MASALIQ
Jurnal Pendidikan dan Sains

e-ISSN: 2808-8115
p-ISSN: 2809-1051

Terindeks: Sinta 5, Copernicus, Dimensions, Scilit, Lens, Crossref, Garuda, Google Scholar, Base, etc

https://doi.org/10.58578/masaliq.v6i5.11538

MODEL ISOTERM ADSORPSI *METHYLENE BLUE* PADA SILIKA XEROGEL TERMODIFIKASI EDA/CU

Methylene Blue Adsorption Isotherm Model on EDA/Cu-Modified Silica Xerogel

Nabilla, Edi Nasra, Budhi Oktavia, Riga, M.Iqbal Saputra Gemasih
Universitas Negeri Padang
edinasra@fmipa.unp.ac.id

Article Info:

Submitted:	Revised:	Accepted:	Published:
Jun 14, 2026	Jul 12, 2026	Jul 24, 2026	Jul 29, 2026

Abstract

Methylene blue is a cationic dye that has the potential to contaminate aquatic environments and therefore requires an effective treatment method, one of which is adsorption. This study aimed to analyze the adsorption isotherm characteristics of methylene blue on EDA/Cu-modified silica xerogel and determine the most appropriate isotherm model. The study was conducted experimentally by varying the initial methylene blue concentration from 400 to 1,100 mg/L under optimum adsorption conditions. The adsorption equilibrium data were analyzed using the Langmuir and Freundlich isotherm models through a linear regression approach. The results showed that the Langmuir model exhibited a higher goodness of fit, with an R^2 value of 0.9967, than the Freundlich model, which obtained an R^2 value of 0.5763. Analysis using the Langmuir model yielded a maximum adsorption capacity (Qm) of 235.63 mg/g and a Langmuir constant (KL) of 0.201 L/mg, whereas the Freundlich model yielded a Kf constant of 109.3 and an n value of 6.44. These findings indicate that the adsorption of methylene blue on EDA/Cu-modified silica xerogel is better described by the Langmuir isotherm model, indicating the formation of a monolayer on the relatively homogeneous adsorbent surface. This study strengthens the

Masaliq Journal is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License

understanding of the equilibrium adsorption mechanism of dyes on modified silica materials and demonstrates the potential of EDA/Cu-modified silica xerogel as an adsorbent for treating dye-containing wastewater.

Keywords: Adsorption; Freundlich Isotherm; Langmuir Isotherm; Methylene Blue; EDA/Cu-Modified Silica Xerogel

Abstrak: *Methylene blue* merupakan zat warna kationik yang berpotensi mencemari lingkungan perairan sehingga memerlukan metode pengolahan yang efektif, salah satunya melalui adsorpsi. Penelitian ini bertujuan menganalisis karakteristik isoterm adsorpsi *methylene blue* pada silika xerogel termodifikasi EDA/Cu serta menentukan model isoterm yang paling sesuai. Penelitian dilakukan secara eksperimental dengan variasi konsentrasi awal *methylene blue* sebesar 400–1.100 mg/L pada kondisi optimum adsorpsi. Data kesetimbangan adsorpsi dianalisis menggunakan model isoterm Langmuir dan Freundlich melalui pendekatan regresi linear. Hasil penelitian menunjukkan bahwa model Langmuir memiliki tingkat kesesuaian yang lebih tinggi dengan nilai R^2 sebesar 0,9967 dibandingkan model Freundlich yang memperoleh nilai R^2 sebesar 0,5763. Analisis model Langmuir menghasilkan kapasitas adsorpsi maksimum (Qm) sebesar 235,63 mg/g dan konstanta Langmuir (KL) sebesar 0,201 L/mg, sedangkan model Freundlich menghasilkan konstanta Kf sebesar 109,3 dan nilai n sebesar 6,44. Temuan ini menunjukkan bahwa adsorpsi *methylene blue* pada silika xerogel termodifikasi EDA/Cu lebih sesuai dengan model isoterm Langmuir, yang mengindikasikan pembentukan lapisan tunggal (*monolayer*) pada permukaan adsorben yang relatif homogen. Penelitian ini memperkuat pemahaman mengenai mekanisme kesetimbangan adsorpsi zat warna pada material silika termodifikasi serta menunjukkan potensi silika xerogel termodifikasi EDA/Cu sebagai adsorben untuk pengolahan limbah cair yang mengandung zat warna.

