

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring dengan meningkatnya pertumbuhan penduduk dan era modernisasi, permintaan akan pewarna untuk nilai keindahan terus meningkat. Berbagai sektor industri, secara masif menggunakan pewarna untuk produknya, seperti industri tekstil, kulit, kertas, dan plastik (Azanaw *et al.*, 2022; A. Kumar *et al.*, 2021; Lanzetta *et al.*, 2023). Secara global, lebih dari 3.000 kiloton limbah cair pewarna berasal dari industri yang memproduksi dan memanfaatkan pewarna (Bukola M Adesanmi *et al.*, 2022). Keberadaan limbah cair pewarna akan mudah dikenali karena visibilitas pewarna yang tinggi. Selain itu, limbah cair pewarna mampu meningkatkan kebutuhan oksigen biokimia dan kimia (Mudhoo *et al.*, 2020; Tank & Researcher, 2023), menghalangi cahaya sehingga mampu menghambat proses fotosintesis tanaman air, dan bersifat beracun yang mampu menurunkan laju pertumbuhan makhluk hidup perairan (Carney Almroth *et al.*, 2021). Oleh karena itu, limbah cair pewarna menjadi salah satu permasalahan penting yang harus ditangani.

Industri tekstil menjadi penyumbang utama limbah cair pewarna (Katheresan *et al.*, 2018). Industri tekstil memanfaatkan banyak jenis pewarna dengan mayoritas jenis pewarna azo (Hassaan & Nemr, 2017). *Eriochrome Black T* (EBT) merupakan salah satu pewarna azo yang banyak digunakan untuk proses pewarnaan atau pencelupan pada industri tekstil, percetakan, kosmetik, wol dan di laboratorium sebagai indikator pada titrasi kompleksometri untuk penentuan ion Mg^{2+} dan Ca^{2+} (El-Sayed *et al.*, 2024; Sahoo *et al.*, 2019). *Eriochrome Black T* bersifat sulit terurai dan beracun bahkan pada konsentrasi rendah karena adanya gugus azo ($-N=N-$) (Sahoo *et al.*, 2024). Selain itu, pewarna *xanthene* seperti Rhodamin B yang memiliki tiga cincin aromatik dan ion Cl^- yang bersifat reaktif banyak digunakan oleh

industri tekstil, kosmetik, dan percetakan (Laksmi *et al.*, 2018; Vithalani & Bhatt, 2023). Pewarna *Eriochrome Black T* dan Rhodamin B bersifat beracun, mutagenik dan karsinogenik (Iryani *et al.*, 2020; Kaur *et al.*, 2021; Sahoo *et al.*, 2024), serta memiliki struktur yang kompleks dan stabil yang menyebabkan sulitnya proses penguraian, sehingga menyebabkan pewarna tersebut tetap ada di perairan dalam waktu lama (C. Zhang *et al.*, 2015).

Proses penghilangan pewarna dalam limbah air dapat dilakukan melalui tiga pendekatan yakni pendekatan biologi, kimia, dan *physicochemical*. Pendekatan biologi (mikroorganisme) umumnya murah dan mudah digunakan, namun kurang efektif untuk menghilangkan pewarna azo dan membutuhkan waktu lama. Metode kimia (oksidasi, ozonisasi) cenderung membutuhkan biaya yang besar dan menghasilkan produk samping yang beracun (Katheresan *et al.*, 2018). Metode yang memiliki efektivitas & efisiensi tinggi, murah, dan mudah digunakan untuk menghilangkan pewarna adalah metode fisikokimia seperti adsorpsi dengan adsorben (Javeed Ganaie *et al.*, 2023; Katheresan *et al.*, 2018). Salah satu adsorben yang dapat digunakan untuk menghilangkan pewarna dalam limbah air adalah zeolit (Radoor *et al.*, 2021).

