

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

A. Kajian Pustaka

1. *Methylene Blue*

Methylene Blue adalah zat pewarna sintetis yang termasuk ke dalam kelompok pewarna tiazina (*thiazine dye*). Senyawa ini banyak dimanfaatkan pada berbagai sektor industri, antara lain industri tekstil, kertas, percetakan, farmasi, serta kegiatan laboratorium, karena memiliki sifat pewarna yang stabil dan mudah diaplikasikan. Senyawa ini mempunyai rumus molekul $C_{16}H_{18}ClN_3S$ dengan MR sebesar 319,85 g/mol serta dikenal sebagai zat warna kationik karena menghasilkan ion bermuatan positif ketika dilarutkan dalam air (Asiah et al., 2022). Sifat tersebut menyebabkan *Methylene Blue* banyak digunakan sebagai senyawa model (model pollutant) dalam penelitian adsorpsi untuk mengevaluasi kemampuan suatu adsorben dalam menghilangkan zat warna dari limbah cair (Mulyana et al., 2024).

Methylene Blue berbentuk kristal dengan warna hijau kebiruan. Apabila dilarutkan ke dalam air, senyawa ini akan membentuk larutan yang berwarna biru pekat. Senyawa ini memiliki kelarutan yang tinggi, stabil pada kondisi lingkungan tertentu, serta mampu menyerap cahaya tampak secara maksimum pada panjang gelombang sekitar 664 nm sehingga sering dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis (Mulyana et al., 2024). Stabilitas struktur aromatik yang dimiliki *Methylene Blue* menyebabkan senyawa ini relatif sulit mengalami degradasi secara alami, sehingga keberadaannya di

lingkungan perairan mampu mempertahankan kondisinya dalam periode yang lama apabila tidak dilakukan pengolahan yang memadai (Pujiastuti, 2025).

Keberadaan *Methylene Blue* dalam limbah cair dapat berpotensi menurunkan kualitas lingkungan perairan. Warna pekat yang menyebabkan berkurangnya intensitas cahaya matahari yang menembus perairan, sehingga proses fotosintesis organisme akuatik menjadi terganggu dan menyebabkan penurunan kadar oksigen terlarut. Selain itu, paparan *Methylene Blue* dalam konsentrasi tertentu juga dilaporkan dapat menimbulkan efek toksik terhadap organisme air serta berpotensi menyebabkan gangguan kesehatan apabila terpapar secara terus-menerus (Asiah et al., 2022). Oleh sebab itu, limbah yang mengandung *Methylene Blue* perlu melalui proses pengolahan terlebih dahulu sebelum dilepaskan ke lingkungan guna mencegah terjadinya pencemaran serta meminimalkan dampak negatif terhadap ekosistem.

Berbagai metode pengolahan telah banyak dikembangkan sebagai upaya menghilangkan zat warna *Methylene Blue* dari limbah cair, di antaranya koagulasi-flokulasi, oksidasi lanjut, filtrasi membran, proses biologis, dan adsorpsi. Di antara berbagai metode pengolahan limbah, adsorpsi menjadi teknik yang banyak dipilih karena pelaksanaannya relatif mudah, kemampuan penyisihan polutannya yang tinggi, serta dapat memanfaatkan beragam biomassa sebagai bahan dasar adsorben. Keberhasilan proses adsorpsi *Methylene Blue* dipengaruhi oleh berbagai faktor pendukung, seperti pH, konsentrasi awal, waktu kontak, dosis adsorben, luas permukaan, ukuran pori, serta gugus fungsi di permukaan adsorben (Pujiastuti, 2025). Pada adsorben berbasis

biomassa, mekanisme adsorpsi *Methylene Blue* umumnya melibatkan interaksi elektrostatik, ikatan hidrogen, interaksi π - π , dan gaya van der Waals pada permukaan adsorben (Moniz et al., 2024).

2. Kromium Heksavalen Cr(VI)

Kromium (Cr) merupakan salah satu logam berat yang banyak dimanfaatkan dalam berbagai kegiatan industri, seperti pelapisan logam (*electroplating*), penyamakan kulit, tekstil, produksi pigmen, pengawetan kayu, serta industri kimia. Di lingkungan, kromium umumnya ditemukan dalam dua tingkat oksidasi yang paling stabil, yaitu kromium trivalen (Cr^{3+}) dan kromium heksavalen Cr(VI). (Cr^{3+}) dikenal sebagai unsur esensial dalam jumlah yang sangat kecil bagi metabolisme tubuh, sedangkan Cr(VI) memiliki sifat toksik yang jauh lebih tinggi sehingga menjadi perhatian utama dalam pengelolaan limbah cair industri. Cr(VI) banyak digunakan sebagai model polutan logam berat dalam penelitian adsorpsi karena stabil di dalam larutan dan sering dijumpai pada limbah industri (Pakade et al., 2019).

