

SINTESIS DAN KARAKTERISASI ZNO-CU MENGGUNAKAN EKSTRAK KULIT JERUK MANIS

¹⁾Faizal Pristian Syah Putra, ²⁾Munasir

¹⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: faizalpristian.21031@mhs.unesa.ac.id

²⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: Munasir@unesa.ac.id

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis dan mengkarakterisasi nanopartikel ZnO yang didoping dengan tembaga (ZnO-Cu) menggunakan metode green synthesis berbasis ekstrak kulit jeruk manis (*Citrus sinensis* L.) sebagai agen pereduksi dan penstabil. Metode ini dipilih karena ramah lingkungan dan berpotensi menghasilkan nanopartikel yang lebih stabil. Karakterisasi dilakukan menggunakan X-Ray Diffraction (XRD), Fourier Transform Infrared (FTIR), dan Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-ray (SEM-EDX). Hasil XRD menunjukkan bahwa struktur kristal ZnO-Cu tetap berada dalam fase wurtzite, namun terdapat pergeseran puncak yang mengindikasikan interaksi dopan Cu dalam kisi ZnO. Spektrum FTIR mengonfirmasi keberadaan gugus fungsional O-H, C=O, C-H, serta pembentukan CuO yang menandakan keberhasilan proses doping. Analisis SEM menunjukkan perbedaan signifikan pada morfologi antara ZnO murni dan ZnO-Cu 5%, di mana ukuran partikel ZnO-Cu 5% lebih kecil dan lebih terdispersi. Dengan demikian, doping Cu terbukti berpengaruh terhadap struktur kristal, morfologi, dan gugus fungsi nanopartikel, serta berpotensi meningkatkan performa material dalam aplikasi fotokatalitik.

Kata Kunci: ZnO-Cu, *Green synthesis*, Kulit Jeruk Manis, XRD, FTIR, SEM.

Abstract

This study aims to synthesize and characterize copper-doped zinc oxide nanoparticles (ZnO-Cu) using a green synthesis method based on sweet orange peel (*Citrus sinensis* L.) extract as a reducing and stabilizing agent. This environmentally friendly approach offers the potential to produce more stable nanoparticles. Characterization was performed using X-Ray Diffraction (XRD), Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), and Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-ray (SEM-EDX). XRD results confirmed that the ZnO-Cu nanoparticles retained the typical wurtzite crystal structure, although slight peak shifts indicated lattice distortion caused by Cu doping. FTIR spectra revealed the presence of O-H, C=O, and C-H functional groups, along with CuO formation, suggesting successful incorporation of copper into the ZnO matrix. SEM analysis showed significant differences in morphology between pure ZnO and ZnO-Cu 5%, with the doped sample exhibiting smaller and more homogeneously distributed particles. Overall, Cu doping was found to influence the crystal structure, morphology, and surface functional groups of the nanoparticles, indicating improved potential for photocatalytic applications.

Keywords: ZnO-Cu, *Green synthesis*, *Citrus sinensis* L., XRD, FTIR, SEM-EDX

I. PENDAHULUAN

Pencemaran air akibat limbah industri tekstil menjadi masalah lingkungan yang signifikan, terutama dengan keberadaan zat warna sintetis yang sulit terurai secara alami dan berpotensi berbahaya bagi ekosistem. Salah satu upaya untuk mengatasi permasalahan ini adalah dengan menggunakan material fotokatalitik yang dapat mengurai polutan di dalam air. Zinc oxide (ZnO) adalah salah satu material semikonduktor yang banyak digunakan dalam aplikasi fotokatalisis berkat kemampuannya dalam mengurai polutan, meskipun efisiensinya terbatas pada cahaya UV. Salah satu solusi untuk meningkatkan kinerja fotokatalitik ZnO adalah dengan melakukan doping logam transisi seperti tembaga (Cu), yang dapat meningkatkan penyerapan cahaya dan mengurangi rekombinasi pembawa muatan selama proses fotokatalisis.

