

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Perkembangan industri tekstil dalam beberapa tahun terakhir mengalami peningkatan yang signifikan terhadap pertumbuhan ekonomi. Namun perkembangan industri ini menimbulkan permasalahan lingkungan yang serius, khususnya pencemaran air. Limbah cair industri tekstil umumnya mengandung zat warna sintetis yang memiliki harga relatif murah, mudah diperoleh, warna yang kuat, dan stabil terhadap pengaruh cahaya dan suhu. Namun, kestabilan tersebut menyebabkan zat warna sulit terdegradasi secara alami. Pembuangan limbah zat warna tanpa pengolahan yang memadai ke badan perairan dapat menurunkan kualitas air, mengganggu keseimbangan ekosistem perairan, dan mengurangi ketersediaan air bersih bagi masyarakat (Nwaiwu dkk., 2024).

Salah satu zat warna sintetis yang banyak digunakan dalam industri tekstil adalah *Congo Red*. Pewarna ini termasuk ke dalam golongan zat warna azo anionik. *Congo Red* banyak dimanfaatkan karena mempunyai warna yang pekat, sulit untuk dihilangkan pada serat, dan memiliki kestabilan kimia yang tinggi. Keberadaan *Congo Red* dalam lingkungan perairan dapat menghambat penetrasi cahaya matahari, mengganggu proses fotosintesis organisme air, dan berpotensi menimbulkan dampak toksik dan karsinogenik bagi makhluk hidup (Alkhalifa dkk., 2025a). Oleh karena itu, diperlukan metode pengolahan limbah yang efektif untuk menurunkan konsentrasi *Congo Red* di lingkungan perairan.

Beberapa metode telah dikembangkan untuk mengatasi limbah zat warna, di antaranya metode adsorpsi dan lumpur aktif (*activated sludge*). Metode adsorpsi sering dianggap kurang efektif karena hanya memindahkan polutan dari fase cair ke fase padat sehingga berpotensi menimbulkan masalah lanjutan berupa akumulasi adsorbat pada adsorben. Sementara itu, metode lumpur aktif memerlukan waktu pengolahan yang relatif lama dan pengendalian kondisi operasional yang kompleks (Ernawati dkk., 2020). Keterbatasan metode-metode tersebut mendorong pengembangan teknologi alternatif yang lebih efisien, salah satunya adalah fotodegradasi berbasis material semikonduktor. Pada proses fotodegradasi, material

semikonduktor yang disinari cahaya dengan energi yang sesuai akan menghasilkan pasangan elektron–lubang yang kemudian membentuk spesies oksidator kuat, seperti radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$), yang mampu mendegradasi senyawa organik kompleks menjadi senyawa yang lebih sederhana dan ramah lingkungan (Alresheedi, 2025).

Material semikonduktor yang berpotensi digunakan sebagai fotokatalis dalam pengolahan limbah air adalah zirkonia oksida (ZrO_2). Sebagai oksida logam dengan struktur semikonduktor tipe-n, ZrO_2 memiliki stabilitas kimia dan termal yang tinggi, serta ketahanan korosi yang baik, sehingga dapat digunakan untuk berbagai aplikasi termasuk proteksi lingkungan dan degradasi polutan organik dalam limbah cair. Namun, ZrO_2 murni memiliki energi celah pita (*band gap*) yang cukup besar (4 - 5,5 eV) (Sharaf dkk., 2024a), sehingga pemanfaatannya masih terbatas pada daerah ultraviolet (UV). Selain itu, karakteristik material berbasis ZrO_2 yang diperoleh dari pasir zirkon alam dapat berbeda dibandingkan ZrO_2 berkemurnian tinggi karena masih mengandung berbagai oksida pengotor. Oleh karena itu, diperlukan upaya modifikasi material, seperti doping logam, pembentukan *heterojunction* (Chu dkk., 2022a), atau perubahan morfologi permukaan, untuk meningkatkan aktivitas fotokatalitiknya dalam proses degradasi zat warna pada limbah industri tekstil (Rani dkk., 2022).

Karakteristik ZrO_2 dipengaruhi oleh sumber bahan baku yang digunakan. ZrO_2 yang diperoleh dari ekstraksi pasir zirkon alam tidak selalu memiliki kemurnian yang sama dengan ZrO_2 sintetis komersial karena kemungkinan masih mengandung sejumlah oksida lain seperti SiO_2 , MgO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 , HfO_2 , dan CeO_2 (Subuki dkk., 2020b). Keberadaan oksida-oksida tersebut dapat mempengaruhi struktur kristal, morfologi, dan sifat elektronik material yang dihasilkan (Renuka dkk., 2017).

Salah satu pendekatan yang banyak digunakan untuk meningkatkan aktivitas fotokatalitik ZrO_2 adalah dengan doping logam transisi, salah satunya tembaga (Cu). Oksida tembaga seperti CuO dan Cu_2O merupakan semikonduktor tipe-p dengan energi celah pita yang lebih kecil dibandingkan ZrO_2 , yaitu sekitar 1,2–1,9 eV untuk CuO dan 2,0–2,2 eV untuk Cu_2O (Chu dkk., 2022b). Keberadaan

CuO atau Cu₂O berpotensi mempengaruhi sifat elektronik material dan meningkatkan penyerapan cahaya. Selain itu, kombinasi ZrO₂ dengan CuO atau Cu₂O dapat membentuk *p-n junction* yang membantu pemisahan pasangan *electron-hole* dan menurunkan laju rekombinasi muatan. *Heterojunction* CuO–Cu₂O juga telah terbukti meningkatkan generasi spesies oksidator aktif selama proses fotodegradasi (Chu dkk., 2022). Dengan demikian, material berbasis ZrO₂ terdoping Cu diharapkan memiliki aktivitas fotokatalitik yang lebih tinggi dalam mendegradasi zat warna *Congo Red* dibandingkan material tanpa doping. Selain itu, Cu merupakan logam yang relatif ramah lingkungan dan memiliki biaya yang terjangkau (Chu dkk., 2022b).

Metode sol–gel menjadi alternatif dalam penelitian ini karena mampu menghasilkan material dengan ukuran partikel yang seragam, luas permukaan yang tinggi, dan distribusi dopan Cu yang lebih homogen. Selain itu, metode ini dapat dilakukan pada kondisi suhu relatif rendah dan tidak memerlukan tekanan tinggi, sehingga lebih sederhana dan efisien dibandingkan metode hidrotermal (Alkhalifa dkk., 2025b). Oleh karena itu, sintesis material berbasis ZrO₂ terdoping Cu dari pasir zirkon diharapkan dapat menghasilkan material yang memiliki aktivitas adsorpsi dan fotokatalitik yang baik untuk degradasi zat warna *Congo Red*.

I.2 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Memperoleh dan menentukan karakterisasi material berbasis zirkonia oksida (ZrO₂) hasil ekstraksi pasir zirkon terdoping Cu menggunakan metode sol-gel.
2. Menentukan efektivitas ZrO₂ terdoping Cu dalam proses adsorpsi zat warna *Congo Red*.
3. Menentukan efektivitas ZrO₂ terdoping Cu dalam proses fotodegradasi zat warna *Congo Red*.