

BAB I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Industrialisasi dan modernisasi yang berkembang pesat saat ini menimbulkan berbagai tantangan, termasuk risiko terhadap kesehatan manusia dan meningkatnya pencemaran pada ekosistem perairan (Das & Dhar, 2020). Limbah industri umumnya mengandung senyawa organik maupun anorganik, seperti logam berat dan pewarna sintesis, yang berkontribusi besar terhadap pencemaran air (Bibi *et al.*, 2024). Salah satu logam berat yang paling sering ditemukan dalam limbah industri adalah kromium (Cr). Kromium memiliki dua bilangan oksidasi utama, yaitu Cr(VI) dan Cr(III), dengan sifat yang sangat berbeda. Cr(VI) adalah karsinogen berbahaya, sementara Cr(III) merupakan unsur esensial bagi kehidupan (Mishra *et al.*, 2023). Cr(VI) dikenal memiliki kelarutan tinggi, toksisitas yang kuat, dan kemampuan akumulasi dalam tubuh, sehingga menimbulkan risiko kesehatan jangka panjang. Oleh karena itu, mengkonversi Cr(VI) menjadi Cr(III) dianggap sebagai salah satu solusi efektif untuk mengurangi pencemaran logam berat akibat aktivitas industri dan menjadi fokus utama dalam pengembangan metode remediasi terkini (Zhou *et al.*, 2025).

Berbagai metode telah digunakan untuk mengatasi pencemaran air limbah diantaranya adsorpsi, karbon aktif, proses membran, osmosis balik (*reverse osmosis*), dekomposisi biologis, koagulasi pertukaran ion, dan *advanced oxidation processes* (AOP) seperti fotokatalitik, fotolisis, sonokimia, dan elektrokimia serta proses berbasis ozon (Gharagozlou *et al.*, 2024; Preethi *et al.*, 2024). Di antara metode tersebut, fotokatalisis telah menarik perhatian karena keunggulannya yang hemat biaya, ramah lingkungan, dan efisien dalam memecah molekul polutan menjadi senyawa tidak berbahaya tanpa menghasilkan produk samping dengan memanfaatkan energi cahaya (Alem *et al.*, 2023). Proses fotokatalisis melibatkan dua langkah utama yaitu adsorpsi polutan pada permukaan fotokatalis, diikuti oleh reaksi fotodegradasi yang dipicu oleh cahaya. Adsorpsi memainkan peran penting dalam memastikan kontak antara polutan dan situs aktif fotokatalis, yang kemudian memfasilitasi terjadinya reaksi fotokatalitik (Zhou *et al.*, 2025).

Material oksida logam seperti titanium dioksida (TiO_2), seng oksida (ZnO), dan tungsten oksida (WO_3) banyak digunakan dalam berbagai proses fotokatalitik

karena harganya relatif murah, tidak beracun, serta stabilitas kimia yang tinggi. Meskipun demikian, sebagian besar material ini memiliki celah pita yang cukup besar (>3 eV), sehingga aktivitas fotokatalitiknya berada pada spektrum UV, yang hanya menyumbang sekitar 4% dari total radiasi matahari. Kondisi ini mendorong perlunya pengembangan material fotokatalis baru yang mampu merespons cahaya tampak untuk meningkatkan efisiensi fotodegradasi dan fotoreduksi limbah cair (Alqassem *et al.*, 2024; Gharagozlou *et al.*, 2024; Preethi *et al.*, 2024). Salah satu material alternatif yang menjanjikan adalah semikonduktor spinel ferit seperti ZnFe_2O_4 , yang memiliki celah pita lebih kecil ($\sim 2,18$ eV) sehingga dapat menyerap foton dalam spektrum cahaya tampak (Kefeni *et al.*, 2017). Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa ZnFe_2O_4 efektif dalam fotokatalisis, seperti degradasi methylene blue sebesar 95,33% (Saridewi *et al.*, 2024) dan reduksi uranium (VI) sebesar 98% (P. liang Liang *et al.*, 2020). Selain itu, ZnFe_2O_4 telah dilaporkan mampu mereduksi ion logam lain seperti Cr(VI) menjadi Cr(III) pada konsentrasi tinggi (100 mg/L) di bawah cahaya tampak dengan persentase reduksi sebesar 45,2% (Huang *et al.*, 2022). Hal ini menunjukkan potensinya sebagai fotokatalis multifungsi dan menjadikannya kandidat unggul untuk pengolahan limbah yang mengandung logam berat.

Efisiensi ZnFe_2O_4 masih dipengaruhi oleh rekombinasi pasangan elektron-hole (e^-/h^+) melalui tingkat cacat, yang membatasi pemanfaatan muatan fotogenerasi secara optimal dalam reaksi katalitik. Untuk mengatasi keterbatasan ini, ZnFe_2O_4 sering dikombinasikan dengan berbagai dopan untuk meningkatkan efisiensinya sebagai fotokatalis (Nadeem *et al.*, 2024; L. T. T. Nguyen *et al.*, 2022). Pada penelitian ini, ion tanah jarang La^{3+} dipilih sebagai dopan untuk ZnFe_2O_4 . Doping La^{3+} dilaporkan mampu meningkatkan sifat struktural, dielektrik, dan magnetik ZnFe_2O_4 , sekaligus menghambat rekombinasi e^-/h^+ selama proses fotokatalisis (Khatoon *et al.*, 2023; Khatun *et al.*, 2023; Masunga *et al.*, 2024). Merujuk pada penelitian sebelumnya, konsentrasi doping La^{3+} sebesar 0,1 mol dipilih karena menghasilkan struktur yang lebih stabil serta aktivitas fotokatalitik yang optimal terhadap degradasi zat warna *Direct Red 81* (Zulhadjri *et al.*, 2025).

