



Pemanfaatan Limbah Karbon-Aktif Melalui Reaktivitasi Termal Sebagai Adsorben Ion Kadmium pada Lindi TPA

[Utilization of Activated Carbon Waste Through Thermal Reactivity as a Cadmium Ion Adsorbent in Landfill Leachate]

Bambang Sardi¹ ✉, Anggie Putry Afrilya², Sitti Maghfirah Andriani², Try Novika¹, Fadlia Azzahra¹, Wahyu Hidayat¹

¹⁾ Jurusan Kimia, Fakultas MIPA, Universitas Tadulako, Palu 94118, Indonesia

²⁾ Jurusan Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Tadulako, Palu 94118, Indonesia

Abstract. The leachate produced at the Kawatuna landfill, managed without proper waste treatment systems, has been found to contain heavy metals like cadmium (Cd), which contaminate groundwater and pose significant health risks. This study investigates the reduction of Cd ions in leachate through adsorption using activated carbon (AC) waste. The AC waste was reactivated via thermal methods, including phosphoric acid immersion, heating, and washing. Morphological analysis was conducted using scanning electron microscopy (SEM), and adsorption efficacy was evaluated with atomic absorption spectroscopy (AAS). The findings indicate that AC waste with a pore diameter of 2.95 μm can be effectively reused as an adsorbent through thermal reactivation. Specifically, AC treated with H_3PO_4 immersion and heating exhibited a pore diameter of 3.24 μm , while heating and washing resulted in a pore diameter of 2.29 μm . The Cd concentration in leachate treated with AC immersed in H_3PO_4 followed by heating showed a modest reduction, whereas the heating and washing treatment led to a significant decrease in Cd levels, achieving an adsorption capacity of 3.92 mg/L within 50 min. This method presents a viable alternative for managing landfill leachate at the Kawatuna site.

Keywords: Activated carbon, adsorption, leachate, cadmium, reactivation.

Abstrak. Lindi dari tempat pembuangan akhir (TPA) Kawatuna, yang diproses tanpa pengelolaan limbah yang tepat, memperkenalkan logam berat seperti kadmium (Cd) ke dalam air tanah, yang menimbulkan risiko kesehatan yang signifikan. Penelitian ini bertujuan untuk mengurangi konsentrasi ion Cd dalam lindi melalui adsorpsi menggunakan limbah *activated carbon* (AC). Reaktivitasi AC dilakukan melalui metode termal, yang melibatkan perendaman dalam asam fosfat serta pemanasan dan pencucian, dengan analisis morfologi menggunakan scanning electron microscopy (SEM). Efektivitas adsorpsi dinilai melalui *atomic absorption spectrophotometry* (AAS). Hasilnya menunjukkan bahwa limbah AC dengan diameter pori (dp) 2,95 μm dapat digunakan kembali secara efektif sebagai adsorben melalui reaktivitasi termal. Secara spesifik, nilai dp sebesar 3,24 μm dan 2,29 μm diamati untuk AC yang diperlakukan dengan perendaman–pemanasan H_3PO_4 dan pemanasan–pencucian, masing-masing. Konsentrasi Cd dalam lindi yang diolah dengan AC yang direndam dalam H_3PO_4 kemudian dipanaskan menunjukkan penurunan yang tidak signifikan, sedangkan perlakuan pemanasan–pencucian menghasilkan penurunan yang signifikan, dengan kapasitas adsorpsi Cd sebesar 3,92 mg/L dalam waktu 50 menit. Metode ini menawarkan alternatif yang layak untuk mengelola lindi TPA di Kawatuna.

Kata kunci: Karbon aktif, adsorpsi, lindi, kadmium, reaktivasi.

Diterima: 21 Juni 2024, Disetujui: 23 Agustus 2024

Sitasi: Sardi, B., Afrilya, A. P., Andriani, S.M., Novika, T., Azzahra, F., dan Hidayat, W. (2024). Pemanfaatan Limbah Karbon-Aktif Melalui Reaktivitasi Termal Sebagai Adsorben Ion Kadmium pada Lindi TPA. *KOVALEN: Jurnal Riset Kimia*, 10(2): 167-174.

