BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Riset

Kajian isoterm, kinetika, dan termodinamika secara luas digunakan dalam penelitian adsorpsi untuk mengevaluasi kinerja adsorben secara mendalam, tidak hanya ditinjau dari kapasitas penjerapan, tetapi juga dari mekanisme interaksi serta karakter energi proses yang berlangsung. El Jery et al. (2024) menjelaskan bahwa analisis isoterm adsorpsi berperan dalam menggambarkan hubungan kesetimbangan antara konsentrasi adsorbat dalam larutan dan jumlah adsorbat yang terikat pada permukaan adsorben, sehingga memungkinkan penentuan kapasitas adsorpsi maksimum serta evaluasi karakteristik permukaan material. Pendekatan isoterm ini menjadi dasar penting dalam memahami perilaku adsorpsi secara kuantitatif dan membandingkan performa berbagai material adsorben pada kondisi kesetimbangan yang berbeda.

Selain kajian isoterm, analisis kinetika adsorpsi banyak dimanfaatkan untuk menentukan laju penjerapan serta mekanisme yang mengendalikan proses adsorpsi, apakah didominasi oleh reaksi pada permukaan atau oleh proses difusi intra-partikel. Brahma & Saikia. (2022) melaporkan bahwa pemodelan kinetika, seperti pseudo-first-order dan pseudo-second-order, berperan penting dalam penentuan waktu kontak optimum serta evaluasi efektivitas adsorben pada berbagai kondisi operasional. Di sisi lain, kajian termodinamika adsorpsi digunakan untuk menjelaskan sifat energi proses melalui parameter perubahan energi bebas Gibbs (ΔG°), entalpi (ΔH°), dan entropi (ΔS°), yang mencerminkan spontanitas, sifat endotermik atau eksotermik, serta kestabilan interaksi adsorben–adsorbat pada berbagai kondisi temperatur (El Jery et al., 2024). Oleh karena itu, kajian kinetika dan termodinamika sering digunakan secara bersamaan untuk memberikan pemahaman yang lebih menyeluruh mengenai perilaku sistem adsorpsi, khususnya dalam konteks evaluasi kinerja adsorben pada kondisi lingkungan yang dinamis.

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa kajian isoterm, kinetika, dan termodinamika berperan penting dalam menjelaskan perilaku adsorpsi ion logam

secara kuantitatif pada berbagai sistem adsorben berpori. Khairahma (2025) melaporkan bahwa adsorpsi ion Fe(II) pada sistem adsorben berbasis $Cu(TAC)_2$ dapat dianalisis secara komprehensif melalui pendekatan isoterm, kinetika, dan termodinamika untuk mengungkap karakter kesetimbangan, laju penjerapan, serta sifat energi interaksi adsorben–adsorbat. Analisis isoterm menunjukkan kecocokan dengan model Freundlich (R^2 = 0,9552), yang mengindikasikan permukaan adsorben bersifat heterogen dengan kemungkinan adsorpsi multilapis. Dari sisi kinetika, model pseudo-second-order memberikan kesesuaian terbaik (R^2 = 0,99147), menunjukkan bahwa mekanisme adsorpsi dikendalikan oleh interaksi kimia pada permukaan. Sementara itu, kajian termodinamika memperlihatkan nilai $\Delta G°$ negatif yang menandakan proses adsorpsi berlangsung secara spontan, serta nilai $\Delta H°$ positif yang mengindikasikan sifat endotermik. Hasil-hasil tersebut menegaskan bahwa pendekatan kimia fisika mampu memberikan pemahaman menyeluruh mengenai mekanisme, laju, dan karakter energi adsorpsi ion logam.

Berdasarkan hasil penelitian terdahulu tersebut, kajian isoterm, kinetika, dan termodinamika terbukti berperan penting dalam memahami perilaku adsorpsi ion logam pada berbagai sistem adsorben. Namun demikian, efektivitas dan relevansi pendekatan tersebut sangat dipengaruhi oleh jenis material adsorben serta ketersediaan sumber bahan baku yang digunakan. Oleh karena itu, pemanfaatan sumber daya lokal dan limbah yang melimpah menjadi aspek penting dalam pengembangan material adsorben yang tidak hanya efektif secara ilmiah, tetapi juga relevan secara lingkungan dan ekonomi.

