Journal of Innovative and Creativity
Journal Homepage: https://joecy.org/index.php/joecy
e-mail: journaljoecy@gmail.com

Faculty of Education
University of Pahlawan Tuanku Tambusai
ISSN 2775-771X (Online)
ISSN 2962-570X (Printed)
5 (3) 2025, Page: 37393-37400

Studi Kinetika Adsorpsi Logam Tembaga (Cu) Menggunakan Ampas Kopi dan Kulit Ari Pipil Jagung

Zakiyah Darajat[1], Mimin Septiani[2], Mahirullah[3], Arifah Sukasri[4]
[1,2,3,4]Politeknik Negeri Ujung Pandang
Corresponding Author: Zakiyah Darajat, e-mail: zakiyah.darajat@poliupg.ac.id

Published: Desember, 2025

ABSTRAK

Pencemaran logam berat tembaga (Cu) dalam limbah cair industri merupakan permasalahan lingkungan yang berbahaya karena bersifat toksik dan sulit terdegradasi secara alami. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji efektivitas ampas kopi dan kulit ari pipil jagung sebagai adsorben alternatif dalam menurunkan konsentrasi ion Cu (II) pada limbah sintetik, serta menganalisis kinetika proses adsorpsinya. Adsorben dipreparasi melalui proses pengeringan, karbonisasi pada suhu 400–500 °C, dan aktivasi kimia menggunakan larutan HCl 0,1 M. Proses adsorpsi dilakukan dalam kolom adsorpsi dengan variasi waktu kontak 10, 20, dan 30 menit. Konsentrasi Cu (II) dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kedua adsorben efektif menurunkan konsentrasi Cu (II), dengan efisiensi tertinggi sebesar 77,92% untuk ampas kopi dan 90,91% untuk kulit ari pipil jagung pada waktu kontak 30 menit. Kajian kinetika menunjukkan bahwa model pseudo orde dua (Ho) memberikan kecocokan terbaik dengan nilai R^2 masing-masing sebesar 0,993 dan 0,976, yang mengindikasikan bahwa mekanisme adsorpsi berlangsung secara kimisorpsi. Hasil ini membuktikan bahwa ampas kopi dan kulit ari pipil jagung berpotensi sebagai adsorben ramah lingkungan, murah, dan efektif untuk pengolahan limbah cair yang mengandung logam berat Cu (II).

Kata Kunci: Adsorpsi, Ampas kopi, Kulit Ari Pipil Jagung, Cu (II), Kinetika Adsorpsi, Limbah Cair

© The Author(s). 2021 Open Access This article is licensed under a Creative Commons Atibution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. To view a copy of this licence, visit http://creativecommons.org/licenses/by/4.0

PENDAHULUAN

Peningkatan jumlah penduduk yang disertai dengan kemajuan teknologi telah menyebabkan permasalahan pencemaran air semakin kompleks dan menjadi isu lingkungan yang mendapatkan perhatian luas (Nurullita & Mifbakhuddin, 2015). Pelepasan limbah logam berat ke badan perairan dalam jumlah besar akibat aktivitas industri dan pertumbuhan kawasan perkotaan telah menjadi permasalahan lingkungan berskala global. Berbeda dengan senyawa pencemar organik yang umumnya dapat terurai secara biologis, ion logam berat bersifat persisten dan sulit mengalami degradasi menjadi senyawa yang aman bagi lingkungan. Kondisi ini menyebabkan terjadinya akumulasi logam berat di perairan hingga melampaui ambang batas yang diperkenankan, sehingga berpotensi menimbulkan dampak toksik bagi berbagai organisme hidup (Nurhidayati et al., 2022). Salah satu jenis pencemar yang terkandung dalam limbah perairan adalah logam berat tembaga (Cu) yang bersifat toksik dan berpotensi karsinogenik, sehingga dapat membahayakan lingkungan apabila tidak dilakukan pengolahan terlebih dahulu (Mayangsari & Astuti, 2021).

