

Potensi Arang Aktif Apu-Apu (*Salvinia molesta*) sebagai Bioadsorben Terhadap Zat Warna Metil Jingga

Risfiah Ruli Cahyani¹, Eka Jhonatan Krissilvio¹, Marvin Horale Pasaribu¹, Erwin Prasety Toepak^{1*}

¹Program Studi Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Palangka Raya

Kata kunci

bioadsorben, arang, Apu-apu (*Salvinia molesta*), aktivasi, metil jingga

Abstrak

Bioadsorben merupakan bahan alami yang memiliki kemampuan untuk menyerap atau mengikat senyawa-senyawa tertentu dari lingkungan melalui adsorpsi. Di mana salah satu tanaman yang memiliki potensi sebagai bioadsorben adalah tanaman apu-apu. Pada penelitian ini, tanaman apu-apu digunakan sebagai agen bioadsorpsi terhadap zat warna metil jingga. Apu-apu diaktivasi dengan asam klorida (HCl) sebelum dilakukan proses adsorpsi dengan zat warna metil jingga, kemudian dikarakterisasi dengan spektrofotometer UV-Vis. Dari hasil yang didapatkan, bioadsorben apu-apu menunjukkan efektivitas penyerapan yang tinggi pada model isoterm Langmuir di mana nilai koefisien determinasi (R^2) yang didapatkan adalah 0,904 dan 0,9097 untuk konsentrasi HCl 0,5 M dan 1 M berturut-turut. Energi bebas Gibbs yang diperoleh sebesar 23,51 kJ/mol dan 25,45 kJ/mol. Tetapan kesetimbangan adsorpsi yang diperoleh yaitu $1,36 \times 10^4$ L/mol dan $2,99 \times 10^4$ L/mol untuk adsorben karbon aktif teraktivasi HCl 0,5 M dan 1 M berturut-turut. Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa proses adsorpsi zat warna metil jingga oleh karbon aktif dari tanaman apu-apu merupakan jenis adsorpsi kimia.

Keywords

bioadsorbent, charcoal, Apu-apu (*Salvinia molesta*), activation, methyl orange

Abstract

Bioadsorbents are natural materials that have the ability to absorb or bind certain compounds from the environment through adsorption. Where one of the plants that has potential as a bioadsorbent is the apu-apu plant. In this study, the apu-apu plant was used as a bioadsorption agent against methyl orange dye. Apu-apu material was activated with hydrochloric acid (HCl) before the adsorption process with methyl orange dye, then characterized with a UV-Vis spectrophotometer. From the results obtained, the apu-apu bioadsorbent showed high absorption effectiveness in the Langmuir isotherm model where the coefficient of determination (R^2) values obtained were 0.904 and 0,9097 for 0.5 M and 1 M HCl concentrations respectively. The Gibbs free energies obtained were 23.51 kJ/mol and 25.45 kJ/mol. The adsorption equilibrium constants obtained were 1.36×10^4 L/mol and 2.99×10^4 L/mol for 0.5 M and 1 M HCl-activated activated carbon adsorbents, respectively. Based on these results, it can be concluded that the adsorption process of methyl orange dye by activated carbon from apu-apu plant is a type of chemical adsorption.

Diterima : 05-02-2024
Disetujui : 17-02-2024
Dipublikasi : 29-02-2024

© 2024 Bohr: Jurnal Cendekia Kimia. *This work is licensed under a [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)*

