

Kinerja Karbon Aktif Pelepah Kelapa Sawit Untuk Adsorpsi Ion Cu(II): Analisis Kinetika, Isoterm, Dan Pengaruh Aktivasi

Rannando¹, Cecep Ijang Wahyudin^{2*}, Rangga Rahmananda³, Fachri Ibrahim Nasution⁴, Rahayu Dwi Ningtyas⁵, Ronal Castro⁶, Bajora Justisia⁷

^{1,2,4,6,7} Institut Teknologi Perkebunan Pelalawan Indonesia

^{3,5} Institut Pertanian Stiper Yogyakarta

*Author Correspondence. Email : cecep.i.w@gmail.com

Informasi Artikel	Abstract
Kata Kunci: Karbon Aktif; Pelepah Kelapa Sawit; Cu(II); Adsorpsi; Kinetika; Isoterm.	Pencemaran logam berat, khususnya Cu(II), menjadi salah satu permasalahan penting dalam pengelolaan kualitas air sehingga diperlukan material adsorben yang efektif, ekonomis, dan terbarukan. Pelepah kelapa sawit merupakan limbah biomassa yang berpotensi dikonversi menjadi karbon aktif untuk aplikasi adsorpsi logam berat. Penelitian ini bertujuan mensintesis temuan penelitian terdahulu mengenai kinerja karbon aktif berbahan pelepah kelapa sawit dalam adsorpsi Cu(II), dengan fokus pada dosis adsorben, waktu kontak, perlakuan aktivasi, kinetika adsorpsi, dan model isoterm. Penelitian dilakukan menggunakan metode literature review melalui sintesis naratif dan analisis komparatif terhadap penelitian yang relevan. Hasil sintesis menunjukkan bahwa peningkatan dosis adsorben dan waktu kontak secara umum dapat meningkatkan efisiensi penyisihan Cu(II) pada kondisi eksperimen yang sebanding. Salah satu penelitian adsorpsi Cu(II) melaporkan efisiensi penyisihan sebesar 37,34% pada dosis adsorben 1,5 g dan waktu kontak 40 menit, dibandingkan 31,46% pada dosis 1,0 g. Studi karakterisasi juga menunjukkan bahwa aktivasi dapat mengubah sifat permukaan karbon secara signifikan, dengan karbon teraktivasi H₃PO₄ memiliki luas permukaan 307,692 m²/g, sedangkan karbon tanpa aktivasi sebesar 15,149 m²/g. Hasil sintesis kinetika menunjukkan bahwa model pseudo-orde kedua memiliki nilai R² lebih tinggi, yaitu 0,9972, sedangkan model Freundlich menunjukkan kesesuaian lebih tinggi dibandingkan model Langmuir dengan nilai R² sebesar 0,9990. Secara keseluruhan, literatur menunjukkan bahwa karbon aktif pelepah kelapa sawit berpotensi digunakan sebagai adsorben Cu(II), meskipun kinerjanya dipengaruhi oleh kondisi aktivasi dan parameter operasi adsorpsi.
Article Info	Abstract
Keywords: Activated Carbon; Oil Palm Frond; Cu(II); Adsorption; Kinetics; Isotherm.	<i>Heavy metal pollution, particularly Cu(II), is an important concern in water quality management, highlighting the need for effective, economical, and renewable adsorbent materials. Oil palm fronds are abundant biomass waste with potential for conversion into activated carbon for heavy metal adsorption. This study aimed to synthesize findings from previous studies on the performance of oil palm frond-derived activated carbon for Cu(II) adsorption, focusing on adsorbent dosage, contact time, activation treatment, adsorption kinetics, and isotherm models. A literature review was conducted using narrative synthesis and comparative analysis of relevant studies. The synthesized findings show that increasing adsorbent dosage and contact time generally improves Cu(II) removal efficiency under comparable experimental conditions. In one reported Cu(II) adsorption study, an adsorbent dosage of 1.5 g and a contact time of 40 minutes achieved a removal efficiency of 37.34%, compared with 31.46% at a dosage of 1.0 g. Other characterization studies reported substantial changes in surface properties following activation, with H₃PO₄-activated carbon showing a surface area of 307.692 m²/g compared with 15.149 m²/g for unactivated carbon. The synthesized kinetic results showed a higher R² value for the pseudo-second-order model (0.9972), while the Freundlich model showed a higher fit than the Langmuir model, with an R² value of 0.9990. Overall, the reviewed literature indicates that oil palm frond-derived activated carbon has potential for Cu(II) adsorption, although its performance varies according to activation conditions and adsorption parameters.</i>

1. PENDAHULUAN

Pencemaran air oleh logam berat menjadi salah satu persoalan lingkungan karena sifatnya yang persisten dan berpotensi terakumulasi dalam ekosistem. Tembaga [Cu(II)] merupakan salah satu ion logam yang dapat ditemukan dalam limbah dari kegiatan industri, seperti pelapisan logam, pertambangan, dan manufaktur. Meskipun tembaga diperlukan dalam jumlah tertentu, konsentrasi yang berlebihan dapat menimbulkan risiko terhadap lingkungan dan kesehatan. Oleh karena itu, diperlukan metode pengolahan yang efektif, ekonomis, dan memanfaatkan material yang tersedia secara berkelanjutan (Sen, 2023; Wang et al., 2023).

