BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kajian kinetika dan termodinamika merupakan pendekatan fundamental dalam memahami suatu proses kimia, khususnya pada sistem interaksi antara ion logam dan material padat. Kinetika berperan dalam menjelaskan laju suatu proses serta mekanisme tahapan reaksi yang mengendalikan kecepatan interaksi, sedangkan termodinamika digunakan untuk menilai arah dan kelayakan proses berdasarkan perubahan energi yang terjadi. Dalam konteks material fungsional, integrasi kajian kinetika dan termodinamika diperlukan untuk menjelaskan tidak hanya apakah suatu proses dapat berlangsung, tetapi juga bagaimana proses tersebut dikendalikan secara mekanistik dan energetik (Sholahudin *et al*., 2023).

Dalam sistem adsorpsi, kajian kinetika menjadi sangat penting karena berkaitan langsung dengan laju penyerapan adsorbat pada permukaan adsorben dan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kesetimbangan. Model kinetika seperti *pseudo-first-order* dan *pseudo-second-order* banyak digunakan untuk menginterpretasikan mekanisme adsorpsi, di mana kecocokan model dapat mengindikasikan apakah proses didominasi oleh interaksi fisik atau kimia. Selain itu, parameter kinetika seperti konstanta laju reaksi (k) memberikan informasi kuantitatif mengenai efisiensi dan kecepatan adsorpsi, yang menjadi faktor krusial dalam perancangan sistem adsorpsi yang aplikatif dan efisien (Somsiripan *et al*., 2023).

Sementara itu, kajian termodinamika adsorpsi berfokus pada evaluasi perubahan energi selama proses adsorpsi berlangsung. Parameter termodinamika seperti energi bebas Gibbs ($\Delta G°$), perubahan entalpi ($\Delta H°$), dan perubahan entropi ($\Delta S°$) digunakan untuk menilai spontanitas proses adsorpsi, sifat eksotermis atau endotermis sistem, serta perubahan keteraturan molekuler pada antarmuka adsorben-adsorbat. Analisis parameter termodinamika tidak hanya memberikan informasi mengenai stabilitas sistem adsorpsi, tetapi juga memungkinkan prediksi perilaku adsorben pada variasi kondisi operasi, seperti perubahan suhu dan konsentrasi awal ion logam (Raji *et al*., 2023).

Kajian kinetika dan termodinamika telah banyak digunakan sebagai pendekatan fundamental untuk memahami mekanisme dan efisiensi proses adsorpsi pada material berbasis biomassa. Ali *et al*. (2022) melaporkan studi komprehensif mengenai adsorpsi pewarna metil violet menggunakan adsorben berbasis biji kurma, di mana analisis kinetika menunjukkan bahwa model *pseudo-second-order* memberikan kecocokan terbaik dengan nilai koefisien determinasi yang tinggi (R^2 > 0,99). Hasil ini mengindikasikan bahwa proses adsorpsi dikendalikan oleh mekanisme *chemisorption* melalui interaksi kimia antara adsorbat dan gugus aktif pada permukaan adsorben. Selain itu, kajian termodinamika yang dilakukan melalui evaluasi parameter energi bebas Gibbs (ΔG°), perubahan entalpi (ΔH°), dan perubahan entropi (ΔS°) menunjukkan bahwa proses adsorpsi berlangsung secara spontan dan bersifat endotermis, dengan peningkatan suhu berkontribusi terhadap peningkatan kapasitas adsorpsi. Nilai ΔS° yang positif juga mencerminkan meningkatnya ketidakteraturan pada antarmuka adsorben-adsorbat selama proses berlangsung. Hal ini menegaskan bahwa integrasi kajian kinetika dan termodinamika tidak hanya penting untuk menjelaskan laju adsorpsi, tetapi juga krusial dalam memahami mekanisme interaksi serta kestabilan energi sistem adsorpsi secara menyeluruh (Ali *et al*., 2022).

