BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Karakterisasi XRD menunjukkan bahwa komposit KA–$Cu(TAC)_2$ memiliki dua sistem kristal sekaligus, yaitu triklinik dengan parameter kisi a = 7,6 Å, b = 7,9 Å, c = 5,5 Å dan monoklinik dengan parameter kisi a = 10,6 Å, b = 10,1 Å, c = 8,9 Å. Karakterisasi SEM memperlihatkan bahwa partikel-partikel MOFs $Cu(TAC)_2$ terdistribusi secara merata pada permukaan matriks karbon aktif tanpa membentuk aglomerasi besar, yang mengindikasikan keberhasilan proses pengompositan secara struktural dan menghasilkan material adsorben dengan aksesibilitas situs aktif yang lebih baik dibandingkan karbon aktif tanpa modifikasi.
2. Variasi parameter operasional menunjukkan bahwa kondisi optimum adsorpsi ion Zn(II) oleh komposit KA–$Cu(TAC)_2$ dicapai pada massa adsorben 1 gram, konsentrasi awal 180 ppm, waktu kontak 30 menit, dan suhu 25°C (298 K), dengan kapasitas adsorpsi optimum sebesar 9,66 mg/g dan efisiensi penyerapan 53,69%. Nilai kapasitas adsorpsi komposit KA–$Cu(TAC)_2$ secara konsisten lebih tinggi dibandingkan karbon aktif tanpa modifikasi pada seluruh kondisi yang diuji, yang menegaskan bahwa integrasi fase MOFs $Cu(TAC)_2$ pada matriks karbon aktif secara nyata meningkatkan kinerja adsorpsi.
3. Kesetimbangan isoterm adsorpsi ion Zn(II) oleh komposit KA–$Cu(TAC)_2$ pada kondisi optimum mengikuti model isoterm Freundlich, dengan nilai koefisien determinasi R^2 = 0,9880. Pemodelan menggunakan persamaan linearisasi Langmuir tidak dapat diterima untuk adsorben ini karena menghasilkan parameter yang tidak bermakna secara fisis, yakni nilai kapasitas adsorpsi maksimum (q_{max}) dan konstanta afinitas (K_L) yang keduanya bernilai negatif, sehingga model tersebut dinyatakan gugur.

Kesesuaian yang tinggi terhadap model Freundlich mengindikasikan bahwa proses adsorpsi berlangsung pada permukaan yang bersifat heterogen dengan distribusi energi pengikatan yang bervariasi dan memungkinkan adsorpsi multilayer. Hal ini konsisten secara struktural dengan karakter komposit KA–$Cu(TAC)_2$ yang tersusun atas matriks karbon aktif berpori heterogen dan kerangka MOFs $Cu(TAC)_2$ dengan situs koordinasi logam yang beragam. Nilai parameter 1/n sebesar 1,365 mengindikasikan adanya interaksi kooperatif yang kuat antara ion Zn(II) dengan permukaan adsorben, di mana penyerapan pada satu situs aktif memfasilitasi penyerapan berikutnya secara lebih intensif.

4. Analisis kinetika adsorpsi ion Zn(II) oleh komposit KA–$Cu(TAC)_2$ menunjukkan kesesuaian terbaik dengan model pseudo-orde kedua dengan nilai koefisien determinasi R^2 = 0,9458, sedangkan model pseudo-orde pertama menghasilkan nilai R^2 yang sangat rendah (0,427). Kesesuaian dengan model pseudo-orde kedua mengindikasikan bahwa mekanisme adsorpsi dikontrol oleh proses kimisorpsi, yang melibatkan pertukaran atau berbagi elektron antara ion Zn(II) dengan situs aktif pada permukaan komposit, khususnya melalui interaksi koordinasi dengan gugus aktif MOFs $Cu(TAC)_2$.
5. Parameter termodinamika adsorpsi ion Zn(II) oleh komposit KA–$Cu(TAC)_2$ yang diperoleh melalui persamaan Van't Hoff menunjukkan nilai entalpi standar ($\Delta H°$) sebesar −48,18 kJ/mol, nilai entropi standar ($\Delta S°$) sebesar −191,14 J/mol·K, dan nilai energi bebas Gibbs ($\Delta G°$) yang bernilai positif pada seluruh variasi suhu yang diuji. Nilai $\Delta H°$ negatif mengindikasikan bahwa proses adsorpsi bersifat eksotermik, nilai $\Delta S°$ negatif menunjukkan penurunan ketidakteraturan sistem selama proses adsorpsi, serta nilai $\Delta G°$ positif yang semakin meningkat seiring kenaikan suhu mengindikasikan bahwa proses adsorpsi bersifat non-spontan pada kondisi standar dan kespontanannya semakin menurun pada suhu yang lebih tinggi.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah diperoleh, beberapa saran

dikemukakan untuk pengembangan penelitian selanjutnya:

1. Perlu dilakukan pengujian stabilitas dan kemampuan regenerasi komposit KA–$Cu(TAC)_2$ melalui siklus adsorpsi–desorpsi berulang, guna mengevaluasi kelayakan penggunaan kembali adsorben dan efisiensi ekonomi dalam skala aplikasi yang lebih besar.
2. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengkaji pengaruh variabel pH larutan dan kehadiran ion-ion logam pengganggu (competing ions) terhadap kinerja adsorpsi komposit KA–$Cu(TAC)_2$, mengingat kondisi air limbah industri yang sesungguhnya bersifat kompleks dan mengandung berbagai kontaminan secara bersamaan.
3. Pengujian aplikasi komposit KA–$Cu(TAC)_2$ pada sampel air limbah nyata dari industri kelapa sawit (POME) perlu dilakukan sebagai validasi kinerja adsorben dalam kondisi lapangan yang sesungguhnya, sebelum material ini dipertimbangkan untuk dikembangkan dalam skala pilot maupun skala industri.

UNIVERSITAS NEGERI MEDAN
UNIMED
THE Character Building UNIVERSITY