Kata Kunci: Adsorpsi; Isoterm Freundlich; Isoterm Langmuir; *Methylene Blue*; Silika Xerogel Termodifikasi EDA/Cu

PENDAHULUAN

Peningkatan aktivitas industri tekstil, kertas, farmasi, dan laboratorium menyebabkan penggunaan zat warna semakin meningkat setiap tahunnya. Salah satu zat warna yang banyak digunakan adalah *methylene blue*, yaitu salah satu zat warna kationik yang memiliki struktur aromatik yang stabil sehingga sulit terdegradasi secara alami dan dapat bertahan dalam lingkungan perairan dalam waktu yang lama (Ambroz *et al*., 2018). Pembuangan limbah yang mengandung *methylene blue* tanpa pengolahan yang tepat dapat menurunkan kualitas perairan, serta juga berpotensi menimbulkan dampak toksik terhadap organisme akuatik dan makhluk hidup disekitarnya. Oleh karena itu, diperlukan metode pengolahan yang efektif untuk mengurangi konsentrasi *methylene blue* dari limbah cair (Ren *et al*., 2024).

Berbagai metode telah dikembangkan untuk menghilangkan zat warna dari limbah cair, diantaranya koagulasi-flokulasi, fotokatalis, degradasi biologis, filtrasi membrane, dan adsorpsi (El *et al*., 2025). Diantara metode tersebut adsorpsi menjadi salah satu yang paling

banyak diterapkan karena memiliki efisiensi yang tinggi, proses sederhana, serta biaya operasional yang relatif rendah, serta tidak menghasilkan produk samping yang berbahaya. Efektivitas proses adsorpsi dipengaruhi oleh sifat adsorben, seperti luas permukaan spesifik, ukuran pori, volume pori, serta jumlah gugus fungsi aktif yang tersedia pada permukaan material. (Anggriawan *et al*., 2019). Hasil ini sejalan dengan penelitian yang menunjukkan bahwa factor fisik seperti ukuran partikel dan massa dasorben turut memengaruhi kapasitas adsorpsi zat warna kationik pada material adsorben (Kurniawati *et al*., 2023).

Material berbasis silika merupakan salah satu adsorben yang banyak dikembangkan karena memiliki kestabilitasan termal dan kimia yang baik, luas permukaan tinggi, serta mudah dimodifikasi melalui penambahan gugus fungsional tertentu (Olívio *et al*., 2021). Salah satu bentuk material seisillika yang banyak digunakan sebagai adsorben adalah silika xerogel, yang memilki luas permukaan yang tinggi, struktur berpori, serta stabilitas kimia yang baik. Karakteristik tersebut memungkinkan silika xerogel memiliki kapasitas adsorpsi yang tinggi terhadap berbagai ion logam berat maupun zat warna (Xie *et al*., 2025). Meskipun silika xerogel memiliki kemampuan adsorpsi yang baik, jumlah gugus aktif pada permukaannya masih dapat ditingkatkan melalui proses modifikasi. Salah satu pendekatan yang banyak digunakan adalah modifikasi permukaan silika xerogel menggunakan etilendiamina (EDA) dan ion Cu^{2+} yang dapat memperkuat interaksi dengan molekul *methylene blue* dan meningkatkan kapasitas adsorpsi (Nasra *et al*., 2026).

Kinerja suatu adsorben tidak hanya ditentukan oleh besarnya kapasitas adsorpsi, tetapi juga melalui model isoterm adsorpsi. Model isoterm digunakan untuk menggambarkan hubungan antara jumlah adsorbat yang teradsorpsi dengan konsentrasi adsorbat pada kondisi kesetimbangan sehingga dapat memberikan informasi mengenai mekanisme adsorpsi yang terjadi (Danat *et al*., 2026). Analisis isoterm juga digunakan untuk menentukan parameter penting, seperti kapasitas adsorpsi maksimum, afinitas adsorben terhadap adsorbat, serta karakteristik permukaan adsorben. Oleh karena itu, kajian kesetimbangan adsorpsi menjadi sangat penting dalam perancangan dan pengembangan adsorben untuk aplikasi pengolahan limbah cair pada skala yang besar (Liu *et al*., 2023).

Beberapa penelitian terdahulu telah melaporkan bahwa adsorpsi *methylene blue* menggunakan material berbasis silika umumnya mengikuti model isoterm Langmuir, yang menunjukkan bahwa proses adsorpsi berlangsung melalui pembentukan lapisan Tunggal pada permukaan adsorben yang relatif homogen (Parida *et al*., 2021).Namun demikian, karakteristik isoterm adsorpsi sangat dipengaruhi oleh jenis material dan metode sintesis.