Dalam adsorpsi ion logam berat seperti Cu(II), kajian kinetika dan termodinamika menjadi semakin krusial karena interaksi yang terjadi umumnya melibatkan kombinasi gaya elektrostatik, pertukaran ion, dan pembentukan ikatan koordinasi antara ion logam dan gugus aktif pada permukaan adsorben. Oleh karena itu, pemahaman terhadap sifat kinetika dan termodinamika adsorpsi Cu(II) diperlukan untuk menjelaskan mekanisme interaksi secara menyeluruh, serta untuk mengevaluasi efisiensi dan kestabilan sistem adsorpsi yang dikembangkan (Maulina *et al*., 2023).

Namun demikian, penelitian terdahulu terkait adsorpsi ion Cu(II) umumnya masih berfokus pada karakterisasi fisik material adsorben dan kajian kesetimbangan adsorpsi, sementara kajian kinetika dan termodinamika adsorpsi Cu(II) belum banyak dievaluasi secara mendalam dan terintegrasi. Akibatnya, diperlukan kajian yang lebih komprehensif untuk menjelaskan hubungan antara sifat material adsorben dan performa adsorpsinya (Nugraha, 2024). Dalam konteks aplikatif,

keterbatasan pemahaman mengenai kinetika dan termodinamika adsorpsi Cu(II) menjadi isu penting mengingat ion Cu^{2+} merupakan salah satu kontaminan utama yang banyak ditemukan pada limbah cair industri dan berpotensi mencemari lingkungan perairan.

Limbah cair yang dihasilkan dari proses produksi minyak kelapa sawit, yang dikenal sebagai *Palm Oil Mill Effluent* (POME), merupakan salah satu sumber pencemaran lingkungan yang signifikan. Selain memiliki kandungan bahan organik yang tinggi, POME juga dilaporkan mengandung logam berat, termasuk tembaga (Cu), yang berasal dari aktivitas operasional pabrik kelapa sawit. Keberadaan Cu^{2+} dalam POME terutama disebabkan oleh korosi dan pelindian (*leaching*) peralatan berbahan logam seperti *sterilizer*, digester, *screw press*, sistem perpipaan, dan boiler yang beroperasi pada suhu tinggi serta lingkungan kimia yang reaktif, sehingga ion Cu^{2+} terlarut dan terbawa dalam aliran limbah cair (Oyedoh & Apakhade, 2023). Keberadaan Cu^{2+} dalam lingkungan perairan menjadi persoalan serius karena tembaga merupakan unsur mikro nutrien esensial bagi organisme hidup yang berperan dalam aktivitas enzimatik dan metabolisme, tetapi pada konsentrasi yang berlebih logam ini dapat bersifat toksik terhadap organisme akuatik (Hossain & Rakkibu, 2023).

Beberapa penelitian melaporkan bahwa Cu terdeteksi secara nyata dalam POME mentah, bersama logam berat lain seperti Fe, Zn, dan Ni, sehingga berpotensi mencemari badan air apabila limbah dibuang tanpa pengolahan yang memadai. Meskipun Cu(II) merupakan unsur mikro esensial yang berperan dalam proses enzimatik organisme hidup, akumulasi Cu^{2+} pada konsentrasi berlebih bersifat toksik, menyebabkan gangguan fisiologis pada organisme akuatik dan meningkatkan risiko akumulasi dalam rantai makanan (Jijingi *et al*., 2025). Karena sifatnya yang sulit terdegradasi, pengendalian konsentrasi Cu^{2+} dalam air limbah menjadi langkah penting untuk mencegah dampak ekologis dan kesehatan manusia di masa depan (Quiton *et al*., 2022). Di Sumatera Utara, hasil penelitian menunjukkan bahwa kandungan tembaga (Cu^{2+}) pada beberapa biota air tawar di perairan Danau Toba berada pada kisaran 0,0059 - 0,0325 ppm, yang mengindikasikan adanya akumulasi logam berat akibat aktivitas antropogenik di sekitar kawasan perairan (Pane & Siahaan, 2023). Oleh karena itu, pengendalian

dan penurunan kadar Cu^{2+} dalam POME menjadi aspek penting dalam pengelolaan limbah industri kelapa sawit yang berkelanjutan guna mencegah dampak negatif jangka panjang terhadap lingkungan dan kesehatan manusia.

