

Karbon Aktif dari Limbah Sawi Putih untuk Adsorpsi Ion Mangan (Mn)

Activated Carbon from White Mustard Waste for Adsorption of Manganese (Mn) Ions

Jefriadi^{1*}, Rinny Jelita¹, Nurhaliza¹, Nur Nailisa¹

¹Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Lambung Mangkurat, Jl. A. Yani Km. 35,5 Banjarbaru, 70714, Indonesia

*Email: jefriadi@ulm.ac.id

Naskah diterima: 3 Juni 2025; Naskah disetujui: 26 Juni 2025

ABSTRACT

Water pollution caused by manganese (Mn) heavy metal is a serious issue in various aquatic environments. One of the effective approaches to reduce heavy metal concentrations is the adsorption process using activated carbon. In this study, white mustard waste (*Brassica pekinensis* L.) was utilized as a raw material for activated carbon production through pyrolysis at 400 °C for one hour, followed by chemical activation using 1N HCl solution. The investigated variables included variations in contact time (0, 30, 60, 90, and 120 minutes) and adsorbent mass (0.2 to 1.0 grams) to evaluate the adsorption efficiency and capacity for Mn ions. The analysis results showed that the activated carbon had a moisture content of 11.09%, meeting the SNI 06-3730-1995 standard. The optimum contact time for Mn ion adsorption was 90 minutes, with an efficiency of 64.7% and an adsorption capacity of 6.47 mg/g. The optimum adsorbent mass of 1.0 gram yielded the highest efficiency of 68.37% and an adsorption capacity of 5.12 mg/g. Based on these findings, activated carbon derived from white mustard waste demonstrates promising potential as an adsorbent material for manganese ion removal from water.

Keywords: activated carbon, adsorption, manganese, pyrolysis, white mustard

ABSTRAK

Pencemaran air oleh logam berat mangan (Mn) merupakan masalah serius di berbagai wilayah perairan. Salah satu pendekatan yang dinilai efektif untuk mengurangi kandungan logam berat tersebut adalah melalui proses adsorpsi menggunakan karbon aktif. Dalam studi ini, limbah sawi putih (*Brassica pekinensis* L.) dimanfaatkan sebagai bahan dasar pembuatan karbon aktif melalui proses pirolisis pada suhu 400 °C selama satu jam, dilanjutkan dengan aktivasi menggunakan larutan HCl 1N. Variabel yang diteliti meliputi variasi waktu kontak (0, 30, 60, 90, dan 120 menit) serta massa adsorben (0,2 hingga 1,0 gram) untuk mengevaluasi efisiensi dan kapasitas penjerapan ion Mn. Hasil analisis menunjukkan bahwa karbon aktif memiliki kadar air sebesar 11,09%, sesuai standar SNI 06-3730-1995. Waktu kontak optimum untuk adsorpsi ion Mn adalah 90 menit, dengan efisiensi 64,7% dan kapasitas adsorpsi 6,47 mg/g. Variasi massa adsorben optimum 1,0 gram menghasilkan efisiensi tertinggi 68,37% dan kapasitas adsorpsi 5,12 mg/g. Berdasarkan hasil tersebut, karbon aktif berbahan limbah sawi putih menunjukkan potensi yang menjanjikan sebagai material adsorben untuk mengurangi ion mangan dari perairan.

Kata kunci: karbon aktif, adsorpsi, mangan, pirolisis, sawi putih

PENDAHULUAN

Pencemaran air akibat logam berat merupakan salah satu permasalahan lingkungan yang krusial di berbagai wilayah. Logam berat seperti mangan (Mn) bersifat toksik, dapat terakumulasi di dalam tubuh organisme air, dan menyebabkan gangguan fisiologis maupun kerusakan ekosistem (Sudarningsih, 2021, Leonard, 2023). Konsentrasi Mn yang melebihi baku mutu air dapat membahayakan kesehatan manusia dan mengganggu fungsi ekosistem perairan.

Berbagai metode telah digunakan untuk mengurangi kadar logam berat dalam air, salah satunya adalah metode adsorpsi. Adsorpsi menjadi metode yang banyak dipilih karena keefektifannya, biaya operasional yang relatif rendah, dan kemudahan dalam pengoperasian (Mariana dkk., 2021). Material adsorben yang banyak dipilih sebagai material adsorben berkat struktur porinya yang memiliki luas permukaan yang besar dan struktur pori yang mendukung interaksi dengan ion logam (Sultana dkk., 2022).