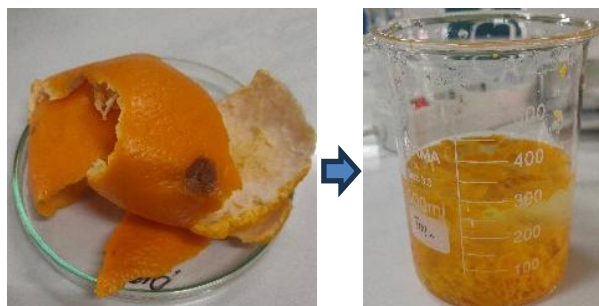
Salah satu metode yang digunakan untuk sintesis nanopartikel ZnO-Cu adalah sintesis hijau, yang menggunakan agen reduktor alami seperti ekstrak kulit jeruk manis (*Citrus sinensis* L.). Metode ini lebih ramah lingkungan karena mengurangi penggunaan bahan kimia berbahaya dan menghasilkan nanopartikel yang lebih stabil serta biokompatibel. Untuk memastikan kualitas dan karakteristik nanopartikel ZnO-Cu yang dihasilkan, berbagai teknik karakterisasi diperlukan. X-Ray Diffraction (XRD) digunakan untuk menganalisis struktur kristal dan menentukan fase dari nanopartikel. XRD juga memungkinkan perhitungan ukuran kristalit melalui rumus Debye-Scherrer. Teknik Fourier Transform Infrared (FTIR) digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi yang ada pada permukaan nanopartikel. FTIR memberikan informasi penting mengenai interaksi kimia yang terjadi pada permukaan material, yang dapat menunjukkan keberadaan senyawa organik atau anorganik yang teradsorpsi. Scanning Electron Microscopy (SEM) yang dipadukan dengan Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX) memberikan gambaran morfologi permukaan nanopartikel serta komposisi unsur-unsur yang terdapat pada material tersebut. SEM memungkinkan analisis struktur permukaan dengan resolusi tinggi, sedangkan EDX memberikan informasi mengenai unsur-unsur yang terdeteksi di dalam sampel, termasuk tembaga (Cu) yang digunakan untuk doping pada ZnO.

II. METODE

A. Rancangan Penelitian

Penelitian dibagi menjadi 2 tahap utama, yaitu pembuatan ekstrak kulit jeruk manis (*Citrus sinensis* L.), Sintesis nanopartikel ZnO-Cu dengan *green synthesis*:

1. Sintesis Ekstrak Kulit Jeruk Manis (*Citrus sinensis* L.)



Kulit jeruk manis (*Citrus sinensis* L.) terlebih dahulu menjalani perlakuan awal berupa sortasi basah dan penghalusan (*size reduction*). Sortasi basah dilakukan dengan memisahkan kulit jeruk manis dari daging buahnya, kemudian dicuci menggunakan air mengalir untuk menghilangkan kotoran dan residu yang menempel. Setelah pencucian, kulit jeruk manis dipotong kecil-kecil guna memperluas area kontak selama proses ekstraksi. Sebanyak 30 gram kulit jeruk manis yang telah dipotong dihaluskan menggunakan mortar dan alu hingga mencapai tekstur yang lebih homogen. Selanjutnya, 100 mL akuades ditambahkan ke dalam campuran dan dilakukan proses pengadukan menggunakan magnetic stirrer pada suhu 80°C dengan

kecepatan 350 rpm selama 60 menit untuk meningkatkan efisiensi ekstraksi. Setelah proses ekstraksi selesai, larutan disaring menggunakan kertas saring *Whatman* No. 1 untuk memisahkan filtrat dari residu padatan. Filtrat yang diperoleh kemudian disimpan dalam wadah gelap di dalam lemari pendingin untuk menjaga stabilitas senyawa aktif yang terkandung di dalamnya.