Berbagai metode pengolahan limbah telah dikembangkan, termasuk presipitasi kimia, filtrasi membran, pertukaran ion, dan adsorpsi. Di antara teknologi tersebut, adsorpsi menggunakan karbon aktif berbasis biomassa muncul sebagai metode yang efisien dan ekonomis untuk menghilangkan ion logam beracun, karena prosedurnya sederhana, fleksibel, dapat digunakan kembali, dan menghasilkan residu dalam jumlah minimal. Adsorpsi mampu mencapai kapasitas penjerapan yang tinggi terhadap ion logam tertentu bergantung pada jenis material adsorben yang digunakan (Wang *et al*., 2023).

Adsorben dengan luas permukaan yang tinggi dan porositas yang baik umumnya menunjukkan kapasitas adsorpsi yang lebih besar terhadap ion logam berat dalam air limbah. Karbon aktif dipilih karena memiliki karakteristik yang sangat menguntungkan, seperti luas permukaan spesifik yang tinggi, struktur pori yang berkembang, serta stabilitas termal dan kimia yang baik (Al-Mazed *et al*., 2022). Karbon aktif berbasis biomassa mampu mengadsorpsi berbagai polutan, mulai dari senyawa organik hingga ion logam berat, secara efisien. Namun, penggunaan karbon aktif komersial tetap menghadapi tantangan, seperti biaya produksi yang tinggi dan keterbatasan efisiensi dalam mengikat ion logam tertentu tanpa melalui modifikasi lebih lanjut (Wang *et al*., 2023).

Salah satu bahan baku biomassa yang berpotensi untuk produksi karbon aktif adalah tandan kosong kelapa sawit (TKKS), yang merupakan limbah padat utama dari industri kelapa sawit di Indonesia. Pemanfaatan TKKS sebagai bahan baku karbon aktif tidak hanya bernilai ekonomis, tetapi juga berkontribusi dalam pengurangan limbah biomassa yang melimpah. TKKS merupakan limbah padat utama dari industri kelapa sawit, dengan jumlah yang dapat mencapai 20-23% dari total tandan buah segar (TBS) yang diproses. Menurut data dari Direktorat Jenderal Perkebunan (2022), Sumatera Utara adalah salah satu produsen kelapa sawit terbesar di Indonesia, dengan produksi mencapai 5,45 juta ton, yang menghasilkan limbah TKKS dalam jumlah besar. Kandungan lignoselulosa yang tinggi, terdiri dari selulosa, hemiselulosa, dan lignin, menjadikan TKKS sebagai bahan baku yang

sangat potensial untuk produksi karbon aktif. TKKS mengandung selulosa sebesar 45,95%, hemiselulosa 22,84%, lignin 16,49%, minyak 2,41%, dan abu 1,23% (Adiguna & Aryantha, 2020).

Pemanfaatan TKKS masih terbatas pada aplikasi bernilai rendah seperti pupuk atau bahan bakar padat. Tingginya kandungan lignoselulosa pada TKKS menjadikannya ideal untuk diproduksi menjadi adsorben ramah lingkungan. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa karbon aktif dari TKKS dapat ditingkatkan kinerjanya melalui modifikasi material. Misalnya, studi oleh Zubir *et al*. (2021) membuktikan bahwa karbon aktif berbasis tandan kosong kelapa sawit (TKKS) yang dimodifikasi menggunakan nanopartikel logam Fe-Cu menunjukkan peningkatan karakteristik fisik dan fungsional dibandingkan karbon aktif tanpa modifikasi. Hasil karakterisasi BET menunjukkan bahwa proses impregnasi logam Fe-Cu menyebabkan peningkatan luas permukaan spesifik dan volume pori, yang mengindikasikan berkembangnya struktur pori aktif pada karbon. Analisis SEM memperlihatkan perubahan morfologi permukaan menjadi lebih kasar dan heterogen setelah modifikasi, yang berkaitan dengan terbentuknya situs aktif baru. Selain itu, hasil EDX mengonfirmasi keberadaan unsur Fe dan Cu pada permukaan karbon aktif, yang menandakan bahwa nanopartikel logam berhasil terdispersi dan terikat pada matriks karbon.

