

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Industri tekstil dan pewarnaan menghasilkan limbah dengan jumlah besar yang mengandung berbagai macam kontaminan, baik kontaminan yang mudah terurai maupun sulit terurai secara alami (Pandey dkk., 2024). Di antara banyaknya jenis kontaminan dalam limbah tekstil, pewarna tekstil sintetis cukup menimbulkan kekhawatiran karena zat warna yang menempel pada kain jauh lebih kecil dibandingkan zat warna yang lepas dan mengalir ke sistem pembuangan limbah. Setidaknya, sebanyak 7×10^5 ton limbah pewarna sintetis dikeluarkan oleh industri tekstil di dunia tiap tahun (Sghaier dkk., 2019). Akumulasi pewarna sintetis yang tinggi tanpa upaya pengolahan lebih lanjut dapat memicu potensi pencemaran ekosistem akuatik dan menurunkan kualitas lingkungan.

Malachite green tergolong sebagai salah satu jenis pewarna trifenilmetana sintetis yang umum digunakan dalam industri tekstil. Pewarna ini umum digunakan untuk memberi warna pada material kulit, rami, katun, kertas, sutra, wol, serta pewarna aditif pada makanan. Tidak hanya itu, *malachite green* juga dimanfaatkan dalam akuakultur sebagai antiseptik dan fungisida, serta antelmintik dan disinfektan. *Malachite green* berupa padatan kristalin, pewarna trifenilmetana berwarna hijau cerah. Senyawa ini memiliki berbagai bentuk, termasuk garam klorida atau oksalat (bentuk kromatik), campuran garam asetat dan hidroklorida, bentuk tereduksi (*leuco*), serta karbinol atau *pseudobase* (J. Sharma dkk., 2023). Sebagai pewarna sintetis, *malachite green* didesain memiliki ketahanan yang baik

sehingga cukup sukar untuk didegradasi secara alami (Groeneveld dkk., 2023). Kontaminasi *malachite green* di perairan berpotensi mengancam ekosistem akuatik karena dapat menghalangi penetrasi cahaya ke dalam badan air. Hal ini menghambat proses fotosintesis yang berakibat pada penurunan kadar oksigen yang diperlukan oleh biota air (Al-Tohamy dkk., 2022). Selain berbahaya pada ekosistem akuatik, *malachite green* juga bersifat toksik, karsinogenik, dan mutagenik sehingga mengancam kesehatan manusia apabila mencemari sumber air minum dan rantai makanan (Al-Tohamy dkk., 2022).

Advanced oxidation process (AOP) merupakan metode yang efektif untuk mengurangi konsentrasi tinggi pewarna azo, trifenilmetana, dan antrakuinon dalam limbah cair. AOP memanfaatkan listrik, radiasi cahaya, atau katalis untuk mengaktifkan oksidator yang dapat menghasilkan radikal bebas aktif dengan kemampuan oksidasi yang sangat tinggi. Reaksi oksidasi yang terjadi akan mendegradasi molekul zat warna melalui serangan radikal bebas (Song dkk., 2022). Salah satu metode AOP yang diminati adalah fotokatalisis. Metode fotokatalisis memanfaatkan material katalis dan radiasi foton seperti gelombang ultraviolet (UV). Meskipun demikian, terdapat sejumlah kekurangan AOP yang menjadi pertimbangan aplikasinya, antara lain laju rekombinasi yang tinggi serta kinerja optimal yang terbatas pada radiasi gelombang UV (Heryanto dan Tahir, 2025).

Fotoelektrokatalisis menggabungkan energi foton dan listrik untuk menghasilkan spesies reaktif yang dapat mendegradasi *malachite green* melalui proses oksidasi dan pemecahan struktur molekulnya. Fotoelektrokatalisis berlangsung melalui penerapan potensial bias eksternal pada lapisan semikonduktor

(fotokatalis) yang dilekatkan pada substrat konduktif (anoda). Penerapan potensial mampu menekan rekombinasi pasangan elektron (e^- di pita konduksi) dan *hole* (h^+ di pita valensi) (Y. Liu dkk., 2025a). Kinerja fotoelektrokatalisis dapat dipengaruhi oleh sejumlah faktor, seperti intensitas radiasi, potensial aplikasi, dan sifat material semikonduktor yang digunakan. Arus listrik yang dialirkan pada material anoda akan menurunkan laju rekombinasi sehingga proses degradasi polutan dapat berlangsung lebih optimal (Y. Liu dkk., 2025b).

