

PEMODELAN *BOX-BEHNKEN* DESAIN PADA ADSORPSI LOGAM TEMBAGA(II) MENGGUNAKAN KARBON AKTIF BIJI SALAK (*Salacca zalacca*)

DESSY TRI WULANDARI¹, RIZKA FITRIYANI S^{1*}, DAN ADI MULYANA SUPRIATNA¹

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: adsorpsi; biji salak; box-behnken; isotherm; karbon aktif; logam tembaga.	Adsorpsi merupakan metode yang efektif dan efisien dalam mengatasi logam berat tembaga(II) yang ada di perairan. Biji salak berpotensi sebagai adsorben karena memiliki kandungan selulosa yang dapat disintesis menjadi karbon aktif. Penelitian ini dilakukan untuk menentukan karakteristik dan kemampuan adsorpsi karbon aktif biji salak menggunakan aktivator natrium karbonat serta menentukan kondisi optimum adsorpsi ion logam tembaga(II). Karbon aktif disintesis melalui tahap karbonisasi dan aktivasi kimia, kemudian dianalisis menggunakan FTIR dan SEM. Hasil karakterisasi FTIR mengidentifikasi adanya gugus fungsi seperti -OH, C=O, C-H, dan C-O. Karakterisasi SEM menunjukkan perubahan morfologi menjadi lebih kasar dan berongga dengan struktur yang tidak beraturan. Optimasi dilakukan menggunakan model rancangan <i>Box-Behnken Desain</i> terhadap 3 variabel bebas yaitu massa adsorben, waktu kontak, dan konsentrasi awal ion logam tembaga(II). Berdasarkan <i>Box-Behnken Desain</i> , kondisi optimum adsorpsi diperoleh pada massa adsorben 0,2 g, waktu kontak 60 menit, dan konsentrasi awal 140 mg/L dengan nilai kapasitas sebesar 6,51 mg/g. Efisiensi adsorpsi diperoleh pada massa adsorben 0,6 g, waktu kontak 120 menit, dan konsentrasi awal 100 mg/L dengan efisiensi sebesar 94,10%. Data mengikuti model isotherm Langmuir yang menunjukkan bahwa adsorpsi berlangsung pada lapisan tunggal (<i>monolayer</i>) dengan situs permukaan yang homogen. Hasil ini menunjukkan bahwa karbon aktif biji salak dapat digunakan sebagai adsorben efektif untuk remediasi logam tembaga(II).
Keywords: activated carbon; adsorption; box-behnken; copper ions; isotherm; salak seeds	<i>Adsorption is an effective and efficient method for removing copper(II) from water. Salak seeds have potential as an adsorbent because they contain cellulose that can be synthesized into activated carbon. This study was conducted to determine the characteristics and adsorption capacity of salak seed-derived activated carbon using sodium carbonate as an activator, as well as to determine the optimal conditions for the adsorption of copper(II) ions. The activated carbon was synthesized through carbonization and chemical activation, then analyzed using FTIR and SEM. The FTIR characterization results identified the presence of functional groups such</i>

as $-OH$, $C=O$, $C-H$, and $C-O$. SEM characterization revealed a change in morphology toward a rougher and more porous structure with an irregular shape. Optimization was performed using a Box-Behnken design model for three independent variables: adsorbent mass, contact time, and initial concentration of copper(II) ions. Based on the Box-Behnken design, the optimal adsorption conditions were obtained at an adsorbent mass of 0.2 g, a contact time of 60 minutes, and an initial concentration of 140 mg/L, with a capacity value of 6.51 mg/g. The highest adsorption efficiency was achieved at an adsorbent mass of 0.6 g, a contact time of 120 minutes, and an initial concentration of 100 mg/L, with an efficiency of 94.10%. The data followed the Langmuir isotherm model, indicating that adsorption occurred in a monolayer with homogeneous surface sites. These results indicate that activated charcoal derived from salak seeds can be used as an effective adsorbent for the remediation of copper(II).

PENDAHULUAN

Salak (*Salacca zalacca*) merupakan buah tropis yang banyak dikonsumsi di Indonesia. Produksi salak di Indonesia pada tahun 2025 mencapai 1.263.412 ton [1]. Tingginya produksi ini turut meningkatkan jumlah limbah biji salak yang dihasilkan, baik dari rumah tangga maupun industri pengolahan pangan. Apabila tidak dikelola dengan baik, limbah biji salak dapat menimbulkan pencemaran dan menurunkan kualitas lingkungan [2].

Biji salak selama ini dianggap limbah yang tidak memiliki nilai guna, padahal mengandung selulosa sebesar 39,67% yang berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan baku karbon aktif [3]. Karbon aktif merupakan adsorben yang banyak digunakan karena memiliki luas permukaan dan porositas tinggi [4]. Pemanfaatan karbon aktif dari limbah biomassa seperti biji salak dinilai lebih ramah lingkungan dan berbiaya rendah, serta berpotensi digunakan untuk mengadsorpsi logam berat di perairan [5].

Tembaga merupakan salah satu logam berat yang berpotensi mencemari perairan. Meskipun dibutuhkan tubuh dalam jumlah kecil, tembaga bersifat toksik apabila terakumulasi dalam jangka panjang dan dapat menyebabkan gangguan pencernaan, kerusakan ginjal, serta anemia. Kadar maksimum tembaga dalam air ditetapkan sebesar 0,02 mg/L menurut PP Nomor 22 Tahun 2021 [6]. Tembaga juga termasuk polutan *non-degradable* yang sulit diuraikan secara alami [7]. Penelitian di Sungai Sebanan, Kabupaten Tanah Bumbu, melaporkan kadar Cu pada air sungai mencapai 5,25–16,07 mg/L akibat aktivitas pertambangan batu

bara, jauh melampaui baku mutu yang ditetapkan [8].

