

SINTESIS DAN KARAKTERISASI KARBON AKTIF DARI KULIT BUAH JERUK MANIS (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck) TERMODIFIKASI MAGNETIT SEBAGAI ADSORBEN ION LOGAM TIMBAL(II)

SALSABILA AS-SYIFA^{1*}, RIZKA FITRIYANI S¹, DAN ADI MULYANA SUPRIATNA¹

¹Program Studi Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi, UIN Sunan Gunung Djati, Jl. AH. Nasution No.105, Cipadung Wetan, Kec. Cibatu, Kota Bandung, Jawa Barat 40614, Indonesia

*alamat email korespondensi: salsabilaasyifaa18@gmail.com

Informasi Artikel	Abstrak/Abstract
Kata Kunci: adsorpsi; ion logam timbal(II); karbon aktif; kulit jeruk; magnetit.	Adsorpsi merupakan metode efektif dan ekonomis untuk mengatasi pencemaran logam berat, khususnya ion logam timbal(II) yang bersifat toksik. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi karbon aktif dari kulit jeruk manis (<i>Citrus sinensis</i> (L.) Osbeck) yang diaktifasi $ZnCl_2$ dan dimodifikasi magnetit (Fe_3O_4) sebagai adsorben ion Pb(II). Sintesis dilakukan melalui karbonisasi, aktivasi kimia, dan modifikasi kopresipitasi menggunakan $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ dan $FeSO_4 \cdot 7H_2O$. Karakterisasi FTIR mengidentifikasi gugus Fe–O pada $577,91\text{ cm}^{-1}$, sedangkan SEM menunjukkan permukaan berpori dengan sebaran partikel magnetit dan aglomerasi partikel yang membentuk struktur tidak beraturan. Pengujian dilakukan dengan variasi massa adsorben (0,02–0,1 g), waktu kontak (30–150 menit), dan konsentrasi awal ion logam timbal(II) (50–250 mg/L), dianalisis menggunakan SSA. Kondisi optimum diperoleh pada konsentrasi awal 250 mg/L, massa adsorben 0,1 g, dan waktu kontak 150 menit, dengan kapasitas adsorpsi tertinggi sebesar 28,03 mg/g. Data mengikuti model isoterm Freundlich ($K_f = 0,493\text{ mg/g}$ dan $n = 0,99753$), menunjukkan adsorpsi fisik pada permukaan heterogen. Hasil ini menunjukkan bahwa karbon aktif termodifikasi magnetit dari kulit jeruk manis efektif dan ramah lingkungan sebagai adsorben logam berat.
Keywords: activated carbon; adsorption; lead(II) metal ions, magnetite; orange peel.	<i>Adsorption is an effective and economical method for addressing heavy metal pollution, particularly toxic lead(II) ions. This study aims to evaluate activated carbon from sweet orange peel (<i>Citrus sinensis</i> (L.) Osbeck) activated with $ZnCl_2$ and modified with magnetite (Fe_3O_4) as an adsorbent for Pb(II) ions. Synthesis was carried out through carbonization, chemical activation, and coprecipitation modification using $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ and $FeSO_4 \cdot 7H_2O$. FTIR characterization identified Fe–O groups at 577.91 cm^{-1}, while SEM showed a porous surface with a distribution of magnetite particles and particle agglomeration forming an irregular structure. The testing was conducted with variations in adsorbent mass (0.02–0.1 g), contact time (30–150 minutes), and initial concentration of lead(II) ions (50–250 mg/L), analyzed using SSA. Optimal conditions were obtained at an initial concentration of 250 mg/L, adsorbent mass of 0.1 g, and contact time of 150 minutes, with the highest adsorption capacity of 28.03 mg/g. The data followed the Freundlich isotherm model ($K_f = 0.493\text{ mg/g}$ and $n = 0.99753$), indicating physical adsorption on a heterogeneous surface. These results indicate that magnetite-modified activated carbon from sweet orange peel is effective and environmentally friendly as a heavy metal adsorbent.</i>

PENDAHULUAN

Adsorpsi merupakan salah satu metode pengolahan limbah cair yang banyak digunakan karena efisiensinya yang tinggi, kemudahan operasional, serta biaya yang relatif rendah. Metode adsorpsi memiliki banyak keunggulan dibanding teknik lain, seperti presipitasi kimia, pertukaran ion, maupun filtrasi membran, karena dapat menghilangkan kontaminan hingga

konsentrasi rendah, tidak menghasilkan lumpur beracun, serta fleksibel dalam pemilihan material adsorben/ Metode ini bekerja melalui interaksi antara ion atau molekul (adsorbat) dengan permukaan padatan (adsorben), baik melalui ikatan fisik (fisisorpsi) maupun ikatan kimia (kemisorpsi) [1]. Keunggulan metode ini menjadikannya salah satu alternatif utama dalam penghilangan logam berat dari lingkungan, khususnya pada sistem perairan yang tercemar.

Salah satu adsorben yang umum digunakan dalam proses adsorpsi adalah karbon aktif, yang dikenal memiliki luas permukaan tinggi, struktur pori yang berkembang, serta kestabilan kimia yang baik. Kemampuan adsorpsi karbon aktif terhadap berbagai kontaminan ditentukan oleh struktur kimia dan gugus fungsional dari atom C, H, dan O [2]. Karbon aktif dapat disintesis dari berbagai limbah biomassa, seperti sekam padi, tempurung kelapa, dan kulit buah. Pemanfaatan limbah pertanian sebagai bahan dasar karbon aktif menjadi pendekatan yang berkelanjutan dan berbiaya rendah dalam pengolahan limbah [3].

Kulit jeruk manis (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck) merupakan salah satu limbah biomassa yang kaya akan lignoselulosa, pektin, dan senyawa fungsional lainnya yang mengandung gugus hidroksil dan karboksil, sehingga berpotensi tinggi sebagai bahan dasar adsorben [4]. Penelitian Arifyana dan Wardani (2023) menunjukkan bahwa karbon aktif dari kulit jeruk mampu menyerap ion logam timbal(II) dengan kapasitas adsorpsi sebesar 7,27 mg/g [5]. Selain itu, Khalil dkk. (2024) mencatat kapasitas adsorpsi terbesar yaitu sebesar 143,3 mg/g untuk zat warna menggunakan karbon aktif kulit jeruk yang dimodifikasi magnetit [6]. Dengan demikian, pemanfaatan kulit jeruk tidak hanya mengurangi volume limbah organik, tetapi juga menghasilkan adsorben yang ramah lingkungan dan bernilai ekonomis.

