

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Kualitas sumber daya air terus menghadapi ancaman yang diakibatkan oleh adanya pencemaran, sehingga permasalahan ini masih menjadi fokus penanganan di berbagai negara, termasuk Indonesia.. Seiring dengan meningkatnya perkembangan sektor industri, aktivitas produksi juga menghasilkan limbah cair dalam jumlah yang semakin besar. Limbah tersebut umumnya mengandung berbagai jenis polutan yang berasal dari proses produksi, baik berupa logam berat maupun senyawa organik yang bersifat persisten. Limbah yang langsung dilepaskan ke lingkungan tanpa melalui tahap pengolahan yang sesuai dapat menyebabkan degradasi kualitas perairan, merusak keseimbangan ekosistem, dan meningkatkan potensi risiko kesehatan bagi manusia maupun organisme akuatik (Sutarti et al., 2025).

Limbah industri umumnya mengandung berbagai jenis polutan, tetapi logam berat dan zat warna sintesis menjadi dua kelompok polutan yang paling banyak mendapat perhatian karena keberadaannya sulit dihilangkan dan dapat menimbulkan dampak serius terhadap lingkungan. Banyak sektor industri, meliputi pelapisan logam (*electroplating*), penyamakan kulit, tekstil, percetakan, cat, dan pewarna, diketahui menghasilkan limbah yang mengandung logam berat maupun zat warna sintesis dalam konsentrasi tertentu (Halimah et al., 2024). Keberadaan kedua jenis polutan tersebut menjadi tantangan tersendiri dalam pengolahan limbah karena memiliki sifat kimia, mekanisme pencemaran, serta metode penyisihan yang berbeda.

Salah satu unsur logam berat yang banyak dikaji karena dampaknya terhadap lingkungan adalah kromium (Cr), khususnya kromium heksavalen Cr(VI). Bentuk Cr(VI) diketahui mempunyai kelarutan yang tinggi dalam media air menyebabkan Cr(VI) lebih mudah diserap sel-sel makhluk hidup. Karakteristik tersebut menjadikan bentuk kromium ini memiliki tingkat toksisitas yang lebih besar dibandingkan jenis kromium lainnya. (Sharma et al., 2022; Murti & Sugihartono, 2020). Paparan Cr(VI) dalam jangka panjang dapat mengakibatkan banyak masalah kesehatan, diantaranya iritasi kulit, penurunan fungsi hati dan ginjal, terganggunya sistem pernapasan, hingga bersifat mutagenik dan karsinogenik (C. Khan et al., 2024). Selain berdampak terhadap kesehatan manusia, keberadaan Cr(VI) di lingkungan perairan juga dapat mengganggu pertumbuhan organisme akuatik, menurunkan keanekaragaman hayati, serta terakumulasi dalam rantai makanan (Suryono et al., 2016).

Pencemaran akibat zat warna sintetis juga menjadi isu lingkungan yang terus meningkat seiring berkembangnya industri tekstil dan pewarna. Di antara berbagai jenis pewarna sintetis, *Methylene Blue* menjadi salah satu senyawa pewarna sintetis yang paling umum digunakan sebagai model pada penelitian.. Senyawa ini banyak dimanfaatkan dalam industri tekstil, kertas, farmasi, maupun laboratorium karena memiliki kestabilan warna yang tinggi serta mudah larut dalam air. Namun, karakteristik tersebut juga menyebabkan *Methylene Blue* relatif sulit terurai di alam sehingga berpotensi berada di lingkungan dalam jangka waktu yang lama (Suprihatin et al., 2022; Fatya & Raihan, 2025).

Keberadaan *Methylene Blue* di dalam badan air, meskipun dalam konsentrasi yang relatif rendah, dapat menurunkan kualitas lingkungan perairan. Warna yang ditimbulkan mampu menghambat penetrasi cahaya matahari ke dalam perairan akibatnya proses fotosintesis organisme akuatik dan kadar oksigen dalam perairan menjadi menurun (Saputra et al., 2022). Selain itu, paparan *Methylene Blue* dalam jumlah tertentu juga dilaporkan dapat memberikan efek toksik terhadap organisme air serta menimbulkan gangguan kesehatan apabila terpapar secara terus-menerus (Khan et al., 2022). Oleh sebab itu, adanya zat warna sintetis di limbah cair memerlukan pengolahan yang efektif sebelum dibuang ke lingkungan.

