

## Karakterisasi Adsorben dari Limbah Pelepah Kelapa Sawit Teraktivasi Natrium Hidroksida untuk Adsorpsi Mangan

### *Characterization of Adsorbent from Oil Palm Frond Waste via Sodium Hydroxide Activation for Manganese Adsorption*

Titien Sara<sup>1</sup>, Eka Marya Mistar<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Industri, Universitas Serambi Mekkah, Banda Aceh, 23249, Indonesia

<sup>2</sup>Program Studi Teknik Kimia, Universitas Serambi Mekkah, Banda Aceh, 23249, Indonesia

\*Email: [eka.marya.mistar@serambimekkah.ac.id](mailto:eka.marya.mistar@serambimekkah.ac.id)

#### Article history:

Diterima : 15 Agustus 2024  
Direvisi : 4 November 2024  
Disetujui : 21 November 2024  
Mulai online : 27 Maret 2025

E-ISSN: 2337-4888

#### How to cite:

Titien Sara, Eka Marya Mistar. (2025). Karakterisasi Adsorben dari Limbah Pelepah Kelapa Sawit Teraktivasi Natrium Hidroksida untuk Adsorpsi Mangan. Jurnal Teknik Kimia USU, 14(1), 19-26.

#### ABSTRAK

Penggunaan logam berat termasuk mangan (Mn) pada berbagai kegiatan industri pertambangan dan pengolahan logam telah menyebabkan pencemaran terhadap badan air dan berdampak negatif pada kesehatan manusia. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis sifat adsorben dari limbah pelepah kelapa sawit teraktivasi natrium hidroksida untuk adsorpsi Mn(II) dari air menggunakan kolom unggun tetap pada laju alir 5, 10, dan 15 mL/menit. Hasil analisis morfologi permukaan menunjukkan bahwa pembentukan pori terjadi secara signifikan pada adsorben setelah diaktivasi dengan natrium hidroksida. Demikian pula, hasil analisis gugus fungsi menunjukkan bahwa adsorben teraktivasi mengindikasikan peningkatan gugus fungsi yang mengandung oksigen dan berguna dalam proses adsorpsi. Dalam aplikasi penyerapan secara kontinyu, laju alir 5 mL/menit menunjukkan kapasitas adsorpsi optimum yaitu 36,58 mg/g. Sementara, laju alir 10 mL/menit dan 15 mL/menit menghasilkan kapasitas adsorpsi sebesar 28,94 mg/g dan 22,07 mg/g. Hasil penelitian menunjukkan efektivitas limbah pelepah kelapa sawit sebagai adsorben, yang memiliki kemampuan mengadsorpsi Mn(II) dengan relatif baik.

**Kata kunci:** logam berat, mangan, adsorben, adsorpsi, kolom unggun tetap

#### ABSTRACT

The use of heavy metals including manganese (Mn) in various industrial applications such as mining and metal processing has triggered water pollution and caused a negative impact on human health. This study aims to evaluate the adsorbent properties activated by sodium hydroxide from oil palm frond waste for Mn(II) adsorption from the water via a fixed-bed column at flow rates of 5, 10, and 15 mL/min. The morphology analysis exhibited high pore development in the adsorbent after the activation process using sodium hydroxide. Similar to the results of functional group analysis, the activated adsorbent indicated an increase in oxygen-containing functional groups that are beneficial aspects in the adsorption process. In the continuous adsorption applications, a flow rate of 5 mL/min presented an optimum adsorption capacity of 36.58 mg/g compared to flow rates of 10 mL/min and 15 mL/min: 28.94 mg/g and 22.07 mg/g, respectively. The findings of the present work denote the utility and effectiveness of oil palm frond waste as an eco-friendly raw material for the fabrication of adsorbent with relatively favorable properties for Mn(II) adsorption.

**Keyword:** heavy metal, manganese, adsorbent, adsorption, fixed-bed column



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International.  
<https://doi.org/10.32734/jtk.v14i1.17898>

## 1. Pendahuluan

Pencemaran lingkungan yang disebabkan oleh logam berat semakin marak terjadi akibat pembuangan dari kegiatan industri yang meningkat [1]. Logam berat merupakan salah satu polutan yang dapat mencemari badan air dan telah menjadi isu lingkungan [2]. Mn(II) adalah salah satu logam berat yang berasal dari limbah industri dan dapat mencemari badan air [3]. Paparan Mn(II) dalam jumlah yang tinggi dapat membahayakan kesehatan manusia dengan merusak organ tubuh makhluk hidup. Bahkan dalam konsentrasi yang rendah, Mn(II) tetap berbahaya bagi manusia, hewan, dan tumbuhan karena bersifat racun [4]. Kontaminan logam berat seperti Mn(II) dapat dengan mudah berdampak pada manusia yang berada di sekitar sumber melalui debu yang tersuspensi atau kontak langsung. Konsentrasi Mn(II) yang tinggi pada badan air dapat menurunkan kualitas lingkungan hidup sehingga membahayakan makhluk hidup termasuk organisme perairan [5].