Adsorpsi merupakan salah satu metode yang banyak digunakan untuk mengurangi kandungan logam berat dalam air karena prosesnya relatif sederhana dan memungkinkan penggunaan material berbasis biomassa. Berbagai limbah pertanian telah dikembangkan menjadi biosorben dan karbon aktif karena memiliki struktur berpori serta gugus fungsi yang dapat mendukung interaksi dengan ion logam. Pemanfaatan limbah biomassa sebagai adsorben juga memberikan nilai tambah terhadap material yang sebelumnya kurang dimanfaatkan sekaligus mendukung pengelolaan sumber daya yang lebih berkelanjutan (Karić et al., 2022; Sen, 2023).

Pelepah kelapa sawit merupakan salah satu limbah biomassa lignoselulosa yang berpotensi dikonversi menjadi karbon aktif melalui proses karbonisasi dan aktivasi. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa karbon aktif berbahan pelepah kelapa sawit dapat digunakan untuk mengadsorpsi berbagai jenis pencemar. Yusoff et al. (2021) membahas potensi karbon aktif pelepah untuk adsorpsi logam berat, sedangkan Prasaningtyas et al. (2024) menunjukkan pemanfaatannya dalam menurunkan kandungan Fe dalam air tanah. Temuan tersebut menunjukkan bahwa pelepah kelapa sawit memiliki potensi sebagai bahan dasar adsorben, tetapi karakteristik dan kinerjanya dapat berbeda *באחדות* pada jenis adsorbat dan kondisi proses.

Pada adsorpsi Cu(II), beberapa penelitian telah melaporkan hasil yang berbeda. Oktavianty dan Anggoro (2024) menunjukkan bahwa peningkatan massa adsorben dari 1,0 menjadi 1,5 g pada kondisi penelitian tertentu meningkatkan persentase penyisihan hingga 37,34% setelah waktu kontak 40 menit. Sebaliknya, Hammad et al. (2025) melaporkan penyisihan Cu(II) hingga 99,65% menggunakan karbon aktif pelepah yang diproses dengan H₃PO₄ pada kondisi eksperimen yang berbeda. Nurfatihayati et al. (2025) juga melaporkan kemampuan karbon aktif pelepah dalam mengadsorpsi ion Cu²⁺. Perbedaan hasil tersebut menunjukkan bahwa kinerja adsorben tidak dapat dinilai

hanya berdasarkan persentase penyisihan, karena dipengaruhi oleh konsentrasi awal, pH, dosis adsorben, waktu kontak, jenis aktivasi, dan karakteristik material.

Selain kondisi operasi, proses aktivasi berperan penting dalam menentukan karakteristik karbon aktif. Intifadah et al. (2025) melaporkan bahwa karbon pelepah yang diaktivasi menggunakan H_3PO_4 memiliki luas permukaan sebesar $307,692 \text{ m}^2/\text{g}$, sedangkan karbon tanpa aktivasi memiliki luas permukaan sebesar $15,149 \text{ m}^2/\text{g}$. Jasri et al. (2023) juga menunjukkan bahwa metode dan kondisi aktivasi dapat menghasilkan karakteristik pori yang berbeda. Namun, peningkatan luas permukaan tidak dapat digunakan sebagai satu-satunya indikator peningkatan kinerja adsorpsi karena porositas, distribusi ukuran pori, gugus fungsi, dan kondisi larutan juga dapat memengaruhi interaksi antara adsorben dan Cu(II) .

Kajian mengenai karbon aktif pelepah kelapa sawit telah banyak membahas proses pembuatan, karakteristik material, serta aplikasinya terhadap berbagai pencemar. Penelitian lain juga secara terpisah telah mengkaji pengaruh massa adsorben dan waktu kontak, efektivitas aktivasi, maupun model kinetika dan isoterm. Namun, masih diperlukan sintesis yang mengintegrasikan hasil-hasil tersebut secara khusus untuk adsorpsi Cu(II) . Kesenjangan kajian terletak pada belum terintegrasinya hubungan antara kondisi aktivasi, karakteristik permukaan, parameter operasi adsorpsi, serta kecocokan model kinetika dan isoterm, dengan tetap mempertimbangkan perbedaan kondisi eksperimen antarpelitian.

Selain persentase penyisihan, analisis kinetika dan isoterm diperlukan untuk memahami pola adsorpsi berdasarkan data penelitian yang tersedia. Oktaviany dan Anggoro (2024) melaporkan bahwa model pseudo-second-order memiliki kecocokan lebih tinggi dibandingkan pseudo-first-order, sedangkan model Freundlich menunjukkan kecocokan lebih tinggi dibandingkan Langmuir pada kondisi penelitian tersebut. Namun, kecocokan model berdasarkan nilai statistik tidak dapat digunakan sebagai satu-satunya dasar untuk menetapkan mekanisme adsorpsi secara mutlak tanpa didukung oleh karakterisasi material dan kondisi eksperimen yang relevan (Wang et al., 2023).

