

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pertumbuhan sektor industri di Indonesia menunjukkan peningkatan yang signifikan dalam beberapa tahun terakhir. Namun, perkembangan industri yang berlangsung secara intensif juga berpotensi menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan, khususnya dalam bentuk pencemaran (Rahayu et al., 2023). Salah satu dampak yang ditimbulkan berupa penurunan kualitas lingkungan perairan yang disebabkan oleh pencemaran logam berat (Afifudin et al., 2024).

Keberadaan logam berat yang terakumulasi dalam tubuh manusia maupun organisme lain berpotensi menimbulkan dampak fatal karena sifatnya yang toksik serta tidak mudah terdegradasi secara alami. Salah satu logam berat yang berbahaya di perairan yaitu logam kadmium (Cd) (Zharfanio, 2020). Sumber pencemaran kadmium umumnya berasal dari limbah industri, antara lain aktivitas pertambangan, industri peleburan, industri pelapisan logam, industri baterai, industri cat, dan aktivitas industri sejenis lainnya. Ion Cd^{2+} merupakan logam berat non-esensial yang sangat toksik, persisten, dan bersifat karsinogenik bagi manusia (B. Yan et al., 2022). Paparan Ion Cd^{2+} , bahkan pada konsentrasi yang relatif rendah, dapat menyebabkan terjadinya bioakumulasi dalam rantai makanan. Proses tersebut berimplikasi pada timbulnya berbagai gangguan kesehatan serius, termasuk kerusakan organ seperti paru-paru, ginjal, dan hati, peningkatan tekanan darah, serta gangguan pada sistem pencernaan (Udin et al., 2019).

Berbagai metode telah digunakan untuk menyisihkan kandungan logam berat, di antaranya metode kimia, biologis, dan fisika (Lajja et al., 2021). Proses fisika seperti filtrasi dan sedimentasi umumnya efektif untuk menghilangkan partikel tersuspensi, namun kurang optimal dalam menangani ion logam terlarut seperti Ion Cd^{2+} . Proses kimia seperti presipitasi, koagulasi, dan pertukaran ion, mampu menurunkan Ion Cd^{2+} dengan optimal, namun metode-metode tersebut dinilai sulit, mahal, dan menghasilkan lumpur beracun yang memerlukan pengolahan tambahan (Tasanif et al., 2020). Sementara itu, pendekatan melalui

proses biologis dikenal lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan, namun efektivitasnya dalam menyisihkan logam berat relatif terbatas. Hal ini disebabkan oleh sifat toksik Ion Cd^{2+} yang sangat tinggi, yang mampu mengganggu sistem enzimatik dan menghambat aktivitas metabolisme mikroba secara signifikan (Tripathi et al., 2022). Oleh karena itu, dibutuhkan metode alternatif yang lebih sederhana, ekonomis, serta efektif dalam menghilangkan Ion Cd^{2+} tanpa menimbulkan efek samping lingkungan.

Salah satu metode alternatif yang dapat digunakan adalah adsorpsi. Adsorpsi merupakan proses berpindahnya partikel polutan ke permukaan adsorben padat karena adanya gaya *van der Waals* atau adanya reaksi kimia antara adsorben dengan adsorbat (Rahman et al., 2023). Metode ini dinilai efisien, mudah dioperasikan, tidak menghasilkan produk samping berbahaya, serta mampu menghilangkan Ion Cd^{2+} secara signifikan dari air limbah. Adsorpsi bekerja berdasarkan interaksi antara gugus fungsional pada permukaan adsorben dengan Ion Cd^{2+} melalui gaya elektrostatis, pertukaran ion (Pang et al., 2022).

Efektivitas metode adsorpsi sangat bergantung pada karakteristik adsorben yang digunakan (Shan et al., 2022). Bioadsorben merupakan material penyerap yang berasal dari biomassa alami, seperti limbah pertanian, residu agroindustri, maupun bahan lignoselulosa, yang memiliki kemampuan mengikat kontaminan melalui interaksi pada permukaan adsorben. Salah satu keunggulan utama bioadsorben terletak pada proses pembuatannya yang relatif sederhana dan lebih ramah lingkungan (Ziani et al., 2026). Preparasi bioadsorben umumnya hanya melibatkan tahapan fisik seperti pencucian, pengeringan, pengecilan ukuran partikel, perlakuan termal sederhana tanpa kebutuhan bahan kimia aktivator dalam jumlah besar serta tanpa dibutuhkan proses karbonisasi pada suhu tinggi yang berpotensi meningkatkan konsumsi energi (Frescura et al., 2026). Oleh karena itu, dalam aplikasi pengolahan limbah berbasis adsorpsi, penggunaan bioadsorben lebih dipilih karena mampu memberikan efisiensi penyisihan yang baik dengan proses produksi yang lebih ramah lingkungan, hemat energi, serta memanfaatkan limbah biomassa sebagai material bernilai tambah (Dubey et al., 2026).

