



## ISOTHERMIC ADSORPTION STUDY OF NITRATE ION ADSORPTION IN BIOETHANOL WASTE USING QUATERNARY AMMONIUM POLYMER

Nafira Alfi Zaini Amrillah<sup>1)</sup>, Aster Rahayu<sup>1)\*</sup>, Dhias Cahya Hakika<sup>1)</sup>, Vivi Sisca<sup>2)</sup>, Veranica<sup>1)</sup>,  
Firda Mahira Alfiata Chusna<sup>1)</sup>, Lia Anggresani<sup>3)</sup>, Lee Wah Lim<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Ahmad Dahlan, D.I. Yogyakarta, 55191, Indonesia.

<sup>2)</sup>Pusat Penelitian Kimia, Badan Riset dan Inovasi Nasional, B.J. Habiebie Science and Techno Park, Serpong, South Tangerang, Banten, 15314, Indonesia.

<sup>3)</sup>Department of Chemistry and Biomolecular Science, Faculty of Engineering, Gifu University, Japan.

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 20 Nov 2024,

Revised 07 Dec 2024,

Accepted 09 Dec 2024,

Available online 30 Jan 2025

#### Keywords:

- ✓ Adsorption,
- ✓ Polymer Ammonium Quaternary,
- ✓ Bioethanol,
- ✓ Isoterm,
- ✓ Nitrate Ions

\*corresponding author:

[aster.rahayu@che.uad.ac.id](mailto:aster.rahayu@che.uad.ac.id)

Phone:-

[https://doi.org/10.31938/jsn.v](https://doi.org/10.31938/jsn.v15i1.770)

[15i1.770](https://doi.org/10.31938/jsn.v15i1.770)

### ABSTRACT

The global shift towards renewable energy sources has led to a significant increase in bioethanol production, particularly from sugar mills. Despite being an environmentally friendly alternative to fossil fuels, bioethanol production produces large amounts of waste containing dangerous contaminants such as nitrate ions ( $\text{NO}_3^-$ ). These contaminants pose severe environmental and health risks, including water pollution and eutrophication. This study explores the use of ammonium polymer as an adsorbent and the influence of pH in the adsorption process as a promising technique for removing nitrate ions from bioethanol waste. Based on the analysis that has been carried out, the optimal pH for adsorption of nitrate ions is around 9, where the removal efficiency (%RE) reaches 98.43% and the adsorption capacity ( $Q_e$ ) is 24.86 mg/g. These experiments show that the Freundlich model, with a heterogeneity factor ( $n$ ) of 1.0947 and a Freundlich constant ( $K_F$ ) of  $1.92 \times 10^3$  units, provides the best fit to the adsorption data, indicating a heterogeneous adsorption process with a strong affinity for nitrate ions.

### Studi Adsorpsi Isotermis pada Penyerapan Ion Nitrat dalam Limbah Bioetanol dengan Polimer Amonium Kuartener

#### ABSTRAK

Pergeseran global menuju sumber energi terbarukan telah menyebabkan peningkatan signifikan dalam produksi bioetanol, khususnya dari pabrik gula. Meskipun merupakan alternatif bahan bakar fosil yang ramah lingkungan, produksi bioetanol menghasilkan sejumlah besar limbah yang mengandung kontaminan berbahaya seperti ion nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ). Kontaminan ini menimbulkan risiko lingkungan dan kesehatan yang parah, termasuk polusi air dan eutrofikasi. Studi ini mengeksplorasi penggunaan polimer ammonium sebagai adsorben dan pengaruh pH dalam proses adsorpsi sebagai teknik yang menjanjikan untuk menghilangkan ion nitrat dari limbah bioetanol. Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, pH optimal untuk adsorpsi ion nitrat adalah sekitar 9, dimana efisiensi *removal* (% RE) mencapai 98,43% dan kapasitas adsorpsi ( $Q_e$ ) 24,86 mg/g. Eksperimen ini menunjukkan bahwa isoterm model Freundlich, dengan faktor heterogenitas ( $n$ ) sebesar 1,0947 dan konstanta Freundlich ( $K_F$ ) sebesar  $1,92 \times 10^3$  unit, memberikan kesesuaian terbaik untuk data adsorpsi, menunjukkan proses adsorpsi heterogen dengan kuat afinitas terhadap ion nitrat.

Kata Kunci: Adsorpsi, Polimer Amonium Kuartener, Bioetanol, Isotermis, Ion Nitrat

## PENDAHULUAN

Dalam sepuluh tahun terakhir, pencemaran lingkungan telah menjadi isu utama, hal ini

diakibatkan karena meningkatnya aktivitas manusia dan pesatnya perkembangan industri khususnya yang berkaitan dengan penggunaan air. Sebagai salah satu elemen yang cukup vital, bagi



kehidupan, air berperan dalam berbagai bidang seperti industri dan pertanian. Pergeseran global menuju sumber energi terbarukan telah meningkatkan produksi bioetanol secara signifikan. Selama proses terjadi, produksi bioetanol menghasilkan hasil samping berupa residu cair buangan. Limbah cair ini berwarna coklat, memiliki bau yang khas dan pH yang rendah (di bawah 4). Limbah ini tentu akan mencemari lingkungan jika langsung dibuang tanpa adanya pengolahan.