Oleh karena itu setiap adsorben memerlukan evaluasi isoterm secara spesifik untuk memperoleh informasi mengenai mekanisme adsorpsinya (Dahliyanti *et al*., 2022).

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan model isoterm adsorpsi *methylene blue* pada silika xerogel termodifikasi EDA/Cu. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan informasi mengenai karakteristik kesetimbangan adsorpsi, menentukan model isoterm yang paling sesuai, serta menjadi dasar pengembangan adsorben berbasis silika xerogel termodifikasi untuk aplikasi pengolahan limbah cair yang mengandung zat warna.

METODE

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah gelas kimia, labu ukur, botol semprot, pipet tetes, spatula logam, pengaduk magnetic, corong, kertas saring, pH meter, timbangan analitik (ABS 220-4), *hot plate*, *shaker*. Sedangkan bahan-bahan yang digunakan adalah abu terbang yang didapatkan dari PT Semen Padang, *methylene blue*, aquades, HNO_3, NaOH.

Sebanyak 0,1 gram adsorben dimasukkan ke dalam 25 mL larutan *methylene blue* dengan variasi konsentrasi awwal 400, 500, 600, 700, dan 800 mg/L. Setiap pH larutan disesuaikan ke pH optimum yang telah ditentukan. Proses adsorpsi dilakukan dengan *shaker* pada kecepatan 200 rpm selama 60 menit. Larutan disaring dan absorbansi filtratnya diukur menggunakan spektrofotometer UV-Vis.

HASIL

Hasil penelitian menunjukkan data kesetimbangan adsorpsi *methylene blue* pada silika xerogel termodifikasi EDA/Cu yang dianalisis menggunakan model isoterm Freundlich dan Langmuir. Penyajian hasil meliputi data kesetimbangan adsorpsi, kurva regresi, dan parameter isoterm yanng diperoleh dari masing-masing model.

a. Isoterm Freundlich

Model isoterm Freundlich dianalisis menggunakan hubungan antara log C_e dan log Q_e. Data kesetimbangan adsorpsi disajikan pada Tabel 1. Dengan persamaan:

$$Q = K_f C_e^{1/n} \qquad (1)$$

Bentuk linear persamaan Freundlich

$$\log Q_e = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_e \quad (2)$$

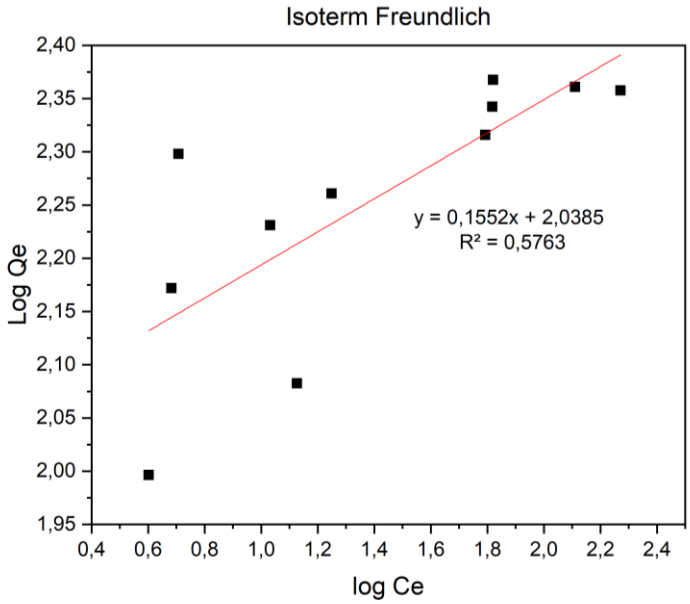
Dimana : K_f = Konstanta adsorpsi Freundlich

n = Afinitas adsorpsi

Tabel 1. Data parameter kesetimbangan adsorpsi methylene blue

Log C_e	Log Q_e
0,60184	1,9964
1,12666	2,08245
0,68242	2,17191
1,03183	2,23103
1,24918	2,26085
0,70722	2,29808
1,79281	2,31599
1,81722	2,3424
1,82039	2,36754
2,11059	2,36107
2,27083	2,35777