Perubahan sifat struktural dan kimia permukaan ini berdampak langsung pada peningkatan kapasitas adsorpsi karbon aktif termodifikasi terhadap polutan dalam air limbah dibandingkan karbon aktif TKKS tanpa modifikasi. Hasil ini menunjukkan bahwa TKKS tidak hanya berpotensi sebagai sumber karbon aktif, tetapi juga memiliki kemampuan untuk dimodifikasi demi aplikasi pengolahan limbah yang lebih efektif. Meskipun karbon aktif berbasis tandan kosong kelapa sawit (TKKS) memiliki potensi yang besar sebagai adsorben, material ini masih memiliki beberapa keterbatasan, terutama dalam kapasitas penjerapan ion logam berat seperti Cu(II). Keterbatasan tersebut berkaitan dengan sifat permukaan dan distribusi pori yang belum optimal, sehingga efektivitas adsorpsinya masih perlu ditingkatkan melalui upaya modifikasi material (Zubir *et al*., 2021).

Salah satu pendekatan yang dapat dilakukan untuk meningkatkan kapasitas adsorpsi karbon aktif adalah dengan memodifikasi permukaan karbon aktif dengan

material berpori canggih, seperti *Metal Organic Frameworks* (MOFs). MOFs adalah kelas material kristalin baru yang tersusun dari pusat ion logam dan ligan organik yang membentuk struktur jaringan tiga dimensi yang teratur. Karakteristik utamanya seperti luas permukaan spesifik yang sangat besar, kapasitas pertukaran ion yang tinggi, dan pori-pori yang dapat diatur (*tunable porosity*) menjadikannya adsorben yang ideal untuk polutan target (Russo *et al*., 2020).

Integrasi antara karbon aktif dan *Metal Organic Frameworks* (MOFs) dalam bentuk material komposit menjadi strategi yang menjanjikan untuk menghasilkan adsorben dengan kinerja yang lebih baik. Karbon aktif memiliki struktur yang tidak teratur dengan volume pori sebesar 0,40 cm^3/g dan luas permukaan 380 m^2/g. Komposit karbon aktif-MOFs memiliki struktur berbentuk kristal dengan volume pori mencapai 0,72 cm^3/g dan luas permukaan 815 m^2/g. Hal ini menunjukkan bahwa komposit ini memiliki porositas dan luas permukaan yang lebih besar dibandingkan karbon aktif biasa. Kombinasi antara karbon aktif dan MOFs tidak hanya memanfaatkan efektivitas adsorpsi massal dari karbon aktif tetapi juga menambahkan situs aktif yang spesifik dari MOFs, sehingga menghasilkan material komposit dengan sinergi optimal untuk penyerapan ion logam berat (Munoz-Senmache *et al*., 2020).

MOFs Cu-TAC, yang dibentuk dari ion tembaga (Cu^{2+}) sebagai pusat logam dan asam tereftalat (*terephthalic acid*) sebagai ligan organik. Keberadaan gugus karboksilat (-COOH) pada ligan TAC sangat penting karena gugus ini bermuatan negatif dan mampu membentuk ikatan koordinasi yang kuat dengan ion logam positif sehingga secara signifikan meningkatkan kapasitas adsorpsi (Zubir *et al*., 2021). MOFs Cu-TAC dikenal memiliki struktur yang stabil, luas permukaan spesifik yang sangat besar, dan pori-pori yang ideal untuk digunakan sebagai matriks penyerap dalam kondisi perairan. Ketika dikompositkan dengan karbon aktif dari TKKS, MOFs Cu-TAC berperan sebagai peningkat (*enhancer*) yang tidak hanya meningkatkan luas permukaan, tetapi juga menyediakan situs aktif yang spesifik untuk interaksi dengan ion logam di larutan. MOFs Cu-TAC memiliki keunggulan dalam stabilitas termal dan kimia, yang menjadikannya pilihan ideal untuk aplikasi pengolahan air (Russo *et al*., 2020).

