

SINTESIS KARBON AKTIF POLIETILEN DARI LIMBAH *BANNER* SEBAGAI ADSORBEN LOGAM CU PADA AIR KOLONG BANGKA BELITUNG

Astri Ayu Ningsih^{1,a}, Verry Andre Fabiani¹, Ristika Oktavia Asriza¹

¹Program Studi Kimia, Universitas Bangka Belitung, Bangka, Kepulauan Bangka Belitung, 33172

^{a)} email korespondensi: astrningsiyu@gmail.com

ABSTRAK

Aktivitas pertambangan di Provinsi Bangka Belitung masih berlangsung dengan intens, yang mengakibatkan pencemaran pada air kolong dengan kandungan logam berat seperti Cu yang cukup tinggi. Upaya untuk mengurangi kadar logam berat telah dilakukan dengan pembuatan karbon aktif dari limbah *banner* yang berfungsi sebagai penyerap. Sintesis dilakukan dengan cara karbonisasi limbah *banner* pada suhu 450°C selama 2 jam, kemudian dilanjutkan dengan aktivasi kimia menggunakan HCl 1 M. Karakterisasi karbon aktif dari limbah *banner* meliputi analisis gugus fungsi menggunakan FTIR, analisis struktur kristal dengan XRD, dan morfologi menggunakan SEM. Analisis FTIR menunjukkan adanya serapan pada angka 1741 cm⁻¹ (gugus karbonil) yang berfungsi sebagai sisi aktif pada karbon yang disintesis, serta serapan pada gelombang 3744 cm⁻¹ (gugus hidroksil bebas) interaksi dari karbon aktif dengan molekul air yang teradsorpsi baik selama maupun setelah karbonisasi. Hasil analisa XRD menunjukkan pola puncak difraksi baru pada sudut 2θ 26,6°; 43,4°; 54,8°; dan 83,8° yang sesuai dengan struktur amorf khas karbon aktif dari limbah plastik. Hasil SEM pada pembesaran 5.000x menunjukkan morfologi dengan permukaan yang kasar dan tidak merata serta ukuran pori rata-rata yang terbentuk sebesar 1,92 μm. Efisiensi adsorpsi maksimum pada ion Cu²⁺ dalam larutan artifisial mencapai 99,998% pada waktu kontak 60 menit. Efisiensi adsorpsi logam Cu pada air kolong sebesar 99,07%.

Kata kunci: air kolong, logam berat, karbon aktif limbah *banner*, karakterisasi, adsorpsi.

PENDAHULUAN

Bangka Belitung adalah salah satu provinsi di Indonesia yang memiliki sumber daya alam timah yang melimpah, yang menyuplai lebih dari 80% ekspornya (Yulianti *et al.*, 2020). Kegiatan penambangan menghasilkan kolong atau lubang terisi air, yang pada tahun 2018 tercatat sebanyak 12.607 unit dengan total luas mencapai 15.579,747 hektar (IKPLHD, 2021). Air dari kolong ini diketahui mengandung logam berat seperti Fe, Al, Pb, Zn, Cd, dan Cu (Meyzilia, 2018). Kadar Cu terlarut dalam air kolong di Desa Rebo mencapai 0,32 ppm, yang 16 kali lebih tinggi daripada batas mutu 0,02 ppm (Aldila *et al.*, 2020). Paparan Cu yang berlebihan dapat menyebabkan efek toksik yang bersifat akut maupun kronis, termasuk masalah pada ginjal dan hati (Ibrahim, 2015).

Berbagai metode telah dikembangkan untuk mengurangi kadar logam berat, termasuk penggunaan membran, karbon berpori, dan silika (Ramadiani & Munasir, 2021; Halim *et al.*, 2021). Penggunaan limbah polimer sebagai bahan baku adsorben menjadi alternatif yang lebih ekonomis, mudah didapat, dan ramah lingkungan (Firda *et al.*, 2023). Salah satu sumber limbah polimer yang melimpah adalah *banner* atau spanduk yang terbuat dari *Polyvinyl Chloride* (PVC),

jenis plastik yang kuat, keras, sulit terurai, dan umum digunakan untuk media promosi (Sikumbang, 2019).