Salah satu material yang potensial untuk dikembangkan sebagai bioadsorben adalah Okara (Wu, Julian, et al., 2021). Okara merupakan limbah padat hasil pengolahan kedelai, ketersediaannya sangat melimpah secara global seiring dengan tingginya konsumsi produk turunan kedelai seperti tahu dan susu kedelai. Di Indonesia sendiri, diperkirakan sekitar 1,1–1,2 juta ton okara segar dihasilkan setiap tahunnya (Ginting et al., 2024). Namun pemanfaatannya hingga kini masih kurang maksimal dan belum mencapai nilai ekonomi yang tinggi. Sebagian besar okara hanya dimanfaatkan sebagai pakan ternak berbiaya rendah atau dibuang langsung ke lingkungan sebagai limbah organik (Gaur et al., 2018). Oleh karena itu, inovasi yang dapat dilakukan adalah memanfaatkan limbah tersebut menjadi bioadsorben bernilai tinggi. Secara struktural, okara merupakan limbah yang kaya akan makromolekul seperti mengandung 29–51% selulosa, 10–25% hemiselulosa, 1–4% lignin, 4–8% pektin. Kandungan tersebut memungkinkan terjadinya interaksi pengikatan yang kuat terhadap Cd^{2+} melalui mekanisme pertukaran ion, ikatan elektrostatik maupun pembentukan ikatan hidrogen (Liu & Li, 2017)

Meskipun potensi okara sebagai adsorben sudah diteliti, namun sebagian besar studi hanya terpaku pada efisiensi penyisihan tanpa meninjau mekanisme perpindahan massa secara komprehensif. Penerapan studi neraca massa menjadi sangat krusial untuk memvalidasi fenomena adsorpsi yang terjadi di dalam sistem. Melalui pendekatan ini, distribusi massa Ion Cd^{2+} dari fase cair ke fase padat dapat dilacak secara kuantitatif berdasarkan hukum kekekalan massa, di mana Ion Cd^{2+} yang hilang dari larutan harus setara dengan Ion Cd^{2+} yang terakumulasi pada permukaan bioadsorben okara (Purwitasari et al., 2022)

Studi regenerasi menentukan kelayakan ekonomi dan keberlanjutan proses adsorpsi. Melalui proses desorpsi, situs aktif pada permukaan okara teraktivasi dapat dipulihkan kembali, yang tidak hanya mengurangi biaya operasional pembelian bahan baku baru, tetapi juga meminimalisir akumulasi limbah padat baru berupa adsorben jenuh yang berpotensi menjadi polutan (Badri et al., 2020).

Oleh karena itu, penelitian ini menjadi penting untuk mengkaji lebih lanjut neraca massa, regenerasi, karakteristik kimia bioadsorben okara serta efektivitasnya dalam menghilangkan Ion Cd^{2+} dalam sistem batch. Hasil penelitian ini diharapkan

memiliki manfaat untuk menaikkan nilai ekonomis dari limbah okara dan juga sebagai salah satu upaya alternatif pengembangan adsorben berbasis biomassa ramah lingkungan untuk pengendalian pencemaran lingkungan, terutama Ion Cd^{2+} yang belum terurai dilingkungan akuatik.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh pH dan waktu kontak terhadap efektivitas penyisihan ion Cd^{2+} ?
2. Bagaimana hubungan morfologi bioadsorben okara untuk memvalidasi neraca massa proses adsorpsi?
3. Bagaimana hubungan karakteristik kimia bioadsorben okara terhadap kinetika laju adsorpsi ion Cd^{2+} ?
4. Bagaimana kemampuan regenerasi bioadsorben okara dalam beberapa siklus adsorpsi–desorpsi?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh pH dan waktu kontak terhadap efektivitas penyisihan ion Cd^{2+} .
2. Menganalisis hubungan morfologi bioadsorben okara untuk memvalidasi neraca massa proses adsorpsi.
3. Menganalisis hubungan karakteristik kimia bioadsorben okara terhadap kinetika laju adsorpsi ion Cd^{2+} .
4. Menganalisis kemampuan regenerasi bioadsorben okara dalam beberapa siklus adsorpsi–desorpsi.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian yang didapat dari penelitian ini adalah:

1. Peneliti
Memperoleh informasi terkait pemanfaatan bioadsorben berbasis okara dengan menganalisis karakteristik fisikokimia bioadsorben, uji efisiensi adsorpsi, neraca massa dan regenerasi.
2. Ilmu Pengetahuan

Dapat menjadi salah satu bahan kajian mahasiswa atau peneliti selanjutnya untuk penelitian pengolahan adsorpsi dalam menyisihkan ion Cd^{2+}

3. Masyarakat

Memberikan alternatif solusi bagi industri pengolahan tahu dalam mengelola limbah padat (okara) menjadi produk bernilai guna tinggi serta menambah wawasan dan pengetahuan tentang metode adsorpsi pada air limbah yang mengandung ion Cd^{2+} karsinogenik sehingga dapat mengurangi dampak negatif pada ekosistem perairan.

4. Lingkungan

Mengurangi dampak pencemaran air dan kerusakan ekosistem akibat ion Cd^{2+} karsinogenik serta mendukung konsep pengolahan limbah berbasis sirkular

1.5 Ruang Lingkup Penelitian

Adapun ruang lingkup penelitian sebagai berikut:

1. Sampel yang digunakan yaitu air limbah artifisial Cd (II)
2. Bioadsorben menggunakan limbah okara yang berasal dari Pabrik Tahu Muncul, Tambaksari, Surabaya.
3. Penelitian dilakukan dengan variabel bebas, pH dan waktu kontak
4. Parameter air limbah yang diuji adalah Ion Cd^{2+}
5. Proses penelitian dilakukan dalam sistem batch.