Sumber bahan baku karbon aktif yang berlimpah dan murah menjadi pertimbangan penting untuk keberlanjutan lingkungan dan ekonomi. Salah satu bahan yang potensial adalah limbah sawi putih (*Brassica pekinensis* L.), yang sering terbuang di pasar tradisional. Sawi putih memiliki kandungan lignoselulosa (hemiselulosa, selulosa, dan lignin) yang tinggi, sehingga berpotensi menghasilkan karbon aktif dengan karakteristik yang baik untuk adsorpsi (Bari dkk., 2016).

Proses pirolisis diikuti aktivasi kimia diketahui mampu meningkatkan luas permukaan dan membuka pori-pori karbon aktif, sehingga meningkatkan kapasitas adsorpsi ion logam berat (Pasaribu, 2021). Namun, karakteristik karbon aktif yang dihasilkan dari limbah sawi putih, serta pengaruh parameter operasional seperti waktu kontak dan massa adsorben terhadap efektivitas adsorpsi ion Mn, masih perlu dievaluasi lebih lanjut.

Dengan demikian, penelitian ini dilakukan untuk mengoptimalkan pemanfaatan limbah sawi putih sebagai bahan dasar pembuatan karbon aktif melalui proses pirolisis dan aktivasi kimia, serta menganalisis pengaruh waktu kontak dan massa adsorben terhadap efisiensi dan kapasitas adsorpsi ion logam Mn. Penelitian ini diharapkan mampu memberikan kontribusi terhadap pemanfaatan limbah organik sebagai material adsorben yang efisien dalam pengolahan air limbah yang tercemar logam berat

METODE PENELITIAN

Penelitian ini bertujuan mengeksplorasi potensi limbah sawi putih sebagai bahan dasar dalam pembuatan karbon aktif yang kemudian diaplikasikan untuk adsorpsi ion logam Mn. Tahapan penelitian ini meliputi pembuatan karbon aktif, aktivasi kimia, pembuatan larutan artifisial Mn, proses adsorpsi, dan analisis karakteristik karbon aktif serta performa adsorpsi.

Bahan

Bahan utama yang digunakan adalah limbah sawi putih (*Brassica pekinensia* L.) yang diperoleh dari pasar tradisional Martapura, gas nitrogen, serbuk logam $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (Merck), akuades, dan larutan HCl 1N.

Alat

Peralatan yang digunakan antara lain reaktor pirolisis dengan termokopel dan kondensator, *furnace* elektrik (Carbolite), oven, AAS (*Atomic Absorption Spectrophotometer*), *magnetic heated stirrer*, ayakan 20 mesh, serta peralatan laboratorium pendukung (gelas ukur, pipet kaca, desikator).

Pembuatan Karbon Aktif

Limbah sawi putih dicuci, dikeringkan di bawah sinar matahari, dan dihaluskan menggunakan blender. Serbuk biomassa diayak hingga lolos ayakan 20 mesh. Pirolisis dilakukan pada suhu 400 °C selama 1 jam sambil mengalirkan gas nitrogen ke dalam reaktor dengan kecepatan alir 150 mL/menit untuk menghasilkan arang. Selanjutnya, arang diaktivasi dengan merendam 20 gram arang dalam 250 mL larutan HCl 1N selama 22 jam. Setelah aktivasi, karbon aktif dicuci dengan akuades hingga pH netral, kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 120 °C selama 3 jam. Karbon aktif yang dihasilkan dilakukan analisis kadar air.

Pembuatan Larutan Artifisial Mn 30 ppm

Larutan artifisial Mn 30 ppm dibuat dengan melarutkan 0,0922 gram serbuk $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ dalam 1000 mL akuades dan diaduk hingga homogen. Larutan homogen ini digunakan sebagai sampel uji adsorpsi. Larutan yang diperoleh dilakukan analisis AAS.

Proses Adsorpsi

Proses adsorpsi dilakukan dengan memvariasikan waktu kontak (0, 30, 60, 90, dan 120 menit) dan massa adsorben (0,2–1,0 gram) untuk menentukan parameter optimum. Sebanyak 200 mL larutan artifisial Mn 30 ppm dicampurkan dengan karbon aktif dalam erlenmeyer, kemudian diaduk pada kecepatan 150 rpm. Setelah proses adsorpsi, larutan disaring dan dianalisis kandungan ion Mn menggunakan AAS.