Upaya pengurangan pencemar dalam perairan dapat dilakukan melalui metode kimia, fisika, dan biologi. Sejumlah teknologi pengolahan air limbah yang mengandung logam berat telah dikembangkan, antara lain koagulasi, presipitasi, pertukaran ion, teknologi membran, reverse osmosis, bioremediasi, koagulasi–flokulasi, dan adsorpsi. Akan tetapi, penerapan metode-metode tersebut untuk menghilangkan ion Cu (II) masih terkendala oleh tingginya biaya operasional, kompleksitas proses, terbentuknya residu limbah, serta kebutuhan energi yang besar. Dibandingkan metode yang lain, adsorpsi menjadi pilihan yang lebih unggul karena efisien, ekonomis, mudah dioperasikan, tidak menghasilkan lumpur berlebih, serta fleksibel untuk berbagai aplikasi pengolahan

limbah cair (Afandy & Sawali, 2024). Metode adsorpsi merupakan proses penghilangan ion logam berat dalam air limbah melalui mekanisme penjerapan secara fisik maupun kimia oleh material adsorben yang memiliki struktur berpori atau gugus fungsi khusus dengan luas permukaan spesifik yang tinggi. Material adsorben dapat diklasifikasikan berdasarkan struktur kimianya menjadi material polimer, material anorganik, material berbasis karbon, dan material adsorben biologis (B. Wang et al., 2023).

Tabel 1. Berbagai Jenis Adsorben

Jenis Adsorben	Adsorben	Luas Permukaan BET (m^2/g)	Ukuran Pori (nm)	Karakteristik	Ref.
Adsorben Polimer	Resin Poliakrilamida	≤ 1000	0,3 – 4	Laju adsorpsi tinggi, kapasitas adsorpsi besar, kinerja baik, stabil terhadap basa, tidak stabil terhadap asam anorganik, baik untuk pengolahan air limbah organik, sifat antistatik rendah, selektivitas menurun setelah regenerasi, dan tahan panas	(K. Wang et al., 2019)
Adsorben Anorganik	Aluminimum Oksida (Alumina)	200 – 300	2 – 30	Stabilitas tinggi, kinerja pemurnian gas asam limbah yang baik, umur pakai relatif rendah.	(Ren et al., 2022)
	Zeolit	500 – 1000	0,4 – 1	Struktur mikropori teratur, stabilitas termal dan hidrotermal baik, selektivitas tinggi, kinerja adsorpsi baik, untuk adsorpsi anion rentan terjadi penyumbatan pori.	(Yang et al., 2019)
Adsorben Berbasis Karbon	Karbon Aktif	500 – 1000	2 – 30	Kaya akan struktur mikropori dan mesopori, mampu mengadsorpsi senyawa organik, logam berat, hidrokarbon berat, dan zat organik lainnya.	(Shahrivar & Gharabaghi, 2020)
Adsorben Biomassa	Mikroalga	-	-	Pertumbuhan dan reproduksi cepat, toleransi tinggi, efisiensi penghilangan tinggi, stabilitas sistem rendah, rentan terhadap pencemaran dan kematian, membutuhkan pelatihan dan peralatan yang tinggi, kurang praktis untuk aplikasi lapangan.	(Saraleguiet al., 2021)
	Limbah Pertaniam	-	-	Sumber melimpah, biaya rendah, mampu mengadsorpsi zat warna dan logam berat, tidak dapat didaur ulang, berpotensi menimbulkan pencemaran sekunder.	(Piol et al., 2021)

Limbah pertanian merupakan material lignoselulosa yang tersusun atas tiga komponen struktur utama, yaitu selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Lignoselulosa sendiri merupakan polimer karbohidrat yang terdiri dari selulosa dan hemiselulosa, disertai lignin serta sejumlah kecil senyawa ekstraktif, garam, dan mineral. Struktur utama komponen lignoselulosa pada limbah pertanian umumnya terdiri atas selulosa sekitar 30–35%, hemiselulosa 20–40%, lignin 15–25%, serta fraksi kecil berupa air, abu mineral, hidrokarbon siklik, dan senyawa ekstraktif lainnya. Selulosa diketahui berperan sebagai adsorben alami yang mampu mengikat berbagai jenis zat, termasuk air, ion logam, senyawa organik, dan zat warna. Dalam proses penjerapan logam berat menggunakan biomassa

lignoselulosa alami tanpa modifikasi, lignin memegang peranan yang sangat penting. Lignin memiliki gugus fungsi polifenol dan polihidroksi yang efektif dalam mengikat ion logam berat melalui mekanisme koordinasi dan pertukaran ion. Selain itu, lignin merupakan komponen biomassa yang paling stabil secara termal, sehingga bahan biomassa dengan kandungan lignin yang tinggi sangat potensial digunakan sebagai prekursor dalam pembuatan karbon aktif berkualitas tinggi (Abu et al., 2021).

