

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Krisis lingkungan yang terjadi secara global saat ini sebagian besar dipicu oleh meningkatnya aktivitas industri, konsumsi rumah tangga, serta penggunaan bahan kimia sintetis dalam berbagai sektor (Naidu dkk., 2021). Polusi air menjadi salah satu permasalahan utama, terutama akibat pembuangan limbah cair yang mengandung senyawa berbahaya seperti zat pewarna sintetis (Slama dkk., 2021). Beberapa pewarna sintetis yang umum digunakan antara lain *Malachite Green*, *Methylene Blue*, *Congo Red* dan *Rhodamine B*, yang lazim dipakai dalam industri tekstil, percetakan, dan farmasi, serta dikenal bersifat toksik dan sulit terurai secara alami (Haleem dkk., 2024). Di antara berbagai jenis pewarna tersebut, *methylene blue* (metilen biru) merupakan salah satu pewarna anorganik yang paling umum digunakan. Pewarna ini dikenal sangat stabil di lingkungan, sulit terurai secara alami, serta memiliki tingkat toksisitas yang tinggi (Oladoye dkk., 2022).

Metilen biru dapat menyebabkan gangguan pernapasan, gangguan perut, kebutaan, iritasi kulit, serta nekrosis jaringan jika terakumulasi dalam tubuh manusia atau makhluk hidup lainnya. Oleh karena itu diperlukan pendekatan inovatif dan ramah lingkungan untuk mendetoksifikasi atau mendekomposisi limbah pewarna ini (I. Khan dkk., 2022). Sebelum proses pengolahan dilakukan, deteksi dan pemantauan konsentrasi metilen biru dalam larutan menjadi langkah penting untuk menilai tingkat pencemaran. Berbagai metode telah dikembangkan untuk mendeteksi zat ini. Salah satu yang paling umum digunakan adalah spektrofotometri UV-Vis, yang mengukur absorbansi metilen biru pada panjang gelombang sekitar 664 nm secara cepat dan akurat (Hulupi dkk., 2023). Selain itu, metode lain seperti spektrofotometri, voltametri, dan *High Performance Liquid Chromatography* (HPLC) juga telah diaplikasikan untuk mendeteksi metilen biru dengan sensitivitas yang lebih tinggi dalam konsentrasi rendah (Hayat dkk., 2022; X. Zhang dkk., 2021). Dari berbagai metode tersebut, spektrofotometri UV-Vis menjadi pilihan utama dalam penelitian terkait degradasi zat pewarna karena praktis, sederhana, ekonomis dan cukup sensitif (Hulupi dkk., 2023).

Setelah zat pewarna berhasil terdeteksi, tahap penanganan menjadi sangat penting untuk dilakukan. Salah satu pendekatan yang menjanjikan dalam hal ini adalah teknologi fotokatalisis. Proses ini memanfaatkan cahaya dan bahan semikonduktor untuk mendekomposisi senyawa organik berbahaya menjadi senyawa yang tidak toksik (F. Zhang dkk., 2019). Dalam upaya meningkatkan efisiensi proses fotokatalitik, nanoteknologi hadir sebagai pendekatan inovatif yang memungkinkan rekayasa material pada skala nanometer (1–100 nm) (Cai dkk., 2020). Melalui nanoteknologi, material seperti semikonduktor dapat dibuat dalam bentuk nanopartikel yang memiliki luas permukaan tinggi dan sifat optik maupun reaktivitas yang lebih unggul dibandingkan material dengan bentuk bulk (Islam dkk., 2024). Di antara berbagai semikonduktor yang dikembangkan, *zinc oxide* (ZnO) banyak digunakan karena kestabilan kimia yang tinggi, harga yang ekonomis, serta aktivitas fotokatalitik yang baik (Dyshlyuk dkk., 2020). ZnO merupakan semikonduktor tipe-n dari golongan II–VI dengan struktur wurtzite dan *bandgap* langsung sebesar 3,37 eV, serta energi ikat eksiton tinggi sebesar 60 meV yang memungkinkan evolusi eksiton pada suhu ruang (Galdámez-Martinez dkk., 2020; Gherbi dkk., 2022).