Limbah cair yang dihasilkan dari produksi bioetanol memiliki tingkat kebutuhan oksigen kimia (*Chemical Oxygen Demand* atau COD) yang sangat tinggi, sering kali melebihi 100.000 mg/L. Menurut Harahap et al. (2020), limbah cair dari pabrik bioetanol menunjukkan kadar COD yang signifikan, yang mencerminkan jumlah oksigen yang diperlukan untuk mengoksidasi senyawa organik dalam air limbah (Harahap et al., 2022). Dalam setiap liter produksi bioetanol, dihasilkan sekitar 12-15 kali lipat limbah cair, yang mengandung berbagai ion anorganik seperti nitrat (Saminem, 2021). Limbah ini, jika tidak diolah dengan tepat, dapat menyebabkan masalah lingkungan seperti eutrofikasi pada badan air, yang berpotensi menurunkan kualitas air dan mengganggu ekosistem akuatik (Tunjung Murti Pratiwi et al., 2019).

Meskipun bioetanol merupakan alternatif yang lebih ramah lingkungan dibandingkan bahan bakar fosil, produksinya menghasilkan limbah dalam jumlah besar, yang seringkali mengandung kontaminan berbahaya seperti ion nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ). Ion nitrat jika tidak dikelola dengan baik, dapat menyebabkan masalah lingkungan dan kesehatan yang serius, termasuk polusi air dan eutrofikasi (Rajabi et al., 2023). Selain itu, paparan nitrat dalam jangka panjang telah dikaitkan dengan peningkatan risiko beberapa jenis kanker, termasuk kanker kolorektal, kandung kemih, ginjal, gastrointestinal, ovarium, dan tiroid. Beberapa teknik pengolahan limbah bioetanol telah dikembangkan untuk meminimalkan dampak toksik terhadap lingkungan.

Metode-metode fisik, kimia dan biologis konvensional seperti koagulasi/flokulasi, oksidasi lanjutan, dan proses aerob dan anaerob sering kali diterapkan dalam proses penghilangan ion nitrat (Karimi et al., 2021). Namun, teknik-teknik konvensional ini sering memerlukan bahan kimia tambahan, seperti koagulan, yang tidak ramah lingkungan karena dapat menghasilkan produk sampingan berupa lumpur yang perlu diolah lebih lanjut. Selain itu, beberapa polutan dalam limbah

bioetanol sulit terurai secara kimia sehingga membuat metode tradisional kurang efektif. Oleh karena itu, diperlukan pengembangan metode baru yang lebih ramah lingkungan dan efisien untuk mengatasi dampak negatif limbah bioetanol.

Salah satu teknologi alternatif dalam pengolahan limbah bioetanol adalah adsorpsi, yang memanfaatkan prinsip isoterm adsorpsi yang secara efektif menangkap dan menghilangkan ion nitrat, sehingga mengurangi dampak lingkungan dari produksi bioetanol (Mustapha et al., 2019). Adsorpsi merupakan metode yang serbaguna dan efektif dalam menghilangkan polutan organik, nutrisi, serta logam berat dari limbah. Metode yang cukup efektif untuk mengolah air limbah ini adalah adsorpsi, yang melibatkan penggunaan bahan seperti polimer untuk menghilangkan kontaminan. Proses adsorpsi sangat efisien, hemat biaya, dan terukur, sehingga cocok untuk operasi skala kecil dan besar (Bremers et al., 2010). Secara keseluruhan, adsorpsi adalah metode serbaguna dan efisien untuk mengolah air limbah bioetanol, dan memastikan bahwa jejak lingkungan dari produksi bioetanol dapat diminimalkan (Oladipo et al., 2023).

Keberhasilan adsorpsi pada pengolahan limbah cair sangat bergantung pada pemilihan jenis adsorben dan kondisi operasi yang digunakan. Adsorben dengan luas permukaan yang lebih tinggi dan struktur yang lebih berpori, seperti karbon aktif dan tabung nano karbon, umumnya memiliki kapasitas adsorpsi yang lebih tinggi karena peningkatan jumlah lokasi yang tersedia untuk melekat pada kontaminan. Kehadiran gugus fungsional tertentu pada permukaan adsorben juga dapat meningkatkan kemampuannya untuk menarik dan mengikat polutan. Selain itu, sifat kontaminan, termasuk ukuran molekul, polaritas, dan kelarutannya, memainkan peran penting dalam efisiensi adsorpsi (Sabzehmeidani et al., 2021). Dengan pemilihan adsorben yang optimal dan pengaturan proses yang tepat, adsorpsi dapat menjadi solusi biaya rendah untuk pengelolaan limbah bioetanol dan mengurangi dampak lingkungan yang dihasilkannya. Adsorpsi terjadi ketika interaksi antara zat terlarut (adsorbat) dan permukaan padatan (adsorben) terjadi. Metode ini dikenal sebagai teknik yang ekonomis, mudah diregenerasi, dan efisien dalam pengelolaan limbah bioetanol.

Proses adsorpsi melibatkan interaksi antara molekul adsorbat dengan permukaan bahan adsorben. Berbagai faktor, seperti suhu, pH, dan

sifat adsorben, memainkan peran penting dalam menentukan kapasitas dan kinetika adsorpsi (Kanagalakshmi et al., 2024). Memahami faktor-faktor tersebut penting untuk mengoptimalkan proses adsorpsi agar bisa dijadikan acuan dalam penerapannya pada berbagai kasus. Pada penelitian sebelumnya, diperoleh bahwa temperatur memiliki efek yang signifikan terhadap presentase *removal* ion, kapasitas penyerapan, dan model adsorpsi isotermisnya (Veranica et al., 2024). Oleh karena itu, pada artikel ini akan dibahas bagaimana pengaruh pH limbah bioetanol pada Pabrik Gula Madukismo terhadap proses adsorpsi ion nitrat. Studi ini juga menyelidiki model isoterm adsorpsi, seperti model Langmuir dan Freundlich, untuk menggambarkan kesetimbangan adsorpsi dan memberikan wawasan tentang mekanisme adsorpsi. Temuan ini diharapkan dapat berkontribusi pada pengembangan praktik pengelolaan limbah berkelanjutan di industri bioetanol, mendorong teknologi produksi yang lebih bersih, dan menjaga kesehatan lingkungan.

