

Pengaruh Variasi Aktivator KOH dan NaCl terhadap Kapasitas Adsorpsi Biji Kapuk (*Ceiba pentandra*) dalam Penjerapan Ion Fe(II)

*The Effect of KOH and NaCl Activator Variations on the Adsorption Capacity of Kapok Seeds (*Ceiba pentandra*) in Fe(II) Ion Absorption*

Kelvin Hadinatan*, Iriany, Taslim, Okta Bani, Yesi Artanti, Nafis Ijlal Syach

Departemen Teknik Kimia, Universitas Sumatera Utara, Jalan Almamater Kampus USU, Medan, Indonesia.

*Email: kelvinhadinatan@usu.ac.id

Article history:

Diterima : 19 Oktober 2025
Direvisi : 20 Januari 2026
Disetujui : 24 Januari 2026
Mulai online : 27 Maret 2026

E-ISSN: 2337-4888

How to cite:

Kelvin Hadinatan, Iriany, Taslim, Okta Bani, Yesi Artanti, Nafis Ijlal Syach. (2026). Pengaruh Variasi Aktivator KOH dan NaCl terhadap Kapasitas Adsorpsi Biji Kapuk (*Ceiba pentandra*) dalam Penjerapan Ion Fe(II). Jurnal Teknik Kimia USU, 15(1), 49-56.

ABSTRAK

Pencemaran logam berat seperti besi (Fe) dalam air limbah menjadi isu lingkungan yang signifikan karena dampak negatifnya terhadap ekosistem dan kesehatan manusia. Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis adsorben dari biji kapuk (*Ceiba pentandra*) dengan mengkaji pengaruh jenis aktivator (KOH dan NaCl) serta ukuran partikel (100 dan 120 mesh) terhadap kapasitas adsorpsi ion Fe(II). Metodologi penelitian meliputi proses karbonisasi dan aktivasi kimia, diikuti dengan uji kinetika adsorpsi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan aktivator NaCl dengan ukuran partikel 120 mesh memberikan performa terbaik dengan kemampuan adsorpsi setimbang mencapai 89,75% dan bilangan iodin sebesar 127 mg/g. Analisis kinetika menunjukkan bahwa proses penjerapan ion Fe(II) mengikuti model kinetika orde dua semu (pseudo-second order) dengan nilai R^2 sebesar 0,999, yang mengindikasikan bahwa mekanisme utama adsorpsi adalah kemisorpsi melalui interaksi dua langkah yang melibatkan difusi dan interaksi antarmolekul pada area adsorben.

Kata kunci: adsorpsi, aktivator, biji kapuk, besi (Fe), kinetika

ABSTRACT

Heavy metal contamination such as iron (Fe) in wastewater is a significant environmental issue due to its negative impact on ecosystems and human health. This study aims to synthesize adsorbents from kapok seeds (*Ceiba pentandra*) by examining the effect of activator type (KOH and NaCl) and particle size (100 and 120 mesh) on the adsorption capacity of Fe(II) ions. The research methodology includes carbonation and chemical activation processes, followed by adsorption kinetics testing. The results showed that the use of NaCl activator with a particle size of 120 mesh provided the best performance with an equilibrium adsorption capacity of 89.75% and an iodine number of 127 mg/g. Kinetic analysis showed that the Fe(II) ion adsorption process followed a pseudo-second-order kinetic model with an R^2 value of 0.999, indicating that the main adsorption mechanism was chemisorption through a two-step interaction involving diffusion and intermolecular interactions in the adsorbent area.

Keyword: adsorption, activator, kapok seeds, iron (Fe), kinetics



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International.
<https://doi.org/10.32734/jtk.v15i1.23194>

1. Pendahuluan

Pencemaran air akibat zat anorganik, khususnya logam berat, merupakan permasalahan lingkungan yang banyak dijumpai di berbagai wilayah Indonesia. Fenomena ini dipicu oleh pesatnya industrialisasi dan urbanisasi yang sering diikuti oleh pembuangan limbah tanpa pengolahan yang memadai [1]. Logam berat yang terkandung dalam limbah cair industri, seperti Fe(II), Cu(II), Pb(II) dan Hg(II), diketahui berpotensi memberikan dampak negatif terhadap keseimbangan ekosistem serta kesehatan manusia. Fe(II), meskipun

merupakan unsur penting yang secara alami terdapat pada air tanah dan air permukaan, dalam konsentrasi tinggi dapat menimbulkan gangguan lingkungan dan kesehatan [2]. Air di sekitar kawasan industri pertambangan yang mengandung besi dalam kadar berlebih tidak layak digunakan untuk keperluan domestik karena dapat menyebabkan noda karat pada pakaian dan peralatan rumah tangga, serta menimbulkan rasa logam pada air minum ketika konsentrasinya melebihi $\pm 0,31$ mg/L [3].