Beberapa penelitian telah memanfaatkan adsorben dari limbah biomassa untuk mengatasi pencemaran logam berat. Penelitian oleh Theeradit dan Kanyarak (2022) melaporkan karbon aktif biji salak teraktivasi H_3PO_4 memiliki kapasitas adsorpsi Cr(VI) sebesar 7,94 mg/g [9]. Berdasarkan uraian tersebut, penelitian mengenai karbon aktif biji salak teraktivasi Na_2CO_3 sebagai adsorben Cu(II) perlu dilakukan. Na_2CO_3 dipilih sebagai aktivator karena mampu membentuk pori melalui proses aktivasi kimia sehingga dapat meningkatkan kemampuan adsorpsi. Optimasi kondisi adsorpsi dilakukan menggunakan rancangan *Box-Behnken Desain* (BBD). Metode ini digunakan untuk menganalisis hubungan antara variabel bebas dan variabel respons serta menentukan kondisi optimum suatu proses. Metode BBD dipilih karena mampu memodelkan variabel bebas dengan jumlah percobaan yang lebih sedikit dan efisien [10]. Karakterisasi karbon aktif dilakukan menggunakan FTIR dan SEM, dilanjutkan dengan penentuan kondisi optimum massa adsorben, waktu kontak, dan konsentrasi awal, serta penentuan model isotherm adsorpsi yang sesuai.

EKSPERIMEN

Material

Biji salak pondoh, padatan Na_2CO_3 (p.a), larutan HCl (teknis), larutan induk $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ (p.a emsure), aquadm, dan aquades.

Instrumentasi

Karakterisasi karbon aktif menggunakan instrumen FTIR (*Bruker Alpha*) dan SEM (JEOL JSM-6510). Optimasi karbon aktif terhadap ion logam tembaga(II) menggunakan instrumen AAS (Agilent 240FS AA).

Prosedur

Sintesis dan Aktivasi Karbon Aktif

Biji salak dibersihkan dengan air, kemudian dipotong menjadi beberapa bagian kecil. Setelah itu, biji salak dikarbonisasi menggunakan furnace pada suhu 300°C selama 1 jam. Karbon yang terbentuk kemudian ditumbuk dengan mortal alu, lalu diayak menggunakan ayakan 100 mesh [11]. Karbon kemudian diaktivasi menggunakan larutan Na_2CO_3 10%, diaduk dan didiamkan selama 24 jam [12]. Karbon aktif selanjutnya disaring dan dicuci menggunakan larutan HCl 0,1 M dan aquades hingga pH netral, kemudian dikeringkan menggunakan oven pada suhu 110°C selama 3 jam.

Optimasi Adsorpsi Menggunakan Box-Behnken Desain (BBD)

Optimasi adsorpsi dilakukan menggunakan rancangan *Box-Behnken Desain* (BBD) terhadap tiga variabel bebas, yaitu massa (g), waktu kontak (menit), dan konsentrasi awal (mg/L). Kombinasi ketiga variabel tersebut menghasilkan 15 run percobaan yang terdiri dari 12 kombinasi percobaan dan 3 titik pusat, seperti pada **Tabel 1**.

Masing-masing karbon aktif ditambahkan sebanyak 25 ml limbah artifisial $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ dengan berbagai variasi massa adsorben, waktu kontak, dan konsentrasi awal berdasarkan pada **Tabel 1**.

Setelah proses adsorpsi selesai, saring campuran menggunakan kertas saring *Whatman* No. 42. Filtrat yang diperoleh dilakukan analisis menggunakan instrumen AAS pada panjang gelombang 324,8 nm untuk mengetahui konsentrasi ion logam tembaga(II).

Tabel 1. Optimasi adsorpsi berdasarkan rancangan *Box-Behnken Desain*

Run	Massa (gram)	Waktu Kontak (menit)	Konsentrasi Awal (mg/L)
1	0,2	60	120
2	0,2	90	140
3	0,2	90	100
4	0,2	120	120
5	0,4	60	100
6	0,4	60	140
7	0,4	90	120
8	0,4	90	120
9	0,4	90	120
10	0,4	120	100
11	0,4	120	140
12	0,6	60	120
13	0,6	90	100
14	0,6	90	140
15	0,6	120	120

Analisis Data

Efisiensi adsorpsi ion logam tembaga pada adsorben dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$Efisiensi = \frac{(C_o - C_e)}{C_o} \times 100\%$$

Keterangan:

C_o = konsentrasi awal (mg/L)

C_t = konsentrasi akhir (mg/L)

Kapasitas adsorpsi dari ion logam tembaga yang teradsorpsi dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$Q_e = \frac{(C_o - C_e)}{m} \times V$$

Keterangan:

Q_e = kapasitas adsorpsi (mg/g)

C_o = konsentrasi awal (mg/L)

C_t = konsentrasi akhir (mg/L)

m = massa adsorben (g)

V = volume larutan (L)

Penentuan Model Isoterm Adsorpsi

Data yang diperoleh dari kapasitas adsorpsi ion logam tembaga pada variasi konsentrasi awal (100; 120; 140 mg/L) digunakan untuk menentukan model isoterm adsorpsi yaitu isoterm Langmuir dan Freundlich.