Banyak metode penelitian yang dikembangkan dengan tujuan untuk meminimalkan keberadaan logam berat maupun zat warna di limbah cair, di antaranya koagulasi-flokulasi, presipitasi kimia, pertukaran ion, filtrasi membran, oksidasi lanjut, proses biologis, serta adsorpsi (Hakim et al., 2025). Masing-masing metode memiliki kelebihan dan keterbatasan. Metode presipitasi kimia, misalnya, relatif efektif untuk menghilangkan logam berat, tetapi menghasilkan lumpur dalam jumlah besar yang masih memerlukan penanganan lebih lanjut (Anami et al., 2020). Teknologi membran mampu menghasilkan efisiensi penyisihan yang tinggi, tetapi membutuhkan biaya investasi dan operasional yang relatif mahal serta rentan mengalami fouling (Hikmawan et al., 2020). Sementara itu, proses biologis umumnya kurang efektif untuk menangani senyawa yang bersifat toksik atau sulit terurai secara hayati (Iner et al., 2024)

Berbagai metode tersebut, adsorpsi merupakan salah satu alternatif yang sering digunakan dengan alasan proses operasinya relative sederhana, efisien, tidak menghasilkan limbah berbahaya dalam jumlah besar, serta dapat diaplikasikan pada berbagai jenis polutan (Zahro & Adityosulindro, 2023). Prinsip dasar adsorpsi adalah perpindahan molekul atau ion dari fase cair menuju permukaan adsorben melalui interaksi fisika maupun kimia. Adapun faktor – faktor yang mempengaruhi efektivitas adsorpsi diantaranya, karakteristik adsorben, luas permukaan, ukuran pori, gugus fungsi permukaan, pH larutan, konsentrasi awal polutan, waktu kontak, dosis adsorben, serta suhu proses (Hajar et al., 2016). Oleh karena itu, pemilihan material adsorben menjadi faktor yang sangat menentukan keberhasilan proses adsorpsi dalam menghilangkan berbagai jenis kontaminan dari limbah cair.

Keberhasilan proses adsorpsi sangat bergantung pada sifat dan karakteristik adsorben yang digunakan. Seiring berkembangnya konsep *green technology* dan *circular economy*, pemanfaatan biomassa sebagai bioadsorben semakin banyak dikembangkan sebagai alternatif pengganti adsorben komersial. Bioadsorben yang berasal dari limbah pertanian maupun limbah agroindustri dinilai memiliki potensi yang besar karena tersedia dalam jumlah melimpah, bersifat terbarukan, mudah diperoleh, ramah lingkungan, serta memiliki biaya produksi yang relatif rendah dibandingkan karbon aktif komersial (Zahro & Adityosulindro, 2023). Selain memberikan nilai tambah terhadap limbah biomassa, pemanfaatan bioadsorben juga dapat mendukung

upaya pengurangan limbah organik sehingga sejalan dengan prinsip pembangunan berkelanjutan (Kurniawan, 2024).

Berbagai jenis biomassa telah dilaporkan memiliki potensi sebagai bioadsorben, di antaranya tongkol jagung (Dawuriyah et al., 2025), sekam padi (Maliki et al., 2024), ampas tebu (Siqueira et al., n.d.), tempurung kelapa (Desiana et al., 2022), kulit singkong (Utama et al., 2023), kulit jeruk (Ihyadin et al., 2026), kulit durian (Ariyani, 2019), hingga kulit pisang (Rifai et al., 2025). Tiap biomassa mempunyai sifat fisik dan kimia yang tidak sama sehingga menghasilkan kemampuan adsorpsinya berbeda terhadap suatu polutan. Perbedaan tersebut dipengaruhi oleh kandungan penyusun biomassa, seperti selulosa, hemiselulosa, lignin, serta gugus fungsi aktif di permukaannya. Oleh sebab itu, pemilihan jenis biomassa merupakan faktor penting untuk menentukan keberhasilan proses adsorpsi (Pisceselia et al., 2026; Manurung et al., 2025) .