Di dalam larutan berair, Cr(VI) tidak berada sebagai atom logam bebas, tetapi membentuk spesies ion seperti kromat (CrO_4^{2-}), dikromat ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$), dan hidrogen kromat (HCrO_4^-). Bentuk spesies tersebut dipengaruhi oleh pH larutan sehingga kondisi pH menjadi salah satu faktor utama yang menentukan keberhasilan proses adsorpsi. Pada kondisi asam, Cr(VI) lebih banyak berada dalam bentuk HCrO_4^- dan $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$, sedangkan pada kondisi basa lebih dominan sebagai CrO_4^{2-} . Perubahan spesiasi ini memengaruhi interaksi antara ion Cr(VI) dengan gugus fungsi yang terdapat pada permukaan adsorben, sehingga

efisiensi penyisihan Cr(VI) sangat dipengaruhi oleh kondisi operasi selama proses adsorpsi (Pakade et al., 2019).

Keberadaan Cr(VI) di lingkungan perairan menjadi perhatian serius karena memiliki tingkat toksisitas, mobilitas, dan kelarutan yang tinggi dibandingkan (Cr^{3+}). Sifat tersebut menyebabkan Cr(VI) lebih mudah berpindah di lingkungan dan lebih mudah memasuki sel melalui sistem transportasi, sehingga berpotensi menimbulkan efek toksik pada organisme hidup. Paparan Cr(VI) dalam jangka panjang dapat menyebabkan iritasi kulit, gangguan fungsi hati dan ginjal, kerusakan sistem pernapasan, serta meningkatkan risiko terjadinya mutasi genetik dan kanker. Selain itu, Cr(VI) juga dapat terakumulasi dalam rantai makanan sehingga memberikan dampak terhadap keseimbangan ekosistem perairan (Tyas et al., 2016).

Berbagai metode telah dikembangkan untuk menurunkan konsentrasi Cr(VI) dalam limbah cair, antara lain presipitasi kimia, pertukaran ion, filtrasi membran, reduksi kimia, elektrokimia, dan adsorpsi. Di antara berbagai metode tersebut, adsorpsi menjadi salah satu alternatif yang paling banyak dikembangkan karena memiliki efisiensi penyisihan yang tinggi, proses operasi yang sederhana, serta dapat memanfaatkan material biomassa sebagai adsorben berbiaya rendah. Pada proses adsorpsi, penyisihan Cr(VI) umumnya berlangsung melalui kombinasi beberapa mekanisme, seperti interaksi elektrostatik, pertukaran ion, kompleksasi dengan gugus fungsi aktif, serta pada beberapa jenis bioadsorben dapat disertai dengan reduksi Cr(VI) menjadi (Cr^{3+}) yang memiliki tingkat toksisitas lebih rendah (Pakade et al., 2019).

3. Adsorpsi

Adsorpsi merupakan proses penyerapan suatu zat, baik berupa molekul maupun ion, dari suatu larutan ke permukaan material padat yang disebut adsorben. Proses ini banyak digunakan dalam pengolahan limbah cair karena dinilai cukup sederhana, tidak membutuhkan peralatan yang rumit, serta relatif lebih ekonomis. Selain itu, adsorpsi juga mampu menghilangkan berbagai zat pencemar, baik yang bersifat organik maupun anorganik.

Dalam prosesnya, zat pencemar akan menempel pada permukaan adsorben melalui interaksi tertentu, sehingga konsentrasinya dalam larutan dapat berkurang. Efektivitas adsorpsi dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti pH larutan, waktu kontak, dan jumlah adsorben yang digunakan. Menurut (Lestari, 2020), kondisi-kondisi tersebut sangat menentukan kemampuan adsorben dalam menyerap zat pencemar secara optimal.

4. Bioadsorben Berbasis Biomassa

Bioadsorben berbasis biomassa merupakan material adsorben yang berasal dari bahan-bahan hayati, terutama limbah pertanian, limbah perkebunan, limbah kehutanan, maupun limbah organik lainnya yang dimanfaatkan untuk menyerap berbagai jenis polutan dalam air. Bioadsorben menjadi alternatif pengganti adsorben komersial karena memiliki ketersediaan yang melimpah, biaya produksi yang relatif rendah, bersifat terbarukan, serta lebih ramah lingkungan (Manurung et al., 2025).

Kemampuan biomassa sebagai bioadsorben dipengaruhi oleh kandungan komponen penyusunnya, seperti selulosa, hemiselulosa, lignin,

protein, dan pektin yang mengandung berbagai gugus fungsi aktif, antara lain gugus hidroksil (-OH), karboksil (-COOH), karbonil (C=O), amino (-NH₂), dan fenolik. Gugus-gugus fungsi tersebut berperan sebagai situs aktif yang dapat berinteraksi dengan ion logam maupun senyawa organik melalui mekanisme adsorpsi, seperti interaksi elektrostatik, pertukaran ion, pembentukan kompleks, dan ikatan hydrogen (Sahania et al., 2024)

Berdasarkan sumber bahan bakunya, bioadsorben berbasis biomassa dapat dikelompokkan menjadi beberapa jenis, yaitu: kulit singkong (Utama et al., 2023), sekam padi (Maliki et al., 2024), tongkol jagung (Dawuriyah et al., 2025), ampas tebu (Siqueira et al., n.d.), tempurung kelapa (Desiana et al., 2022), kulit jeruk (Ihyadin et al., 2026), kulit durian (Ariyani, 2019), hingga kulit pisang (Rifai et al., 2025). Berbagai jenis biomassa tersebut telah banyak dimanfaatkan sebagai bioadsorben untuk menyisihkan logam berat maupun zat warna dari limbah cair setelah melalui proses karbonisasi dan/atau aktivasi fisik maupun kimia (Veranica et al., 2023).