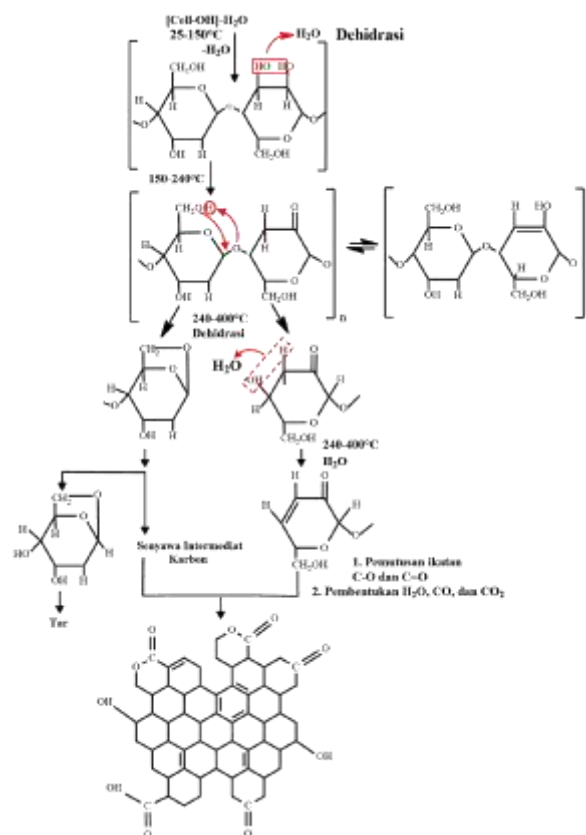
HASIL DAN PEMBAHASAN

Sintesis dan Aktivasi Karbon Aktif

Biji salak dibersihkan dan dipotong menjadi bagian kecil untuk memudahkan proses karbonisasi, kemudian dikeringkan di bawah sinar matahari selama 4 hari dan dilanjutkan dengan pengeringan oven untuk menghilangkan sisa kadar air dan pengotor pada permukaan biji salak. Biji salak selanjutnya dikarbonisasi menggunakan *furnace* pada suhu 300°C selama 1 jam. Suhu ini dipilih karena pada rentang tersebut hemiselulosa dan selulosa mulai terdekomposisi membentuk struktur karbon berpori yang dapat digunakan sebagai situs aktif adsorpsi. Suhu yang terlalu rendah dapat menghambat pembentukan pori, sedangkan suhu terlalu tinggi dapat mengurangi gugus fungsi aktif pada permukaan karbon. Penggunaan waktu karbonisasi 1 jam bertujuan agar dekomposisi termal berlangsung secara merata pada seluruh bagian biji salak [11].

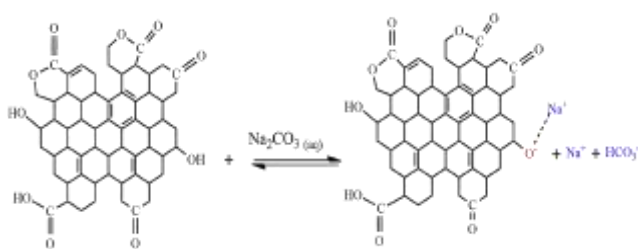
Tahap karbonisasi dilakukan melalui proses pemanasan tanpa adanya oksigen untuk mengubah bahan organik menjadi arang. Selama proses karbonisasi, komponen lignoselulosa (hemiselulosa, selulosa, dan lignin) mengalami penguraian melalui mekanisme pirolisis, masing-masing pada rentang suhu 200–300°C, 300–400°C, dan 250–500°C. Pada suhu 240–400°C, selulosa mengalami pemutusan ikatan C–O dan C=O membentuk senyawa *levoglucosan*, yang selanjutnya terurai menjadi tar dan gas seperti H₂O, CO, dan CO₂ [13]. Penguraian ini menghasilkan karbon padat berpori, dengan hemiselulosa berperan sebagai pembentukan mikropori, selulosa berperan sebagai penyusun kerangka karbon, dan lignin berperan dalam menjaga kestabilan struktur karbon. Selama proses ini, kadar air, senyawa volatil, dan mineral pengotor akan berkurang sehingga kandungan karbon meningkat dan ditandai dengan perubahan warna karbon menjadi hitam [14]. Mekanisme

pembentukan karbon selama proses karbonisasi disajikan pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Mekanisme Pembentukan Karbon [15]

Tahap selanjutnya aktivasi kimia menggunakan aktivator garam basa yaitu natrium karbonat (Na₂CO₃). Aktivasi dilakukan dengan merendam karbon dalam larutan Na₂CO₃ 10% (b/v) selama 24 jam. Hal ini agar ion karbonat (CO₃²⁻) dan ion natrium (Na⁺) dapat berdifusi secara merata dalam pori-pori karbon serta membersihkan sisa tar dan senyawa organik yang menempel setelah karbonisasi. Secara kimia, interaksi ini berlangsung melalui reaksi asam-basa. Natrium karbonat (Na₂CO₃) terhidrolisis dalam air menghasilkan ion CO₃²⁻ yang berinteraksi dengan gugus hidroksil (–OH) pada permukaan karbon. Interaksi tersebut menyebabkan gugus hidroksil mengalami deprotonasi yaitu ion CO₃²⁻ menerima proton (H⁺) dari gugus –OH untuk membentuk ion bikarbonat (HCO₃⁻) sedangkan ion Na⁺ berperan sebagai ion pendamping (*counter ion*) yang berasosiasi secara elektrostatis dengan gugus alkoksida (R–O⁻) membentuk ikatan ionik (R–O⁻...Na⁺). Mekanisme aktivasi oleh Na₂CO₃ dapat dilihat pada **Gambar 2**.