Selain memanfaatkan limbah biomassa, penelitian ini juga

mengintegrasikan pemanfaatan limbah plastik jenis *polyethylene terephthalate* (PET) sebagai sumber ligan organik dalam sintesis MOFs. Indonesia sendiri termasuk lima besar penyumbang sampah plastik laut di dunia, dengan sekitar 5,4 juta ton plastik dihasilkan per tahun, dan 19,2% dari total sampah nasional pada tahun 2023 merupakan plastik (KLHK, 2024). Plastik PET merupakan polimer yang sangat resisten terhadap degradasi alami dan dapat bertahan ratusan tahun di lingkungan (Jia *et al*., 2023). Limbah plastik PET dapat didepolimerisasi untuk menghasilkan asam tereftalat yang selanjutnya digunakan sebagai ligan dalam pembentukan struktur MOFs berbasis tembaga. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan nilai guna limbah plastik, tetapi juga mendukung konsep ekonomi sirkular dalam pengembangan material fungsional berbasis limbah (Nguyen & Chiang, 2024).

Sintesis komposit Kabon Aktif dengan MOFs $Cu(TAC)_2$ berhasil dilakukan dengan perbandingan logam, ligan, dan karbon aktif sebesar 1:2:3. Pada proses pembuatan komposit KA-$Cu(TAC)_2$, karbon aktif berfungsi sebagai *template* untuk membentuk pori-pori terbuka, sedangkan ligan asam tereftalat meningkatkan luas permukaan, diameter pori, dan volume sel material (Permana, 2024). Karakterisasi XRD menunjukkan bahwa karbon aktif bersifat amorf, sedangkan MOFs $Cu(TAC)_2$ dan KA-$Cu(TAC)_2$ memperlihatkan pola kristal berbeda, yaitu triklinik, monoklinik, atau kombinasi keduanya. Analisis SEM mengungkapkan bahwa KA-$Cu(TAC)_2$ memiliki morfologi serabut tidak beraturan (Nugraha, 2024). Hasil uji EDX memperlihatkan komposisi unsur yang didominasi karbon (52–61%). Kandungan Cu meningkat pada KA-$Cu(TAC)_2$ sebesar 3,9% dibandingkan MOFs $Cu(TAC)_2$ murni sebesar 2,9% (Nugraha, 2024). Distribusi unsur yang merata ini menunjukkan bahwa penambahan karbon aktif tidak hanya berperan sebagai pengisi pori, tetapi juga memperkuat integrasi logam dalam kerangka $Cu(TAC)_2$.

Selain itu, perbedaan rasio antara ion logam (Cu^{2+}), ligan TAC, dan karbon aktif dari TKKS dalam pembentukan komposit juga berpengaruh signifikan terhadap struktur material dan performa adsorpsi. Beberapa rasio yang telah diuji menunjukkan hasil karakterisasi yang tidak stabil atau tidak homogen, baik dari segi morfologi maupun distribusi unsur (Nugraha, 2024). Penelitian tentang adsorpsi Cu(II) menggunakan KA-$Cu(TAC)_2$ sendiri masih sangat terbatas;

misalnya, Jasmidi *et al*. (2021) melaporkan hasil kesetimbangan isoterm Langmuir dengan konsentrasi awal 180 ppm, tetapi belum mengeksplorasi aspek kinetika maupun termodinamika secara mendalam. Padahal, kajian kinetika diperlukan untuk memahami mekanisme kecepatan proses, sedangkan parameter termodinamika penting untuk menilai spontanitas serta energi yang terlibat dalam sistem adsorpsi (Tanjung *et al*., 2024). Kajian terhadap parameter seperti konstanta laju (k), energi bebas Gibbs (ΔG°), entalpi (ΔH°), dan entropi (ΔS°) sangat penting untuk memahami mekanisme interaksi antar ion logam dengan material adsorben dan memprediksi performa sistem pada kondisi nyata (Jasmidi *et al*., 2021).