Karbon aktif konvensional masih memiliki keterbatasan, seperti masih terdapatnya pengotor dan jumlah sisi aktif yang terbatas. Untuk mengatasi keterbatasan ini dapat dilakukan aktivasi dan modifikasi kimia. Aktivasi diperlukan untuk meningkatkan kemampuan adsorpsi bahan alami terhadap logam berat. Aktivasi dapat membuka pori-pori, menghilangkan pengotor, serta memperluas luas permukaan karbon aktif. Aktivasi kimia menggunakan $ZnCl_2$ diketahui meningkatkan kualitas karbon aktif melalui pembentukan struktur grafit aromatik [7]. Meskipun demikian, karbon aktif memiliki keterbatasan seperti jumlah situs aktif yang terbatas dan kestabilan yang rendah [9]. Modifikasi dengan penambahan magnetit (Fe_3O_4) digunakan untuk meningkatkan luas permukaan spesifik dan stabilitas, serta mempermudah pemisahan adsorben karena sifat kemagnetannya [8].

Karbon aktif termodifikasi magnetit dapat digunakan untuk menghilangkan ion logam

timbal(II). Ion logam timbal(II) bersifat toksik, tidak dapat terurai secara biologis, dan mudah terakumulasi dalam tubuh makhluk hidup. Sumber utama pencemarannya berasal dari limbah industri seperti baterai, pelapisan logam, dan cat. Paparan jangka panjang terhadap Ion logam timbal(II) dapat menyebabkan gangguan saraf, kerusakan ginjal, dan penurunan kemampuan kognitif, terutama pada anak-anak [9].

Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis dan mengevaluasi karbon aktif dari kulit jeruk manis yang diaktivasi $ZnCl_2$ dan dimodifikasi magnetit (Fe_3O_4) sebagai adsorben ion logam timbal(II). Karbon aktif yang telah dimodifikasi diaplikasikan untuk mengadsorpsi ion logam timbal(II) serta dilakukan perhitungan untuk mengetahui kapasitas dan efisiensi adsorpsinya. Selain itu dilakukan pula penentuan model isoterm yang cocok. Hasilnya diharapkan mendukung pengembangan adsorben biomassa yang efisien dan berkelanjutan untuk remidiasi logam berat.

EKSPERIMENT

Penelitian ini memanfaatkan limbah kulit jeruk manis sebagai adsorben untuk mengadsorpsi ion logam timbal(II). Proses sintesis melibatkan aktivasi dan modifikasi. Selain itu, dalam penelitian ini dilakukan penentuan kapasitas dan efisiensi adsorpsi serta dilakukan penentuan model isoterm adsorpsi. Model isoterm adsorpsi yang digunakan adalah isoterm *Langmuir* dan *Freundlich*.

Material

Limbah kulit jeruk manis, $ZnCl_2$ (Merck®), $Pb(NO_3)_2$ (Merck®), $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ (Merck®), $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ (Merck®), aqua DM, HNO_3 (65%, Merck®), dan NaOH (Merck®).

Instrumentasi

Fourier Transform Infra Red (FTIR) (Bruker Alpha) dan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) (JEOL JSM-6510). Untuk optimasi karbon aktif digunakan instrumen Spektroskopii Serapan Atom (SSA) (Agilent Technologies 200 Series AA).

Prosedur

Karbon aktif yang disintesis dari limbah kulit jeruk manis yang telah dikarbonisasi dan diaktivasi dengan $ZnCl_2$. Karbon aktif kemudian

dimodifikasi dengan magnetit (Fe_3O_4) dan digunakan untuk mengadsorpsi limbah sintetik ion logam timbal(II).

Sintesis dan Aktivasi Karbon Aktif

Limbah kulit jeruk manis dibersihkan dari sisa daging buah dan pengotor, kemudian dicuci, dipotong kecil, dan dijemur selama satu hari. Selanjutnya dikeringkan pada suhu 105°C selama 2 jam, dihaluskan, dan dikarbonisasi pada suhu 300°C selama 1 jam. Hasil karbonisasi ditumbuk, diayak dengan ukuran 60 mesh, lalu diaktivasi menggunakan larutan ZnCl_2 dengan rasio 1:2 (50 g adsorben : 100 mL ZnCl_2), diaduk selama 24 jam, dicuci hingga pH netral, dan dikeringkan kembali pada suhu 110°C selama 2 jam. Subbab untuk prosedur jika terdiri dari beberapa perlakuan atau metode.

Modifikasi Karbon Aktif

Modifikasi karbon aktif dilakukan dengan metode deposisi kimia menggunakan perbandingan massa karbon aktif dan prekursor magnetik 1:1. Sebanyak 24,57 gram karbon aktif teraktivasi dilarutkan dalam 200 mL aquadest demineralisasi, kemudian diaduk menggunakan stirrer selama 30 menit pada suhu 70°C. Larutan tersebut dicampurkan dengan 200 mL larutan magnetik yang mengandung 8,12 gram $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dan 4,17 gram $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, lalu diaduk menggunakan shaker selama 30 menit. Selanjutnya, 100 mL larutan NaOH 5 M ditambahkan secara tetes demi tetes hingga terbentuk endapan berwarna hitam. Endapan yang terbentuk disaring, dicuci dengan aquadest hingga pH netral (pH 7), kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 105°C selama 3 jam.

Karakterisasi Karbon Aktif

Karakterisasi karbon aktif dilakukan dengan menggunakan instrumen FTIR untuk mengetahui gugus fungsi penyusun adsorben dan instrumen SEM untuk mengetahui morfologi permukaan karbon aktif.

Aplikasi Karbon Aktif

Pengaruh variasi massa adsorben

Karbon aktif kulit jeruk yang sudah dimodifikasi ditimbang masing-masing 0,02; 0,04;

0,06; 0,08; dan 0,1 gram. Lalu dimasukkan kedalam gelas kimia. Selanjutnya masing-masing ditambahkan larutan ion logam timbal(II) 100 mg/L sebanyak 50 mL. Lalu dilakukan pengadukan selama 60 menit. Setelah proses adsorpsi selesai, hasil adsorpsi disaring menggunakan kertas saring Whatman No. 42. Filtrat yang diperoleh dianalisis dengan Spektroskopi Serapan Atom (SSA).