Indonesia merupakan salah satu produsen kelapa sawit terbesar di dunia dengan total produksi mencapai 46,99 juta ton pada tahun 2023, yang didominasi oleh wilayah Sumatera dan Kalimantan (BPS, 2023). Di Provinsi Sumatera Utara, produksi kelapa sawit pada tahun 2021 tercatat sebesar 7.451.890,91 ton, menjadikannya sebagai salah satu kontributor utama industri kelapa sawit nasional. Tingginya produksi kelapa sawit tersebut berbanding lurus dengan meningkatnya jumlah limbah yang dihasilkan, baik limbah padat maupun limbah cair, yang berpotensi menimbulkan permasalahan lingkungan apabila tidak dikelola secara optimal.

Proses pengolahan tandan buah segar (TBS) menghasilkan limbah padat berupa tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dengan proporsi sekitar 20–23% dari total hasil panen. Limbah padat ini umumnya belum dimanfaatkan secara maksimal dan sering kali hanya ditimbun atau dibuang, sehingga berpotensi mencemari lingkungan. Di sisi lain, TKKS memiliki kandungan lignoselulosa yang tinggi, terdiri atas selulosa, hemiselulosa, dan lignin, yang menjadikannya bahan baku potensial untuk dikonversi menjadi material bernilai tambah, khususnya sebagai adsorben berbasis karbon (Damanik dkk., 2024).

Selain limbah padat, industri kelapa sawit juga menghasilkan limbah cair berupa Palm Oil Mill Effluent (POME) sebanyak 2,5–3,5 m^3 untuk setiap ton crude palm oil (CPO) yang diproduksi (Maryani & Umar, 2021). Limbah cair ini dihasilkan dari berbagai tahapan proses pengolahan, terutama dari unit sterilisasi (pengukusan), proses klarifikasi minyak, serta buangan dari hidrosiklon pada pabrik kelapa sawit (Mulyanto et al., 2023). POME umumnya mengandung bahan organik dan anorganik dalam konsentrasi tinggi serta berpotensi membawa berbagai logam berat seperti tembaga (Cu), timbal (Pb), seng (Zn), besi (Fe), nikel (Ni), dan perak (Ag), yang berasal dari bahan baku tandan buah segar, proses korosi peralatan dan pipa logam, serta akumulasi mineral selama proses pengolahan (Silalahi & Supijatno, 2017).

Logam berat merupakan unsur dengan berat jenis lebih dari 5 g/cm^3 yang bersifat persisten, sulit terdegradasi, dan mudah terakumulasi di lingkungan, sehingga dapat mencemari tanah, air, dan udara serta menimbulkan dampak negatif bagi ekosistem dan kesehatan manusia. Salah satu logam berat yang menjadi perhatian adalah seng (Zn). Meskipun seng dibutuhkan dalam jumlah kecil, akumulasi Zn dalam kadar berlebih bersifat toksik dan dapat menyebabkan gangguan kesehatan seperti mual, pusing, muntah, diare, dan demam. Berdasarkan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 22 Tahun 2021, batas maksimum kandungan Zn dalam air sungai Kelas IV ditetapkan sebesar 2 mg/L, sehingga diperlukan upaya pengolahan limbah yang efektif untuk menurunkan konsentrasi logam tersebut sebelum dilepas ke lingkungan.

Seiring dengan meningkatnya permasalahan pencemaran air limbah, berbagai pendekatan biologis dan fisikokimia telah diterapkan, antara lain reverse

osmosis, presipitasi, koagulasi–flokulasi, pertukaran ion, filtrasi membran, adsorpsi, serta oksidasi foto-Fenton. Meskipun metode-metode tersebut terbukti mampu menurunkan konsentrasi pencemar, masing-masing masih memiliki keterbatasan, seperti kebutuhan kondisi operasi yang ekstrem, biaya operasional yang tinggi, efisiensi yang relatif rendah, penghilangan pencemar yang tidak sempurna, pembentukan senyawa antara berbahaya, serta waktu proses yang relatif lama (Jani *et al*., 2022). Oleh karena itu, adsorpsi menjadi salah satu metode yang paling banyak digunakan karena prosesnya relatif sederhana, berbiaya rendah, memiliki efisiensi dan efektivitas tinggi, serta memungkinkan adsorben untuk diregenerasi dan digunakan kembali (Jasmidi *et al*., 2022).