✉ Corresponding author

E-mail: bambang.teknikkimia2022@gmail.com

<https://doi.org/10.22487/kovalen.2024.v10.i2.17169>



LATAR BELAKANG

Permasalahan sampah sudah menjadi tantangan yang harus dihadapi oleh berbagai daerah di seluruh Indonesia, khususnya di Provinsi Sulawesi Tengah. Berdasarkan data dari Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (2021), tercatat 18,856,324 juta sampah yang masuk ke dalam Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) di Provinsi Sulawesi Tengah pertahunnya. Jumlah sampah yang ditampung di TPA kian meningkat sehingga menghasilkan lindi (air limbah) yang bisa mempengaruhi kualitas air tanah akibat tercemar bahan logam berat dan kimia organik. Salah satu kawasan TPA yang terletak di Provinsi Sulawesi Tengah adalah TPA Kawatuna yang berada di Kota Palu dengan total sampah yang masuk sebanyak 54,400,00 ton/tahun di tahun 2021 menurut data Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan.

Saat ini, TPA tersebut menggunakan sistem pengelolaan sampah *open dumping*, yakni penimbunan sampah dan/atau membuang sampah tanpa mengelola. Sampah akan teruraikan secara alami, tetapi *yield* dari penguraian tersebut akan melarut diantara timbunan sampah (Rahmi dan Edison, 2019). Proses penimbunan sampah yang selalu dilakukan di TPA menghasilkan polutan dalam bentuk air lindi (*leachate*) dari air hujan yang mengalir ke tumpukan sampah (Siswoyo dan Habibi, 2018). Faktor-faktor yang mempengaruhi air lindi (*leachate*) adalah kandungan dalam air lindi tersebut, diantaranya ukuran partikel dan tingkat pemadatan tanah, jenis dan komposisi sampah, iklim, hidrologi, usia penimbunan sampah, dan lokasi TPA tersebut (Sari dan Lucyana, 2021).

Air lindi mengandung unsur logam dan kandungan organik yang cukup tinggi (Sari & Lucyana, 2021). Kandungan logam berat dari air lindi dapat mencemari air tanah dan memberikan efek negatif bagi manusia di daerah atau pemukiman yang berdekatan dengan TPA, sehingga harus dikontrol. Salah satu logam tersebut adalah Kadmium (Cd), Cd merupakan logam toksik non esensial (Aselna, 2019).

Logam Cd bersifat *undegradable* dan *accumulated* yang dapat menyebabkan peningkatan konsentrasi logam berat di lingkungan (Satarug, 2019). Alternatif yang dapat dilakukan guna meminimalisir ion logam Cd pada air lindi adalah menggunakan metode adsorpsi. Penggunaan metode tersebut dikarena dapat menyerap ion atau zat molekul pada permukaan adsorben. Adsorpsi dapat dibedakan secara fisika dan kimia (Sardi dkk., 2022b; Yanto, 2021).

Dalam dunia industri, metode adsorpsi sering digunakan sebagai salah satu metode penyerapan dalam sistem pengolahan air dalam industri. Umumnya, adsorben yang digunakan sebagai media adsorpsi adalah *activated carbon* (AC). AC yang telah digunakan selanjutnya akan menjadi AC habis pakai yang berupa bahan berbahaya terhadap lingkungan jika tidak dikelola dengan baik. Limbah AC tersebut dapat dimanfaatkan dengan diaktivasi kembali (*reactivation*) menggunakan beberapa metode, contohnya seperti metode termal.

Biasanya limbah karbon aktif tipe powdered *activated carbon* (PAC) atau AC bubuk tidak direaktivasi, melainkan dibuang, sementara tipe *granular activated carbon* (GAC) atau AC granular direaktivasi (Carlson & Ebben, 2017; Sardi dkk., 2023a; Sardi dkk.,

2022a). Adapun pada riset ini, metode adsorpsi yang digunakan adalah metode reaktivasi termal. Metode reaktivasi termal lebih banyak digunakan di luar negeri karena menawarkan banyak keuntungan dibandingkan membeli karbon aktif baru (Carlson & Ebben, 2017).