Berdasarkan kesenjangan tersebut, kajian ini bertujuan mensintesis dan membandingkan temuan penelitian terdahulu mengenai kinerja karbon aktif berbahan pelepah kelapa sawit dalam adsorpsi Cu(II) dengan fokus pada pengaruh massa adsorben, waktu kontak, kondisi aktivasi, karakteristik permukaan, kinetika, dan isoterm adsorpsi. Kontribusi kajian ini adalah menyajikan pemahaman yang lebih terintegrasi mengenai faktor-faktor yang memengaruhi kinerja adsorben serta menempatkan hasil

dari berbagai penelitian sesuai dengan kondisi eksperimennya. Dengan demikian, kajian ini diharapkan dapat memberikan dasar bagi penelitian selanjutnya dalam mengoptimalkan karbon aktif pelepah kelapa sawit sebagai adsorben Cu(II).

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Karbon Aktif Pelepah Kelapa Sawit

Pelepah kelapa sawit merupakan biomassa lignoselulosa yang dapat dikonversi menjadi karbon aktif melalui proses karbonisasi dan aktivasi. Struktur karbon yang dihasilkan memiliki pori dan gugus fungsi yang dapat berperan sebagai situs adsorpsi. Achmad et al. (2020) mengembangkan karbon aktif dari pelepah kelapa sawit dan melakukan karakterisasi menggunakan FTIR, SEM, dan BET untuk mengetahui perubahan karakteristik permukaan setelah modifikasi. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pelepah kelapa sawit dapat dikembangkan menjadi material karbon aktif yang memiliki karakteristik sesuai untuk digunakan sebagai adsorben.

Selain digunakan untuk zat warna, karbon aktif pelepah juga dapat diaplikasikan untuk mengadsorpsi ion logam. Andriansyah et al. (2023) menghasilkan karbon aktif dari limbah pelepah kelapa sawit melalui karbonisasi dan aktivasi menggunakan H_3PO_4 untuk menyerap ion Fe dari air sumur. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa karakteristik bahan baku dan proses aktivasi berperan dalam menentukan kemampuan adsorben. Temuan tersebut relevan dengan pengembangan karbon aktif pelepah untuk adsorpsi Cu(II), karena keduanya sama-sama melibatkan interaksi ion logam dengan permukaan material karbon.

2.2 Aktivasi dan Karakteristik Permukaan

Aktivasi merupakan tahap penting untuk meningkatkan karakteristik adsorben karena dapat mengembangkan porositas dan mengubah gugus fungsi permukaan. Jenis aktivator serta kondisi aktivasi dapat menghasilkan karakteristik adsorben yang berbeda. Sara dan Mistar (2025) menunjukkan bahwa aktivasi pelepah kelapa sawit menggunakan NaOH menghasilkan perkembangan pori dan peningkatan gugus fungsi yang mengandung oksigen. Pada aplikasi kolom untuk adsorpsi Mn(II), kapasitas adsorpsi tertinggi mencapai 36,58 mg/g pada laju alir 5 mL/menit. Hasil ini memperlihatkan hubungan antara aktivasi, karakteristik permukaan, dan kinerja adsorpsi.

Modifikasi lebih lanjut juga dapat digunakan untuk meningkatkan kemampuan karbon aktif dalam mengikat ion logam. Zainol et al. (2017) mengembangkan karbon aktif pelepah kelapa sawit yang dimodifikasi dengan partikel magnetik dan memperoleh luas permukaan sekitar 700 m²/g. Material tersebut kemudian digunakan untuk

mengadsorpsi Pb(II), Zn(II), dan Cu(II), dengan efisiensi penyisihan hingga 100% dan kapasitas hingga 15 mg/g pada kondisi tertentu. Hasil tersebut memperlihatkan bahwa modifikasi permukaan dapat menjadi strategi untuk meningkatkan fungsi karbon aktif pelepah sebagai adsorben ion logam.

2.3 Adsorpsi Ion Cu(II)

Adsorpsi Cu(II) pada karbon aktif dipengaruhi oleh karakteristik permukaan adsorben dan kondisi proses, seperti pH, konsentrasi awal, dosis adsorben, dan waktu kontak. Dalam sistem adsorpsi, ion Cu(II) dapat berinteraksi dengan gugus fungsi yang terdapat pada permukaan karbon serta masuk ke dalam struktur pori yang tersedia. Zainol et al. (2017) membuktikan bahwa karbon aktif pelepah yang dimodifikasi dapat digunakan untuk menghilangkan Cu(II) bersama ion logam lainnya. Hasil tersebut memperkuat potensi pelepah kelapa sawit sebagai bahan dasar adsorben logam berat.

Kinerja adsorpsi juga dapat dievaluasi melalui pengaruh waktu kontak dan jumlah adsorben. Prasaningtyas et al. (2024), meskipun menggunakan Fe sebagai adsorbat, menunjukkan bahwa karbon aktif pelepah kelapa sawit mampu mencapai efisiensi penyisihan 99,56% pada kondisi dosis 5 g/L dan waktu kontak 30 menit. Temuan tersebut menunjukkan bahwa parameter operasi mempunyai peranan penting dalam menentukan efektivitas adsorben. Prinsip tersebut menjadi dasar untuk menganalisis pengaruh massa adsorben dan waktu kontak pada adsorpsi Cu(II).