Limbah *banner* PVC dapat diolah menjadi karbon aktif berpori melalui proses karbonisasi dan aktivasi. Proses aktivasi berfungsi untuk meningkatkan jumlah pori, menghilangkan sisa senyawa, dan meningkatkan kemampuan adsorpsi (Oko *et al.*, 2021). Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa karbon aktif yang dibuat dari PVC dapat mengadsorpsi logam Fe sampai 80% (Hendrasarie & Prihantini, 2021).

Dengan potensi ini, penelitian ini dilakukan untuk mensintesis karbon aktif dari limbah *banner* sebagai adsorben Cu dalam air kolong di Bangka Belitung. Keunggulan dari penelitian ini adalah ketersediaan bahan baku yang melimpah, kontribusi dalam pengurangan limbah plastik, dan peluang untuk menjadi solusi inovatif dalam mengatasi pencemaran logam berat.

METODE PENELITIAN

Bahan dan Peralatan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari limbah *banner*, aquades, asam klorida (HCl) 1 M, asam nitrat (HNO₃), dan CuSO₄.5H₂O.

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi gunting, baskom, ayakan 100 mesh, keranjang, labu ukur 100 dan 250 mL, corong kaca,

erlenmeyer, neraca analitik, gelas beaker 250, 500, dan 1000 mL, gelas ukur 50 dan 100 mL, botol sampel, plastik sampel, kertas pH, cawan porselen, batang pengaduk, kertas timbang, pipet tetes, pipet volume, oven, aluminium foil, plastik pembungkus, *tubular furnace*, *Scanning Electron Microscope* (SEM), *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR), *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry* (ICP-MS), dan *X-ray Diffraction* (XRD).

Prosedur Penelitian

Preparasi Limbah Banner

Limbah *banner* yang berasal dari Sekretariat Himpunan Mahasiswa Kimia dibersihkan menggunakan aquades, dipotong menjadi ukuran kecil, lalu dikeringkan pada suhu ruangan untuk menghilangkan sisa air sebelum proses karbonisasi (Oko *et al.*, 2021; Juliantie *et al.*, 2022).

Sintesis Karbon Aktif

Sebanyak 30 gram limbah *banner* difurnace pada temperatur 450 °C selama 2 jam, lalu diayak (mesh 100), selanjutnya diaktivasi menggunakan HCl 1 M selama 2 jam, dibilas hingga mencapai pH netral, dan dikeringkan pada suhu 110 °C selama 3 jam untuk mendapatkan karbon aktif (Hendrasarie dan Prihantini, 2020). Karbon aktif yang dihasilkan kemudian dianalisis dengan SEM untuk mengetahui morfologi, FTIR untuk mengidentifikasi gugus fungsional, dan XRD untuk pola kristal (Novala *et al.*, 2019).

Preparasi Sampel Air Kolong

Pengambilan sampel air dari kolong mengikuti standar SNI 6989.59:2008, dilakukan di area sekitar Jalan Lintas Timur pada permukaan dan dasar air dengan total volume 2,5 L. Wadah untuk sampel dicuci menggunakan air bersih dan akuades, selanjutnya sampel dihomogenkan, diukur suhu dan pH-nya, kemudian disaring, serta diawetkan menggunakan HNO₃ sampai pH ≤ 2 untuk memperpanjang masa simpan sampai 6 bulan.