Zeolit adalah kristal aluminosilikat yang terdiri dari kerangka silika (SiO_4)⁻ dan alumina (AlO_4)⁻ dengan struktur pori yang unik dan luas permukaan yang besar sehingga sangat baik untuk proses adsorpsi. Zeolit sintetis memiliki kelebihan dibandingkan zeolit alami yakni memiliki kemurnian yang tinggi dan mampu menunjukkan luas permukaan dan kapasitas adsorpsi yang besar (Møller, 2020). Zeolit dapat disintesis dengan memanfaatkan limbah abu layang batubara karena kaya akan Si dan Al. Abu layang batubara memiliki kandungan Si dan Al yang besar (Abdul Aziz, Rahmi, 2025). Selain itu, diketahui bahwa pada tahun 2019 produksi CFA mencapai 8,31 juta ton dan akan terus meningkat 5% setiap tahunnya (Petrus *et al.*, 2020; Sari *et al.*, 2024). Apabila CFA dibiarkan secara berkepanjangan akan berdampak buruk bagi lingkungan dan kesehatan karena bersifat karsinogenik (Prayoga & Afla,

2023). Oleh karena itu, penggunaan limbah abu layang batubara dalam sintesis zeolit menjadi suatu alternatif sekaligus memaksimalkan potensi pemanfaatan limbah.

Terdapat beberapa metode yang dilakukan untuk sintesis zeolit seperti metode hidrotermal konvensional (Iryani *et al.*, 2020), sol gel (Nur *et al.*, 2023), dan solvothermal (Jamil *et al.*, 2016). Namun ketiga metode tersebut membutuhkan waktu sintesis yang lama, menghasilkan zeolit dengan kristalinitas rendah, dan biaya yang relatif tinggi. Metode alkali fusi-hidrotermal yang melibatkan alkali dan perlakuan fusi dalam proses sintesisnya (Ayele *et al.*, 2016; Paramitha, 2020; Ren *et al.*, 2018a). Faktor yang mempengaruhi sintesis ini adalah waktu dan suhu, rasio Si/Al dalam abu layang, dan jumlah NaOH atau jenis alkali yang digunakan (Parra-Huertas *et al.*, 2023; Ren *et al.*, 2018a).

Zeolit memiliki kelemahan yakni sulit diregenerasi dan dipisahkan dari adsorbat setelah digunakan. Akibatnya dibutuhkan alternatif lain untuk mengatasi permasalahan tersebut. Sintesis zeolit magnetik memungkinkan proses pemisahan yang lebih mudah secara magnetik, dapat digunakan kembali, dan tidak bersifat beracun (Maharana & Sen, 2021). Salah satu limbah yang mengandung senyawa besi oksida adalah terak baja (*Steel Slag*). Terak baja merupakan produk samping dari proses pembakaran dalam produksi baja yang berwujud seperti batuan (Li, Tang, *et al.*, 2025a), dan memiliki persentase oksida besi (Fe_2O_3) yang cukup besar (Li, Tang, *et al.*, 2025a; Masoudi *et al.*, 2017). Selain itu, diketahui bahwa terak baja memiliki kandungan CaO dan SiO_2 (Li, Tang, *et al.*, 2025a). Kandungan oksida besi yang besar membuat terak baja menjadi material yang potensial untuk sintesis zeolit magnetik.

Dalam beberapa tahun terakhir, penelitian mengenai pemanfaatan abu layang untuk sintesis zeolit magnetik telah banyak dilakukan, seperti untuk menghilangkan kandungan logam berat dalam air (Buzukashvili, Sommerville, Hu, *et al.*, 2024), antibiotik (Mpelane *et al.*, 2023), dan mikroplastik (Wang *et*

al., 2024). Sementara untuk penghilangan pewarna dalam air menggunakan zeolit magnetik belum banyak dilaporkan dan seringkali menggunakan zeolit tanpa modifikasi seperti penelitian yang dilaporkan oleh Radoor *et al.*, (2021). Namun, terdapat patent CN 111729641A (2020) yang telah melaporkan zeolit magnetik dari zeolit alam yang dimodifikasi dengan FeCl_3 dan FeSO_4 untuk adsorpsi limbah cair pewarna dan percetakan dan memungkinkan proses regenerasi melalui pemisahan magnetic. Selain itu, terdapat penelitian mengenai sintesis zeolit magnetik menggunakan larutan $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dan nanopartikel besi oksida sebagai sumber magnetik yang memberikan gambaran potensi pengembangan zeolit sebagai adsorben (Majid *et al.*, 2019), namun zeolit magnetik yang dihasilkan memiliki harga yang tinggi ketika dipasarkan. Oleh sebab itu, dilakukan penelitian mengenai zeolit magnetik yang disintesis dari limbah abu layang batubara dan limbah terak baja. Pendekatan ini tidak hanya menambah studi mengenai penggunaan zeolit magnetik untuk adsorpsi pewarna melainkan memaksimalkan potensi pemanfaatan limbah sebagai upaya mencapai tujuan keberlanjutan.

