

Bio-Adsorben Berbasis Batang Sorgum (*Sorgum Bicolor L. Moench*): Adsorpsi Ion Logam Tembaga(II) dengan Aktivator KOH

INTAN AULIA WINDANA¹, RIZKA FITRIYANI S^{1*}, DAN NUNUNG KURNIASIH¹

¹Program Studi Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi, UIN Sunan Gunung Djati Bandung, Jalan A.H
Nasution No. 105, Cipadung, Cibiru, Kota Bandung, Jawa Barat 40614, Indonesia

*alamat email korespondensi: rizkafs@uinsgd.ac.id

Informasi Artikel	Abstrak/Abstract
Kata Kunci: adsorben; batang sorgum; isoterm; KOH; logam berat.	Perkembangan industri yang semakin pesat, menyebabkan pencemaran lingkungan perairan yang signifikan, salah satunya berupa logam berat, khususnya tembaga. Adsorpsi merupakan salah satu metode yang efektif dalam mengurangi logam berat tembaga(II) di lingkungan. Karbon aktif dimanfaatkan sebagai adsorben, karena luas permukaannya yang besar dan struktur pori yang berkembang. Batang sorgum dari limbah pertanian bisa dimanfaatkan sebagai karbon aktif, karena memiliki kandungan serat selulosa yang tinggi ($\pm 65,61\%$). Penelitian ini bertujuan untuk meninjau kemampuan limbah batang sorgum sebagai adsorben ion logam tembaga(II). Sintesis karbon aktif dicapai melalui proses karbonisasi pada suhu 400°C dan aktivasi dengan KOH 1M. Karakterisasi dengan FT-IR digunakan untuk menentukan gugus fungsi dan SEM untuk melihat morfologi permukaan. FT-IR menghasilkan gugus fungsi baru yaitu gugus karbonil ($\text{C}=\text{O}$) dengan bilangan gelombang $1696,24\text{ cm}^{-1}$. SEM terlihat memiliki struktur pori melingkar yang melimpah pada arah sejajar (paralel) pada sisi vertikalnya. Metode <i>Box Behnken Design</i> pada proses adsorpsi dilakukan dengan memvariasikan massa adsorben, waktu kontak, konsentrasi larutan ion logam tembaga(II). Pada kapasitas adsorpsi kondisi optimum dicapai pada variasi massa adsorben 0,02 g dengan waktu kontak 15 menit dan konsentrasi limbah 150 ppm, dengan rata-rata sekitar 91,17 mg/g. Efisiensi adsorpsi kondisi optimum yang dicapai pada konsentrasi tembaga(II) limbah sebesar 50 mg/L dengan waktu kontak 15 menit, dan massa adsorben sebesar 0,02 g menghasilkan efisiensi adsorpsi sebesar 84,14%. Hasil adsorpsi sesuai dengan model <i>Langmuir</i> , yang menunjukkan bahwa proses adsorpsi terjadi secara <i>monolayer</i> dan permukaan adsorben homogen.
Keywords: adsorbent; heavy metals; isotherm; KOH; sorghum stem.	<i>The rapid growth of industry has led to significant water pollution, including contamination by heavy metals, particularly copper. Adsorption is an effective method for reducing copper(II) in the environment. Activated carbon is used as an adsorbent due to its large surface area and well-developed pore structure. Sorghum stalks from agricultural waste can be utilized as activated carbon because they have a high cellulose fiber content ($\pm 65,61\%$). This study aims to evaluate the ability of sorghum stalk waste to act as an adsorbent for copper(II) ions. Activated carbon was synthesized through a carbonization process at 400°C followed by activation with 1 M KOH. FT-IR characterization was used to identify functional groups, and SEM was used to examine surface morphology. FT-IR revealed a new functional group, namely the carbonyl group ($\text{C}=\text{O}$), with a</i>

wavenumber of $1696,24\text{ cm}^{-1}$. SEM analysis showed an abundance of circular pore structures aligned parallel to the vertical sides. The Box-Behnken design the method for the adsorption process was carried out by varying the adsorbent mass, contact time, and concentration of the copper(II) ion solution. The optimum adsorption capacity was achieved with an adsorbent mass of 0,02 g, a contact time of 15 minutes, and a waste concentration of 150 ppm, with an average of approximately 91,17 mg/g. The adsorption efficiency under optimal conditions achieved at a copper(II) concentration of 50 mg/L, a contact time of 15 minutes, and an adsorbent mass of 0,02 g was 84,14%. The adsorption results are consistent with the Langmuir model, indicating that the adsorption process occurs as a monolayer on a homogeneous adsorbent surface.

PENDAHULUAN

Perkembangan kegiatan industri memberikan manfaat besar bagi kehidupan sehari-hari, dengan memanfaatkan bahan kimia serta logam sebagai material utama produksi. Namun, di balik efektivitas produksi tersebut, menghasilkan limbah berupa limbah padat maupun cair yang berbahaya bagi kesehatan lingkungan [1]. Salah satu ancaman paling berbahaya berasal dari limbah cair yang mengandung logam berat yang bersifat toksik dan tidak dapat terdegradasi secara alami di lingkungan. Salah satu logam berat yang memberikan dampak negatif adalah tembaga. Secara khusus, tingginya kandungan logam tembaga(II) dalam perairan dapat memicu berbagai gangguan kesehatan pada manusia, seperti anemia, kerusakan sistem pencernaan, hingga kerusakan ginjal. Oleh karena itu, pengembangan metode pemisahan yang efektif, efisien, dan ramah lingkungan untuk mereduksi keberadaan logam tembaga di lingkungan menjadi hal yang sangat penting [2]. Berbagai metode pemisahan telah dikembangkan, termasuk flokulasi, pertukaran ion, elektrodeposisi, dan adsorpsi [1].

Adsorpsi merupakan metode yang efisien dan ramah lingkungan. Proses ini melibatkan penyerapan zat terlarut (adsorbat) pada permukaan material padat (adsorben). Proses adsorpsi biasanya menggunakan karbon aktif sebagai adsorben. Penggunaan karbon aktif unggul karena memiliki luas permukaan yang tinggi dan struktur pori yang berkembang pesat, sehingga mampu meningkatkan proses adsorpsi [3]. Pemanfaatan limbah pertanian sebagai prekursor karbon aktif merupakan strategi berkelanjutan untuk menghilangkan zat warna dan logam berat, mengingat ketersediaannya yang melimpah, murah, dan mudah diperoleh.