2. Green Synthesis nanopartikel ZnO-Cu

Sebanyak 6 gram terbentuk. $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ dan $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ dengan variasi konsentrasi doping tembaga (Cu) masing-masing 5%, 10%, dan 13% dilarutkan dalam 75 mL larutan kuning (dengan masing-masing volume 75 mL untuk setiap variabel) dan dilakukan proses sonikasi pada suhu 40°C selama 60 menit. Larutan campuran kemudian diberi NaOH yang telah dilarutkan dalam 100 mL aquadest, yang berfungsi untuk mengatur pH larutan dan memfasilitasi proses presipitasi. Setelah pemberian NaOH, larutan tersebut didiamkan semalam pada suhu $4,4^\circ\text{C}$ di dalam kulkas (bukan di dalam freezer) untuk memungkinkan pembentukan endapan. Endapan yang terbentuk pada dasar larutan kemudian dipisahkan menggunakan proses sentrifugasi selama tiga kali dengan kecepatan 2000 rpm masing-masing selama 5 menit untuk memastikan pemisahan yang optimal. Setelah proses sentrifugasi, endapan yang terbentuk dikeringkan di dalam oven pada suhu 150°C selama 10 jam untuk menghilangkan kadar air yang terkandung dalam endapan tersebut, sesuai dengan prosedur yang telah dilaporkan oleh Kebede Urge et al. (2023). Proses pengeringan ini penting untuk menghindari gangguan kelembaban yang dapat mempengaruhi sifat fisik dan kimia nanopartikel yang dihasilkan. Selanjutnya, sampel yang telah dikeringkan dioven dikalsinasi pada suhu 500°C selama 3 jam untuk mencapai dekomposisi termal dan menghilangkan fraksi-fraksi yang bersifat volatil. Proses kalsinasi ini berfungsi untuk memastikan terbentuknya struktur kristal yang stabil dan meningkatkan sifat fotokatalitik dari nanopartikel

B. Teknik Pengumpulan Data

Nanopartikel ZnO-Cu yang telah disintesis kemudian dianalisis menggunakan beberapa metode karakterisasi untuk memastikan identitas sampel tersebut sebagai ZnO-Cu. Karakterisasi menggunakan X-Ray Diffraction (XRD) dilakukan untuk mengidentifikasi fasa kristal dari nanopartikel ZnO-Cu, dimana data yang diperoleh selanjutnya dianalisis lebih lanjut menggunakan software Origin. Fourier Transform Infrared (FTIR) digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi dan ikatan kimia pada nanopartikel ZnO-Cu, dengan membandingkan bilangan gelombang yang terdeteksi dan mencocokkannya dengan data referensi. Hasil FTIR yang diperoleh juga dianalisis menggunakan software Origin untuk interpretasi lebih lanjut. Karakterisasi Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-ray (SEM-EDX) digunakan untuk mengamati morfologi permukaan serta komposisi unsur dari nanopartikel ZnO-Cu. SEM memberikan citra dengan resolusi tinggi pada skala nanometer hingga mikrometer, sementara EDX digunakan untuk menganalisis unsur-unsur yang terkandung dalam sampel, sehingga dapat memberikan informasi lengkap mengenai komposisi material yang dianalisis. data XRD didapatkan parameter seperti posisi puncak (2θ), intensitas puncak, dan lebar puncak.

C. Teknik Pengolahan Data

Pada data XRD didapatkan parameter seperti posisi puncak (2θ), intensitas puncak, dan lebar puncak (FWHM) dianalisis untuk menentukan ukuran kristal, struktur kristal, dan fase material. Untuk menentukan jarak antar bidang kristal menggunakan Hukum Bragg (Bragg, 1913):

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (1)$$

dimana, n adalah bilangan bulat orde difraksi, λ merupakan panjang gelombang sinar x, d jarak antar bidang Kristal dan θ sudut difraksi.

Sedangkan untuk menghitung ukuran kristalit menggunakan Persamaan Scherrer (Scherrer, 1918):

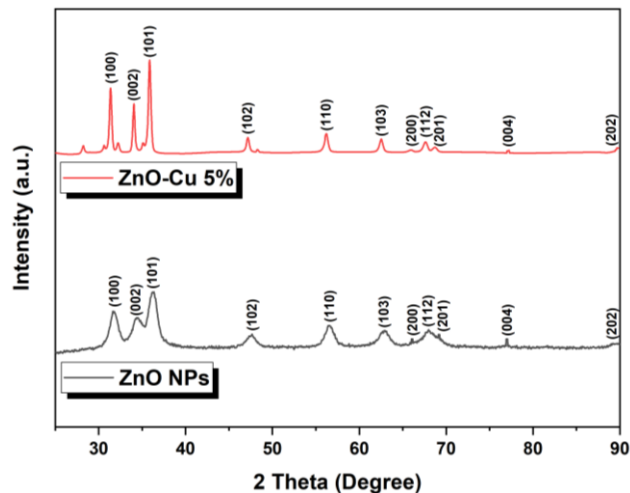
$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (2)$$

dimana, D merupakan ukuran kristalit (nm), K faktor bentuk, λ panjang gelombang sinar-X, β lebar puncak pada setengah tinggi (dalam radian), dan θ sudut Bragg.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Analisa Data X-Ray Diffraction (XRD)

Hasil analisis XRD pada ZnO-NPs dan nanopartikel ZnO-Cu 5% menunjukkan pola difraksi khas yang mencerminkan perubahan struktur kristal.