Pada penelitian ini, sintesis zeolit magnetik dilakukan menggunakan metode alkali fusi-hidrotermal dengan memvariasikan waktu dan suhu hidrotermal untuk memperoleh zeolit magnetik dengan hasil terbaik. Penelitian ini menyelidiki kapasitas adsorpsi dengan variasi waktu kontak dan pH pada pewarna Rhodamin B dan *Eriochrome Black T* oleh zeolit magnetik. Mekanisme adsorpsi pewarna pada zeolit magnetik dikaji melalui parameter model isoterm adsorpsi. Serta penggunaan kembali atau proses regenerasi zeolit magnetik juga dipelajari.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan, diperoleh rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana sintesis zeolit magnetik dari limbah abu layang batubara dan terak baja (*steel slag*)?

2. Bagaimana karakteristik zeolit magnetik hasil sintesis?
3. Bagaimana mekanisme adsorpsi pewarna Rhodamin B dan *Eriochrome Black T* oleh zeolit magnetik hasil sintesis?
4. Bagaimana kemampuan zeolit magnetik setelah digunakan untuk adsorpsi pewarna Rhodamin B dan *Eriochrome Black T*?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini, sebagai berikut:

1. Mensintesis zeolit magnetik dari limbah abu layang batubara dan terak baja (*steel slag*).
2. Mengkarakterisasi zeolit magnetik hasil sintesis.
3. Mengetahui mekanisme adsorpsi pewarna Rhodamin B dan *Eriochrome Black T* oleh zeolit magnetik hasil sintesis.
4. Untuk mengetahui kemampuan zeolit magnetik hasil sintesis setelah digunakan untuk adsorpsi pewarna Rhodamin B dan *Eriochrome Black T*.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Manfaat teoritis
Memodifikasi abu layang batubara dan terak baja menjadi zeolit magnetik yang dapat digunakan sebagai alternatif adsorben yang mudah diproduksi dan murah.
2. Manfaat praktis
 - a. Mendaur ulang limbah abu layang batubara sebagai produk samping pembakaran batubara dan terak baja sebagai material tambahan dalam sintesis zeolit magnetik dengan metode alkali fusi hidrotermal.

- b. Memanfaatkan limbah terak baja sebagai material tambahan dalam sintesis zeolit magnetik.
- c. Mengurangi limbah pewarna Rhodamin B dan *Eriochrome Black T* menggunakan zeolit magnetik dengan metode yang mudah dan murah.

1.5 Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup penelitian ini dibatasi pada sintesis zeolit magnetik dari limbah abu layang batubara dan terak baja menggunakan metode alkali fusi hidrotermal. Zeolit magnetik hasil sintesis dikarakterisasi menggunakan XRD, FTIR, SEM-EDS, Zeta Potensial, dan *Surface Area Analyzer* (SAA) untuk mengetahui sifat fisik dan kimianya. Zeolit magnetik dengan hasil yang optimum digunakan sebagai adsorben dalam uji adsorpsi pewarna Rhodamin B (RhB) dan *Eriochrome Black T* (EBT) dalam sistem *batch* dengan variasi waktu kontak dan pH. Mekanisme adsorpsi kedua pewarna dianalisis melalui model isotherm adsorpsi. Selain itu, proses pengambilan zeolit magnetik dari dalam larutan pewarna serta penggunaan kembali dalam beberapa siklus adsorpsi-desorpsi juga diteliti guna mengetahui kemampuan zeolit magnetik setelah digunakan.