Karakterisasi dan Analisis

Penelitian ini menggunakan beberapa metode analisis untuk mengevaluasi karakteristik karbon aktif dan efektivitasnya sebagai adsorben, yaitu:

a. Analisis Kadar Lignoselulosa

Lignoselulosa terdiri atas tiga komponen utama, yakni selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Kandungan selulosa, hemiselulosa, dan lignin pada biomassa sawi putih dianalisis menggunakan metode Chesson-Datta. Metode ini merupakan prosedur gravimetri berurutan yang melibatkan tahap-tahap delignifikasi dan fraksinasi komponen lignoselulosa berdasarkan perbedaan kelarutan dan stabilitas termal.

b. Analisis Kadar Air

Kadar air pada biomassa dan karbon aktif diukur dengan metode pengeringan termogravimetri, sesuai standar SNI 06-3730-1995. Sebanyak 1 gram sampel dikeringkan pada suhu 110 °C selama 1 jam, kemudian ditimbang untuk menghitung persentase kadar air. Analisis kadar air dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$Kadar\ air = \frac{a-b}{a} \times 100\% \quad (1)$$

Keterangan: a = massa sampel awal (gram)

b = massa sampel setelah dikeringkan (gram)

c. Analisis Konsentrasi Logam Berat (Mn)

Konsentrasi logam Mn dalam larutan diukur menggunakan AAS. Hasil AAS digunakan untuk menghitung kapasitas adsorpsi (mg/g) dan efisiensi adsorpsi (%). Sebelum pengujian, alat dikalibrasi menggunakan larutan standar Mn dengan konsentrasi 5 ppm, 10 ppm, 20 ppm, dan 30 ppm untuk memperoleh kurva kalibrasi. Seluruh proses pengujian dilakukan di ruang laboratorium terkontrol, dengan suhu dijaga pada kisaran 20–25 °C, serta sistem ventilasi dan pencahayaan yang memadai.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menunjukkan bagaimana limbah sawi putih dapat diolah menjadi karbon aktif melalui pirolisis, kemudian diuji efektivitasnya sebagai adsorben untuk ion Mn.

Analisis Kandungan Lignoselulosa

Kandungan lignoselulosa dalam biomassa merupakan salah satu parameter penting dalam pemilihan bahan baku untuk pembuatan karbon aktif. Komponen utama lignoselulosa, yaitu hemiselulosa, selulosa, dan lignin, memiliki peran yang berbeda dalam pembentukan struktur dan sifat pori-pori karbon aktif. Analisis kandungan lignoselulosa pada biomassa sawi putih dilakukan untuk menilai sejauh mana bahan ini potensial sebagai bahan baku karbon aktif yang efektif untuk aplikasi adsorpsi pada air limbah.

Hasil analisis kandungan lignoselulosa pada biomassa sawi putih yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Analisa Lignoselulosa

Kode Sampel	Hasil analisis		
	Hemiselulosa (%)	Selulosa (%)	Lignin (%)
Sawi Putih	22,08 %	30,56%	7,62%

Hasil analisis menunjukkan bahwa biomassa sawi putih memiliki kandungan hemiselulosa 22,08%, selulosa 30,56%, dan lignin 7,62%. Komposisi ini menunjukkan potensi tinggi biomassa ini sebagai prekursor karbon aktif. Tingginya kadar selulosa dan hemiselulosa mendukung pembentukan pori-pori selama proses pirolisis, karena kedua komponen ini terdekomposisi pada suhu pirolisis (300–400 °C), meninggalkan rongga dan ruang pori yang menjadi jalur bagi penjerapan kontaminan (Contescu dkk., 2018). Sementara itu, lignin yang relatif stabil berkontribusi pada kestabilan struktur karbon aktif yang dihasilkan, karena lignin memiliki struktur aromatik yang lebih tahan terhadap dekomposisi termal (Setiapraja dkk., 2024).

Selain itu, kandungan lignoselulosa yang terukur pada biomassa sawi putih ini menunjukkan kesesuaian dengan karakteristik umum bahan baku karbon aktif berbasis biomassa, yaitu tingginya kandungan selulosa dan hemiselulosa yang berperan penting dalam pembentukan struktur pori saat proses pirolisis, serta kandungan lignin yang memberikan kestabilan termal dan mekanik pada kerangka karbon. Karakteristik ini menjadi indikator utama dalam menilai potensi biomassa sebagai prekursor karbon aktif

(Lubis dkk., 2020). Biomassa sawi putih ini tidak hanya memiliki potensi ekonomis sebagai bahan baku alternatif yang melimpah dan murah, tetapi juga dapat memberikan performa adsorpsi yang baik pada aplikasi pengolahan air limbah, khususnya untuk penjerapan ion logam berat.