Dalam proses adsorpsi, karbon aktif sering digunakan sebagai adsorben utama karena karakteristiknya berupa struktur homogen, luas permukaan yang besar, serta dominasi pori-pori mikro yang mendukung daya serap tinggi. Meskipun demikian, biaya produksi dan penggunaannya tergolong cukup tinggi. Sebagai solusi, pemanfaatan limbah bahan alam seperti ampas kopi dan kulit ari pipil jagung dapat dijadikan alternatif adsorben yang lebih murah, melimpah, dan ramah lingkungan (Kusumaningrum et al., 2022).

Tabel 2. Kandungan Ampas Kopi dan Kulit Pipil Jagung

Jenis Adsorben	Hemiselulosa (%)	Selulosa (%)	Lignin (%)	Kadar Air (%)	Kadar Abu (%)	Ref.
Ampas Kopi	36	8,6	24	11,69	1,3 - 1,5	(Arpit & Namrata, 2023)
Kulit Ari Pipil Jagung	26-36	33 - 43	17-21	6 - 7	2,7	(Gandam et al., 2022)

Berdasarkan komposisi di atas, ampas kopi dan kulit ari pipil jagung mengandung selulosa, hemiselulosa, dan lignin yang memiliki gugus fungsi aktif untuk mengikat ion logam. Didukung oleh kadar abu yang relatif rendah serta struktur berpori yang baik, kedua biomassa ini berpotensi dimanfaatkan sebagai adsorben alternatif yang murah, ramah lingkungan, dan efektif untuk menurunkan kadar logam tembaga (Cu) dalam limbah cair.

METODOLOGI

Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi peralatan gelas laboratorium, oven, alat karbonisasi, pengaduk, kolom adsorpsi, neraca analitik, serta instrumen spektrofotometer UV-Vis. Bahan-bahan yang digunakan meliputi ampas kopi, kulit ari pipil jagung, larutan asam klorida (HCl 0,1 N), tembaga sulfat ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$), larutan amonia (NH_3 20%), asam sulfat (H_2SO_4), akuades, dan natrium tiosulfat ($Na_2S_2O_3$ 0,1 N).

Preparasi Karbon Aktif

Ampas kopi yang diperoleh dari kedai kopi di Kota Makassar serta kulit ari pipil jagung yang berasal dari pasar tradisional Kabupaten Pangkep dikeringkan menggunakan oven pada suhu 110 °C selama ±5 jam. Khusus kulit jagung dilakukan pengecilan ukuran menggunakan blender. Selanjutnya, kedua bahan diayak menggunakan ayakan berukuran 60 *mesh*. Proses karbonisasi dilakukan pada suhu 400–500 °C selama 1 jam, kemudian didinginkan hingga suhu ruang. Aktivasi kimia dilakukan dengan merendam hasil karbonisasi ampas kopi dalam larutan HCl 0,1 M, dilanjutkan dengan pengadukan dan perendaman selama 48 jam. Setelah itu dilakukan penyaringan, pencucian menggunakan akuades hingga pH netral, dan pengeringan kembali pada suhu 110 °C hingga diperoleh massa konstan.

