

Efektivitas Komposit Silika-Kitosan Berbasis Abu Ampas Tebu Sebagai Adsorben Ion Fe Pada Limbah Cair *Printed Circuit Board*

Magdalena Fransiska, Anerasari Meidinariasty*, Erika Dwi Oktaviani

Jurusan Teknik Kimia, Program Studi Teknologi Kimia Industri, Politeknik Negeri Sriwijaya

*Koresponden email: anerasari@polsri.ac.id

Diterima: 21 Juli 2026

Disetujui: 25 Juli 2026

Abstract

Printed Circuit Board (PCB) wastewater contains iron (Fe) ions that may pollute the environment and therefore requires effective treatment. This study aimed to identify the functional groups and morphology of a silica-chitosan composite derived from sugarcane bagasse ash, evaluate the effects of adsorbent dosage and contact time on Fe adsorption, and determine the most suitable adsorption isotherm model. The synthesized silica was modified with chitosan to increase the number of active adsorption sites. FTIR analysis confirmed the presence of -OH (3384.4 cm^{-1}), -NH_2 (1640 cm^{-1}), Si-O-Si , and Si-O groups (1051.1 , 790.2 , and 708.2 cm^{-1}), indicating successful composite formation. SEM analysis showed a rougher and more granular surface after modification. Adsorption experiments were performed using adsorbent dosages of 0.1, 0.2, and 0.3 g with contact times of 40–120 min. The highest adsorption capacity was 16.2 mg g^{-1} at 0.1 g and 120 min, whereas the highest removal efficiency was 82.5% at 0.2 g and 60 min. The *Langmuir* model provided higher R^2 values (0.9924–0.9995), indicating monolayer adsorption on a homogeneous surface. The silica-chitosan composite is a promising environmentally friendly adsorbent for PCB wastewater treatment, offering sustainable, cost-effective, and efficient heavy metal removal.

Keywords: silica-chitosan, sugarcane bagasse ash, adsorption, fe ions, pcb wastewater

Abstrak

Limbah cair *Printed Circuit Board* (PCB) mengandung ion logam berat Fe yang berpotensi mencemari lingkungan sehingga memerlukan metode pengolahan yang efektif. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi gugus fungsi dan morfologi komposit silika-kitosan berbasis abu ampas tebu, menganalisis pengaruh variasi massa adsorben dan waktu kontak terhadap efisiensi serta kapasitas adsorpsi ion Fe, serta menentukan model isoterm adsorpsi yang paling sesuai. Silika hasil sintesis dimodifikasi dengan kitosan untuk meningkatkan jumlah situs aktif adsorben. Karakterisasi FTIR menunjukkan keberadaan gugus -OH ($3384,4\text{ cm}^{-1}$), -NH_2 (1640 cm^{-1}), serta Si-O-Si dan Si-O ($1051,1$; $790,2$; dan $708,2\text{ cm}^{-1}$) yang mengonfirmasi terbentuknya komposit silika-kitosan. Analisis SEM menunjukkan permukaan menjadi lebih kasar dan granular setelah modifikasi. Pengujian adsorpsi dilakukan menggunakan variasi massa adsorben 0,1; 0,2; dan 0,3 g serta waktu kontak 40–120 menit dengan analisis AAS. Hasil menunjukkan kapasitas adsorpsi menurun seiring peningkatan massa adsorben. Kapasitas adsorpsi tertinggi sebesar $16,2\text{ mg/g}$ diperoleh pada massa 0,1 g selama 120 menit, sedangkan efisiensi tertinggi sebesar 82,5% diperoleh pada massa 0,2 g selama 60 menit. Model *Langmuir* memberikan nilai R^2 lebih tinggi (0,9924–0,9995), menunjukkan adsorpsi berlangsung secara monolayer pada permukaan homogen. Komposit silika-kitosan berpotensi sebagai adsorben ramah lingkungan untuk pengolahan limbah cair PCB.

Kata Kunci: silika-kitosan, abu ampas tebu, adsorpsi, ion fe, limbah cair pcb

1. Pendahuluan

Limbah cair yang mengandung logam berat merupakan salah satu permasalahan lingkungan yang semakin meningkat seiring berkembangnya aktivitas industri dan teknologi. Logam berat bersifat toksik, persisten, dan sulit terdegradasi secara alami sehingga berpotensi mencemari badan air serta membahayakan organisme dan kesehatan manusia. Salah satu logam yang sering ditemukan dalam limbah industri adalah besi (Fe). Keberadaan ion Fe dalam konsentrasi tinggi dapat menurunkan kualitas perairan dan memberikan dampak negatif terhadap ekosistem maupun kesehatan manusia [1]. Salah satu sumber limbah yang berpotensi mengandung ion Fe adalah proses pelarutan tembaga pada *Printed Circuit Board* (PCB) menggunakan larutan ferri klorida (FeCl_3) [2]. Selain melarutkan tembaga dari PCB, penggunaan FeCl_3 juga menyebabkan terbentuknya ion Fe dalam limbah cair sehingga diperlukan pengolahan sebelum limbah dibuang ke lingkungan.

Adsorpsi merupakan salah satu metode yang banyak digunakan untuk menghilangkan logam berat dari limbah cair karena prosesnya sederhana, efisien, ekonomis, serta tidak menghasilkan produk samping yang berbahaya [3]. Salah satu material adsorben yang banyak dikembangkan adalah silika berbasis limbah biomassa. Abu ampas tebu merupakan limbah pertanian yang mengandung silika (SiO_2) sekitar 50,2% sehingga berpotensi dimanfaatkan sebagai sumber silika bernilai tambah [4]. Silika memiliki struktur berpori dan ketahanan kimia yang baik, namun kemampuan adsorpsinya terhadap ion logam masih terbatas karena gugus aktif silanol (Si-OH) pada permukaannya memiliki interaksi yang relatif lemah dengan ion logam [5]. Oleh karena itu, diperlukan modifikasi menggunakan kitosan untuk meningkatkan kemampuan adsorpsinya.