Beberapa penelitian terdahulu telah mengevaluasi performa material komposit yang mirip dengan sistem karbon aktif-MOFs berbasis ligan tereftalat, khususnya untuk adsorpsi ion Cu(II). Trivena *et al*. (2025) melakukan kajian terhadap tiga jenis adsorben berbasis karbon aktif dari tandan kosong kelapa sawit (TKKS), yaitu karbon aktif murni, karbon aktif dimodifikasi logam Fe-Cu dan karbon aktif yang dikompositkan dengan MOFs $Cu(TAC)_2$. Analisis kinetika menggunakan model *pseudo-first-order* dan *pseudo-second-order* menunjukkan bahwa semua sistem mengikuti model kinetika *pseudo-order* dengan koefisien determinasi (R^2) sangat tinggi ($R^2 \geq 0{,}998$), yang mengindikasikan mekanisme chemisorption mendominasi adsorpsi Cu(II) pada material tersebut. Selain itu, kajian kesetimbangan menggunakan model *isotherm* Langmuir dan Freundlich juga dilakukan untuk memahami kapasitas dan karakter adsorpsi material-material itu, meskipun performa kurang optimal dibandingkan variasi lain dalam studi tersebut. Hasil-hasil ini menunjukkan bahwa modifikasi dengan $Cu(TAC)_2$ memang memengaruhi perilaku adsorpsi dan kinetik sistem karbon aktif, dan meskipun kajian termodinamika belum banyak dilaporkan untuk komposit spesifik ini, data kinetika yang tersedia menjadi dasar empiris penting untuk penelitian lanjutan mengenai mekanisme adsorpsi Cu(II) dengan material berbasis MOFs tereftalat Berbasis $Cu(TAC)_2$.

Berdasarkan urgensi permasalahan pencemaran logam berat Cu(II), potensi tinggi TKKS sebagai bahan karbon aktif, dan keunggulan $Cu(TAC)_2$ sebagai material fungsional, maka penelitian ini dilakukan untuk mengkaji sifat kinetika dan termodinamika adsorpsi ion Cu(II) menggunakan komposit karbon aktif dari

tandan kosong kelapa sawit yang dimodifikasi dengan $Cu(TAC)_2$. Ligan asam tereftalat (TAC) pada MOFs $Cu(TAC)_2$ diperoleh melalui hasil depolimerisasi limbah plastik jenis PET (*polyethylene terephthalate*).

1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijabarkan, dapat diidentifikasi beberapa permasalahan sebagai berikut:

1. Pencemaran logam berat Cu(II) di lingkungan perairan semakin meningkat akibat aktivitas industri dan bersifat toksik bagi biota air serta berpotensi membahayakan kesehatan manusia.
2. Adsorpsi menjadi metode yang efektif dan efisien untuk menghilangkan ion logam berat dari air limbah, namun keberhasilannya sangat tergantung pada jenis dan sifat adsorben yang digunakan.
3. Karbon aktif dari tandan kosong kelapa sawit (TKKS) berpotensi tinggi sebagai adsorben karena kandungan karbon dan strukturnya yang sesuai, namun secara alami masih memiliki keterbatasan dalam kapasitas penjerapan ion logam seperti Cu(II).
4. Modifikasi ligan asam tereftalat dari limbah plastik jenis PET dalam sintesis MOFs $Cu(TAC)_2$ merupakan pendekatan inovatif yang tidak hanya mengurangi dampak pencemaran plastik, tetapi juga menghasilkan material fungsional berpori tinggi dengan kestabilan kimia yang baik.
5. Modifikasi karbon aktif dengan *Metal Organic Frameworks* (MOFs), seperti MOFs $Cu(TAC)_2$, menawarkan peningkatan luas permukaan, afinitas kimia, dan efisiensi adsorpsi logam berat. Masih terbatasnya penelitian mengenai sifat kinetika dan termodinamika adsorpsi Cu(II) pada komposit KA-$Cu(TAC)_2$, yang penting untuk memahami mekanisme adsorpsi, efisiensi energi, dan model interaksi antara adsorben dan ion logam.
6. Belum ada kajian sistematis mengenai pengaruh rasio logam-ligan-karbon aktif dalam sintesis komposit terhadap efisiensi adsorpsi Cu(II), serta model isoterm dan kinetika yang paling sesuai untuk menggambarkan proses tersebut.