Logam oksida, seperti ZnO, cukup populer sebagai semikonduktor karena aktivitas fotokatalitiknya. ZnO memiliki celah pita yang lebar (3,3 eV) serta pita konduksi dengan kemampuan mobilitas elektron yang tinggi. Karena energi radiasi ultraviolet sama dengan atau lebih besar dari celah pita (*band gap*) ZnO, ketika permukaan fotokatalis ini dipapari radiasi ultraviolet sebagai sumber energi, akan menyebabkan eksitasi elektron dari pita valensi dan berpindah ke pita konduksi. Kondisi ini menciptakan *hole* (h^+) di pita valensi. *Hole* (h^+) yang terbentuk pada permukaan katalis ini mampu mengoksidasi molekul air dan ion hidroksida (OH^-) yang teradsorpsi, serta menghasilkan $\bullet OH$. Pasangan elektron-*hole* yang dihasilkan juga dapat melakukan reaksi transfer elektron dengan spesies lain dalam larutan (Ma dkk., 2025). Penelitian sebelumnya membuktikan aktivitas fotokatalitik ZnO dapat dimanfaatkan sebagai fotokatalis untuk dekolourisasi zat warna *methylene blue* dengan persentase 94,26% dalam waktu 180 menit (Chaudhari dkk., 2025). Penelitian lainnya juga telah membuktikan kemampuan fotokatalitik ZnO untuk dekolourisasi zat warna *methyl orange* dengan persentase 90% (Haritha dkk., 2025).

Celah pita yang lebar pada ZnO mengakibatkan kinerja maksimalnya cukup terbatas pada absorpsi spektrum UV. Hal ini menyebabkan kebutuhan energi yang cukup besar untuk aplikasi sehingga material ZnO perlu didoping untuk menurunkan lebar celah pita dan meningkatkan absorpsi cahaya di spektrum tampak. Salah satu senyawa yang dapat digunakan sebagai doping ialah CuO (Kalanoor dkk., 2021). Tembaga (II) oksida (CuO) termasuk dalam semikonduktor tipe p yang memiliki aktivitas fotokatalitik mumpuni pada spektrum tampak karena celah pita yang sempit (1.2 – 1.79 eV). Material ini juga memiliki sejumlah keunggulan, antara lain mudah disintesis, kestabilan kimia baik, tidak beracun, serta memiliki sifat termal dan elektrik yang bagus (Hardiansyah dkk., 2025). Penelitian sebelumnya telah membuktikan kombinasi CuO-ZnO untuk aplikasi fotokatalisis *malachite green* dengan persentase degradasi mencapai 90,7% pada penyinaran menggunakan cahaya tampak (Hardiansyah dkk., 2025).

Grafit merupakan material yang dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan, salah satunya adalah sebagai elektroda dan substrat untuk pembuatan film tipis. Grafit memiliki kombinasi sifat-sifat yang menguntungkan, seperti konduktivitas listrik yang tinggi serta ketahanan kimia dan termal yang baik. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa substrat berbasis karbon seperti grafit mampu memberikan performa yang lebih unggul dibandingkan substrat konvensional seperti FTO (*Fluorine-doped Tin Oxide*) atau logam pelat. Keunggulan tersebut berkaitan dengan beberapa aspek, antara lain pembentukan kontak ohmic yang efisien, pengumpulan muatan yang optimal, serta potensi daur ulang substrat untuk dimanfaatkan kembali. Plat grafit juga dapat meningkatkan

transfer elektron dan hidrofilitas permukaan, sekaligus mendukung pelapisan fotokatalis logam oksida (Rahmawati dkk., 2010; Xu dkk., 2023).

I.2 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian yang dilakukan adalah:

1. Memperoleh anoda CuO-ZnO/Grafit menggunakan metode sol-gel dan teknik *dip coating* serta melakukan karakterisasi.
2. Mengetahui efektivitas CuO-ZnO/Grafit untuk dekolonisasi fotoelektrokatalitik zat warna *malachite green*.