## BAHAN DAN METODE

### Bahan dan Alat

Adsorbat yang digunakan dalam penelitian ini adalah limbah bioetanol. Polimer amonium disintesis menggunakan bahan-bahan berikut : 2-[(metakrililoksi)etil]trimetilamonium klorida (META), etilen dimetakrilat (EDMA), isopropil alkohol, metanol, dan etanol (semua dari Wako 1st Grade, Jepang). Selain itu, 2,2'-azobisisobutironitril (AIBN) dan polietilena oksida 400 diperoleh dari Trade TCI Mark, Jepang. Kadar nitrat dalam air diuji menggunakan reagen sesuai metode SNI No. 06-6989.9-2004.

### Metode

#### Sintesis Polimer Amonium

Polimer amonium kuarterner diperoleh melalui persiapan dalam penelitian sebelumnya (Rahayu et al., 2023) dan digunakan untuk studi adsorpsi nitrat.

#### Adsorpsi Ion Nitrat ( $\text{NO}_3^-$ )

Percobaan adsorpsi dilakukan menggunakan metode *batch*. Sejumlah adsorben ditambahkan ke 100 mL limbah bioetanol. Campuran tersebut diaduk secara menyeluruh menggunakan pengaduk magnetik dengan kecepatan 150 rpm dan kemudian dianalisis menggunakan

Spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang 410 nm. Adsorpsi dilakukan dengan menggunakan parameter pH (1, 2, 3, 4,5 8 9) pada suhu 40°C selama 60 menit untuk menentukan *removal* dan kapasitas adsorpsi nitrat dalam larutan, yang dihitung sesuai dengan Persamaan (1), sedangkan kapasitas adsorpsi adsorben dihitung sesuai dengan Persamaan (2).

$$\% \text{ Efisiensi Removal (RE)} = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \quad (1)$$

$$Q_e = \frac{C_0 - C_e}{m} \times V \quad (2)$$

Di mana  $C_0$  adalah konsentrasi awal (mg/L),  $C_e$  adalah konsentrasi akhir (mg/L),  $V$  adalah volume larutan (L), dan  $m$  adalah massa adsorben (mg).

### Model Isoterm Adsorpsi

Isoterm adsorpsi adalah model matematis yang menggambarkan bagaimana suatu zat (adsorbat) menempel pada permukaan padat (adsorben). Isoterm ini sangat penting untuk mempelajari mekanisme adsorpsi, karena menunjukkan bagaimana proses adsorpsi berubah dengan variasi konsentrasi adsorbat (Al-Ghouthi & Da'ana, 2020). Dalam penelitian ini, tiga model isoterm yang dipelajari adalah isoterm Langmuir, isoterm Freundlich, dan isoterm Temkin.

#### 1. Isoterm Langmuir

Model isoterm Langmuir mengasumsikan bahwa adsorpsi terjadi dalam bentuk lapisan tunggal (*monolayer*) di permukaan luar adsorben, dan tidak ada interaksi antarmolekul yang teradsorpsi. Model ini memprediksi distribusi situs adsorpsi yang seragam serta tidak memperhitungkan interaksi lateral antar-partikel teradsorpsi (Mahmoodi & Arami, 2008). Bentuk linear dari model Langmuir dinyatakan dalam Persamaan (3) dan (4).

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{K_L} Q_m + \frac{C_e}{Q_m} \quad (3)$$

Dalam konteks ini,  $q_e$  mewakili jumlah zat warna yang teradsorpsi pada kondisi kesetimbangan (mg/g), yang ditentukan menggunakan Persamaan 2.

$$q_e = \frac{Q_m \cdot C_e}{1 + K_L \cdot C_e} \quad (4)$$

Dalam persamaan ini,  $Q_m$  menunjukkan kapasitas adsorpsi maksimum (mg/g),  $C_e$  mewakili konsentrasi kesetimbangan zat warna (mg/L), dan  $K_L$  adalah konstanta Langmuir yang berhubungan dengan energi adsorpsi (L/mg). Persamaan ini membantu dalam mengevaluasi efektivitas suatu material dalam mengadsorpsi zat warna pada kesetimbangan, dengan

mempertimbangkan kapasitas maksimum dan energi adsorpsi. Hubungan linear antara  $C_e/q_e$  diilustrasikan dalam Gambar 2a.

## 2. Isoterm Freundlich

Isoterm Freundlich didasarkan pada adsorpsi multilayer pada permukaan heterogen. Isoterm Freundlich adalah model empiris yang menggambarkan hubungan antara jumlah suatu zat yang diadsorpsi (adsorbat) ke permukaan padat (adsorben) dan konsentrasinya adsorbat dalam cairan sekitarnya (adsorbat) pada suhu konstan (Aini et al., 2024). Persamaan isoterm Freundlich dapat dinyatakan dalam Persamaan (5):

$$q_e = K_F C_e^{\frac{1}{n}} \quad (5)$$

Dimana,  $K_F$  adalah konstanta isoterm Freundlich  $\text{L}^{1/n} \text{mg}^{(1-1/n)}/\text{g}$  dan  $\frac{1}{n}$  adalah eksponen Freundlich.

