p-ISSN : 2302-4216
e-ISSN : 2830-1765
Inovasi Fisika Indonesia
https://ejournal.unesa.ac.id/index.php/inovasi-fisika-indonesia
Published by:
Program Studi Fisika
Jurusan Fisika FMIPA
Universitas Negeri Surabaya
Kampus Unesa Ketintang Jl. Ketintang Gd. C3 Lt. 1
Surabaya - Indonesia
jifi@unesa.ac.id

Jurnal Inovasi Fisika Indonesia (IFI) Volume 15 Nomor 2 Tahun 2026, hal 278-285

SINTESIS DAN KARAKTERISASI ZnO *QUANTUM DOTS* UNTUK DEGRADASI *MALACHITE GREEN* DALAM LARUTAN BERAIR

[1)]Muhammad Tegar Rahmawan, [2)]Munasir

[1)] Progdi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: muhammadtegar.22033@mhs.unesa.ac.id
[2)] Prodi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: munasir_physics@unesa.ac.id

Abstrak

ZnO QDs berhasil disintesis melalui metode kopresipitasi menggunakan prekursor seng asetat dihidrat [$Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$] dan agen pengendap natrium hidroksida (NaOH) 0,4 M. Campuran larutan diaduk hingga homogen selama kurang lebih 2 jam, disentrifugasi, dicuci dengan akuades hingga mencapai pH netral, dan dikeringkan pada suhu 80 °C selama 4 jam. Karakterisasi fasa kristal dan ukuran partikel dianalisis menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD), sedangkan identifikasi ikatan kimia permukaan menggunakan spektroskopi *Fourier Transform Infra Red* (FTIR). Hasil analisis XRD mengonfirmasi bahwa ZnO QDs yang terbentuk memiliki fasa *hexagonal wurtzite* murni sesuai dengan standar JCPDS No. 36-1451 dengan tingkat kristalinitas mencapai 100%. Ukuran rata-rata kristal ZnO QDs yang dihasilkan adalah sebesar 2,377 nm, membuktikan keberhasilan reduksi material hingga skala titik kuantum. Spektrum FTIR menunjukkan puncak serapan tajam yang dominan pada daerah bilangan gelombang di bawah 439,9 cm^{-1}, yang merupakan sidik jari molekuler dari vibrasi regangan ikatan logam-oksigen (Zn–O). Selain itu, terdeteksi pula pita serapan gugus hidroksil (O–H) permukaan pada bilangan gelombang 3421,87 cm^{-1} dan 1490,77 cm^{-1} akibat adanya molekul air lingkungan yang teradsorpsi secara fisik. Proses fotokatalis berhasil mendegradasi zat pewarna *malachite green* hingga 98,6% selama 300 menit. Karakteristik struktural skala kuantum serta eksistensi gugus fungsi permukaan yang melimpah ini memberikan indikasi potensi fungsional ZnO QD untuk dikembangkan lebih lanjut pada aplikasi fotokatalitik.

Kata Kunci: ZnO, *quantum dots, malachite green,* fotoaktalis, limbah zat warna

Abstract

Zinc oxide quantum dots (ZnO QDs) were successfully synthesized using the coprecipitation method with zinc acetate dihydrate [$Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$] as the precursor and 0.4 M sodium hydroxide (NaOH) as the precipitating agent. The solution mixture was stirred until homogeneous for approximately 2 hours, followed by centrifugation, washing with distilled water until neutral pH was achieved, and drying at 80 °C for 4 hours. The crystal phase and particle size were characterized using X-ray Diffraction (XRD), while the surface chemical bonds were identified using Fourier Transform Infrared (FTIR) spectroscopy. The XRD results confirmed that the synthesized ZnO QDs exhibited a pure hexagonal wurtzite crystal phase in accordance with the JCPDS standard No. 36-1451, with a crystallinity of 100%. The average crystallite size of the synthesized ZnO QDs was 2.377 nm, confirming the successful reduction of the material to the quantum dot scale. The FTIR spectrum revealed a dominant sharp absorption peak below 439.9 cm^{-1}, corresponding to the characteristic stretching vibration of the Zn–O metal–oxygen bond. In addition, absorption bands associated with surface hydroxyl (O–H) groups were observed at 3421.87 cm^{-1} and 1490.77 cm^{-1} due to the presence of physically adsorbed environmental water molecules. The photocatalytic process successfully degraded malachite green dye by up to 98.6% within 300 minutes. The quantum-scale structural characteristics and the presence of abundant surface functional groups indicate the promising potential of ZnO QDs for further development in photocatalytic applications.