Selanjutnya, data kesetimbangan dianalisis menggunakan model isoterm Freundlich dengan memplot hubungan antara log C_e dan log Q_e untuk memperoleh konstanta Freundlich serta mengevaluasi karakteristik adsorpsi pada permukaan adsorben. Hasil kurva isoterm disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Kurva isoterm Freundlich adsorpsi methylene blue pada silika xerogel termodifikasi EDA/Cu

Hasil regresi linier model Freundlich menghasilkan persamaan:

$$\log Q_e = 0{,}1552 \log C_e + 2{,}0385 \qquad (3)$$

Berdasarkan hasil analisis, diperoleh parameter isoterm Freundlich adsorpsi *methylene blue* pada silika xerogel termodifikasi EDA/Cu seperti yang disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter isoterm Freundlich adsorpsi methylene blue pada silika xerogel termodifikasi EDA/Cu

Parameter	Nilai
Persamaan regresi	$\log Q_e = 0{,}1552 \log C_e + 2{,}0385$
Koefisien determinasi (R^2)	0,5763
Konstanta Freundlich (K_f)	109,3
Intensitas adsorpsi (n)	6,44

b. Isoterm Langmuir

Analisis isoterm Langmuir dilakukan menggunakan hubungan Ce/Qe terhadap Ce. Data kesetimbangan disajikan pada Tabel 3. Dapat dinyatakan melalui persamaan berikut:

$$Q_e = \frac{K_l Q_m C_e}{1 + K_l C_e} \qquad (4)$$

Bentuk linear dari model ini dapat dinyatakan melalui persamaan berikut:

$$\frac{C_e}{Q_e} + \frac{1}{Q_m K_l} + \frac{C_e}{Q_m} \qquad (5)$$

Dimana :Q_e = Kapasitas adsorpsi pada saat setimbang (mg/g)

Q_m = Kapasitas adsorpsi maksimum (mg/g)

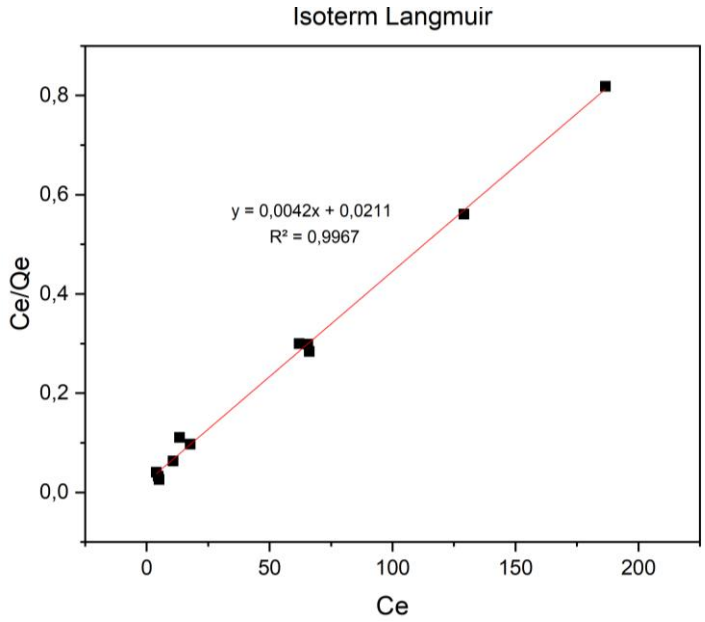
K_L = Energi adsorpsi (L/mg)

C_e = Konsentrasi zat warna dalam larutan saat setimbang (mg/L)

Tabel 3. Data parameter kesetimbangan adsorpsi methylene blue

C_e	Q_e	C_e/Q_e
3,997982	99,17528	0,040312
13,3862	120,9057	0,110716
4,813097	148,5622	0,032398
10,76053	170,228	0,063212
17,7492	182,326	0,097349
5,095929	198,6464	0,025653
62,06018	207,0093	0,299794
65,64779	219,9885	0,298415
66,1292	233,1004	0,283694
129	230,1482	0,560508
186,5664	227,9115	0,818591

Data pada Tabel 3 kemudian dianalisis menggunakan model isoterm Langmuir melalui hubungan antara C_e/Q_e untuk memperoleh kurva isotherm Langmuir seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Kurva isoterm Langmuir adsorpsi methylene blue pada silika xerogel termodifikasi EDA/Cu

Hasil analisis isoterm Langmuir menghasilkan persamaan:

$$\frac{C_e}{Q_e} = 0{,}0042x + 0{,}02108 \qquad (6)$$

Berdasarkan hasil analisis diperoleh parameter isoterm Langmuir adsorpsi *methylene blue* pada silika xerogel termodifikasi EDA/Cu seperti yang disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Parameter isoterm Langmuir adsorpsi methylene blue pada silika xerogel termodifikasi EDA/Cu