Penentuan Kadar Kualitas Karbon Aktif

a. Kadar Air

Kadar air karbon aktif ditentukan dengan menimbang 1 g sampel (W₁), kemudian dikeringkan pada 105 °C selama 2 jam, didinginkan dalam desikator, dan ditimbang hingga massa konstan (W₂). Kadar air dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut (Tani & Lumingkewas, 2022).

$$\text{Kadar air (\%)} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100\%$$

Keterangan :

W₁ = Massa karbon aktif mula-mula (gram)

W₂ = Massa karbon aktif akhir (gram)

b. Kadar Abu

Kadar abu ditentukan dengan menimbang 1 g karbon aktif (W₁), difurnace pada 600 °C selama 4 jam, didinginkan dalam desikator, lalu ditimbang hingga massa konstan (W₂). Kadar abu dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut (Tani & Lumingkewas, 2022).

$$\text{Kadar abu (\%)} = \frac{W_1}{W_2} \times 100\%$$

Keterangan :

W₁ = Massa karbon aktif mula-mula (gram)

W₂ = Massa karbon aktif akhir (gram)

c. Kadar Zat Menguap

Kadar zat menguap ditentukan dengan menimbang 1 g karbon aktif (W₁), difurnace pada 950 °C selama 6 menit, didinginkan dalam desikator, lalu ditimbang hingga massa konstan (W₂). Kadar zat menguap dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut (Tani & Lumingkewas, 2022).

$$\text{Kadar zat menguap (\%)} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100\%$$

Keterangan :

W₁ = Massa karbon aktif mula-mula (gram)

W₂ = Massa karbon aktif akhir (gram)

Pembuatan Larutan Artifisial Cu (II)

Larutan artifisial Cu (II) disiapkan melalui tahapan bertingkat. Pertama, larutan induk 100 ppm dibuat dengan melarutkan 0,0393 g CuSO₄·5H₂O dalam 100 mL aquades. Setelah itu, larutan baku 50 ppm diperoleh dengan mengencerkan 50 mL larutan induk ke dalam 100 mL labu ukur, dan larutan standar 2 ppm dibuat dengan mengencerkan 2 mL larutan baku ke dalam 100 mL aquades (Raudlotus & Edy, 2017).

Penentuan Waktu Optimum

a. Penentuan Waktu Kontak Adsorben

Adsorben ditimbang sebanyak 75 mg dan dimasukkan ke dalam erlenmeyer yang telah berisikan larutan logam berat sebanyak 100 ml. Kemudian, erlenmeyer yang berisikan campuran tersebut diletakkan pada shaker dengan kecepatan pengadukan 200 rpm pada temperatur ruang dengan variasi waktu 15, 30, 45, dan 60 menit. Setelah itu campuran dipisahkan dengan cara disaring menggunakan kertas saring. Adapun filtrat saringan diukur dengan ICP. Selanjutnya, dihitung efisiensi (E) (Hanifah *et al.*, 2023).

Uji Adsorpsi Logam Berat Pada Air Kolong

Adsorpsi dilakukan dengan menambahkan karbon aktif pada 100 mL air kolong menggunakan massa dan waktu optimum, dikocok pada shaker 200 rpm, disaring, dan filtrat dianalisis dengan ICP untuk menghitung efisiensi adsorpsi (E) (Hanifah *et al.*, 2023).

$$\text{Efisiensi adsorpsi} = \frac{a-b}{a} \times 100\%$$

Keterangan

a = Konsentrasi awal

b = Konsentrasi akhir

HASIL DAN PEMBAHASAN

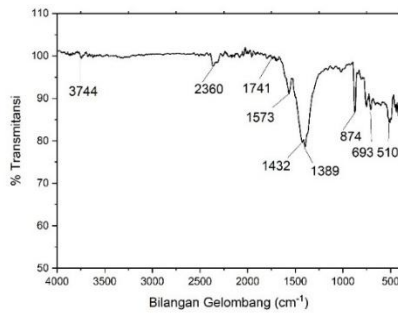
Sintesis Karbon Aktif Limbah Banner

Limbah *banner* dibersihkan menggunakan akuades hingga bersih untuk menghilangkan kotoran, lalu dikeringkan pada suhu ruang hingga benar-benar kering. Setelah itu, limbah tersebut dipotong menjadi bagian-bagian kecil agar lebih praktis untuk diproses dalam tahap karbonisasi (Juliantie *et al.*, 2022). Proses karbonisasi dilakukan dengan menggunakan *furnace* pada suhu 450°C selama 2 jam. Tujuan dari proses ini adalah untuk mendekomposisi bahan organik melalui degradasi termal, sehingga menghasilkan karbon yang lebih murni. Karbon yang diperoleh dari karbonisasi kemudian digerus dan diayak menggunakan mesh 100 untuk memperbesar luas permukaan dan mempermudah