Keywords: *ZnO, quantum dots, malachite green, photocatalysis, dye wastewater*

p-ISSN : 2302-4216
e-ISSN : 2830-1765
Inovasi Fisika Indonesia
https://ejournal.unesa.ac.id/index.php/inovasi-fisika-indonesia
Published by
Program Studi Fisika
Jurusan Fisika FMIPA
Universitas Negeri Surabaya
Kampus Unesa Ketintang Jl. Ketintang Gd. C3 Lt. 1
Surabaya - Indonesia
jifi@unesa.ac.id

I. PENDAHULUAN

Seng oksida (ZnO) merupakan material semikonduktor yang memiliki perhatian besar dalam penelitian sains material modern. ZnO memiliki celah pita energi yang lebar sekitar 3,37 eV dan energi ikat eksiton yang tinggi sebesar 60 meV pada suhu ruang (Gurylev & Perng, 2021). ZnO memiliki sifat optik dan elektronik yang sangat baik yang menjadikan ZnO sangat potensial untuk diaplikasikan dalam berbagai perangkat teknologi canggih, fotokatalis, hingga aplikasi biomedis. Keunggulan tambahan seperti biokompatibilitas yang baik, stabilitas termal yang tinggi, serta ketersediaan bahan baku yang melimpah dan murah semakin menempatkan ZnO sebagai salah satu material multifungsi yang paling menjanjikan (Jiang et al., 2018).

Untuk memaksimalkan potensi material ini, rekayasa ZnO dari ukuran bulk menuju dimensi berskala nanometer, khususnya dalam bentuk quantum dots (QDs), terus dikembangkan secara intensif. Ketika ukuran partikel ZnO direduksi hingga sebanding atau lebih kecil dari jari-jari Bohr eksitonnya, material ini akan mengalami fenomena efek kurungan kuantum (Maurya, 2026). Efek ini akan menghasilkan sifat fisikokimia yang secara drastis berbeda dari material kondisi bulk. Diantara pemanfaatannya seperti pergeseran energi celah pita yang dapat disesuaikan bergantung pada ukuran partikel serta sifat pendaran (luminesensi) yang sangat unik (Huang et al., 2023). Selain itu, rasio luas permukaan terhadap volume yang sangat tinggi pada ZnO QDs memberikan karakteristik permukaan yang jauh lebih reaktif dalam membuka peluang baru untuk peningkatan performa material secara fundamental.

Meskipun ZnO QDs menawarkan karakteristik yang luar biasa, tantangan utama dalam pengembangannya terletak pada proses sintesis untuk mengontrol ukuran, morfologi, dan tingkat kristalinitas partikel secara presisi. Berbagai teknik sintesis telah banyak dilaporkan seperti metode hidrotermal, sol-gel, fasa uap, hingga ablasi laser. Namun, sebagian besar metode tersebut sering kali membutuhkan instrumen yang rumit, kondisi operasi dengan suhu atau tekanan tinggi, waktu reaksi yang lama, serta proses yang sulit untuk diukur ulang (Bian et al., 2025). Oleh karena itu, diperlukan suatu pendekatan sintesis alternatif yang lebih efisien, praktis, dan ekonomis, namun tetap mampu menghasilkan partikel dengan kualitas struktural dan optik yang baik serta distribusi ukuran yang seragam.

Di antara berbagai rute sintesis yang ada, metode kopresipitasi hadir sebagai salah satu pendekatan yang paling efektif dan rasional untuk pembuatan ZnO QDs. Metode ini didasarkan pada proses pengendapan secara simultan dari larutan prekursor dalam fasa cair yang menawarkan sejumlah keunggulan seperti proses preparasi yang sederhana, biaya produksi yang rendah, dan reaksi yang dapat berlangsung pada suhu yang relatif rendah (Bian et al., 2025). Lebih lanjut, metode kopresipitasi memberikan kemudahan dalam mengontrol laju pertumbuhan inti kristal dan ukuran akhir partikel melalui penyesuaian parameter sintesis yang sederhana. Diantaranya dapat dilakukan penyesuaian seperti konsentrasi prekursor, tingkat keasaman (pH), dan waktu pengadukan. Berdasarkan pertimbangan tersebut, penelitian ini difokuskan pada sintesis ZnO quantum dots menggunakan metode kopresipitasi, dilanjutkan dengan karakterisasi komprehensif terhadap sifat struktural dan optiknya guna memahami secara mendalam karakteristik material yang dihasilkan.