Salah satu biomassa potensial adalah batang sorgum yang mengandung serat selulosa cukup tinggi 65,61%, lignin 6,5%, kadar air 10–15% [4]. Proses dehidrasi, karbonisasi, dan aktivasi diperlukan untuk mengubah biomassa menjadi karbon aktif [5].

Aktivasi kimia pada karbon aktif bertujuan untuk memperluas area permukaan dan mengoptimalkan struktur pori agar proses penyerapan polutan berjalan lebih efektif. Penggunaan agen pengaktivasi seperti KOH terbukti sangat efektif dalam menghasilkan struktur pori berlapis dan luas permukaan yang signifikan, sebagaimana ditunjukkan pada penelitian terdahulu yang mampu mencapai kapasitas adsorpsi sebesar 197,6 mg/g dengan efisiensi penghilangan mencapai 98,82% [6]. Penelitian ini bertujuan untuk menguji dan menganalisis proses adsorpsi karbon aktif berbasis batang sorgum yang teraktivasi KOH terhadap logam tembaga(II), dengan optimasi parameter proses (massa adsorben, waktu kontak, dan konsentrasi larutan) menggunakan metode *Box-Behnken Design* (BBD) melalui perangkat lunak *Minitab* 21. Pendekatan ini memungkinkan penentuan kondisi optimum adsorpsi lebih. Karakterisasi gugus fungsi aktif dan morfologi permukaan adsorben karbon aktif batang sorgum, sementara penentuan model isoterm adsorpsi dilakukan melalui pengukuran konsentrasi ion logam tembaga(II).

Penelitian ini diharapkan mampu memberikan pengetahuan baru tentang mengurangi pencemaran air yang mengandung logam berat seperti tembaga(II) akibat kegiatan industri, dengan memanfaatkan biomassa batang sorgum menjadi adsorben karbon aktif yang efektif dan bernilai ekonomis.

EKSPERIMEN

Penelitian ini dilakukan dengan lima tahapan, yaitu: (1) sintesis batang sorgum dengan metode karbonisasi, (2) aktivasi karbon dengan KOH, (3) karakterisasi adsorben, (4) uji adsorpsi dengan ion logam tembaga(II) dengan metode *Box Behnken Design*, (5) penentuan model isoterm adsorpsi.

Material

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah batang sorgum, aquades, aqua dm, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (0,3930 gram, Merck®), HCl (1,67 mL, Teknis), KOH (5,6110 gram, Merck®), kertas saring, dan larutan induk tembaga(II) 1000 ppm (Merck®).

Instrumentasi

Instrumen yang digunakan meliputi Atomic Absorption Spectroscopy (AAS) dengan type Agilent Technologies Inc 240 AA. Fourier Transform Infrared (FT-IR) type (Thermo Scientific BDM1910155), dan Scanning Electron Microscopy (SEM) type JEOL JSM-6510.

Prosedur

Penelitian dilakukan melalui empat tahapan, yaitu tahapan pertama sintesis karbon dari batang sorgum. Tahapan kedua proses aktivasi kimia karbon aktif. Tahapan ketiga karakterisasi. Tahapan keempat pengaplikasian karbon aktif.

Sintesis Batang Sorgum

Batang sorgum dicuci dengan aquades dan dikeringkan dalam oven pada suhu 105°C selama 2 jam. Selanjutnya, dikarbonisasi dalam *furnace* pada suhu 400°C selama 2 jam. Setelah itu karbon didinginkan dalam desikator dan digerus serta diayak hingga diperoleh karbon berukuran 100 mesh.

$$\text{Rendemen (\%)} = \frac{\text{bobot sampel akhir (g)}}{\text{bobot sampel awal (g)}} \%$$

Aktivasi Karbon

Karbon direndam dengan larutan KOH 1M dengan rasio perbandingan (1:8). Diaduk selama

1 jam dan diamkan campuran terendam selama 24 jam. Selanjutnya, disaring karbon dan dicuci residu dengan larutan HCl 0,1M hingga netral atau pH=7. Setelah itu dikeringkan pada oven dengan suhu 105°C selama 2 jam.

Karakterisasi Adsorben

Karakterisasi yang dilakukan meliputi analisis gugus fungsi dengan FT-IR $1000\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$ dan analisis pengukuran morfologi permukaan dengan menggunakan SEM dengan perbesaran 1000x.

Uji Adsorpsi Ion Logam Tembaga(II)

Rancangan percobaan dilakukan menggunakan perangkat lunak *Minitab* versi 21.4.1 dengan metode *Box-Behnken Design* (BBD) dan pendekatan *Response Surface Methodology* (RSM). Pengujian optimum ion logam tembaga(II) dilakukan berdasarkan ketiga variabel pada metode *Box-Behnken Design* (BBD) menghasilkan total 15 titik percobaan seperti pada **Tabel 1** yang kemudian diuji dengan menggunakan instrumen AAS. Diperoleh data absorbansi dan dihitung kapasitas serta efisiensi adsorpsinya.

Tabel 1. Variasi Optimasi Adsorpsi dengan BBD

Run	Massa (gram)	Waktu Kontak (menit)	Konsentrasi Awal (mg/L)
1	0,1	50	30
2	0,1	100	15
3	0,1	100	60
4	0,1	150	30
5	0,2	50	15
6	0,2	50	60
7	0,2	100	30
8	0,2	100	30
9	0,2	100	30
10	0,2	150	15
11	0,2	150	60
12	0,3	50	30
13	0,3	100	15
14	0,3	100	60
15	0,3	150	30

Kapasitas Adsorpsi

Kapasitas adsorpsi menunjukkan seberapa efisien suatu bahan adsorben dalam menangkap atau menyerap zat tertentu dari larutan atau gas.