Berbagai metode telah dikembangkan untuk mengurangi logam Fe(II) dari air limbah, antara lain filtrasi membran, koagulasi, flokulasi kimia, pertukaran ion dan adsorpsi [1]. Salah satu metode yang banyak digunakan untuk menurunkan kadar Fe(II) dalam air adalah adsorpsi. Metode ini memiliki sejumlah keunggulan dibandingkan teknik pengolahan lainnya, antara lain biaya yang relatif rendah, proses yang sederhana, tidak menghasilkan produk samping beracun, serta tetap efektif pada konsentrasi logam yang rendah. Keberhasilan proses adsorpsi sangat dipengaruhi oleh jenis dan karakteristik adsorben yang digunakan. Adsorben yang ideal umumnya memiliki luas permukaan serta volume pori yang besar untuk mendukung kapasitas penyerapan yang optimal [4].

Berbagai penelitian telah mengembangkan penggunaan bahan organik alami sebagai alternatif adsorben ramah lingkungan, seperti limbah kulit pisang, jerami jagung, dan biomassa lainnya, yang menunjukkan efisiensi tinggi dalam proses penyerapan logam berat [5]. Di antara berbagai jenis adsorben alami dan sintetis, arang aktif menjadi salah satu pilihan yang paling luas digunakan karena memiliki kapasitas adsorpsi dan efisiensi yang tinggi. Bahan baku pembuatan arang aktif umumnya berasal dari sumber karbon alami seperti kayu, gambut, dan lignit [1].

Biji kapuk (*Ceiba pentandra*) merupakan salah satu bahan alami yang menjanjikan, melimpah, dan masih sangat kurang dimanfaatkan. Biji kapuk mengandung selulosa 21,83%, hemiselulosa 23,24%, lignin 10,37% dan komponen kimia lainnya. Tingginya total lignoselulosa dalam biji kapuk menunjukkan kadar karbon yang tinggi dan berpotensi digunakan sebagai bahan baku dalam pembuatan adsorben [6]. Berdasarkan potensi tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji efektivitas biji kapuk sebagai adsorben dalam penyisihan ion Fe(II) serta menganalisis pengaruh variasi jenis aktivator dan ukuran partikel terhadap kinerja adsorben yang dihasilkan.

2. Metode

Alat dan Peralatan

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah biji kapuk yang diperoleh dari Pematang Siantar, Sumatera Utara. Bahan kimia seperti KOH, NaOH, dan besi(II) sulfat heptahidrat ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) diperoleh dari CV. Rudang Jaya, Medan. Alat yang digunakan pada penelitian ini adalah *hotplate stirrer* (THERMO FISHER SCIENTIFIC Cimarec+™ Stirrer, USA), neraca digital (METTLER TOLEDO Analytical Balance ME204, Indonesia), oven (Mettmert UNB 500, Germany), pH meter (HANNA INSTRUMENT HI98107, USA), ayakan (ABM Test Sieve Analysis, Indonesia), *Atomic Absorption Spectroscopy* (LABTRON LAAS-A13, Inggris) serta *laboratory glassware*.

Pembuatan Adsorben Biji Kapuk

Proses pembuatan adsorben dari biji kapuk (*Ceiba pentandra*) diawali dengan tahap persiapan bahan baku, yaitu biji kapuk dicuci menggunakan air bersih untuk menghilangkan kotoran dan minyak alami yang menempel hingga terbebas dari pengotor, kemudian dikeringkan lebih lanjut dalam oven pada suhu 110°C selama 24 jam [7]. Biji kapuk yang telah dikeringkan kemudian dikarbonisasi menggunakan *furnace* pada suhu 400°C selama 2 jam, kemudian didinginkan hingga suhu ruang. Sampel kemudian dihaluskan menggunakan ball mill dan diayak dengan ukuran 100 dan 120 mesh untuk memperoleh partikel dengan ukuran seragam sebelum dilakukan proses aktivasi [6].

Aktivasi Adsorben Biji Kapuk

Sebanyak 5 g adsorben (ukuran 100 dan 120 mesh) direndam dalam larutan aktivator KOH dan NaCl 0,1 M dalam 100 mL akuades selama 24 jam. Campuran adsorben dan larutan aktivator diaduk hingga homogen, kemudian disaring untuk memisahkan fase padat dari larutannya. Residu padat (*cake*) yang diperoleh selanjutnya dicuci menggunakan akuades secara berulang hingga pH filtrat netral, guna menghilangkan sisa aktivator yang tidak bereaksi, kemudian sampel dikeringkan dalam oven pada suhu 110°C selama 3 jam. Adsorben yang telah diaktivasi selanjutnya siap digunakan dalam proses pengujian kemampuan adsorpsi ion logam besi (Fe^{2+}) [8].