PENDAHULUAN

Bioadsorben merupakan material alami yang secara intrinsik memiliki kapasitas untuk mengikat dan menyerap polutan spesifik dari lingkungan melalui proses adsorpsi. Salah satu bentuk bioadsorben potensial adalah arang sisa pembakaran biomassa, yang dapat dimodifikasi permukaannya melalui aktivasi fisika dan kimia. Mekanisme adsorpsi bioadsorben melibatkan interaksi molekuler antara target polutan dengan gugus fungsi pada permukaan bioadsorben. Berbagai sumber alami seperti mikroorganisme, tumbuhan, dan produk limbah organik dapat dimanfaatkan sebagai bioadsorben [1], [2], [3]. Salah satu kandidat bioadsorben alami yang menjanjikan adalah apu-apu (*Salvinia molesta*). Tumbuhan air ini berasal dari Amerika Selatan dan termasuk dalam famili *Salviniaceae*. Apu-apu ditemukan tumbuh secara alami di perairan tawar seperti danau, sungai, dan rawa-rawa [4]. Meskipun demikian, apu-apu dapat menjadi spesies invasif yang membawa dampak negatif ketika diintroduksi ke ekosistem baru di luar habitat aslinya [4], [5]. Ciri khas apu-apu adalah daunnya yang mengapung di permukaan air dengan struktur khusus yang memungkinkannya menjebak lapisan udara di bawahnya, sehingga memberikan kemampuan mengapung yang luar biasa. Namun, kemampuan ini juga memungkinkan apu-apu untuk berkembang biak dengan pesat dan membentuk tutupan tebal di permukaan air, yang dapat memicu berbagai permasalahan ekologis. Oleh karena itu, diperlukan upaya pengendalian apu-apu, salah satunya dengan memanfaatkannya sebagai agen biologis, yaitu sebagai bioadsorben. Pertumbuhan apu-apu yang cepat menjadikannya

kandidat potensial, namun pengelolaan yang efektif perlu diimplementasikan untuk menghindari dampak negatifnya terhadap ekosistem air dan kehidupan di dalamnya.

Adsorpsi adalah proses fisika atau kimiawi di mana molekul, ion, atau partikel kecil dari suatu zat diserap atau melekat pada permukaan zat padat. Proses ini terjadi karena gaya tarik antara molekul atau partikel yang akan diserap dengan permukaan zat padat tempat adsorpsi terjadi. Faktor-faktor yang memengaruhi daya serap adsorpsi dapat melibatkan beberapa variabel kunci dalam percobaan. Pertama, kapasitas adsorpsi bergantung pada sifat-sifat fisik dan kimia arang aktif. Ini termasuk luas permukaan spesifik dan keberadaan grup fungsional yang berpotensi untuk berinteraksi dengan zat warna. Misalnya, penggunaan arang aktif sebagai adsorben yang dihasilkan dengan metode pembakaran yang optimal dapat meningkatkan daya serapnya [6]. Selanjutnya, konsentrasi awal zat warna dalam larutan juga merupakan faktor kritis. Waktu kontak antara arang aktif dan larutan zat warna juga memainkan peran penting. Waktu yang optimal dapat memastikan interaksi yang maksimal antara arang aktif dan zat warna, sehingga meningkatkan daya serap [7].

Bioadsorben telah menjadi fokus utama dalam pengolahan limbah, pengelolaan lingkungan, dan pemurnian air. Keunggulan utama bioadsorben terletak pada sifatnya yang ramah lingkungan, biodegradable, dan ekonomis dibandingkan dengan bahan adsorben kimia konvensional. Bioadsorben mampu menghilangkan berbagai jenis polutan, seperti logam berat, zat pewarna, dan senyawa organik berbahaya [2], [7], [8], [9]. Kemampuan bioadsorben dalam mengurangi kadar polutan dalam air atau

limbah gas menjadikannya solusi menarik untuk meminimalkan dampak negatif aktivitas manusia terhadap lingkungan. Penelitian terus dilakukan untuk meningkatkan efisiensi dan aplikasi bioadsorben di berbagai bidang. Dengan pengembangan teknologi dan penemuan sumber bioadsorben baru, diharapkan penggunaannya akan semakin meluas sebagai alternatif ramah lingkungan dan berkelanjutan untuk mengatasi permasalahan lingkungan dan pencemaran.

METODOLOGI PENELITIAN

Peralatan

Pada penelitian ini, adapun alat-alat yang digunakan diantaranya adalah alat-alat gelas seperti gelas kimia, gelas ukur, erlenmeyer, pipet volume, pipet tetes, dan alat lainnya seperti timbangan analitik, saringan 100 mesh, oven, botol vial, corong, furnace, sentrifugator, lampu pijar, *shaker*, dan *spektrofotometer UV-Vis*.

Bahan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu arang aktif dari tanaman apu-apu, asam klorida (*HCl*) 0,5 M dan 1 M, akuades, serta zat warna metil jingga (*MO*).