proses aktivasi. Sebanyak 30 gram karbon dari karbonisasi direndam dalam larutan HCl 1 M selama 2 jam. Aktivasi secara kimia ini bertujuan untuk melarutkan kontaminan logam atau mineral. Setelah proses perendaman, karbon dicuci dengan akuades hingga pH netral, lalu dikeringkan dalam oven pada suhu 105°C selama 3 jam. Karbon aktif yang dihasilkan berwarna abu kehitaman dengan massa 16,2 gram (Juliantie *et al.*, 2022).

Analisis Gugus Fungsi dengan Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

Hasil analisis FTIR pada karbon limbah *banner* menunjukkan bahwa terdapat beberapa gugus fungsional yang masih terdeteksi walaupun telah melalui proses karbonisasi pada suhu 450°C dan aktivasi dengan menggunakan HCl.

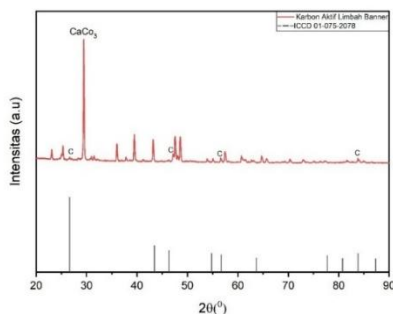


Gambar 1. Spektrum FTIR Karbon Aktif

Berdasarkan Gambar 1., spektrum FTIR memperlihatkan pita serapan pada 3744 cm⁻¹ yang menunjukkan keberadaan gugus -OH bebas, 1741 cm⁻¹ untuk gugus C=O, 1573 cm⁻¹ yang berkaitan dengan C=C aromatik terkonjugasi, serta 1389 cm⁻¹ untuk gugus -CH₃. Selain itu, serapan pada 2360 cm⁻¹ menandakan adanya CO₂ yang teradsorpsi, sementara pita pada 874 cm⁻¹ (C-Cl) dan pada 693 serta 510 cm⁻¹ (Ca-O) menunjukkan keberadaan sisa polimer PVC dan senyawa anorganik seperti CaCO₃.

Analisis Fasa dengan X-Ray Diffraction (XRD)

Karakterisasi XRD dilakukan untuk mengidentifikasi fasa kristal dari sampel karbon aktif limbah *banner*.



Tabel 1. Kualitas Karbon Aktif Limbah *Banner*

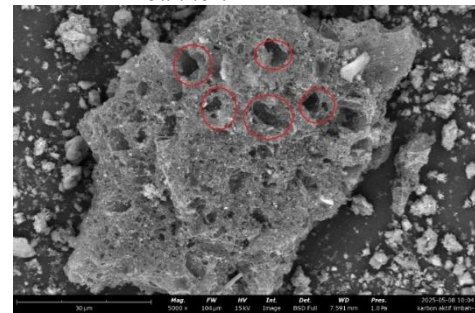
Parameter Uji (%)	Prasyarat Kualitas (%)	Hasil Analisis (%)	Referensi
Kadar Air	Maks. 15	3,4	SNI-06-3730-1995
Kadar Abu	Maks. 10	9,7	
Kadar Zat Menguap	Maks. 25	24,3	

Gambar 2. Difraktogram XRD Karbon Aktif

Berdasarkan Gambar 2., difraktogram XRD karbon aktif dari limbah *banner* menampilkan puncak-puncak utama pada 2θ = 26,6°, 43,4°, 54,8°, dan 83,8° yang menunjukkan keberadaan fase grafit kristalin (ICDD 01-075-2078), dengan puncak 26,6° menandakan struktur amorf khas karbon aktif. Selain itu, muncul puncak tambahan pada 29,4° yang menunjukkan adanya CaCO₃, serta puncak pada 25,3° yang mengindikasikan keberadaan fase kristalin TiO₂ (Farooq *et al.*, 2024; Mondol *et al.*, 2021).