II. METODE

A. Rancangan Penelitian

1. Sintesis ZnO *Quantum Dots*

Sintesis ZnO *quantum dots* mengacu pada penelitian Banerjee et al. (2023). 1,1 gram $Zn(CH_3COO)_2.2H_2O$ dilarutkan ke dalam 50 mL akuades (Larutan A). Kemudian ambil 50 mL NaOH 0.4 M pada wadah terpisah (Larutan B). Tambahkan larutan B tetes demi tetes ke larutan A diikuti pengadukan dengan stirrer. Aduk hingga homogen kurang lebih 2 jam hingga terbentuk endapan putih keruh. Kemudian endapan putih dipisahkan dengan sentrifugasi, Dimana pencucian dilakukan dengan air akuades hingga pH 7 dan dengan etanol 1 kali. Selanjutnya endapan dikeringkan di dalam oven dengan suhu 80℃ selama 4 jam untuk mengurangi kadar airnya.

B. Rancangan Penelitian

1. *X-Ray Diffraction* (XRD)

X-Ray Diffraction (XRD) merupakan metode yang digunakan untuk mengkarakterisasi struktur kristal, mengidentifikasi fase, serta menentukan ukuran kristalit dari sampel ZnO murni dan nanokomposit ZnO QD. Pengujian dilakukan menggunakan instrumen *X-Ray Diffractometer* dengan sumber radiasi Cu-Kα ((λ = 1,5406 Å) yang dioperasikan pada tegangan 40 kV dan arus 15 mA. Perekaman data dilakukan dengan memindai sampel serbuk pada rentang sudut 2θ antara 20° hingga 80° dengan *step size* sebesar 0,02°. Analisis struktur kristal untuk mengetahui fase yang terbentuk dilakukan secara kualitatif dengan mencocokkan posisi dan intensitas puncak difraksi sampel terhadap data standar dari *Joint Committee on Powder Diffraction Standards* (JCPDS). Proses identifikasi ini difokuskan untuk mengonfirmasi keberadaan fase *hexagonal wurtzite* pada partikel ZnO serta mendeteksi fasa amorf dari silika pada komposit. Data hasil difraksi tersebut kemudian diolah dan divisualisasikan menggunakan perangkat lunak analisis pada OriginLab untuk menganalisis puncak. Kemudian uukuran kristalit rata-rata dihitung menggunakan pendekatan persamaan Scherrer.

2. Spektrofotometri *Fourier Transform Infra Red* (FTIR)

Spektrofotometri *Fourier Transform Infra Red* (FTIR) merupakan metode analisis yang digunakan untuk mendeteksi keberadaan gugus fungsi serta mengidentifikasi jenis ikatan kimia pada sampel ZnO murni dan nanokomposit ZnO QD. Analisis ini bertujuan untuk mengonfirmasi keberadaan gugus permukaan, seperti –OH atau silanol, yang berpotensi memengaruhi sifat adsorpsi maupun aktivitas fotokatalitik dari material yang disintesis. Pengujian dilakukan menggunakan instrumen FTIR dengan konfigurasi ATR (*Attenuated Total Reflectance*), di mana perekaman spektrum dilakukan pada rentang bilangan gelombang *mid-IR*, yaitu 4000–400 cm^{-1}. Data spektrum yang dihasilkan kemudian dianalisis dengan mencocokkan pita serapan yang muncul terhadap pita vibrasi standar. Proses identifikasi ini difokuskan pada pengamatan serapan khas ikatan Zn–O yang umumnya terdeteksi pada bilangan gelombang di bawah 500 cm^{-1} , vibrasi regangan ikatan Si–O–Si dari matriks silika pada 803 cm^{-1} dan 1064 cm^{-1} , serta indikasi terbentuknya interaksi antarmuka kimiawi penyusun komposit berupa ikatan Si–O–Zn yang dapat teramati di sekitar 579 cm^{-1}.