Beberapa metode yang telah dilakukan untuk menurunkan kandungan ion logam berat dalam limbah cair antara lain seperti filtrasi, sedimentasi, adsorpsi, dan penukar ion dengan menggunakan resin [6]. Di antara metode tersebut, proses adsorpsi dianggap lebih ekonomis dan mudah diaplikasikan karena harganya yang relatif murah, bahan baku melimpah dan dapat diperbaharui, dapat diregenerasi, dan lebih ramah lingkungan. Adsorpsi adalah suatu proses perpindahan massa adsorbat dari fase gerak menuju permukaan adsorben, yang dipengaruhi oleh gaya tarik menarik antar molekul adsorbat dengan pori-pori aktif serta gugus fungsional pada permukaan adsorben. Dalam aplikasinya, terdapat dua proses aktivasi untuk menghasilkan adsorben yaitu aktivasi secara fisika dan kimia. Aktivasi ini dapat dilakukan dengan satu atau dua tahapan proses. Dalam proses aktivasi satu tahap, pirolisis dan aktivasi dilakukan secara bersamaan dan bahan baku dicampur dengan agen dehidrasi seperti kalium karbonat, kalium hidroksida, natrium karbonat, asam fosfat, natrium hidroksida, asam sulfat, asam klorida, kalium klorida, magnesium klorida, seng klorida, atau aluminium klorida. Sedangkan aktivasi dua tahap terdiri dari proses karbonisasi suatu bahan baku kemudian diikuti dengan impregnasi dari arang yang dihasilkan dengan menggunakan aktivator untuk proses aktivasi [7].

Di antara berbagai metode pengolahan limbah cair yang tersedia, proses adsorpsi dengan menggunakan adsorben merupakan aplikasi yang mudah diterapkan karena efisien, dan lebih ekonomis [8]. Sejak abad ke-20, produksi dan pemanfaatan karbon aktif terus meningkat, terutama dari bahan baku biomassa dan limbah biomassa [9]. Tanaman kelapa sawit memiliki banyak manfaat dan dikenal luas oleh masyarakat Indonesia. Indonesia merupakan salah satu negara terbesar yang memiliki perkebunan kelapa sawit dan telah menjadi negara produsen dan eksportir terbesar di dunia untuk produk kelapa sawit [10]. Permintaan yang terus meningkat terhadap minyak kelapa sawit juga menyebabkan limpahan limbah dari perkebunan kelapa sawit. Limbah padat yang dihasilkan berupa batang, pelepah, tandan kosong, cangkang kernel, dan serat mesokarp. Limbah padat perkebunan sawit yaitu tandan kosong sekitar 22% dan pelepah kelapa sawit yang mencapai 14%.

Penelitian mengenai karakteristik adsorben dari limbah pelepah kelapa sawit masih terbatas. Efektifitas penyerapan logam berat dan zat warna menggunakan adsorben dari berbagai bahan baku telah dilaporkan seperti pasir hitam [11], tanah bentonit [12], biji asam jawa [13], dan kulit durian [14]. Beberapa penelitian sebelumnya telah menemukan bahwa pelepah kelapa sawit berpotensi menjadi bahan baku karbon aktif yang berkualitas baik dan efektif digunakan untuk menyerap logam berat pada air limbah [15]. Penggunaan natrium hidroksida dapat membentuk porositas adsorben sehingga meningkatkan kapasitas adsorpsi dan gugus fungsi yang mengandung oksigen. Penggunaan adsorben dari pelepah kelapa sawit teraktivasi natrium hidroksida untuk adsorpsi Mn(II) belum pernah dilaporkan sebelumnya. Penelitian ini bertujuan untuk membuat karbon aktif dari limbah pelepah kelapa sawit dengan menggunakan natrium hidroksida sebagai aktivator. Artikel ini menyajikan efektifitas penyerapan logam berat Mn(II) menggunakan adsorben dari limbah biomassa dengan kapasitas adsorpsi yang baik.

## 2. Metode

### Bahan

Limbah pelepah kelapa sawit diperoleh dari perkebunan kelapa sawit di Kabupaten Aceh Barat, Provinsi Aceh, Indonesia. Bahan kimia yang digunakan pada penelitian ini adalah *analytical grade* yaitu mangan(II) klorida tetrahidrat ( $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ), natrium hidroksida (NaOH) dan asam klorida (HCl) bermerek Merck (Darmstadt, Germany). Selain itu, gas nitrogen ( $\text{N}_2$ ) dan *aquadest* juga digunakan pada penelitian ini.

## Peralatan

Peralatan utama yang digunakan pada penelitian ini yaitu *furnace* (Programmable Digital PID Control, Lab House), suhu maksimum 1200°C dan tegangan 220 V atau AC 380 V; *Scanning electron microscope* (SEM), Regulus 8220 (Hitachi, Japan), resolusi hingga 0,7 nm, tegangan akselerasi dari 0,5 hingga 30 kV, dan magnifikasi maksimum hingga 2 juta kali; *Fourier transform infrared* (FT-IR) IR Prestige-21 Shimadzu (Kyoto, Japan), resolusi 4 cm<sup>-1</sup> dan rasio sinyal terhadap derau 40.000:1; dan Atomic absorption spectrophotometer (AAS), Shimadzu model AA-7000 (Kyoto, Japan), tegangan 230 VA dan dilengkapi optik sinar ganda 3D.