Langkah Kerja

a. Persiapan arang dari apu-apu

Pada proses ini, sampel yang telah diambil dikeringkan terlebih dahulu di bawah sinar matahari selama ± 24 jam kemudian dibakar dipanaskan dalam furnace pada suhu 200°C selama 1 jam dan digerus dengan mortar, kemudian diayak untuk mendapatkan serbuk dengan ukuran 100 mesh.

b. Pembuatan arang apu-apu teraktivasi dengan asam

Sampel sebanyak 12,5 gr kemudian diaktivasi dengan menggunakan larutan asam klorida (*HCl*) yang telah dibuat dengan konsentrasi 0,5 M dan 1 M sebanyak 125 mL selama ± 24 jam.

Selanjutnya, arang aktif yang telah melalui proses aktivasi kemudian difiltrasi dengan kertas saring dan dicuci dengan akuades. Lalu sampel arang aktif tersebut dikeringkan pada suhu 100°C .

c. Adsorpsi metil jingga pada arang aktif apu-apu

Arang aktif 0,5 M dan 1 M *HCl* yang telah kering ditimbang sebanyak 0,02 gram kemudian dimasukkan ke dalam erlenmeyer yang telah berisi larutan zat warna metil jingga dengan konsentrasi 20, 40, 60, 80, 100, dan 120 ppm yang masing-masing sebanyak 20 mL. Selanjutnya dilakukan metode adsorpsi batch dengan variasi konsentrasi menggunakan *shaker* selama ± 60 menit.

Setelah diaduk, filtrat dan endapan kemudian disentrifuge selama ± 15 menit dengan kecepatan 3500 rpm lalu dipisahkan filtratnya. Kemudian filtrat tersebut diencerkan 10 kali dan dikarakterisasi dengan menggunakan *spektrofotometer UV-Vis* dengan panjang gelombang 465 nm. Nilai absorbansi yang didapatkan dari hasil uji tersebut selanjutnya dihitung dan dimasukkan ke dalam persamaan isoterm langmuir dan freundlich untuk mengetahui karakteristik penyerapannya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sintesis arang aktif apu-apu

Dalam proses sintesis arang aktif dari apu-apu, terdapat beberapa tahap yang harus dijalani. Tahap pertama adalah preparasi sampel, yang melibatkan proses pencucian dan pengeringan sampel. Selanjutnya, dilakukan aktivasi fisik melalui karbonisasi pada sampel apu-apu yang telah dikeringkan dengan cara membakar sampel tersebut. Hasil dari proses ini adalah residu berupa arang. Proses karbonisasi terjadi melalui dekomposisi sampel dan senyawa pada suhu ekstrem. Penting dicatat bahwa suhu tinggi selama pembakaran memainkan peran kunci dalam meningkatkan porositas dan

stabilitas termal pada arang. Kenaikan suhu mendorong zat-zat volatil keluar dari arang, menyebabkan pembentukan pori dan peningkatan luas permukaan.

Setelah tahap aktivasi fisik, dilanjutkan dengan aktivasi kimia pada arang apu-apu yang telah dibakar. Proses ini bertujuan untuk meningkatkan gugus fungsional pada permukaan arang aktif.

Aktivasi kimia dilakukan dengan menggunakan asam klorida (HCl), dengan konsentrasi 0,5 M dan 1M. Hasil dari aktivasi kimia adalah pembentukan gugus fungsional seperti karboksilat, karbonil, dan sejenisnya pada permukaan arang aktif. hasil aktiviasi arang dari tanaman apu-apu ditunjukkan pada gambar 1 dibawah ini.



(a)



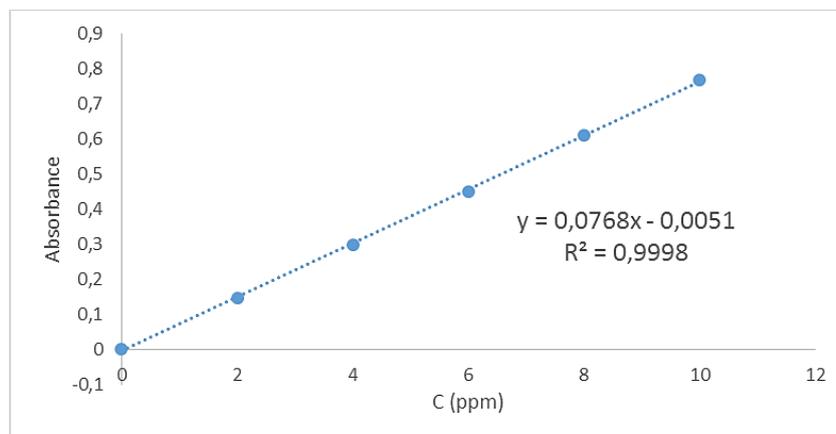
(b)