1.3 Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup penelitian ini dibatasi pada:

1. Penelitian ini difokuskan pada proses sintesis komposit adsorben berbasis karbon aktif dari tandan kosong kelapa sawit (TKKS) yang dimodifikasi dengan *Metal Organic Frameworks* (MOFs) $Cu(TAC)_2$, di mana ligan asam tereftalatnya diperoleh melalui pemanfaatan limbah plastik PET sebagai sumber organik alternatif.
2. Adsorben yang dihasilkan digunakan untuk mengadsorpsi ion logam Cu(II) dari larutan buatan (sintetik), bukan dari sampel limbah nyata industri.
3. Penelitian ini secara khusus mengkaji parameter kinetika dan termodinamika adsorpsi, termasuk model kinetika (misalnya pseudo-orde satu dan dua), model isoterm (Langmuir dan Freundlich), serta parameter termodinamika ($\Delta G°$, $\Delta H°$, $\Delta S°$) untuk mengetahui mekanisme dan karakter proses adsorpsi.
4. Karakterisasi material adsorben dilakukan melalui analisis fisis dan kimia yang meliputi analisis luas permukaan (BET), morfologi (SEM), struktur kristal (XRD), komposisi unsur (EDX) dan struktur molekul (FTIR). Selain itu, efektivitas adsorpsi ditentukan menggunakan AAS untuk menganalisis performa adsorpsi ion logam sisa setelah proses adsorpsi.
5. Lingkup penelitian tidak mencakup aplikasi terhadap air limbah aktual industri, uji toksisitas terhadap organisme hidup, regenerasi adsorben, maupun pengaruh parameter lingkungan jangka panjang.
6. Variasi yang diuji terbatas pada rasio tertentu antara logam Cu^{2+}, ligan TAC, dan karbon aktif TKKS berdasarkan rasio optimal yang dirujuk dari studi sebelumnya.

1.4 Batasan Masalah

Agar penelitian lebih tefokus dan terarah, maka Batasan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Penelitian ini hanya membahas adsorpsi ion logam Cu(II) sebagai polutan target.
2. Proses adsorpsi dilakukan menggunakan larutan Cu(II) sintetik dalam kondisi terkontrol di laboratorium, bukan air limbah industri sesungguhnya.
3. Material adsorben yang digunakan adalah komposit karbon aktif dari tandan kosong kelapa sawit (TKKS) yang dimodifikasi dengan MOFs $Cu(TAC)_2$. Tidak dilakukan perbandingan dengan jenis MOFs atau karbon aktif lainnya.

4. Variabel yang dikaji dibatasi pada variasi Massa, konsentrasi, waktu kontak dan suhu, hanya dalam konteks perhitungan kinetika dan termodinamika adsorpsi.
5. Karakterisasi material hanya dilakukan dengan analisis permukaan, bentuk dan struktur molekul (SEM, XRD, FTIR) dan AAS untuk analisis performa adsorpsi ion logam, tanpa uji toksisitas, uji regenerasi adsorben, atau analisis dampak lingkungan lebih lanjut.
6. Proses sintesis komposit KA-Cu(TAC)$_2$ dibatasi pada metode yang telah terstandardisasi dari penelitian sebelumnya, tanpa optimasi reaksi atau skala produksi besar.

1.5 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijabarkan, maka dapat disusun rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana struktur kristal dan morfologi pemukaan komposit KA-Cu(TAC)$_2$ dengan menggunakan variasi perbandingan logam, ligan dan karbon aktif (1:2:3) sebagai adsoben ion Cu(II)?
2. Bagaimana kondisi optimum adsorpsi Cu(II) oleh komposit KA-Cu(TAC)$_2$ ditinjau dari variasi massa adsorben, konsentrasi larutan, waktu kontak dan suhu berdasarkan kapasitas adsorpsi dan efisiensi adsorpsi?
3. Bagaimana sifat kesetimbangan isoterm adsorpsi Cu(II) pada komposit KA-Cu(TAC)$_2$ pada kondisi optimum berdasarkan variasi konsentrasi ditinjau dari model isoterm langmuir dan isoterm freundlich?
4. Bagaimana mekanisme kinetika adsorpsi Cu(II) pada komposit KA-Cu(TAC)$_2$ berdasarkan variasi waktu kontak ditinjau dari model *pseudo-first-order* dan *pseudo-second-order*?
5. Bagaimana parameter termodinamika ($\Delta G°$, $\Delta H°$, $\Delta S°$) dari proses adsorpsi Cu(II) pada komposit KA-Cu(TAC)$_2$ berdasarkan variasi suhu serta implikasinya terhadap spontanitas dan sifat energi sistem?