Pada nilai kapasitas adsorpsi dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$Q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{W}$$

Keterangan:

Q_e = Kapasitas Adsorpsi (mg/g)

C_0 = konsentrasi larutan sebelum adsorpsi (mg/L)

C_e = konsentrasi larutan sesudah adsorpsi (mg/L)

V = volume larutan (mL)

W = massa adsorben (g)

Efisiensi Adsorpsi

Efisiensi adsorpsi adalah jumlah adsorbat yang terakumulasi pada permukaan adsorben. Pada nilai efisiensi adsorpsi dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\% \text{ Efisiensi Adsorpsi} = \frac{(C_0 - C_e)V}{C_0} \times 100\%$$

Keterangan:

C_0 = konsentrasi larutan sebelum adsorpsi (mg/L)

C_e = konsentrasi larutan sesudah adsorpsi (mg/L)

Model Isoterm Adsorpsi

Model isoterm yang digunakan meliputi model *Langmuir* dan *Freundlich*. Adapun pengolahan data isoterm *Langmuir* sebagai berikut:

$$\frac{C_e}{Q_e} = \frac{1}{a} C_e + \frac{1}{a \cdot b}$$

Pada C_e merupakan konsentrasi akhir (mg/g), Q_e merupakan kapasitas adsorpsi (mg/L), b atau KL merupakan konstanta *Langmuir*, dan a merupakan daya adsorpsi maksimum (mg/g). Sedangkan untuk pengolahan data isoterm *Freundlich* sebagai berikut:

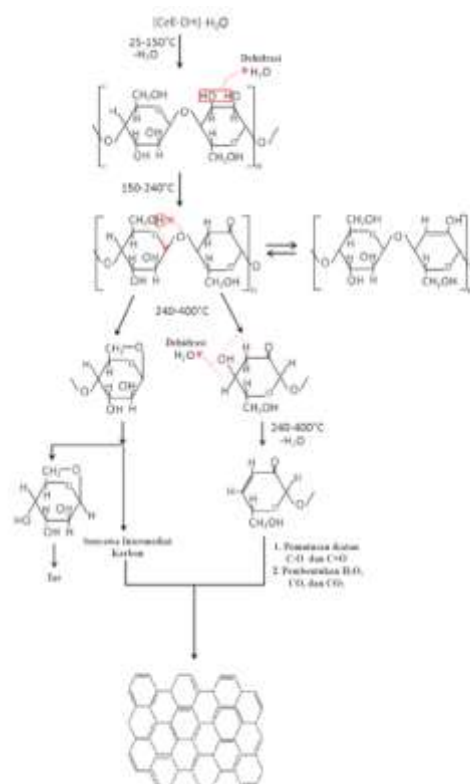
$$\log \log Q_e = \log \log K + \frac{1}{n} \log \log C_e$$

Pada C_e merupakan konsentrasi akhir (mg/L), Q_e merupakan kapasitas adsorpsi (mg/g), b atau KF merupakan konstanta *Freundlich*, dan K merupakan daya adsorpsi maksimum (mg/g).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sintesis Batang Sorgum

Pada tahapan ini, batang Sorgum dikeringkan di dalam oven pada suhu 105°C selama 2 jam untuk mengurangi kadar air, sehingga proses dekomposisi termal (karbonisasi) dapat berjalan secara optimal. Selanjutnya, proses karbonisasi dengan menggunakan *furnace* pada suhu 400°C selama 2 jam. Proses karbonisasi pada dasarnya melibatkan penguapan air dan penguraian senyawa-senyawa penting dalam batang sorgum, seperti hemiselulosa, selulosa, dan lignin. Dipilih kondisi dengan suhu 400°C dan waktu 2 jam untuk proses karbonisasi, karena pada kondisi tersebut komponen lignoselulosa dalam batang sorgum dapat terurai sempurna menjadi karbon. Penguraian hemiselulosa terjadi lebih dulu pada suhu 200°C–250°C dengan tanda asap putih tipis, kemudian diikuti oleh selulosa pada suhu 280°C–350°C yang memicu asap tebal berwarna hitam kecoklatan, dan lignin pada suhu 300°C–400°C saat asap kembali memutih lalu menghilang [7].



Gambar 1. Proses Mekanisme Karbonisasi

Proses dekomposisi selulosa terjadi dalam empat tahapan utama berdasarkan rentang suhunya. Proses ini dimulai dengan penguapan air pada suhu

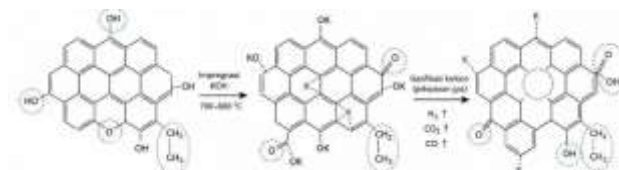
25-150 °C. Kemudian, pada suhu 150–240 °C, dehidrasi selulosa terjadi, di mana ikatan silang antar molekul gula menggantikan ikatan hidrogen. Pada suhu 240–400 °C, tahap degradasi termal terjadi, di mana ikatan C-O dan C-C diputuskan. Ini menghasilkan tar dan produk gas seperti H₂O, CO, dan CO₂. Proses ini kemudian berakhir pada suhu 400–500 °C. Adapun mekanismenya seperti pada **Gambar 1**.

Kualitas karbon yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh suhu pemanasan. Suhu berlebih menghasilkan abu dengan kapasitas adsorpsi yang rendah, sedangkan suhu terlalu rendah menyebabkan struktur pori yang tidak ideal [5]. Karbon yang telah dikarbonisasi kemudian digerus dan diayak dengan ayakan 100 mesh untuk memastikan ukuran partikel yang sama dan memastikan proses aktivasi berjalan dengan lancar [8]. Hasil rendemen diperoleh sebesar 33,64%, hal tersebut disebabkan oleh jenis bahan baku, suhu, dan lama karbonisasi.

Aktivasi Karbon

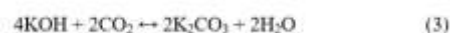
Proses selanjutnya merupakan aktivasi untuk mengubah karbon biasa menjadi karbon aktif dengan cara mengoksidasi molekul hidrokarbon di dalamnya. Proses aktivasi bertujuan untuk membuka kembali sekaligus memperluas permukaan pori-pori karbon yang sempat terhambat oleh sisa-sisa pembakaran selama proses karbonisasi sebelumnya. Dengan demikian, daya serap atau kapasitas adsorpsi dari karbon aktif tersebut akan meningkat drastis [9]. Dalam penelitian ini metode yang digunakan adalah aktivasi kimia, keunggulan dari metode aktivasi kimia adalah kemampuannya dalam menciptakan pori-pori yang lebih besar pada karbon, dengan menggunakan bantuan zat aktivator, sehingga luas permukaannya nanti menjadi jauh lebih maksimal [10].