Meski demikian, ZnO memiliki keterbatasan utama karena hanya aktif di bawah sinar UV yang mencakup sekitar 5% dari spektrum matahari, sehingga efisiensi fotokatalitiknya rendah di bawah cahaya tampak (Rauwel dkk., 2016). Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, doping logam transisi seperti besi (Fe) digunakan. Doping Fe dapat mempersempit *bandgap*, memperluas absorpsi ke spektrum cahaya tampak, serta meningkatkan efisiensi pemisahan pasangan elektron-hole yang sangat penting dalam reaksi fotokatalitik (Bousslama dkk., 2017).

Terdapat beberapa metode sintesis ZnO nanopartikel, antara lain metode hidrotermal, metode transportasi uap kimia, sintesis berbasis sistem biologis (biosintesis), hidrotermal, sol-gel, dan sebagainya (Shahat dkk., 2023; Soleimani dkk., 2018; Zhou dkk., 2023). Diantara metode-metode tersebut, metode biosintesis digunakan karena menggunakan pendekatan *bottom-up* yang sederhana, tidak memerlukan bahan kimia tambahan, ramah lingkungan, memiliki tingkat toksisitas rendah, biaya yang ekonomis, dan memanfaatkan senyawa fitokimia alami dalam

ekstrak tumbuhan untuk mereduksi ion logam secara biologis (Sugihartono dkk., 2024). Beberapa metode biosintesis menggunakan ekstrak tumbuhan melibatkan pemanfaatan berbagai bagian tanaman, seperti daun, bunga, batang, dan buah (Bao dkk., 2021). Tanaman yang digunakan dalam biosintesis nanopartikel antara lain Teh Hijau (*Camellia sinensis*) (Aboulthana dkk., 2024), Lidah Buaya (*Aloe vera*) (Flieger dkk., 2021), dan Ceplukan (*Physalis peruviana*) (Sarvalkar dkk., 2024). Salah satu tanaman yang juga banyak digunakan dalam biosintesis adalah *Moringa oleifera*, terutama ekstrak daunnya, yang kaya akan senyawa bioaktif seperti flavonoid, alkaloid, vitamin, karotenoid, polifenol, asam fenolik, dan glukosinolat yang dapat mendukung proses sintesis nanopartikel dengan sifat-sifat biologis yang unggul dan berperan penting dalam proses reduksi nanopartikel selama biosintesis (Harun dkk., 2020; M. A. Hassan dkk., 2021). Flavonoid mengandung gugus hidroksil seperti -OH yang dapat mereduksi ion logam menjadi nanopartikel (Naseer dkk., 2020). Kandungan flavonoid yang melimpah pada daun kelor menjadikannya bahan yang potensial untuk digunakan dalam proses biosintesis nanopartikel ZnO (Rhamdiyah & Kartika Maharani, 2022).

Berbagai pendekatan biosintesis nanopartikel ZnO telah dilakukan oleh peneliti, salah satunya adalah penelitian Vera dkk. (2023) menggunakan ekstrak daun dari empat spesies tanaman: *Aristotelia chilensis* (maqui), *Eucalyptus globulus* (kayu putih), *Ceratonia siliqua* (karub), dan *Quillaja saponaria* (kulit sabun). Karakterisasi menunjukkan bahwa nanopartikel yang dihasilkan memiliki struktur kristal wurtzite yang khas dari ZnO, dengan ukuran partikel berkisar antara 18–44 nm, tergantung pada aktivitas antioksidan ekstrak yang digunakan. Aktivitas antioksidan nanopartikel ZnO yang dihasilkan juga terbukti signifikan, mengindikasikan bahwa ekstrak tanaman berperan tidak hanya sebagai agen reduksi dan stabilisasi, tetapi juga dalam meningkatkan sifat biologis nanopartikel.