## Preparasi Karbon dan Adsorben

Pelepah kelapa sawit (kadar air: 6,2%) dibilas dengan *aquadest* terlebih dahulu dan dikeringkan dengan bantuan sinar matahari. Pelepah kelapa sawit yang telah kering dipotong hingga ukuran sekitar 1 – 2 cm. Selanjutnya, proses karbonisasi atau pengarangan potongan pelepah kelapa sawit dilakukan menggunakan *furnace* (Programmable Digital PID Control, Lab House) pada suhu 500 °C, dengan mengalirkan gas N<sub>2</sub> sebesar 200 mL/menit selama 2 jam. Kemudian arang didinginkan dan dihancurkan menggunakan *milling*. Selanjutnya, dilakukan pengayakan dengan diperoleh ukuran karbon 60 – 120 mesh. Karbon yang diperoleh dari proses ini disimpan dalam desikator sebelum dianalisis.

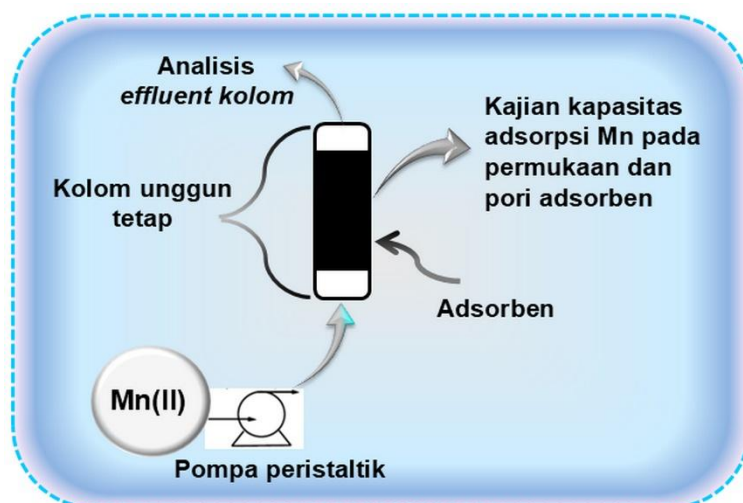
Untuk proses aktivasi, karbon dicampur dengan NaOH dengan rasio karbon:NaOH yaitu 1:1 (b/b). Sebanyak 10 g karbon ditambahkan ke dalam gelas kimia yang berisi 10 g NaOH. Kemudian, campuran diaduk dengan kecepatan pengaduk 100 rpm selama 2 jam dan dikeringkan pada suhu 120 °C selama 4 jam. Campuran karbon dengan NaOH selanjutnya dipirolysis dan diaktivasi pada suhu 600 °C selama 1 jam dan diturunkan suhunya mencapai suhu kamar. Selanjutnya adsorben dibilas dengan HCl 0,1 M sebanyak 250 mL dan diaduk selama 30 menit pada suhu 85 °C [6]. Adsorben yang diperoleh kemudian dibilas dengan *aquadest* hingga pH netral. Adsorben dikeringkan pada suhu 110 °C selama 24 jam. Adsorben yang diperoleh disimpan dalam desikator sebelum digunakan untuk analisis dan proses adsorpsi.

## Karakterisasi Karbon dan Adsorben

Penelitian dilakukan di laboratorium Universitas Serambi Mekkah dan Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh, Provinsi Aceh, Indonesia. Analisis morfologi permukaan karbon dan adsorben yang dihasilkan dari penelitian ini dilakukan dengan menggunakan SEM, Regulus 8220 (Hitachi, Japan). Sementara analisis gugus fungsi menggunakan FT-IR, IR Prestige-21 Shimadzu (Kyoto, Japan).

## Proses Adsorpsi dan Kapasitas Adsorpsi Adsorben

Pada persiapan proses adsorpsi, larutan Mn(II) disiapkan dengan melarutkan 0,36 g MnCl<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O ke dalam labu ukur 1000 mL, kemudian ditambahkan *aquadest* sampai tanda tera dan dihomogenkan, sehingga didapatkan larutan Mn(II) dengan konsentrasi 100 mg/L. Proses adsorpsi dilakukan dengan cara mengalirkan larutan Mn(II) kedalam kolom unggun tetap yang berisi 1 g adsorben. Pada penelitian ini, kolom unggun tetap digunakan sebagai media penyerapan Mn(II) yang dialirkan secara kontinyu oleh pompa peristaltik seperti yang ilustasikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema proses adsorpsi Mn(II) pada adsorben.

Proses adsorpsi dilakukan secara kontinyu menggunakan pompa peristaltik dengan variasi laju alir yaitu 5 mL/menit, 10 mL/menit dan 15 mL/menit. Pencuplikan sampel pada efluen dilakukan pada waktu: 1, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, dan 100 menit. Pada penelitian ini, persentase optimum penyisihan Mn(II) mencapai 100 % hingga menit ke-40 pada laju alir 5 mL/menit. Analisis konsentrasi Mn dilakukan dengan menggunakan AAS, Shimadzu model AA-7000 (Kyoto, Japan), konsentrasi Mn yang diperoleh digunakan untuk menentukan kapasitas adsorpsi dengan menggunakan model Thomas. Persamaan linier model Thomas dapat dilihat pada persamaan (1):

$$\ln\left(\frac{C_0}{C_t} - 1\right) = (k_T \cdot q_0 \cdot \frac{m}{F}) - (k_T \cdot C_0) \cdot t \quad (1)$$