Gambar 2. Mekanisme Aktivasi dengan Na_2CO_3

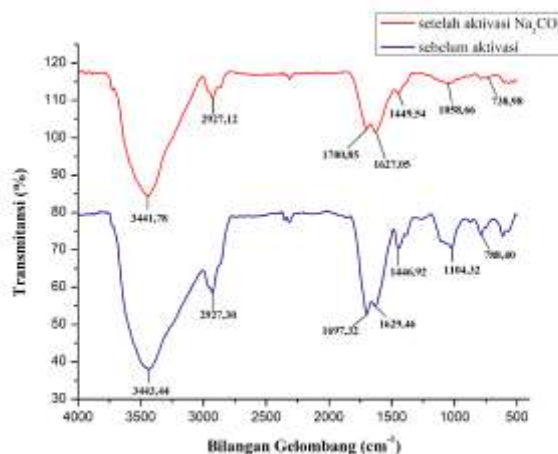
Karakterisasi Karbon Aktif

Karakterisasi FTIR

Karakterisasi FTIR dilakukan untuk mengidentifikasi keberadaan gugus fungsi yang terdapat pada karbon biji salak sebelum dan setelah aktivasi. Pergeseran pita serapan gugus -OH dari $3443,43$ menjadi $3441,78 \text{ cm}^{-1}$ menunjukkan adanya vibrasi ulur dari gugus hidroksil yang bersifat polar. Gugus hidroksil berasal dari reaksi antara uap air dengan senyawa bebas pada permukaan karbon aktif [16]. Pergeseran ini diduga terjadi karena sebagian gugus -OH mengalami deprotonasi akibat interaksi dengan ion karbonat (CO_3^{2-}) dengan membentuk gugus alkoksida (-O^-) yang berasosiasi dengan Na^+ , sehingga mengubah ikatan pada gugus -OH . Pita serapan $2927,30$ dan $2927,12 \text{ cm}^{-1}$ menunjukkan vibrasi regangan C-H dari rantai alifatik selulosa dan hemiselulosa yang belum terkarbonisasi sempurna [17].

Pita serapan gugus C=O pada $1697,32$ dan $1700,85 \text{ cm}^{-1}$ menandakan terbentuknya struktur karbon selama karbonisasi dan aktivasi. Gugus karbonil umumnya berasal dari aldehid, keton, asam karboksilat, atau ester [18]. Pergeseran ke bilangan gelombang yang lebih tinggi mengindikasikan adanya penguatan ikatan C=O setelah aktivasi, hal ini diduga akibat berkurangnya ikatan hidrogen antara gugus C=O dengan gugus -OH , seiring terbentuknya gugus alkoksida (-O^-) pada sebagian gugus hidroksil. Serapan pada panjang gelombang $1629,46$ dan $1627,05 \text{ cm}^{-1}$ menunjukkan cincin aromatik yang berasal dari lignin. Selama karbonisasi dan aktivasi membentuk gugus C=C aromatik sebagai struktur penyusun heksagonal karbon [19]. Pita serapan $1446,92 \text{ cm}^{-1}$, yang menunjukkan vibrasi tekukan (*scissoring*) C-H dari gugus metilen maupun metil, bergeser menjadi $1449,54 \text{ cm}^{-1}$ setelah aktivasi, menandakan proses

aktivasi memengaruhi karakteristik ikatan C-H tanpa membentuk gugus fungsi baru. Spektrum karbon biji salak sebelum dan setelah aktivasi dapat disajikan pada **Gambar 3**.

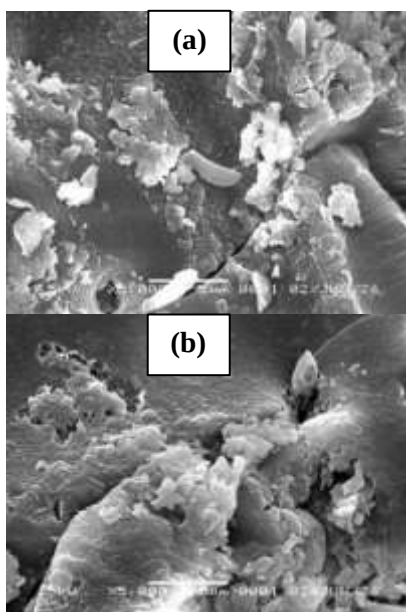


Gambar 3. Spektrum FTIR Karbon Biji Salak Sebelum dan Setelah Aktivasi Na_2CO_3

Pergeseran terbesar terjadi pada gugus C-O , dari $1104,32$ menjadi $1058,66 \text{ cm}^{-1}$. Hal ini disebabkan oleh deprotonasi gugus -OH oleh CO_3^{2-} yang membentuk -O^- dan berasosiasi dengan Na^+ , sehingga memengaruhi distribusi elektron pada atom O dan ikatan C-O serta menggeser frekuensi vibrasinya. Gugus beroksigen yang bersifat polar ini turut meningkatkan interaksi antara adsorben dan zat teradsorpsi. Sementara itu, puncak $788,40 \text{ cm}^{-1}$ menurun menjadi $738,98 \text{ cm}^{-1}$, menunjukkan vibrasi tekukan di luar bidang dari gugus C-H aromatik. Hal ini mengindikasikan terbentuknya struktur karbon aromatik yang meningkatkan kestabilan karbon aktif serta memperluas permukaan untuk adsorpsi fisik melalui gaya *van der Waals* [20]. Berdasarkan hasil karakterisasi FTIR pada **Gambar 3**, karbon aktif biji salak sebelum dan setelah aktivasi menunjukkan keberadaan gugus fungsi -OH , C-H , C=O , dan C-O , sehingga karbon aktif yang dihasilkan dapat digunakan sebagai adsorben logam tembaga.

Karakterisasi SEM

Karakterisasi SEM dilakukan untuk mengamati perubahan morfologi permukaan karbon sebelum dan setelah aktivasi yang dihasilkan dengan perbesaran 5000x. Struktur permukaan morfologi SEM dapat dilihat pada **Gambar 4**.