Dalam penelitian ini, bahan baku yang dimanfaatkan untuk pembuatan bioadsorben adalah kulit pisang kepok (*Musa paradisiaca L.*), yang merupakan salah satu limbah hasil pertanian. Pemilihan kulit pisang kepok didasarkan pada tingginya kandungan lignoselulosa, mudah diperoleh, serta berpotensi dikembangkan menjadi bioadsorben melalui proses karbonisasi dan aktivasi kimia menggunakan HCl sehingga diharapkan mampu meningkatkan kemampuan adsorpsi terhadap logam Cr(VI) dan *Methylene Blue*.

5. Bioadsorben Kulit Pisang Kepok (*Musa paradisiaca* L.)



Gambar 1. 1 Arang Kulit Pisang Kepok (Sumber : Dokumentasi Pribadi)

Kulit pisang kepok menjadi biomassa yang memiliki potensi besar sebagai untuk dijadikan adsorben karena kandungan selulosa, hemiselulosa, lignin, dan berbagai gugus fungsional yang mendukung terjadinya proses adsorpsi melalui keberadaan situs-situs aktif pada permukaannya. Setelah i proses karbonisasi dan aktivasi, kulit pisang kepok dapat menghasilkan arang aktif dengan pori - pori yang lebih besar, dan kemampuan adsorpsi yang tinggi. Hal ini menjadikan kulit pisang kepok layak digunakan sebagai biosorben dalam pengolahan berbagai jenis limbah cair, termasuk limbah laundry. Penelitian Fadlilah et al., (2023) menunjukkan bahwa karbon aktif kulit pisang kepok efektif digunakan sebagai biosorben untuk menurunkan fosfat pada limbah laundry dengan efisiensi yang tinggi.

Selain itu, penelitian Khairiah et al., (2021) melaporkan bahwa karbon aktif dari kulit pisang memiliki karakteristik model dan laju adsorpsi yang baik untuk berbagai logam berat, sedangkan menurut Yulis & Febliza, (2023)

melaporkan bahwa bioadsorben kulit pisang kepok dengan aktivator asam klorida (HCl) dapat digunakan secara efektif sebagai biosorben logam raksa. Hasil-hasil tersebut memperkuat potensi bioadsorben kulit pisang memiliki arang aktif berbasis biomassa yang dapat dimodifikasi sesuai kebutuhan pengolahan limbah.

6. Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Adsorpsi

Kinerja proses adsorpsi dipengaruhi oleh sejumlah faktor operasional, seperti derajat keasaman (pH) larutan, jumlah adsorben yang digunakan, durasi kontak antara adsorben dan adsorbat, konsentrasi mula - mula, suhu, ukuran partikel adsorben, serta kecepatan pengadukan (rpm). Oleh karena itu, apabila penelitian bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh suatu parameter tertentu, maka parameter lainnya harus dijaga tetap (konstan) agar perubahan yang terjadi benar-benar disebabkan oleh variabel yang sedang diteliti (Nurhidayati et al., 2022). Pada adsorpsi Cr(VI), pH merupakan faktor yang sangat penting karena menentukan spesiasi kromium di dalam larutan sekaligus memengaruhi muatan permukaan adsorben. Cr(VI) umumnya lebih mudah teradsorpsi pada kondisi asam, terutama sekitar pH 2-3, karena spesies dominan berupa HCrO_4^- dan permukaan adsorben cenderung bermuatan positif sehingga interaksi elektrostatik berlangsung lebih kuat (Fitria et al., 2023). Sebaliknya, adsorpsi metilen biru dipengaruhi oleh pH yang menentukan tingkat ionisasi gugus fungsi pada permukaan adsorben dan interaksi antara adsorben dengan molekul zat warna kationik. Ketika pH berada pada kisaran netral hingga sedikit basa,

permukaan adsorben menjadi lebih bermuatan negative sehingga gaya tarik elektrostatik terhadap metilen biru menjadi lebih besar dan efisiensi adsorpsi meningkat (Anwar et al., 2022) . Selain pH, suhu dan kecepatan pengadukan juga berpengaruh terhadap laju perpindahan massa adsorbat menuju permukaan adsorben. Namun, kedua parameter tersebut umumnya dipertahankan tetap selama proses penelitian agar tidak memengaruhi hasil pengujian massa adsorben, waktu kontak, maupun konsentrasi awal yang menjadi variabel utama penelitian (Ali et al., 2016)

7. Aktivasi HCl

Pada proses pembuatan arang aktif, tahap aktivasi kimia dilakukan untuk memperbaiki karakteristik struktur karbon agar luas permukaan dan porinya berkembang, sehingga material tersebut lebih efektif digunakan sebagai adsorben (Roni et al., 2021). Tahap ini bukan hanya sekadar perlakuan tambahan, tetapi justru penentu utama kualitas adsorben, karena arang hasil karbonisasi biasanya masih menyisakan pengotor yang menutup pori dan menghambat proses penyerapan. Aktivasi dengan HCl dipilih karena mampu membantu membersihkan permukaan karbon, membuka pori-pori yang tertutup, dan meningkatkan luas permukaan sehingga situs aktif adsorben menjadi lebih tersedia.