Kitosan merupakan biopolimer alami yang memiliki gugus amina ($-\text{NH}_2$) dan hidroksil ($-\text{OH}$) yang mampu berinteraksi dengan ion logam melalui mekanisme kompleksasi [6]. Kombinasi silika dan kitosan membentuk komposit yang memiliki jumlah situs aktif lebih banyak, struktur pori yang lebih baik, serta stabilitas yang lebih tinggi dibandingkan material penyusunnya [7]. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa modifikasi silika dengan kitosan mampu meningkatkan kemampuan adsorpsi logam berat. Putra dkk. (2022) melaporkan bahwa komposit silika-kitosan berbahan abu sekam padi dengan rasio 2:1 menghasilkan efisiensi adsorpsi ion Fe sebesar 89,776% [4]. Rahma dkk. (2023) juga melaporkan bahwa komposit kitin-silika mampu mengadsorpsi Fe(III) dengan efisiensi sebesar 91,42% dan mengikuti model isoterm *Langmuir* [8]. Selain itu, Putra dan Sari (2015) menunjukkan bahwa modifikasi kitosan menggunakan silika meningkatkan kemampuan adsorpsi ion Cu(II) melalui penambahan gugus aktif pada permukaan adsorben. Hasil-hasil tersebut menunjukkan bahwa modifikasi silika menggunakan kitosan mampu meningkatkan efektivitas adsorpsi logam dibandingkan adsorben tunggal [9].

Efektivitas proses adsorpsi tidak hanya dipengaruhi oleh karakteristik adsorben, tetapi juga oleh kondisi operasi seperti massa adsorben dan waktu kontak. Penelitian terdahulu umumnya menggunakan massa adsorben hingga 0,2 g dengan waktu kontak berkisar 10–100 menit. Meskipun komposit silika-kitosan telah banyak dikembangkan sebagai adsorben logam berat, penelitian mengenai pemanfaatan komposit silika-kitosan berbasis abu ampas tebu untuk mengadsorpsi ion Fe pada limbah cair hasil pelarutan PCB masih terbatas. Selain itu, kajian mengenai pengaruh penggunaan massa adsorben hingga 0,3 g dan waktu kontak hingga 120 menit belum banyak dilaporkan. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan variasi massa adsorben sebesar 0,1; 0,2; dan 0,3 g serta waktu kontak 40, 60, 80, 100, dan 120 menit untuk mengevaluasi pengaruh kedua parameter tersebut terhadap efisiensi dan kapasitas adsorpsi ion Fe.

Penelitian ini bertujuan untuk mengkarakterisasi komposit silika-kitosan berbasis abu ampas tebu menggunakan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) dan *Scanning Electron Microscopy* (SEM), menganalisis pengaruh variasi massa adsorben dan waktu kontak terhadap efisiensi serta kapasitas adsorpsi ion Fe pada limbah cair PCB, serta menentukan model isoterm adsorpsi yang paling sesuai.

2. Metode Penelitian

Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi abu ampas tebu sebagai sumber silika, kitosan, natrium hidroksida (NaOH), asam klorida (HCl), asam asetat, akuades, dan limbah cair *Printed Circuit Board* (PCB) sebagai sampel uji. Peralatan utama yang digunakan meliputi furnace, oven, magnetic stirrer, hotplate, neraca analitik, ayakan 100 mesh, gelas laboratorium, kertas saring Whatman No. 42, serta instrumen *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR), *Scanning Electron Microscopy* (SEM), dan *Atomic Absorption Spectrophotometer* (AAS).

Preparasi Silika dari Abu Ampas Tebu

Ampas tebu dikeringkan, kemudian dikalsinasi pada suhu 700 °C selama 4 jam untuk memperoleh abu. Abu yang dihasilkan dihaluskan dan diayak menggunakan ayakan 100 mesh. Selanjutnya, abu direndam dalam larutan HCl 1 M dengan perbandingan 1:10 (b/v) selama 2 jam untuk menghilangkan pengotor logam, kemudian dicuci hingga netral dan dikeringkan pada suhu 100 °C. Ekstraksi silika dilakukan menggunakan larutan NaOH 2 M dengan perbandingan 1:6 (b/v) pada suhu 80 °C selama 1,5 jam sehingga diperoleh larutan natrium silikat. Larutan tersebut kemudian dipresipitasi menggunakan HCl 1 M hingga mencapai pH netral dan didiamkan selama 24 jam untuk membentuk gel silika. Gel yang diperoleh dicuci hingga netral dan dikeringkan pada suhu 80 °C selama 6 jam sehingga diperoleh silika kering.

Sintesis Komposit Silika–Kitosan

Larutan kitosan disiapkan dengan melarutkan 2 g kitosan ke dalam 100 mL larutan asam asetat 2% (v/v). Sebanyak 4 g silika kemudian ditambahkan ke dalam larutan kitosan sehingga diperoleh perbandingan silika:kitosan sebesar 2:1 (b/v). Campuran diaduk hingga homogen dan didiamkan selama 18 jam pada suhu ruang. Endapan yang terbentuk dipisahkan menggunakan penyaringan, dicuci hingga pH netral, kemudian dikeringkan pada suhu 100 °C hingga massa konstan. Padatan yang diperoleh dihaluskan dan diayak menggunakan ayakan 100 mesh sebelum digunakan sebagai adsorben.