Analisis Morfologi dengan Scanning Electron Microscope (SEM)

Karakterisasi SEM dilakukan dengan mengidentifikasi permukaan dan pori dari material karbon aktif limbah *banner*.



Gambar 3. Karbon Aktif Limbah *Banner* dengan Perbesaran 5.000x

Berdasarkan Gambar 3., morfologi karbon aktif dari limbah *banner* pada perbesaran 5.000x memperlihatkan permukaan yang kasar, tidak rata, serta memiliki pori dengan ukuran rata-rata 1,92 μm yang termasuk dalam kategori makropori (Aripin, 2007). Proses aktivasi menggunakan HCl berkontribusi dalam pembentukan dan perluasan pori karena kemampuannya melarutkan senyawa organik maupun anorganik yang masih terikat (Harmawanda *et al.*, 2023).

Kualitas Karbon Aktif Limbah Banner

Penentuan kualitas karbon aktif limbah *banner* dilakukan sesuai dengan SNI-06-3730-1995 tentang syarat dan mutu karbon aktif. Penentuan kualitas yang dilakukan berupa uji kadar air, kadar abu dan kadar zat menguap.

Berdasarkan Berdasarkan Tabel 1., karbon aktif yang disintesis dari limbah *banner* telah memenuhi standar mutu karbon aktif menurut SNI-06-3730-1995. Salah satu parameter penting adalah kadar air, yang menunjukkan sifat higroskopis material. Nilai kadar air sebesar 3,4% masih berada dalam batas yang ditetapkan standar. Hasil ini konsisten dengan temuan Dewi *et al.* (2020) yang menjelaskan bahwa semakin tinggi suhu dan konsentrasi aktivator, kadar air akan menurun. Rendahnya kadar air menandakan pori-pori lebih terbuka, sehingga proses adsorpsi berlangsung lebih optimal (Lestari *et al.*, 2024).

Parameter lain yang diuji adalah kadar abu, dengan hasil 9,7%, juga memenuhi ketentuan SNI-06-3730-1995. Penentuan kadar abu bertujuan untuk mengetahui kandungan oksida logam dalam karbon aktif. Kadar abu yang terlalu tinggi dapat menutupi pori-pori dan menurunkan kemampuan adsorpsi (Lestari *et al.*, 2024).

Selain itu, kadar zat menguap yang diperoleh sebesar 24,3% masih sesuai dengan standar. Komponen volatil ini meliputi senyawa seperti hidrogen, karbon monoksida, serta sebagian kecil uap air (Dewi *et al.*, 2020). Kondisi proses, terutama waktu dan suhu karbonisasi, berpengaruh terhadap jumlah zat menguap semakin tinggi suhu dan lama waktu karbonisasi, semakin banyak komponen volatil yang terlepas (Dewi *et al.*, 2020).

Penentuan Waktu Kontak Adsorpsi Logam Cu (II)

Karbon aktif limbah *banner* dilakukan uji adsorpsi terhadap logam Cu (II) menggunakan variasi waktu kontak dapat dilihat pada tabel 15, 30, 45 dan 60 menit dengan massa karbon aktif yang digunakan masing-masing 75 mg.

Tabel 2. Efisiensi Adsorpsi Logam Cu (II) Terhadap waktu

Waktu Kontak (Menit)	Konsentrasi Awal (ppm)	Konsentrasi Akhir (ppm)	Efisiensi Adsorpsi (%)
15	2	0,000081	99,995
30	2	0,000072	99,996
45	2	0,000052	99,997
60	2	0,000043	99,998

Berdasarkan Tabel 2., efisiensi adsorpsi meningkat seiring dengan bertambahnya waktu kontak dari 15 hingga 60 menit, dengan nilai maksimum tercapai pada menit ke-60. Peningkatan ini sejalan dengan hasil penelitian Lin *et al.* (2025) yang menjelaskan bahwa pada tahap awal, laju adsorpsi berlangsung cepat karena banyaknya situs aktif yang masih tersedia. Namun, seiring waktu, situs aktif mulai terisi oleh ion logam menyebabkan laju adsorpsi menurun hingga mencapai kondisi setimbang pada menit ke-60.