Biomassa yang memiliki berpotensi tinggi untuk digunakan sebagai bioadsorben yaitu kulit pisang kepok (*Musa paradisiaca* L.). Kulit pisang kepok adalah limbah pertanian dengan keberadaan cukup di Indonesia, namun pemanfaatannya masih relatif terbatas (Rifai et al., 2025). Padahal, kulit pisang mengandung selulosa, hemiselulosa, lignin, serta berbagai gugus fungsi yaitu gugus hidroksil (-OH), gugus karboksil (-COOH), dan gugus karbonil (C=O) sebagai situs aktif pada proses adsorpsi. Melalui proses karbonisasi dan aktivasi kimia, struktur pori adsorben dapat berkembang sehingga luas permukaan meningkat dan kemampuan adsorpsinya menjadi lebih baik. Maka dari itu,

potensi sebagai bioadsorben banyak dikembangkan dengan alasan dapat menjadi alternatif yang murah, mudah diperoleh, serta ramah lingkungan untuk mengatasi pencemaran limbah cair (Batu et al., 2024; Rahadi et al., 2019)

Potensi kulit pisang sebagai bioadsorben telah banyak dibuktikan melalui berbagai penelitian terdahulu. Beberapa penelitian lebih dahulu mengkaji pemanfaatan kulit pisang untuk menyisihkan logam berat. Arifiyana & Devianti (2020), melaporkan bahwa biosorben kulit pisang kepok mampu menyerap logam besi (Fe) dari larutan secara efektif. Penelitian lain oleh Malik & Gunawan (2021) menjelaskan arang kulit pisang kepok teraktivasi secara kimia menunjukkan potensi adsorpsi yang baik dalam mengikat ion kadmium (Cd^{2+}). Selain itu, Rifai et al., (2025) juga menunjukkan bahwa kulit pisang memiliki potensi untuk digunakan menjadi adsorben alami dalam mengurangi konsentrasi logam timbal di dalam larutan.. Dari penelitian-penelitian tersebut dapat disimpulkan kulit pisang berpotensi tinggi untuk menurunkan logam berat, namun seluruh penelitian tersebut masih terbatas pada satu jenis polutan sehingga belum memberikan gambaran mengenai kemampuan adsorben terhadap polutan lain yang memiliki karakteristik kimia berbeda.

Selain dimanfaatkan untuk penjerapan logam berat, kulit pisang juga banyak diteliti sebagai material adsorben dalam proses penyisihan zat warna sintetis, terutama *Methylene Blue*. Kurniati et al., (2019) mengkaji kinetika adsorpsi *Methylene Blue* menggunakan karbon aktif berbahan limbah kulit pisang dan mengindikasikan bahwasanya karbon aktif kulit pisang memiliki kapasitas adsorpsi yang efektif terhadap zat warna. Penelitian serupa dilakukan

oleh Susanti & Santoso, (2020) menggunakan material berbasis komposit lempung alam dengan kulit pisang sebagai adsorben *Methylene Blue*. Pengembangan adsorben untuk penyisihan *Methylene Blue* juga dilakukan pada biomassa lain, seperti biochar kulit sagu Amelia et al., (2023) serta karbon aktif yang diperoleh dari tongkol jagung dan dikombinasikan dengan hidroksiapatit membentuk material komposit. Kusumawati et al., (2023). Meskipun memberikan hasil yang baik, penelitian-penelitian tersebut hanya berfokus pada penyisihan zat warna organik tanpa membandingkan kemampuan adsorben terhadap polutan anorganik seperti logam berat.

Penelitian mengenai adsorpsi logam berat Cr(VI) dengan kulit pisang juga telah banyak dilaporkan. Septianingsih & J.Sis, (2021) meneliti Kapasitas penjerapan ion Cr(VI) oleh karbon aktif yang berasal dari kulit pisang kepok dan telah mengalami aktivasi menggunakan asam sulfat (H_2SO_4) dan memperoleh kemampuan adsorpsi yang baik. Penelitian yang dilakukan oleh Suryani et al., (2023) dan Ali et al., (2016) menjelaskan karbon aktif kulit pisang yang dimodifikasi secara kimia mampu menyisihkan Cr(VI) dengan efisiensi tinggi dengan model isotherm Langmuir dan kinetika pseudo-second-order yang paling sesuai. Selanjutnya, Rahman et al., (2022) melaporkan bahwa karbon aktif kulit pisang termodifikasi menggunakan aktivator asam memiliki kapasitas adsorpsi Cr(VI) yang tinggi akibat meningkatnya luas permukaan dan jumlah situs aktif adsorben. Penelitian terbaru oleh (Huang et al., 2024) juga mengembangkan adsorben berbahan kulit pisang yang dimodifikasi menggunakan perlakuan asam HNO_3 sehingga mampu meningkatkan efisiensi