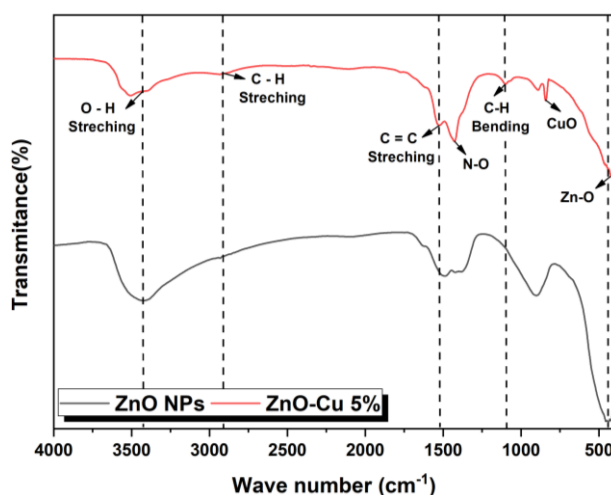
Gambar 1. Pola difraksi ZnO-NPs dan ZnO-Cu 5%

Pada **Gambar 2**, menunjukkan pola difraksi sinar-X (XRD) yang ditunjukkan pada gambar di atas membandingkan nanopartikel ZnO (ZnO NPs) dan ZnO-Cu 5%. Kedua sampel menunjukkan puncak-puncak yang jelas yang sesuai dengan struktur kristal wurtzite khas ZnO, yang tercatat pada JCPDS No. 36-1451. Pada ZnO NPs (ditunjukkan dengan warna hitam), puncak XRD terlihat pada $2\theta = 31,78^\circ$ (100), $34,46^\circ$ (002), $36,25^\circ$ (101), $47,60^\circ$ (102), $56,59^\circ$ (110), $62,90^\circ$ (103), $66,44^\circ$ (200), $68,02^\circ$ (112), $69,06^\circ$ (201), $77,17^\circ$ (004), dan $89,59^\circ$ (202), yang semuanya merupakan karakteristik dari struktur wurtzite ZnO (Singh et al., 2023). Puncak-puncak ini menunjukkan bahwa nanopartikel ZnO terbentuk dengan struktur kristalin yang baik dalam fase wurtzite.

Pada ZnO-Cu 5% (ditunjukkan dengan warna merah), pola XRD menunjukkan puncak-puncak serupa, meskipun terdapat sedikit pergeseran pada nilai 2θ , khususnya pada puncak (100) dan (002). Pergeseran ini mengindikasikan adanya pemasukan tembaga (Cu) dalam struktur ZnO, yang menyebabkan distorsi kisi dan ekspansi jarak antar bidang karena perbedaan jari-jari ion Zn^{2+} dan Cu^{2+} (Naseem & Durrani, 2021). Hal ini mengindikasikan bahwa doping Cu dapat mempengaruhi struktur kristal ZnO. Kedua sampel menunjukkan puncak-puncak yang jelas yang terkait dengan fase wurtzite, yang mengonfirmasi bahwa material tersebut terformasi sebagai kristalin ZnO. Namun, keberadaan Cu dalam sampel ZnO-Cu menyebabkan perubahan pada intensitas dan posisi puncak, yang menunjukkan bahwa doping Cu mempengaruhi proses kristalisasi dan sifat struktural nanopartikel ZnO.