Di samping strategi doping ion logam La^{3+} , pendekatan lain yang juga efektif untuk meningkatkan efisiensi fotokatalis adalah penggabungan dengan adsorben

fungsional melalui mekanisme sinergis adsorpsi-fotokatalisis (Herrera-Mares *et al.*, 2025). Hidroksiapatit (HAp) dengan rumus kimia $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$, yaitu material berbasis kalsium fosfat biokompatibel dengan kemampuan adsorpsi kuat dengan diameter pori yang besar, telah banyak dimanfaatkan sebagai matriks pendukung dalam berbagai sistem fotokatalis komposit. HAp dapat diperoleh dari bahan alami seperti cangkang kerang pensi (*Corbicula moltipkiana*), yang mengandung CaO dalam jumlah tinggi (98.38%) (Das *et al.*, 2021; Rahmayeni *et al.*, 2023). Pada sistem berbasis ZnFe_2O_4 terdoping La^{3+} ($\text{ZnFe}_{1,9}\text{La}_{0,1}\text{O}_4$), keberadaan HAp berperan penting dalam meningkatkan interaksi antarmuka dan kemampuan adsorpsi ion Cr(VI) maupun Cr(III). Kehadiran HAp juga membantu mendistribusikan partikel ZFLa secara lebih homogen dan menstabilkan fotokatalis di lingkungan berair, sehingga mendukung proses transfer muatan dan memperkuat efisiensi fotoreduksi secara keseluruhan.

Dalam penelitian ini, nanokomposit $\text{HAp}/\text{ZnFe}_{1,9}\text{La}_{0,1}\text{O}_4$ disintesis menggunakan metode hidrotermal karena dapat menghasilkan material dengan kemurnian tinggi serta memungkinkan kontrol ukuran partikel, morfologi, dan sifat fisik dengan menyesuaikan parameter sintesis seperti suhu, waktu, dan dopan (Salih & Mahmood, 2023). Selain itu, pendekatan *green synthesis* dilakukan dengan penambahan ekstrak daun gambir (*Uncaria gambir* Roxb.) sebagai *capping agent* untuk mencegah aglomerasi nanopartikel dan memodifikasi sifat material. Ekstrak daun gambir kaya akan senyawa aktif seperti flavonoid dan polifenol, yang dapat meningkatkan stabilitas serta memengaruhi struktur dan morfologi material yang dihasilkan (Labanni *et al.*, 2020; Zulhadjri *et al.*, 2025).

Penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan nanokomposit $\text{HAp}/\text{ZnFe}_{1,9}\text{La}_{0,1}\text{O}_4$ yang multifungsi untuk adsorpsi dan fotokatalisis dalam fotoreduksi Cr(VI). Berdasarkan tinjauan literatur, pendekatan ini belum pernah dilaporkan sebelumnya. Kombinasi adsorpsi dan fotokatalisis dalam satu sistem menawarkan efisiensi tinggi dengan meminimalkan langkah pengolahan tambahan (Sabouri *et al.*, 2020). Nanokomposit ini diharapkan memberikan solusi inovatif untuk mitigasi polusi logam berat, dengan potensi aplikasi luas dalam pengolahan limbah industri.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana struktur kristal dan morfologi nanokomposit HAp/ZnFe_{1,9}La_{0,1}O₄ yang disintesis menggunakan metode hidrotermal dengan cangkang pensi sebagai sumber CaO dan daun gambir sebagai *capping agent*?
2. Bagaimana doping La³⁺ dan pengompositan dengan HAp memengaruhi struktur kristal, sifat magnetik, sifat optik serta aktivitas fotokatalitik HAp/ZnFe_{1,9}La_{0,1}O₄ dalam fotoreduksi Cr(VI)?
3. Apakah kombinasi HAp dengan ZnFe_{1,9}La_{0,1}O₄ dapat meningkatkan simultanitas proses adsorpsi dan fotokatalisis untuk fotoreduksi Cr(VI) di bawah pencahayaan lampu LED 24W?

1.3 Tujuan Penelitian

1. Menganalisis struktur kristal dan morfologi nanokomposit HAp/ZnFe_{1,9}La_{0,1}O₄ yang disintesis menggunakan metode hidrotermal dengan cangkang pensi sebagai sumber CaO dan daun gambir sebagai *capping agent*.
2. Mempelajari pengaruh doping La³⁺ dan pengompositan dengan HAp memengaruhi struktur kristal, sifat magnetik, sifat optik serta aktivitas fotokatalitik HAp/ZnFe_{1,9}La_{0,1}O₄ dalam fotoreduksi Cr(VI),
3. Menganalisis efektivitas kombinasi HAp dengan ZnFe_{1,9}La_{0,1}O₄ dapat meningkatkan simultanitas proses adsorpsi dan fotokatalisis untuk fotoreduksi Cr(VI) di bawah pencahayaan lampu LED 24W

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi mengenai sintesis nanokomposit HAp/ZnFe_{1,9}La_{0,1}O₄ dengan memanfaatkan cangkang pensi sebagai sumber CaO dan daun gambir sebagai *capping agent*. Selain itu, penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi dalam pengembangan material baru untuk aplikasi fotoreduksi logam berat.