Pengaruh variasi waktu kontak adsorpsi

Karbon aktif kulit jeruk yang sudah dimodifikasi ditimbang sebanyak 0,1 gram. Selanjutnya dimasukkan kedalam gelas kimia. Lalu ditambahkan ion logam timbal(II) 100 mg/L sebanyak 50 mL. Selanjutnya diaduk selama 30, 60, 90, 120, dan 150 menit. Setelah proses adsorpsi selesai, hasil adsorpsi disaring menggunakan kertas saring Whatman No. 42. Filtrat yang diperoleh dianalisis dengan Spektroskopi Serapan atom (SSA).

Pengaruh variasi konsentrasi awal adsorbat

Karbon aktif kulit jeruk yang sudah dimodifikasi ditimbang sebanyak 0,1 gram. Selanjutnya dimasukkan kedalam gelas kimia. Lalu ditambahkan ion logam timbal(II) dengan variasi konsentrasi 50, 100, 150, 200, dan 250 mg/L sebanyak 50 mL. Selanjutnya diaduk selama 120 menit. Setelah proses adsorpsi selesai, hasil adsorpsi disaring menggunakan kertas saring Whatman No. 42. Filtrat yang diperoleh dianalisis dengan Spektroskopi Serapan atom (SSA).

Penentuan Model Isoterm Adsorpsi

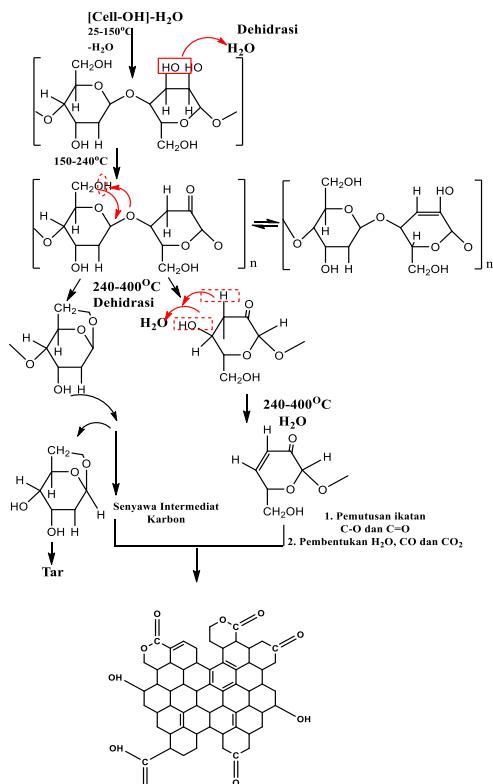
Berdasarkan prosedur sebelumnya, setelah diketahui konsentrasi akhir dari ion logam timbal(II), pada variasi konsentrasi awal ion logam timbal(II) yang digunakan dapat diperoleh efisiensi adsorpsi dan nilai kapasitas adsorpsi. Data kemudian digunakan untuk penentuan model isoterm adsorpsi. Model isoterm yang dipilih adalah model isoterm Langmuir dan Freundlich.

HASIL DAN PEMBAHASAN

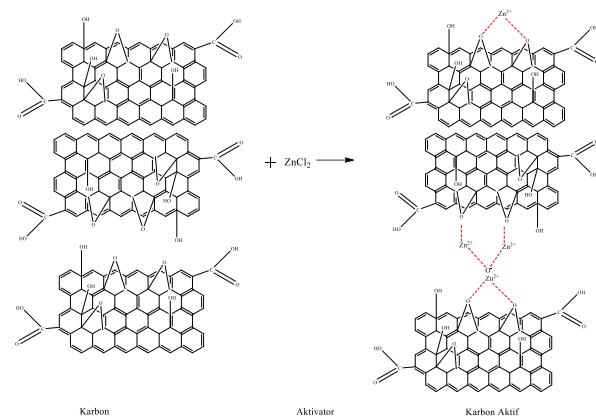
Sintesis dan Aktivasi Karbon Aktif

Proses sintesis karbon aktif dilakukan

melalui empat tahap utama, yaitu preparasi, karbonisasi, aktivasi, dan modifikasi. Tahap preparasi diawali dengan pemotongan kulit jeruk menjadi bagian kecil untuk memperluas permukaan dan mempermudah proses pengeringan serta karbonisasi. Kulit jeruk kemudian dicuci hingga bersih dan dijemur selama satu hari di bawah sinar matahari untuk mengurangi kadar air. Pengeringan dilanjutkan menggunakan oven pada suhu 105 °C untuk menghilangkan sisa kelembaban, sehingga dapat mencegah pembentukan uap air berlebih saat karbonisasi dan meningkatkan efisiensi aktivasi. Mekanisme pembentukan karbon ditunjukkan oleh **Gambar 1**.



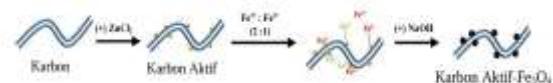
Tahap selanjutnya adalah aktivasi kimia menggunakan larutan $ZnCl_2$ 10% selama 24 jam. Aktivasi ini bertujuan untuk membuka pori-pori karbon aktif yang tertutup akibat proses karbonisasi, serta meningkatkan luas permukaan dan porositas material [13]. $ZnCl_2$ berperan sebagai asam Lewis yang dapat menarik gugus hidroksil ($-OH$) dari struktur karbon, memicu dehidrasi, dan menstabilkan struktur terhadap degradasi termal. Proses ini mampu menghasilkan luas permukaan karbon aktif hingga 800–1200 m^2/g [14]. Mekanisme aktivasi karbon aktif ditunjukkan pada **Gambar 2**.



Gambar 2. Mekanisme Aktivasi Karbon Aktif.

Modifikasi Karbon Aktif

Modifikasi karbon aktif dengan penambahan material magnetik Fe_3O_4 dilakukan melalui metode kopresipitasi pada suhu 70 °C. Metode ini dipilih karena efisien, sederhana, serta mampu menghasilkan partikel magnetik dengan sebaran merata pada permukaan karbon aktif. Prinsip dasar dari metode kopresipitasi adalah pengendapan ion logam secara bersamaan dari suatu larutan prekursor dalam bentuk senyawa tak larut, seperti hidroksida, karbonat, oksalat, atau sitrat, melalui pengaturan pH dan suhu larutan. Prekursor ion Fe^{2+} dan Fe^{3+} berasal dari $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ dan $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ dengan rasio molar 1:2. Penambahan $NaOH$ 5 M ke dalam campuran menyebabkan terbentuknya endapan hitam kecoklatan, menandakan pembentukan Fe_3O_4 , yang dikonfirmasi melalui sifat magnetiknya.[15] Ilustrasi proses pembentukan karbon aktif- Fe_3O_4 ditunjukkan dalam **Gambar 3**.