penyisihan Cr(VI). Walaupun menunjukkan hasil yang baik, penelitian-penelitian tersebut masih berfokus pada satu jenis polutan, yaitu logam Cr(VI), sehingga belum memberikan informasi mengenai kemampuan adsorben yang sama dalam mengadsorpsi zat warna organik.

Penelitian yang paling mendekati topik penelitian ini dilakukan oleh (Dini et al., 2023) yang mengkaji penggunaan adsorben kulit pisang kepok untuk menyisihkan logam krom (Cr) sekaligus zat warna pada air limbah batik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa adsorben kulit pisang kepok mampu menurunkan kadar kedua jenis pencemar tersebut, dengan model isoterm yang mengikuti Freundlich dan model kinetika pseudo-second-order. Hasil penelitian menunjukkan bahwa adsorben kulit pisang kepok mampu menurunkan kadar kedua jenis pencemar tersebut, dengan model isoterm yang mengikuti Freundlich dan model kinetika pseudo-second-order. Akan tetapi, pengujian tersebut menggunakan air limbah batik sebagai sampel sehingga mengandung campuran berbagai senyawa pencemar yang dapat memengaruhi mekanisme adsorpsi masing-masing polutan. Selain itu, aktivator yang digunakan adalah H_2SO_4 , variasi massa adsorben belum dikaji secara sistematis untuk memperoleh kondisi optimum, serta belum dilakukan analisis perbandingan karakteristik kinetika dan isoterm adsorpsi antara logam Cr(VI) dan *Methylene Blue* secara terpisah.

Dari sejumlah penelitian yang telah dibahas sebelumnya, dapat dipahami bahwa sebagian besar penelitian masih berfokus pada pengujian satu jenis polutan, baik logam berat maupun zat warna sintesis. Penelitian mengenai

Cr(VI) umumnya hanya mengevaluasi kemampuan adsorpsi terhadap logam berat, sedangkan penelitian mengenai *Methylene Blue* hanya mengkaji penyisihan zat warna. Padahal, kedua polutan tersebut memiliki karakteristik kimia yang berbeda. Cr(VI) merupakan polutan anorganik yang umumnya berada dalam bentuk ion, sedangkan *Methylene Blue* merupakan zat warna organik kationik. Perbedaan karakteristik tersebut menyebabkan mekanisme adsorpsi yang terjadi juga berbeda, sehingga keberhasilan suatu adsorben dalam mengadsorpsi salah satu polutan belum tentu menunjukkan kemampuan yang sama terhadap polutan lainnya. Selain itu, penelitian-penelitian terdahulu juga umumnya menggunakan aktivator yang berbeda, seperti H_2SO_4 maupun modifikasi kimia lainnya, sedangkan pemanfaatan HCl sebagai aktivator pada bioadsorben kulit pisang kepok untuk mengadsorpsi Cr(VI) dan *Methylene Blue* secara komparatif masih sangat terbatas dilaporkan. Oleh karena itu, masih diperlukan penelitian yang mampu mengevaluasi kinerja satu jenis bioadsorben terhadap kedua kelompok polutan tersebut menggunakan kondisi pengujian yang terkontrol.

Berdasarkan research gap tersebut, penelitian ini menggunakan bioadsorben kulit pisang kepok (*Musa paradisiaca* L.) yang diaktivasi menggunakan HCl untuk mengadsorpsi dua jenis polutan yang memiliki karakteristik kimia berbeda, yaitu logam Cr(VI) sebagai polutan anorganik dan *Methylene Blue* sebagai polutan organik kationik. Kedua polutan diuji secara terpisah menggunakan larutan artifisial dengan konsentrasi terkontrol sehingga karakteristik adsorpsi masing-masing dapat diamati secara lebih akurat.