Penentuan Kinetika Adsorpsi

Penentuan kinetika adsorpsi dilakukan dengan memodifikasi prosedur yang telah dilakukan oleh Zein dkk. (2019). Sebanyak 0,5 g adsorben biji kapuk dimasukkan ke dalam *erlenmeyer*, kemudian ditambahkan 200 mL larutan $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ dengan konsentrasi 100 ppm. Campuran tersebut diaduk menggunakan *magnetic stirrer* pada kecepatan 100 rpm selama 60 menit. Pengambilan sampel dilakukan secara berkala setiap 2 menit hingga tercapai kondisi setimbang. Larutan disaring menggunakan kertas saring dan konsentrasi akhir ion logam Fe(II) pada filtrat analisis menggunakan *Atomic Absorption Spectroscopy* (AAS). Nilai kapasitas adsorpsi (q_{ads}) dihitung menggunakan Persamaan 1 [9].

$$q_{\text{ads}} = \frac{(C_0 - C_t) V}{w} \quad (1)$$

q_{ads} adalah kapasitas adsorpsi pada waktu t (mg/g), C_0 adalah konsentrasi awal ion Fe^{2+} dalam larutan (mg/L), C_t adalah konsentrasi ion Fe^{2+} pada waktu t (mg/L), V adalah volume larutan (L), dan w adalah massa adsorben (g).

Penentuan Bilangan Iodin

Bilangan iodin ditentukan dengan mengikuti prosedur yang telah dilakukan oleh Hasibuan (2020). Sebanyak 0,25 g adsorben ditimbang dan ditambahkan 25 mL larutan iodin 0,1 N, diaduk rata selama 2 menit. Kemudian, campuran disaring dan diambil 10 mL filtratnya, selanjutnya dititrasi dengan larutan natrium tiosulfat 0,1 N sampai warna kuning pucat, lalu ditambahkan 1 mL indikator amilum 1% dan dititrasi hingga tidak berwarna (bening). Bilangan iodin dihitung menggunakan Persamaan 2 [10]:

$$\text{Bilangan Iodin} = \frac{(V_{\text{blanko}} - V_{\text{sampel}}) \times N \times 12,69 \times f}{W} \quad (2)$$

V_{blanko} adalah volume larutan natrium tiosulfat pada titrasi blanko (mL), V_{sampel} adalah volume larutan natrium tiosulfat pada titrasi sampel (mL), N adalah normalitas natrium tiosulfat (N), 12,69 adalah faktor konversi iodin, f adalah faktor koreksi dan W adalah massa adsorben (g).

3. Hasil

Adsorben dari Biji Kapuk

Adsorben yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari biji kapuk (*Ceiba pentandra*) yang diolah melalui beberapa tahapan, yaitu pengeringan, karbonisasi, penghalusan, pengayakan, dan aktivasi. Proses karbonisasi dan aktivasi kimia menggunakan KOH dan NaCl memberikan perubahan signifikan terhadap karakteristik material. Pengamatan visual menunjukkan transisi warna dari cokelat kehitaman menjadi hitam setelah proses aktivasi. Perubahan ini mengindikasikan terjadinya karbonisasi sempurna serta hilangnya senyawa volatil dan pengotor organik dari matriks biji kapuk. Adsorben biji kapuk dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Produk adsorben dari biji kapuk (*Ceiba pentandra*)

Secara struktural, penggunaan aktivator KOH dan NaCl berperan penting dalam pembentukan porositas. KOH berfungsi sebagai agen dehidrasi yang mengikis permukaan karbon, sehingga membuka pori-pori yang sebelumnya tertutup oleh residu tar hasil karbonisasi. Hal ini didukung oleh perubahan tekstur permukaan adsorben yang menjadi lebih kasar dan berongga. Peningkatan volume pori dan luas permukaan ini menjadi faktor kunci yang memungkinkan ion logam Fe(II) terperangkap secara lebih efektif di dalam rongga adsorben [11].

Pengaruh Jenis Aktivator terhadap Kemampuan Adsorpsi

Kemampuan adsorpsi ion Fe(II) oleh adsorben biji kapuk diukur secara periodik untuk menentukan laju adsorpsi. Berdasarkan data pengamatan pada Tabel 1 dan Gambar 1, terlihat bahwa kemampuan adsorpsi ion Fe(II) oleh adsorben biji kapuk dipengaruhi secara signifikan oleh jenis aktivasi kimia dan ukuran partikel. Secara umum, penggunaan aktivator kimia meningkatkan efisiensi adsorpsi dibandingkan dengan adsorben tanpa aktivasi (kontrol).