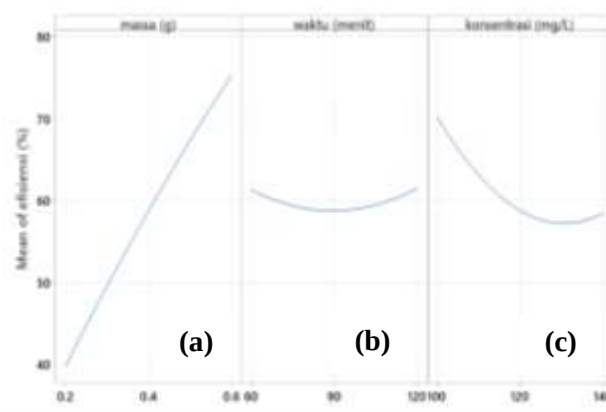


Gambar 4. Morfologi Permukaan (a) karbon sebelum aktivasi (b) karbon setelah aktivasi Na_2CO_3

Pada gambar (a), karbon sebelum aktivasi memiliki permukaan karbon yang relatif padat dan tidak merata, disertai aglomerasi partikel yang membentuk gumpalan-gumpalan. Hal ini diduga akibat sisa senyawa organik hasil karbonisasi yang masih menempel. Sementara setelah aktivasi menggunakan Na_2CO_3 , permukaan menjadi lebih bersih dengan munculnya rongga dan struktur yang lebih tidak beraturan. Hal ini sesuai dengan sifat Na_2CO_3 sebagai aktivator garam yang dapat memecah ikatan hidrokarbon, menghilangkan pengotor, serta mengembangkan pori-pori karbon, sehingga meningkatkan kemampuan adsorbennya dalam proses penyerapan [21].

Uji Adsorpsi Karbon Aktif Terhadap Ion Logam Tembaga(II)

Uji efektivitas karbon aktif dalam mengadsorpsi ion logam tembaga(II) dilakukan menggunakan rancangan *Box-Behnken Desain* melalui perangkat lunak Minitab versi 22.2.2 dengan mengkombinasikan 3 variabel bebas, yaitu massa adsorben, waktu kontak, dan konsentrasi awal larutan.



Gambar 5. Kurva Efisiensi Adsorpsi Terhadap (a) Massa (b) Waktu kontak (c) Konsentrasi

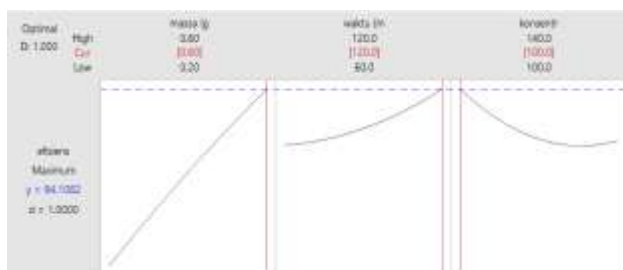
Berdasarkan **Gambar 5**, variabel massa adsorben memberikan pengaruh yang paling signifikan terhadap efisiensi adsorpsi, ditunjukkan dengan kemiringan garis yang semakin tinggi dibandingkan dengan kedua variabel lainnya. Efisiensi adsorpsi meningkat seiring bertambahnya massa adsorben, yaitu berkisar 40% hingga 75%. Peningkatan jumlah massa adsorben akan menyediakan permukaan yang lebih luas sebagai situs adsorpsi, sehingga semakin banyak ion logam yang dapat terikat pada permukaan adsorben [22].

Tabel 2. Uji Anova Efisiensi Adsorpsi Terhadap Model

Source	DF	Jumlah Kuadran	Rerata Kuadran	Nilai F	Nilai P
Model	9	3038,68	337,63	4,31	0,061
Linear	3	2785,08	928,36	11,84	0,010
Massa	1	2509,36	2509,36	32,00	0,002
Waktu kontak	1	0,08	0,08	0,00	0,976
Konsentrasi	1	275,74	275,74	3,52	0,120
Kuadrat	3	145,53	48,51	0,62	0,632
Massa*	1	5,07	5,07	0,06	0,809
Massa Waktu Kontak*	1	26,02	26,02	0,33	0,590
Waktu Kontak Konsentrasi*	1	115,58	115,58	1,47	0,279
Konsentrasi	1	115,58	115,58	1,47	0,279
Interaksi	3	108,24	36,08	0,46	0,722
Massa*	1	81,51	81,51	1,04	0,355
Waktu Kontak Massa*	1	12,44	12,44	0,16	0,707
Konsentrasi Waktu Kontak*	1	14,33	14,33	0,18	0,687
Konsentrasi	1	14,33	14,33	0,18	0,687

Berdasarkan **Tabel 2**, model secara keseluruhan memiliki nilai P sebesar 0,061 yang sedikit lebih besar dari 0,05, namun masih dapat diterima untuk menggambarkan hubungan antara

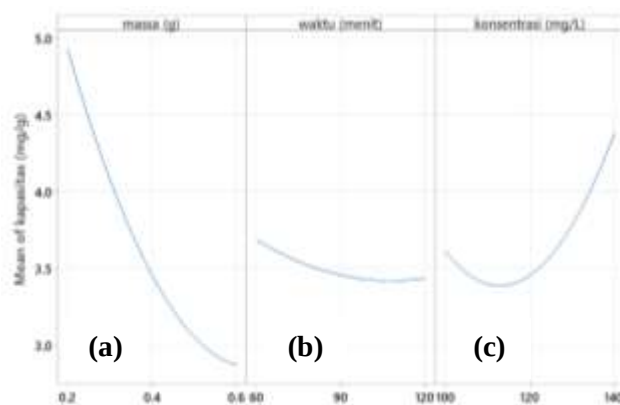
variabel bebas dan respons. Model linear ketiga variabel memiliki nilai P sebesar 0,010, yang menunjukkan pengaruh signifikan secara bersama-sama, sedangkan secara individual hanya massa adsorben yang berpengaruh signifikan dengan nilai P sebesar 0,006. Waktu kontak dan konsentrasi awal tidak berpengaruh signifikan dengan nilai P masing-masing sebesar 0,976 dan 0,120. Komponen kuadrat massa, waktu kontak, dan konsentrasi juga tidak signifikan dengan nilai P berturut-turut sebesar 0,809; 0,590; dan 0,279. Tidak signifikannya komponen kuadrat maupun interaksi menunjukkan bahwa hubungan antara variabel bebas dan efisiensi adsorpsi cenderung bersifat linear. Selain itu, setiap variabel memberikan pengaruh terhadap respons tanpa dipengaruhi oleh perubahan variabel lainnya.