2.4 Kinetika dan Isoterm Adsorpsi

Kinetika dan isoterm merupakan dua pendekatan penting untuk mengevaluasi proses adsorpsi. Kinetika menggambarkan perubahan adsorpsi terhadap waktu, sedangkan isoterm menjelaskan hubungan antara konsentrasi adsorbat dan jumlah adsorbat yang terikat pada kondisi kesetimbangan. Oktavianty dan Anggoro (2024) menunjukkan bahwa adsorpsi Cu(II) menggunakan karbon aktif pelepah lebih sesuai dengan model pseudo-second-order dibandingkan pseudo-first-order. Model Freundlich juga memberikan kecocokan lebih tinggi daripada Langmuir pada kondisi penelitian tersebut.

Hasil kajian tersebut menunjukkan bahwa analisis kinerja karbon aktif pelepah tidak cukup hanya menggunakan persentase penyisihan. Parameter kinetika dan isoterm diperlukan untuk memahami pola perubahan adsorpsi dan kecenderungan interaksi pada permukaan adsorben. Dengan demikian, kajian karbon aktif pelepah kelapa sawit untuk Cu(II) perlu menghubungkan jenis dan kondisi aktivasi, karakteristik permukaan, massa adsorben, waktu kontak, kapasitas adsorpsi, model kinetika, dan model isoterm.

Hubungan tersebut menjadi dasar untuk mengevaluasi kinerja adsorben secara lebih menyeluruh.

3. METODE

Kajian ini menggunakan pendekatan *literature review* dengan sintesis naratif dan analisis komparatif untuk mengidentifikasi, menelaah, dan mengintegrasikan hasil penelitian terdahulu mengenai karbon aktif berbahan pelepah kelapa sawit untuk adsorpsi ion Cu(II). Kajian ini tidak melakukan eksperimen baru, tetapi menganalisis dan membandingkan data yang telah dipublikasikan. Tahapan kajian meliputi penelusuran literatur, seleksi sumber, ekstraksi data, analisis komparatif, dan sintesis hasil. Pendekatan tersebut digunakan untuk memperoleh gambaran terpadu mengenai hubungan antara karakteristik adsorben, kondisi aktivasi, parameter operasi, kinetika, dan isoterm adsorpsi.

Penelusuran literatur dilakukan melalui basis data ilmiah dengan menggunakan kata kunci *oil palm frond activated carbon*, *palm frond*, *Cu(II) adsorption*, *copper ion adsorption*, *activation*, *adsorption kinetics*, dan *adsorption isotherm*. Literatur yang dipertimbangkan meliputi artikel penelitian yang membahas karbon aktif atau adsorben berbahan pelepah kelapa sawit, proses aktivasi, karakteristik permukaan, serta aplikasinya dalam adsorpsi logam berat, khususnya Cu(II). Seleksi sumber mempertimbangkan kesesuaian topik, kredibilitas publikasi, keterlacakan informasi eksperimen, ketersediaan data yang dapat dianalisis, dan relevansi terhadap tujuan kajian. Literatur yang tidak berkaitan dengan pelepah kelapa sawit, tidak menyediakan informasi yang relevan, atau tidak memungkinkan penelusuran data utama tidak digunakan dalam sintesis. Proses pencarian dan evaluasi literatur dilakukan secara terarah untuk memastikan sumber yang digunakan memiliki relevansi dan dasar informasi yang memadai (Creswell & Creswell, 2023; Saunders et al., 2023).

Berdasarkan proses penelusuran dan seleksi, sebanyak [30] artikel diidentifikasi pada tahap awal dan [16] artikel memenuhi kriteria untuk digunakan dalam kajian akhir. Data diekstraksi dari setiap artikel yang terpilih berdasarkan beberapa aspek, yaitu jenis bahan adsorben, jenis dan kondisi aktivasi, massa adsorben, konsentrasi awal Cu(II), pH, waktu kontak, konsentrasi akhir, persentase penyisihan, kapasitas adsorpsi, luas permukaan, serta model kinetika dan isoterm. Data utama mengenai kinerja adsorpsi Cu(II) diperoleh dari Oktavianty dan Anggoro (2024), sedangkan penelitian lainnya digunakan sebagai pembanding untuk menjelaskan pengaruh aktivasi dan karakteristik material. Data yang diperoleh langsung dari sumber dibedakan dari data yang dihitung kembali oleh peneliti berdasarkan informasi yang tersedia dalam artikel.

Kapasitas adsorpsi dihitung berdasarkan persamaan:

$$q_e = (C_0 - C_e)V/m$$

dengan q_e merupakan kapasitas adsorpsi pada kesetimbangan (mg/g), C_0 merupakan konsentrasi awal adsorbat (mg/L), C_e merupakan konsentrasi adsorbat pada kesetimbangan (mg/L), V merupakan volume larutan (L), dan m merupakan massa adsorben (g). Apabila nilai kapasitas adsorpsi dihitung kembali dari data penelitian terdahulu, hasil tersebut dinyatakan sebagai hasil perhitungan dalam kajian ini dan tidak diperlakukan sebagai nilai yang dilaporkan langsung oleh penulis sumber.