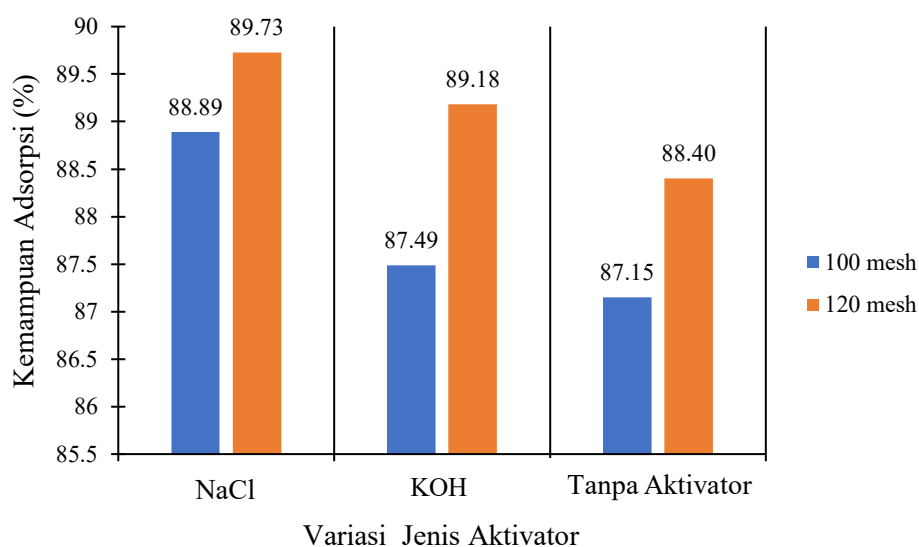
Tabel 1. Profil kemampuan adsorpsi ion Fe(II) pada berbagai variasi perlakuan

Jenis Aktivator	Ukuran (Mesh)	Kemampuan Adsorpsi Menit ke-2 (%)	Kemampuan Adsorpsi Menit ke-14 (%)	Kemampuan Adsorpsi Setimbang (%)	Waktu Setimbang (Menit)
Tanpa Aktivasi	100	86,837	87,149	87,151	16
	120	88,060	88,403	88,447	22
NaCl	100	88,628	88,891	88,927	18
	120	89,408	89,728	89,754	20
KOH	100	87,114	87,487	87,589	22
	120	88,858	89,183	89,254	22

Pada rentang waktu 2 hingga 14 menit, terjadi penurunan konsentrasi akhir ion Fe(II) yang sangat signifikan di seluruh variasi. Sebagai contoh, pada sampel NaCl 120 mesh, kemampuan adsorpsi meningkat dari 0% hingga mencapai 89,728% dalam waktu 14 menit. Hal ini menunjukkan bahwa situs aktif pada permukaan adsorben biji kapuk sangat aksesibel bagi ion logam pada fase awal kontak. Setelah menit ke-14, laju adsorpsi mulai melambat. Hal ini mengindikasikan bahwa pada menit ke-14, sebagian besar situs aktif telah terisi oleh ion Fe(II) sehingga proses adsorpsi mulai mencapai titik jenuh (*equilibrium*).

Gambar 2 menunjukkan pengaruh jenis aktivator terhadap kemampuan adsorpsi ion logam Fe²⁺ pada menit ke-14 dengan berbagai variasi aktivator yang digunakan. Hasil menunjukkan bahwa adsorben yang diaktivasi dengan NaCl memberikan hasil adsorpsi terbaik dibandingkan dengan KOH dan kontrol. Pada ukuran 120 mesh, aktivator NaCl menghasilkan kemampuan adsorpsi setimbang tertinggi sebesar 89,73% dibandingkan dengan aktivator KOH dan tanpa aktivator, secara berturut-turut sebesar 89,18% dan 88,40%. Fenomena ini menunjukkan bahwa aktivator NaCl lebih efektif dalam meningkatkan kemampuan adsorpsi dibandingkan dengan KOH.

Aktivasi dengan NaCl berfungsi untuk membersihkan permukaan pori dari pengotor dan meningkatkan situs aktif pada permukaan adsorben. Menurut Radika dan Astuti (2020), pori-pori yang terdapat pada adsorben disebabkan oleh aktivasi garam (seperti NaCl) memiliki sifat *dehydrating agent* yang dapat membatasi pembentukan tar. Tar dapat menyumbat pori-pori karbon dan menurunkan efisiensi adsorpsi. Selain itu, aktivasi garam dapat meningkatkan luas permukaan spesifik melalui proses pertukaran ion dan pembukaan pori yang lebih efektif pada biomassa yang dapat memperluas bidang permukaan adsorpsi terhadap ion-ion logam [12]. Meskipun KOH dikenal sebagai aktivator basa yang kuat dalam meningkatkan porositas, dalam konteks penjeratan ion logam Fe(II) pada penelitian ini, karakteristik permukaan yang dihasilkan oleh NaCl tampaknya lebih kompatibel. Hal ini dapat dipengaruhi oleh perbedaan afinitas antara ion logam di larutan dengan gugus fungsi yang terbentuk setelah proses aktivasi alkali (KOH) dan garam netral (NaCl) [5]. Sedangkan pada adsorben tanpa aktivasi menunjukkan kemampuan adsorpsi terendah, dimana pori-pori alami adsorben biji kapuk masih tertutup oleh senyawa-senyawa organik yang membatasi jumlah ion Fe(II) yang dapat terikat pada permukaan adsorben [13].