Proses Adsorpsi Logam Cu pada Limbah Sintetik

Pada tahap awal, dilakukan pengukuran konsentrasi awal Cu dalam limbah sintetik tanpa perlakuan adsorben. Proses adsorpsi dilakukan menggunakan adsorben ampas kopi dan kulit ari jagung dengan perbandingan berturut-turut 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, dan 30:70 (gram). Adsorben dimasukkan ke dalam kolom adsorpsi, diratakan permukaannya, kemudian diberi pemberat agar

tidak mengapung. Limbah cair sintetik selanjutnya dialirkan ke dalam kolom untuk dikontakkan dengan adsorben. Variasi waktu kontak yang digunakan yaitu 10, 20, dan 30 menit. Pada setiap interval waktu, larutan hasil kontak dikeluarkan dari kolom, disaring, kemudian dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis untuk menentukan konsentrasi ion Cu. Seluruh prosedur diulangi untuk setiap variasi komposisi adsorben.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil adsorpsi ion Cu (II) dengan ampas kopi dan kulit ari pipil jagung disajikan dalam Tabel 3. Penentuan jumlah ion Cu (II) teradsorpsi menggunakan metode spektrofotometri UV-Vis utnuk menentukan kinetika adsorpsi.

Tabel 3. Hasil Adsorpsi Cu (II) Ampas Kopi dan Kulit Ari Pipil Jagung pada Limbah Sintetik

Variabel	Konsentrasi Cu (ppm)		
	10 menit	20 menit	30 meni4
Sebelum Kontak	19,25	19,25	19,25
Ampas Kopi	5,5	5,5	4,25
Kulit Ari Pipil Jagung	4,25	4,25	1,75

Tabel 4. Efisiensi Penyerapan Cu (II) Ampas Kopi dan Kulit Ari Pipil Jagung pada Limbah Sintetik

Variabel	Konsentrasi Cu (ppm)		
	10 menit	20 menit	30 meni4
Ampas Kopi	71,43	71,43	77,92
Kulit Ari Pipil Jagung	77,92	77,92	90,91

Pengaruh Waktu Terhadap Adsorpsi

Hasil percobaan menunjukkan bahwa ampas kopi dan kulit ari pipil jagung efektif menurunkan konsentrasi ion Cu (II) dari limbah sintetik, dan efisiensi peningkatan sejalan dengan bertambahnya waktu kontak. Fenomena peningkatan efisiensi seiring waktu kontak konsisten dengan kajian kinetika adsorpsi yang melaporkan bahwa proses penjerapan pada tahap awal berlangsung cepat sebelum melambat saat mendekati kesetimbangan (X. Wang et al., 2025). Kemampuan ampas kopi sebagai biosorben telah dilaporkan efektif untuk penjerapan Cu (II) dan logam berat lain; studi-studi terkini menunjukkan bahwa ampas kopi, baik dalam bentuk mentah maupun dimodifikasi, dapat mencapai efisiensi tinggi terutama pada konsentrasi rendah dan kondisi pH yang sesuai. Sifat permukaan ampas kopi (gugus hidroksil dan karboksil) serta struktur organik aromatiknya menjelaskan mekanisme interaksi dengan ion logam (Mlynarczykowska & Orlof-naturalna, 2024).

Demikian pula, residu jagung (termasuk kulit ari/pipil) dapat diolah menjadi karbon aktif atau adsorben kimiawi yang memiliki kapasitas penjerapan Cu (II) kompetitif. Beberapa penelitian terbaru menunjukkan bahwa karbon aktif yang dibuat dari kulit jagung atau residu jagung yang dimodifikasi mampu meningkatkan kapasitas adsorpsi melalui peningkatan luas permukaan dan aktivasi gugus permukaan. Oleh karena itu, performa kulit ari pipil jagung pada studi ini sejalan

dengan temuan literatur yang mendukung potensi residu jagung sebagai prekursor karbon aktif untuk penghilangan logam berat (Silva et al., 2024).

Perbedaan efisiensi antara ampas kopi dan kulit ari pipil jagung pada penelitian ini kemungkinan besar dipengaruhi oleh perbedaan komposisi kimia (proporsi selulosa, hemiselulosa, lignin) dan karakteristik tekstur/pori masing-masing adsorben. Literatur menyatakan bahwa kandungan lignin dan struktur aromatik pada ampas kopi mendukung pembentukan pori mikro/meso setelah perlakuan karbonisasi, sedangkan fraksi selulosa/hemiselulosa pada kulit jagung menyediakan gugus hidroksil dan karboksil yang aktif secara kimia untuk koordinasi ion logam. Kombinasi sifat fisik dan kimia inilah yang menentukan kapasitas serta kinetika adsorpsi (B. Wang et al., 2023).