Karakterisasi Adsorben

Karakterisasi komposit silika–kitosan dilakukan menggunakan FTIR pada rentang bilangan gelombang 4000–400 cm⁻¹ untuk mengidentifikasi gugus fungsi penyusun komposit. Morfologi permukaan silika dan komposit diamati menggunakan SEM untuk mengevaluasi perubahan struktur permukaan setelah proses modifikasi.

Uji Adsorpsi

Limbah cair PCB terlebih dahulu dipreparasi dengan menambahkan larutan NaOH 0,5 M hingga mencapai pH 5, kemudian disaring untuk memisahkan endapan yang terbentuk. Sebanyak 50 mL sampel limbah cair digunakan pada setiap percobaan adsorpsi dengan konsentrasi awal ion Fe sebesar 43,572 mg/L. Proses adsorpsi dilakukan secara batch pada suhu ruang menggunakan variasi massa adsorben sebesar 0,1; 0,2; dan 0,3 g serta waktu kontak 40, 60, 80, 100, dan 120 menit. Setelah proses adsorpsi selesai, campuran disaring dan filtrat dianalisis menggunakan *Atomic Absorption Spectrophotometer* (AAS) untuk menentukan konsentrasi ion Fe setelah adsorpsi.

Analisis Data

Kapasitas adsorpsi (q_e) dan efisiensi adsorpsi (%) dihitung menggunakan Persamaan (1) dan Persamaan (2).

$$Q_e = \frac{(C_0 - C_e) V}{W} \quad (1)$$

$$\% \text{ efisiensi} = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100\% \quad (2)$$

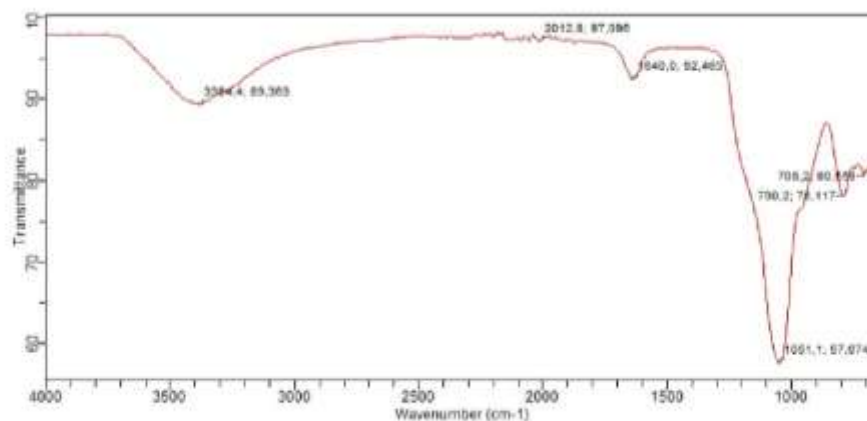
dengan C_0 adalah konsentrasi awal ion Fe (mg/L), C_e adalah konsentrasi ion Fe pada keadaan setimbang (mg/L), V adalah volume larutan (L), dan W adalah massa adsorben (g).

Data isoterm adsorpsi dianalisis menggunakan model *Langmuir* dan *Freundlich*. Model *Langmuir* diperoleh melalui hubungan linear antara C_e/q_e terhadap C_e , sedangkan model *Freundlich* dianalisis melalui hubungan linear antara $\ln q_e$ terhadap $\ln C_e$. Model isoterm yang paling sesuai ditentukan berdasarkan nilai koefisien determinasi (R^2) tertinggi [10].

3. Hasil dan Diskusi

3.1 Karakterisasi Komposit Silika–Kitosan Menggunakan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy*

Spektrum *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) komposit silika–kitosan mengonfirmasi terbentuknya gugus hidroksil (–OH), amina (–NH₂), siloksan (Si–O–Si), dan silanol (Si–O). Pita serapan pada 3384,4 cm⁻¹ berkaitan dengan vibrasi regangan gugus –OH, sedangkan pita pada 1640 cm⁻¹ menunjukkan keberadaan gugus –NH₂ dari kitosan.