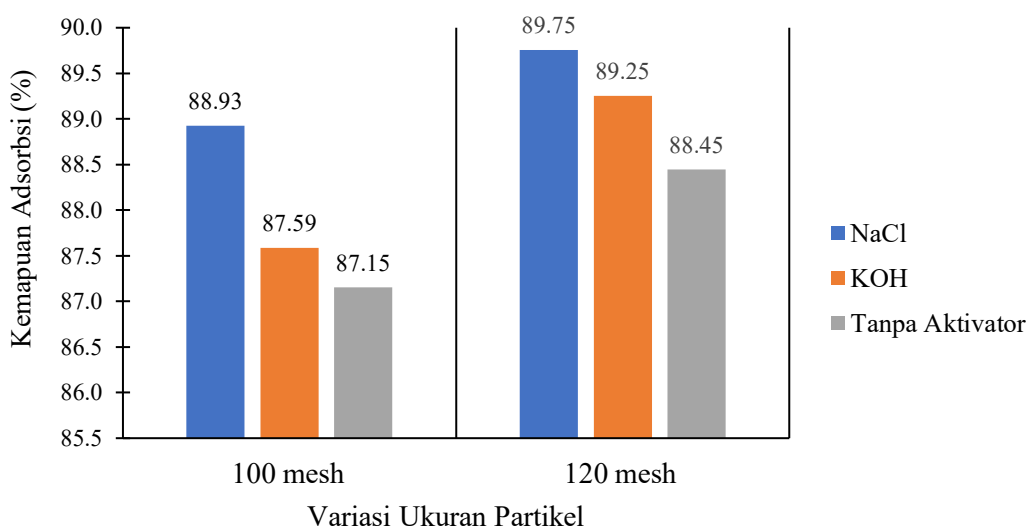
Gambar 2. Pengaruh jenis aktivator terhadap kemampuan adsorpsi adsorben biji kapuk

Pengaruh Ukuran Adsorben Biji Kapuk terhadap Kemampuan Adsorpsi

Ukuran partikel menentukan kemampuan molekul adsorbat untuk berdifusi dan menembus pori-pori adsorben. Oleh karena itu, semakin kecil ukuran partikel adsorben, semakin besar luas permukaan kontak yang tersedia, sehingga kapasitas adsorpsi cenderung meningkat [14]. Berdasarkan data yang disajikan pada Tabel 1 dan Gambar 3, terlihat adanya korelasi antara ukuran partikel terhadap peningkatan kemampuan adsorpsi ion Fe(II). Adsorben dengan ukuran 120 mesh menunjukkan performa penyerapan yang lebih unggul dibandingkan dengan ukuran 100 mesh pada seluruh jenis aktivator.

Pada ukuran partikel 100 mesh dan 120 mesh yang diaktivasi menggunakan NaCl, diperoleh kapasitas adsorpsi pada kondisi kesetimbangan masing-masing sebesar 88,93% dan 89,75%. Sementara itu, pada adsorben yang diaktivasi dengan KOH, kapasitas adsorpsi pada ukuran 100 mesh mencapai 87,59%, dan meningkat menjadi 89,25% pada ukuran 120 mesh. Sedangkan pada adsorben tanpa aktivasi, kapasitas adsorpsi yang diperoleh sebesar 87,15% pada ukuran 100 mesh dan 88,45% pada ukuran 120 mesh.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa ukuran partikel yang lebih kecil (120 mesh) memberikan kemampuan adsorpsi yang lebih tinggi dibandingkan ukuran 100 mesh pada semua jenis perlakuan aktivasi. Hal ini disebabkan oleh meningkatnya luas permukaan spesifik adsorben seiring dengan penurunan ukuran partikel, sehingga jumlah situs aktif yang tersedia untuk interaksi dengan molekul adsorbat juga meningkat. Luas permukaan adsorben berbanding terbalik dengan ukuran partikel, di mana semakin kecil ukuran partikel, semakin besar luas permukaan kontak yang memungkinkan terjadinya penyerapan yang lebih efektif [5].