Gambar 6. Optimasi Respons Terhadap Efisiensi Adsorpsi

Pemilihan kondisi optimum dari respons dilakukan dengan menggunakan *optimization plot* pada *software* statistika. Dikarenakan masing-masing variabel menghasilkan respons yang berbeda, maka penentuan kondisi optimum ini merupakan hubungan dari respons terhadap variabel bebas. Nilai *desirability* (d) digunakan untuk menilai tingkat keberhasilan hasil optimasi, dengan rentang nilai 0–1. Semakin mendekati nilai 1, semakin sesuai respons yang dihasilkan dengan target optimasi yang diinginkan [23].

Hasil optimasi respons menggunakan *desirability function* pada **Gambar 6** menunjukkan bahwa kondisi optimum untuk memperoleh efisiensi adsorpsi tertinggi dicapai pada massa adsorben 0,6 g, waktu kontak 120 menit, dan konsentrasi awal 100 mg/L. Pada kondisi tersebut, model memprediksikan efisiensi sebesar 94,1082% dengan nilai *desirability* 1,000. Nilai *desirability* sebesar 1,000 menunjukkan bahwa kondisi optimum tersebut telah memenuhi target optimasi yang ditetapkan pada model.



Gambar 7. Kurva Kapasitas Adsorpsi Terhadap (a) Massa (b) Waktu Kontak (c) Konsentrasi

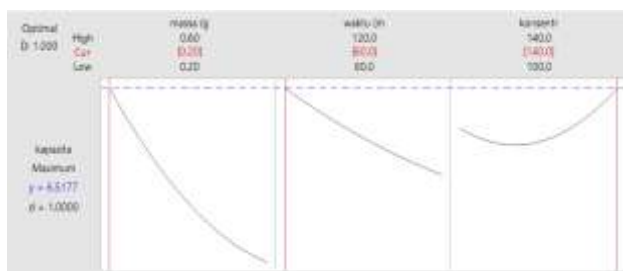
Hasil analisis kapasitas adsorpsi terhadap massa pada **Gambar 7** menunjukkan adanya penurunan kapasitas adsorpsi seiring dengan meningkatnya massa adsorben. Penurunan kapasitas adsorpsi terjadi karena penambahan massa adsorben tidak diikuti oleh peningkatan jumlah ion logam dalam larutan. Akibatnya, jumlah ion yang teradsorpsi per satuan massa menjadi kecil sehingga nilai kapasitas adsorpsi menurun [24].

Tabel 3. Uji ANOVA Kapasitas Adsorpsi Terhadap Model

Source	DF	Jumlah Kuadran	Rerata Kuadran	Nilai F	Nilai P
Model	9	12,5168	1,39076	3,51	0,090
Linear	3	9,7631	3,25438	8,22	0,022
Massa	1	8,4410	8,44095	21,31	0,006
Waktu kontak	1	0,1220	0,12196	0,31	0,603
Konsentrasi	1	1,2001	1,20010	3,03	0,142
Kuadrat	3	1,6783	0,55942	1,41	0,342
Massa*	1	0,7236	0,72357	1,83	0,234
Massa Waktu Kontak*	1	0,0392	0,03920	0,10	0,766
Waktu Kontak Konsentrasi*	1	1,0764	1,07636	2,72	0,160
Interaksi	3	1,0860	0,36201	0,91	0,497
Massa*	1	0,9910	0,99105	2,50	0,175
Waktu Kontak Massa*	1	0,0747	0,07474	0,19	0,682
Konsentrasi Waktu Kontak*	1	0,0204	0,02037	0,05	0,830
Konsentrasi	1	0,0204	0,02037	0,05	0,830

Hasil uji ANOVA terhadap kapasitas adsorpsi pada **Tabel IV.5** menunjukkan model secara keseluruhan memiliki nilai P sebesar 0,090. Model linear menunjukkan pengaruh yang signifikan, sedangkan secara individual hanya massa adsorben

yang berpengaruh signifikan terhadap kapasitas adsorpsi dengan nilai P sebesar 0,006. Waktu kontak dan konsentrasi awal tidak berpengaruh signifikan dengan nilai P masing-masing sebesar 0,603 dan 0,142. Komponen kuadrat dan interaksi juga tidak menunjukkan pengaruh signifikan dengan nilai P berada pada rentang 0,160–0,830. Hal ini menunjukkan bahwa hubungan antara variabel bebas dan kapasitas adsorpsi cenderung bersifat linear, serta pengaruh masing-masing variabel tidak berpengaruh pada perubahan variabel lainnya.



Gambar 8. Optimasi Respons Terhadap Kapasitas Adsorpsi

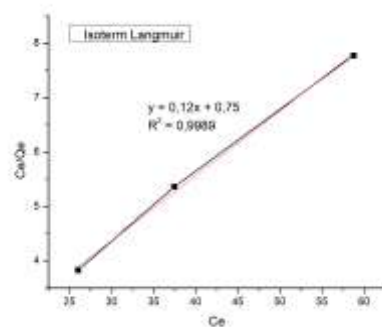
Hasil optimasi respons untuk kapasitas adsorpsi pada **Gambar 8** menunjukkan kondisi optimum diperoleh pada massa adsorben 0,2 g, waktu kontak 60 menit, dan konsentrasi awal 140 mg/L dengan prediksi nilai kapasitas adsorpsi sebesar 6,5177 mg/g dan nilai *desirability* sebesar 1,000. Nilai *desirability* sebesar 1,000 menunjukkan bahwa kondisi optimum tersebut telah memenuhi target optimasi yang ditetapkan pada model.