Uji Adsorpsi Logam Cu pada Air Kolong

Uji adsorpsi karbon aktif dari limbah *banner* terhadap sampel air kolong dilakukan setelah diperoleh waktu kontak optimum pada larutan artifisial.

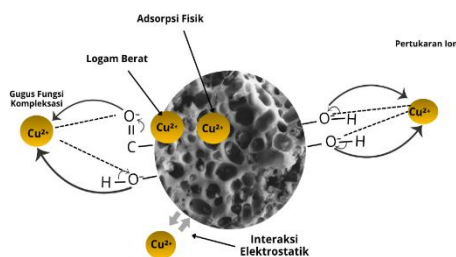
Pengambilan sampel mengikuti SNI 8995:2021, yakni dari permukaan dan dasar kolong dengan kedalaman ≤ 10 m di kawasan Jalan Lintas Timur. Hasil pengujian menunjukkan konsentrasi Cu sebesar 0,003 mg/L, masih berada di bawah baku mutu kelas I menurut PP No. 22 Tahun 2021 (0,02 mg/L). Rendahnya kadar Cu ini diduga disebabkan oleh kestabilannya di sedimen, baik dalam bentuk senyawa sulfida maupun yang teradsorpsi pada oksida besi, sehingga pelepasannya ke kolom air terbatas meskipun ada gangguan fisik. Selain itu, pada perairan dangkal dengan dinamika partikel tinggi, lebih dari 70% Cu terlarut dapat kembali mengendap dalam waktu kurang dari satu bulan, sehingga menurunkan konsentrasi Cu di kolom air (Raden *et al.*, 2018).

Tabel 3. Kadar Logam pada Air Kolong Sebelum dan Setelah Perlakuan

Logam Berat	Konsentrasi Awal (ppm)	Konsentrasi Akhir (ppm)	Efisiensi Adsorpsi (%)
Cu	0,003	0,000028	99,07%

Berdasarkan Tabel 3., karbon aktif dari limbah *banner* memiliki efisiensi adsorpsi ion Cu^{2+} pada air kolong sebesar 99,07%, yang sebanding dengan hasil pada larutan artifisial (99,998%), sehingga menunjukkan potensinya sebagai adsorben logam berat. Perbedaan efisiensi ini dipengaruhi oleh adanya ion-ion lain yang turut bersaing dengan Cu^{2+} . Hasil karakterisasi FTIR mengungkap keberadaan gugus $-\text{OH}$ dan $\text{C}=\text{O}$

sebagai situs aktif, analisis SEM memperlihatkan morfologi permukaan yang kasar, sedangkan XRD mengindikasikan struktur amorf. Ketiga hasil karakterisasi tersebut memperkuat mekanisme adsorpsi dan menjelaskan kinerja tinggi karbon aktif limbah *banner* dalam penyerapan ion Cu^{2+} .



Gambar 4. Ilustrasi Proses Adsorpsi Logam Cu oleh Karbon Aktif

Berdasarkan Gambar 4., proses adsorpsi ion Cu^{2+} pada karbon aktif limbah *banner* terjadi melalui mekanisme fisika dan kimia. Pada tahap awal, fisiosorpsi berlangsung melalui difusi ion ke dalam pori-pori permukaan akibat gaya *van der Waals* dan interaksi elektrostatik. Selanjutnya, kemisorpsi terjadi melalui pertukaran ion serta pembentukan ikatan koordinasi antara Cu^{2+} dengan gugus fungsi $-\text{OH}$ dan $\text{C}=\text{O}$. Struktur amorf karbon aktif menyediakan banyak situs aktif, memungkinkan ion Cu^{2+} terikat stabil pada permukaannya, sehingga menunjukkan kinerja tinggi sebagai adsorben logam berat dalam pengolahan air.