Pergeseran puncak XRD pada sampel ZnO-Cu 5% mengindikasikan interaksi antara atom tembaga dengan matriks ZnO. Penambahan tembaga ke dalam matriks ZnO kemungkinan besar menyebabkan defek struktural, yang dapat meningkatkan aktivitas dan stabilitas material tersebut. Doping Cu berperan dalam mengubah jarak antar lapisan kristal, yang dipengaruhi oleh perbedaan ukuran ion Cu^{2+} dan Zn^{2+} . Ion Cu^{2+} yang lebih besar dibandingkan dengan ion Zn^{2+} menyebabkan distorsi pada kisi kristal ZnO, yang tercermin dalam perubahan posisi puncak XRD. Perubahan intensitas puncak yang terlihat pada sampel ZnO-Cu juga mengindikasikan bahwa adanya Cu dapat memodifikasi struktur kristal dan distribusi kekuatan ikatan dalam nanopartikel ZnO, yang dapat mempengaruhi sifat optik dan fotokatalitik material tersebut (Wang et al., 2023).

B. Pembahasan Analisa Data *Fourier Transform Infrared (FTIR)*



Gambar 1. Spektrum FTIR nanopartikel ZnO-NPs dan ZnO-Cu 5%

Pada **Gambar 3** menunjukkan bahwa spektrum FTIR memperlihatkan hasil analisis untuk nanopartikel ZnO dan ZnO-Cu 5%. Puncak pada sekitar 3430 cm^{-1} pada kedua sampel menunjukkan adanya getaran peregangan O-H, yang mengindikasikan keberadaan gugus hidroksil (OH) pada nanopartikel, menunjukkan bahwa nanopartikel ZnO dan ZnO-Cu terpapar kelembapan atau terdapat gugus OH yang mungkin berasal dari air adsorpsi atau kelompok hidroksil di permukaan nanopartikel (El-Naggar et al., 2022). Puncak di sekitar 2663 cm^{-1} pada sampel ZnO-Cu 5% menunjukkan getaran peregangan C-H, yang menandakan adanya ikatan C-H dalam senyawa organik atau ligan yang teradsorpsi pada permukaan nanopartikel (Rajendran et al., 2021). Hal ini menunjukkan bahwa permukaan nanopartikel ZnO-Cu berinteraksi dengan molekul organik. Selain itu, puncak pada sekitar 1547 cm^{-1} menunjukkan getaran peregangan C=C, yang mengindikasikan adanya ikatan rangkap dalam senyawa organik, berhubungan dengan ligan organik pada permukaan nanopartikel. Puncak pada 1084 cm^{-1} mengindikasikan pembengkokan C-H, yang menunjukkan adanya senyawa organik yang berinteraksi dengan nanopartikel ZnO-Cu dan berperan dalam stabilisasi nanopartikel (Khan et al., 2020). Puncak pada sekitar 844 cm^{-1} menunjukkan pembentukan CuO, yang menandakan bahwa doping Cu pada ZnO berhasil membentuk CuO dalam struktur nanopartikel, memengaruhi sifat optik dan struktur kristal nanopartikel tersebut (Zhang et al., 2022). Terakhir, puncak pada 441 cm^{-1} menunjukkan getaran peregangan Zn-O, yang merupakan karakteristik dari ikatan Zn-O dalam struktur ZnO, menegaskan bahwa struktur dasar nanopartikel ZnO tetap terjaga meskipun ada doping Cu (Kumar et al., 2021). Secara keseluruhan, analisis FTIR menunjukkan bahwa doping Cu pada ZnO menghasilkan perubahan dalam spektrum, dengan penambahan puncak-puncak terkait CuO, serta mempengaruhi karakteristik gugus fungsi permukaan nanopartikel.

Selain itu, analisis FTIR juga menunjukkan bahwa adanya perubahan yang signifikan pada spektrum nanopartikel ZnO-Cu dibandingkan dengan ZnO murni, yang menggambarkan adanya interaksi antara Cu dan ZnO selama proses doping. Puncak pada 844 cm^{-1} yang mengindikasikan pembentukan CuO memperlihatkan bahwa tembaga berhasil masuk ke dalam struktur ZnO, yang menyebabkan pembentukan fase CuO di permukaan nanopartikel. Pembentukan CuO ini dapat mempengaruhi sifat fotokatalitik dan stabilitas nanopartikel ZnO-Cu. Perubahan pada posisi dan intensitas puncak juga mengindikasikan bahwa doping Cu dapat mempengaruhi konsentrasi dan distribusi gugus fungsional pada permukaan nanopartikel, yang berpotensi meningkatkan sifat reaktif permukaan dan memperbaiki proses pemisahan pasangan pembawa muatan dalam aplikasi fotokatalitik (Ahmed et al., 2023; Addi et al., 2022).