Gambar 1. Karbon dari tanaman Apu-apu (*Salvinia molesta*) sebelum aktivasi HCl (a), setelah aktivasi HCl 0,5 M (kiri) dan 1M (kanan) (b)

Penentuan kurva standar metil jingga

Kurva kalibrasi untuk zat warna metil jingga dibuat dengan menyiapkan serangkaian larutan standar dengan konsentrasi 2, 4, 6, 8, dan 10 ppm. Absorbansi setiap larutan diukur menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum 464 nm. Data absorbansi dan konsentrasi kemudian diplot dalam bentuk grafik.

Persamaan kurva kalibrasi diperoleh sebagai $y = 0,07682x + 0,00514$, dengan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,99989 seperti yang ditunjukkan pada gambar 2. Nilai R^2 yang diperoleh mendekati 1 menunjukkan kecocokan yang sangat baik antara data eksperimental dan kurva kalibrasi. Hal ini menegaskan validitas penggunaan kurva kalibrasi untuk pengujian selanjutnya.

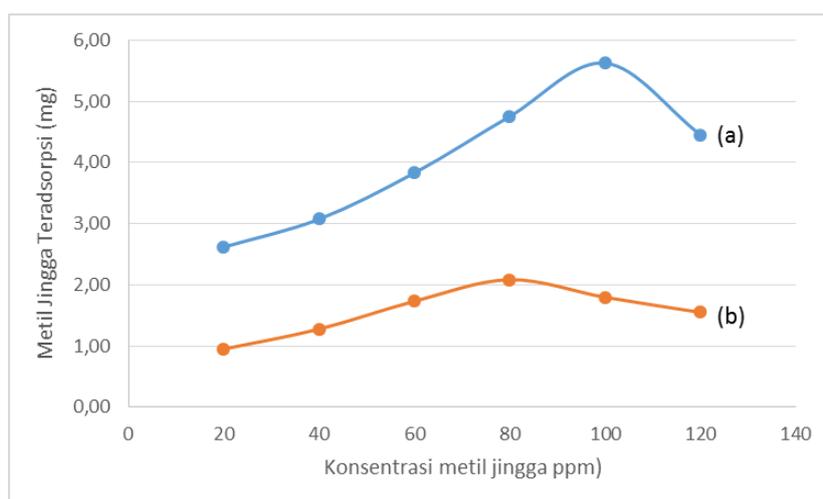


Gambar 2. Kurva kalibrasi metil jingga

Daya serap metil jingga pada arang aktif apu-apu

Kapasitas adsorpsi optimum arang aktif apu-apu terhadap metil jingga diukur dengan memvariasikan konsentrasi zat warna metil jingga dari 20, 40, 60, 80, 100, dan 120 ppm. Pengujian dilakukan pada pH 7 dengan waktu kontak 60 menit. Spektrofotometer UV-Vis digunakan untuk mengukur absorbansi larutan metil jingga setelah proses adsorpsi. Hasil penentuan konsentrasi optimal ditunjukkan pada

Gambar 3. Grafik menunjukkan hubungan antara konsentrasi awal metil jingga dan jumlah metil jingga yang teradsorpsi oleh arang aktif apu-apu dengan aktivator HCl 0,5 dan 1 M. Konsentrasi optimum dapat ditentukan pada titik di mana kurva mulai mencapai plateau, menunjukkan bahwa arang aktif telah mencapai kapasitas maksimumnya dalam mengadsorpsi metil jingga.