Jika dibandingkan dengan aktivator lain, HCl cenderung lebih efektif dalam menghasilkan arang aktif yang bersih dan stabil untuk aplikasi adsorpsi. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa aktivasi HCl mampu memperbaiki karakteristik fisik dan kimia karbon aktif, baik pada bahan berbasis kulit pisang

maupun biomassa lain. Misalnya, penelitian Yulis & Asyti Febliza, (2023) pada BPAC melaporkan bahwa bioadsorben aktif kulit pisang dengan aktivator HCl memiliki kualitas karakterisasi yang baik dan efektif sebagai biosorben logam raksa. Selain itu, studi perbandingan aktivator HCl dan NaOH juga menunjukkan bahwa HCl dapat menghasilkan karakter adsorben yang lebih mendukung proses penjerapan dibandingkan aktivator lain pada bahan biomassa tertentu (Febriana et al., 2026).

8. Kinetika Adsorpsi

Kajian kinetika adsorpsi memiliki tujuan untuk menganalisis kecepatan interaksi antara adsorben dan zat pencemar hingga tercapai kondisi kesetimbangan selama proses adsorpsi berlangsung (Muhammad, 2014). Analisis ini penting karena tidak hanya menunjukkan seberapa cepat adsorpsi berlangsung, tetapi juga membantu menjelaskan mekanisme yang dominan dalam proses tersebut. Dalam studi, umumnya model kinetika yang digunakan adalah *pseudo* orde satu dan *pseudo* orde dua, karena keduanya cukup baik dalam menggambarkan pengaruh waktu kontak terhadap kuantitas zat yang teradsorpsi pada permukaan adsorben (Sulistyawati et al., 2020).

Pada penelitian ini, analisis kinetika menjadi bagian yang penting karena dapat memperlihatkan apakah proses penyerapan Cr(VI) dan *Methylene Blue* oleh arang kulit pisang kepok lebih sesuai model kinetika adsorpsi orde satu maupun orde dua. Berdasarkan penelitian (Pramudinta et al., 2024), karbon aktif batang pisang dalam penurunan fosfat sesuai dengan model *pseudo second order*. Penelitian lain oleh Suryani et al., (2023) dan Sanjaya &

Agustine, (2015) juga menunjukkan bahwa arang aktif kulit pisang pada adsorpsi Pb cenderung mengikuti kinetika orde dua pada variasi tertentu. Karena itu, kajian kinetika tidak hanya berguna untuk melihat hasil akhir penurunan kadar pencemar, tetapi juga untuk memperkuat interpretasi ilmiah mengenai karakter proses adsorpsi yang terjadi.

7.1 Model Pseudo-First Order (PFO)

Kinetika pseudo-orde satu yang diperkenalkan oleh Lagergren menjelaskan bahwa laju berlangsungnya proses adsorpsi ditentukan oleh banyaknya sisi aktif adsorben yang belum terisi. Semakin sedikit situs aktif yang tersedia, semakin rendah laju adsorpsi yang terjadi. Umumnya model ini cocok untuk menggambarkan tahap awal adsorpsi, di mana masih terdapat banyak situs aktif yang tersedia. Persamaan kinetika pseudo-first order dalam bentuk diferensial dapat dilihat pada Persamaan 2.1

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (2.1)$$

dengan:

q_t = jumlah adsorbat yang teradsorpsi per satuan massa adsorben pada waktu t (mg/g),

q_e = jumlah adsorbat yang teradsorpsi per satuan massa adsorben pada kesetimbangan (mg/g),

k_1 = konstanta laju adsorpsi pseudo-first order (min^{-1} atau jam^{-1}),

t = waktu kontak (menit atau jam).

Dalam bentuk linear, persamaan di atas dapat diintegrasikan dengan batas kondisi $q_t = 0$ ketika $t = 0$ dan $q_t = q_e$ ketika $t = t$, sehingga menghasilkan:

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2,303} t \quad (2.2)$$

atau dalam bentuk natural log:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (2.3)$$

(Rahman et al., 2022)

Plot antara $\log(q_e - q_t)$ atau $\ln(q_e - q_t)$ terhadap t akan menghasilkan garis lurus dengan kemiringan (slope) sebesar $-k_1/2,303$ atau $-k_1$, dan intersep sebesar $\log q_e$ atau $\ln q_e$. Nilai konstanta (k) dan kapasitas adsorpsi (q) dapat diperoleh melalui perhitungan berdasarkan nilai kemiringan (slope) dan titik potong (intersep) dari persamaan linier. Penilaian terhadap kecocokan model pseudo-first order dilakukan dengan memperhatikan besarnya nilai R^2 yang mendekati satu serta kesesuaian antara kapasitas adsorpsi teoritis ($q_{e, \text{hitung}}$) dan kapasitas adsorpsi yang diperoleh melalui pengujian ($q_{e, \text{eksperimen}}$).