Sementara itu, Ngom dkk. (2019) mengeksplorasi biosintesis nanopartikel ZnO menggunakan ekstrak dari berbagai bagian tanaman *Moringa oleifera*, yaitu bunga, biji, dan daun, berfungsi sebagai agen pengikat yang efektif. Hasil analisis menunjukkan bahwa ukuran kristalit rata-rata ZnO-NPs yang disintesis dari bunga, biji, dan daun masing-masing adalah 13,2 nm, 13,9 nm, dan 10,8 nm, dengan nilai energi celah pita yang diperoleh melalui metode Tauc adalah 3,12 eV, 3,18 eV, dan

3,25 eV. Penelitian ini menyoroti perbedaan sifat struktural dan optik dari nanopartikel yang dihasilkan, serta potensi aplikasi mereka dalam nanoteknologi.

Penambahan dopan logam transisi seperti Fe ke dalam struktur ZnO juga telah diteliti dalam upaya meningkatkan performa material tersebut. Bawazeer dkk. (2021) mensintesis ZnO:Fe menggunakan metode auto-combustion dengan prekursor nitrat dan asam sitrat sebagai bahan bakar. Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa struktur kristal yang terbentuk adalah wurtzite, dengan ukuran partikel yang menurun dari 23 nm menjadi 9 nm seiring meningkatnya kadar doping Fe hingga 7,5 wt%. Selain itu, energi celah pita juga mengalami penurunan dari 3,287 eV menjadi 3,212 eV, yang berkorelasi dengan peningkatan performa fotokatalitik. Hal ini mengindikasikan bahwa dopan Fe dapat meningkatkan struktur dan sifat optik ZnO, serta menjadikannya lebih efisien untuk aplikasi lingkungan seperti pengolahan air.

Pada penelitian Azzahra dkk. (2024) dilakukan biosintesis nanopartikel ZnO menggunakan ekstrak daun kelor (*Moringa oleifera*) melalui teknik presipitasi, yaitu seng nitrat tetrahidrat dilarutkan dalam ekstrak pada pH 9 dan suhu 60°C. Setelah proses pengendapan, endapan yang terbentuk dikalsinasi pada suhu 400°C selama 2 jam untuk menghasilkan serbuk nanopartikel ZnO. Karakterisasi menggunakan difraksi sinar-X mengungkapkan bahwa nanopartikel memiliki struktur polikristal heksagonal wurtzite dengan parameter kisi $a = 3.253 \text{ \AA}$ dan $c = 5.210 \text{ \AA}$, serta rata-rata ukuran kristalit sebesar 22.524 nm, menunjukkan bahwa ekstrak daun kelor efektif sebagai agen bio-reduksi dan penstabil dalam sintesis nanopartikel tersebut.

Penelitian Tiawati (2023) mengkaji pengaruh doping Fe pada nanopartikel ZnO dengan variasi konsentrasi $x = 0, 0.06, 0.10, \text{ dan } 0.12$ terhadap sifat struktural dan optiknya. Sampel nanopartikel $\text{Zn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}$ disintesis melalui metode kopresipitasi dengan prekursor seng nitrat dan besi nitrat. Karakterisasi menggunakan XRD menunjukkan bahwa nanopartikel memiliki struktur kristal heksagonal wurtzite dengan ukuran kristal yang semakin membesar seiring meningkatnya jumlah doping Fe. Pengujian dengan UV-Vis menunjukkan bahwa doping Fe menurunkan *bandgap*, yang menyatakan bahwa doping ini mampu memodifikasi sifat optik dari ZnO.