Pada penelitian ini, proses aktivasi kimia dengan menggunakan KOH. Penggunaan KOH dipilih karena menghasilkan karbon aktif yang mengalami perubahan struktur pori serta karakteristik kimia pada permukaan karbon tersebut dapat meningkatkan performa untuk aplikasi daya tinggi [11]. Berdasarkan penelitian Junhua (2020), proses aktivasi KOH berhasil memperluas area permukaan spesifik secara signifikan [6]. Adapun mekanisme aktivasi seperti pada **Gambar 2**.



Gambar 2. Mekanisme Aktivasi

Keberadaan gugus fungsi yang memiliki banyak elektron seperti -OH dan C=O pada permukaan karbon menciptakan muatan negatif (polaritas negatif), yang membuat material ini sangat efektif [6]. Reaksi antara KOH dan karbon (C) menghasilkan gas karbon dioksida (CO₂) yang kemudian menyebar ke permukaannya. Proses ini menyebabkan terbentuknya pori-pori baru yang pada akhirnya dapat mengubah material tersebut menjadi karbon aktif. Adapun reaksi kimia yang terjadi seperti pada persamaan 1, 2, dan 3 berikut:



Proses selanjutnya adalah karbon aktif disaring dan dicuci menggunakan HCl hingga pH netral yang berfungsi untuk menghilangkan sisa ion kalium, tar, dan zat volatil. Setelah netral, bahan dikeringkan selama dua jam di dalam oven pada suhu 105°C untuk menguapkan air dan pengotor yang tersisa agar pori-porinya tidak tersumbat [12].

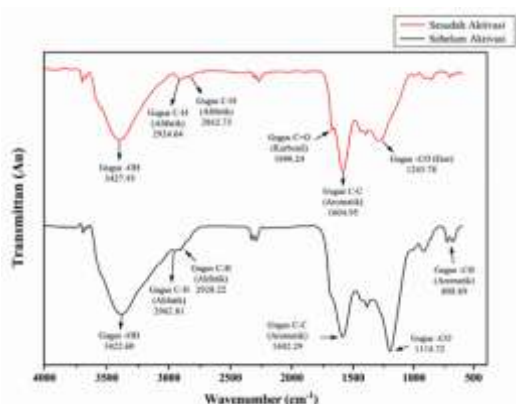
Karakterisasi Adsorben

Proses selanjutnya merupakan karakterisasi untuk mengetahui perubahan spesifik, seperti struktur dan sifat kimia, serta permukaan material pada karbon sebelum dan sesudah diaktivasi. Analisis gugus fungsi kimia dengan menggunakan *Fourier Transform Infrared* (FT-IR) dan analisis morfologi permukaannya diidentifikasi dengan menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM).

Fourier Transform Infrared (FT-IR)

Karakterisasi dengan FTIR bertujuan untuk mengidentifikasi gugus fungsi pada struktur adsorben dengan rentang bilangan gelombang 4000 cm⁻¹. Dilakukan dengan membandingkan spektrum karbon aktif batang sorgum sebelum dan sesudah diaktivasi dengan KOH, sehingga perubahan kimiawi dapat dilihat. Berdasarkan

Gambar 3 menunjukkan pergeseran dari gugus fungsi karbon sebelum dan sesudah diaktivasi, dapat dilihat pada **Tabel 2**.



Gambar 3. Spektrum FT-IR sebelum dan sesudah diaktivasi

Hasil spektrum FT-IR pada **Gambar 3** menunjukkan adanya pergeseran beberapa pita serapan yang mengindikasikan perubahan gugus fungsi pada karbon berbasis batang sorgum, sebelum dan sesudah aktivasi. Komponen lignoselulosa, seperti selulosa, hemiselulosa, dan lignin ditunjukkan oleh puncak vibrasi regangan gugus hidroksil (O-H) pada $3422,60\text{ cm}^{-1}$ yang mengalami pergeseran menjadi $3427,95\text{ cm}^{-1}$. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kemunculan gugus hidroksil (-OH) berkaitan dengan struktur lignoselulosa, sebagai komponen utama pada adsorben batang sorgum [13].

Pergeseran pita serapan gugus aromatik (C=C) dari $1602,29\text{ cm}^{-1}$ ke $1604,95\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan proses karbonisasi, yang menyebabkan dehidrasi dan dekarboksilasi, yang menghasilkan struktur aromatik yang lebih stabil. Selain vibrasi bending (C-H) aromatik pada $808,89\text{ cm}^{-1}$, reaksi KOH sebagai agen oksidasi yang membentuk gugus oksigen yang terdiri dari eter (C-O-C) dari sisa selulosa yang meningkat dari $1114,72\text{ cm}^{-1}$ hingga $1245,75\text{ cm}^{-1}$. Selain itu, munculnya puncak gugus karbonil (C=O) pada $1696,24\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan bahwa serat batang sorgum telah didegradasi secara bersamaan dengan pembentukan jaringan pori dan peningkatan luas permukaan khusus.

Aktivator KOH merupakan agen oksidasi yang bereaksi dengan biomassa batang sorgum untuk menghasilkan gugus fungsi beroksigen seperti hidroksil (-OH), eter (-C-O), dan gugus fungsional baru yaitu karbonil (C=O). Kehadiran dan kemungkinan pembentukan gugus fungsional baru ini sangat penting untuk

mengubah karakteristik dan meningkatkan kemampuan karbon aktif sebagai adsorben [6].

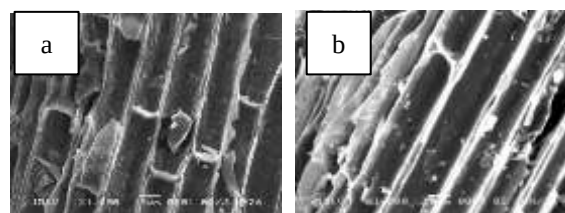
Tabel 2. Bilangan Gelombang Gugus Fungsi pada karbon sebelum dan sesudah aktivasi.

Gugus Fungsi	Bilangan Gelombang Referensi (cm^{-1})	Karbon sebelum aktivasi (cm^{-1})	Karbon setelah aktivasi (cm^{-1})
-OH (Hidroksil)	3200-3600	3422,60	3427,95
C-H (alifatik) tekukan	2850-2970	2962,81	2924,04
C=O (Karbonil)	1650-1750	-	1696,24
C=C (Aromatik) regangan	1550-1610	1602,29	1604,95
C-O (ester/eter)	1000-1300	1114,72	1245,78

Aktivator KOH merupakan agen oksidasi yang bereaksi dengan biomassa batang sorgum untuk menghasilkan gugus fungsi beroksigen seperti hidroksil (-OH), eter (-C-O), dan gugus fungsional baru yaitu karbonil (C=O). Kehadiran dan kemungkinan pembentukan gugus fungsional baru ini sangat penting untuk mengubah karakteristik dan meningkatkan kemampuan karbon aktif sebagai adsorben [6].