Meskipun model pseudo-first order cukup baik dalam menggambarkan tahap awal adsorpsi, model ini sering kali kurang mampu memprediksi seluruh rentang waktu adsorpsi, terutama ketika proses mendekati kesetimbangan. Oleh karena itu, model pseudo-second order seringkali memberikan gambaran yang lebih baik untuk sistem adsorpsi yang melibatkan interaksi kimia antara adsorbat dan adsorben.

7.2 Model *Pseudo-Second Order* (PSO)

Asumsi dasar model pseudo orde dua adalah bahwa laju adsorpsi dikendalikan oleh perbedaan kapasitas adsorpsi antara kondisi setimbang dan kondisi sesaat, di mana hubungan tersebut mengikuti orde dua. Dasar penyusunan model ini adalah asumsi bahwa mekanisme adsorpsi didominasi oleh kemisorpsi, yaitu interaksi kimia antara adsorbat dengan gugus fungsi aktif, seperti mekanisme pembentukan ikatan kompleks, pertukaran ion, atau ikatan kovalen. Persamaan kinetika pseudo-second order dalam bentuk diferensial adalah:

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad (2.4)$$

dengan:

q_t = jumlah adsorbat yang terserap oleh adsorben pada waktu t (mg/g),

q_e = jumlah adsorbat yang terserap pada kondisi setimbang (mg/g),

k_2 = konstanta laju pada model kinetika pseudo-orde dua (g/mg·min atau g/mg·jam),

t = waktu kontak (menit atau jam).

Dengan mengintegrasikan persamaan di atas pada batas kondisi $q_t = 0$ pada $t = 0$ dan $q_t = q_t$ pada $t = t$, diperoleh bentuk linear sebagai berikut:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (2.5)$$

atau sering pula dituliskan dalam bentuk:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{v_0} + \frac{t}{q_e} \quad (2.6)$$

(Huang et al., 2024)

dengan $v_0 = k_2 q_e^2$ adalah laju adsorpsi awal (mg/g·min).

Plot antara t/q_t terhadap t akan menghasilkan garis lurus dengan kemiringan (slope) sebesar $1/q_e$ dan intersep sebesar $1/(k_2 q_e^2)$ atau $1/v_0$. Dari slope dan intersep tersebut, nilai q_e dan k_2 dapat dihitung. Kesesuaian data dengan model pseudo-second order dinilai dari nilai R^2 yang mendekati 1 serta kesesuaian antara nilai q_e hasil perhitungan dengan nilai q_e eksperimen.

Model pseudo-second order umumnya lebih baik dalam menggambarkan seluruh rentang waktu adsorpsi, termasuk tahap awal dan tahap mendekati kesetimbangan. Selain itu, model ini sering kali memberikan nilai q_e yang lebih mendekati nilai eksperimen dibandingkan model pseudo-first order. Oleh karena itu, banyak penelitian adsorpsi, termasuk yang menggunakan biomassa dan karbon aktif dari limbah pertanian, melaporkan bahwa kesesuaian data kinetika terhadap model pseudo-second order menunjukkan bahwa proses adsorpsi lebih banyak dipengaruhi oleh mekanisme kemisorpsi, yaitu adanya keterlibatan interaksi kimia antara molekul adsorbat dengan gugus aktif pada permukaan adsorben.

9. Isoterm Adsorpsi

Isoterm adsorpsi menggambarkan hubungan antara jumlah adsorbat yang terikat pada permukaan adsorben dengan konsentrasi adsorbat yang masih tersisa dalam fase cair ketika proses adsorpsi mencapai kondisi kesetimbangan dan suhu konstan. Kurva isoterm adsorpsi dibuat dengan menggambarkan hubungan antara jumlah adsorbat yang terikat pada adsorben per satuan massa (mg/g) dengan konsentrasi adsorbat yang tersisa dalam larutan setelah mencapai kesetimbangan. Grafik ini digunakan untuk mengetahui karakteristik interaksi antara adsorbat dan permukaan adsorben. Informasi dari isoterm adsorpsi sangat penting untuk memahami kapasitas adsorpsi maksimum adsorben, sifat permukaan adsorben, serta mekanisme interaksi antara adsorbat dan adsorben (Murphy et al., 2023).

Beberapa model isoterm yang umum digunakan untuk menggambarkan data kesetimbangan antara lain Langmuir, Freundlich, Temkin, dan Dubinin–Radushkevich (D–R). Di antara model-model tersebut, isoterm Langmuir dan Freundlich merupakan yang paling banyak diaplikasikan dalam studi adsorpsi logam berat dan zat warna menggunakan biomassa dan karbon aktif.