## 3. Isoterm Temkin

Model isoterm Temkin memperhitungkan penurunan panas adsorpsi seiring dengan meningkatnya luas permukaan yang tertutup, dengan mengasumsikan adanya hubungan linier antara panas dan luas cakupan. Model ini lebih sesuai untuk sistem dengan permukaan yang heterogen dan memberikan wawasan tentang energi ikatan dalam proses adsorpsi. Tidak seperti model lain yang mengusulkan penurunan panas secara logaritmik, isoterm Temkin mengasumsikan penurunan linier (Shojaeipoor et

al., 2016). Bentuk linier dari isoterm Temkin dinyatakan dalam Persamaan (6) – (9).

$$q_e = \frac{RT}{B} \ln(K_T C_e) \quad (6)$$

$$q_e = \frac{RT}{B} \ln K_T + \left(\frac{RT}{B}\right) \ln C_e \quad (7)$$

$$\beta = (RT)/B \quad (8)$$

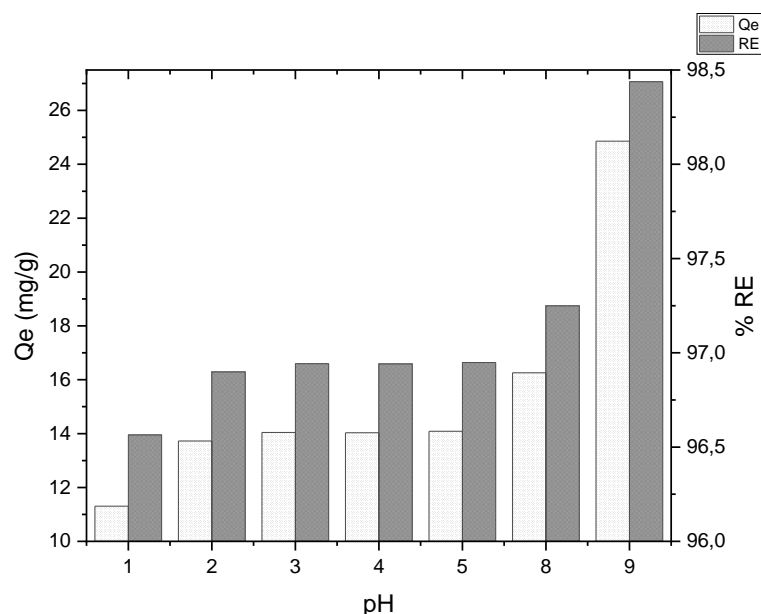
$$q_e = \beta \ln K_T + \beta \ln C_e \quad (9)$$

Di sini,  $T$  adalah suhu absolut pada 298K,  $R$  adalah konstanta gas universal sebesar  $8.314 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$ ,  $B$  adalah konstanta Temkin yang berhubungan dengan panas adsorpsi ( $\text{J/mg}$ ), dan  $K_T$  adalah konstanta kesetimbangan yang berhubungan dengan energi ikatan maksimum ( $\text{L/g}$ ).

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### pH Optimum Limbah Bioetanol untuk Removal Ion Nitrat dan Amonia

Untuk mengetahui efektivitas proses adsorpsi ion nitrat dalam limbah bioetanol, dilakukan analisis terhadap parameter % *removal* (% RE) dan kapasitas adsorpsi ( $Q_e$ ) pada berbagai nilai pH. Kondisi pH merupakan faktor penting yang memengaruhi kemampuan adsorben dalam menarik ion-ion nitrat yang bermuatan negatif, karena pH dapat mempengaruhi muatan permukaan adsorben serta derajat ionisasi ion nitrat. Grafik di bawah ini menunjukkan hasil dari pengujian tersebut, memperlihatkan bagaimana persentase *removal* dan kapasitas adsorpsi berubah pada rentang pH yang berbeda.



Gambar 1. Presentase Penyerapan dan Kapasitas Adsorpsi Ion Nitrat

Gambar 1. menunjukkan pengaruh pH terhadap efektivitas adsorpsi ion nitrat dalam limbah bioetanol, yang diukur melalui dua parameter utama: persentase *removal* (% RE) dan kapasitas adsorpsi (*Qe*). Pada grafik, terlihat bahwa persentase *removal* meningkat secara signifikan seiring dengan kenaikan pH, terutama pada pH 8 hingga 9. Di pH rendah, sekitar pH 1 hingga 2, persentase *removal* relatif rendah, menunjukkan bahwa kondisi asam kurang efektif untuk menghilangkan ion nitrat. Namun, seiring peningkatan pH menuju kondisi basa, % RE meningkat secara drastis dan mencapai 98,43% pada pH 9. Kondisi alkalin memang dapat meningkatkan efektivitas proses adsorpsi ion nitrat. Pada pH tinggi, interaksi antara ion nitrat yang bermuatan negatif dan permukaan adsorben yang memiliki gugus amonium bermuatan positif menjadi lebih kuat. Hal ini disebabkan oleh peningkatan daya tarik elektrostatis antara ion-ion tersebut, yang membantu menarik ion nitrat ke permukaan adsorben dan meningkatkan persentase *removal* (Syafaat et al., 2013).