3. Spektrofotometer UV-Vis

Karakterisasi UV-Vis digunakan untuk ifat optik dan energi celah pita (band gap energy) dari sampel diselidiki menggunakan instrumen Spektrofotometer UV-Vis. Pengukuran spektrum absorbansi dilakukan dengan memindai sampel pada rentang panjang gelombang 300 hingga 700 nm. Data spektrum yang dihasilkan dianalisis secara kualitatif untuk mengamati pergeseran puncak absorbansi (λ_max) yang mengindikasikan perubahan struktur elektronik akibat pelapisan silika (Banerjee et al, 2023). Untuk mengetahui persentase degradasinya dapat menggunakan persamaan 1 berikut:

$$C_0 = \frac{Abs+B}{A} x f_p \quad (1)$$

$$\%\, Degradasi = \frac{C_0 - C_t}{C_0} x\, 100 \quad (2)$$

dimana C_0 adalah konsentrasi awal dari *malachite green* sedangkan C_t adalah konsentrasi akhir *malachite green* setelah proses aplikasi fotokatalis. Untuk Abs adalah hasil pembacaan serapan cahaya oleh sampel pada waktu tertentu dari UV-vis, A adalah Nilai *slope* regresi linear dari kurva kalibrasi zat yang sedang diuji, B adalah nilai *intercept* kurva kalibrasi, dan f_p adalah factor pengenceran.

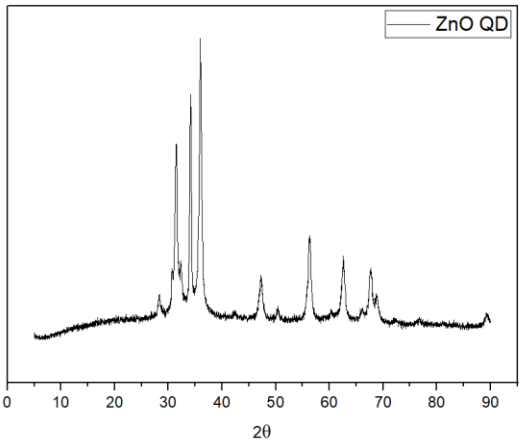
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. *X-Ray Diffraction* (XRD)

Berdasarkan difraktogram XRD pada **Gambar 1**, profil spektrum untuk sampel ZnO murni memperlihatkan serangkaian puncak difraksi yang intens. Puncak-puncak difraksi utama teramati dengan jelas pada posisi sudut 2θ pada area 31,5°, 34,1°, dan 36,0° secara berturut-turut merepresentasikan bidang difraksi (100), (101), dan (002). Kemunculan bidang-bidang difraksi ini beserta puncak minor lainnya lanjut terhadap posisi sudut 2θ pada area 47,2°, 56,3°, 62,5°, dan 67,7° yang mempresentasikan bidang difraksi (102),

(110), (103), dan (112) mengonfirmasi bahwa ZnO yang disintesis telah terbentuk secara sempurna dan memiliki struktur kristal *hexagonal wurtzite* yang murni yang sesuai dengan data referensi standar (JCPDS No. 36-1451) (Banerjee et al., 2023). Dengan menggunakan rumus Scherrer, pelebaran puncak dari XRD yang diamati dapat dikorelasikan dengan penurunan ukuran nanopartikel menjadi ukuran titik kuantum. Nilai ukuran nanokristalit sampel titik kuantum ZnO telah dihitung sebesar 2,377 nm yang menggunanpersamaan 3 rumus Scherrer:

$$D = \frac{k\lambda}{\beta cos\theta} \tag{3}$$



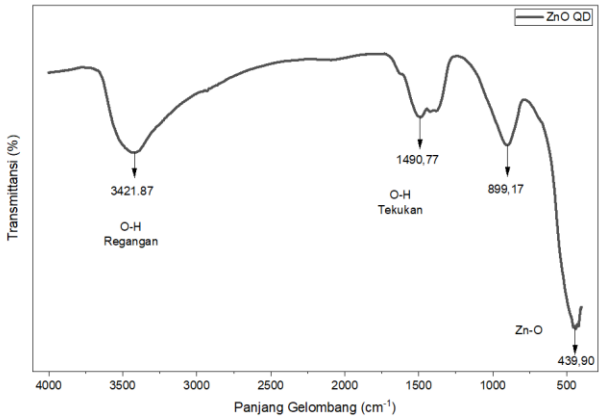
Gambar 1. Grafik Karakterisasi XRD

Dalam Persamaan (2), panjang gelombang λ radiasi adalah 1,540 Å, ß adalah lebar penuh pada setengah maksimum (FWHM) puncak dengan nilai sebesar 1,019 rad, dan θ adalah sudut Bragg yang diperoleh dari 2θ sebesar 17,969. Sehingga menghasilkan ukuran Kristal dari ZnO QD sebesar 2,377 nm. Kemudian pada seluruh puncak yang muncul memiliki intensitas sebesar 7744,69, 1623,40, 5133,35, 1697,80, 3082,7, 2151,95, 6170,65. Sehingga total fraksi luas kristalin sebesar 27.604,5 dan fraksi luas kristalin dan amorf sebesar 27.604,5. Maka hasil analisis kristalinitas memperlihatkan ZnO QD memiliki kristalinitas tertinggi sebesar 100% yang mana seluruhnya berasal dari fase kristal menggunakan persamaan 4.

$$Kristalinitas = \frac{Fraksi\ luas\ kristalin}{Fraksi\ luas\ kristalin\ dan\ amorf} x\ 100\% \tag{4}$$

B. FTIR

Analisis gugus fungsi menggunakan spektroskopi FTIR pada material ZnO murni QD dilakukan untuk mengidentifikasi ikatan kimia fundamental yang terbentuk pasca-sintesis. Berdasarkan spektrum FTIR pada **Gambar 2**, puncak serapan karakteristik yang paling dominan teramati pada daerah bilangan gelombang rendah, yakni pada rentang di bawah 439,9 cm^{-1}. Pita serapan yang tajam pada area tersebut merupakan sidik jari molekuler dari vibrasi regangan (*stretching vibration*) ikatan logam-oksigen (Zn–O) yang secara absolut mengonfirmasi keberhasilan pembentukan struktur fasa padat seng oksida (Banerjee et el., 2023). Selain ikatan fundamental penyusun kisi kristal, spektrum ZnO juga memperlihatkan keberadaan pita serapan asimetris pada area sekitar 3421,87 cm^{-1} serta puncak serapan sekunder pada kisaran 1490,77 cm^{-1}. Kedua area serapan ini secara berurutan berkorespondensi dengan mode vibrasi regangan dan vibrasi tekukan (*bending*) dari gugus hidroksil (O–H). Kemunculan pita serapan O–H ini mengindikasikan adanya molekul air (H_2O) dari kelembapan lingkungan yang teradsorpsi secara fisik pada permukaan nanopartikel (Sharon et al., 2022). Dalam konteks aplikasi material, eksistensi gugus hidroksil permukaan yang melimpah ini sangat menguntungkan secara fotokimia, karena molekul-molekul tersebut dapat berperan aktif sebagai spesi penangkap lubang (*hole scavengers*) untuk memproduksi radikal bebas hidroksil (•OH) yang krusial selama proses fotodegradasi.