Parameter	Nilai
Persamaan regresi	$\frac{C_e}{Q_e} = 0{,}0042x + 0{,}02108$
Koefisien determinasi (R^2)	0,9967
Kapasitas adsorpsi maksimum (Q_m)	235,63 mg/g
Konstanta Langmuir (K_L)	0,201 L/mg

Analisis parameter isoterm menunjukkan bahwa model Langmuir memberikan nilai koefisien determinasi (R^2) yang lebih tinggi dibandingkan model Freundlich, sehingga menunjukkan tingkat kesesuaian yang lebih baik terhadap data kesetimbangan adsorpsi. Nilai parameter yang diperoleh dari masing-masing model disajikan pada Tabel 2 dan Tabel 4.

PEMBAHASAN

Model isoterm adsorpsi digunakan untuk menjelaskan kemampuan adsorpsi dari suatu adsorben. Model isoterm Freundlich dan Langmuir digunakan untuk menganalisis data kesetimbangan yang diperoleh dari proses adsorpsi (SEZGIN, 2024).

1. Isoterm Freundlich

Model isoterm Freundlich digunakan untuk menggambarkan proses adsorpsi yang berlangsung pada permukaan adsorben yang bersifat heterogen dengan terbentuknya multilayer (Ayawei *et al*., 2017). Model ini menjelaskan bahwa permukaan adsorben memiliki distribusi energi adsorpsi yang tidak seragam sehingga situs aktif memiliki afinitas yang berbeda terhadap molekul adsorbat. Model isoterm Freundlich dikenal sebagai isoterm adsorpsi yang bersifat linier. Analisis model isoterm Freundlich dilakukan menggunakan data kesetimbangan adsorpsi yang dinyatakan dalam bentuk hubungan antara log C_e dan Q_e (Al-Ghouti & Da'ana, 2020). Data tersebut disajikan pada Tabel 1 sebagai dasar perhitungan parameter isoterm Freundlich. Selanjutnya data kesetimbangan dianalisis menggunakan model isoterm Freundlich dengan memplot hubungan antara log C_e dan log Q_e untuk memperoleh konstanta Freundluch serta mengevaluasi karakteristik adsorpsi pada permukaan adsorben. Hasil regresi linier disajikan pada Gambar 1.

Berdasarkan hasil analisis, diperoleh persamaan regresi log Q_e = 0,1552 log C_e + 2,0385 dengan nilai R^2 sebesar 0,5763 yang menunjukkan bahwa model Freundlich belum mampu menggambarkan proses adsorpsi *methylene blue* pada silika xerogel termodifikasi EDA/Cu secara optimal (Wang & Guo, 2020). Nilai koefisien determinasi yang relatif rendah menunjukkan bahwa model Freundlich kurang mampu merepresentasikan mekanisme adsorpsi dibandingkan Langmuir. Hasil ini mengindikasikan bahwa proses adsorpsi pada penelitian ini tidak didominasi oleh adsorpsi *multilayer* pada permukaan heterogen, melainkan lebih mengarah pada interaksi adsorbat dengan situs aktif yang relatif seragam (Radoor *et al*., 2021).

Meskipun demikian, parameter Freundlich yang diperoleh masih menunjukkan karakteristik adsorpsi yang baik. Nilai afinitas adsorpsi (n) sebesar 6,44 menunjukkan bahwa proses adsorpsi berlangsung dengan baik, karena nilai (n>1) mengindikasikan afinitas adsorben terhadap adsorbat cukup tinggi. Selain itu, nilai konstanta Freundlich (K_f) sebesar 109,3 menunjukkan bahwa silika xerogel termodifikasi EDA/Cu memiliki kapasitas adsorpsi yang relatif tinggi terhadap *methylene blue* (Shikuku & Mishra, 2021). Menurut Ayawei *et al.* (2017), nilai n yang lebih besar dari satu menggambarkan interaksi adsorben-adsorbat yang baik serta menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi adsorbat masih diikuti oleh peningkatan kapasitas penyerapan (Ayawei *et al*., 2017).