Selain persentase *removal*, kapasitas adsorpsi (*Qe*) juga menunjukkan tren peningkatan seiring dengan kenaikan pH, meskipun dengan laju yang lebih stabil dibandingkan % RE. Pada pH rendah, (*Qe*) hanya mencapai 11,3 mg/g, mengindikasikan bahwa sedikit ion nitrat yang terserap pada kondisi asam. Namun, saat pH mendekati 9, kapasitas adsorpsi meningkat secara signifikan hingga mencapai 24,86 mg/g. Hal ini menunjukkan bahwa adsorben memiliki kemampuan yang lebih besar untuk menyerap ion nitrat pada kondisi basa. Salah satu alasan utama untuk peningkatan ini adalah kemungkinan peningkatan ionisasi permukaan adsorben pada pH tinggi, yang dapat meningkatkan afinitas adsorben terhadap ion nitrat. Dalam kondisi basa, gugus amonium pada adsorben mungkin lebih aktif berinteraksi dengan ion nitrat, sehingga meningkatkan jumlah ion yang berhasil diserap.

Mekanisme reaksi adsorpsi ion nitrat pada permukaan adsorben dengan gugus amonium dapat dijelaskan sebagai berikut:



Reaksi (i) menunjukkan terjadi ionisasi amonium, dimana amonium pada kondisi alkali

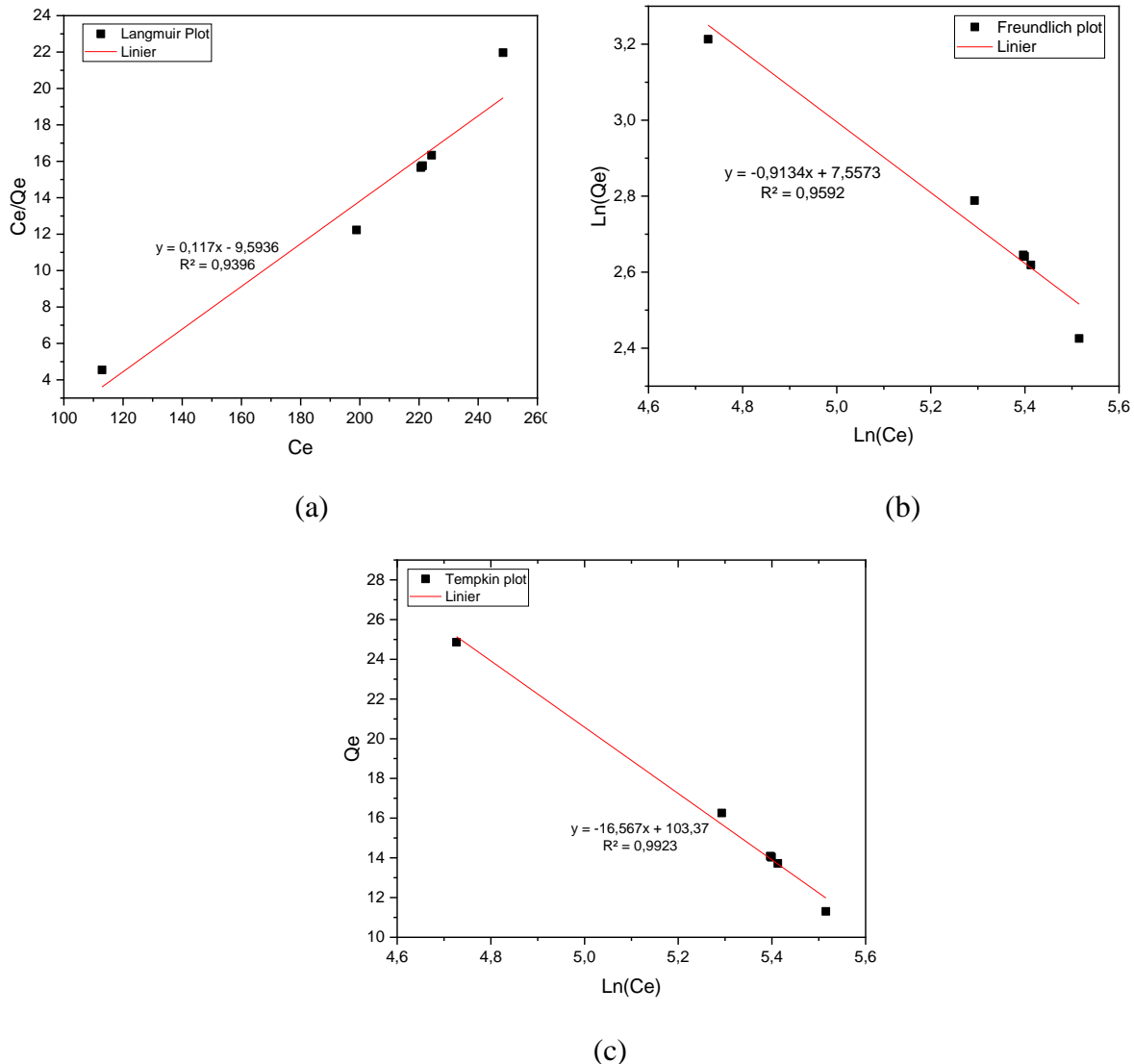
(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) di permukaan adsorben dapat terionisasi menjadi amonia (NH<sub>3</sub>) dan hidrogen (H<sup>+</sup>). Selanjutnya akan terjadi interaksi elektrostatis pada reaksi (ii), dimana ion nitrat (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) yang bermuatan negatif akan tertarik ke permukaan adsorben yang memiliki gugus amonium bermuatan positif. Interaksi ini diperkuat oleh gaya tarik elektrostatis antara ion nitrat dan gugus amonium. Ion nitrat kemudian berikatan dengan gugus amonium melalui interaksi ionik, yang menghasilkan peningkatan persentase *removal* ion nitrat pada pH tinggi. Hal ini karena ion nitrat lebih mudah tertarik dan terikat pada permukaan adsorben yang bermuatan positif.