Analisis dilakukan secara deskriptif-komparatif dengan membandingkan hasil penelitian berdasarkan kondisi eksperimen masing-masing. Analisis kinerja adsorpsi mencakup perubahan persentase penyisihan dan kapasitas adsorpsi berdasarkan massa adsorben dan waktu kontak. Pengaruh aktivasi dianalisis dengan membandingkan karakteristik permukaan dan hasil adsorpsi berdasarkan jenis aktivator yang digunakan. Analisis kinetika difokuskan pada model pseudo-first-order dan pseudo-second-order, sedangkan analisis isoterm mencakup model Langmuir dan Freundlich. Kesesuaian model dinilai berdasarkan parameter statistik yang dilaporkan dalam penelitian sumber, terutama nilai koefisien determinasi (R^2).

Interpretasi hasil dilakukan dengan mempertimbangkan perbedaan konsentrasi awal, pH, massa adsorben, waktu kontak, jenis aktivator, metode aktivasi, dan karakteristik material. Oleh karena itu, nilai persentase penyisihan, kapasitas adsorpsi, luas permukaan, dan parameter model tidak dibandingkan secara langsung apabila kondisi eksperimennya berbeda secara substantif. Nilai R^2 juga digunakan untuk menunjukkan tingkat kesesuaian model terhadap data, bukan sebagai satu-satunya dasar untuk menentukan mekanisme adsorpsi. Selanjutnya, hasil dari seluruh literatur disintesis untuk mengidentifikasi pola hubungan antara kondisi aktivasi, karakteristik permukaan, parameter operasi, kinetika, dan isoterm dalam menentukan kinerja karbon aktif pelepah kelapa sawit untuk adsorpsi Cu(II).

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Kinerja Karbon Aktif Pelepah Kelapa Sawit dalam Adsorpsi Cu(II)

Hasil sintesis penelitian terdahulu menunjukkan bahwa karbon aktif berbahan pelepah kelapa sawit memiliki kemampuan dalam mengadsorpsi ion Cu(II), meskipun tingkat penyisihannya dipengaruhi oleh kondisi operasi. Oktavianty dan Anggoro (2024) melaporkan bahwa karbon aktif pelepah kelapa sawit mampu menurunkan konsentrasi Cu(II) dari konsentrasi awal sekitar 100,05 ppm. Pada massa adsorben 1,0 g, konsentrasi Cu(II) menurun dari 100,05 menjadi 68,59 ppm setelah 40 menit dengan

persentase penyisihan sebesar 31,46%. Ketika massa adsorben ditingkatkan menjadi 1,5 g, konsentrasi akhir menurun menjadi 62,71 ppm dengan persentase penyisihan sebesar 37,34%

Peningkatan penyisihan pada massa adsorben yang lebih tinggi dapat dikaitkan dengan bertambahnya jumlah situs aktif yang tersedia untuk berinteraksi dengan ion Cu(II). Semakin banyak adsorben yang digunakan, semakin besar peluang ion logam mengalami kontak dengan permukaan adsorben. Namun, peningkatan massa adsorben tidak selalu menghasilkan peningkatan kapasitas adsorpsi per satuan massa. Berdasarkan persamaan $q_e = (C_0 - C_e)V/m$, pada waktu kontak 40 menit kapasitas adsorpsi massa 1,0 g mencapai 1,573 mg/g, sedangkan massa 1,5 g menghasilkan 1,245 mg/g. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa efektivitas penyisihan dan kapasitas adsorpsi merupakan dua parameter yang perlu dianalisis secara bersamaan.

Tabel 1. Adsorpsi Cu(II) Berdasarkan Massa dan Waktu Kontak

Massa adsorben	Waktu kontak	C ₀ (ppm)	C _e (ppm)	Penyisihan (%)	q _e (mg/g)
1,0 g	10 menit	100,05	85,33	14,72	0,736
1,0 g	20 menit	100,05	79,72	20,33	1,017
1,0 g	30 menit	100,05	74,48	25,57	1,279
1,0 g	40 menit	100,05	68,59	31,46	1,573
1,5 g	10 menit	100,05	83,49	16,56	0,552
1,5 g	20 menit	100,05	75,26	24,79	0,826
1,5 g	30 menit	100,05	69,15	30,90	1,030
1,5 g	40 menit	100,05	62,71	37,34	1,245

Sumber: diolah dari Oktavianty dan Anggoro (2024).

Pada kedua variasi massa, peningkatan waktu kontak dari 10 hingga 40 menit diikuti peningkatan penyisihan Cu(II). Pada massa 1,0 g, penyisihan meningkat dari 14,72% menjadi 31,46%, sedangkan pada massa 1,5 g meningkat dari 16,56% menjadi 37,34%. Pola tersebut menunjukkan bahwa dalam rentang waktu yang diamati, proses perpindahan ion Cu(II) dari larutan menuju permukaan karbon masih berlangsung. Pada tahap awal, konsentrasi ion Cu(II) yang tinggi menghasilkan gaya pendorong perpindahan massa yang relatif besar sehingga ion lebih mudah mencapai situs aktif. Seiring bertambahnya waktu, situs adsorpsi secara bertahap terisi dan laju adsorpsi berpotensi mengalami perlambatan.