Karbon aktif merupakan adsorben yang paling umum digunakan karena memiliki luas permukaan dan kapasitas adsorpsi yang tinggi, serta umumnya disintesis dari bahan alami yang kaya karbon melalui proses pemanasan pada suhu tinggi tanpa oksidasi (Syauqiah *et al*., 2011; Jasmidi *et al*., 2022). Dalam konteks ini, tandan kosong kelapa sawit (TKKS) menjadi salah satu bahan baku potensial untuk pembuatan karbon aktif, mengingat kandungan karbonnya yang tinggi serta struktur pori yang fleksibel, sehingga efektif diaplikasikan dalam pengolahan limbah cair yang mengandung logam berat.

Namun, karbon aktif pada umumnya memiliki struktur amorf dengan tingkat kekristalan yang rendah, yang dalam beberapa kasus dapat membatasi kinerja adsorpsinya terhadap jenis polutan tertentu. Hasil penelitian Zubir *et al*. (2021) menunjukkan bahwa meskipun aktivasi kimia menggunakan H_3PO_4 mampu meningkatkan luas permukaan spesifik karbon aktif, peningkatan tersebut belum sepenuhnya mengoptimalkan kapasitas adsorpsi, sehingga diperlukan pendekatan modifikasi lanjutan pada material adsorben.

Salah satu strategi yang banyak dikembangkan adalah penggabungan karbon aktif dengan Metal–Organic Frameworks (MOFs). MOFs merupakan material berpori dengan struktur kristalin dan luas permukaan sangat tinggi, serta memiliki fleksibilitas dalam desain pori yang memungkinkan peningkatan selektivitas dan kapasitas adsorpsi (Sánchez-Serratos et al., 2016). Efektivitas pendekatan ini ditunjukkan oleh Muñoz-Senmache *et al*. (2020), yang mensintesis komposit karbon aktif–MOFs dengan menumbuhkan kristal MIL-100(Fe) secara in

situ pada pori makro dan mesopori karbon aktif komersial Darco KB-G. Karbon aktif tersebut memiliki struktur amorf dengan luas permukaan sekitar 380 m^2/g dan volume pori 0,40 cm^3/g, yang setelah dikombinasikan dengan MOF mengalami peningkatan signifikan hingga mencapai luas permukaan 815 m^2/g dan volume pori 0,72 cm^3/g. Hasil ini menunjukkan bahwa pembentukan komposit karbon aktif–MOFs secara efektif mampu memperbaiki keterbatasan struktural karbon aktif dan meningkatkan karakteristik porositasnya secara signifikan.

Penelitian Carson *et al*. (2009) melaporkan bahwa *copper terephthalate metal–organic frameworks* (MOFs $Cu(TAC)_2$) memiliki struktur kristal dengan tipe *space group* C2/m. Pada struktur ini, ion Cu^{2+} berkoordinasi dalam geometri kuadrat-piramidal, sementara ligan tereftalat berperan sebagai penghubung yang menjembatani dimer tembaga sehingga membentuk jaringan berpori yang teratur. MOFs $Cu(TAC)_2$ menunjukkan karakteristik porositas yang baik dengan BET *surface area* sebesar 625 m^2/g dan Langmuir surface area sebesar 752 m^2/g, yang lebih tinggi dibandingkan beberapa MOFs sejenis, seperti MOF-2. Selain memiliki luas permukaan yang besar, material ini juga dilaporkan stabil secara termal hingga suhu sekitar 300 °C. Karakteristik tersebut menjadikan MOFs $Cu(TAC)_2$ berpotensi diaplikasikan dalam penyimpanan gas, pemisahan molekul, serta sebagai material adsorben untuk senyawa target tertentu, termasuk kontaminan anorganik dan organik dalam sistem lingkungan.