9.1 Model Langmuir

Berdasarkan model Langmuir, adsorpsi terjadi pada permukaan adsorben yang bersifat homogen dan memiliki kapasitas situs aktif yang terbatas. Molekul atau ion adsorbat akan menempati situs aktif secara individual, sehingga hanya terbentuk satu lapisan adsorbat (monolayer) pada permukaan adsorben.. Model ini juga mengasumsikan tidak adanya interaksi

lateral antar molekul adsorbat yang teradsorpsi. Persamaan Langmuir dalam bentuk linear dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{K_L q_m} + \frac{C_e}{q_m} \quad (2.7)$$

(Huang et al., 2024)

dengan C_e menunjukkan konsentrasi adsorbat yang tersisa dalam larutan setelah mencapai kondisi kesetimbangan (mg/L). Parameter q menggambarkan jumlah adsorbat yang berhasil terikat pada permukaan adsorben per satuan massa adsorben pada keadaan setimbang (mg/g), sedangkan q_m merupakan kapasitas adsorpsi maksimum yang dapat dicapai oleh adsorben dalam mengikat adsorbat (mg/g), dan K_L merupakan konstanta Langmuir yang berkaitan dengan afinitas adsorpsi (L/mg). Nilai R^2 yang mendekati 1 pada plot linear menunjukkan kesesuaian data dengan model Langmuir

9.2 Model Freundlich

Model Freundlich, di sisi lain, merupakan model empiris yang mengasumsikan adsorben dengan permukaan heterogen menunjukkan variasi karakteristik situs aktif, di mana energi interaksi antara adsorbat dan permukaan tidak terdistribusi secara merata, sehingga memungkinkan terjadinya adsorpsi multilayer. Persamaan Freundlich dalam bentuk linear adalah:

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad (2.7)$$

(Rahman et al., 2022)

dengan K_F merupakan konstanta Freundlich yang merepresentasikan volume adsorpsi $(mg/g)(L/mg)^{1/n}$, dan n adalah parameter intensitas adsorpsi. Nilai $n > 1$ menandakan adsorpsi berlangsung favorable, sedangkan $n = 1$ mengindikasikan adsorpsi linear, dan $n < 1$ menunjukkan adsorpsi yang kurang menguntungkan.

10. Spektrofotometer UV-Vis

Spektrofotometer Ultraviolet-Visible (UV-Vis) adalah instrumen analisis yang digunakan untuk mengidentifikasi dan mengukur kadar suatu senyawa melalui interaksi antara molekul dengan radiasi elektromagnetik. Prinsip kerja metode ini didasarkan pada kemampuan suatu senyawa dalam menyerap energi cahaya pada wilayah ultraviolet dengan panjang gelombang 200–400 nm dan daerah tampak pada rentang 400–800 nm. Teknik analisis UV-Vis banyak diaplikasikan karena memiliki keunggulan berupa akurasi pengukuran yang tinggi, waktu analisis yang singkat, serta kemampuan dalam mendeteksi senyawa dengan konsentrasi rendah tanpa menyebabkan kerusakan pada sampel yang dianalisis. Dalam penelitian adsorpsi, Analisis menggunakan UV-Vis dilakukan untuk mengetahui perubahan kadar polutan melalui pengukuran nilai absorbansi larutan

sebelum dan sesudah kontak dengan adsorben sehingga efisiensi penyisihan dan kapasitas adsorpsi dapat dihitung.

Spektrofotometer UV-Vis bekerja berdasarkan prinsip Hukum Lambert-Beer, yaitu hubungan antara jumlah cahaya yang diserap oleh suatu larutan dengan konsentrasi senyawa penyerap serta panjang jalur optik yang dilalui oleh cahaya tersebut. Semakin tinggi konsentrasi zat penyerap dan semakin panjang lintasan cahaya, maka nilai absorbansi yang dihasilkan akan semakin besar. Hubungan tersebut dinyatakan dengan persamaan:

Dalam hukum Lambert-Beer, hubungan antara absorbansi dan konsentrasi larutan dinyatakan melalui persamaan $A = \epsilon bc$, dengan A menunjukkan nilai absorbansi, ϵ sebagai koefisien absorptivitas molar ($L \text{ mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$), b merupakan panjang jalur optik kuvet (cm), serta c sebagai konsentrasi zat terlarut (mol L^{-1}). Prinsip hubungan linear antara absorbansi dan konsentrasi tersebut dimanfaatkan dalam pembuatan kurva standar atau kurva kalibrasi. Melalui kurva tersebut, konsentrasi suatu sampel dapat dihitung berdasarkan nilai absorbansi yang diperoleh dari hasil pengukuran menggunakan spektrofotometer.

Dalam analisis *Methylene Blue*, pengukuran konsentrasi umumnya dilakukan pada panjang gelombang maksimum sekitar 664–665 nm, karena pada panjang gelombang tersebut *Methylene Blue* memberikan absorbansi tertinggi sehingga menghasilkan sensitivitas analisis yang lebih baik. Sebelum pengukuran, dilakukan pembuatan kurva kalibrasi terlebih dahulu dengan membuat larutan standar berbagai variasi konsentrasi agar diperoleh

hubungan sebanding antara konsentrasi analit dan respons absorbansi (Bollinger et al., 2025).