KESIMPULAN

Karbon aktif hasil sintesis dari limbah *banner* memiliki gugus fungsional aktif ($\text{C}=\text{O}$ dan $-\text{OH}$), struktur amorf, serta morfologi permukaan yang kasar dan tidak merata dengan ukuran makropori sekitar 1,92 μm . Sifat-sifat ini mendukung kinerja adsorpsi, di mana kemampuan penyerapan ion Cu^{2+} mencapai 99,07% dari air kolong. Temuan tersebut menunjukkan bahwa karbon aktif dari limbah *banner* berpotensi sebagai adsorben alternatif yang efisien untuk pengolahan air tercemar logam berat, terutama di daerah yang terdampak aktivitas pertambangan seperti Bangka Belitung.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Dasar Terpadu dan Laboratorium Kimia FST UBB atas fasilitas penelitian, kepada Bapak Verry Andre Fabiani, S.Si., M.Si dan Ibu Ristika Oktavia Asriza, S.Pd., M.Si atas bimbingan dan arahan, serta kepada orang tua dan teman-teman atas dukungan dan bantuan selama penelitian.

REFERENSI

- Aldila, H., Dalimunthe, D. Y. & Nuryadin, A. 2020. Ekstraksi Kitosan Dari Limbah Cangkang Udang Sebagai Adsorben Ion Logam Cu Pada Air Pasca Tambang Timah. *PROMINE*, 8(2), 65–71.
- Aripin. 2007. Preparasi dan Karakterisasi Karbon Aktif Magnetik Nanopori. *Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, 3(1), 1–6.
- Dewi, R., Azhari, & Nofriadi, I. 2020. Aktivasi Karbon dari Kulit Pinang dengan Menggunakan Aktivator Kimia KOH. *Jurnal Teknologi Kimia Unimal*, 9(2), 12–22.
- Farooq, H., Venvik, H. J., & Bandyopadhyay, S. 2024. Quantitative Phase Analysis and Structural Investigation of Graphite Anode for Lithium-Ion Batteries. In Z. Peng et al. (Eds.). *Characterization of Minerals, Metals, and Materials 2024* (pp. 223–233).
- Firda, Z., Muarif, A., Azhari, A., Mulyawan, R. & Kurniawan, E. 2023. Optimasi Suhu Dan Konsentrasi Pelarut Etanol Pada Proses Ekstraksi Tanin Dari Biji Pinang Menggunakan Pendekatan Rsm. *Chemical Engineering Journal Storage (CEJS)*, 3(4), 442.
- Halim, A., Romadon, J. & Achyar, M. 2021. Pembuatan Adsorben dari Sekam Padi Sebagai Penyerap Logam Berat Tembaga (Cu) dan Timbal (Pb) Dalam Air Limbah. *Sustainable Environmental and Optimizing Industry Journal*, 3(2), 66–74.
- Hanifah, H., Hadisoebroto, G. & Dewi, L. 2023. Efektivitas Karbon Aktif Kulit Salak Salacca Zalacca (Gaert) Voss Sebagai Bioadsorben Logam Tembaga (Cu) dari Limbah Laboratorium Farmasi. *Jurnal Ilmiah Ecosystem*, 23(3), 624–636.
- Hendrasarie, N., & Prihantini, R. 2021. Pemanfaatan Karbon Aktif Sampah Plastik Untuk Adsorben Pengolah Limbah Cair. *Jukung Jurnal Teknik Lingkungan*, 6(2), 136–146.
- Harmawanda, S., Wahyuni, D., Nurhanisa, M., Hassanuddin, & Zulfian. 2023. Efektivitas Karbon Aktif dari Limbah Tongkol Jagung Dengan Variasi Aktivator Asam Klorida Dalam Penyerapan Logam Besi Pada Air Gambut. *Jurnal Fisika*, 13(1), 10–19.
- Ibrahim, I. 2015. Dampak Penambangan Timah Ilegal yang Merusak Ekosistem di Bangka Belitung. *Jurnal Hukum Dan Bisnis (Selisik)*, 1(1), 77–90. OK
- Juliantie, F. T., Millenia, G., Limbong, M. C. & Pusfitasari, M. D. 2022. Aplikasi Porous Activated Carbon dari Limbah Botol Plastik sebagai Material Elektroda pada Electric Double Layer Capacitors dengan Gel Polymer Electrolyt. *JRST (Jurnal Riset Sains Dan Teknologi)*, 6(1), 85.
- Lestari, J., Zulnazri, Nurlaila, R., Faisal, F., Fibarzi, W. U., & Fitri, S. 2024. Pengaruh Konsentrasi Aktivator HCl dan Ukuran Partikel Terhadap