Scanning Electron Microscopy (SEM)

Karakterisasi SEM bertujuan untuk melihat morfologi pada permukaan adsorben batang sorgum pada perbesaran 1000 kali. Morfologi yang diamati adalah bentuk, ukuran, dan susunan partikel pada permukaan karbon aktif. Karakterisasi SEM dilakukan baik sebelum maupun setelah aktivasi, dan hasilnya dapat dilihat pada **Gambar 4**.



Gambar 4. Morfologi permukaan a) karbon sebelum aktivasi dan b) setelah aktivasi.

Proses aktivasi kimia menggunakan KOH terbukti berhasil mengubah karakteristik fisik dan morfologi permukaan karbon secara signifikan. Sebelum diaktivasi pada **Gambar 4(a)**, permukaan karbon tidak memperlihatkan keberadaan struktur pori yang jelas. Sebaliknya, setelah diaktivasi dengan KOH pada **Gambar 4(b)**, permukaan karbon berkembang membentuk struktur pori melingkar yang melimpah secara paralel pada sisi vertikalnya, serta menyimpan mesopori dalam jumlah besar di bagian dalam. Peran KOH sebagai agen aktivator terbukti krusial dalam memicu terbentuknya saluran pori yang lurus dan panjang selama preparasi. Struktur pori yang terbuka ini sangat menguntungkan karena mempermudah polutan untuk berpenetrasi ke dalam permukaan material sekaligus menyediakan situs aktif (pusat aktif) yang melimpah untuk mengikat polutan. Pada akhirnya, peningkatan jumlah situs aktif dan perluasan saluran pori tersebut secara signifikan meningkatkan efisiensi, performa, serta laju adsorpsi polutan pada material karbon aktif berbasis batang sorgum ini [7].

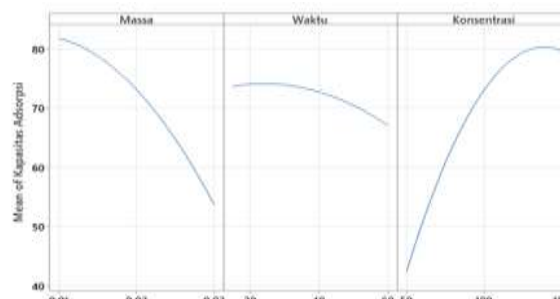
Uji Adsorpsi Ion Logam Tembaga(II)

Penentuan uji optimasi dilakukan untuk memperoleh hasil yang paling efektif dalam proses adsorpsi ion logam tembaga(II) dengan memanfaatkan tiga variabel utama, yaitu massa adsorben, waktu kontak, dan konsentrasi awal larutan. Dirancang menggunakan metode *Response Surface Methodology* (RSM) berbasis *Box-Behnken Design* (BBD) pada *software Minitab* (Versi 21.4.1). Berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI) 6989.6-2009 untuk penentuan kurva kalibrasi untuk larutan standar tembaga(II) yang diukur pada panjang gelombang 324,8 nm [14]. Pembuatan kurva standar dilakukan dengan cara memplotkan antara absorbansi larutan standar dengan konsentrasi logam tembaga(II). Berdasarkan hasil kurva kalibrasi, nilai koefisien korelasi (R^2) yang diperoleh adalah 0,9992.

Kapasitas Adsorpsi

Kapasitas Adsorpsi merupakan ukuran seberapa banyak zat (adsorben) yang dapat diadsorpsi oleh permukaan adsorben (seperti karbon aktif) per-satuan massa adsorpsi.

Kapasitas adsorpsi dinyatakan dalam satuan mg/L, yang berarti miligram zat teradsorpsi per milimeter volume larutan [15].



Gambar 5. Grafik Kapasitas Adsorpsi Variasi, a) Massa, b) Waktu Kontak, c) Konsentrasi Logam.

Berdasarkan pengamatan grafik pada **Gambar 5** menunjukkan bahwa peningkatan massa adsorben dari 0,01 menjadi 0,03 gram menyebabkan penurunan rata-rata kapasitas adsorpsi (Q_e). Penurunan ini terjadi karena penambahan massa menghasilkan situs aktif yang berlebih (belum jenuh) sementara jumlah zat terlarut tetap, sehingga kapasitas adsorpsi per satuan massa menjadi lebih kecil. Sementara itu, variasi waktu kontak tercapai di awal (rentang 15–30 menit) sebelum cenderung stabil pada menit ke-60, yang menandakan sistem telah dengan cepat mengikat situs aktif atau mencapai kondisi kesetimbangan dinamis. Dari segi konsentrasi limbah, terjadi lonjakan tajam kapasitas adsorpsi dari 50 mg/L hingga puncaknya pada 140 mg/L akibat besarnya *driving force* dari perbedaan gradien konsentrasi, yang kemudian sedikit menurun pada 150 mg/L karena situs aktif pada permukaan adsorben telah mencapai kondisi jenuh. Secara keseluruhan, penelitian ini menyimpulkan bahwa kondisi optimum dicapai pada konsentrasi tembaga(II) 150 mg/L, waktu kontak 15 menit, dan massa adsorben 0,02 gram dengan kapasitas adsorpsi sebesar 91,17 mg/g. Hal ini membuktikan bahwa aktivasi kimia KOH pada batang sorgum sukses meningkatkan luas permukaan, pembentukan pori, dan jumlah situs aktif yang secara signifikan memperkuat kemampuan adsorpsi ion logam tembaga(II) [16].

Pengujian optimasi adsorpsi ion logam tembaga(II) dilakukan menggunakan *Box-Behnken Design* yang dievaluasi melalui analisis varians (ANOVA) berdasarkan data pada **Tabel 3**, keberhasilan statistik ditentukan oleh nilai *probability* ($P < 0,05$). Hasil analisis menunjukkan bahwa variabel independen massa adsorben adalah ($P = 0,005$) dan konsentrasi logam tembaga(II)

adalah ($P=0,03$) memiliki nilai $P<0,05$, yang membuktikan bahwa kedua faktor tersebut berpengaruh secara signifikan terhadap variabel respon, yaitu kapasitas adsorpsi [17]. Sebaliknya, variabel waktu kontak memperoleh nilai ($P=0,449$) yaitu ($P>0,05$), sehingga disimpulkan tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kapasitas adsorpsi pada model ini.