Cara kerja metode reaktivasi termal sangat menentukan kualitas AC habis pakai, baik dari segi luas area permukaan maupun segi adsorpsinya. Aktivitas ditentukan oleh luas permukaan, karena area tersebut merupakan tempat berlangsungnya reaksi. Semakin besar luas permukaan maka semakin banyak molekul-molekul zat pereaksi yang teradsorpsi, sehingga mengakibatkan aktivitasnya bertambah besar pula. Aktivasi ini disebabkan oleh pembentukan gugus aktif melalui interaksi radikal bebas pada permukaan karbon dengan atom seperti oksigen dan nitrogen (Sardi dkk., 2023a; Sardi dkk., 2023b; Sari, 2019).

Riset ini dilakukan agar dapat mengadsorpsi ion logam cadmium yang terkandung dalam air lindi di Tempat Pembuangan Akhir Kawatuna menggunakan limbah karbon aktif yang berupa AC habis pakai tipe GAC atau karbon aktif granular yang dapat diaktivasi kembali (*reactivation*) melalui metode termal. Selain itu, tujuan khusus dilakukan riset ini yaitu untuk mengetahui jenis perlakuan dalam metode reaktivasi termal yang tepat dan paling efektif sehingga dapat mengaktivasi kembali limbah AC. Diharapkan pada riset selanjutnya agar pendeteksian parameter pada air lindi lebih kompleks, merangkaikan metode yang lebih kombinatif dan melakukan pengujian reaktivasi berulang-ulang terhadap AC untuk mengetahui batas ketahanan dari mereaktivasi AC.

METODE PENELITIAN

Bahan dan Peralatan

Bahan-bahan yang digunakan dalam riset ini adalah AC granular habis pakai, air lindi TPA Kawatuna, akuades, larutan asam fosfat (H_3PO_4) 5%, kadmium sulfat hidrat. Sedangkan alat-alat yang digunakan yaitu oven lab, tanur, *tissue*, desikator, *jar test*, gelas beker 500 mL, gelas ukur 500 mL, gelas arloji, labu ukur 250 mL, erlenmeyer 500 mL, neraca analitik, *stopwatch*, cawan porselin, botol semprot, corong, kertas saring, pipet volume, penjepit, sudip, SEM, *Atomic Absorption Spectrophotometer* (AAS).

Prosedur Penelitian

Reaktivasi limbah karbon aktif

Riset ini dilakukan melalui dua perlakuan prosedur kerja yang berbeda sebagai pembandingan. Sebelum dilakukan perlakuan tertentu pada limbah AC granular, dikeringkan dahulu dengan tanur hingga $100^\circ C$. Lalu dilakukan perlakuan pertama dengan mengaktivasi ulang limbah karbon aktif menggunakan proses perendaman dengan asam fosfat (H_3PO_4) dan pemanasan. Pada tahap ini, limbah AC dimasukkan ke dalam gelas beker menggunakan spatula dan direndam dengan larutan H_3PO_4 konsentrasi 5% yang diambil melalui pipet volume dengan perbandingan 1:4 yang dilakukan selama 20 jam. Proses perendaman ini dilakukan dengan tujuan agar menghilangkan zat pengotor yang terdapat pada limbah AC.

Setelah dilakukan proses perendaman dengan rasio AC: H_3PO_4 (1:4), limbah karbon aktif tersebut dipanaskan di dalam tanur dengan rentang waktu tertentu yang diukur menggunakan *stopwatch* pada suhu $500^\circ C$ selama 60 menit, pada suhu $600^\circ C$ selama 120

menit, dan pada suhu 700°C selama 180 menit. Setelah proses pemanasan, karbon aktif yang telah diaktivasi diambil menggunakan penjepit ke cawan porselin dan didinginkan menggunakan desikator.

Adapun pada perlakuan kedua dilakukan dengan mengaktivasi limbah AC hasil pemakaian industri pengolahan air dalam bentuk granular melalui proses pemanasan dan pencucian. Pada tahap ini, limbah AC dimasukkan ke gelas beker dan langsung masuk ke dalam proses pemanasan yang dilakukan dalam tanur dengan rentang waktu tertentu yang diukur menggunakan *stopwatch* tanpa proses perendaman terlebih dahulu. Setelah itu, limbah AC dipanaskan pada suhu 500°C selama 60 menit, pada suhu 600°C selama 120 menit, dan pada suhu 700°C yang dilakukan selama 180 menit. Setelah dilakukan proses pemanasan, AC dipindahkan ke gelas ukur, lalu dicuci menggunakan aquades melalui botol semprot, dan dikeringkan pada suhu ruangan.