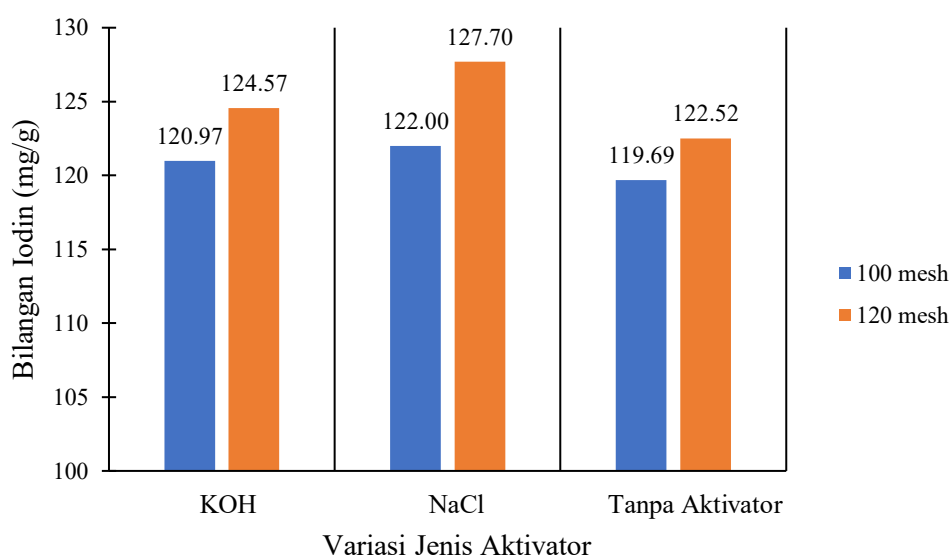


Gambar 3. Grafik pengaruh ukuran adsorben biji kapuk terhadap kapasitas adsorpsi

Bilangan Iodin

Bilangan iodine merupakan parameter penting yang menunjukkan kapasitas adsorpsi mikropori pada adsorben, di mana nilai yang lebih tinggi mengindikasikan luas permukaan spesifik yang lebih besar. Analisis bilangan iodine digunakan untuk melihat efektivitas aktivasi kimia dan ukuran partikel terhadap pembentukan situs aktif pada biji kapuk [15]. Berdasarkan Gambar 4, aktivasi menggunakan NaCl dengan ukuran partikel 120 mesh menghasilkan bilangan iodine tertinggi, yaitu 127 mg/g, dibandingkan dengan KOH dan tanpa aktivasi. Hasil ini menunjukkan bahwa aktivasi menggunakan NaCl efektif meningkatkan jumlah pori aktif pada permukaan adsorben, meskipun peningkatannya tidak terlalu signifikan dibandingkan dengan kondisi sebelum aktivasi. Perbedaan nilai bilangan iodine yang relatif kecil antara sampel kontrol dan sampel teraktivasi diduga akibat rendahnya konsentrasi aktivator yang digunakan. Konsentrasi yang rendah menyebabkan terbatasnya interaksi kimia untuk mendegradasi senyawa organik penutup pori secara masif. Selain itu, terdapat kemungkinan terjadinya *pore blockage* oleh sisa-sisa kristal aktivator yang terjebak di dalam mikropori, sehingga membatasi akses molekul iodine meskipun luas permukaan sebenarnya telah meningkat [16]. Selain itu, ukuran partikel yang lebih kecil (120 mesh) meningkatkan luas permukaan kontak yang menghasilkan struktur pori yang lebih banyak yang memberikan lebih banyak ruang untuk menjerap ion logam Fe(II) secara efektif dibandingkan pada ukuran 100 mesh [5].

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa pada adsorben biji salak, nilai bilangan iodine meningkat dari 1.190 mg/g sebelum aktivasi menjadi 1.243 mg/g setelah diaktivasi menggunakan larutan asam klorida, yang menegaskan bahwa jenis aktivator berperan penting dalam menentukan karakteristik porositas adsorben [16]. Aktivasi kimia dapat membantu menghilangkan pengotor atau zat volatil yang menutupi pori-pori, sehingga memperluas permukaan spesifik karbon aktif. [15].



Gambar 4. Pengaruh jenis aktivator dan variasi ukuran adsorben terhadap bilangan iodine

Penentuan Model Kinetika Adsorpsi

Proses adsorpsi dilakukan dengan konsentrasi awal ion Fe(II) sebesar 100 mg/L menggunakan massa adsorben biji kapuk ukuran 120 mesh sebanyak 0,5 gram dalam volume larutan 200 mL, sehingga diperoleh rasio larutan terhadap adsorben sebesar 200 mL/0,5 gram. Analisis kinetika adsorpsi dilakukan untuk memahami mekanisme laju penjerapan ion logam oleh adsorben. Model kinetika yang digunakan dalam kajian ini meliputi model kinetika orde satu semu (*pseudo-first order*) dan model kinetika orde dua semu (*pseudo-second order*), yang masing-masing digunakan untuk mengevaluasi kesesuaian data eksperimental terhadap mekanisme penjerapan yang terjadi pada permukaan adsorben sesuai dengan persamaan pada Tabel 2 [17].