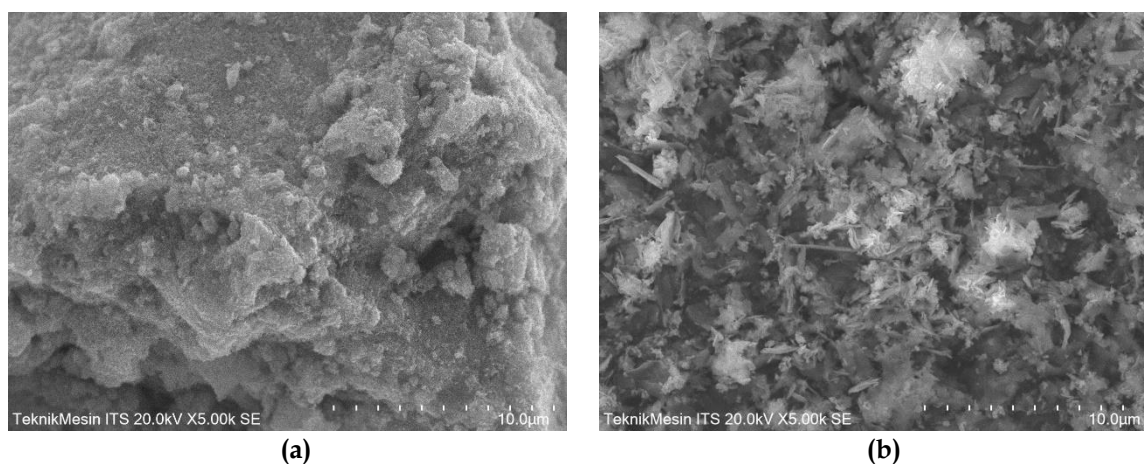
C. Analisa Data *Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-ray (SEM)*

Analisis morfologi permukaan dari material ZnO dan ZnO-Cu 5% berdasarkan citra SEM pada **Gambar 4**. menunjukkan adanya perubahan struktur yang signifikan akibat proses doping. **Gambar 4.(a)** yang

merepresentasikan ZnO murni memperlihatkan partikel dengan morfologi tidak beraturan dan cenderung membentuk agregat yang padat. Permukaan material tampak kasar dan menunjukkan fenomena aglomerasi yang umum terjadi pada nanopartikel oksida logam tanpa penstabil eksternal. Ukuran partikel yang diperoleh dari hasil pengolahan data mencapai 31,42 nm, mengindikasikan bahwa meskipun berada pada skala nano, pertumbuhan kristal belum optimal dalam hal dispersi dan homogenitas.

Sebaliknya, pada **Gambar 4.(b)** yaitu ZnO-Cu 5%, morfologi partikel mengalami perubahan yang cukup signifikan. Partikel terlihat lebih terdispersi dan tersebar merata, dengan struktur yang lebih halus, tidak saling menggumpal, serta memperlihatkan porositas permukaan yang lebih tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa keberadaan ion Cu^{2+} dalam struktur ZnO berperan penting dalam menghambat pertumbuhan butiran kristal secara berlebih dan mengurangi gaya antarmolekul antar partikel ZnO. Ukuran partikel yang lebih kecil, yaitu 17,33 nm, menunjukkan bahwa ion Cu mampu bertindak sebagai inhibitor kristalisasi, sejalan dengan temuan Kumar et al. (2021) dan Ahmed et al. (2023) yang melaporkan bahwa doping logam transisi seperti Cu dapat menyebabkan penurunan ukuran kristalit dan memperbaiki sifat permukaan ZnO.

Doping Cu pada ZnO juga diketahui dapat menyebabkan distorsi kisi karena perbedaan jari-jari ionik Cu^{2+} (0,73 Å) dan Zn^{2+} (0,74 Å), yang memengaruhi pertumbuhan kristal secara anisotropik. Dengan demikian, perubahan morfologi ini berimplikasi langsung terhadap peningkatan luas permukaan spesifik dan jumlah situs aktif katalitik, dua parameter kunci dalam aplikasi fotokatalitik maupun adsorpsi polutan organik. Partikel dengan morfologi yang lebih terbuka dan berpori seperti pada ZnO-Cu 5% akan mendukung peningkatan efisiensi degradasi fotokatalitik melalui peningkatan aksesibilitas substrat terhadap permukaan aktif material.