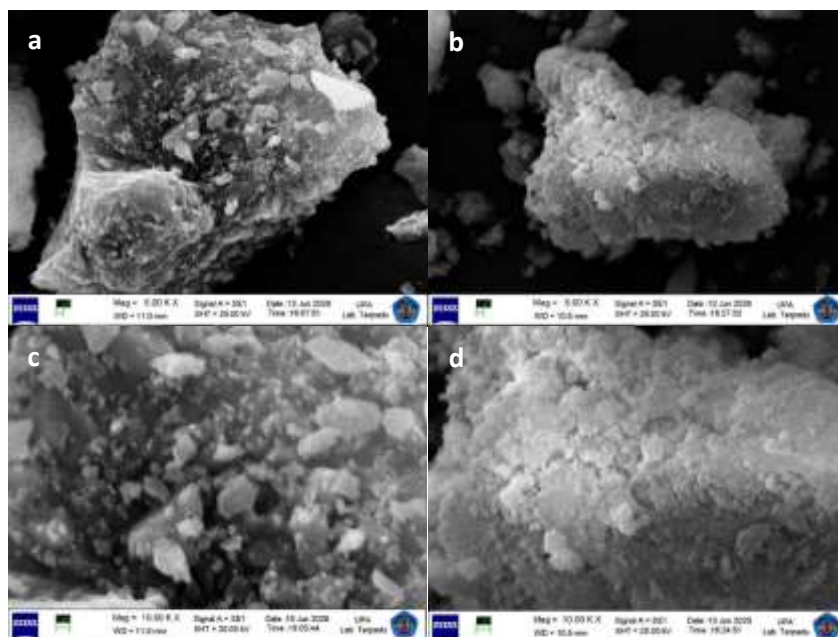


Gambar 1. Hasil Analisis FTIR pada Komposit Silika–Kitosan

Pita serapan pada $1051,1\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan vibrasi ulur asimetri Si–O–Si, sementara pita pada $790,2\text{ cm}^{-1}$ dan $708,2\text{ cm}^{-1}$ mengindikasikan vibrasi ikatan Si–O yang merupakan karakteristik struktur silika. Keberadaan gugus-gugus tersebut menunjukkan bahwa modifikasi silika menggunakan kitosan telah berlangsung dengan baik sehingga menghasilkan komposit yang memiliki situs aktif untuk mengadsorpsi ion logam. Hasil ini konsisten dengan penelitian Nisa dkk. (2022) dan Riskadita (2017) yang melaporkan karakteristik FTIR serupa pada komposit silika–kitosan [11][12].

3.2 Karakterisasi Morfologi Komposit Silika–Kitosan Menggunakan *Scanning Electron Microscopy*

Silika hasil ekstraksi memiliki morfologi permukaan yang kasar dengan bentuk partikel tidak beraturan dan ukuran partikel yang bervariasi. Celah antara partikel masih terlihat pada permukaan silika, yang menunjukkan struktur khas material hasil ekstraksi.



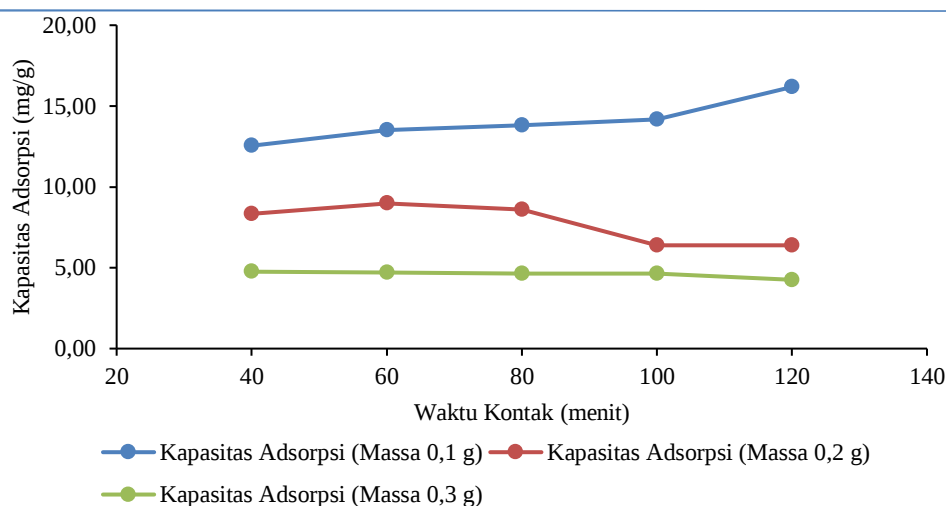
Gambar 1. Morfologi permukaan silika perbesaran 5000x (a) Morfologi permukaan silika-kitosan perbesaran 5000x (b) Morfologi permukaan silika perbesaran 10000x (c) Morfologi permukaan silika-kitosan 10000x (d)

Setelah dimodifikasi menggunakan kitosan, morfologi permukaan berubah menjadi lebih kasar dan granular dibandingkan silika tanpa modifikasi. Partikel tampak membentuk agregat yang tersebar pada permukaan silika, mengindikasikan bahwa kitosan telah terdeposisi dan membentuk komposit silika–kitosan. Meskipun distribusi kitosan belum sepenuhnya homogen, perubahan tekstur permukaan menunjukkan bahwa proses modifikasi telah berlangsung.

Perubahan morfologi tersebut didukung oleh hasil karakterisasi FTIR yang menunjukkan keberadaan gugus amina ($-\text{NH}_2$), hidroksil ($-\text{OH}$), serta gugus Si–O–Si dan Si–O pada material komposit. Kehadiran gugus-gugus fungsi tersebut berpotensi meningkatkan jumlah situs aktif sehingga mendukung proses adsorpsi ion Fe.

3.3 Pengaruh Variasi Massa Adsorben dan Waktu Kontak terhadap Kapasitas Adsorpsi

Kapasitas adsorpsi komposit silika–kitosan terhadap ion Fe dipengaruhi oleh variasi massa adsorben dan waktu kontak. Kapasitas adsorpsi tertinggi diperoleh pada massa adsorben 0,1 g, yaitu sebesar 12,5–16,2 mg/g, diikuti massa adsorben 0,2 g sebesar 6,4–9,0 mg/g, sedangkan massa adsorben 0,3 g menghasilkan kapasitas adsorpsi terendah, yaitu 4,3–4,8 mg/g. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan massa adsorben menyebabkan penurunan kapasitas adsorpsi per satuan massa adsorben. Penurunan kapasitas adsorpsi disebabkan oleh konsentrasi awal ion Fe yang tetap, sementara jumlah adsorben yang digunakan semakin besar. Penambahan massa adsorben meningkatkan jumlah situs aktif yang tersedia, namun jumlah ion Fe dalam larutan tidak mencukupi untuk menempati seluruh situs aktif tersebut. Akibatnya, sebagian situs aktif tidak terisi sehingga jumlah ion Fe yang teradsorpsi per satuan massa adsorben menjadi lebih rendah. Selain itu, peningkatan massa adsorben dapat memicu aglomerasi partikel yang menyebabkan sebagian permukaan aktif saling menutupi, sehingga luas permukaan efektif dan akses ion Fe menuju situs aktif berkurang.