2. Isoterm Langmuir

Model isoterm Langmuir digunakan untuk menggambarkan proses adsorpsi pada permukaan adsorben yang relatif homogen dengan pembentukan lapisan tunggal (*monolayer*) Model ini menjelaskan bahwa setiap situs aktif pada permukaan adsorben memiliki energi adsorpsi yang sama yang hanya dapat ditempati oleh satu molekul adsorbat, sehingga setelah seluruh situs aktif terisi, kapasitas adsorpsi akan mencapai kondisi jenuh (Shimizu & Matubayasi, 2023).

Analisis isoterm Langmuir dilakukan berdasarkan data kesetimbangan adsorpsi *methylene blue* yang diperoleh pada kondisi optimum. Data tersebut disajikan pada Tabel 2 sebagai dasar untuk penentuan parameter isoterm Langmuir. Data pada Tabel 2 kemudian dianalisis menggunakan model isoterm Langmuir melalui hubungan antara C_e/Q_e untuk memperoleh parameter Langmuir serta mengevaluasi kesesuaian model terhadap data adsorpsi. Hasil regresi linier ditunjukkan pada Gambar 2.

Berdasarkan hasil yang diperoleh persamaan regresi $C_e/Q_e = 0{,}00424C_e + 0{,}02108$ dengan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9967 yang menunjukkan bahwa model Langmuir mampu menggambarkan proses adsorpsi *methylene blue* pada silika xerogel termodifikasi EDA/Cu dengan sangat baik. Tingginya nilai R^2 menunjukkan bahwa data eksperimen memiliki kesesuaian yang sangat baik terhadap model Langmuir, sehingga mekanisme adsorpsi lebih tepat dijelaskan melalui pembentukan lapisan tunggal pada permukaan adsorben yang relatif homogen (Zangi, 2023). Hasil serupa dilaporkan oleh Kaya (2019), yang menunjukkan bahwa adsorpsi *methylene blue* menggunakan silika xerogel mengikuti model Langmuir dengan nilai koefisien determinasi yang lebih tinggi dibandingkan model Freundlich, sehingga proses adsorpsi dikendalikan oleh keberadaan situs aktif yang seragam (Guzel Kaya *et al*., 2019). Kesesuaian tinggi terhadap model Langmuir untuk zat warna kationik pada adsorben berbasis silika juga dilaporkan pada studi adsorpsi metanil *yellow* menggunakan biosorben alami, dengan nilai R^2 Langmuir yang jauh lebih tinggi dibandingkan Freundlich (Etika *et al*., 2024).

Parameter Langmuir yang diperoleh meliputi kapasitas adsorpsi (Q_m) sebesar 235,63 mg/g menunjukkan kapasitas adsorpsi maksimum yang tinggi, sedangkan nilai K_L sebesar 0,201 L/mg mengindikasikan afinitas yang kuat antara adsorben dan adsorbat. Nilai K_L yang positif menunjukkan bahwa proses adsorpsi berlangsung efektif hingga mendekati kondisi jenuh ketika sebagian besar situs aktif telah terisi. Peningkatan kapasitas adsorpsi pada silika xerogel berkaitan erat dengan luas permukaan, struktur pori, serta keberadaan gugus fungsi

yang mampu meningkatkan interaksi antara permukaan adsorben dan molekul zat warna (Dahliyanti *et al*., 2022). Temuan ini sejalan dengan hasil karakterisasi tekstural silika xerogel abu terbang terfungsionalisasi EDA/Cu^{2+}, yang menunjukkan luas permukaan spesifik sebesar 77,42 m^2/g, volume pori 0,3894 cm^3/g, dan diameter pori rata-rata 16,09 nm. Perluasan volume dan diameter pori pasca-modifikasi tersebut merefleksikan pembentukan arsitektur mesopori yang lebih terbuka, sehingga berkontribusi terhadap ketersediaan situs aktif bagi interaksi adsorben–adsorbat (Nasra *et al*., 2026).

