampu HPLN mampu mengaktivasi ZnO, tetapi energi radiasinya tersebar pada berbagai panjang gelombang sehingga tidak seluruh energi

berada pada panjang gelombang yang optimum untuk ZnO [19].

Lampu UV-B juga mampu mendukung fotodegradasi, tetapi hasilnya lebih rendah daripada UV-A. Hal ini menunjukkan bahwa besarnya energi foton tidak selalu menghasilkan efisiensi degradasi yang lebih tinggi karena efektivitas proses juga dipengaruhi karakteristik sumber cahaya dan kesesuaiannya dengan fotokatalis [20].

Kondisi Optimal Fotoreaktor

Berdasarkan persen degradasi, persen *removal*, nilai C/C_0 , suhu, dan susut volume, kondisi optimal diperoleh pada penggunaan gelas kimia sebagai wadah reaksi, jarak sumber cahaya 5 cm, serta *magnetic stirrer* dan *exhaust fan* dalam kondisi ON.

Kondisi optimum menghasilkan persen degradasi sebesar 99,21%, persen *removal* sebesar 99,32%, dan nilai C/C_0 sebesar 0,006778 setelah 60 menit penyinaran. Suhu selama pengujian berada pada kisaran sekitar 28-31 °C sehingga kondisi operasi fotoreaktor relatif stabil.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa gelas kimia memberikan distribusi cahaya dan pengadukan yang lebih baik, sedangkan jarak 5 cm memberikan intensitas radiasi yang lebih tinggi. *Magnetic stirrer* membantu mempertahankan homogenitas suspensi ZnO, sementara *exhaust fan* membantu mengurangi akumulasi panas selama penyinaran [20].

SIMPULAN

Secara keseluruhan, variasi parameter fotoreaktor, meliputi jenis wadah, jarak sumber cahaya, waktu penyinaran, serta pengoperasian *magnetic stirrer* dan *exhaust fan*, berpengaruh terhadap efektivitas fotodegradasi metilen biru. Wadah reaksi dan jarak sumber cahaya memengaruhi distribusi cahaya yang diterima fotokatalis, sedangkan *magnetic stirrer* dan *exhaust fan* membantu meningkatkan homogenitas suspensi ZnO serta menjaga kestabilan suhu selama proses. Peningkatan waktu penyinaran menghasilkan efisiensi degradasi yang lebih tinggi, sementara perubahan suhu relatif stabil dan tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap susut volume larutan. Kondisi optimum diperoleh

menggunakan gelas kimia, jarak sumber cahaya 5 cm, serta *magnetic stirrer* dan *exhaust fan* dalam kondisi *ON* selama 60 menit, dengan persen degradasi sebesar 99,21%, persen *removal* sebesar 99,32%, dan nilai *C/C₀* sebesar 0,006778.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada UIN Sunan Gunung Djati Bandung, khususnya Jurusan Kimia Fakultas Sains dan Teknologi, serta kepada Eko Prabowo Hadisantoso, M.Pkim. dan Rizka Fitriyani S., S.Pd., M.Si. atas arahan dan bimbingan selama penelitian dan penyusunan naskah.