Gambar 3. Pengaruh Massa adsorben dan Waktu Kontak terhadap Kapasitas adsorpsi

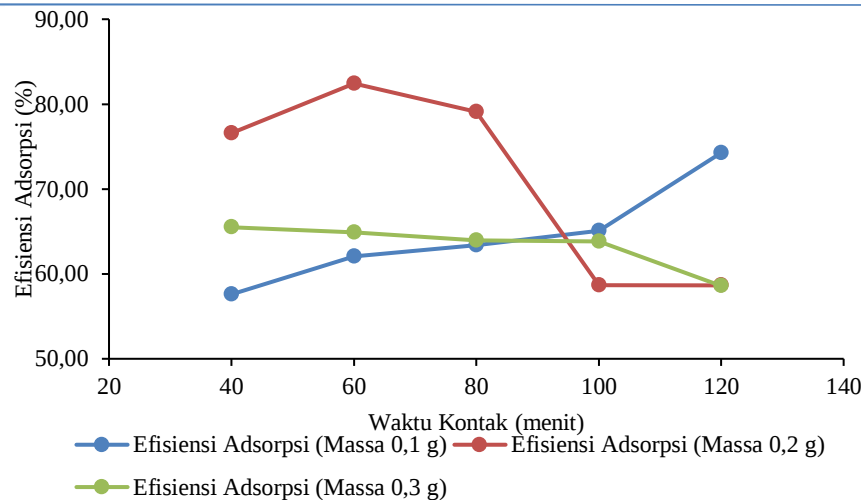
Pengaruh waktu kontak menunjukkan pola yang berbeda pada setiap variasi massa adsorben. Pada massa adsorben 0,1 g, kapasitas adsorpsi meningkat secara bertahap dari 12,5 mg/g pada menit ke-40 menjadi 16,2 mg/g pada menit ke-120. Peningkatan ini menunjukkan bahwa proses perpindahan ion Fe dari larutan menuju permukaan adsorben masih berlangsung sehingga kesetimbangan adsorpsi belum tercapai hingga akhir waktu pengamatan. Sebaliknya, pada massa adsorben 0,2 g dan 0,3 g, kapasitas adsorpsi meningkat hingga menit ke-60, kemudian cenderung konstan atau sedikit menurun. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kesetimbangan adsorpsi telah tercapai lebih cepat sehingga penambahan waktu kontak tidak lagi meningkatkan jumlah ion Fe yang teradsorpsi secara signifikan. Penurunan kapasitas adsorpsi setelah waktu optimum diduga berkaitan dengan terjadinya pelepasan (desorpsi) sebagian ion Fe akibat tercapainya kesetimbangan antara proses adsorpsi dan desorpsi [13] .

Hasil penelitian ini sejalan dengan Putra dkk. (2022), yang melaporkan bahwa kapasitas adsorpsi meningkat seiring bertambahnya waktu kontak hingga mencapai kondisi optimum, kemudian cenderung konstan atau menurun setelah sistem mencapai kesetimbangan adsorpsi [4]. Berdasarkan hasil penelitian, kondisi optimum diperoleh pada massa adsorben 0,1 g dengan waktu kontak 120 menit yang menghasilkan kapasitas adsorpsi sebesar 16,2 mg/g. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pada konsentrasi awal ion Fe yang digunakan, massa adsorben 0,1 g memberikan pemanfaatan situs aktif yang lebih efektif dibandingkan massa adsorben yang lebih besar.

3.4 Pengaruh Variasi Massa Adsorben dan Waktu Kontak terhadap Efisiensi Adsorpsi

Efisiensi adsorpsi ion Fe menunjukkan pola yang berbeda pada setiap variasi massa adsorben (**Gambar 4**). Pada massa adsorben 0,1 g, efisiensi adsorpsi meningkat secara bertahap seiring bertambahnya waktu kontak hingga mencapai 74,3% pada menit ke-120. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa proses perpindahan ion Fe menuju situs aktif adsorben masih berlangsung sehingga kesetimbangan adsorpsi belum tercapai selama waktu pengamatan. Berbeda dengan massa adsorben 0,3 g, efisiensi adsorpsi relatif stabil pada seluruh variasi waktu kontak.

Kondisi ini mengindikasikan bahwa jumlah situs aktif yang tersedia telah mencukupi untuk mengadsorpsi ion Fe sejak awal proses, sehingga penambahan waktu kontak tidak memberikan peningkatan efisiensi yang signifikan. Sementara itu, massa adsorben 0,2 g menunjukkan efisiensi adsorpsi yang meningkat hingga mencapai nilai maksimum sebesar 82,5% pada menit ke-60, kemudian menurun pada waktu kontak berikutnya. Penurunan tersebut mengindikasikan bahwa sistem telah mencapai kondisi kesetimbangan adsorpsi, sehingga laju adsorpsi dan desorpsi menjadi seimbang. Akibatnya, penambahan waktu kontak tidak lagi meningkatkan jumlah ion Fe yang teradsorpsi secara signifikan, bahkan memungkinkan terjadinya pelepasan kembali sebagian ion Fe ke dalam larutan.