Ligan organik yang digunakan dalam sintesis Metal–Organic Frameworks (MOFs), seperti asam tereftalat, dapat diperoleh melalui proses depolimerisasi limbah plastik jenis polyethylene terephthalate (PET). Pemanfaatan limbah plastik sebagai sumber ligan menjadi semakin relevan mengingat permasalahan sampah plastik di Indonesia yang kian serius, dengan kontribusi mencapai 19,19% dari total timbulan sampah nasional sebesar 38,4 juta ton per tahun (KLHK, 2023). Limbah plastik, khususnya polyethylene terephthalate (PET), bersifat sangat sulit terurai secara alami dan dapat bertahan di lingkungan selama puluhan hingga ratusan tahun, sehingga berpotensi mencemari tanah, badan air, dan ekosistem perairan. Selain menimbulkan dampak fisik, limbah plastik juga menghadirkan risiko kimia yang signifikan. Pembakaran sampah plastik secara tidak terkendali, yang masih kerap terjadi dalam praktik pengelolaan limbah, dapat menghasilkan senyawa

dioksin dan furan yang bersifat sangat toksik, persisten, dan karsinogenik. Senyawa-senyawa tersebut diketahui mampu mengganggu sistem endokrin, bersifat bioakumulatif, serta meningkatkan risiko kanker dan gangguan reproduksi pada manusia. Di samping itu, degradasi plastik di lingkungan melalui proses termal dan fotokimia juga berpotensi melepaskan atau membawa senyawa berbahaya lainnya. Plastik PET dilaporkan dapat menghasilkan senyawa aldehida seperti asetaldehida dan formaldehida yang bersifat iritan dan toksik pada paparan jangka panjang. Selain itu, permukaan plastik dan mikroplastik memiliki kemampuan untuk mengadsorpsi senyawa organik persisten, seperti polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), serta berbagai logam berat, sehingga berperan sebagai vektor pencemar yang meningkatkan risiko bioakumulasi dan biomagnifikasi dalam rantai makanan (Utomo & Solin, 2021). Di sisi lain, degradasi plastik di lingkungan perairan menghasilkan mikroplastik dan nanopartikel yang mampu menyerap serta mentransfer polutan berbahaya ke dalam rantai makanan, sehingga memperbesar potensi bioakumulasi dan biomagnifikasi pada organisme akuatik hingga manusia (Rahmayani & Aminah, 2021).

Dalam konteks ini, pemanfaatan limbah plastik PET sebagai bahan baku asam tereftalat tidak hanya berkontribusi pada pengurangan pencemaran lingkungan, tetapi juga menghadirkan pendekatan waste-to-resource yang bernilai tambah. Asam tereftalat memiliki dua gugus karboksilat yang mampu berkoordinasi kuat dengan ion logam, membentuk ikatan yang stabil dan menghasilkan jaringan tiga dimensi MOFs dengan kestabilan struktural tinggi. MOFs berbasis ligan asam tereftalat dikenal memiliki porositas dan luas permukaan yang besar, sehingga sangat potensial untuk diaplikasikan dalam penyimpanan gas, katalisis, serta proses adsorpsi logam berat dan polutan organik (Lapa et al., 2023).

Selain itu, penelitian Permana (2024) mengungkapkan bahwa dalam sintesis komposit KA-Cu(TAC)$_2$ dan KA-Fe(TAC)$_3$, karbon aktif dapat berperan sebagai *template* bagi logam dan ligan untuk berikatan, sehingga membentuk struktur berpori yang lebih terbuka. Kombinasi ini meningkatkan efisiensi adsorpsi serta memperluas potensi aplikasi dalam pemurnian air dan pemisahan zat. Dengan demikian, integrasi karbon aktif dan MOFs menjadi strategi inovatif untuk

mengatasi keterbatasan adsorben konvensional serta mengoptimalkan kinerjanya dalam berbagai bidang.