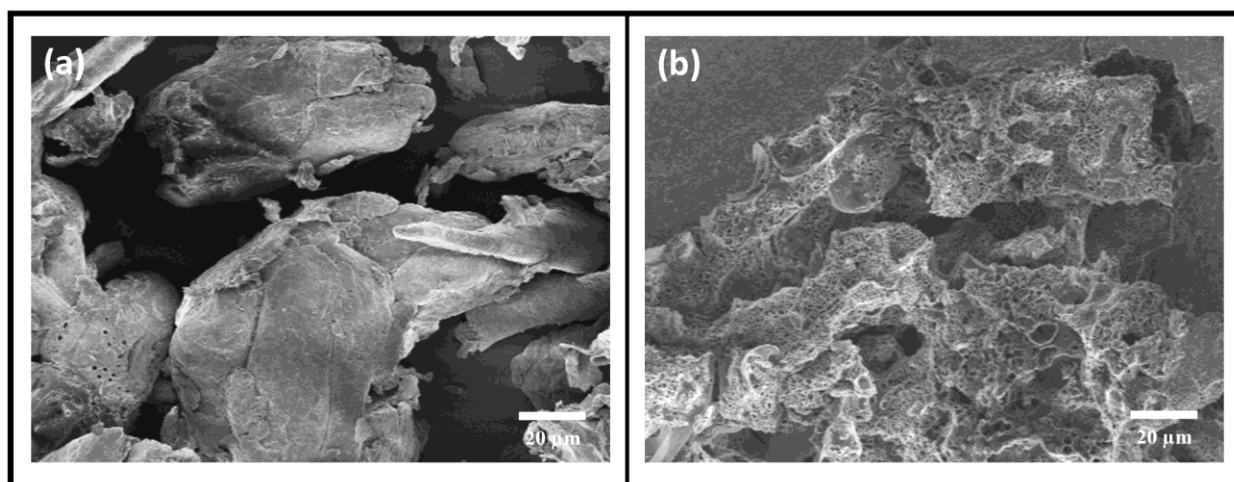
dimana  $C_0$ : konsentrasi awal Mn(II) dalam larutan (mg/L),  $C_t$ : konsentrasi Mn(II) pada efluen (mg/L) pada waktu  $t$ ,  $F$ : laju alir (mL/menit),  $q_0$ : kapasitas adsorpsi Mn(II) per gram adsorben (mg/g),  $m$ : massa adsorben (g),  $t$ : waktu laju alir (menit), dan  $k_T$ : tetapan laju Thomas (L/menit·mg).

### 3. Hasil

#### Karakterisasi Morfologi Karbon dan Adsorben

Analisis morfologi dilakukan untuk mengetahui efek dari proses aktivasi NaOH terhadap struktur permukaan adsorben. Gambar 2 menampilkan hasil mikroskop SEM dari karbon dan adsorben. Seperti yang disajikan pada Gambar 2(a), karbon tanpa aktivasi memiliki struktur permukaan yang rata dan hampir tidak ada pori yang terbentuk. Sementara, pada adsorben terdapat banyak struktur berongga dan pori-pori yang terbentuk dengan baik seperti yang disajikan pada Gambar 2(b). Adsorben dari limbah pelepah kelapa sawit ini memiliki struktur pori yang cukup optimal dengan porositas yang tinggi.