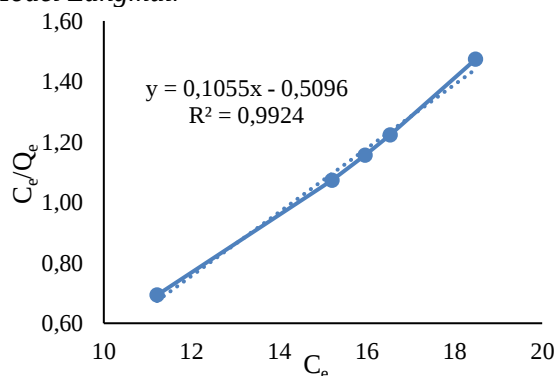


Gambar 4. Pengaruh Massa adsorben dan Waktu Kontak terhadap Efisiensi adsorpsi

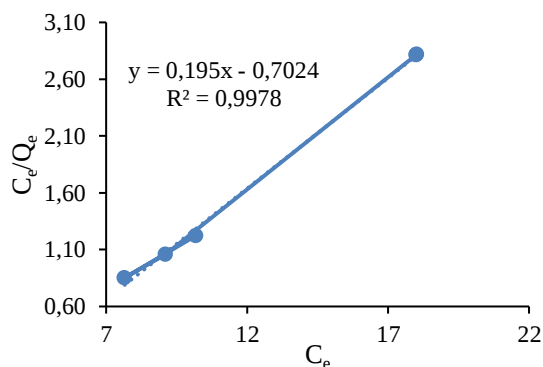
Hasil penelitian ini sejalan dengan Bagaskoro dkk. (2020), yang melaporkan bahwa peningkatan waktu kontak meningkatkan efisiensi adsorpsi hingga mencapai kondisi optimum, kemudian cenderung konstan atau menurun setelah sistem mencapai kesetimbangan. Perbedaan pola adsorpsi pada setiap massa adsorben menunjukkan bahwa efektivitas adsorpsi dipengaruhi oleh keseimbangan antara jumlah situs aktif yang tersedia dan konsentrasi ion Fe dalam larutan [14]. Pada konsentrasi awal ion Fe yang digunakan dalam penelitian ini, massa adsorben 0,2 g memberikan kondisi yang paling optimum dengan efisiensi adsorpsi sebesar 82,5%, sedangkan massa 0,1 g masih menunjukkan kecenderungan peningkatan adsorpsi hingga akhir waktu pengamatan dan massa 0,3 g tidak memberikan peningkatan efisiensi yang berarti meskipun jumlah adsorben ditingkatkan.