Secara keseluruhan, grafik ini mengindikasikan bahwa kondisi pH yang lebih tinggi memberikan hasil yang optimal baik dari segi persentase *removal* maupun kapasitas adsorpsi. Pada pH 9, efisiensi penyerapan ion nitrat berada pada titik tertinggi, menunjukkan bahwa pengaturan pH ke arah kondisi basa sangat krusial untuk memaksimalkan efektivitas adsorpsi. Temuan ini memberikan wawasan penting dalam pengelolaan limbah bioetanol yang mengandung ion nitrat, khususnya dalam menentukan kondisi operasional yang optimal untuk proses adsorpsi yang efisien dan ramah lingkungan.

### Plotting Isoterm Adsorpsi

Adanya *plotting* adsorpsi isotermis akan mempermudah analisis dalam menentukan teori yang cocok pada penelitian ini. Beberapa *plotting* model isoterm seperti Langmuir, Freundlich, dan Temkin ditunjukkan oleh Gambar 2.

Gambar 2(a) menunjukkan plot Langmuir dari data adsorpsi ion nitrat (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) dalam larutan limbah bioetanol. Pada grafik ini, sumbu horizontal menunjukkan nilai konsentrasi kesetimbangan (*Ce*) dalam larutan, sedangkan sumbu vertikal menunjukkan nilai *Ce/Qe*, yang merupakan rasio antara konsentrasi kesetimbangan dan kapasitas adsorpsi pada kesetimbangan (*Qe*). Garis merah linier dalam grafik menunjukkan persamaan linear dari model Langmuir, yang sesuai dengan data eksperimental yang diwakili oleh titik-titik hitam (Langmuir, 1918). Pada *plotting* model Langmuir, persamaan linear yang diperoleh adalah  $y = 0,117x - 9,5936$  dengan nilai R<sup>2</sup>=0,9396.



Gambar 2. Plotting Grafik Model Adsorpsi Isotermis (a) Langmuir (b) Freundlich (c) Temkin

Gambar 2(b) menunjukkan plot Freundlich dari data adsorpsi ion nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) dalam larutan limbah bioetanol. Pada grafik ini, sumbu horizontal menunjukkan nilai logaritma natural konsentrasi kesetimbangan ( $C_e$ ) dalam larutan, sedangkan sumbu vertikal menunjukkan nilai  $\ln(Q_e)$ , yang merupakan logaritma natural kapasitas adsorpsi pada kesetimbangan ( $Q_e$ ) (Freundlich, 1907). Garis merah linear dalam grafik menunjukkan persamaan linear dari model Freundlich, yang sesuai dengan data eksperimental yang diwakili oleh titik-titik hitam. Pada *plotting* model Freundlich, persamaan linear yang diperoleh adalah  $y = -0,9134x + 7,5573$  dengan nilai  $R^2=0,9592$ .

Gambar 2(c) menunjukkan plot Temkin dari data adsorpsi ion nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) dalam larutan limbah bioetanol. Pada grafik ini, sumbu

horizontal menunjukkan nilai logaritma natural konsentrasi kesetimbangan ( $C_e$ ) dalam larutan, sedangkan sumbu vertikal menunjukkan nilai  $Q_e$ , yang merupakan kapasitas adsorpsi pada kesetimbangan ( $Q_e$ ) (Hansen, 1995). Garis merah linear dalam grafik menunjukkan persamaan linear dari model Temkin, yang sesuai dengan data eksperimental yang diwakili oleh titik-titik hitam. Pada *plotting* model Freundlich, persamaan linear yang diperoleh adalah  $y = -16,567x + 103,37$  dengan nilai  $R^2=0,9923$ .

### Penentuan Model Adsorpsi Isotermis

Penentuan model adsorpsi isotermis sangat penting untuk mengetahui interaksi molekul adsorbat dalam permukaan adsorben. Analisis ini penting untuk mengoptimalkan desain dan penerapan material terutama dalam pengolahan

limbah cair seperti limbah bioetanol. Penentuan ini didasarkan pada beberapa parameter seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter Model Isoterm untuk Adsorpsi Ion Nitrat pada Limbah Bioetanol

Model	Parameter	Nilai
Langmuir	Q <sub>m</sub>	8,547
	K <sub>L</sub>	-1,22 x10 <sup>-2</sup>
	R <sup>2</sup>	0,9396
Freundlich	n	1,0947
	K <sub>f</sub>	1,92 x10 <sup>3</sup>
	R <sup>2</sup>	0,9592
Temkin	B	-16,567
	K <sub>T</sub>	1,95 x10 <sup>-3</sup>
	R <sup>2</sup>	0,9923