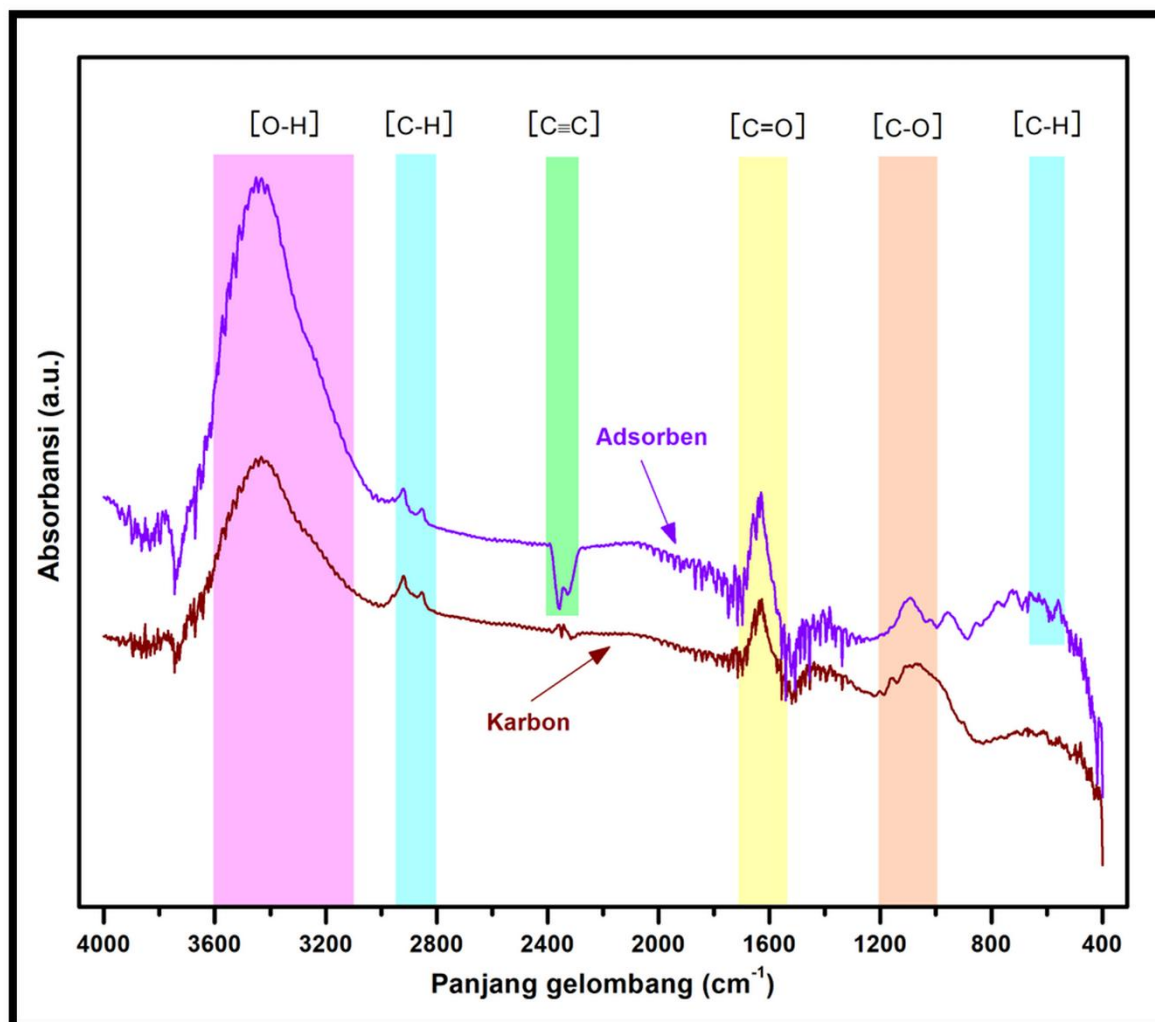
Pori-pori yang terbentuk ini kemungkinan besar disebabkan oleh penguapan senyawa NaOH yang dihasilkan, sehingga rongga yang awalnya ditempati oleh alkali pun ikut terlepas saat proses aktivasi [16]. Pori-pori yang terbentuk menyediakan saluran bagi banyak adsorbat termasuk Mn(II) untuk masuk ke dalam adsorben yang berpori [17]. Dapat disimpulkan bahwa proses aktivasi limbah pelepah kelapa sawit menggunakan alkali memainkan peran penting dalam pengembangan struktur berpori, yang mengarah pada laju peningkatan luas permukaan. Hasil serupa juga diperoleh oleh Yu et al. (2019) yang menggunakan NaOH sebagai aktivator dalam sintesis adsorben dari popcorn [18]. Reaksi kimia yang mungkin terbentuk disajikan pada persamaan reaksi (2) sampai (9):



Gambar 2. Struktur morfologi (a) karbon sebelum aktivasi dan (b) adsorben setelah aktivasi.

### Analisis Gugus Fungsi Karbon dan Adsorben

Analisis gugus fungsi dengan FT-IR dilakukan dengan tujuan untuk mengobservasi struktur kimia secara kualitatif pada karbon dan adsorben. Data representatif dari struktur kimia permukaan adsorben melalui spektrum FT-IR disajikan pada Gambar 3. Keberadaan gugus O–H (hidroksil) pada pita karbon dan adsorben dapat diamati pada pita daerah bilangan gelombang 3100–3600  $\text{cm}^{-1}$ . Daerah dengan Panjang gelombang 2800–2950  $\text{cm}^{-1}$  menunjukkan keberadaan C–H asimetris sebagai gugus metil dan metilen yang menjadi indikator untuk gugus metil dan metilen. Sementara, daerah dengan panjang gelombang 2300–2400  $\text{cm}^{-1}$  mengindikasikan keberadaan gugus alkuna ( $\text{C}\equiv\text{C}$ ) hanya pada sampel adsorben [19].