Temuan tersebut juga dapat dibandingkan dengan penelitian Hammad et al. (2025), yang menggunakan karbon aktif pelepah kelapa sawit teraktivasi H₃PO₄ dan

melaporkan penyisihan Cu(II) hingga 99,65% pada kondisi eksperimen tertentu dengan waktu kontak 90 menit. Perbedaan antara nilai 37,34% dan 99,65% tidak menunjukkan pertentangan hasil karena kondisi eksperimen kedua penelitian berbeda. Jenis aktivator, dosis adsorben, konsentrasi awal Cu(II), pH, waktu kontak, dan karakteristik material dapat memengaruhi efektivitas adsorpsi. Dengan demikian, kinerja karbon aktif perlu dievaluasi berdasarkan kondisi eksperimen secara menyeluruh, bukan hanya berdasarkan nilai persentase penyisihan.

4.2 Pengaruh Aktivasi terhadap Karakteristik dan Kinerja Adsorben

Aktivasi merupakan salah satu tahap penting dalam menghasilkan karbon dengan karakteristik permukaan yang sesuai untuk proses adsorpsi. Intifadah et al. (2025) menunjukkan adanya perbedaan luas permukaan yang cukup besar pada karbon berbahan pelepah kelapa sawit berdasarkan perlakuan aktivasi. Karbon tanpa aktivasi memiliki luas permukaan sebesar 15,149 m²/g, sedangkan karbon yang diaktivasi menggunakan H₃PO₄ mencapai 307,692 m²/g. Sebaliknya, karbon yang diaktivasi menggunakan NaOH pada penelitian tersebut memiliki luas permukaan sebesar 2,082 m²/g. Hasil ini menunjukkan bahwa jenis aktivator memberikan pengaruh yang kuat terhadap karakteristik permukaan karbon.

Peningkatan luas permukaan dapat memperbesar area kontak antara adsorben dan larutan sehingga memberikan peluang lebih besar bagi ion Cu(II) untuk berinteraksi dengan permukaan material. Akan tetapi, luas permukaan tidak dapat digunakan sebagai satu-satunya indikator keberhasilan aktivasi. Karakteristik pori, distribusi ukuran pori, gugus fungsi permukaan, struktur material, serta kondisi kimia larutan juga berperan dalam menentukan kemampuan adsorpsi. Hasil Intifadah et al. (2025) bahkan memperlihatkan bahwa tidak semua aktivator menghasilkan peningkatan luas permukaan. Oleh karena itu, efektivitas aktivasi sangat bergantung pada jenis aktivator dan kondisi proses yang digunakan.

Hubungan antara aktivasi dan kemampuan adsorpsi Cu(II) terlihat pada penelitian Hammad et al. (2025). Karbon aktif pelepah kelapa sawit yang diberi perlakuan H₃PO₄ dilaporkan mampu menghasilkan efisiensi penyisihan Cu(II) hingga 99,65% pada kondisi tertentu. Temuan tersebut menunjukkan potensi aktivasi kimia dalam menghasilkan adsorben dengan kinerja tinggi. Namun, nilai tersebut tidak dapat dibandingkan secara langsung dengan penyisihan 37,34% pada penelitian Oktavianty dan Anggoro (2024), karena kedua penelitian menggunakan kondisi eksperimen yang berbeda. Perbedaan konsentrasi awal, dosis adsorben, pH, waktu kontak, aktivator, dan karakteristik karbon dapat menghasilkan tingkat penyisihan yang berbeda.

Dengan demikian, aktivasi perlu dipandang sebagai proses modifikasi material yang harus dioptimalkan, bukan sekadar perlakuan untuk meningkatkan luas permukaan. Penggunaan H₃PO₄ menunjukkan potensi berdasarkan hasil karakterisasi dan penelitian adsorpsi, tetapi efektivitasnya tetap perlu dikaji pada kondisi yang terkontrol. Karakterisasi BET, SEM-EDX, FTIR, dan XRD menjadi penting untuk menghubungkan perubahan struktur, porositas, dan gugus fungsi dengan kemampuan karbon aktif dalam mengadsorpsi Cu(II).

4.3 Analisis Kinetika Adsorpsi Cu(II)

Analisis kinetika pada penelitian Oktavianty dan Anggoro (2024) menunjukkan bahwa model pseudo-second-order memiliki kesesuaian yang lebih tinggi dibandingkan model pseudo-first-order. Pada massa adsorben 1,0 g, model pseudo-first-order menghasilkan nilai R² sebesar 0,0059, sedangkan pseudo-second-order mencapai 0,9948. Pada massa adsorben 1,5 g, model pseudo-first-order juga menghasilkan R² sebesar 0,0059, sedangkan pseudo-second-order mencapai 0,9972. Berdasarkan nilai koefisien determinasi tersebut, model pseudo-second-order lebih sesuai dalam menggambarkan pola kinetika adsorpsi Cu(II) pada kondisi penelitian tersebut.

Tabel 2. Parameter Kinetika Adsorpsi Cu(II)

Massa adsorben	Model kinetika	k	R ²
1,0 g	Pseudo-first-order	0,5196	0,0059
1,0 g	Pseudo-second-order	0,0016	0,9948
1,5 g	Pseudo-first-order	0,3410	0,0059
1,5 g	Pseudo-second-order	0,0009	0,9972

Sumber: Oktavianty dan Anggoro (2024).