Sementara itu, analisa Cr(VI) dengan spektrofotometer UV-Vis dilakukan berdasarkan pembentukan kompleks berwarna yang kemudian diukur nilai absorbansinya pada nilai λ maksimum (λ_{maks}) yang diperoleh sesuai metode analisis yang dilakukan. Pengukuran menggunakan UV-Vis dinilai memiliki sensitivitas yang baik untuk mengevaluasi perubahan konsentrasi Cr(VI) selama proses adsorpsi. Maka dari itu, prosedur ini sering dipakai dalam penelitian adsorpsi logam berat untuk menghitung efisiensi penyisihan maupun kapasitas adsorpsi adsorben (Al-jabari et al., 2022)

Dalam penelitian ini, spektrofotometer UV-Vis digunakan dalam menganalisis selisih konsentrasi *Methylene Blue* serta Cr(VI) setelah dilakukan prosedur adsorpsi dengan bioadsorben kulit pisang kepok (*Musa paradisiaca L.*) teraktivasi HCl. Data absorbansi yang diperoleh kemudian dikonversi menjadi konsentrasi melalui persamaan kurva kalibrasi sehingga dapat digunakan untuk menghitung efisiensi penyisihan, kapasitas adsorpsi, serta menganalisis karakteristik adsorpsi berdasarkan model kinetika dan isoterm yang digunakan.

B. Kajian Empiris

Berbagai penelitian telah membuktikan bahwa limbah biomassa berpotensi yang tinggi untuk dikembangkan sebagai adsorben untuk mengolah limbah cair. Salah satu biomassa yang banyak diteliti adalah kulit

pisang karena mengandung selulosa, hemiselulosa, lignin, serta gugus fungsi hidroksil dan karboksil yang menjadi sisi aktif pada mekanisme adsorpsi. Hasil penelitian-penelitian tersebut menunjukkan bahwa karakteristik adsorben sangat dipengaruhi oleh jenis biomassa, metode aktivasi, jenis polutan yang diadsorpsi, serta kondisi operasi selama proses adsorpsi.

Penelitian oleh Kurniati et al., (2019) menunjukkan karbon aktif berbahan kulit pisang memiliki kemampuan yang baik dalam mengadsorpsi Methylene Blue. Berdasarkan hasil analisis kinetika, kemampuan adsorben dalam menyerap adsorbat terus meningkat seiring bertambahnya durasi kontak hingga akhirnya mencapai kondisi kesetimbangan adsorpsi. Penelitian tersebut membuktikan bahwa kulit pisang berpotensi digunakan sebagai adsorben zat warna sintetis, namun masih terbatas pada satu jenis polutan.

Penelitian lain oleh Septianingsih & J.Sis, (2021) dengan bioadsorben kulit pisang kepok teraktivasi H_2SO_4 untuk menyisihkan logam Cr(VI). Penelitian menjelaskan aktivasi kimia mampu meningkatkan kemampuan adsorpsi karena memperluas pori - pori adsorben. Akan tetapi, penelitian tersebut hanya mengevaluasi adsorpsi terhadap logam Cr(VI) sehingga belum dapat menggambarkan kemampuan adsorben terhadap polutan organik.

Ali et al., (2016) juga melaporkan bahwa karbon aktif kulit pisang yang dimodifikasi secara kimia memiliki kapasitas adsorpsi Cr(VI) yang tinggi. Berdasarkan hasil analisis isoterm dan kinetika, proses adsorpsi lebih

sesuai mengikuti model Langmuir dan pseudo-second-order. Hasil tersebut menunjukkan bahwa modifikasi kimia mampu meningkatkan kualitas adsorben melalui pembentukan situs aktif yang lebih banyak. Penelitian serupa dilakukan oleh Rahman et al., (2022) yang melaporkan bahwa bioadsorben kulit pisang termodifikasi asam memiliki efisiensi penyisihan Cr(VI) yang tinggi akibat meningkatnya luas permukaan spesifik dan volume pori adsorben. Penelitian terbaru oleh Huang et al., (2024) juga menunjukkan bahwa modifikasi asam pada adsorben berbahan kulit pisang mampu meningkatkan kemampuan adsorpsi Cr(VI) secara signifikan dibandingkan adsorben tanpa modifikasi.

Selain menggunakan kulit pisang, berbagai biomassa lain juga telah dikembangkan sebagai adsorben untuk menyisihkan zat warna maupun logam berat. Amelia et al., (2023) melaporkan bahwa biochar kulit sagu efektif mengadsorpsi Methylene Blue, sedangkan Kusumawati et al., (2023) menjelaskan komposit hidroksiapatit-bioadsorben tongkol jagung memiliki kemampuan adsorpsi yang baik terhadap zat warna. Sementara itu, Pramudinta et al., (2024) melaporkan bahwa karbon aktif batang pisang memiliki karakteristik kinetika yang mengikuti model pseudo-second-order dalam penyisihan fosfat. Temuan-temuan tersebut menunjukkan bahwa biomassa pertanian memiliki potensi yang besar sebagai bahan baku adsorben ramah lingkungan.