Berdasarkan hasil dan kesesuaian model isoterm yang diperoleh dari pada Tabel 1, adsorpsi ion nitrat dari limbah bioetanol paling sesuai merujuk pada model Freundlich dan Temkin, yang ditunjukkan dengan nilai (R<sup>2</sup>) yang tinggi. Model Freundlich menunjukkan proses adsorpsi heterogen dengan afinitas yang kuat terhadap ion nitrat, sedangkan model Temkin menunjukkan interaksi adsorbat-adsorben yang signifikan. Model Langmuir juga memberikan wawasan yang berguna, namun nilai negatif K<sub>L</sub> menunjukkan potensi penyimpangan dari perilaku ideal atau masalah pada data. Namun begitu, meskipun model Temkin memiliki nilai (R<sup>2</sup>) yang lebih tinggi menunjukkan kesesuaian yang lebih baik, model isoterm Freundlich menggambarkan adsorpsi pada permukaan heterogen dengan lokasi dengan afinitas yang bervariasi. Hal ini terlihat dari nilai faktor heterogenitas (n) sebesar 1,0947 menunjukkan proses adsorpsi yang baik, karena nilai (n) antara 1 dan 10 menunjukkan kondisi adsorpsi yang menguntungkan. K<sub>F</sub> sebesar 1,92 x 10<sup>3</sup> satuan mencerminkan kapasitas dan intensitas adsorpsi, menunjukkan afinitas adsorpsi yang kuat terhadap ion nitrat pada adsorben (Cerofolini et al., 1978; Vigdorowitsch et al., 2021).

**KESIMPULAN**

Adsorpsi ion nitrat dari limbah bioetanol dianalisis secara efektif menggunakan model isoterm Langmuir, Freundlich, dan Temkin. Model Freundlich muncul sebagai model yang paling sesuai untuk menggambarkan proses adsorpsi, dengan nilai (R<sup>2</sup>) yang tinggi yaitu

0,9592, yang menunjukkan kesesuaian yang baik. Faktor heterogenitas (n) sebesar 1,0947 menunjukkan kondisi adsorpsi yang menguntungkan, dan konstanta Freundlich (K<sub>F</sub>) sebesar 1,92 x 10<sup>3</sup> unit mencerminkan kapasitas dan intensitas adsorpsi yang kuat. Meskipun model Temkin juga menunjukkan nilai (R<sup>2</sup>) yang tinggi yaitu 0,9923, yang menunjukkan interaksi adsorbat-adsorben yang signifikan, nilai negatif dari konstanta Temkin menunjukkan potensi penyimpangan dari perilaku ideal. Model Langmuir memberikan wawasan yang berguna tetapi kurang sesuai karena nilai negatif. Selain itu, penelitian ini mengidentifikasi bahwa pH optimal untuk adsorpsi ion nitrat adalah sekitar 9, dimana efisiensi penghilangan berada pada titik tertinggi mencapai 98,43% dan kapasitas adsorpsi (Q<sub>e</sub>) 24,86 mg/g. Secara keseluruhan, kemampuan model Freundlich dalam mendeskripsikan adsorpsi pada permukaan heterogen dengan afinitas yang bervariasi menjadikannya model yang paling tepat untuk penelitian ini. Hasil ini fokus pada pentingnya memilih model adsorpsi yang tepat dan mengoptimalkan kondisi pH untuk memaksimalkan penghilangan ion nitrat dari limbah bioetanol, sehingga berkontribusi terhadap praktik pengelolaan limbah yang lebih efisien dan ramah lingkungan.

**UCAPAN TERIMAKASIH**

Pendanaan Nomor 022/PTM/LPPM UAD/VI/2024, Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Direktorat Riset, Teknologi, dan Pengabdian Masyarakat Indonesia mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada penulis karena telah memberikan dukungan finansial untuk penelitian ini.

**REFERENCES**

Aini, N., Rahayu, A., Jamilatun, S., & Mufandi, I. (2024). A case study on functional polymer modification of cacao husk for enhanced removal of nitrate and phosphate from vinasse waste. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 10 (May), 100814. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100814>