Gambar 3. Ilustrasi Pembentukan Karbon aktif- Fe_3O_4

Proses pembentukan komposit Karbon aktif- Fe_3O_4 melibatkan penjerapan ion logam oleh gugus fungsional ($-OH$, $-COOH$, $C=O$) pada karbon aktif, dilanjutkan pembentukan senyawa hidroksida dan dehidrasi menjadi Fe_3O_4 . Ion besi memiliki kecenderungan tinggi untuk berikatan pada permukaan karbon aktif karena muatan positifnya yang besar. Hal ini menyebabkan ion besi terikat lebih efektif pada karbon aktif, sehingga meningkatkan sebaran (dispersi) partikel serta memperbesar kapasitas adsorbsinya [16]. Setelah reaksi selesai, komposit dicuci hingga pH netral dan dikeringkan pada suhu 105 °C selama 2

jam untuk menjaga kestabilan struktur dan mencegah aglomerasi. Penyaringan akhir menggunakan ayakan 100 mesh menghasilkan ukuran partikel yang seragam, yang berkontribusi terhadap peningkatan luas permukaan spesifik dan efisiensi adsorpsi.

Karakterisasi Karbon Aktif

Karakterisasi karbon aktif dilakukan untuk mengetahui sifat-sifat khas dari karbon aktif setelah mengalami proses aktivasi dan modifikasi. Karbon dikarakterisasi menggunakan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) untuk mengidentifikasi keberadaan gugus fungsi spesifik. Selain itu, karbon aktif yang telah diaktivasi dan dimodifikasi dikarakterisasi *Scanning Electron Microscopy* (SEM) guna mengamati morfologi permukaan material.

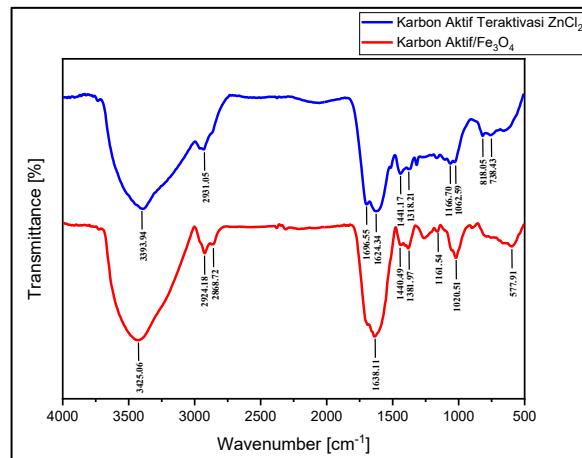
Karakterisasi FTIR

Karakterisasi menggunakan Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) dilakukan untuk mengidentifikasi perubahan gugus fungsi pada karbon aktif sebelum dan sesudah modifikasi dengan Fe_3O_4 . Hasil daerah serapan adsorben dilihat pada **Gambar 4**.

Pada karbon aktif teraktivasi ZnCl_2 , spektrum FTIR menunjukkan pita lebar pada $3393,94 \text{ cm}^{-1}$ yang mengindikasikan vibrasi $-\text{OH}$ dari air terikat atau gugus hidroksil. Pita pada $2931,05 \text{ cm}^{-1}$ berasal dari vibrasi C–H alifatik, sedangkan pita kuat di $1696,55 \text{ cm}^{-1}$ menunjukkan keberadaan gugus karbonil ($\text{C}=\text{O}$), seperti asam karboksilat atau keton. Serapan di $1624,34 \text{ cm}^{-1}$ dan $1441,17 \text{ cm}^{-1}$ masing-masing menandakan ikatan $\text{C}=\text{C}$ aromatik dan C–H aromatik. Rentang $1318\text{--}1062 \text{ cm}^{-1}$ menunjukkan keberadaan gugus C–O, sedangkan pita pada $818,05 \text{ cm}^{-1}$ dan $738,43 \text{ cm}^{-1}$ menandakan struktur cincin aromatik. Pita-pita ini mengindikasikan adanya gugus fungsional polar aktif yang mendukung kemampuan adsorpsi terhadap ion logam [17].

Setelah proses modifikasi, spektrum FTIR karbon aktif– Fe_3O_4 menunjukkan beberapa pergeseran dan penambahan pita serapan. Puncak $-\text{OH}$ mengalami pergeseran ke $3425,06 \text{ cm}^{-1}$, yang dapat diinterpretasikan sebagai interaksi antara gugus hidroksil dengan ion $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ melalui ikatan hidrogen atau koordinasi. Pita C–H alifatik terdeteksi pada $2921,18$ dan $2849,86 \text{ cm}^{-1}$, sementara pita $\text{C}=\text{C}$ bergeser ke $1638,11 \text{ cm}^{-1}$, menunjukkan perubahan struktur elektronik pada

permukaan karbon akibat keberadaan Fe_3O_4 . Kemunculan pita baru pada $577,91 \text{ cm}^{-1}$ menandakan vibrasi regangan ikatan Fe–O, yang merupakan karakteristik utama dari struktur spinel magnetit (Fe_3O_4). Hal ini menunjukkan bahwa partikel magnetik berhasil terdispersi pada permukaan karbon aktif [18].



Gambar 4. Spektrum FTIR Karbon Aktif Teraktivasi dan Karbon Aktif/ Fe_3O_4 .

Karakterisasi SEM

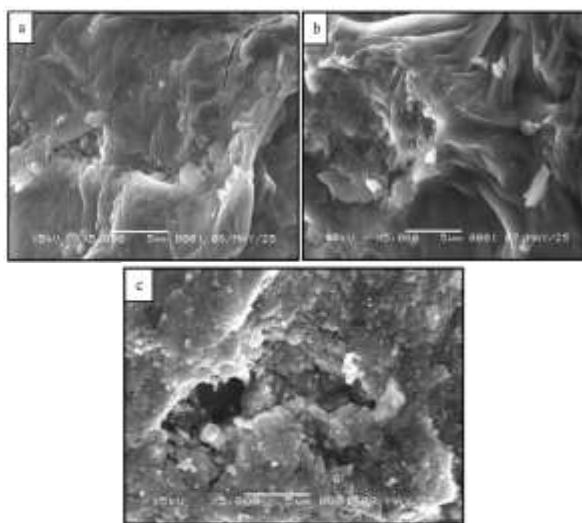
Karakterisasi menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) bertujuan untuk mengamati perubahan morfologi permukaan karbon aktif setelah proses aktivasi dan modifikasi. Permukaan berpori sangat berperan dalam meningkatkan kapasitas adsorpsi. Pengamatan dilakukan pada perbesaran 5000x untuk mendapatkan detail morfologi hingga skala mikron. Tegangan akselerasi 15 kV dipilih untuk menghasilkan citra tajam tanpa merusak struktur karbon aktif yang bersifat non-konduktif [19]. Hasil citra ditunjukkan pada **Gambar 5**.