Kinetika Adsorpsi Cu (II)

Kajian kinetika adsorpsi bertujuan untuk mengevaluasi laju dan mekanisme penjerapan ion Cu (II) oleh adsorben ampas kopi dan kulit ari pipil jagung. Analisis kinetika dilakukan menggunakan tiga model, yaitu model Santosa (orde satu berbasis konsentrasi larutan) dan model Ho (pseudo orde dua). Ketiga model ini umum digunakan untuk menjelaskan mekanisme kontrol laju adsorpsi, baik secara fisik maupun kimia (Ho & Mckay, 1999); (Foo & Hameed, 2010).

Model Santosa merupakan model kinetika orde satu yang didasarkan pada perubahan konsentrasi adsorbat dalam larutan terhadap waktu. Model Santosa digunakan untuk menggambarkan laju penurunan konsentrasi logam dalam larutan pada tahap awal adsorpsi dan banyak diaplikasikan pada sistem biosorben–logam berat (Alfanaar et al., 2017).

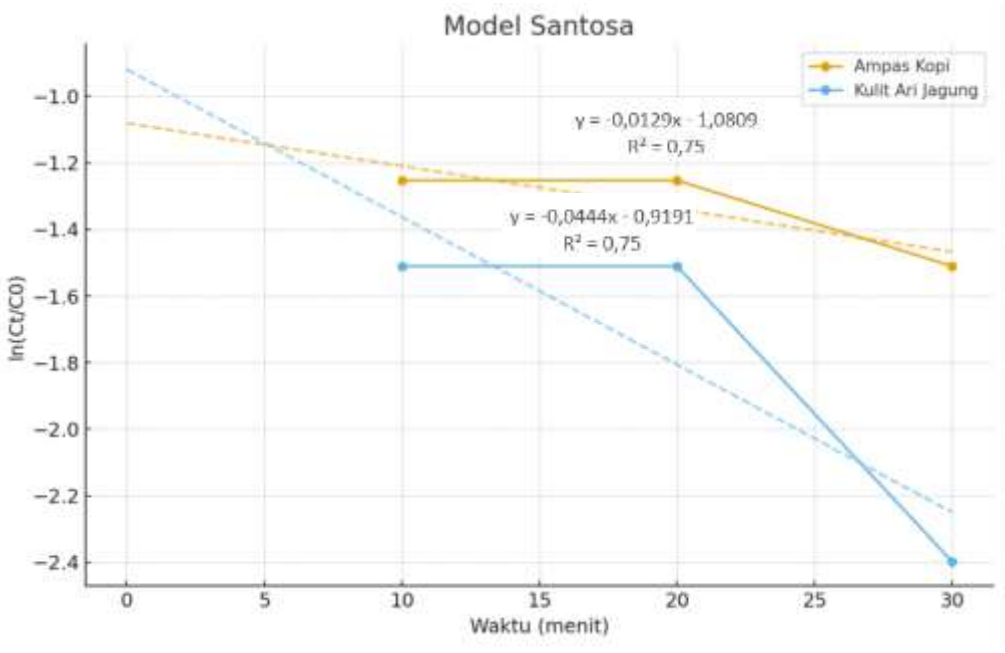
Model ini dinyatakan dengan persamaan:

$$\ln(C_t/C_0) = -k_s t$$

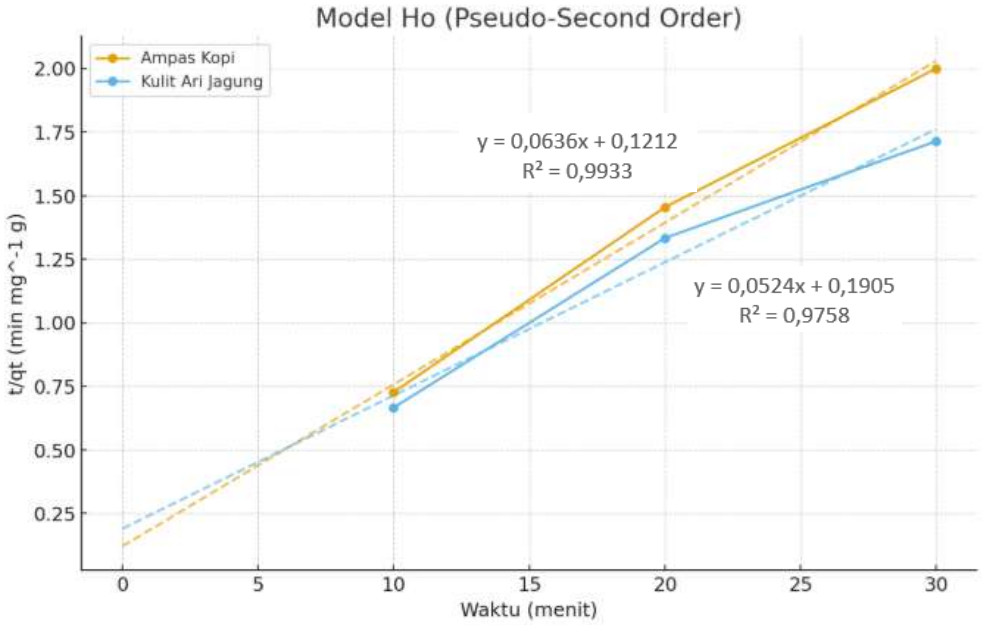
Model kinetika Ho atau pseudo orde dua mengasumsikan bahwa laju adsorpsi bergantung pada kuadrat jumlah situs aktif yang tersedia. Model Ho banyak digunakan untuk menjelaskan mekanisme kimisorpsi yang melibatkan interaksi kimia antara gugus aktif adsorben dengan ion logam, seperti pembentukan ikatan kompleks atau pertukaran ion (19) (20)

Model ini dinyatakan dalam bentuk linear:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}$$



(a)



(b)

Gambar 1. Grafik analisis kinetika adsorpsi (a) Model Santosa; (b) Model Ho

Kajian kinetika adsorpsi dilakukan untuk mengevaluasi laju dan mekanisme penjerapan ion Cu (II) oleh adsorben ampas kopi dan kulit ari pipil jagung. Model kinetika yang digunakan meliputi model Santosa (orde satu berbasis konsentrasi) dan model Ho (pseudo orde dua). Kesesuaian model dievaluasi berdasarkan nilai koefisien determinasi (R^2) serta kemaknaan parameter kinetika.

Berdasarkan hasil regresi linear, model Santosa menunjukkan nilai R^2 sebesar 0,75 baik untuk ampas kopi maupun kulit ari pipil jagung, yang menandakan kecocokan model masih berada pada tingkat sedang. Sementara itu, model Ho (pseudo orde dua) memberikan nilai R^2 yang jauh lebih tinggi, yaitu 0,993 untuk ampas kopi dan 0,976 untuk kulit ari pipil jagung.

Tingginya nilai R^2 pada model Ho menunjukkan bahwa mekanisme adsorpsi Cu (II) lebih sesuai dijelaskan oleh model pseudo orde dua, yang mengindikasikan bahwa proses adsorpsi didominasi oleh mekanisme kimisorpsi yaitu interaksi kimia antara ion Cu^{2+} dengan gugus aktif seperti hidroksil (–OH), karboksilat ($–COO^-$), dan gugus fenolik yang terdapat pada struktur lignoselulosa kedua biomassa tersebut. Mekanisme ini melibatkan pembentukan ikatan kompleks dan pertukaran ion yang bersifat kuat dan stabil. Selain itu, nilai parameter kinetika yang diperoleh juga berada dalam rentang yang masuk akal secara fisik, sehingga semakin memperkuat kesesuaian model Ho dibandingkan model Santosa.

Hasil ini konsisten dengan berbagai penelitian sebelumnya yang melaporkan bahwa adsorben berbasis biomassa umumnya mengikuti model pseudo orde dua untuk adsorpsi logam berat Cu (II) (Ho & Mckay, 1999); (Alfanaar et al., 2017); (Wibowo et al., 2025).