Meskipun berbagai material adsorben telah dikembangkan, efektivitas penyerapan logam berat masih menjadi tantangan besar, terutama ketika berhadapan dengan konsentrasi kontaminan yang tinggi dan kondisi lingkungan yang beragam. Faktor-faktor seperti waktu kontak, luas permukaan adsorben, dan interaksi kimia antara adsorben dan adsorbat sering kali membatasi kinerja adsorpsi secara keseluruhan. Di sisi lain, masalah limbah plastik yang kian meningkat menambah urgensi dalam mencari solusi yang tidak hanya efektif, tetapi juga ramah lingkungan melalui pemanfaatan kembali limbah tersebut. Untuk menjawab tantangan tersebut, penelitian ini mengembangkan material berbasis polimer berpori KA-Cu(TAC)$_2$ yang diperoleh dari limbah plastik, kemudian dipadukan dengan karbon aktif dari tandan kosong kelapa sawit. Pendekatan ini diharapkan mampu menghadirkan adsorben inovatif dengan porositas tinggi, luas permukaan spesifik optimal, distribusi ukuran pori yang sesuai, serta stabilitas material yang baik. Oleh karena itu, peneliti tertarik untuk melakukan kajian komprehensif berjudul "Sifat Kinetika dan Termodinamika Adsorpsi Zn(II) oleh Komposit Polimer Berpori Cu(TAC)$_2$ Berbasis Limbah Plastik dengan Karbon Aktif Tandan Kosong Kelapa Sawit", yang bertujuan mengevaluasi karakteristik kinetika dan termodinamika proses adsorpsi ion Zn^{2+}. Harapannya, penelitian ini tidak hanya dapat meningkatkan efektivitas remediasi pencemaran logam berat, tetapi juga memanfaatkan tandan kosong kelapa sawit sebagai bahan karbon aktif bernilai ekonomis tinggi, serta memberikan nilai tambah dalam pengelolaan limbah plastik yang menjadi masalah lingkungan utama saat ini.

1.2 Ruang Lingkup

Penelitian ini mencakup sintesis dan aplikasi komposit karbon aktif yang dimodifikasi dengan KA-Cu(TAC)$_2$ untuk adsorpsi logam Zn(II) dari larutan. Evaluasi kinerja adsorpsi dilakukan menggunakan instrumen AAS (Atomic Absorption Spectroscopy). Pengukuran kinetika dan termodinamika adsorpsi didasarkan pada variasi waktu kontak, konsentrasi awal logam, suhu, dan massa adsorben. Analisis kinetika menggunakan model pseudo-orde pertama dan kedua

untuk menentukan laju serta mekanisme adsorpsi yang terjadi. Sementara itu, studi termodinamika melibatkan perhitungan perubahan entalpi (ΔH), energi bebas Gibbs (ΔG), dan entropi (ΔS) guna menilai tingkat spontanitas serta sifat endotermik atau eksotermik dari proses adsorpsi. Variasi parameter ini dilakukan untuk memahami pengaruh kondisi lingkungan terhadap kapasitas dan efisiensi adsorpsi logam Zn(II) oleh komposit KA-Cu(TAC)$_2$.

1.3 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah yang terdapat dalam penelitian ini:

1. Bagaimana karakteristik struktur kristal dan morfologi permukaan, komposit KA–Cu(TAC)$_2$ berdasarkan analisis XRD dan SEM sebagai adsorben ion Zn(II)?
2. Bagaimana kondisi optimum adsorpsi ion Zn(II) oleh komposit KA–Cu(TAC)$_2$ berdasarkan variasi massa adsorben, konsentrasi larutan, waktu kontak, dan suhu?
3. Bagaimana karakteristik kesetimbangan isoterm adsorpsi ion Zn(II) oleh komposit KA–Cu(TAC)$_2$ pada kondisi optimum, ditinjau dari parameter isoterm Langmuir dan Freundlich berdasarkan variasi konsentrasi?
4. Bagaimana karakteristik kinetika adsorpsi ion Zn(II) oleh komposit KA–Cu(TAC)$_2$ pada kondisi optimum, ditinjau dari parameter model kinetika pseudo-orde satu dan pseudo orde dua berdasarkan variasi waktu kontak??
5. Bagaimana parameter termodinamika adsorpsi ion Zn(II) oleh komposit KA–Cu(TAC)$_2$ pada kondisi optimum, meliputi perubahan energi bebas Gibbs (ΔG°), entalpi (ΔH°), dan entropi (ΔS°), berdasarkan variasi suhu adsorpsi?