Dominannya model pseudo-second-order menunjukkan bahwa perubahan jumlah Cu(II) teradsorpsi terhadap waktu lebih baik direpresentasikan oleh model tersebut dibandingkan pseudo-first-order. Namun, kesesuaian model berdasarkan nilai R² tidak dapat secara langsung dijadikan bukti tunggal bahwa proses adsorpsi berlangsung melalui mekanisme kemisorpsi. Interpretasi mekanisme memerlukan dukungan dari karakterisasi permukaan, perubahan gugus fungsi, serta analisis sifat material sebelum dan sesudah adsorpsi. Oleh karena itu, hasil kinetika digunakan untuk menunjukkan model matematis yang paling sesuai dengan data sumber, bukan untuk menetapkan mekanisme adsorpsi secara mutlak.

Nilai konstanta kinetika juga menunjukkan adanya perbedaan berdasarkan massa adsorben. Konstanta pseudo-second-order pada massa 1,0 g sebesar 0,0016, sedangkan

pada massa 1,5 g sebesar 0,0009. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa peningkatan jumlah adsorben tidak selalu menghasilkan peningkatan konstanta laju adsorpsi. Penambahan adsorben memang meningkatkan jumlah situs aktif, tetapi pada saat yang sama ion Cu(II) yang tersedia dalam larutan harus terdistribusi pada jumlah situs yang lebih banyak. Oleh karena itu, parameter kinetika perlu dipahami berdasarkan kondisi eksperimen yang digunakan.

4.4 Analisis Isoterm Adsorpsi Cu(II)

Analisis isoterm menunjukkan bahwa model Freundlich memiliki nilai R^2 yang lebih tinggi dibandingkan model Langmuir pada data Oktavianty dan Anggoro (2024). Pada massa adsorben 1,0 g, model Freundlich menghasilkan R^2 sebesar 0,9757, sedangkan model Langmuir sebesar 0,9678. Pada massa adsorben 1,5 g, nilai R^2 Freundlich mencapai 0,9990, sementara Langmuir sebesar 0,9908. Hasil tersebut menunjukkan bahwa model Freundlich memberikan representasi matematis yang lebih sesuai terhadap data kesetimbangan adsorpsi pada kondisi penelitian tersebut.

Tabel 3. Parameter Isoterm Adsorpsi Cu(II)

Massa adsorben	Model isoterm	R^2
1,0 g	Langmuir	0,9678
1,0 g	Freundlich	0,9757
1,5 g	Langmuir	0,9908
1,5 g	Freundlich	0,9990

Sumber: Oktavianty dan Anggoro (2024).

Kesesuaian model Freundlich yang lebih tinggi menunjukkan bahwa data pada kondisi tersebut lebih dekat dengan asumsi permukaan adsorben yang heterogen dan distribusi energi adsorpsi yang tidak seragam. Karbon berbasis biomassa memiliki struktur permukaan yang kompleks sehingga keberadaan berbagai ukuran pori dan gugus fungsi dapat menghasilkan situs adsorpsi dengan karakteristik berbeda. Meskipun demikian, hasil tersebut tidak berarti bahwa seluruh karbon aktif pelepah kelapa sawit selalu mengikuti isoterm Freundlich. Model isoterm yang sesuai dapat berubah bergantung pada jenis aktivator, karakteristik permukaan, konsentrasi awal Cu(II), pH, massa adsorben, dan kondisi operasi lainnya.

Secara keseluruhan, hasil kajian memperlihatkan bahwa kinerja karbon aktif pelepah kelapa sawit terhadap Cu(II) dipengaruhi oleh keterkaitan antara karakteristik material dan kondisi operasi. Peningkatan massa adsorben dan waktu kontak dapat meningkatkan persentase penyisihan, sedangkan aktivasi dapat mengubah karakteristik

permukaan secara signifikan. Pada data Oktavianty dan Anggoro (2024), model pseudo-second-order memberikan kecocokan kinetika yang lebih tinggi, sedangkan model Freundlich memberikan kecocokan isoterm yang lebih tinggi. Temuan tersebut menunjukkan bahwa pengembangan karbon aktif pelepah kelapa sawit perlu mempertimbangkan optimasi aktivasi, dosis adsorben, waktu kontak, dan karakteristik permukaan secara terpadu.

4 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil sintesis penelitian terdahulu, karbon aktif berbahan pelepah kelapa sawit memiliki potensi sebagai adsorben ion Cu(II), dengan kinerja yang dipengaruhi oleh massa adsorben, waktu kontak, dan perlakuan aktivasi. Data Oktavianty dan Anggoro (2024) menunjukkan bahwa peningkatan massa adsorben dari 1,0 menjadi 1,5 g dan waktu kontak hingga 40 menit meningkatkan persentase penyisihan Cu(II), dengan nilai tertinggi sebesar 37,34%. Aktivasi juga dapat mengubah karakteristik permukaan secara signifikan, terutama luas permukaan, meskipun pengaruhnya bergantung pada jenis aktivator. Analisis kinetika menunjukkan bahwa model pseudo-second-order memiliki kecocokan lebih tinggi, sedangkan analisis isoterm menunjukkan kecocokan model Freundlich yang lebih tinggi dibandingkan Langmuir. Secara keseluruhan, pengembangan karbon aktif pelepah kelapa sawit untuk adsorpsi Cu(II) memerlukan optimasi kondisi aktivasi dan operasi secara terpadu dengan mempertimbangkan karakteristik permukaan adsorben.