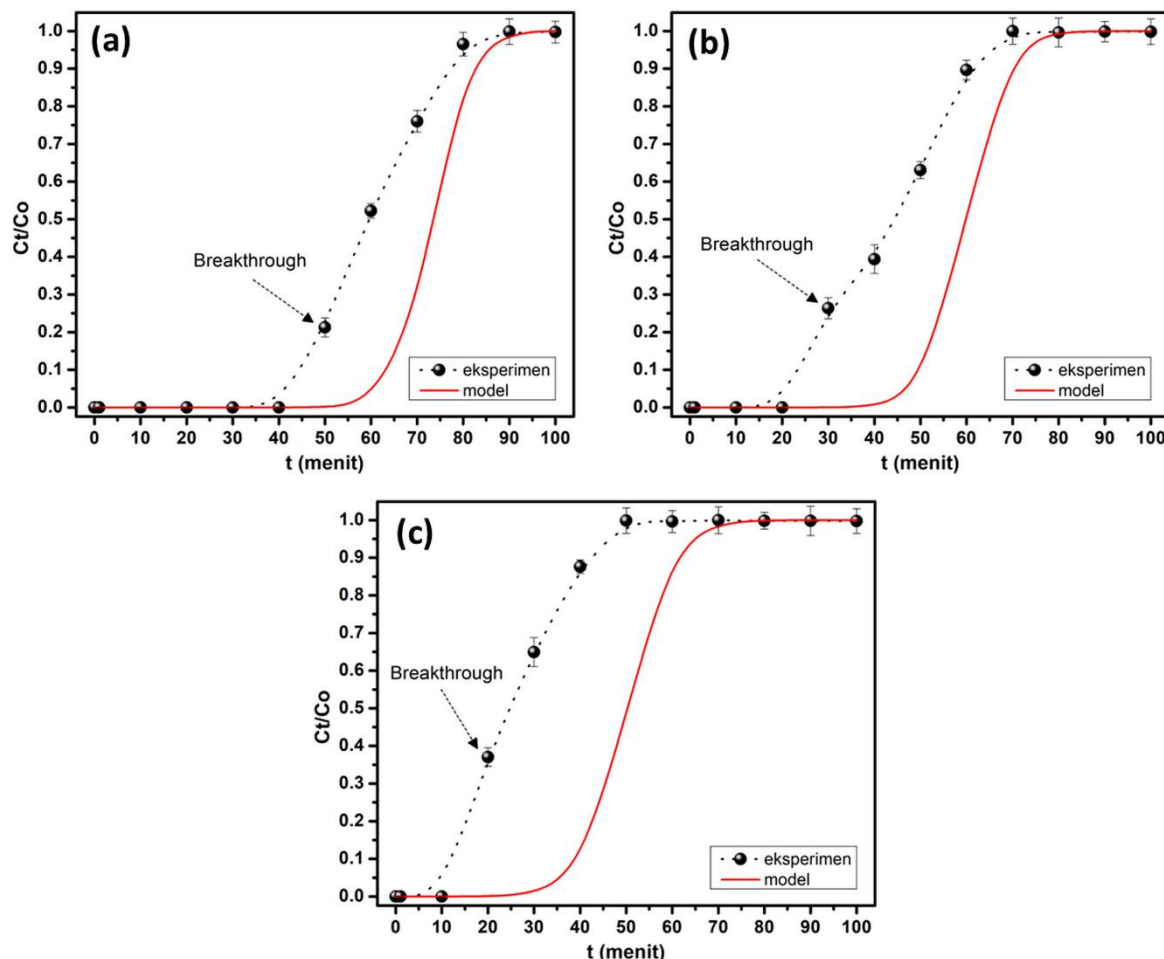
Gambar 3. Analisis FT-IR karbon dan adsorben.

Selanjutnya, keberadaan gugus C=O (karbonil) pada panjang gelombang 1550–1700  $\text{cm}^{-1}$ , sedangkan gugus C–O (alkoksi) muncul pada panjang gelombang 1000–1200  $\text{cm}^{-1}$  [20]. Pada panjang gelombang rendah 500–625  $\text{cm}^{-1}$ , sampel adsorben terindikasi memiliki gugus C–H asimetris (metil dan metilen). Alfatah et al. (2021) melaporkan pentingnya gugus fungsi yang mengandung oksigen dalam proses adsorpsi karena gugus fungsi tersebut menunjukkan interaksi elektrostatik dan ikatan hidrogen antara adsorbat dan permukaan adsorben [21]. Pergeseran, eliminasi, dan perubahan spektrum absorbansi yang diperoleh mengindikasikan proses aktivasi menyebabkan perubahan kimia pada permukaan adsorben.

### Pengaruh Laju Alir dan Kurva *Breakthrough* pada Proses Adsorpsi Mangan

Proses adsorpsi secara kontinyu menggunakan kolom unggun tetap telah diterapkan secara luas dalam banyak aplikasi di dunia perindustrian. Hasil analisis konsentrasi Mn(II) digunakan dalam menentukan kurva *breakthrough* dan parameter adsorpsi lainnya dengan menggunakan model Thomas. Kurva *breakthrough* yang diperoleh pada konsentrasi Mn(II) 100 mg/L dan laju alir 5 mL/menit, 10 mL/menit, dan 15 mL/menit ditampilkan pada Gambar 4(a, b, dan c). Waktu *breakthrough* untuk laju alir 5, 10, dan 15 mL/menit adalah masing-masing 50, 30, dan 20 menit. Berdasarkan hasil yang diperoleh, laju alir yang lebih tinggi yaitu 15

mL/menit menyebabkan waktu kontak antara fluida cair dengan adsorben di dalam kolom unggun tetap menjadi lebih singkat. Hal ini dapat menyebabkan lapisan penyerapan massa eksternal pada permukaan adsorben cenderung kurang optimum. Pada akhirnya, fenomena ini menyebabkan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kejenuhan menjadi lebih cepat [22].



Gambar 4. Kurva *breakthrough* adsorpsi mangan pada adsorben dengan laju alir (a) 5 mL/menit, (b) 10 mL/menit, dan (c) 15 mL/menit.

#### Parameter Model Kinetika Thomas

Model Thomas digunakan untuk mengkaji kinetika proses adsorpsi Mn(II) pada adsorben untuk ketiga variasi laju alir pada penelitian ini. Model kinetika ini telah banyak diaplikasikan oleh apar peneliti pada perhitungan proses adsorpsi secara kontinyu karena mudah diimplementasikan dan tingkat akurasi yang baik. Prediksi model kinetika Thomas dievaluasi dengan persamaan regresi linier seperti yang ditunjukkan pada Persamaan (1). Tabel 1 merangkum data eksperimen penyerapan Mn(II) yang menghasilkan nilai  $q_0$  dan  $k_T$ . Seperti yang ditunjukkan dalam data yang ditabulasikan, nilai  $q_0$  dari laju alir 5 mL/menit, 10 mL/menit, dan 15 mL/menit yaitu 36,58 mg/g, 28,94 mg/g, dan 22,07 mg/g, sedangkan nilai  $k_T$  yang diperoleh sebesar  $3,465 \times 10^{-3}$ ,  $3,152 \times 10^{-3}$ , dan  $2,562 \times 10^{-3}$  L/menit·mg. Kapasitas adsorpsi optimum dicapai untuk adsorben dengan laju alir 5 mL/menit. Koefisien determinasi ( $R^2$ ) yang diperoleh dari laju alir 5 mL/menit menunjukkan hasil yang lebih baik (0,9529) dibandingkan dengan laju alir yang lebih tinggi.