1.4 Batasan Masalah

Adapun Batasan masalah yang terdapat dalam penelitian ini:

1. Sintesis KA-Cu(TAC)$_2$ dalam penelitian ini dilakukan dengan perbandingan logam, ligan, dan karbon aktif dalam KA-Cu(TAC)$_2$ adalah 1:2:3.

2. Penentuan sifat kinetika adsorpsi dilakukan dengan menggunakan model pseudo-orde pertama dan kedua untuk menganalisis laju penyerapan ion Zn(II).
3. Penentuan sifat termodinamika adsorpsi dilakukan dengan menghitung perubahan energi bebas Gibbs (ΔG), entalpi (ΔH), dan entropi (ΔS) berdasarkan data suhu, konsentrasi awal, dan kesetimbangan adsorbat.
4. Data yang digunakan untuk analisis kinetika dan termodinamika mencakup variasi waktu kontak, suhu, dan konsentrasi awal ion Zn(II), serta hasil analisis konsentrasi residu Spectrophotometer (AAS).

1.5 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian yang terdapat dalam penelitian ini:

1. Mengetahui karakteristik struktur kristal dan morfologi permukaan komposit KA–$Cu(TAC)_2$ berdasarkan analisis XRD dan SEM sebagai adsorben ion Zn(II).
2. Mengetahui kondisi optimum adsorpsi ion Zn(II) oleh komposit KA–$Cu(TAC)_2$ berdasarkan variasi massa adsorben, konsentrasi larutan, waktu kontak, dan suhu.
3. Mengetahui karakteristik kesetimbangan isoterm adsorpsi ion Zn(II) oleh komposit KA–$Cu(TAC)_2$ pada kondisi optimum, ditinjau dari parameter isoterm Langmuir dan Freundlich berdasarkan variasi konsentrasi.
4. Mengetahui karakteristik kinetika adsorpsi ion Zn(II) oleh komposit KA–$Cu(TAC)_2$ pada kondisi optimum, ditinjau dari parameter model kinetika pseudo-orde satu dan pseudo-orde dua berdasarkan variasi waktu kontak.
5. Mengetahui parameter termodinamika adsorpsi ion Zn(II) oleh komposit KA–$Cu(TAC)_2$ pada kondisi optimum, meliputi perubahan energi bebas Gibbs (ΔG°), entalpi (ΔH°), dan entropi (ΔS°), berdasarkan variasi suhu adsorpsi.

1.6 Manfaat Penelitian

Penelitian ini memberikan kontribusi teoritis dan praktis. Secara teoritis, penelitian ini memperkaya pengembangan ilmu adsorben dan teknik lingkungan

melalui peningkatan efektivitas aktivasi karbon aktif serta sintesis material fungsional berporositas dan luas permukaan tinggi. Kajian ini juga memperluas pemanfaatan biomassa limbah pertanian, seperti tandan kosong kelapa sawit, dan limbah plastik PET sebagai bahan baku komposit KA–Cu(TAC)$_2$.

Secara praktis, penelitian ini menawarkan solusi yang ekonomis dan aplikatif untuk penanganan pencemaran logam berat, khususnya di wilayah penghasil kelapa sawit seperti Sumatera Utara. Pemanfaatan limbah PET sebagai sumber asam tereftalat dan tandan kosong kelapa sawit sebagai bahan karbon aktif mendukung pengelolaan limbah yang berkelanjutan sekaligus meningkatkan nilai guna limbah. Dengan demikian, penelitian ini berpotensi mengurangi dampak pencemaran logam berat serta menyediakan alternatif teknologi ramah lingkungan bagi pengolahan limbah.

UNIVERSITAS NEGERI MEDAN
UNIMED
THE Character Building UNIVERSITY