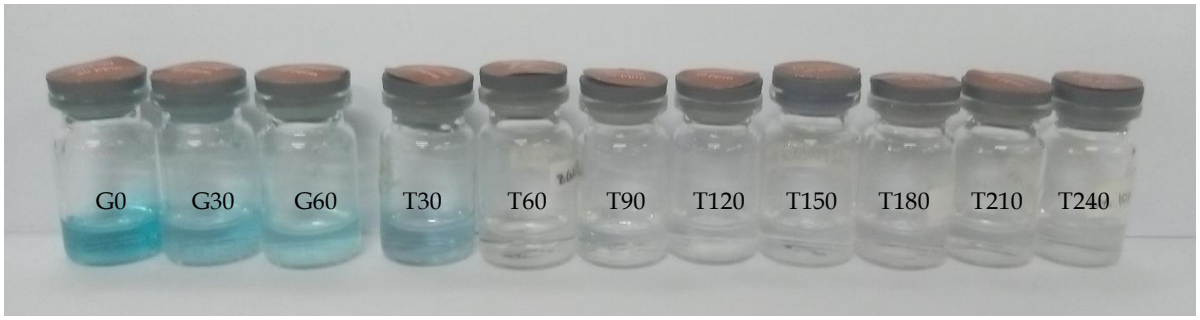


Gambar 2. Grafik Karakterisasi FTIR ZnO QD

C. Aplikasi Fotokatalis ZnO QD

Uji aktivitas fotokatalitik dilakukan dengan mendispersikan sebanyak 0,3 g serbuk fotokatalis komposit ZnO QD ke dalam 30 mL larutan pewarna *Malachite Green* dengan konsentrasi awal 30 ppm tanpa manipulasi suhu. Sebelum proses penyinaran dimulai, larutan terlebih dahulu diaduk secara dalam kondisi gelap selama 60 menit untuk memastikan tercapainya kesetimbangan adsorpsi-desorpsi molekul pewarna pada permukaan katalis dan pengambilan sampel dilakukan pada interval waktu 30 menit untuk diamati. Setelah kesetimbangan tercapai, larutan disinari menggunkan lampu UV panjang gelombang 365 nm selama 240 menit dan pengambilan sampel dilakukan pada interval waktu 30 menit untuk diamati.

Berdasarkan hasil pengamatan visual pada **Gambar 3**, terjadi proses degradasi zat warna yang sangat signifikan dari waktu ke waktu. Tiga sampel pada botol paling kiri menunjukkan warna biru pekat yang merepresentasikan kondisi awal larutan pada fase gelap (G0, G30, G60). Seiring dengan bertambahnya waktu penyinaran intensitas warna hijau pada larutan secara bertahap memudar hingga akhirnya menjadi jernih dan tak berwarna pada akhir waktu pengamatan (T30 sampai T240). Pemudaran warna larutan ini mengindikasikan terjadinya pemutusan ikatan pada gugus kromofor penyusun molekul kompleks pewarna oleh radikal hidroksil (•OH) dan spesi reaktif lain yang dihasilkan oleh material fotokatalis, sehingga senyawa tersebut berhasil terdegradasi menjadi molekul yang lebih sederhana menjadi.

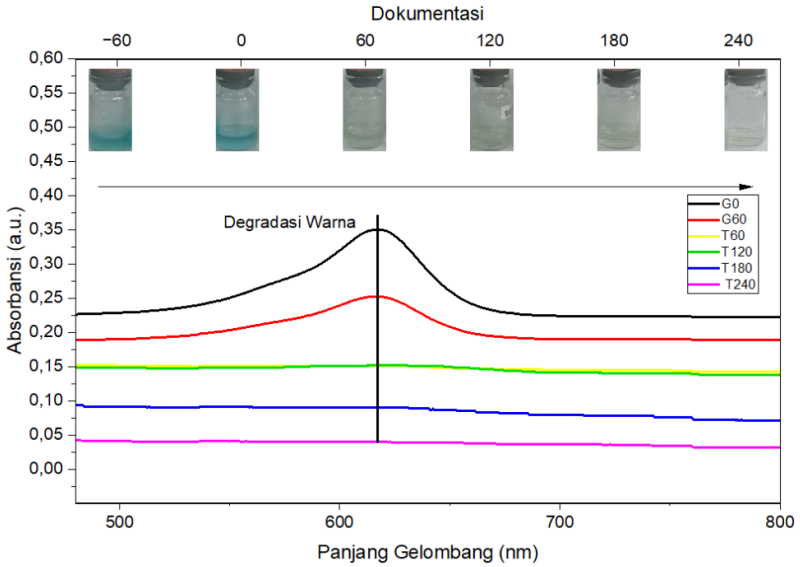


Gambar 3. Hasil aplikasi fotokatalis ZnO QD terhadap MG konsentrasi 30 ppm

Aktivitas Fotokalis pada hasil **Gambar 3** berdasarkan hasil uji UV-Vis pada T240 menghasilkan nilai absorbansi sebesar 0,049 a.u. Dimana nilai A dan B untuk MG sebesar 0,1897 dan 0,0287, lalu dihitung menggunakan persamaan 1 menghasil C_0 sebesar 0,4096 ppm. Sehingga jika nilai C_0 dimasukkan pada persamaan 2 maka menunjukkan persentase degradasi sebesar 98,6 %. Berdasarkan yang disajikan pada **Gambar 4,** proses degradasi dapat dibuktikan secara kuantitatif melalui penurunan intensitas puncak serapan secara bertahap spektrum absorbansi UV-Vis. Puncak absorbansi maksimum (λ maks) larutan uji terlihat dengan jelas pada rentang panjang gelombang sekitar 617 nm. Pada awal pengamatan (G0), larutan memiliki intensitas absorbansi tertinggi. Setelah dilakukan pengadukan dalam kondisi gelap selama 60 menit (G60), terjadi penurunan absorbansi awal yang mengindikasikan bahwa sebagian molekul zat warna telah

teradsorpsi ke dalam pori-pori atau permukaan material komposit fotokatalis sebelum reaksi fotodegradasi dimulai.