Penelitian sebelumnya telah menunjukkan potensi biosintesis nanopartikel ZnO menggunakan ekstrak daun *Moringa oleifera* sebagai fotokatalis. Untuk meningkatkan kinerja fotokatalitik ZnO, dilakukan modifikasi dengan cara doping logam transisi, seperti besi (Fe). Doping Fe pada ZnO terbukti dapat menurunkan energi *bandgap*, memperluas absorpsi ke spektrum cahaya tampak, serta menghambat rekombinasi pasangan elektron-hole, sehingga meningkatkan efisiensi degradasi polutan (Bawazeer dkk., 2021). Selain itu, ion Fe^{3+} dapat bertindak sebagai penangkap elektron (*electron trap*), yang membantu meningkatkan generasi radikal hidroksil dan memperkuat reaktivitas fotokatalis (Naik dkk., 2023).

Dalam penelitian ini, biosintesis nanopartikel ZnO terdoping Fe akan dilakukan dengan memanfaatkan ekstrak daun *Moringa oleifera* sebagai agen pereduksi dan penstabil. Proses sintesis akan dilakukan melalui metode *green synthesis* yang ramah lingkungan. Karakterisasi nanopartikel yang dihasilkan akan dilakukan menggunakan beberapa teknik, antara lain X-Ray Diffraction (XRD) untuk mengidentifikasi struktur kristal dan ukuran partikel, *Scanning Electron Microscopy* (SEM) untuk mempelajari morfologi partikel, *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) untuk identifikasi senyawa bioaktif dan *DH mini* untuk mengetahui sifat reflektansi. Aktivitas fotokatalitik nanopartikel yang dihasilkan akan dievaluasi menggunakan *UV-Vis Spectrophotometry* untuk mengamati aktivitas fotokatalitik terhadap degradasi metilen biru. Pendekatan biosintesis ini diharapkan dapat menghasilkan nanopartikel ZnO dengan sifat optik dan fotokatalitik yang lebih baik, serta menjadi alternatif yang ramah lingkungan dibandingkan metode sintesis nanopartikel konvensional. Hasil penelitian ini dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan nanomaterial hijau berbasis tumbuhan yang efektif untuk aplikasi lingkungan, khususnya dalam pengolahan limbah pewarna.

B. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka perumusan masalah yang perlu dikaji dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana biosintesis nanopartikel ZnO dengan ekstrak daun kelor?

2. Bagaimana pengaruh doping Fe terhadap struktur kristal, ukuran partikel, gugus fungsi dan morfologi nanopartikel ZnO yang dihasilkan?
3. Bagaimana kemampuan fotokatalitik ZnO:Fe terhadap metilen biru dapat dianalisis?

C. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mensintesis nanopartikel ZnO menggunakan metode biosintesis dengan ekstrak daun kelor.
2. Menganalisis pengaruh doping Fe terhadap struktur kristal, ukuran partikel, gugus fungsi dan morfologi nanopartikel ZnO.
3. Mempelajari kemampuan fotokatalitik ZnO:Fe menggunakan uji degradasi terhadap metilen biru.

D. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata dalam pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang nanoteknologi dan fotokatalisis. Dengan menggunakan ekstrak daun kelor sebagai agen pereduksi dalam proses biosintesis, penelitian ini menawarkan alternatif sintesis nanopartikel ZnO yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan dibandingkan metode sintesis kimia konvensional. Selain itu, studi ini juga mengeksplorasi pengaruh doping logam transisi Fe terhadap struktur kristal, ukuran partikel, dan morfologi nanopartikel ZnO, yang berpotensi meningkatkan efisiensi fotokatalitiknya. Hasil evaluasi aktivitas fotokatalitik menggunakan zat pewarna metilen biru diharapkan dapat menjadi landasan untuk pengembangan teknologi pengolahan limbah yang lebih efektif dan ekonomis. Temuan dari penelitian ini juga dapat menjadi referensi bagi penelitian lanjutan, baik dalam pengembangan material fotokatalis berbasis tanaman lokal maupun dalam aplikasi praktis di bidang lingkungan.