Nilai koefisien determinasi (R^2) model Freundlich yang lebih rendah dibandingkan model Langmuir menunjukkan bahwa model Freundlich kurang sesuai untuk menggambarkan mekanisme adsorpsi pada penelitian ini (Parida *et al*., 2021). Kesesuaian model Langmuir pada penelitian ini menunjukkan bahwa modifikasi menggunakan etilendiamin (EDA) dan ion Cu berperan dalam menghasilkan distribusi situs aktif yang lebih seragam pada permukaan silika xerogel (Nowicki, 2019). Menurut Mortazavi 2025), yang menunjukkan bahwa material berbasis silika memiliki kecenderungan mengikuti model Langmuir dengan kapasitas adsorpsi yang tinggi terhadap zat warna kationik akibat dominannya mekanisme adsorpsi lapisan tunggal (*monolayer*) (Mortazavi *et al*., 2025).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa modifikasi silika xerogel menggunakan etilendiamina (EDA) dan ion Cu mampu menghasilkan adsorben dengan karakteristik permukaan yang mendukung proses adsorpsi methylene blue secara efektif. Kesesuaian model Langmuir yang ditunjukkan oleh nilai R^2 sebesar 0,9967 mengindikasikan bahwa distribusi situs aktif pada permukaan adsorben relatif homogen sehingga interaksi antara adsorben dan adsorbat berlangsung secara lebih terarah. Temuan ini memperkuat potensi pemanfaatan silika xerogel berbahan dasar abu terbang (*fly ash*) sebagai adsorben alternatif yang ramah lingkungan dan bernilai tambah untuk aplikasi pengolahan limbah cair yang mengandung zat warna.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa model isoterm Langmuir merupakan model yang paling sesuai untuk menggambarkan adsorpsi *methylene blue* pada silika xerogel termodifikasi EDA/Cu, yang ditunjukkan oleh nilai koefisien determinasi (R^2 = 0,9967) yang lebih tinggi dibandingkan model Freundlich (R^2 = 0,5763). Hasil tersebut mengindikasikan bahwa proses adsorpsi berlangsung pada situs aktif yang relatif seragam dengan kecenderungan

pembentukan lapisan tunggal (*monolayer*) hingga mencapai kondisi setimbang. Modifikasi menggunakan EDA/Cu berkontribusi terhadap peningkatan kemampuan silika xerogel dalam mengadsorpsi *methylene blue*, sehingga material ini berpotensi digunakan sebagai adsorben untuk pengolahan limbah cair yang mengandung zat warna. Hasil penelitian ini memberikan informasi mengenai karakteristik kesetimbangan adsorpsi pada silika xerogel termodifikasi EDA/Cu dan dapat menjadi dasar bagi pengembangan penelitian lebih lanjut mengenai optimasi material maupun kajian mekanisme adsorpsi menggunakan model isoterm.

DAFTAR PUSTAKA

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*, 122383. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122383

Ambroz, F., Macdonald, T. J., Martis, V., & Parkin, I. P. (2018). Evaluation of the BET theory for the characterization of meso and microporous MOFs. *Small Methods, 2*(11), 1800173. https://doi.org/10.1002/smtd.201800173

Anggriawan, A., Atwanda, M. Y., Lubis, N., & Fathoni, R. (2019). Kemampuan Adsorpsi Logam Berat Cu dengan Menggunakan Adsorben Kulit Jagung (*Zea mays*). *Jurnal Chemurgy, 3*(2), 27–30. https://doi.org/10.30872/cmg.v3i2.3581

Ayawei, N., Ebelegi, A. N., & Wankasi, D. (2017). Modelling and interpretation of adsorption isotherms. *Journal of Chemistry, 2017*, 3039817. https://doi.org/10.1155/2017/3039817

Dahliyanti, A., Yunitama, D. A., Rofiqoh, I. M., & Mustapha, M. (2022). Synthesis and characterization of silica xerogel from corn husk waste as cationic dyes adsorbent. *F1000Research, 11*, 305. https://doi.org/10.12688/f1000research.75979.1

Danat, B. T., Wuana, R. A., Chahul, H. F., & Iorungwa, M. S. (2026). Review of adsorption isotherms models. *Applied Water Science, 16*, 72. https://doi.org/10.1007/s13201-025-02682-0

El Meziani, S., Agnaou, H., El Haddaj, H., Boumya, W., Barka, N., & Elhalil, A. (2025). Sustainable adsorption technologies for textile dye removal: Advances in biomass-derived and magnetically modified activated carbons. *Cleaner Chemical Engineering, 12*, 100210. https://doi.org/10.1016/j.clce.2025.100210

Etika, S. B., Kurniawati, D., Mulia, M., Darussalam, R., Suryani, O., Nasra, E., & Frista, N. (2024). Adsorption of Metanil Yellow Using Flavonoid Extract from Longan Peel (Dimocarpus longan): Optimization of pH and Concentration. *Pharmacognosy Journal* , *16*(6), 1315–1319. https://doi.org/10.5530/pj.2024.16.212