Tabel 3. Hasil Uji ANOVA Kapasitas Adsorpsi

Source	DF	Jumlah Kuadran	Rerata Kuadran	Nilai F	Nilai P
Model	9	4945,43	549,49	9,14	0,013
Linear	3	2966,11	988,70	16,44	0,005
Massa	1	674,68	674,68	11,22	0,020
Waktu	1	40,62	40,62	0,68	0,449
Konsentrasi	1	1847,45	1847,45	30,72	0,003
Kuadrat	3	759,14	759,14	4,21	0,078
Massa*Massa	1	64,00	64,00	1,06	0,350
Waktu*Waktu	1	16,95	16,95	0,28	0,618
Konsentrasi*	1	423,49	423,49	7,04	0,045
Konsentrasi					
Interaksi	3	140,31	140,31	0,78	0,555
Massa*Waktu	1	20,37	20,37	0,34	0,586
Massa*	1	118,65	118,65	1,97	0,219
Konsentrasi					
Waktu*	1	17,52	17,52	0,29	0,613
Konsentrasi					

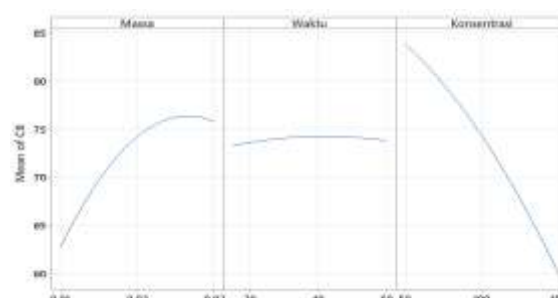
Berdasarkan **Gambar 6** menunjukkan kondisi optimum hasil pengolahan *Response Surface Methodology* (RSM) berbasis *Box-Behnken Design* (BBD) untuk kapasitas adsorpsi dengan target yang ingin dicapai adalah 100%, tetapi secara statistik nilai target yang diperoleh sebesar 91,5171% dengan massa adsorben sebesar 0,01 g, waktu kontak selama 15 menit, dan konsentrasi ion logam tembaga(II) sebesar 140 mg/L. Hal tersebut menunjukkan bahwa kombinasi variabelnya berbeda, tetapi bukan berarti modelnya salah, justru menunjukkan model cukup akurat di area tersebut. Nilai d yang tidak mencapai 1,0 menunjukkan model tidak bisa mencapai target secara sempurna dalam rentang faktor yang diuji. Ini konsisten dengan banyak studi RSM adsorpsi lain (nilai d biasanya berkisar 0,9–0,99, bukan selalu 1,0).



Gambar 6. Plot Optimasi Hasil RSM BBD untuk Kapasitas Adsorpsi.

Efisiensi Adsorpsi

Efisiensi adsorpsi merupakan persentase adsorbat yang berhasil terikat pada permukaan adsorben. Efisiensi tidak bergantung pada massa adsorben, hanya bergantung pada konsentrasi awal dan akhir.



Gambar 7. Grafik Efisiensi Adsorpsi a) Massa b) Waktu Kontak (c) Konsentrasi Limbah

Berdasarkan pengamatan **Gambar 7**, efisiensi adsorpsi meningkat seiring penambahan massa adsorben hingga mencapai puncaknya pada kisaran (0,025–0,027) gram, sebelum akhirnya menurun akibat aglomerasi partikel. Sementara itu, variabel waktu kontak menunjukkan grafik yang cenderung landai dan stabil di kisaran 73%–74%, yang menandakan proses adsorpsi berlangsung sangat cepat serta telah mencapai kesetimbangan sejak menit ke-15. Sedangkan pada konsentrasi ion awal menjadi variabel yang paling berpengaruh, sehingga efisiensi tertinggi tercapai pada konsentrasi rendah (50 mg/L dengan rata-rata 80%) dan menurun drastis pada konsentrasi 150 mg/L karena terbatasnya situs aktif yang tersedia. Secara keseluruhan, kondisi optimum dicapai pada konsentrasi 50 mg/L, waktu kontak 15 menit, dan massa adsorben 0,02 gram dengan efisiensi adsorpsi puncak sebesar 84,14%, yang membuktikan efektivitas aktivasi KOH pada batang sorgum dalam mengikat ion tembaga(II) [15].

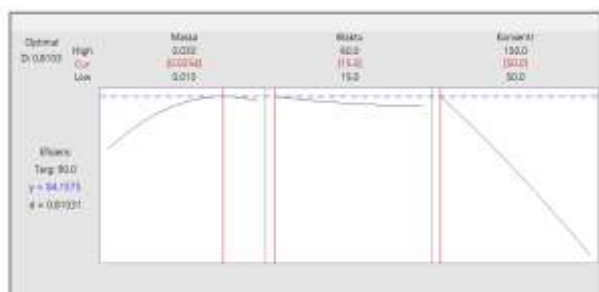
Hasil uji ANOVA berdasarkan **Tabel 4**, menunjukkan bahwa variabel independen massa

adsorben dan konsentrasi logam tembaga(II) berpengaruh signifikan terhadap respons efisiensi adsorpsi karena memiliki nilai $P < 0,05$. Hasil signifikan juga ditunjukkan oleh variabel interaksi kuadrat massa*massa ($P=0,022$) dan konsentrasi*konsentrasi ($P=0,041$). Sedangkan, variabel waktu kontak terbukti tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap respons efisiensi adsorpsi maupun kapasitas adsorpsi karena memiliki nilai $P=0,783$.