Analisa karbon aktif menggunakan SEM

Karbon aktif yang telah direaktivasi kemudian diobservasi menggunakan SEM untuk diketahui diameter masing-masing karbon aktif tereaktivasi perlakuan satu, perlakuan dua, maupun limbah karbon aktif.

Pembuatan limbah air lindi simulasi

Pembuatan limbah air lindi simulasi dilakukan karena pada pengujian pertama konsentrasi kadmium pada air lindi <0,01 sehingga tidak terbaca. Maka dari itu perlu dilakukan pembuatan limbah air lindi simulasi yang dimulai dengan melarutkan kadmium sulfat hidrat sebanyak 0,5 gram dalam bentuk padatan dan diencerkan dengan aquades sebanyak 50 mL yang dimasukkan ke labu ukur

250 mL sampai garis tanda. Sehingga diperoleh larutan kadmium sebanyak 50 mL. Selanjutnya larutan kadmium diambil sebanyak 5 mL menggunakan pipet tetes dan dimasukkan ke dalam air lindi 1000 mL. Sehingga didapatkan limbah air lindi simulasi dengan konsentrasi kadmium sebesar 1,937 ppm.

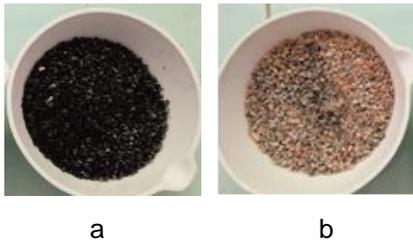
Adsorpsi kadmium pada air lindi dengan karbon aktif reaktivasi

AC hasil reaktivasi dari tiap perlakuan yang berbeda masing-masing dimasukkan sebanyak 1,2 gram menggunakan sudip ke dalam gelas ukur berisi airlindi 300 ml, setelah itu dipindahkan ke *jar test* dengan variasi waktu kontak 10, 20, 30, 40 dan 50 menit. Tahap selanjutnya, air lindi yang sudah diadsorpsi oleh karbon aktif disaring menggunakan kertas saring untuk memisahkan air lindi dari sisa karbon aktif, kemudian dilakukan pengukuran parameter logam Cd menggunakan alat AAS terhadap 11 sampel dengan 5 sampel untuk air lindi dengan karbon aktif perlakuan pertama (perendaman H₃PO₄ – pemanasan), 5 sampel untuk perlakuan kedua (pemanasan-pencucian) dan 1 sampel air lindi tanpa perlakuan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Reaktivasi Limbah Karbon Aktif

Hasil reaktivasi limbah AC dengan metode termal perlakuan pertama (perendaman H₃PO₄ dan pemanasan) penambahan aktivator atau asam dapat melindungi AC dari suhu tinggi dengan memperlambat laju reaksi pada proses oksidasi sehingga kadar abu dan perubahan warna pada AC lebih sedikit (Gambar 1a) dibandingkan AC hasil reaktivasi perlakuan kedua yaitu pemanasan dan pencucian (Gambar 1b).



Gambar 1. Hasil reaktivasi karbon aktif: (a) metode pemanasan dan pencucian; (b) metode perendaman asam fosfat dan pemanasan

Hasil Analisa *Scanning Electron Microscope* Karbon Aktif yang Telah Direaktivasi

Analisis struktur permukaan pori dilakukan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM). Analisis ini bertujuan untuk

mengetahui topografi permukaan pori limbah AC yang telah direaktivasi. Hasil analisis SEM dapat dilihat di Tabel 1.