Tabel 1. Hasil parameter model Thomas

| $C_0$ (mg/L) | $F$ (mL/menit) | $k_T$ (L/menit·mg)     | $q_0$ (mg/g) | $R^2$  |
|--------------|----------------|------------------------|--------------|--------|
| 100          | 5              | $3,465 \times 10^{-3}$ | 36,58        | 0,9529 |
|              | 10             | $3,152 \times 10^{-3}$ | 28,94        | 0,9174 |
|              | 15             | $2,562 \times 10^{-3}$ | 22,07        | 0.8635 |

Pada laju alir yang lebih rendah dapat meningkatkan difusi Mn(II) ke dalam lapisan adsorben [23], yang didukung oleh nilai  $k_T$  yang paling tinggi dibandingkan dengan nilai  $k_T$  pada laju alir lainnya. Ion Mn(II) dapat terserap lebih banyak di area permukaan dan didukung dengan keberadaan situs aktif pada adsorben. Peristiwa ini meningkatkan interaksi antara situs aktif adsorben dengan Mn(II) sebagai adsorbat. Sedangkan kapasitas adsorpsi yang lebih rendah diperoleh dari laju alir yang lebih tinggi. Hasil ini dapat terjadi karena penurunan dalam interaksi kovalen dan keterikatan elektrostatik dari situs pengikatan aktif dengan afinitas pengikatan ion logam berat tersebut yang lebih lemah karena waktu kontak yang lebih singkat [24]. Akibatnya, ion logam Mn(II) tidak teradsorpsi secara optimum pada laju alir yang lebih cepat karena situs aktif lebih cepat mengalami peningkatan saturasi.

#### 4. Kesimpulan

Limbah pelepah kelapa sawit dapat digunakan sebagai bahan baku untuk pembuatan adsorben yang dimanfaatkan dalam proses adsorpsi Mn(II). Setelah proses aktivasi, adsorben teraktivasi NaOH menunjukkan pembentukan pori yang signifikan seperti yang ditunjukkan dari analisis morfologi. Sejalan dengan itu, gugus fungsi yang mengandung oksigen (O–H, C=O, dan C–O) meningkat pada permukaan adsorben yang dapat mengoptimalkan proses penyerapan Mn(II). Proses adsorpsi Mn(II) pada adsorben secara kontinyu dengan laju alir 5 mL/menit menghasilkan kapasitas adsorpsi optimum sebesar 36,58 mg/g, tetapan laju Thomas sebesar  $3,465 \times 10^{-3}$  L/menit·mg, dan waktu *breakthrough* mencapai 50 menit.

#### 5. Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Republik Indonesia atas pendanaan yang diberikan melalui Penelitian dan Pengabdian Bagi Dosen No: 055/LPPM-USM/VII/2024.

#### 6. Konflik Kepentingan

Semua penulis tidak memiliki konflik kepentingan (*conflict of interest*) pada publikasi artikel ini.

#### Daftar Pustaka

- [1] S. Mishra, R.N. Bharagava, N. More, A. Yadav, S. Zainith, S. Mani, and P. Chowdhary, *Heavy Metal Contamination: An Alarming Threat to Environment and Human Health*, Environmental Biotechnology: For Sustainable Future, 2019.
- [2] M. Mariana, E. M. Mistar, D. Aswita, A. S. Zulkipli, and T. Alfatah, “Nipa palm shell as a sustainable precursor for synthesizing high-performance activated carbon: Characterization and application for Hg<sup>2+</sup> adsorption,” *Bioresour. Technol. Reports*, vol. 21, p. 101329, 2023.
- [3] S. Dey, B. Tripathy, M. S. Kumar, and A. P. Das, “Ecotoxicological consequences of manganese mining pollutants and their biological remediation,” *Environ. Chem. Ecotoxicol.*, vol. 5, pp. 55–61, 2023.
- [4] S. Mitra, A. J. Chakraborty, A. M. Tareq, T. B. Emran, F. Nainu, A. Khusro, A. M. Idris, M. U. Khandaker, H. Osman, F. A. Alhumaydhi, J. S. Gandara, “Impact of heavy metals on the environment and human health: Novel therapeutic insights to counter the toxicity,” *J. King Saud Univ. - Sci.*, vol. 34, p. 101865, 2022..
- [5] V. A. Matveeva, A. V. Alekseenko, D. Karthe, and A. V. Puzanov, “Manganese Pollution in Mining-Influenced Rivers and Lakes: Current State and Forecast under Climate Change in the Russian Arctic,” *Water*, vol. 14, p. 1091, 2022.
- [6] M. Mariana, E. M. Mistar, M. Syabriyana, A. S. Zulkipli, D. Aswita, and T. Alfatah, “Properties and adsorptive performance of candlenut shell and its porous charcoals for aqueous mercury(II) removal,” *Bioresour. Technol. Reports*, vol. 19, p. 101182, 2022.
- [7] E. M. Mistar, T. Alfatah, and M. D. Supardan, “Synthesis and characterization of activated carbon from Bambusa vulgaris striata using two-step KOH activation,” *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 9, pp. 6278–6286, 2020.
- [8] M. Bilal, I. Ihsanullah, M. Younas, and M. Ul Hassan Shah, “Recent advances in applications of low-cost adsorbents for the removal of heavy metals from water: A critical review,” *Sep. Purif. Technol.*, vol. 278, p. 119510, 2021.
- [9] P. González-García, “Activated carbon from lignocellulosics precursors: A review of the synthesis methods, characterization techniques and applications,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, pp. 1393–1414, 2018.