1.6 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah diatas, maka tujuan dari penelitian ini sebagai berikut:

1. Mengetahui struktur kristal dan morfologi pemukaan komposit KA-Cu(TAC)$_2$

dengan menggunakan variasi perbandingan logam, ligan dan karbon aktif (1:2:3).

2. Mengetahui kondisi optimum adsorpsi Cu(II) oleh komposit KA-$Cu(TAC)_2$ ditinjau dari variasi massa adsorben, konsentrasi larutan, waktu kontak dan suhu.
3. Mengetahui sifat kesetimbangan isoterm adsorpsi Cu(II) pada komposit KA-$Cu(TAC)_2$ berdasarkan model isoterm langmuir atau isoterm freundlich.
4. Mengetahui mekanisme kinetika Cu(II) pada komposit KA-$Cu(TAC)_2$ berdasarkan model model *pseudo-first-order* atau *pseudo-second-order*.
5. Mengetahui parameter termodinamika ($\Delta G°$, $\Delta H°$, $\Delta S°$) dari proses adsorpsi Cu(II) pada komposit KA-$Cu(TAC)_2$ serta implikasinya terhadap spontanitas dan sifat energi sistem.

1.7 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat baik secara teoritis maupun praktis. Secara teoritis, penelitian ini berkontribusi pada pengembangan ilmu di bidang kimia lingkungan dan ilmu material, khususnya dalam hal sintesis dan karakterisasi komposit karbon aktif berbasis tandan kosong kelapa sawit (TKKS) yang dimodifikasi MOFs $Cu(TAC)_2$ dengan ligan asam tereftalat dari limbah plastik jenis PET dalam sintesis MOFs $Cu(TAC)_2$. Hasil penelitian ini juga memperkaya referensi ilmiah mengenai mekanisme adsorpsi logam berat, terutama ion Cu(II), melalui kajian mendalam terhadap aspek kinetika dan termodinamika adsorpsi, serta validasi model-model adsorpsi seperti pseudo-orde satu, pseudo-orde dua, Langmuir dan Freundlich.

Secara praktis, penelitian ini diharapkan dapat menjadi solusi alternatif yang efektif dan ramah lingkungan untuk mengatasi pencemaran logam berat, khususnya Cu(II), di lingkungan perairan. Pemanfaatan limbah tandan kosong kelapa sawit sebagai bahan baku karbon aktif memberikan nilai tambah terhadap limbah pertanian yang selama ini belum dimanfaatkan secara optimal. Kemudian memberikan alternatif solusi ramah lingkungan terhadap permasalahan akumulasi limbah plastik PET, melalui pendekatan daur ulang kimia yang bernilai tambah tinggi. Pemanfaatan PET sebagai sumber ligan tereftalat dalam sintesis MOFs $Cu(TAC)_2$ dapat menekan ketergantungan terhadap bahan kimia komersial.

Komposit KA-Cu(TAC)$_2$ yang dikembangkan dapat diaplikasikan sebagai material penyerap dalam sistem pengolahan limbah skala kecil maupun skala industri, terutama di daerah yang memiliki potensi limbah Cu(II) tinggi. Penelitian ini diharapkan dapat mendukung dalam pengelolaan lingkungan dan mendorong inovasi pemanfaatan sumber daya lokal dalam bidang teknologi pengolahan air.

UNIVERSITAS NEGERI MEDAN
UNIMED
THE Character Building UNIVERSITY