Guzel Kaya, G., Yilmaz, E., & Deveci, H. (2019). A novel silica xerogel synthesized from volcanic tuff as an adsorbent for high-efficient removal of methylene blue: Parameter optimization using Taguchi experimental design. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 94*(8), 2729–2737. https://doi.org/10.1002/jctb.6089

Kurniawati, D., Ramadhani, E. D., Ali, R. K., Khair, M., Nizar, U. K., Nasra, E., & Sari, T. K. (2023). Effect of Particle Size and Mass of Longan Peel (Euphoria Longan L.) as Adsorbent on the Adsorption of Rhodamine B and Methylene Blue Dyes Using the Column Method. *Journal of Physics: Conference Series*, *2582*(1). https://doi.org/10.1088/1742-6596/2582/1/012034

Liu, Y., Zhang, X., & Zhao, L. (2023). Removal of tetracycline from water using ethylenediamine-modified magnetic chitosan. *Water Cycle, 4*, 179–191. https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2023.09.001

Mortazavi, S., Sillanpää, M., & Bose, D. (2025). Kinetic and equilibrium comparison of methylene blue and basic blue 41 adsorption by silica fume. *Journal of the Serbian Chemical Society, 90*(11), 1415–1424. https://doi.org/10.2298/JSC241212030M

Nasra, E., Deswati, Safni, Putri, Y. E., Gemasih, M. I. S., & Putra, A. (2026). Synthesis and characterization of ethylenediamine and cupric ions functionalized fly-ash silica xerogel and ANN-based prediction of its heavy metal adsorption performance. *Journal of Ecological Engineering , 27*(6), 14–29. https://doi.org/10.12911/22998993/215517

Nowicki, W. (2019). Structural studies of complexation of Cu(II) with aminosilane-modified silica surface in heterogeneous system in a wide range of pH. *Applied Surface Science, 469*, 566–572. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.11.066

Olívio, P. H. de P., Buzato, G. V., & Souza, A. L. de. (2021). Influência da catálise ácida e básica na síntese de xerogéis de sílica para a adsorção de azul de metileno em meio aquoso. *Research, Society and Development, 10*(15), e132101522524. https://doi.org/10.33448/rsd-v10i15.22524

Parida, D., Salmeia, K. A., Sadeghpour, A., Zhao, S., Maurya, A. K., Assaf, K. I., Moreau, E., Pauer, R., Lehner, S., Jovic, M., Hirsch, C., & Gaan, S. (2021). Template-free synthesis of hybrid silica nanoparticle with functionalized mesostructure for efficient methylene blue removal. *Materials & Design, 201*, 109494. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109494

Radoor, S., Karayil, J., Jayakumar, A., Parameswaranpillai, J., & Siengchin, S. (2021). Release of toxic methylene blue from water by mesoporous silicalite-1: Characterization, kinetics and isotherm studies. *Applied Water Science, 11*, 110. https://doi.org/10.1007/s13201-021-01435-z

Ren, J., Zhang, S., Wang, Y., & Yang, H. (2024). Adsorption properties and mechanisms of methylene blue by modified Sphagnum moss bio-based adsorbents. *Materials, 17*(17), 4329. https://doi.org/10.3390/ma17174329

Sezgin, D., & Sarı Yılmaz, M. (2024). Xerogel of fast kinetics and high adsorption capacity for cationic dye removal. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences, 42*(1), 189–197. https://doi.org/10.14744/sigma.2022.00019

Shikuku, V. O., & Mishra, T. (2021). Adsorption isotherm modeling for methylene blue removal onto magnetic kaolinite clay: A comparison of two-parameter isotherms. *Applied Water Science, 11*, 103. https://doi.org/10.1007/s13201-021-01440-2

Shimizu, S., & Matubayasi, N. (2023). Sorption from solution: A statistical thermodynamic fluctuation theory. *Langmuir, 39*(37), 12987–12998. https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.3c00804

Wang, J., & Guo, X. (2020). Adsorption isotherm models: Classification, physical meaning, application and solving method. *Chemosphere, 258*, 127279. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127279

Xie, X., Zhu, Z., Meng, Y., Wang, L., Zhao, F., Chen, L., Jiang, L., Yan, M., & Zhou, X. (2025). Ambient-dried silica xerogels with enhanced strength and thermal insulation via calcium ion-glycerol synergistic crosslinking. *Gels, 11*(6), 462. https://doi.org/10.3390/gels11060462

Zangi, R. (2024). Breakdown of Langmuir adsorption isotherm in small closed systems. *Langmuir, 40*(7), 3900–3910. https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.3c03894