Analisis Kadar Air Karbon Aktif

Kadar air merupakan salah satu parameter kualitas penting pada karbon aktif. Nilai kadar air yang rendah menunjukkan bahwa karbon aktif memiliki stabilitas yang baik dan tidak bersifat higroskopis berlebihan, sehingga mampu menjaga kemampuan adsorpsi pada aplikasi praktis. Pengukuran kadar air dilakukan pada tiga jenis sampel, yaitu biomassa awal, arang hasil pirolisis (sebelum aktivasi), dan karbon aktif setelah aktivasi. Hasil dari analisis kadar air dari ketiga jenis sampel dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Uji Kadar Air dengan Metode Pengeringan (Thermogravimetri)

Sampel	Kadar Air	Satuan
Biomassa	17.8	%
Karbon sebelum aktivasi (arang)	2.03	%
Karbon setelah aktivasi	11.09	%

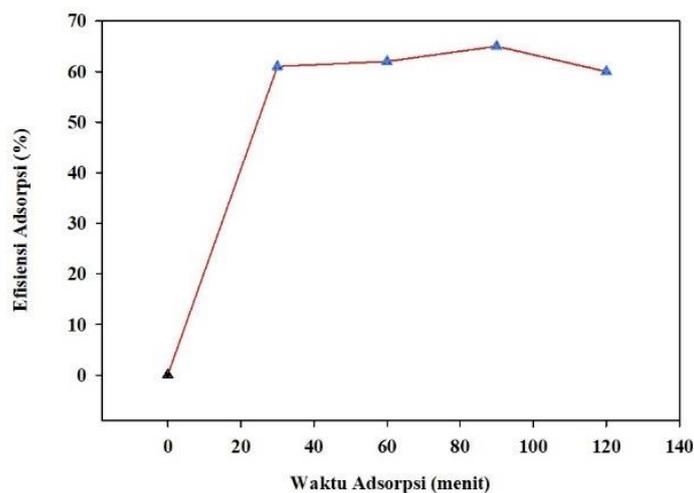
Hasil analisis menunjukkan bahwa kadar air pada biomassa sawi putih awal adalah 17,8%, yang masih tergolong tinggi sebagaimana karakteristik umum bahan organik segar. Setelah proses pirolisis, kadar air menurun drastis menjadi 2,03% pada arang hasil pirolisis. Penurunan ini menunjukkan keberhasilan pirolisis dalam mengeluarkan air terikat dan volatil lainnya. Namun, setelah proses aktivasi kimia menggunakan HCl 1N, kadar air sedikit meningkat menjadi 11,09%. Hal ini terjadi karena proses aktivasi kimia dapat membuka struktur pori dan meningkatkan afinitas terhadap kelembaban (Dewi dkk., 2020). Proses aktivasi kimia menggunakan larutan asam mampu melarutkan senyawa mineral dan membuka struktur mikropori karbon. Selain itu, aktivasi juga meningkatkan jumlah gugus fungsional polar yang bersifat hidrofilik, seperti $-OH$ dan $-COOH$, yang menyebabkan afinitas karbon aktif terhadap kelembaban meningkat (Sultana dkk., 2022, Dewi dkk., 2020).

Meskipun kadar air karbon aktif meningkat setelah aktivasi, nilai 11,09% masih memenuhi persyaratan SNI 06-3730-1995 (maksimum kadar air 15%). Hal ini menunjukkan bahwa karbon aktif yang dihasilkan stabil dan siap digunakan sebagai adsorben pada aplikasi air limbah. Kadar air yang sesuai standar ini juga penting untuk mencegah kompetisi antara molekul air dengan ion logam dalam proses adsorpsi (Yakout