Penelitian yang paling relevan dengan penelitian ini adalah Dini et al., (2023) yang melakukan penelitian penurunan kadar Cr(VI) dan pewarna

sintetis di limbah batik menggunakan bioadsorben kulit pisang kepok teraktivasi H_2SO_4 . Penelitian tersebut menunjukkan bahwa adsorben kulit pisang kepok mampu mengadsorpsi kedua jenis pencemar dengan model isoterm Freundlich dan kinetika pseudo-second-order. Namun demikian, penelitian tersebut menggunakan air limbah nyata yang mengandung campuran berbagai senyawa sehingga karakteristik adsorpsi masing-masing polutan belum dapat diamati secara spesifik. Selain itu, penelitian tersebut belum melakukan perbandingan mekanisme adsorpsi Cr(VI) dan Methylene Blue secara terpisah dengan kondisi operasi yang sama.

Berdasarkan hasil kajian empiris tersebut dapat diketahui bahwa penelitian mengenai adsorpsi menggunakan kulit pisang masih didominasi oleh pengujian terhadap satu jenis polutan, baik logam berat maupun zat warna sintetis. Penelitian yang mengkaji kemampuan bioadsorben kulit pisang kepok teraktivasi HCl dalam mengadsorpsi Cr(VI) dan Methylene Blue secara terpisah dengan memvariasi berat adsorben, durasi kontak, konsentrasi mula – mula, karakterisasi adsorben, serta analisis dan perbandingan model kinetika maupun isoterm masih sangat terbatas. Melalui penelitian ini, diharapkan dapat diperoleh temuan yang melengkapi aspek-aspek yang belum banyak dibahas dalam penelitian sebelumnya sekaligus memberikan informasi yang lebih komprehensif mengenai karakteristik adsorpsi bioadsorben kulit pisang kepok terhadap dua jenis polutan yang memiliki sifat kimia berbeda.

C. Kerangka Berpikir

Salah satu permasalahan lingkungan yang banyak mendapat perhatian adalah limbah cair industri, sebab di dalamnya terdapat berbagai jenis polutan, terutama logam berat dan senyawa pewarna sintetis.. Keberadaan kedua jenis polutan tersebut menjadi perhatian karena memiliki sifat toksik, sulit terdegradasi secara alami, serta beresiko lingkungan perairan jika dibuang secara langsung tanpa melalui tahapan pengolahan yang sesuai. Dalam penelitian ini, logam kromium heksavalen Cr(VI) dan *Methylene Blue* dipilih sebagai model polutan karena mewakili dua kelompok kontaminan yang memiliki karakteristik kimia berbeda, yaitu polutan anorganik dan polutan organik.

Salah satu metode yang banyak dikembangkan untuk mengurangi konsentrasi kedua polutan tersebut adalah adsorpsi. Metode adsorpsi menjadi pilihan yang tepat sebab tahapan operasionalnya tidak rumit, namun mampu menghasilkan tingkat penyisihan polutan yang tinggi, serta memungkinkan penggunaan bioadsorben berbasis biomassa yang murah dan ramah lingkungan. Biomassa yang berpotensi dikembangkan menjadi bioadsorben yaitu kulit pisang kepok (*Musa paradisiaca L.*) karena mengandung selulosa, hemiselulosa, lignin, yang mampu berinteraksi dengan ion logam maupun molekul zat warna.

Untuk meningkatkan kemampuan adsorpsinya, kulit pisang kepok diaktivasi menggunakan larutan HCl. Tahap aktivasi bertujuan untuk membersihkan pengotor yang menutupi pori-pori adsorben. Dengan

hilangnya pengotor tersebut, luas permukaan adsorben menjadi lebih besar dan situs aktif yang terbentuk pun semakin banyak sehingga kemampuan adsorpsi terhadap Cr(VI) maupun *Methylene Blue* menjadi lebih baik. Selanjutnya, kemampuan bioadsorben dievaluasi melalui variasi massa adsorben, waktu kontak, dan konsentrasi awal larutan untuk memperoleh kondisi adsorpsi yang optimum.

Data konsentrasi awal dan konsentrasi akhir polutan dianalisa dengan spektrofotometer *Ultraviolet-Visible* untuk menghitung efisiensi penyisihan serta kapasitas penyerapan. Data yang diperoleh kemudian dianalisis menggunakan model kinetika adsorpsi dan isoterm adsorpsi sehingga dapat diketahui mekanisme adsorpsi yang terjadi serta karakteristik interaksi antara bioadsorben kulit pisang kepok diaktivasi HCl dan logam kromium dan *Methylene Blue*. Dengan dilakukannya penelitian ini, diharapkan dapat diketahui sejauh mana kemampuan bioadsorben kulit pisang kepok teraktivasi HCl sebagai adsorben alternatif yang efektif dalam mengadsorpsi dua jenis polutan dengan karakteristik kimia yang berbeda.