Gambar 2. Karakterisasi SEM-EDX material (a) ZnO NPs dan (b) ZnO-Cu 5%

IV.PENUTUP

A. Simpulan

Berdasarkan hasil sintesis dan karakterisasi yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa metode green synthesis dengan memanfaatkan ekstrak kulit jeruk manis berhasil menghasilkan nanopartikel ZnO-Cu yang terstruktur baik dan menunjukkan sifat material yang diinginkan. Analisis XRD menunjukkan bahwa struktur kristal tetap berada pada fase wurtzite meskipun telah didoping dengan Cu, dengan indikasi distorsi kisi akibat perbedaan jari-jari ion. Hasil FTIR memperlihatkan keberadaan gugus fungsional penting yang mendukung keberhasilan sintesis dan pembentukan fase CuO. Morfologi hasil SEM memperlihatkan bahwa doping Cu menurunkan ukuran partikel serta meningkatkan dispersi dan luas permukaan, yang merupakan faktor penting dalam meningkatkan efisiensi fotokatalitik. Dengan demikian, ZnO-Cu hasil sintesis menunjukkan potensi sebagai material fotokatalis ramah lingkungan dalam degradasi polutan organik seperti zat warna sintesis.

B. Saran

Penelitian ini menyarankan agar pada studi lanjutan dilakukan pengujian aktivitas fotokatalitik secara langsung, khususnya terhadap polutan organik spesifik seperti Malachite Green atau Methylene Blue, guna mengukur efisiensi degradasi nyata. Selain itu, diperlukan studi lanjutan terhadap kestabilan jangka panjang dan daur ulang material ZnO-Cu.

DAFTAR PUSTAKA

- Addi, A., Belasri, A., Azizi, A., & El Hajjaji, S. (2022). Green synthesis of ZnO nanoparticles using citrus extract: Characterization and application. *Applied Sciences*, 12(1), 29. <https://doi.org/10.3390/app12010029>
- Ahmed, F., et al. (2023). Synergistic antibacterial activity of Cu-doped ZnO nanoparticles: Role of ion release and ROS generation. *Materials Science and Engineering: C*, 144, 113725. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2022.113725>
- El-Naggar, M. E., et al. (2022). Aloe vera-mediated synthesis of ZnO nanoparticles for enhanced antibacterial and photocatalytic activities. *Materials Chemistry and Physics*, 278, 125641. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.125641>
- Khan, S. A., et al. (2020). Neem leaf extract as a green agent for ZnO nanoparticle synthesis: Characterization and antibacterial evaluation. *Journal of Molecular Structure*, 1220, 128649. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2020.128649>
- Kumar, S., et al. (2021). Bandgap engineering and enhanced photocatalytic activity of Cu-doped ZnO nanoparticles. *Journal of Alloys and Compounds*, 876, 160123. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.160123>
- Naseem, T., & Durrani, T. (2021). The role of phytochemicals in the green synthesis of nanoparticles. *Arabian Journal of Chemistry*, 14(5), 103199. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103199>
- Rajendran, S. P., et al. (2021). Valorization of citrus peel waste for green synthesis of ZnO nanoparticles: A sustainable approach. *Journal of Cleaner Production*, 320, 128649. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128649>
- Singh, J., Kaur, G., Kumar, A., & Rawat, M. (2023). Orange peel extract-mediated synthesis of ZnO nanoparticles for photocatalytic degradation of dyes. *Journal of Cleaner Production*, 405, 136859. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136859>
- Wang, L., Liu, Y., Zhang, Y., & Lin, Y. (2023). Natural capping agents in nanoparticle synthesis: Mechanisms and applications. *Nanoscale Advances*, 5(2), 312–325. <https://doi.org/10.1039/D2NA00623E>
- Zhang, Y., et al. (2022). Visible-light-driven photocatalytic degradation of organic pollutants by Cu-doped ZnO nanorods. *Applied Surface Science*, 589, 152943. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.152943>