Tabel 2. Persamaan model kinetika reaksi adsorpsi

Model	Persamaan	Persamaan Linear	Plot Grafik
Orde 1	$\frac{dq}{dt} = k(q_e - q_t)$	$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k}{2,303} t$	$\log(q_e - q_t)$ vs t
Orde 2	$\frac{dq}{dt} = k(q_e - q_t)^2$	$\frac{t}{qt} = \frac{t}{qe} + \frac{1}{kqe^2}$	$\frac{t}{qt}$ vs t

Tabel 3. Nilai kinetika adsorpsi ion logam Fe(II) dengan adsorben biji kapuk 120 mesh

Model	Parameter	Jenis Aktivator		
		KOH	NaCl	Tanpa Aktivator
Orde 1	R^2	0,986	0,947	0,954
	K_1 (min^{-1})	0,167	0,227	0,207
	Q_e (mg/g)	275,93	301,23	318,78
Orde 2	R^2	0,999	0,999	0,999
	K_2 (mg/g.min)	0,0018	0,0022	0,0018
	Q_e (mg/g)	35.701	35.901	35.378

Berdasarkan parameter karakteristik model kinetika yang tersaji pada Tabel 3, model pseudo-orde kedua secara konsisten menunjukkan tingkat kecocokan yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan model orde pertama. Hal ini dibuktikan dengan nilai koefisien determinasi (R^2) yang mencapai nilai sempurna sebesar 0,999 untuk seluruh variasi aktivator (KOH, NaCl, maupun tanpa aktivator), sedangkan pada model orde pertama, nilai R^2 hanya berkisar antara 0,947 hingga 0,986.

Model pseudo-orde kedua memberikan gambaran mengenai mekanisme yang terjadi di tingkat molekuler, di mana laju adsorpsi dikontrol oleh mekanisme kemisorpsi (*chemical adsorption*). Mekanisme ini melibatkan gaya valensi melalui berbagi atau pertukaran elektron antara ion Fe(II) sebagai adsorbat dengan gugus fungsi aktif pada permukaan biji kapuk sebagai adsorben. Dalam kemisorpsi, interaksi yang terbentuk jauh lebih kuat dibandingkan fisisorpsi karena melibatkan pembentukan ikatan kimia yang cenderung ireversibel pada situs-situs spesifik permukaan adsorben [17]. Hal ini didukung oleh nilai kapasitas adsorpsi setimbang (q_e) pada model orde kedua yang menunjukkan angka yang lebih stabil, yakni berada pada rentang 35.378 mg/g hingga 35.901 mg/g, dibandingkan model orde pertama yang menghasilkan q_e teoritis yang sangat fluktuatif (275,93-318,78 mg/g) dan tidak linier dengan tren R^2 .

Hasil analisis menunjukkan bahwa penggunaan NaCl memberikan performa adsorpsi yang paling optimal. Aktivasi menggunakan NaCl menghasilkan nilai q_e tertinggi 35.901 mg/g dan konstanta laju tercepat (k_2) sebesar 0,0022 g/mg.min. Tingginya nilai k_2 pada sampel dengan aktivasi NaCl mengindikasikan bahwa perlakuan tersebut berhasil memodifikasi morfologi permukaan biji kapuk sehingga mempermudah akses ion Fe(II) menuju situs aktif, yang pada akhirnya mempercepat waktu pencapaian kesetimbangan adsorpsi. Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa biji kapuk 120 mesh dengan bantuan aktivator NaCl merupakan sistem adsorben yang sangat efisien untuk penyisihan Fe(II) dengan mekanisme utama berupa penjerapan kimiawi yang mengikuti pola kinetika pseudo-orde kedua.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menyimpulkan bahwa biji kapuk (*Ceiba pentandra*) memiliki potensi sebagai adsorben efektif untuk penyisihan ion Fe(II), di mana perlakuan aktivasi NaCl dengan ukuran partikel 120 mesh menghasilkan performa terbaik dengan kapasitas adsorpsi setimbang sebesar 89,75%. Proses penjerapan ini secara konsisten mengikuti model kinetika orde dua semu ($R^2 = 0,999$), yang mengindikasikan bahwa mekanisme utama yang terjadi adalah kemisorpsi melalui interaksi kimia antara ion logam dengan situs aktif adsorben. Meskipun menunjukkan hasil yang menjanjikan, penelitian ini masih memiliki keterbatasan karena belum dilakukannya kajian isoterm adsorpsi untuk menentukan kapasitas maksimum teoritis, pengujian pengaruh pH terhadap efisiensi penjerapan, serta karakterisasi fisik material yang mendalam. Oleh karena itu, penelitian lanjutan sangat direkomendasikan untuk melakukan analisis *Brunauer-Emmett-Teller* (BET) guna mengetahui luas permukaan spesifik secara akurat, uji *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) untuk mengidentifikasi perubahan gugus fungsi setelah aktivasi, serta melakukan variasi konsentrasi awal Fe(II) guna memperluas pemahaman mengenai batas saturasi adsorben.

5. Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Sumatera Utara yang telah mendukung kegiatan penelitian ini.