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa ampas kopi dan kulit ari pipil jagung terbukti efektif sebagai adsorben alternatif dalam menurunkan konsentrasi ion Cu (II) pada limbah sintetik. Efisiensi adsorpsi meningkat seiring dengan bertambahnya waktu kontak, dengan efisiensi tertinggi diperoleh pada waktu 30 menit, yaitu sebesar 77,92% untuk ampas kopi dan 90,91% untuk kulit ari pipil jagung. Hal ini menunjukkan bahwa kulit ari pipil jagung memiliki kemampuan adsorpsi yang lebih baik dibandingkan ampas kopi.

Hasil kajian kinetika menunjukkan bahwa model pseudo orde dua (Ho) memberikan kecocokan terbaik dengan nilai koefisien determinasi (R^2) yang sangat tinggi, yaitu 0,993 untuk ampas kopi dan 0,976 untuk kulit ari pipil jagung. Hal ini mengindikasikan bahwa mekanisme adsorpsi Cu (II) pada kedua adsorben didominasi oleh proses kimisorpsi yang melibatkan interaksi

kimia antara ion Cu^{2+} dengan gugus aktif pada biomassa. Dengan demikian, pemanfaatan ampas kopi dan kulit ari pipil jagung sangat berpotensi dikembangkan sebagai alternatif adsorben yang murah, melimpah, dan ramah lingkungan untuk pengolahan limbah cair yang mengandung logam berat.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Politeknik Negeri Ujung Pandang (PNUP) atas dukungan pendanaan yang telah diberikan sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada seluruh pihak yang telah membantu dalam pelaksanaan penelitian, khususnya kepada staf laboratorium atas bantuan dalam proses pengujian dan analisis sampel, serta semua pihak yang telah berkontribusi secara langsung maupun tidak langsung.

DAFTAR PUSTAKA

Abu, N., Othman, N., Murni, Z., & Ali, W. (2021). Environmental Technology & Innovation An insight review of lignocellulosic materials as activated carbon precursor for textile wastewater treatment. *Environmental Technology & Innovation*, *22*, 101445. https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101445

Afandy, M. A., & Sawali, F. D. I. (2024). Studi Isotherm Adsorpsi Cu (II) Dalam Larutan. *Jurnal Teknologi Kimia Mineral*, *3*, 25–32. https://doi.org/https://doi.org/10.61844/jtkm.v3i1.755

Alfanaar, R., Yuniati, Y., & Rismiarti, Z. (2017). Studi Kinetika Dan Isoterm Adsorpsi Besi (III) Pada Zeolit Alam Dengan Bantuan Gelombang Sonikasi. *EduChemia (Jurnal Kimia Dan Pendidikan)*, *2*(1), 63–72.

Arpit, T., & Namrata, S. (2023). Spent coffee ground : transformation from environmental burden into valuable bioactive metabolites. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, *22*(4), 887–898. https://doi.org/10.1007/s11157-023-09669-w

Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2010). Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chemical Engineering Journal*, *156*, 2–10. https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.09.013

Gandam, P. K., Chinta, M. L., Gandham, A. P., Prem, N., Pabbathi, P., Konakanchi, S., Bhavanam, A., Atchuta, S. R., Baadhe, R. R., & Bhatia, R. K. (2022). A New Insight into the Composition and Physical Characteristics of Corncob — Substantiating Its Potential for Tailored Biorefinery Objectives. *Journal Fermentation*, *8*, 704. https://doi.org/https://doi.org/10.3390/fermentation8120704

Ho, Y. S., & Mckay, G. (1999). Pseudo-second order model for sorption processes. *Process Biochemistry*, *34*, 451–465.