Penelitian ini juga melakukan optimasi kondisi adsorpsi melalui variasi massa bioadsorben, waktu kontak, dan konsentrasi awal larutan, serta dilengkapi dengan karakterisasi bioadsorben yang meliputi kadar air, kadar abu, juga daya serap iodin. Selanjutnya, menganalisis dan perbandingan model kinetika serta isoterm adsorpsi pada kedua jenis polutan untuk memperoleh gambaran yang lebih komprehensif mengenai mekanisme adsorpsi bioadsorben kulit pisang kepok teraktivasi HCl. Melalui penelitian ini, diharapkan diperoleh kontribusi terhadap pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya bioadsorben berbasis biomassa sebagai alternatif pengolahan limbah cair yang efektif terhadap polutan organik maupun anorganik.

B. Batasan Masalah

1. Bioadsorben yang digunakan adalah arang kulit pisang *kepok* (*Musa paradisiaca L.*) yang teraktivasi HCl.
2. Polutan yang digunakan berupa larutan artifisial *Methylene Blue* (*Methylene Blue*) dan kromium heksavalen Cr(VI) yang diuji secara terpisah, bukan dalam campuran.
3. Penelitian dilakukan dengan metode adsorpsi sistem *batch* menggunakan *shaker* pada kecepatan pengadukan tetap.
4. Kondisi operasi yang dikaji meliputi variasi beraat bioadsorben, waktu, dan konsentrasi awal larutan untuk menentukan kondisi optimal adsorpsi.
5. Kemampuan adsorpsi dievaluasi berdasarkan persentase penyisihan, kapasitas adsorpsi (q_e), kinetika adsorpsi, dan isoterm adsorpsi.

6. Analisis konsentrasi *Methylene Blue* dan Cr(VI) menggunakan spektrofotometer UV-Vis dengan kurva kalibrasi masing-masing.

C. Rumusan Masalah

1. Bagaimana efektivitas bioadsorben kulit pisang kepok (*Musa paradisiaca L.*) teraktivasi HCl dalam menurunkan konsentrasi *Methylene Blue* dan Cr(VI)?
2. Bagaimana karakteristik bioadsorben kulit pisang kepok (*Musa paradisiaca L.*) teraktivasi HCl berdasarkan kadar air, kadar abu, dan daya serap iodin?
3. Bagaimana kondisi optimal massa bioadsorben, waktu kontak, dan konsentrasi awal larutan pada proses adsorpsi *Methylene Blue* dan Cr(VI)?
4. Bagaimana model kinetika yang sesuai untuk merepresentasikan proses adsorpsi *Methylene Blue* dan Cr(VI) menggunakan bioadsorben kulit pisang kepok (*Musa paradisiaca L.*) teraktivasi HCl?
5. Bagaimana model isoterm yang sesuai untuk merepresentasikan proses adsorpsi *Methylene Blue* dan Cr(VI) menggunakan bioadsorben kulit pisang kepok (*Musa paradisiaca L.*) teraktivasi HCl?

D. Tujuan Penelitian

1. Mengetahui efektivitas bioadsorben kulit pisang kepok (*Musa paradisiaca L.*) teraktivasi HCl dalam menurunkan konsentrasi *Methylene Blue* dan Cr(VI).

2. Mengetahui karakteristik bioadsorben kulit pisang kepok (*Musa paradisiaca* L.) teraktivasi HCl berdasarkan parameter kadar air, kadar abu, dan daya serap iodin.
3. Menentukan kondisi optimum proses adsorpsi *Methylene Blue* dan Cr(VI) berdasarkan variasi massa bioadsorben, waktu kontak, dan konsentrasi awal larutan.
4. Menganalisis model kinetika yang paling sesuai untuk menggambarkan proses adsorpsi *Methylene Blue* dan Cr(VI) menggunakan bioadsorben kulit pisang kepok (*Musa paradisiaca* L.) teraktivasi HCl.
5. Menganalisis model isoterm yang paling sesuai untuk menggambarkan proses adsorpsi *Methylene Blue* dan Cr(VI) menggunakan bioadsorben kulit pisang kepok (*Musa paradisiaca* L.) teraktivasi HCl.