Tabel 4. Hasil Uji ANOVA Efisiensi Adsorpsi

Source	DF	Jumlah Kuadran	Rerata Kuadran	Nilai F	Nilai P
Model	9	733,448	81,494	38,61	0,000
Linear	3	422,069	140,690	66,65	0,000
Massa	1	37,125	37,125	17,59	0,009
Waktu	1	0,178	0,178	0,08	0,783
Konsentrasi	1	275,515	275,515	130,52	0,000
Kuadrat	3	43,901	14,634	6,93	0,031
Massa*Massa	1	22,893	22,893	10,84	0,022
Waktu*Waktu	1	0,798	0,798	0,38	0,566
Konsentrasi*	1	15,854	15,854	7,51	0,041
Konsentrasi					
Interaksi	3	17,363	5,788	2,74	0,153
Massa*Waktu	1	0,008	0,008	0,00	0,953
Massa*	1	12,673	12,673	6,00	0,058
Konsentrasi					
Waktu*	1	2,939	2,939	1,39	0,291
Konsentrasi					

Berdasarkan **Gambar 8** hasil optimum dari pengolahan *Response Surface Methodology* (RSM) berbasis *Box-Behnken Design* (BBD) untuk efisiensi adsorpsi target yang dicapai adalah 100%, namun secara statistik target yang diperoleh adalah 84,1575 % dengan massa adsorben 0,0254 g, waktu kontak 15 menit, dan konsentrasi ion logam tembaga(II) sebesar 50 mg/L.



Gambar 8. Plot Optimasi Hasil RSM BBD untuk Efisiensi Adsorpsi.

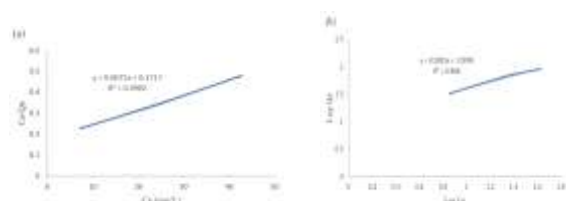
Metode Isoterm Adsorpsi

Berdasarkan hasil pengujian adsorpsi ion logam tembaga(II), proses adsorpsi dievaluasi dengan pendekatan isoterm adsorpsi. Pendekatan dengan isoterm adsorpsi untuk memahami laju kesetimbangan dan jenis perilaku adsorpsi terhadap adsorben karbon yang sudah diaktivasi dengan KOH. Selain itu, isoterm adsorpsi juga penting untuk mengkarakterisasi proses adsorpsi dan memeriksa interaksi ion logam pada permukaan adsorben [18]. Isoterm *Langmuir* dan *Freundlich* adalah dua model isoterm adsorpsi yang menentukan kesetimbangan antara adsorpsi dan desorpsi. Model isoterm dengan nilai R^2 yang paling mendekati 1, dipilih untuk menilai kesesuaian setiap model. Pada **Tabel 5** menunjukkan perbandingan nilai R^2 dalam menentukan model isoterm manakah yang paling sesuai.

Tabel 5. Konstanta Model Isoterm Adsorpsi Ion Logam Tembaga(II)

Isoterm Adsorpsi	Parameter	Keterangan
Langmuir	a	140,8450
	K_L	0,41351
	R^2	0,9992
Freundlich	K	10,2306
	K_F	1,6975
	R^2	0,9880

Hasil pemodelan isoterm adsorpsi ditunjukkan pada **Gambar 9**. Hubungan linear yang baik pada grafik isoterm *Langmuir* dan *Freundlich* menunjukkan bahwa kedua model dapat menggambarkan proses adsorpsi ion tembaga(II). Hal tersebut menunjukkan bahwa model isoterm *Langmuir* memiliki nilai R^2 sebesar 0,9992, sedangkan model *Freundlich* memperoleh nilai R^2 sebesar 0,9880. Sehingga, model isoterm *Langmuir* disimpulkan lebih cocok dan tepat dalam menggambarkan proses adsorpsi ion logam tembaga(II) pada penelitian ini. Model permukaan adsorben hanya memiliki satu lapisan (*monolayer*) dan memiliki energi yang seragam tanpa interaksi antarmolekul yang terikat. Hal ini menunjukkan bahwa proses adsorpsi berjalan dengan baik dan bahwa karbon aktif batang sorgum yang teraktivasi dengan KOH dapat mengadsorpsi ion tembaga(II) dengan sangat baik [19].



Gambar 9. Isoterm Adosrpsi (a) *Langmuir* (b) *Freundlich*

Parameter konstanta *Langmuir* (K_L) digunakan untuk menentukan kondisi adsorpsi, di mana nilai $0 < K_L < 1$ menunjukkan proses yang menguntungkan. Nilai K_L sebesar 0,41351 menunjukkan proses adsorpsi yang menguntungkan dalam penelitian ini. Dengan demikian, karbon aktif batang sorgum yang teraktivasi dengan KOH dapat digunakan sebagai adsorben yang ideal untuk ion logam tembaga(II). Berdasarkan **Tabel 5** dan **Gambar 9** menunjukkan bahwa regresi linear isoterm *Freundlich* untuk adsorpsi fisik terjadi melalui interaksi *Van der Waals* setelah ion logam terikat pada permukaan adsorben. Menurut analisis FT-IR, pergeseran gelombang gugus -OH (menjadi $3427,95 \text{ cm}^{-1}$) dan C-O (menjadi $1245,78 \text{ cm}^{-1}$) pada situs aktif mendukung interaksi *elektrostatik* lemah ini. Ini mengikat ion logam dengan baik sekaligus mencegah proses desorpsi [20].

SIMPULAN

Sintesis dan karakterisasi adsorben berbasis batang sorgum yang diaktivasi menggunakan KOH 1M mengalami perubahan signifikan pada struktur kimia maupun fisiknya. Analisis FT-IR mengkonfirmasi kemunculan gugus karbonil (C=O) baru pada bilangan gelombang $1696,24 \text{ cm}^{-1}$ sebagai penanda terbentuknya banyak struktur pori, sementara analisis SEM memperlihatkan perubahan morfologi permukaan karbon yang ditandai dengan terbentuknya pori-pori yang jelas. Berdasarkan optimasi *Box-Behnken Design*, kondisi terbaik untuk menyerap ion logam tembaga(II) dicapai pada massa adsorben 0,02g dan waktu kontak 15 menit. Pada variasi ini, kapasitas adsorpsi tertinggi menghasilkan rata-rata penyerapan sebesar 91,17 mg/g pada konsentrasi limbah 150 ppm, sedangkan efisiensi adsorpsi optimum mencapai 84,14% pada konsentrasi limbah 50 ppm. Berdasarkan penentuan isotherm adsorpsi, model isotherm *Langmuir* menunjukkan kecocokan yang ditandai dengan nilai koefisien determinasi R^2 sebesar 0,9992. Hasil ini

mengindikasikan bahwa mekanisme adsorpsi berlangsung secara *monolayer* (satu lapisan tunggal) pada permukaan adsorben yang bersifat homogen.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih kepada Ibu Rizka Fitriyani S., S.Pd., M.Si. dan Ibu Dr. Nunung Kurniasih, S.Pd., M.Si. yang telah memberikan bimbingan, kritik, saran, dan inspirasi, serta selalu meluangkan waktunya untuk mendukung penelitian, penyusunan, serta penulisan artikel ini.