- Kemampuan Daya Serap Karbon Aktif dari Ampas Bubuk Kopi. *Chemical Engineering Journal Storage*, 4(4), 596–605.
- Lin, J.-Y., Shi, J.-R., Liu, F.-C., Wang, C.-Y., Liu, F.-W., & Lin, C.-M. 2025. Sustainable Conversion of Waste PET Into Porous Activated Carbon for Efficient Cu^{2+} Elimination From Aqueous Solution. *ACS Omega*, 10(15), 14994–15008.
- Meyzilia, A. 2018. Pemanfaatan Air Kolong Bekas Tambang Timah sebagai Penambah Sumber Air Tanah Menggunakan Lubang Kompos di Bangka Belitung. *Jurnal Pendidikan Ilmu Sosial*, 27, 22–30. OK
- Mondol, M. N., Khalid, N. S., Jalil, M. A., & Rahman, M. T. 2021. Adsorptive Removal of Cu(II) from Aqueous Solution Using HCl-Modified Activated Carbon Prepared from Coconut Husk. *Applied Water Science*, 11(3), 81.
- Novala, G. C., Kirana, K. H., Fajar, S. J. & Bijaksana, S. 2019. Testing The Effectiveness of Mechanical Magnetic Extraction in Riverine and Lacustrine Sediment. *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1204, No. 1, p. 012085). IOP Publishing.
- Oko, S., Mustafa, M.; Kurniawan, A. & Norfitria, L. 2021. Pembuatan Karbon Aktif dari Limbah Plastik PET (Polyethylene terephthalate) Menggunakan Aktivator KOH. *Metana*, 17(2), 61–68.
- Raden, K. J., Carbonaro, R. F., van Hullebusch, E. D., Baken, S., & Delbeke, K. 2019. The Fate of Copper Added to Surface Water: Field, Laboratory, and Modeling Studies. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 38(7), 1386–1399.
- Ramadiani, L. S., & Munasir. 2021. Material Komposit Karbon Aktif/ Fe_3O_4 sebagai Adsorben Zat Warna dan Logam Berat (Cu dan Cd) dalam Air. *Prosiding Seminar Nasional Fisika (SNF)*, Cd, 90–96.
- Raudlotus, M., & Edy, I. 2017. Analisa Kadar Tembaga (Cu) yang Terdapat Pada Minuman Kaleng Menggunakan Metode Spektroskopi UV-VIS. *Jurnal Sains*, 21–27.
- Sikumbang, C. A. 2019. Daur Ulang Limbah Spanduk Plastik Menjadi Tas Belanja. Universitas Negeri Semarang. Semarang. (SKRIPSI).
- Tani, D., & Lumingkewas, S. 2022. Pembuatan dan Karakterisasi Karbon Aktif Dari Arang Tempurung Kelapa dengan Kombinasi Aktivasi Kimia dan Fisika. *Fullerene Journ.Of Chem*, 7(2), 120–132.
- Yulianti.; Bani, B. & Albana. 2020. Analisa Pertambangan Timah di Provinsi Kepulauan Bangka Belitung. *Jurnal Ekonomi*, 22(1), 54–62.