5 DAFTAR PUSTAKA

- Achmad, R., Fauziah, S., & Zakir, M. (2020). Pembuatan dan modifikasi karbon aktif pelepah kelapa sawit (*Cocus nucifera* L.) sebagai adsorben metilen biru. *Indonesian Journal of Pure and Applied Chemistry*, 3(2), 1–10. <https://doi.org/10.26418/indonesian.v3i2.46309>
- Andriansyah, R., Elwina, & Suryani. (2023). Pembuatan karbon aktif dari limbah pelepah kelapa sawit (*Elaies guineesis* Jacq.) sebagai media penyerapan ion logam Fe air sumur menggunakan aktivator asam fosfat (H_3PO_4). *Jurnal Riset, Inovasi, Teknologi & Terapan*, 1(2), 30–34. <https://doi.org/10.30811/ristera.v1i2.4683>
- Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2023). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (6th ed.). SAGE Publications.
- Hammad, W. A., Alqahtani, F. M., Darweesh, M. A., Amr, M. H. A., Eweida, B., & Bakr, A. (2025). Innovative methods using palm frond-derived activated carbon for Cu(II) adsorption. *Materials Chemistry and Physics*, 339, 130568. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2025.130568>

- Intifadah, S. H., Munir, R., Hamdani, D., Natalisanto, A. I., & Mulyono, S. (2025). Surface area analysis of activated carbon material from palm frond waste using different activation agents. *Indonesian Journal of Applied Physics*, 15(1), 193–203. <https://doi.org/10.13057/ijap.v15i1.96045>
- Jasri, K., Abdulhameed, A. S., Jawad, A. H., AlOthman, Z. A., Yousef, T. A., & Al Duaij, O. K. (2023). Mesoporous activated carbon produced from mixed wastes of oil palm frond and palm kernel shell using microwave radiation-assisted K_2CO_3 activation for methylene blue dye removal: Optimization by response surface methodology. *Diamond and Related Materials*, 131, 109581. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2022.109581>
- Karić, N., Maia, A. S., Teodorović, A., Atanasova, N., Langergraber, G., Crini, G., Ribeiro, A. R. L., & Đolić, M. (2022). Bio-waste valorisation: Agricultural wastes as biosorbents for removal of (in)organic pollutants in wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal Advances*, 9, 100239. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.100239>
- Nurfatihayati, N., Irianty, R. S., Winarno, W., Yani, O. D., & Al'farisi, C. D. (2025). Kapasitas adsorpsi dan efektivitas karbon aktif pelepah kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) untuk mengadsorpsi ion logam tembaga (Cu^{2+}). *Journal of Bioprocess, Chemical and Environmental Engineering Science*, 6(1), 62–71. <https://doi.org/10.31258/jbchees.6.1.51-61>
- Oktavianty, H., & Anggoro, D. D. (2024). Adsorption kinetics of activated carbon from oil palm fronds on decreasing of copper and lead ions. *E3S Web of Conferences*, 503, 09001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202450309001>
- Prasaningtyas, A., Febrianti, N., Azzahra, R., & Ngang, D. A. (2024). The effect of contact time and oil palm frond activated carbon dose as an adsorbent in decreasing iron (Fe) in groundwater. *Jurnal Presipitasi: Media Komunikasi dan Pengembangan Teknik Lingkungan*, 21(3), 660–669. <https://doi.org/10.14710/presipitasi.v21i3.660-669>
- Sara, T., & Mistar, E. M. (2025). Karakterisasi adsorben dari limbah pelepah kelapa sawit teraktivasi natrium hidroksida untuk adsorpsi mangan. *Jurnal Teknik Kimia USU*, 14(1), 19–26. <https://doi.org/10.32734/jtk.v14i1.17898>
- Saunders, M. N. K., Lewis, P., & Thornhill, A. (2023). *Research methods for business students* (9th ed.). Pearson.

- Sen, T. K. (2023). Agricultural solid wastes based adsorbent materials in the remediation of heavy metal ions from water and wastewater by adsorption: A review. *Molecules*, 28(14), 5575. <https://doi.org/10.3390/molecules28145575>
- Wang, B., Lan, J., Bo, C., Gong, B., & Ou, J. (2023). Adsorption of heavy metal onto biomass-derived activated carbon: Review. *RSC Advances*, 13, 4275–4302. <https://doi.org/10.1039/D2RA07911A>
- Yusoff, M. S. N. M., Kamari, A., Putra, W. P., Ishak, C. F., Mohamed, A., Hashim, N., & Isa, I. M. (2021). Adsorption of heavy metals by oil palm frond-derived activated carbon: A review. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 53(1), 210104. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2021.53.1.4>
- Zainol, M. M., Amin, N. A. S., & Asmadi, M. (2017). Preparation and characterization of impregnated magnetic particles on oil palm frond activated carbon for metal ions removal. *Sains Malaysiana*, 46(5), 773–782. <https://doi.org/10.17576/jsm-2017-4605-12>