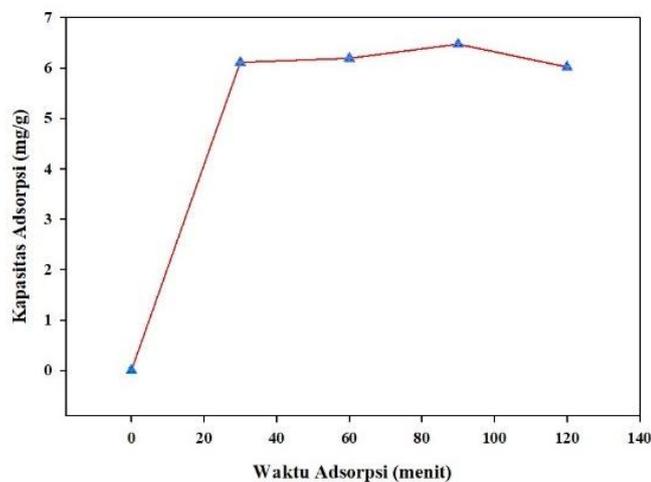
dkk., 2015). Dengan demikian, karbon aktif dari limbah sawi putih ini telah memenuhi salah satu kriteria penting kualitas karbon aktif, yang memperkuat potensinya sebagai bahan adsorben.

Pengaruh Waktu Kontak terhadap Adsorpsi Ion Mn

Waktu kontak merupakan salah satu faktor penting yang memengaruhi efektivitas dan kapasitas adsorpsi dalam proses pemurnian air limbah. Pada penelitian ini, variasi waktu kontak yang digunakan adalah 0, 30, 60, 90, dan 120 menit, dengan menggunakan karbon aktif dari limbah sawi putih sebagai adsorben. Hasil pengukuran konsentrasi ion Mn setelah proses adsorpsi divisualisasikan pada Gambar 1 (grafik hubungan efisiensi adsorpsi dengan waktu kontak) dan Gambar 2 (grafik hubungan kapasitas adsorpsi dengan waktu kontak).



Gambar 1 Hubungan Efisiensi Adsorpsi terhadap Waktu Kontak



Gambar 2 Hubungan Kapasitas Adsorpsi terhadap Waktu Kontak

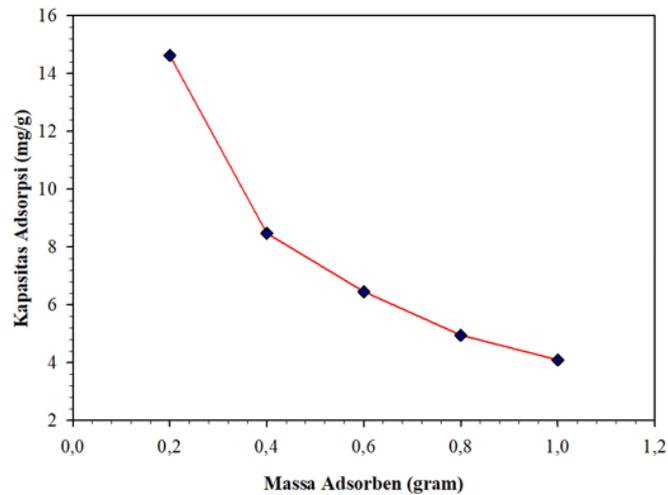
Berdasarkan grafik, terlihat bahwa efisiensi dan kapasitas adsorpsi meningkat secara signifikan hingga waktu kontak 90 menit. Pada waktu tersebut, efisiensi adsorpsi mencapai sekitar 64,7% dengan kapasitas adsorpsi sebesar 6,47 mg/g. Peningkatan ini disebabkan oleh interaksi yang semakin optimal antara ion Mn dalam larutan dan gugus fungsional pada permukaan karbon aktif, sehingga semakin banyak ion Mn yang terperangkap dalam pori-pori adsorben (Li dkk., 2022).

Namun, pada waktu kontak 120 menit, terjadi penurunan efisiensi dan kapasitas adsorpsi. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh tercapainya kondisi kesetimbangan dinamis antara proses adsorpsi dan desorpsi. Setelah waktu optimum tercapai, sebagian ion Mn yang telah teradsorpsi dapat terlepas kembali ke larutan akibat perubahan gradien konsentrasi dan interaksi fisiko-kimia yang tidak lagi mendukung adsorpsi (Geraldina dkk., 2016).