- [10] T. Alfatah, E. M. Mistar, M. Syabriyana, and M. D. Supardan, “Advances in oil palm shell fibre reinforced thermoplastic and thermoset polymer composites,” *Alexandria Eng. J.*, vol. 61, pp. 4945–4962, 2022.
- [11] B. Haryanto, W. K. Sinaga, and F. T. Saragih, “Kajian Model Interaksi pada Adsorpsi Logam Berat Kadmium ( $\text{Cd}^{2+}$ ) dengan Menggunakan Adsorben dari Pasir Hitam,” *J. Tek. Kim. USU*, vol. 8, pp. 79–84, 2019.
- [12] D. S. Bath, J. M. Siregar, and M. T. Lubis, “Penggunaan tanah bentonit sebagai adsorben logam Cu,” *J. Tek. Kim. USU*, vol. 1, pp. 1–4, 2012.
- [13] A. Rizki, E. Syahputra, S. Pandia, and Halimatuddahlia, “Pengaruh waktu kontak dan massa adsorben biji asam jawa (*tamarindus indica*) dengan aktivator  $\text{H}_3\text{PO}_4$  terhadap kapasitas adsorpsi zat warna methylene blue,” *J. Tek. Kim. USU*, vol. 8, pp. 54–60, 2019.
- [14] F. Hanum, R. J. Gultom, and M. Simanjuntak, “Adsorpsi zat warna metilen biru dengan karbon aktif dari kulit durian menggunakan koh dan naoh sebagai aktivator,” *J. Tek. Kim. USU*, vol. 6, pp. 49–55, 2017.
- [15] N. Z. J. Zakaria, S. Rozali, N. M. Mubarak, and S. Ibrahim, “A review of the recent trend in the synthesis of carbon nanomaterials derived from oil palm by-product materials,” *Biomass Convers. Biorefinery*, vol. 14, pp. 13–44, 2022.
- [16] S. Lv, X. Ma, Q. Fu, Y. Zheng, and Z. Ma, “Removal of hexamethyldisiloxane by NaOH-activated porous carbons produced from coconut shells,” *Catalysts*, vol. 13, p. 918, 2023.
- [17] E. M. Mistar, S. Ahmad, A. Muslim, T. Alfatah, and M. D. Supardan, “Preparation and characterization of a high surface area of activated carbon from *Bambusa vulgaris*—Effect of NaOH activation and pyrolysis temperature,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 334, no. 1.
- [18] Y. Yu, N. Qiao, D. Wang, Q. Zhu, F. Fu, R. Cao, R. Wang, W. Liu, B. Xu, “Fluffy honeycomb-like activated carbon from popcorn with high surface area and well-developed porosity for ultra-high efficiency adsorption of organic dyes,” *Bioresour. Technol.*, vol. 285, p. 121340, 2019.
- [19] D. W. Kim, J. H. Wee, C. M. Yang, and K. S. Yang, “Efficient removals of Hg and Cd in aqueous solution through NaOH-modified activated carbon fiber,” *Chem. Eng. J.*, vol. 392, p. 123768, 2020.
- [20] E. M. Chatir, A. El Hadrami, S. Ojala, and R. Brahmi, “Production of activated carbon with tunable porosity and surface chemistry via chemical activation of hydrochar with phosphoric acid under oxidizing atmosphere,” *Surfaces and Interfaces*, vol. 30, p. 101849, 2022.
- [21] T. Alfatah, E. M. Mistar, and M. D. Supardan, “Porous structure and adsorptive properties of activated carbon derived from *Bambusa vulgaris striata* by two-stage KOH/NaOH mixture activation for  $\text{Hg}^{2+}$  removal,” *J. Water Process Eng.*, vol. 43, p. 102294, 2021.
- [22] E. M. Mistar, I. Hasmita, T. Alfatah, A. Muslim, and M. D. Supardan, “Adsorption of mercury(II) using activated carbon produced from *bambusa vulgaris* var. *striata* in a fixed-bed column,” *Sains Malaysiana*, vol. 48, pp. 719–725, 2019.
- [23] A. M. Elewa, A. A. Amer, M. F. Attallah, H. A. Gad, Z. A. M. Al-Ahmed, and I. A. Ahmed, “Chemically Activated Carbon Based on Biomass for Adsorption of Fe(III) and Mn(II) Ions from Aqueous Solution,” *Materials*, vol. 16, p. 1251, 2023.
- [24] D. K. Mondal, B. K. Nandi, and M. K. Purkait, “Removal of mercury (II) from aqueous solution using bamboo leaf powder: Equilibrium, thermodynamic and kinetic studies,” *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 1, pp. 891–898, 2013.