Isoterm Adsorpsi

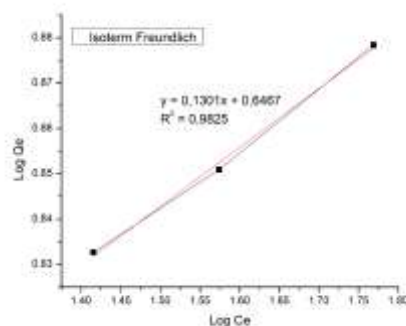
Isoterm adsorpsi menggambarkan kesetimbangan antara jumlah zat yang terserap dengan jumlah adsorben. Model isoterm adsorpsi digunakan untuk mengetahui interaksi antara larutan dengan adsorben serta kemampuan yang dapat diserap oleh adsorben. Untuk menentukan adsorpsi yang terjadi pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan model isoterm yaitu model isoterm Langmuir dan Freundlich.

Isoterm Langmuir digunakan untuk menggambarkan proses adsorpsi yang berlangsung pada permukaan homogen dengan pembentukan satu lapisan (*monolayer*). Model ini mengasumsikan bahwa setiap situs adsorpsi hanya dapat ditempati oleh satu molekul adsorbat serta tidak terjadi interaksi antar molekul yang telah teradsorpsi pada permukaan. Isoterm Freundlich digunakan untuk menggambarkan proses adsorpsi pada permukaan adsorben yang bersifat heterogen dan tidak

mengikuti asumsi adsorpsi ideal.



(a)



(b)

Gambar 9. Isoterm Adsorpsi (a) Langmuir (b) Freundlich

Berdasarkan kurva pada **Gambar 9**, diperoleh nilai koefisien determinasi (R^2) dari masing-masing model isoterm adsorpsi yaitu model isoterm Langmuir ($R^2 = 0,9989$) > Freundlich ($R^2 = 0,9825$). Semakin dekat nilai R^2 dengan 1 maka semakin besar kesesuaian model isoterm pada adsorben [25]. Dari kedua nilai R^2 tersebut dapat dilihat bahwa pemodelan isoterm adsorpsi Langmuir lebih sesuai untuk menggambarkan penyerapan ion logam tembaga(II). Hal ini menunjukkan bahwa setiap sisi adsorben memiliki permukaan yang homogen dan energi yang sama, sehingga pada saat proses adsorpsi maksimum hanya terjadi pembentukan satu lapisan (*monolayer*) pada situs aktif adsorben.

SIMPULAN

Karakterisasi FTIR karbon aktif biji salak menunjukkan keberadaan gugus fungsi –OH, C=O, C–H, dan C–O yang mengindikasikan keberhasilan proses aktivasi, sementara karakterisasi SEM menunjukkan morfologi permukaan yang lebih kasar, berongga, dan tidak beraturan. Optimasi menggunakan Box-Behnken. Desain menunjukkan

kapasitas adsorpsi maksimum sebesar 6,51 mg/g diperoleh pada kondisi massa adsorben 0,2 g, waktu kontak 60 menit, dan konsentrasi awal 140 mg/L. Efisiensi adsorpsi tertinggi sebesar 94,10% diperoleh pada massa 0,6 g, waktu kontak 120 menit, dan konsentrasi awal 100 mg/L. Hasil penentuan model isoterm menunjukkan bahwa proses adsorpsi karbon aktif biji salak lebih sesuai dengan model isoterm Langmuir.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan rasa terima kasih kepada semua pihak yang telah mendukung penelitian ini, terutama kepada kedua dosen pembimbing Ibu Rizka Fitriyani S, S.Pd., M.Si. dan Bapak Adi Mulyana Supriatna, S.Pd., M.T. atas bimbingan yang diberikan selama proses penelitian hingga penyelesaian penulisan artikel ilmiah ini.

REFERENSI

- [1] Badan Pusat Statistik, “Produksi Tanaman Buah-buahan dan Sayuran Tahunan Menurut Provinsi dan Jenis Tanaman.” Accessed: Jun. 09, 2026. [Online]. Available: <https://www.bps.go.id/id/statistics-table/3/U0dKc1owczVSaIJ5VFdOMWVETnIVRVJ6YlRJMFp6MDkJMw==/produksi-tanaman-buah-buahan-dan-sayuran-tahunan-menurut-provinsi-dan-jenis-tanaman--2024.html?year=2025>
- [2] S. Anggraini and A. Lesmana, “Potensi Pengolahan Limbah Salak Pondoh di Kabupaten Rokan Hulu,” *Jurnal Ilmiah Manajemen dan Bisnis*, vol. 03, no. 03, 2022.
- [3] C. I. Surbakti and B. R. Barus, “Manufacture of Active Carbon Tablets from Salacca (Salacca Zalacca) Seeds as Anti-Diary Treatment,” *Jurnal Biosains*, vol. 8, no. 1, pp. 30–34, Mar. 2022, doi: 10.24114/jbio.v8i1.32356.
- [4] R. Tarma, B. Fitria, A. Muslim, and E. Munawar, “Efisiensi Penyerapan Ion Logam Cu(II) Menggunakan Karbon Aktif Dari Limbah Sagu,” 2023.
- [5] R. Alfi, F. Lubis, H. I. Nasution, and M. Zubir, “Production of Activated Carbon from Natural Sources for Water Purification,” 2020.
- [6] Presiden Republik Indonesia, Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. 2021.
- [7] S. Masruroh and T. Purnomo, “Analisis Kandungan Logam Berat Tembaga (Cu) pada Tumbuhan Akuatik sebagai Indikator Pencemaran di Sungai Brantas Mojokerto,” *LenteraBio*, vol. 13, no. 1, pp. 131–140, 2024, [Online]. Available: <https://journal.unesa.ac.id/index.php/lenterabio/index>.
- [8] H. Saniah, T. Alawiyah, D. Mahdiah, and R. Rahmadani, “Analisis Pengaruh Waktu Pengambilan Sampel Terhadap Kandungan Logam Berat Tembaga (Cu) pada Air Sungai Sebamban Kabupaten Tanah Bumbu,” *Jurnal Surya Medika*, vol. 11, no. 2, pp. 197–203, Aug. 2025, doi: 10.33084/jsm.v11i2.10538.
- [9] T. Phothitontimongkol and K. Prasertboonyai, “Process Optimization and Modeling of Low-cost Activated Carbon Preparation and Its Application in Chromium (VI) Removal,” *Chiang Mai Journal of Science*, vol. 49, no. 6, pp. 1559–1575, Nov. 2022, doi: 10.12982/CMJS.2022.100.
- [10] Z. N. Fauziah, M. Fathurrahman, L. J. Kusumawardani, L. Heliawati, and R. Artikel, “Pemanfaatan Sekam Padi Menjadi Karbon Aktif Teraktivasi NaCl Sebagai Adsorben Untuk Menjerap Logam Cr(VI),” *Alchemy: Journal of Chemistry*, vol. 12, no. 2, pp. 44–52, Nov. 2024, doi: 10.18860/al.v12i2.25825.
- [11] A. I. Bakti, A. R. Rio, H. I. R. Mosey, and J. Jumriadi, “Biomass-Derived Activated Carbon via Na₂CO₃, KOH, and ZnCl₂ Activation: A Comparative Physicochemical Study toward Energy Storage Electrodes,” *Jurnal Ilmiah Pendidikan Fisika Al-Biruni*, vol. 14, no. 2, pp. 125–137, Dec. 2025, doi: 10.24042/jipfalbiruni.v14i2.29076.
- [12] K. Amru, S. Fahmi, and E. Dhora Jati, “Pemanfaatan Biji Salak (Salacca zalacca) Sebagai Adsorben Logam Cr Dalam Air,” vol. 2, pp. 1117–1123, Apr. 2023.
- [13] E. Erawati and E. Rahmalia Helmy, “Pembuatan Karbon Aktif dari Serbuk Gergaji Kayu Jati (Tectona grandis L.f.) (Suhu dan Waktu Karbonasi),” *University Research Colloquium*, pp. 105–112, 2018.
- [14] A. G. Dumanlı and A. H. Windle, “Carbon