- Al-Ghouti, M. A., & Da'ana, D. A. (2020). Guidelines for the use and interpretation of adsorption isotherm models: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 393 (January), 122383. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122383>
- Bremers, G., Birzietis, G., Blija, A., Skele, A., Rucins, A., & Danilevics, A. (2010). Evaluation Usability of Water Adsorption and Rectification in. *Engineering for Rural Development*, 27, 154–157.
- Cerofolini, G. I. V., Jaroniec, M., & Sokotowski, S. (1978). A theoretical isotherm for adsorption on heterogeneous surface. *Polymer*, 256 (5), 471–477.
- Dewi, S. N., Joko, T., & Dewanti, N. A. Y. (2016). Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan Pencemaran Nitrat ( $\text{NO}_3$ ) Pada Air Sumur Gali Di Kawasan Pertanian Desa Tumpukan Kecamatan Karangdowo Kabupaten Klaten. *Jurnal Kesehatan Masyarakat*, 4 (5), 204–212. <http://ejournal-s1.undip.ac.id/index.php/jkm>
- Freundlich, H. (1907). Über die Adsorption in Lösungen. *Zeitschrift Für Physikalische Chemie*, 57U (1), 385–470. <https://doi.org/doi:10.1515/zpch-1907-5723>
- Hansen, J. B. (1995). *Kinetics of Ammonia Synthesis and Decomposition on Heterogeneous Catalysts BT - Ammonia: Catalysis and Manufacture* (A. Nielsen (ed.); pp. 149–190). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-79197-0\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-642-79197-0_4)
- Harahap, M. R., Amanda, L. D., & Matondang, A. H. (2022). Analisis Kadar Cod (Chemical Oxygen Demand) Dan Tss (Total Suspended Solid) Pada Limbah Cair Dengan Menggunakan Spektrofotometer Uv-Vis. *Amina*, 2 (2), 79–83. <https://doi.org/10.22373/amina.v2i2.772>
- Kanagalakshmi, M., Devi, S. G., Ananthi, P., & Pius, A. (2024). *Adsorption Isotherms and Kinetic Models BT - Carbon Nanomaterials and their Composites as Adsorbents* (J. Tharini & S. Thomas (eds.); pp. 135–154). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-48719-4\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-031-48719-4_8)
- Karimi, S., Karri, R. R., Tavakkoli Yarak, M., & Koduru, J. R. (2021). Processes and separation technologies for the production of fuel-grade bioethanol: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19 (4), 2873–2890. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01208-9>
- Langmuir, I. (1918). THE ADSORPTION OF GASES ON PLANE SURFACES OF GLASS, MICA AND PLATINUM. *Journal of the American Chemical Society*, 40 (9), 1361–1403. <https://doi.org/10.1021/ja02242a004>
- Mahmoodi, N. M., & Arami, M. (2008). Modeling and sensitivity analysis of dyes adsorption onto natural adsorbent from colored textile wastewater. *Journal of Applied Polymer Science*, 109 (6), 4043–4048. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/app.28547>
- Mustapha, S., Shuaib, D. T., Ndamitso, M. M., Etsuyankpa, M. B., Sumaila, A., Mohammed, U. M., & Nasirudeen, M. B. (2019). Adsorption isotherm, kinetic and thermodynamic studies for the removal of Pb(II), Cd(II), Zn(II) and Cu(II) ions from aqueous solutions using Albizia lebeck pods. *Applied Water Science*, 9 (6), 1–11. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1021-x>
- Oladipo, B., Taiwo, A. E., & Ojumu, T. V. (2023). *Bioethanol Recovery and Dehydration Techniques BT - Bioethanol: A Green Energy Substitute for Fossil Fuels* (E. Betiku & M. M. Ishola (eds.); pp. 229–254). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-36542-3\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-031-36542-3_9)
- Rahayu, A., Hakika, D. C., Alfi, N., Amrillah, Z., & Veranica, V. (2023). Synthesis and characterization of ammonium polymer for anion removal in aqueous solutions. *Polimery*, 68 (10), 537–543.
- Rajabi, M., Keihankhadiv, S., Suhas, Tyagi, I., Karri, R. R., Chaudhary, M., Mubarak, N. M., Chaudhary, S., Kumar, P., & Singh, P. (2023). Comparison and interpretation of

- isotherm models for the adsorption of dyes, proteins, antibiotics, pesticides and heavy metal ions on different nanomaterials and non-nano materials—a comprehensive review. *Journal of Nanostructure in Chemistry*, 13 (1), 43–65. <https://doi.org/10.1007/s40097-022-00509-x>
- Sabzehmeidani, M. M., Mahnaee, S., Ghaedi, M., Heidari, H., & Roy, V. A. L. (2021). Carbon based materials: A review of adsorbents for inorganic and organic compounds. *Materials Advances*, 2 (2), 598–627. <https://doi.org/10.1039/d0ma00087f>
- Saminem, F. (2021). Increasing Teachers' Ability Using Zoom Meeting Applications in the Distance Learning Process Through Collaborative Assistance in Sd Negeri Bendo Kapanewon Samigaluh Kulon Progo Academic Year 2020/2021. *IJ CER (International Journal of Chemistry Education Research)*, 5 (2), 78–83. <https://doi.org/10.20885/ijcer.vol5.iss2.art5>
- Shojaeipoor, F., Elhamifar, D., & Moshkelgosha, R. (2016). Removal of Pb(II) and Co(II) ions from aqueous solution and industrial wastewater using ILNO-NH<sub>2</sub>: Kinetic, isotherm and thermodynamic studies: *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 67. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2016.07.008>
- Syafaat, F., Suseno, A., & Arnelli, A. (2013). Kinetika Adsorpsi Anion Nitrat dan Fosfat pada Zeolit Alam Termodifikasi Surfaktan Hexadesiltrimetilammonium Klorida. *Jurnal Kimia Sains Dan Aplikasi*, 16 (3), 73–78. <https://doi.org/10.14710/jksa.16.3.73-78>
- Tunjung Murti Pratiwi, N., Hariyani, S., Puspa Ayu, I., Apriadi, T., Iswantari, A., & Yuni Wulandari, D. (2019). Pengelolaan Kandungan Bahan Organik pada Limbah Cair Laboratorium Proling MSP-IPB dengan Berbagai Kombinasi Agen Bioremediasi. *Jurnal Biologi Indonesia*, 15 (1), 89–95. <https://doi.org/10.47349/jbi/15012019/89>
- Veranica, Rahayu, A., Maryudi, Dhias Cahya Hakika, Lee Wah Lim, & Lia Anggresani. (2024). Isotherm Adsorption of Ion Phosphate from Vinasse Waste Using Quaternary Ammonium Polymer as Adsorbent in Term Effect of Temperature. *Jurnal Sains Natural*, 14 (2), 91–97. <https://doi.org/10.31938/jsn.v14i2.720>
- Vigdorowitsch, M., Pchelintsev, A., Tsygankova, L., & Tanygina, E. (2021). Freundlich isotherm: An adsorption model complete framework. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11 (17), 1–7. <https://doi.org/10.3390/app11178078>