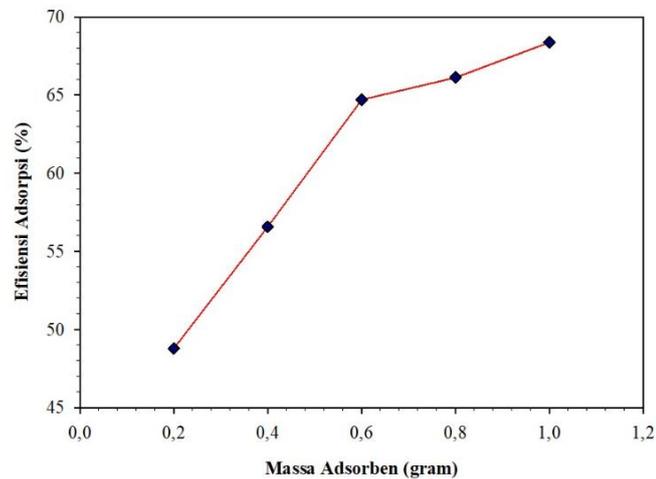
Hasil ini menunjukkan bahwa waktu kontak optimum untuk proses adsorpsi ion logam Mn oleh karbon aktif dari limbah sawi putih adalah 90 menit. Waktu optimum ini menjadi dasar penting untuk penerapan praktis di lapangan, karena dapat memaksimalkan efisiensi proses adsorpsi dengan waktu yang efisien dan biaya operasional yang lebih rendah.

Pengaruh Variasi Massa Adsorben terhadap Adsorpsi Ion Mn

Selain waktu kontak, massa adsorben juga merupakan faktor penting yang menentukan performa adsorpsi. Pada penelitian ini, massa karbon aktif divariasikan dari 0,2 gram hingga 1,0 gram untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap efisiensi dan kapasitas adsorpsi ion Mn. Hasil pengukuran divisualisasikan melalui grafik yang disajikan pada Gambar 3 (grafik hubungan kapasitas adsorpsi dengan variasi massa adsorben) dan Gambar 4 (grafik hubungan efisiensi adsorpsi dengan variasi massa adsorben).



Gambar 3. Kapasitas Adsorpsi Variasi Massa Adsorben



Gambar 4. Efisiensi Adsorpsi Variasi Massa Adsorben

Berdasarkan grafik, terlihat bahwa peningkatan massa adsorben secara umum menyebabkan peningkatan efisiensi adsorpsi. Efisiensi tertinggi dicapai pada massa 1,0 gram dengan nilai 68,37%. Peningkatan efisiensi ini disebabkan oleh bertambahnya jumlah situs aktif pada permukaan karbon aktif yang tersedia untuk mengadsorpsi ion Mn (Sudarmawan dkk., 2020). Semakin banyak massa adsorben yang ditambahkan, semakin banyak pula gugus fungsional yang dapat berinteraksi dengan ion logam dalam larutan.

Namun, grafik juga menunjukkan bahwa kapasitas adsorpsi (mg/g) tidak selalu meningkat seiring bertambahnya massa adsorben. Kapasitas optimum justru tercapai pada massa adsorben yang lebih kecil, yaitu pada massa 0,2 gram. Hal ini disebabkan oleh terjadinya fenomena tumpang tindih pori (overlapping pores) dan aglomerasi partikel karbon aktif ketika massa adsorben terlalu tinggi (Rashidi dkk., 2014). Overlapping dan

aglomerasi ini mengurangi luas permukaan efektif yang dapat berinteraksi dengan ion logam dalam larutan, sehingga kapasitas adsorpsi menurun meskipun efisiensi secara keseluruhan meningkat.

Temuan ini menunjukkan pentingnya menentukan massa adsorben optimum, karena meskipun massa yang besar dapat meningkatkan efisiensi secara keseluruhan, hal ini belum tentu memberikan kapasitas adsorpsi yang tinggi per satuan berat adsorben. Oleh karena itu, massa optimum harus dipilih untuk menyeimbangkan efisiensi, kapasitas, dan efektivitas biaya dalam aplikasi praktis pengolahan air limbah.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa limbah sawi putih (*Brassica pekinensis* L.) dapat dimanfaatkan sebagai bahan dasar untuk sintesis karbon aktif melalui proses pirolisis pada suhu 400 °C selama satu jam, disertai aktivasi menggunakan larutan HCl 1N. Karbon aktif yang diperoleh memiliki kadar air 11,09%, sesuai standar SNI 06-3730-1995, dan komposisi lignoselulosa yang mendukung pembentukan struktur berpori. Uji adsorpsi menunjukkan bahwa waktu kontak terbaik adalah 90 menit, dengan efisiensi penjerapan ion Mn sebesar 64,7% dan kapasitas adsorpsi 6,47 mg/g. Variasi massa adsorben optimum 1,0 gram menghasilkan efisiensi tertinggi 68,37% dan kapasitas adsorpsi 5,12 mg/g. Hasil ini membuktikan bahwa karbon aktif dari limbah sawi putih berpotensi sebagai adsorben yang efektif untuk mengurangi kandungan ion Mn dalam air limbah, serta memberikan kontribusi positif terhadap pengurangan limbah organik pasar.