Citra SEM karbon aktif dari kulit jeruk manis tanpa aktivasi menunjukkan morfologi permukaan yang tidak beraturan dan relatif halus. Permukaan tampak heterogen, dengan area halus bercampur bagian kasar, serta minimnya saluran pori yang berkembang. Struktur ini mencerminkan karakteristik karbon hasil pirolisis tanpa perlakuan aktivasi, di mana pori-pori belum terbentuk secara merata. Hal ini menegaskan pentingnya aktivasi dalam meningkatkan struktur pori dan luas permukaan untuk aplikasi adsorpsi [20]. Citra SEM karbon aktif kulit jeruk ini ditunjukkan oleh **Gambar 5 (a)**.

Citra SEM karbon aktif teraktivasi ZnCl_2 menunjukkan morfologi permukaan yang jauh

lebih kasar, tidak homogen, serta dipenuhi banyak rongga dan celah dengan pori-pori berukuran bervariasi. Citra SEM ini ditunjukkan pada **Gambar 5 (b)**. Aktivasi menggunakan $ZnCl_2$ memicu pembentukan struktur berpori dengan lebih efisien karena berperan sebagai agen dehidrasi yang memperluas ruang antar struktur karbon dan mencegah pembentukan tar [12]. Permukaan yang kaya mikropori dan mesopori akan meningkatkan kemampuan adsorpsi karbon aktif terhadap ion logam maupun zat organik [21]. Aktivasi kimia dengan $ZnCl_2$ terbukti efektif dalam mengubah morfologi dan struktur pori, sehingga sangat mendukung kinerja karbon dalam aplikasi adsorpsi.

Morfologi permukaan sampel karbon aktif yang dimodifikasi dengan magnetit menunjukkan permukaan yang tidak homogen, dengan partikel granular berwarna terang menempel pada permukaan karbon. Citra SEM yang menggambarkan hasil tersebut ditunjukkan dalam **Gambar 5 (c)**. Permukaan ini tetap memperlihatkan beberapa pori, namun sebagian pori tampak tertutup atau terisi oleh partikel padat yang diduga sebagai Fe_3O_4 . Hal ini menunjukkan bahwa proses impregnasi magnetit telah berhasil, namun berpotensi mengurangi luas permukaan aktif yang tersedia [18]. Proses modifikasi harus dilakukan dengan hati-hati dengan memperhatikan rasio antara karbon aktif dan magnetit serta teknik impregnasi agar struktur berpori karbon aktif tidak terganggu secara signifikan. Rasio Fe_3O_4 terhadap karbon aktif dan metode kopresipitasi yang digunakan sangat memengaruhi sifat magnetik dan karakteristik porositas akhir komposit.



Gambar 5. Citra SEM pada perbesaran 5000x (a) karbon aktif kulit jeruk, (b) karbon aktif teraktivasi, (c) karbon aktif/ Fe_3O_4 .

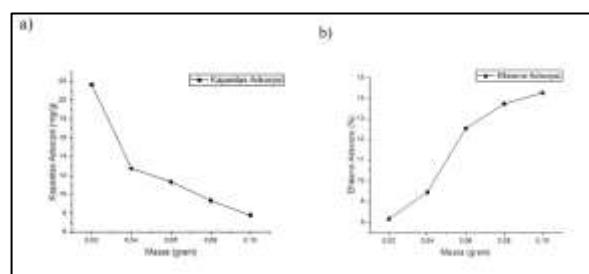
Aplikasi Karbon Aktif

Pengaruh Massa Adsorben

Pada tahap awal aplikasi, dilakukan proses adsorpsi dengan memvariasikan massa adsorben mulai dari 0,02 hingga 0,1 gram dalam 50 mL larutan iom logam timbal(II) dengan konsentrasi 100 mg/L selama 60 menit. Selama proses berlangsung, karbon aktif termodifikasi magnetit berada di dasar larutan dan menghasilkan filtrat yang tidak berwarna.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa kapasitas adsorpsi cenderung menurun seiring peningkatan massa adsorben. Hal ini mengindikasikan bahwa pada massa yang lebih besar, sebagian permukaan aktif adsorben masih dalam keadaan bebas karena kondisi jenuh belum tercapai. Hal ini dapat terjadi karena terdapat banyak ion logam yang tersedia dalam larutan yang relatif stabil, sehingga peningkatan ion adsorben tidak sebanding dengan peningkatan ion logam yang teradsorpsi. Sebaliknya, pada massa adsorben yang lebih kecil, jumlah situs aktif lebih sedikit, tetapi hampir semua situs tersebut dapat berinteraksi secara optimal dengan ion logam yang tersedia. Interaksi yang lebih sederhana menghasilkan keadaan kejemuhan yang lebih efektif yang dapat meningkatkan kapasitas adsorpsi per massa.

Di sisi lain, efisiensi adsorpsi cenderung meningkat seiring dengan bertambahnya massa adsorben. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan massa adsorben menyebabkan terdapat lebih banyak situs aktif yang mampu mengikat ion logam dari larutan [22]. Pola hubungan antara massa adsorben, kapasitas, dan efisiensi ditunjukkan dalam **Gambar 6**.

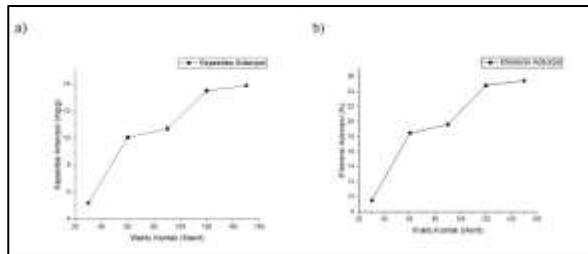


Gambar 6. Kurva Karbon Aktif Termodifikasi Magnetit Variasi Massa: a) Kapasitas Adsorpsi dan b) Efisiensi Adsorpsi.