6. Konflik Kepentingan

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

Daftar Pustaka

- [1] C. M. Futralan, A. E. S. Choi, H. G. O. Soriano, M. K. B. Cabacungan, and J. C. Millare, “Modification strategies of kapok fiber composites and its application in the adsorption of heavy metal ions and dyes from aqueous solutions: a systematic review,” *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 19, no. 5, pp. 1–26, 2022.
- [2] Y. G. Chen *et al.*, “Impacts of heavy metals and medicinal crops on ecological systems, environmental pollution, cultivation, and production processes in China,” *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 219, pp. 1–17, 2021.
- [3] L. Legiso, H. Juniar, and U. M. Sari, “Perbandingan efektivitas karbon aktif sekam padi dan kulit pisang kepok sebagai adsorben pada pengolahan air sungai enim,” *Semin. Nas. Sains dan Teknol. 2019*, vol. 2, no. 1, pp. 1–13, 2019.
- [4] M. U. Herrera, C. M. Futralan, R. Gapusan, and M. D. L. Balela, “Removal of methyl orange dye and Cu(II) ions from aqueous solution using polyaniline-coated kapok (*Ceiba pentandra*) fibers,” *Water Sci. Technol.*, vol. 78, no. 5, pp. 1137–1147, 2018.
- [5] N. M. Thazin, N. Chaiammart, M. M. Thu, and G. Panomsuwan, “Effect of pre-carbonization temperature on the porous structure and electrochemical properties of activated carbon fibers derived from kapok for supercapacitor applications,” *J. Met. Mater. Miner.*, vol. 32, no. 1, pp. 55–64, 2022.
- [6] M. Napitupulu, D. Walanda, K. Nakazawa, D. Poba, V.N.A. Tiwow, Y. Nurmawanti, dan S. Rahma “Biochar from kapuk randu (*Ceiba pentandra*) seeds for adsorption of remazol blue dye in wastewater,” *J. IPA Pembelajaran IPA*, vol. 9, no. 3, pp. 801–814, 2025.
- [7] H. Rahim, W. Ardhaifa, and R. Rachma, “Analisis kualitas arang aktif dari biji kapuk sebagai adsorben logam tembaga (Cu) dalam limbah cair industri,” *J. Teknol. Kim. Miner.*, Vol. 1, No. 1, Pp. 14–17, 2022.
- [8] N. Ahmad Faisal Nik Mohd Azlin Shah *et al.*, “A comparison study of carbonized kapok fibres treated by sodium hydroxide solution and hydrochloric acid solution as an absorbent in removing oil waste,” *IOP Conference Series: Material Science and Engineering*, 2019 vol. 551, no. 1, pp. 1–8.
- [9] R. Zein, D. Nofita, Refilda, and H. Aziz, “Chimica et Natura Acta,” *Chim. Nat. Acta*, vol. 6, no. 3, pp. 127–135, 2023.
- [10] A. Hasibuan, “Studi pengaruh variasi konsentrasi asam posfat (H_3PO_4) dan waktu perendaman karbon terhadap karakteristik karbon aktif dari kulit durian,” *J. Tek. Kim. USU*, vol. 9, no. 2, pp. 80–86, 2020.
- [11] M. Puspitasari, W. W. Nandari, and F. Hadi, “Perbandingan Penggunaan aktivator NaOH dan KOH pada pembuatan karbon aktif dari kulit singkong (*Manihot utilissima*)” *J. Tek. Kim. Fak. Tek. Ind. UPN “Veteran” Yogyakarta*, vol. 19, no. 2, pp. 58–62, 2022.
- [12] R. Radika and A. Astuti, “Pengaruh variasi konsentrasi NaCl sebagai aktivator karbon aktif kulit singkong untuk menurunkan konsentrasi logam berat air sungai batang ombilin,” *J. Fis. Unand*, vol. 9, no. 2, pp. 163–168, 2020.
- [13] E. Wolok, I. H. Lahay, B. R. Machmoed, and F. Pakaya, “Modification and characterization of *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn. (kapok) fiber: physical properties,” *Int. J. Res*, vol. 7, no. 7, pp. 381–390, 2019.
- [14] Sirajuddin and Harjanto, “Pengaruh ukuran adsorben dan waktu adsorpsi terhadap penurunan kadar COD pada limbah cair tahu menggunakan arang aktif tempurung kelapa,” *Prosiding Seminar Hasil Penelitian (SNP2M)*, 2018, pp. 42–46.
- [15] A. dan I. N. Rozanna Dewi, “Aktivitas karbon dari kulit pinang dengan menggunakan aktivator KOH,” *J. Tekonolgi Kim. Unimal*, vol. 2, no. Nopember, pp. 12–22, 2020.
- [16] E. Kusdarini, A. Budianto, M. N. Kusuma, and E. Atiyatussa’adah, “Adsorption capacity of magnetic activated carbon derived from snake fruit (*Salacca zalacca*) seeds to Cd(II): characteristics and isotherm model,” *Reaktor*, vol. 25, no. 1, pp. 12–18, 2025.
- [17] D. Kada, D. Domga, C. Asobo, N. Taybe, and J. Kowe, “Adsorption of iron (II) from aqueous solution by activated carbon from desert date seed shells (*Balanites Aegyptiaca*),” *World J. Appl. Chem.*, vol. 9, no. 3, pp. 44–55, 2024.