DAFTAR PUSTAKA

- Bari, M., Shashi, F., Habib, M., Islam, M. & Hassan, M. Potential agricultural lignocellulosic waste materials for bioconversion. Proceedings of the 3rd International Conference on Advances in Civil Engineering. Chittagong, Bangladesh, 2016. 630-634.
- Contescu, C. I., Adhikari, S. P., Gallego, N. C., Evans, N. D. & Biss, B. E. (2018). Activated carbons derived from high-temperature pyrolysis of lignocellulosic biomass. *C*, 4, 51.
- Dewi, R., Azhari, A. & Nofriadi, I. (2020). Aktivasi karbon dari kulit pinang dengan menggunakan aktivator kimia KOH. *Jurnal Teknologi Kimia Unimal*, 9, 12-22.

- Geraldina, G., Taslimah, T. & Nuryanto, R. (2016). Pemanfaatan Montmorillonit Terpillar Al-Cr pada Adsorpsi Zat Warna Rhodamin B dengan Variasi Massa Adsorben dan Waktu Adsorpsi. *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*, 19, 99-106.
- Leonard, F. (2023). Konsentrasi Logam Berat Besi (Fe), Mangan (Mn), Tembaga (Cu) pada Perairan Sungai Radda. *Jurnal Penelitian Multidisiplin Ilmu*, 2, 2167-2172.
- Li, J., Dong, X., Liu, X., Xu, X., Duan, W., Park, J., Gao, L. & Lu, Y. (2022). Comparative study on the adsorption characteristics of heavy metal ions by activated carbon and selected natural adsorbents. *Sustainability*, 14, 15579.
- Lubis, R. a. F., Nasution, H. I. & Zubir, M. (2020). Production of activated carbon from natural sources for water purification. *Indonesian Journal of Chemical Science and Technology*, 3, 67-73.
- Mariana, M., Hps, A. K., Mistar, E., Yahya, E. B., Alfatah, T., Danish, M. & Amayreh, M. (2021). Recent advances in activated carbon modification techniques for enhanced heavy metal adsorption. *Journal of Water Process Engineering*, 43, 102221.
- Pasaribu, M. Pengaruh Aktivator Asam Dan Basa Karbon Aktif Akar Tumbuhan Mangrove Terhadap Salinitas Air Laut. Prosiding Seminar Nasional Teknologi Industri (Snti), 2021. 380-382.
- Rashidi, N. A., Yusup, S., Borhan, A. & Loong, L. H. (2014). Experimental and modelling studies of carbon dioxide adsorption by porous biomass derived activated carbon. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 16, 1353-1361.
- Setiapraja, L. A., Sururi, M. R. & Rachmawati, V. (2024). Potensi Limbah Biomassa Menjadi Karbon Aktif Sebagai Upaya Resources Recovery: Studi Literatur. *Jurnal Serambi Engineering*, 9, 7795-7803.
- Sudarmawan, W. S., Suprijanto, J. & Riniatsih, I. (2020). Abu cangkang kerang anadara granosa, Linnaeus 1758 (Bivalvia: Arcidae) sebagai adsorben logam berat dalam air laut. *Journal of Marine Research*, 9, 237-244.
- Sudarningsih, S. (2021). Analisis Logam Berat Pada Sedimen Sungai Martapura, Kalimantan Selatan. *Jurnal Fisika Flux: Jurnal Ilmiah Fisika FMIPA Universitas Lambung Mangkurat*, 18, 1-8.
- Sultana, M., Rownok, M. H., Sabrin, M., Rahaman, M. H. & Alam, S. N. (2022). A review on experimental chemically modified activated carbon to enhance dye and heavy metals adsorption. *Cleaner engineering and technology*, 6, 100382.
- Yakout, S., Daifullah, A., El-Reefy, S. & Ali, H. (2015). Surface modification and characterization of a RS activated carbon: density, yield, XRD, ash, and moisture content. *Desalination and Water Treatment*, 53, 718-726.