Kusumaningrum, D. I. P., Sudarni, D. H. A., & Wahyuningsih, S. (2022). Optimasi Pengaruh Waktu Kontak dan Dosis Adsorben Limbah Daun Kayu Putih (Melaleuca cajuputi) dengan Metode Isoterm Adsorpsi Langmuir. *Jurnal Teknik Kimia USU*, *11*(2), 72–79. https://doi.org/https://doi.org/10.32734/jtk.v11i2.9119

Mayangsari, N. E., & Astuti, U. P. (2021). Model Kinetika Adsorpsi Logam Berat Cu2+ Menggunakan Selulosa Daun Nanas Kinetic. *Jurnal Chemurgy*, *05*(200), 15–21. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.30872/cmg.v5i1.5477

Młynarczykowska, A., & Orlof-naturalna, M. (2024). Biosorption of Copper (II) Ions Using Coffee Grounds — A Case Study. *Sustainability (Switzerland)*, *16*(September), 7693. https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su16177693

Nurhidayati, I., Mellisani, B., Puspita, F., Amelia, F., & Putri, R. (2022). Penentuan Isoterm dan Kinetika Adsorpsi Ion Besi oleh Sedimen Sebagai Adsorben. *Jurnal Warta Akab*, *46*(1), 75–83. https://doi.org/10.55075/wa.v46i1.98

Nurullita, U., & Mifbakhuddin. (2015). Adsorbsi Gas Karbon Monoksida (CO) dalam Ruangan dengan Karbon Aktif Tempurung Kelapa dan Kulit Durian. *The 2nd University Research Coloquium 2015*, 297–306. https://doi.org/10.26418/jtllb.v7i1.34363

Piol, M. N., Dickerman, C., Ardanza, M. P., Saralegui, A., & Boeykens, S. P. (2021). Simultaneous removal of chromate and phosphate using different operational combinations for their

adsorption on dolomite and banana peel. *Journal of Environmental Management*, *288*(March), 112463. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112463

Ren, H., Shen, H., & Liu, Y. (2022). Adsorption of CO 2 with tetraethylammonium glycine ionic liquid modified alumina in the Rotating Adsorption Bed. *J. CO2 Util.*, *58*, 1–38.

Saralegui, A. B., Willson, V., Piol, M. N., & Boeykens, S. P. (2021). Macrophyte biomass productivity for heavy metal adsorption. *Journal of Environmental Management*, *289*(March), 112398. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112398

Shahrivar, J., & Gharabaghi, M. (2020). Separation of AuCN2- by activated carbon and functionalized graphene/activated carbon composite. *JAdv. Powder Technol.*, *31*, 4648–4656. https://doi.org/10.1016/S0735-1097(17)35526-2

Silva, M. C., Crespo, L. H. S., Cazetta, A. L., Silva, T. L., Spessato, L., & Almeida, V. C. (2024). Activated carbon fibers of high surface area from corn husk : Mono and multicomponent adsorption studies of Pb 2 + and Cu 2 + ions from aqueous solution. *Journal of Molecular Liquids Volume*, *405*(July), 1–11. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.molliq.2024.124919

Wang, B., Lan, J., & Bo, C. (2023). Adsorption of heavy metal onto biomass-derived activated carbon. *Journal of Royal Sociecty of Chemistry*, *13*, 4275–4302. https://doi.org/10.1039/d2ra07911a

Wang, K., Yang, L., Li, H., & Zhang, F. (2019). Surfactant Pyrolysis-Guided in Situ Fabrication of Primary Amine- Rich Ordered Mesoporous Phenolic Resin Displaying Efficient Heavy. *ACS Appl. Mater.Interfaces*, *11*, 1–42.

Wang, X., Wang, X., Chen, W., Yuan, J., & Zhang, Q. (2025). Adsorption of Cu (II) and Pb (II) in Aqueous Solution by Biochar Composites. *ACS Omega*, *10*, 13816–13828. https://doi.org/10.1021/acsomega.4c06837

Wibowo, K. A., Ikhwan, R. N., Sulistyawati, R. R. E., Diyar, S., Hadi, F., & Widayati, T. W. (2025). Kinetika dan Isoterm Adsorpsi Ion Logam Berat Zn 2 + dalam Limbah Cair Kerajinan Batik Kayu Menggunakan Zeolit Alam. *Jurnal Teknologi*, *18*, 47–56. https://doi.org/https://doi.org/10.34151/jurtek.v16i2.5208

Yang, Z., Wang, D., Meng, Z., & Li, Y. (2019). Adsorption Separation of CH4/N2 on Modified Coal-based Carbon Molecular Sieve. *Sep. Purif. Technol.*, *218*, 1–20. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586618340668