REFERENSI

- [1] V. Katheresan, J. Kansedo, and S. Y. Lau, "Efficiency of various recent wastewater dye removal methods: A review," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 6, no. 4, pp. 4676–4697, 2018, doi: 10.1016/j.jece.2018.06.060.
- [2] H. Afanga, H. Zazou, F. E. Titchou, Y. Rakhila, and R. A. Akbour, "Integrated electrochemical processes for textile industry wastewater treatment: system performances and sludge settling characteristics," vol. 2, pp. 1–11, 2020.
- [3] F. Olivito *et al.*, "Cellulose citrate: A convenient and reusable bio-adsorbent for effective removal of methylene blue dye from artificially contaminated water," *RSC Adv.*, vol. 11, no. 54, pp. 34309–34318, 2021, doi: 10.1039/d1ra05464c.
- [4] A. Krishna Moorthy, B. Govindarajan Rathi, S. P. Shukla, K. Kumar, and V. Shree Bharti, "Acute toxicity of textile dye Methylene blue on growth and metabolism of selected freshwater microalgae," *Environ. Toxicol. Pharmacol.*, vol. 82, no. March 2020, p. 103552, 2021, doi: 10.1016/j.etap.2020.103552.
- [5] S. Li, Y. Cui, M. Wen, and G. Ji, "Toxic Effects of Methylene Blue on the Growth, Reproduction and Physiology of *Daphnia magna*," *Toxics*, vol. 11, no. 7, 2023, doi: 10.3390/toxics11070594.
- [6] H. Chen, Y. Xing, S. Liu, Y. Liang, J. Fu, and L. Wang, "Mechanistic insights into efficient photocatalytic H₂O₂ production of 2D /," vol. 462, no. February, 2023.
- [7] F. Güell *et al.*, "ZnO-based nanomaterials approach for photocatalytic and sensing applications: recent progress and trends," *Mater. Adv.*, vol. 4, no. 17, pp. 3685–3707, 2023, doi: 10.1039/d3ma00227f.
- [8] A. Dhir, N. T. Prakash, and D. Sud, "Comparative studies on TiO₂/ZnO photocatalyzed degradation of 4-chlorocatechol and bleach mill effluents," *Desalin. Water Treat.*, vol. 46, no. 1–3, pp. 196–204, 2012, doi: 10.1080/19443994.2012.677521.
- [9] R. Kitture, S. J. Koppikar, R. Kaul-Ghanekar, and S. N. Kale, "Catalyst efficiency, photostability and reusability study of ZnO nanoparticles in visible light for dye degradation," *J. Phys. Chem. Solids*, vol. 72, no. 1, pp. 60–66, 2011, doi: 10.1016/j.jpcs.2010.10.090.
- [10] A. Enesca and L. Isac, "The influence of light irradiation on the photocatalytic degradation of organic pollutants," *Materials (Basel)*, vol. 13, no. 11, 2020, doi: 10.3390/ma13112494.
- [11] A. Manassero, O. M. Alfano, and M. L. Satuf, "Degradation of Emerging Pollutants by Photocatalysis: Radiation Modeling and Kinetics in Packed-Bed Reactors," *Water (Switzerland)*, vol. 14, no. 22, 2022, doi: 10.3390/w14223608.
- [12] Y. Murillo-Acevedo, J. Bernal-Sanchez, L. Giraldo, R. Sierra-Ramirez, and J. C. Moreno-Piraján, "Initial Approximation to the Design and Construction of a Photocatalysis Reactor for Phenol Degradation with TiO₂ Nanoparticles," *ACS Omega*, vol. 4, no. 22, pp. 19605–19613, 2019, doi: 10.1021/acsomega.9b01750.
- [13] A. Hassanpour, A. Jalali, M. Raisee, and M. R. Naghavi, "Development and modeling of a novel type of photoreactors with exterior

ultraviolet (UV) reflector for water treatment applications,” *Sci. Rep.*, vol. 13, no. 1, pp. 1–17, 2023, doi: 10.1038/s41598-023-34799-0.

- [14] Z. Yiğit Avdan, İ. Demirtaş, and E. Suvacı, “Improved photocatalytic degradation of methylene blue by novel hexagonal ZnO particles,” *Water SA*, vol. 50, no. 4, pp. 392–403, 2024, doi: 10.17159/wsa/2024.v50.i4.4030.
- [15] D. Atta, H. A. Wahab, M. A. Ibrahim, and I. K. Battisha, “Photocatalytic degradation of methylene blue dye by ZnO nanoparticle thin films, using Sol–gel technique and UV laser irradiation,” *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, pp. 1–12, 2024, doi: 10.1038/s41598-024-76938-1.
- [16] M. A. Abu-Dalo, S. A. Al-Rosan, and B. A. Albiss, “Photocatalytic degradation of methylene blue using polymeric membranes based on cellulose acetate impregnated with zno nanostructures,” *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 19, 2021, doi: 10.3390/polym13193451.
- [17] R. Ghamarpoor, A. Fallah, and M. Jamshidi, “A Review of Synthesis Methods , Modifications , and Mechanisms of ZnO / TiO₂ - Based Photocatalysts for Photodegradation of Contaminants 2024,” doi: 10.1021/acsomega.3c08717.
- [18] B. Dai, Y. Zhou, X. Xiao, Y. Chen, J. Guo, and C. Gao, “Fluid Field Modulation in Mass Transfer for Efficient Photocatalysis,” vol. 2203057, pp. 1–20, 2022, doi: 10.1002/advs.202203057.
- [19] M. Martín-Sómer, C. Pablos, R. van Grieken, J. Marugán, “Influence of Light Distribution on The Performance of Photocatalytic Reactors: Led vs Mercury Lamps,” *Applied Catalysis B: Environmental*, 2017, doi: 10.1016/j.apcatb.2017.05.048.
- [20] D. G. Ayu *et al.*, “Photocatalytic Degradation of Methylene Blue Using N - Doped ZnO / Carbon Dot (N-ZnO / CD) Nanocomposites Derived from Organic Soybean,” 2023, doi: 10.1021/acsomega.2c07546.