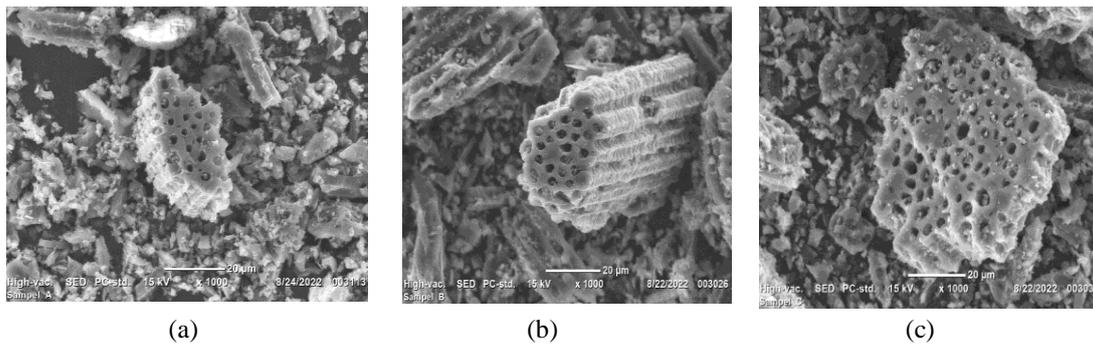
Hasil analisis SEM menunjukkan bahwa limbah karbon aktif masih menunjukkan pori sebesar 2,95 μm (Gambar 2c). Setelah proses reaktivasi, karbon aktif dengan perlakuan perendaman H_3PO_4 5% dan pemanasan menunjukkan pori mengecil dengan diameter 2,29 μm yang menunjukkan bahwa metode pengasaman dengan asam fosfat (H_3PO_4) 5% menghasilkan pori-pori karbon aktif yang lebih kecil (Gambar 2a), sedangkan karbon aktif dengan perlakuan pemanasan dan pencucian cenderung menyebabkan peningkatan diameter pori sebesar 3,24 μm (Gambar 2b).

Tabel 1. Hasil Analisis SEM

Nama Sampel	Diameter pori (μm)
a (karbon aktif perendaman H_3PO_4 – pemanasan)	2,29 μm
b (karbon aktif pemanasan -pencucian)	3,24 μm
c (limbah karbon aktif)	2,95 μm

Proses aktivasi dengan H_3PO_4 umumnya menyebabkan perubahan pada struktur pori AC. Penelitian menunjukkan bahwa H_3PO_4 berperan penting dalam mengembangkan struktur mikropori dengan cara dehidrasi karbon selama proses aktivasi, yang kemudian mengakibatkan pembentukan pori-pori yang lebih kecil. Selain itu, pada suhu tertentu, H_3PO_4 dapat membentuk senyawa polifosfat yang berperan dalam mengecilkan dan menutup sebagai pori-pori yang ada (Barakat dkk., 2023; Neme dkk., 2022).

Di sisi lain, perlakuan panas tanpa pengasaman cenderung membuka pori-pori yang sudah hada atau bahkan memperbesar pori-pori tersebut, karena kurangnya agen penghalang yang seperti yang ada dalam proses pengasaman dengan H_3PO_4 (Bouchelkia dkk., 2023). Data SEM yang ada sesuai dengan hasil penelitian terdahulu yang menunjukkan bahwa penggunaan H_3PO_4 memang menghasilkan AC dengan pori-pori yang lebih kecil dibandingkan dengan perlakuan yang hanya melibatkan pemanasan dan pencucian.



Gambar 2. (a) Hasil analisa SEM karbon aktif dengan perlakuan perendaman H_3PO_4 5%; (b) Hasil analisa SEM karbon aktif dengan perlakuan pemanasan dan pencucian; (c) Hasil analisa SEM limbah karbon aktif

Hasil Analisa Kadar Kadmium pada Air Lindi dengan AAS

Setelah dilakukan pengulangan ke-2 dengan limbah simulasi, air lindi yang telah

diadsorpsi dianalisis kembali kadar kadmium dengan alat AAS yang hasilnya dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil analisa cadmium pada air lindi

Kode Sampel	Konsentrasi (mg/L)	Pengenceran (x)	Konsentrasi x Pengenceran
A	1,396	20	27,92
B	1,405	20	28,1
C	1,331	20	26,62
D	1,135	20	22,7
E	1,217	20	24,34
F	1,471	20	29,42
G	1,316	20	26,32
H	1,31	20	26,2
I	1,263	20	25,26
J	1,017	20	20,34
K	1,937	20	38,74

Pada sampel A sampai E adalah air lindi yang diadsorpsi menggunakan karbon aktif perlakuan 1 (perendaman H_3PO_4 - pemanasan). Sampel F sampai J adalah air lindi yang di adsorpsi menggunakan AC perlakuan 2 (pemanasan-pencucian) serta sampel K adalah air lindi yang tidak di adsorpsi.