Selanjutnya, memasuki fase penyinaran atau kondisi terang (kurva T60 hingga T240), intensitas puncak absorbansi pada panjang gelombang 617 nm mengalami penurunan yang sangat drastis dan berlanjut secara konsisten seiring bertambahnya waktu kontak dengan cahaya. Pada menit ke-240 (kurva magenta, T240), puncak serapan nyaris hilang dan spektrum menjadi sangat landai. Penurunan absorbansi yang signifikan ini mengonfirmasi terjadinya pemutusan ikatan pada struktur kromofor zat warna MG oleh spesies radikal reaktif yang diproduksi oleh fotokatalis. Profil kuantitatif ini sangat selaras dengan visual gambar di atas grafik, di mana warna hijau pekat pada larutan perlahan memudar hingga menjadi jernih yang merepresentasikan tingginya efisiensi degradasi katalis terhadap polutan organik.



Gambar 4. Grafik spektrum UV—Vis dari aplikasi fotokatalis ZnO QD dengan konsentrasi 30 ppm MG selama 300 menit

Tabel 1. Perbandingan Hasil Kemampuan Degradasi ZnO dari berbagai literatur

Peneliti	Material Fotokatalis	Polutan Target	Persentase Kemampuan Degradasi
Hagos & Reda, 2019	ZnO	*Malachite Green*	88%
Elkady & Hassan, 2021	*ZnO polymeric nanofiber*	*Malachite Green*	93,5 %
El-Sawy et al., 2023	ZnO	*Malachite Green*	95,4%
Hosseini et al., 2021	ZnO	*Malachite Green*	97,5 %
Saad et al., 2020	ZnO	*Malachite Green*	18,7 %
Bhernama, 2018	ZnO	*Malachite Green*	93,5 %

IV. PENUTUP

A. Simpulan

Material ZnO *quantum dots* (QDs) telah berhasil disintesis menggunakan metode kopresipitasi. Berdasarkan hasil karakterisasi *X-Ray Diffraction* (XRD), ZnO QDs yang dihasilkan memiliki struktur kristal *hexagonal wurtzite* murni dengan tingkat kristalinitas yang sangat baik, yaitu mencapai 100%. Melalui perhitungan menggunakan persamaan Scherrer, ukuran kristal material ini terbukti telah berhasil direduksi mencapai skala *quantum dot* dengan ukuran sebesar 2,37 nm. Selanjutnya, hasil analisis *Fourier Transform Infra Red* (FTIR) mengonfirmasi keberhasilan pembentukan fasa padat seng oksida melalui deteksi ikatan fundamental Zn–O pada bilangan gelombang 439,9 cm^{-1}. Selain itu, terdeteksinya gugus hidroksil (O–H) pada permukaan nanopartikel menunjukkan potensi yang sangat menguntungkan secara fotokimia, di mana gugus tersebut dapat berperan sebagai penangkap lubang (*hole scavengers*) untuk mendukung proses fotodegradasi.

Proses aplikasi fotokatalis juga berhasil mendegradasi zat pewarna *malachite green* berdasarkan spektruk UV-Vis hingga 98,6% yang dilakukan selama 300 menit.

B. Saran

Berdasarkan hasil penelitian, studi lanjutan disarankan untuk melengkapi karakterisasi material menggunakan *Transmission Electron Microscopy* (TEM) guna memvalidasi morfologi dan distribusi ukuran ZnO *quantum dots* secara visual. Selain itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk memfokuskan pada pengujian aplikasi ZnO *quantum dots* secara langsung sebagai agen fotokatalis, mengingat besarnya potensi yang ditunjukkan oleh melimpahnya gugus hidroksil pada permukaan partikel. Selain itu, guna meningkatkan stabilitas dan efisiensi kinerja fotokatalitiknya, material ZnO ini sangat direkomendasikan untuk dimodifikasi lebih lanjut dengan cara mengompositkannya bersama matriks silika (SiO_2), TiO_2, Fe_3O_4, dan lain sebagainya.