3.5 Analisis Model Isoterm Adsorpsi Fe Menggunakan Model *Langmuir* dan *Freundlich*

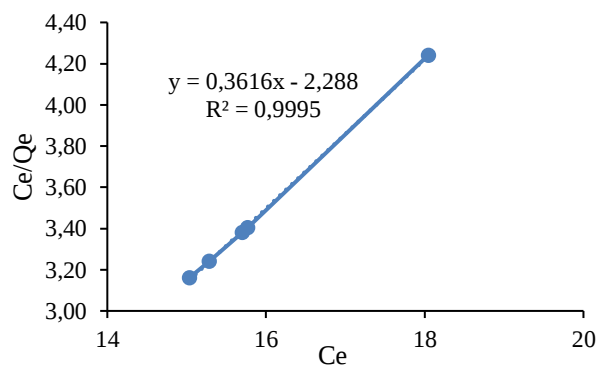
Model *Langmuir*



(a) massa adsorben 0,1 g



(b) massa adsorben 0,2 g

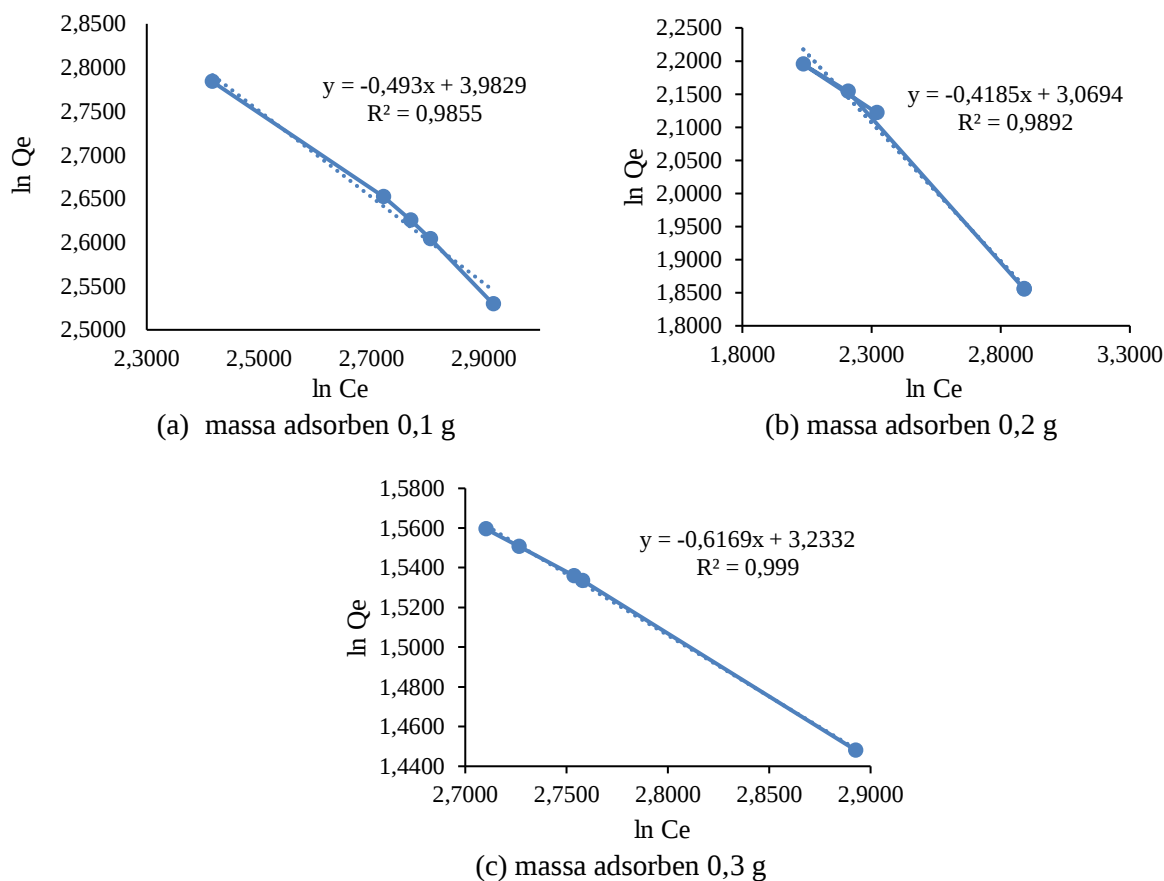


(c) massa adsorben 0,3 g

Gambar 5. Hubungan antara C_e dan C_e/Q_e berdasarkan model isoterm *Langmuir* pada variasi massa adsorben 0,1 g, 0,2 g, dan 0,3 g

Model isoterm *Langmuir* menunjukkan hubungan linear yang sangat baik pada seluruh variasi massa adsorben (**Gambar 5**). Persamaan linear yang diperoleh berturut-turut adalah $y = 0,1055x - 0,5096$ pada massa adsorben 0,1 g, $y = 0,195x - 0,7024$ pada massa adsorben 0,2 g, dan $y = 0,3616x - 2,288$ pada massa adsorben 0,3 g. Nilai koefisien determinasi (R^2) yang diperoleh masing-masing sebesar 0,9924; 0,9978; dan 0,9995. Nilai R^2 yang mendekati 1 menunjukkan bahwa model *Langmuir* mampu menggambarkan hubungan antara konsentrasi ion Fe pada keadaan setimbang (C_e) dan kapasitas adsorpsi (q_e) dengan tingkat kesesuaian yang tinggi.

Model *Freundlich*



Gambar 6. Hubungan antara $\ln C_e$ dan $\ln Q_e$ berdasarkan model isoterm *Freundlich* pada variasi massa adsorben 0,1 g, 0,2 g, dan 0,3 g

Model isoterm *Freundlich* menunjukkan hubungan linear yang baik pada seluruh variasi massa adsorben (**Gambar 6**). Persamaan linear yang diperoleh berturut-turut adalah $y = -0,493x + 3,9829$ pada massa adsorben 0,1 g, $y = -0,4185x + 3,0694$ pada massa adsorben 0,2 g, dan $y = -0,6169x + 3,2332$ pada massa adsorben 0,3 g. Nilai koefisien determinasi (R^2) yang diperoleh masing-masing sebesar 0,9855; 0,9892; dan 0,9990. Nilai R^2 yang mendekati 1 menunjukkan bahwa model *Freundlich* mampu menggambarkan hubungan antara konsentrasi kesetimbangan (C_e) dan kapasitas adsorpsi (q_e) dengan tingkat kesesuaian yang tinggi. Model *Freundlich* mengasumsikan bahwa proses adsorpsi berlangsung pada permukaan adsorben yang heterogen dengan distribusi energi adsorpsi yang tidak seragam serta memungkinkan terjadinya adsorpsi multilapis (multilayer).

Perbandingan nilai koefisien determinasi menunjukkan bahwa model *Langmuir* memiliki nilai R^2 yang secara konsisten lebih tinggi dibandingkan model *Freundlich* pada seluruh variasi massa adsorben. Nilai R^2 model *Langmuir* berturut-turut sebesar 0,9924; 0,9978; dan 0,9995, sedangkan model *Freundlich* sebesar 0,9855; 0,9892; dan 0,9990 untuk massa adsorben 0,1; 0,2; dan 0,3 g. Hasil tersebut menunjukkan bahwa model *Langmuir* memberikan tingkat kesesuaian yang lebih baik dalam menggambarkan proses adsorpsi ion Fe oleh komposit silika–kitosan. Hal ini mengindikasikan bahwa mekanisme adsorpsi cenderung berlangsung secara monolayer pada permukaan adsorben yang relatif homogen dengan distribusi situs aktif yang seragam [15]. Temuan ini menunjukkan bahwa interaksi antara ion Fe dan permukaan

komposit silika-kitosan lebih sesuai dijelaskan oleh asumsi model *Langmuir* dibandingkan model *Freundlich*.