Pengaruh Waktu Kontak Adsorpsi

Aplikasi karbon aktif selanjutnya dilakukan

untuk mengetahui pengaruh variasi waktu kontak terhadap kinerja adsorpsi ion logam timbal(II) oleh karbon aktif termodifikasi magnetit. Proses adsorpsi dilakukan menggunakan larutan ion logam timbal(II) berkonsentrasi 100 mg/L sebanyak 50 mL, dengan massa adsorben sebesar 0,1 gram yang sebelumnya telah ditentukan sebagai massa optimum. Pola hubungan antara waktu kontak, kapasitas, dan efisiensi ditunjukkan dalam **Gambar 7**.



Gambar 7. Kurva Karbon Aktif Termodifikasi Magnetit Variasi Waktu Kontak: a) Kapasitas Adsorpsi dan b) Efisiensi Adsorpsi.

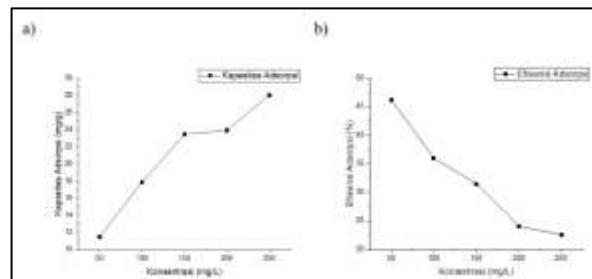
Hasil pengujian menunjukkan bahwa karbon aktif termodifikasi magnetit menghasilkan pola kapasitas dan efisiensi adsorpsi yang relatif konstan namun mengalami peningkatan seiring bertambahnya waktu kontak. Pada waktu kontak paling singkat, kapasitas adsorpsi menunjukkan nilai terendah, sedangkan nilai tertinggi diperoleh pada waktu kontak terlama. Hal serupa juga ditunjukkan oleh efisiensi adsorpsi, yang meningkat secara bertahap dengan semakin lamanya interaksi antara adsorben dan ion logam.

Secara umum, waktu kontak berperan penting dalam proses adsorpsi. Semakin lama waktu yang diberikan, semakin besar peluang ion logam untuk berinteraksi dengan situs aktif yang terdapat pada permukaan dan pori-pori adsorben. Pada awal proses, ketersediaan situs aktif masih tinggi, namun waktu yang terbatas menyebabkan belum semua ion berhasil teradsorpsi. Dengan memperpanjang waktu kontak, ion logam memiliki kesempatan untuk berdifusi lebih dalam ke struktur pori adsorben dan membentuk ikatan yang lebih kuat, sehingga meningkatkan jumlah ion yang berhasil teradsorpsi secara keseluruhan [22].

Pengaruh Konsentrasi Awal Adsorbat

Aplikasi karbon aktif terakhir dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi konsentrasi awal adsorbat. Dalam tahap ini, digunakan massa adsorben sebesar 0,1 gram dan waktu kontak

selama 150 menit, berdasarkan kondisi optimum yang telah diperoleh sebelumnya. Grafik hubungan antara kapasitas dan efisiensi adsorpsi terhadap konsentrasi awal ditunjukkan pada **Gambar 8**.



Gambar 8. Kurva Karbon Aktif Termodifikasi Magnetit Variasi Konsentrasi: a) Kapasitas Adsorpsi dan b) Efisiensi Adsorpsi.

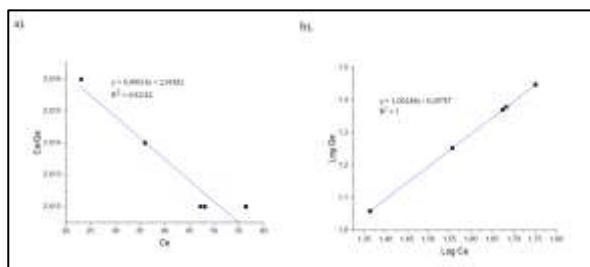
Hasil analisis menunjukkan bahwa terjadi pola kenaikan kapasitas adsorpsi dengan bertambahnya konsentrasi awal ion logam timbal. Peningkatan kapasitas adsorpsi (q_e) seiring bertambahnya konsentrasi awal ion logam timbal(II) menunjukkan bahwa jumlah ion yang berhasil teradsorpsi per gram adsorben juga meningkat. Hal ini disebabkan oleh semakin tingginya jumlah ion logam timbal(II) yang tersedia di dalam larutan, sehingga gaya dorong konsentrasi menjadi lebih besar dan mempercepat laju transfer massa dari larutan ke permukaan adsorben.

Efisiensi adsorpsi ion logam timbal(II) menunjukkan pola menurun seiring dengan bertambahnya konsentrasi awal larutan. Hal ini terjadi karena pada konsentrasi yang lebih tinggi, meskipun jumlah ion yang teradsorpsi meningkat secara absolut, proporsinya terhadap jumlah ion awal menjadi lebih kecil. Hal ini menandakan bahwa semakin banyak ion yang tersisa dalam larutan karena keterbatasan jumlah situs aktif pada adsorben. Hasil serupa dilaporkan oleh Alorabi et al. (2020), yang menunjukkan bahwa efisiensi penghilangan ion logam timbal(II) menurun secara signifikan pada konsentrasi awal di atas 100 mg/L karena keterbatasan situs aktif adsorpsi (II) [23].

Penentuan Model Isoterm Adsorpsi

Secara umum, isoterm adsorpsi menghubungkan konsentrasi kesetimbangan adsorbat dalam larutan dengan jumlah adsorbat yang terserap per satuan massa adsorben. Pemodelan ini menjadi sangat penting dalam

bidang pengolahan limbah, terutama untuk mengetahui efisiensi dan efektivitas suatu material sebagai adsorben. Kedua isoterm ini ditunjukkan dengan data berupa grafik. Grafik tersebut ditunjukkan pada **Gambar 9**.



Gambar 9. Grafik Isoterm: (a) Langmuir dan (b) Freundlich.