Hasil analisis kadar kadmium pada air lindi simulasi (penambahan larutan kadmium) dengan adsorben karbon aktif perendaman H_3PO_4 (Tabel 2) dan pemanasan mengalami penurunan yang tidak signifikan sedangkan

adsorben karbon aktif pemanasan dan pencucian aquades menunjukkan penurunan yang signifikan dengan kadar logam yang terabsorpsi sebesar 3,92 mg/L di waktu 50 menit (Tabel 2).

Dalam studi terkait penggunaan AC yang diaktifkan menggunakan H_3PO_4 untuk adsorpsi logam Cd, ada beberapa temuan penting yang bisa menjelaskan perbedaan hasil penurunan Cd berdasarkan metode aktivasi AC. Pada penelitian tertentu, AC yang diaktivasi menggunakan H_3PO_4 memang dapat

menunjukkan efisiensi penurunan logam berat yang bervariasi. Aktivasi menggunakan H_3PO_4 menghasilkan pori-pori yang lebih kecil, yang cenderung lebih efektif dalam menyerap molekul yang lebih kecil, tetapi mungkin kurang efektif untuk molekul yang lebih besar atau dalam kondisi tertentu, seperti ketika ada kompetisi adsorpsi dengan molekul lain. Proses ini juga bisa meninggalkan residu fosfat yang dapat mempengaruhi efisiensi adsorpsi, seperti yang dilaporkan dalam penelitian tentang karbon aktif dari serbuk gergaji dan sekam padi (Xu dkk., 2021; Zakaria dkk., 2021).

Sebaliknya, AC yang dihasilkan dari pemanasan dan pencucian dengan air aquades menunjukkan penurunan kadar kadmium yang lebih signifikan. Hal ini mungkin disebabkan oleh peningkatan luas permukaan spesifik dan distribusi pori yang lebih sesuai untuk adsorpsi kadmium. Selain itu, metode ini bisa lebih efektif dalam menghilangkan residu dari proses aktivasi, yang pada akhirnya meningkatkan kinerja adsorpsi logam berat (Shu dkk., 2018).

Secara keseluruhan, perbedaan ini menunjukkan bahwa metode aktivasi dan perlakuan pasca-aktivasi memiliki pengaruh signifikan terhadap efektivitas karbon aktif dalam menyerap Cd. Faktor seperti ukuran pori, komposisi kimia permukaan, dan adanya residu dari agen aktivasi dapat mempengaruhi efisiensi adsorpsi.

KESIMPULAN

Hasil riset menunjukkan bahwa limbah karbon aktif dapat digunakan kembali dengan metode termal. Metode reaktivasi termal yang paling tepat untuk meraktivasi limbah karbon aktif yaitu pada perlakuan kedua dengan pemanasan secara bertahap dan pencucian dengan aquades, sehingga didapatkan

adsorben karbon aktif dengan diameter 3,24 μm . Adsorben karbon aktif tersebut menunjukkan penurunan yang signifikan pada air lindi dengan kadar logam yang terabsorpsi sebesar 3,92 mg/L di waktu 50 menit. Pendekatan ini dapat digunakan sebagai alternatif dalam mengelola lindi TPA, tetapi diperlukan penelitian lebih lanjut untuk menilai efektivitasnya dalam jangka panjang.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Direktorat Jenderal Pembelajaran dan Kemahasiswaan selaku pelaksana Program Kreativitas Mahasiswa dan pemberi pendanaan dalam riset yang kami lakukan dan terima kasih pula disampaikan kepada Universitas Tadulako yang telah memberikan bantuan dana pendamping serta Politeknik Kesehatan Palu yang telah memberikan fasilitas laboratorium sebagai penunjang lokasi dilakukannya eksperimen dalam riset yang kami lakukan.

DAFTAR PUSTAKA

- Aselna, I. H. (2019). Identifikasi Kandungan Logam Berat pada Buah dan Sayuran di Sekitar TPA Gunung Tugel, Kabupaten Banyumas. *Disertasi*. Fakultas Teknik Sipil dan Perancangan Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.
- Barakat, N.A.M., Irfan, O.M., Moustafa, H.M., (2023). H_3PO_4/KOH Activation Agent for High Performance Rice Husk Activated Carbon Electrode in Acidic Media Supercapacitors. *Molecules* 28, 1–20. <https://doi.org/10.3390/molecules28010296>
- Bouchelkia, N., Benazouz, K., Mameri, A., Belkhiri, L., Hamri, N., Belkacemi, H., Zoukel, A., Amrane, A., Aoulmi, F., Mouni, L., (2023). Study and Characterization of H_3PO_4 Activated Carbons Prepared from Jujube Stones for the Treatment of Industrial Textile Effluents. *Processes* 11, 2694. <https://doi.org/10.3390/pr11092694>