DAFTAR PUSTAKA

Banerjee, D., & Kumar Kar, A. 2023. Structural strategy to enhance the quantum and photocatalytic efficiency of ZnO quantum dots by incorporation of interface states. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 437(December 2022), 114500. https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2022.114500

Bhernama, B. G. 2018. Fotodegradasi zat warna malachite green menggunakan fotokatalis ZnO. Elkawnie: Journal of Islamic Science and Technology, 2(2), 142–152. https://jurnal.ar-raniry.ac.id/index.php/elkawnie/article/view/535

Elkady, M. F., & Hassan, H. S. 2021. Photocatalytic Degradation of Malachite Green Dye from Aqueous Solution Using Environmentally Compatible Ag/ZnO Polymeric Nanofibers. *Polymers*, *13*(13), 2033. https://doi.org/10.3390/polym13132033

El-Sawy, A.M., Salem, M.A., Salem, I.A. et al. 2023. Sonophotocatalytic degradation of malachite green in aqueous solution using six competitive metal oxides as a benchmark. Photochem Photobiol Sci 22, 579–594. https://doi.org/10.1007/s43630-022-00336-7

Gurylev, V., & Perng, T. P. 2021. Defect engineering of ZnO: Review on oxygen and zinc vacancies. *Journal of the European Ceramic Society*, *41*(10), 4977–4996. https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2021.03.031

Hagos, Tesfaye Teka & Reda, Aynalem. 2019. Comparative Study On The Photocatalytic Degradation Of Malachite Green Using Zinc Oxide Under Different Sources Of Radiation.

Hosseini, A., Karimi, H., Foroughi, J., Sabzehmeidani, M. M., & Ghaedi, M. 2021. Heterogeneous photoelectro-Fenton using ZnO and TiO2 thin film as photocatalyst for photocatalytic degradation malachite green. Applied Surface Science Advances, 6, Article 100126. https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2021.100126

Huang, C. Y., Li, H., Wu, Y., Lin, C. H., Guan, X., Hu, L., Kim, J., Zhu, X., Zeng, H., & Wu, T. 2023. Inorganic Halide Perovskite Quantum Dots: A Versatile Nanomaterial Platform for Electronic Applications. In *Nano-Micro Letters* . Vol. 15, Number 1. https://doi.org/10.1007/s40820-022-00983-6

Jiang, J., Pi, J., & Cai, J. 2018. The advancing of zinc oxide nanoparticles for biomedical applications. *Bioinorganic Chemistry and Applications*, *2018*, 1062562. https://doi.org/10.1155/2018/1062562

Josephine, G. A. S., Ramachandran, S., & Sivasamy, A. 2015. Nanocrystalline ZnO doped lanthanide oxide: An efficient photocatalyst for the degradation of malachite green dye under visible light irradiation. Journal of Saudi Chemical Society, 19(5), 549–556. https://doi.org/10.1016/j.jscs.2015.05.011

Maurya, S., Anupam, Tripathi, S. *et al.* 2026. Recent advances in the synthesis and applications of zinc oxide nanomaterials for healthcare energy and environmental systems. *Discov. Chem.* 3, 98. https://doi.org/10.1007/s44371-026-00570-3

Saad, A. M., Abukhadra, M. R., Ahmed, S. A.-K., Elzanaty, A. M., Mady, A. H., Betiha, M. A., Shim, J.-J., & Rabie, A. M. 2020. Photocatalytic degradation of malachite green dye using chitosan supported ZnO and Ce–ZnO nano-flowers under visible light. Journal of Environmental Management, 258, Article 110043. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.110043

Sharon Tamil Selvi, S., Hannah Priya, G., Ragu, R. *et al.* 2022. Exploring the Outcomes of Sulphur Sources on ZnO/CdS Nanocomposites Towards Photocatalytic Degradation of Mordant Black 11 Dye. *J Clust Sci* **33**, 375–386. https://doi.org/10.1007/s10876-020-01963-9

Yu Bian, Yuan Zhang, Zu-yi Chen, Lian Xu, Chen-yu Zhang, Du Shi, Xue-song Feng, Xue-qing Wang. 2025. Malachite green in environmental samples: Updates on sources, fates, distribution and removal techniques, Ecotoxicology and Environmental Safety. Volume 303. 118978. ISSN 0147-6513. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.118978.