4. Kesimpulan

Komposit silika-kitosan berbasis abu ampas tebu berhasil disintesis, yang dikonfirmasi melalui karakterisasi FTIR dengan munculnya gugus -OH ($3384,4 \text{ cm}^{-1}$), -NH_2 (1640 cm^{-1}), Si-O-Si ($1051,1 \text{ cm}^{-1}$), dan Si-O ($790,2 \text{ cm}^{-1}$), serta didukung oleh hasil SEM yang menunjukkan perubahan morfologi permukaan menjadi lebih kasar dan granular setelah modifikasi menggunakan kitosan. Variasi massa adsorben dan waktu kontak berpengaruh terhadap efisiensi dan kapasitas adsorpsi ion Fe. Kapasitas adsorpsi tertinggi diperoleh pada massa adsorben 0,1 g dengan waktu kontak 120 menit sebesar 16,2 mg/g, sedangkan efisiensi adsorpsi tertinggi diperoleh pada massa adsorben 0,2 g dengan waktu kontak 60 menit sebesar 82,5%. Analisis isoterm menunjukkan bahwa proses adsorpsi lebih sesuai mengikuti model *Langmuir* dengan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9924–0,9995, yang mengindikasikan bahwa adsorpsi berlangsung secara monolayer pada permukaan adsorben yang relatif homogen.

5. Daftar Pustaka

- [1] N. H. Rossavianty, *Adsorpsi Ion Logam Cu (II) Pada Air Lindi Menggunakan Arang Aktif Dari Umbi Porang (Amorphophallus muelleri B .)*, no. II. 2024.
- [2] O. Sisso, S. Dor, D. Eliyahu, E. Sabatani, dan N. Eliaz, "Corrosion inhibition of copper in ferric chloride solutions with organic inhibitors," *npj Mater. Degrad.*, vol. 4, no. 1, 2020, doi: 10.1038/s41529-020-00139-0.
- [3] M. Tunnisa, T. Harmawan, dan Halimatussakhidiah, "Pengaruh Modifikasi Silika pada Karbon Aktif Ampas Tebu terhadap Penurunan Kapasitas Adsorpsi Ion Fe (III)," *Quim. J. Kim. Sains dan Terap.*, vol. 8, no. 1, pp. 10–17, 2026.
- [4] R. Putra, R. Elvia, dan H. Amir, "Sintesis Silika-Kitosan Untuk Menurunkan Kadar Ion Besi Dalam Air Permukaan," *Alotrop*, vol. 6, no. 1, pp. 15–27, 2022, doi: 10.33369/atp.v6i1.20318.
- [5] Sjamsiah, K. Ramadani, dan Hermawan, "Sintesis Membran Silika Kitosan dari Abu Ampas Tebu (Bagasse)," *Al-Kimia*, vol. 5, no. 1, pp. 81–88, 2017, doi: 10.24252/al-kimia.v5i1.2857.
- [6] A. Febriasari, A. Maulana, dan Nurdin, "Uji Kemampuan Kitosan Dan Selulosa Pada Proses Penjerapan Logam Fe Dan Zn Yang Terkandung Dalam Limbah Oli Bekas Dengan Metode Kolom Filtrasi," *Anal. Anal. Environ. Chem.*, vol. 1, no. 01, pp. 1–7, 2016.
- [7] Jabli, Mahjoub. "Synthesis, characterization, and assessment of cationic and anionic dye adsorption performance of functionalized silica immobilized chitosan bio-polymer." *International journal of biological macromolecules* 153 (2020): 305-316.
- [8] M. Rahma, Hasri., dan D. E. Pratiwi, "Studi Adsorpsi Logam Fe (III) Menggunakan Kopolimer Kitin Silika Sekam Padi," *Sainsmat J. Ilm. Ilmu Pengetah. Alam*, vol. 12, no. 2, p. 200, 2023, doi: 10.35580/sainsmat122439262023.
- [9] Putra W. R. dan R. L. P. Sari, "Adsorpsi Ion Logam Cu(II) Menggunakan Kitosan Dari Limbah Cangkang Kepiting Termodifikasi Silika," pp. 1–11, 2015.
- [10] Aljamali, Nagham Mahmood, R. Khdur, and Intisar Obaid Alfatlawi. "Physical and chemical adsorption and its applications." *International Journal of Thermodynamics and Chemical Kinetics* 7.2 (2021): 1-8.
- [11] M. K. Nisa, I. Y. L. Sari, dan S. Koesnarpardi, "Kitosan – Silika Dan Pengaplikasian Terhadap Adsorpsi Ion Cd 2 + The Manufacture And Characterization Of Chitosan-Silica Adsorben And The Application To Cd²⁺ Ion Adsorption," *J. At.*, vol. 07, no. 1, pp. 30–34, 2022.
- [12] R. Riskadita, "Pengaruh pH, lama kontak, dan konsentrasi pada adsorpsi ion logam Cd²⁺ menggunakan kitosan-silika," *Malang Skripsi Univ. Brawijaya*, 2017, [Online]. Tersedia: https://www.academia.edu/download/55194778/Rani_InshaaAllah_2.pdf
- [13] F. A. R. Putri dan C. Asnadi, "Pemisahan Ion Besi dalam Larutan dengan Teknik Adsorpsi Menggunakan Karbon Aktif," *War. Akab*, vol. 45, no. 2, pp. 51–55, 2021, doi: 10.55075/wa.v45i2.35.
- [14] A. P. Bagaskoro, L. F. Ayunda, dan N. D. Siswati, "Pemanfaatan Bulu Ayam Sebagai Adsorben Logam Fe Dalam Air Tanah," *J. Chem. Process Eng. ChemPro J.*, vol. 01, no. 01, pp. 1–8, 2020, [Online]. Tersedia: www.chempro.upnjatim.ac.id
- [15] M. Paradise, "Karakterisasi Isoterm Adsorpsi Fe dan Mn Pada Sampel Air Asam Tambang," *Rekayasa Teknol. Ind. dan Inf.*, vol. 2023, no. November, pp. 988–993, 2023, [Online]. Tersedia: <http://journal.itny.ac.id/index.php/ReTII>