Pada grafik Langmuir, hubungan yang dianalisis adalah antara C_e (konsentrasi kesetimbangan) dan C_e/Q_e (rasio antara C_e dan jumlah zat yang teradsorpsi per gram adsorben). Sementara itu, pada model Freundlich, hubungan yang dianalisis adalah $\log C_e$ terhadap $\log Q_e$. Kesesuaian model dengan data eksperimen dinilai melalui nilai koefisien determinasi (R^2). Model dengan R^2 paling mendekati 1 dianggap paling menggambarkan kondisi sebenarnya. Berdasarkan hasil perhitungan, model Freundlich memiliki nilai $R^2 = 1$, sedangkan Langmuir $R^2 = 0,92182$, yang berarti bahwa proses adsorpsi dalam penelitian ini lebih sesuai dijelaskan oleh model Freundlich. Data eksperimental digunakan untuk menghitung nilai parameter dan konstanta dari masing-masing model isoterm adsorpsi yang ditunjukkan pada **Tabel 1**.

Model Langmuir menggambarkan adsorpsi pada permukaan yang seragam, di mana setiap molekul hanya bisa menempati satu titik aktif (monolayer), dan tidak ada interaksi antar molekul yang telah menempel. Dua parameter penting dalam model ini adalah K_L (konstanta Langmuir) yang menunjukkan kekuatan interaksi adsorben-adsorbat, serta Q_m yang menunjukkan kapasitas maksimum adsorpsi. Pada penelitian ini, nilai K_L sebesar $6,44 \times 10^{-5} \text{ L/mg}$ menunjukkan bahwa proses adsorpsi berlangsung cukup lemah, tapi masih tergolong disukai (favorable). Sementara itu, Q_m yang mencapai 7692,31 mg/g menunjukkan potensi penyerapan yang tinggi [24].

Tabel 1. Konstanta Isoterm Langmuir dan Freundlich.

Isoterm Adsorpsi	Parameter	Keterangan
Langmuir	Q_m	7692,31
	K_L	$6,44 \times 10^{-5}$
	R^2	0,92182
Freundlich	n	0,99753
	K_F	0,493
	R^2	1

Sementara itu, model Freundlich lebih cocok untuk permukaan adsorben yang tidak seragam dan memiliki energi ikatan yang bervariasi. Parameter K_F menunjukkan kapasitas relatif adsorpsi, sedangkan n menggambarkan tingkat heterogenitas dan kekuatan ikatan. Nilai K_F sebesar 0,493 menunjukkan kemampuan penyerapan yang sedang, dan nilai n sebesar 0,99753 menunjukkan bahwa mekanisme adsorpsi berlangsung hampir linier. Namun karena masih di bawah 1, hal ini juga menunjukkan bahwa proses adsorpsi tidak terlalu kuat. Nilai $1/n$ yang sedikit di atas 1 menguatkan bahwa proses ini tidak ideal dan menunjukkan adanya keragaman karakteristik permukaan adsorben [25].

SIMPULAN

Karbon aktif dari kulit jeruk manis yang dimodifikasi dengan magnetit (Fe_3O_4) menunjukkan potensi sebagai adsorben untuk ion logam timbal(II). Hasil karakterisasi FTIR mengindikasikan keberadaan gugus fungsional seperti $-OH$, $C=O$, dan $C-O$, serta munculnya pita serapan $Fe-O$ pada $577,91 \text{ cm}^{-1}$ yang menandakan keberhasilan modifikasi dengan magnetit. Citra SEM menunjukkan perkembangan struktur pori akibat aktivasi $ZnCl_2$ dan keberadaan partikel granular Fe_3O_4 pada permukaan karbon, meskipun sebagian pori tertutup. Aplikasi karbon aktif termodifikasi ini menunjukkan bahwa massa adsorben, waktu kontak, dan konsentrasi awal larutan berpengaruh signifikan terhadap kinerja adsorpsi. Kapasitas adsorpsi tertinggi diperoleh pada konsentrasi 250 mg/L sebesar 28,03 mg/g. Model isoterm Freundlich paling sesuai menggambarkan perilaku adsorpsi dengan koefisien determinasi (R^2) sebesar 1, yang menunjukkan bahwa permukaan adsorben bersifat heterogen.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada Laboratorium Terpadu UIN

Sunan Gunung Djati Bandung atas dukungan dan fasilitas yang telah disediakan selama proses penelitian. Terima kasih juga disampaikan kepada para dosen pembimbing, yaitu Ibu Rizka Fitriyani S, S.Pd., M.Si dan Bapak Adi Mulyana Supriatna, S.Pd., M.T atas arahan, saran, dan bantuannya selama penelitian dan penulisan artikel ini.