- Neme, I., Gonfa, G., Masi, C., (2022). Activated carbon from biomass precursors using phosphoric acid: A review. *Heliyon* 8, e11940. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11940>
- Carlson, C., dan Ebben, A. (2017). A Look at Activated Carbon Thermal Regeneration. FEECO International. <https://feeco.com/a-look-at-activated-carbon-thermal-regeneration/>, Diakses tanggal 22 Maret 2022.
- Rahmi, A., dan Edison, B. (2019). Identifikasi Pengaruh Air Lindi (leachate) terhadap Kualitas Air di Sekitar Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Tanjung Belit. *Aptek.*, 11(1): 1-6.
- Sardi, B., Altway, A., Mahfud, M. (2023a). Low rank coal for fuel production via microwave-assisted pyrolysis: A review. *Int. J. Energy Res*, 3(2): 0–10. <https://doi.org/10.1016/j.fpc.2023.02.002>
- Sardi, B., Altway, A., Mahfud, M. (2022a). Bio-oil production from low-rank coal via novel catalytic microwave pyrolysis using activated carbon + Fe₂(SO₄)₃ and HZSM-5 + Fe₂(SO₄)₃. *Fuel* 324, 124509. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124509>
- Sardi, B., Ningrum, R.F., Ardiansyah, V.A., Qadariyah, L., Mahfud, M. (2022b). Production of Liquid Biofuels from Microalgae *Chlorella* sp. via Catalytic Slow Pyrolysis. *Int. J. Technol.* 13(1): 147–156. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v13i1.4358>
- Sardi, B., Rachmawati, H., Maulana, T. F., Setiawati, E., Indrawan, N., & Mahfud, M. (2023b). Advanced bio-oil production from a mixture of microalgae and low rank coal using microwave assisted pyrolysis. *Bioresource Technology Reports*, 21, Article 101367. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101367>
- Sari, E. K., dan Lucyana, L. (2021). Evaluasi Instalasi Pengolahan Air Lindi di Tempat Pembuangan Akhir Sampah (TPAS) Simpang Kandis Kabupaten Ogan Komering Ulu. *Jurnal Deformasi*. 6(1): 33-41.
- Sari, F. P. (2019). Pembuatan dan Karakteristik Kitosan-Karbon Aktif dari Ampas Kopi Sebagai Adsorben untuk Menurunkan Kadar Logam Kadmium dan Nikel. *Tesis*. Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sumatera Utara, Medan.
- Satarug, S. (2019). Cadmium sources and Toxicity. *Toxics*. 7(2): 25.
- Shu, Y., Tang, C., Hu, Xinjiang, Jiang, L., Hu, Xi, Zhao, Y., (2018). H₃PO₄-activated cattail carbon production and application in chromium removal from aqueous solution: Process optimization and removal mechanism. *Water* 10, 754. <https://doi.org/10.3390/w10060754>
- Siswoyo, E., dan Habibi, G. F. (2018). Sebaran Logam Berat Kadmium (Cd) dan Timbal (Pb) pada Air Sungai dan Sumur di Daerah Sekitar Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Wukirsari Gunung Kidul, Yogyakarta. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan*. 8(1): 1-6.
- Xu, W., Liu, J., Sun, K., Liu, Y., Chen, C., Wang, A., Sun, H., (2021). Effect of activation temperature on properties of H₃PO₄-activated carbon. *BioResources* 16, 4007–4020. <https://doi.org/10.15376/biores.16.2.4007-4020>
- Yanto, S. B. (2021). Pemanfaatan Ampas Kopi Sebagai Biosorben Penyerap Besi (Fe). *Tesis*. Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Ar-Raniry, Banda Aceh.
- Zakaria, R., Jamalluddin, N.A., Abu Bakar, M.Z., (2021). Effect of impregnation ratio and activation temperature on the yield and adsorption performance of mangrove based activated carbon for methylene blue removal. *Results Mater* 10, 100183. <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2021.100183>