fibres from cellulosic precursors: A review,” 2012, *Kluwer Academic Publishers*. doi: 10.1007/s10853-011-6081-8.

[15] A. El Nemr, R. M. Aboughaly, A. El Sikaily, S. Ragab, M. S. Masoud, and 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. Biorefin.*, vol. 12, no. 11, pp. 5125–5143, Nov. 2022, doi: 10.1007/s13399-020-00995-5.

[16] O. Ioannidou and A. Zabaniotou, “Agricultural residues as precursors for activated carbon production—A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 11, no. 9, pp. 1966–2005, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.03.013>.

[17] Barita Arintonang, Nova Florentina Ambarwati, Eka Margaretha Sinaga, and Ahmad Hafizullah Ritonga, “Sintesis dan Karakterisasi Arang Aktif Dari Kulit Salak Sebagai Adsorben Terhadap Kadar BOD, COD dan TSS Pada Limbah Cair Industri Tekstil,” *Jurnal Multidisiplin Madani*, vol. 2, no. 6, pp. 2611–2626, Jun. 2022, doi: 10.55927/mudima.v2i6.441.

[18] Sahdiah, Halimahtus, Kurniawa, and Rudi, “Optimasi Tegangan Akselerasi pada Scanning Electron Microscope–Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (SEM-EDX) untuk Pengamatan Morfologi Sampel Biologi,” *Jurnal Sains dan Teknologi*, vol. 5, no. 2, pp. 33–40, 2023.

[19] A. B. D. Nandiyanto, R. Oktiani, and R. Ragadhita, “How to read and interpret ftir spectroscopy of organic material,” *Indonesian Journal of Science and Technology*, vol. 4, no. 1, pp. 97–118, 2019, doi: 10.17509/ijost.v4i1.15806.

[20] A. Ilnicka and J. P. Lukaszewicz, “Synthesis of N-rich microporous carbon materials from chitosan by alkali activation using Na₂CO₃,” *Materials*

Science and Engineering: B, vol. 201, pp. 66–71, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.mseb.2015.08.002.

[21] Yusril Bahri Sitanggang, Nia Febrianti, and Ismi Khairunnissa Ariani, “Penggunaan Kulit Lai (*Durio kutejensis* (Hassk) Becc.) Sebagai Bioadsorben Untuk Menurunkan Kadar Amonia Pada Limbah Cair Domestik Rumah Sakit,” *Al-Ard: Jurnal Teknik Lingkungan*, vol. 10, no. 2, pp. 90–99, 2025.

[22] S. Ramadhan, P. Lestari, and E. Siswoyo, “Penurunan Logam Berat Kromium (Cr) dalam Air Menggunakan Adsorben Ampas Tebu,” *Jurnal Sains dan Teknologi Lingkungan*, vol. 18, no. 1, pp. 84–92, Jan. 2026, [Online]. Available: <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

[23] A. Silvi Reyra, S. Daud, S. Reni Yenti, and M. Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Riau, “Pengaruh Massa dan Ukuran Partikel Adsorben Daun Nanas Terhadap Efisiensi Penyisihan Fe Pada Air Gambut,” 2017.

[24] R. R. Sahania, Y. Utubira, and J. B. Manuhutu, “Efisiensi dan Kapasitas Adsorpsi Karbon Aktif dari Kulit Jagung dalam Menurunkan Kadar Logam Fe,” vol. 14, no. 1, pp. 60–69, 2024.

[25] I. Nurhidayati, B. Mellisani, F. Puspita, and A. R. Putri, “Penentuan Isoterm dan Kinetika Adsorpsi Ion Besi oleh Sedimen Sebagai Adsorben,” *WARTA AKAB VOLUME*, vol. 46, no. 1, pp. 75–83, Jul. 2022.