REFERENSI

- [1] D. S. Malik, C. K. Jain, dan A. K. Yadav, “Removal of heavy metals from emerging cellulosic low-cost adsorbents: A Review,” *Applied Water Science*, vol. 7, no. 5, pp. 2113–2136, 2017, doi: 10.1007/s13201-016-0401-8.
- [2] M. F. Adhi, R. Marzyan, M. Riza, dan F. Mulana, “Pemanfaatan Kulit Jeruk Purut Teraktivasi Sebagai Adsorben Alternatif Untuk Penyerapan Ion Logam Zn (II),” *Jurnal Inovasi Ramah Lingkungan*, vol. 2, no. 1, pp. 10–14, 2021.
- [3] R. Alfi, F. Lubis, H. I. Nasution, dan M. Zubir, “Microporous and Mesoporous Materials Production of Activated Carbon from Natural Sources for Water,” *Indonesian Journal of Chemical Science and Technology*, vol. 3, no. 2, pp. 67–73, 2020.
- [4] L. Kurniasari, I. Riwayati, dan Suwardiyono, “Pektin Sebagai Alat alternatif Bahan Baku Biosorben Logam Berat,” *Jurnal Momentum UNWAHAS*, vol. 8, no. 1, pp. 11-18, 2020.
- [5] D. Arifiyana dan R. K. Wardani, “Effect of Orange Peel Waste Adsorbent Mass on Lead (Pb) Metal Biosorption in Artificial Liquid Waste,” *Journal Pharmasci (Journal of Pharmacy and Science)*, vol. 8, no. 2, pp. 111–118, 2023, doi: 10.53342/pharmasci.v8i2.359.
- [6] A. Khalil, C. Mangwandi, M. A. Salem, S. Ragab, dan A. El Nemr, “Orange peel magnetic activated carbon for removal of acid orange 7 dye from water,” *Scientific Reports*, vol. 14, no. 1, pp. 1–23, 2024, doi: 10.1038/s41598-023-50273-3.
- [7] S. Suliesyah dan A. D. Astuti, “Optimasi Aktivator $ZnCl_2$ Dalam Pembuatan Karbon Aktif Dari Batubara Dan Pengujian Karbon Aktif Sebagai Adsorben,” *Jurnal Penelitian Dan Karya Ilmiah Lembaga Penelitian Universitas Trisakti*, vol. 6, no. 2, pp. 191–201, 2021, doi: 10.25105/pdk.v6i2.9525.
- [8] R. A. Fatmawati, S. Koesnarpadi, dan T. Wirawan, “Adsorpsi Ion Logam Kadmium(II) Menggunakan Magnetit (Fe_3O_4)-Arang Aktif dari Kulit Buah Tarap (*Artocarpus odoratissimus*),” *Jurnal Atomik.*, vol. 9, no. 2, pp. 110–119, 2024.
- [9] T. Sanadi, J. Schaduw, S. Tilaar, D. Mantiri, R. Bara, dan W. Pelle, “Analisis logam berat timbal (Pb) pada akar mangrove di Desa Bahowo dan Desa Talawaan Bajo Kecamatan Tongkaina,” *Jurnal Pesisir Dan Laut Tropis*, vol. 6, no. 2, hal. 9, 2018, doi: 10.35800/jplt.6.2.2018.21382.
- [10] O. Rachmawanti, R. R. D. S. J.N.S, dan V. L. Allo, “Termogravimetri a Kinetic Study of Pyrolysis of Bagasse Using Thermogravimetric,” *Seminar Nasional Kimia*, hal. 141–145, 2023.
- [11] E. Erawati dan E. R. Helmy, “Pembuatan Karbon Aktif dari Serbuk Gergaji Kayu Jati (*Tectona grandis* L.f.) (Suhu dan Waktu Karbonasi),” *Urecol (University Res. Colloquium)*, hal. 105–112, 2018.
- [12] A. El Nemr, R. M. Aboughaly, A. El Sikaily, S. Ragab, M. S. Masoud, dan M. S. Ramadan, “Microporous nano-activated carbon type I derived from orange peel and its application for Cr(VI) removal from aquatic environment,” *Biomass Convers. Biorefinery*, vol. 12, no. 11, hal. 5125–5143, 2022, doi: 10.1007/s13399-020-00995-5.
- [13] A. Saragih, N. M. Dwidiani, dan I. N. Santhiarsa, “Karakterisasi Karbon Aktif Tempurung Kelapa dengan Variasi Konsentrasi Aktivator Terhadap Adsorbsi Timbal,” *Jurnal Ilmiah Teknik Desain Mekanika.*, vol. 9, no. 3, hal. 993–997, 2020.
- [14] D. Himawan F dan A. Al Farissiwi, “Laporan Hasil Penelitian Aktivasi Arang Aktif Dari Ampas Tebu Menggunakan $ZnCl_2$,” Skripsi, UPN Veteran, Jawa Timur, 2022.
- [15] Z. F. Yang, L. Y. Li, C. Te Hsieh, dan R. S. Juang, “Co-precipitation of magnetic Fe_3O_4 nanoparticles onto carbon nanotubes for removal of copper ions from aqueous solution,” *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, vol. 82, no. November, hal. 56–63, 2018, doi: 10.1016/j.jite.2017.11.009.

- [16] I. Lestari, Y. Ramadhanty, dan L. Marlinda, "Preparation and Characterization of Magnetite Fe₃O₄ Activated Carbon Composite as Adsorbent Cr(VI) Ion," *Eksakta*, hal. 238–247, 2021.
- [17] D. L. Pavia, G. M. Lampman, G. S. Kriz, dan J. R. Vyvyan, *INTRODUCTION TO SPECTROSCOPY*, Fifth. Washington DC: Cengage Learning, 2016.
- [18] L. Hakim dan E. Sedyadi, "Synthesis and Characterization of Fe₃O₄-Coconut Shell Activated Carbon Composites," *J Jurnal Kimia dan Pendidikan Kimia*, vol. 5, no. 3, hal. 245–253, 2020.
- [19] J. I. Goldstein *et al.*, *Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis*. New York: Springer Science Business Media, 2017.
- [20] E. S. Alkhawaja dan H. M. Abdul-Hameed, "Novel Synthesis and Characterization of Nano-Activated Carbon Derived from Agricultural Orange Peel Waste," *International Journal of Design and Nature and Ecodynamics*, vol. 20, no. 1, hal. 31–41, 2025, doi: 10.18280/ijdne.200104.
- [21] E. Moller *et al.*, "Peat-Derived ZnCl₂-Activated Ultramicroporous Carbon Materials for Hydrogen Adsorption," *Nanomaterials*, vol. 13, no. 21, 2023, doi: 10.3390/nano13212883.
- [22] K. Ezech, .C. Ogbu, K. G. Akpomie, N. C. Ojukwu, dan I. J.C., "Utilizing the Sorption Capacity of Local Nigerian Sawdust for Attenuation of Utilizing the Sorption Capacity of Local Nigerian Sawdust for Attenuation of Heavy Metals from Solution: Isotherm, Kinetic, and Thermodynamic Investigations," *The Pacific Journal of Science and Technology*, vol. 18, no. 1, 2017, [Daring]. Tersedia pada:
<https://www.researchgate.net/publication/317663559>
- [23] A. Q. Alorabi, F. A. Alharthi, M. Azizi, N. Al-Zaqri, A. El-Marghany, dan K. A. Abdelshafeek, "Removal of lead(II) from synthetic wastewater by lavandula pubescens decne biosorbent: Insight into composition–adsorption relationship," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 10, no. 21, hal. 1–16, 2020, doi: 10.3390/app10217450.
- [24] R. Sjafruddin, Fajar, K. Nisa, N. Indah Sari, dan A. Ajeng Ferawati, "Model Isoterm Adsorpsi Karbon Aktif dari Ampas Tebu Pada Penyerapan Zat Warna Metilen Biru. Prosiding," *Prosiding 6 th Seminar Nasional Penelitian & Pengabdian Kepada Masyarakat*, hal. 121–126, 2022.
- [25] M. A. Zulfikar, A. Bahri, dan M. Nasir, "Study of Humic Acid Adsorption Equilibrium on Dual Nanofiber PMMA/PVDF," *JKPK (Jurnal Kimia dan Pendidikan Kimia)*, vol. 3, no. 1, hal. 13, 2018, doi: 10.20961/jkpk.v3i1.11918.