REFERENSI

- [1] C. Xiong, S. Wang, W. Sun, and Y. Li, "Selective adsorption of Pb(II) from aqueous solution using nanosilica functionalized with diethanolamine: Equilibrium, kinetic and thermodynamic," *Microchemical Journal*, vol. 146, pp. 270–278. 2019.
- [2] R. N. Raja Sulaiman, N. Othman, N. F. Mohamed Noah, and N. Jusoh, "Removal of nickel from industrial effluent using a synergistic mixtures of acidic and solvating carriers in palm oil-based diluent via supported liquid membrane process," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 137, pp. 360–375. Sep. 2018.
- [3] Y.K. J. Shah, W. Sun, and H. Zheng, "Performance evaluation of chitosan-based flocculants with good pH resistance and high heavy metals removal capacity," *Sep. Purif. Technol.*, pp. 208–216. 2019.
- [4] Murtini, S. M. . *Sorgum dan Pemanfaatannya dalam Industri Pangan*. Malang: UB Press, 2021.
- [5] S. Amelia, F. Dewi, and D. R. Anjarwati, "Adsorpsi Besi (Fe) menggunakan Biosorben dari Kulit Pisang Kepok (Musa Acuminata Balbisiana Colla) dan Kulit Pisang Ambon (Musa Paradisiaca)," *Journal of Chemical Process Engineering*, vol. 8, no. 2, pp. 129–139. 2023.
- [6] Hou, J. Liu, Y. Wen, S. Li, W. Liao, R. Wang, L. "Sorgum-Waste-Derived High Surface Area KOH-Activated Porous Carbon for Highly Efficient Methylene Blue and Pb(II) Removal," *ACS Omega*, vol. 5, no. 23, pp. 13548–13556, Jun. 2020



- [7] R. Alfi, F. Lubis, H. I. Nasution, and M. Zubir, "Production of Activated Carbon from Natural Sources for Water Purification," *ijcst-unimed*, Vol. 03, No. 2, pp; 67 73. 2020.
- [8] I. Fadlilah, N. A. Triwuri, and A. Pramita, "Perbandingan Karbon Aktif-Tempurung Nipah dan Karbon Aktif-Kulit Pisang Kepok Teraktivasi Kalium Hidroksida Comparison of Nipah Shell Activated Carbon and Kepok Banana Peel Activated Carbon by Potassium Hydroxide," *CHEESA*, vol. 5, no. 1. 2022.
- [9] G. Lota, T. A. Centeno, E. Frackowiak, and F. Stoeckli, "Improvement of the structural and chemical properties of a commercial activated carbon for its application in electrochemical capacitors," *Electrochim. Acta*, vol. 53, no. 5, pp. 2210–2216. 2008.
- [10] Y. Wahyu Hidayat and M. A. Agung Sarifudin Rifai, "karbon aktif dari limbah daun jati menggunakan aktivator larutan koh," *Jurnal Teknik Kimia*. Vol. 16, No. 2. 2022.
- [11] I. Arraziy. Juanto, R. Dewati, and S. Sani, "sintesis karbon aktif dari short flaming coal lokal indonesia dengan aktivator KOH sebagai adsorben," *Jurnal Integrasi Proses*. Vol. 13, No. 2, pp: 86 – 91, 2024.
- [12] M. Stefanus Batu, R. Teti, and M. M. Kolo, "synthesis of activated carbon from stalks waste of sorgum (sorgum bicolor (l.) moench) as a rhodamine b adsorbent with varying naoh activator concentrations," vol. 15, no. 2, pp: 59-67. 2025.
- [13] M. A. Tahoona, S. M. Siddeeg, N. S. Alsaiani, W. Mnif, and F. Ben Rebah, "Effective heavy metals removal from water using nanomaterials: A review, 645. Juni 2020,
- [14] Azzahra, S. Hartati, E. "Perancangan .desain eksperimen menggunakan metode response surface methodology" *Seminar Nasional dan Diseminasi*. 2024
- [15] J. Jia, C. Lu, J. Han, W. Wang, K. Zhang, and Z. Ren, "KOH activation of carbon electrodes for enhanced capacitive dechlorination: Performance and mechanisms," *PLoS One*, vol. 21, no. 5 May. 2026.
- [16] L. A. Indriyani, Z. Arif, R. Linda, H. Purwaningsih, and M. Rafi, "Optimization of Cd(II) adsorption condition by glycine-modified silica-based adsorbent using central composite design," *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*, vol. 22, no. 5, pp. 184–191. 2019.
- [17] Fauziah, N. Fathurrahman, M. Linda, J. Heliawati, L. "Pemanfaatan Sekam Padi Menjadi Karbon Aktif Teraktivasi NaCl Sebagai Adsorben Untuk Menyerap Logam Cr(VI)", *Journal of Chemistry*, Vol 12: No.2. pp: 44-52. 2024.
- [18] E. Puspita Anggraeni, F. Khoirunnisa, and A. Aktawan, "Penjerapan Logam Cu dan Cd pada Limbah Cair Batik Menggunakan Adsorben dari Limbah Tulang Ayam Adsorption of Cu and Cd Metals in Batik Liquid Waste Using Adsorbents from Chicken Bone Waste," *jurnal kimia dan rekayasa* vol. 4, no. 1. 2023.
- [19] E. Puspita Anggraeni, F. Khoirunnisa, and A. Aktawan, "Penjerapan Logam Cu dan Cd pada Limbah Cair Batik Menggunakan Adsorben dari Limbah Tulang Ayam Adsorption of Cu and Cd Metals in Batik Liquid Waste Using Adsorbents from Chicken Bone Waste," *jurnal kimia dan rekayasa* vol. 4, no. 1. 2023.
- [20] H. Sharififard, "Advances in Environmental Technology Statistical physics modeling of equilibrium adsorption of cadmium ions onto activated carbon, chitosan and chitosan/activated carbon composite," *Advances in Environmental Technology*, vol. 2, pp. 149–154. 2018.