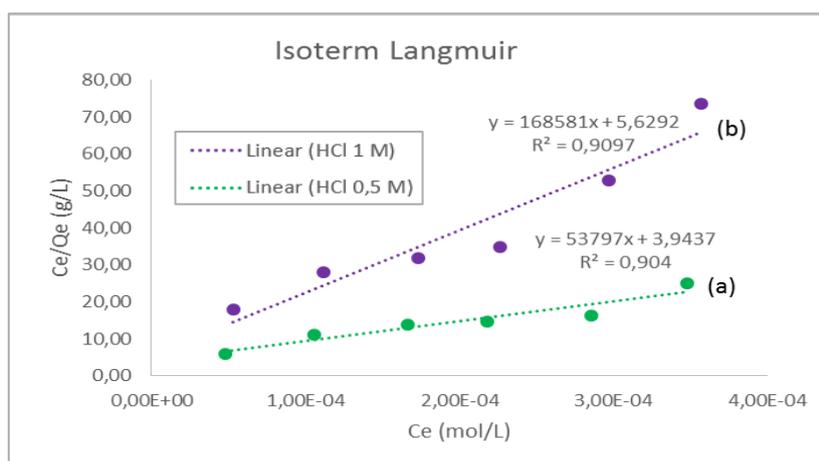
Gambar 3. Grafik hubungan antara variasi konsentrasi dengan efisiensi adsorpsi zat warna metil jingga dengan karbon aktif teraktivasi HCl 0,5 M (a) dan HCL 1 M (b)

Berdasarkan hasil pengujian diperoleh konsentrasi optimum penyerapan zat warna metil jingga pada adsorben karbon aktif tanaman apu-apu teraktivasi HCl 0,5 M pada konsentrasi 100 ppm dan HCl 1 M pada konsentrasi 80 ppm dengan adsorpsi maksimal metil jingga mencapai 5,62 mg dan 2,08 mg secara berturut-turut. Perbedaan nilai adsorpsi ini menunjukkan bahwa aktivasi karbon aktif dengan menggunakan NaOH 0,5 M lebih baik dibandingkan dengan NaOH 1 M, hal ini disebabkan oleh konsentrasi HCl yang

terlalu tinggi justru dapat mengakibatkan pori-pori karbon yang terbentuk menjadi rusak [10]. Penurunan adsorpsi metil jingga pada konsentrasi selanjutnya disebabkan adsorben sudah dalam keadaan setimbang dimana permukaan bahan adsorben telah jenuh sehingga tidak mampu lagi untuk menyerap konsentrasi zat warna metil jingga yang lebih tinggi. Hasil adsorpsi zat warna metil jingga oleh karbon aktif ditunjukkan pada Gambar 4 dibawah ini.



Gambar 4. Hasil adsorbansi karbon aktif apu-apu aktivasi HCl 0,5 M (a) dan HCl 1 M (b) dan terhadap zat warna metil jingga



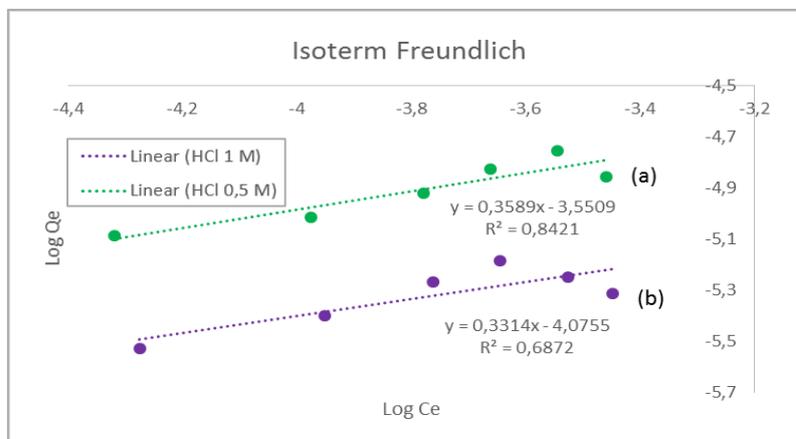
Gambar 5. Model isoterm langmuir adosrpsi zat warna metil jingga oleh karbon aktif apu-apu aktivasi HCl 0,5 M (a) dan HCl 1 M (b)

Data pertama, menunjukkan bahwa arang aktif apu-apu memiliki kemampuan adsorpsi yang baik terhadap metil jingga dalam larutan 0,5 M. Grafik isoterm Langmuir menunjukkan peningkatan konsentrasi kesetimbangan (C_e) seiring dengan peningkatan kapasitas adsorpsi (Q_e). Koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9097 menunjukkan bahwa model Langmuir dengan baik menjelaskan pola adsorpsi pada kondisi ini. Data kedua, menunjukkan pola serupa dalam adsorpsi metil jingga dalam larutan HCl 1 M.

Koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,904 menunjukkan bahwa model Langmuir juga cukup baik dalam menjelaskan proses adsorpsi dalam kondisi ini. Perbandingan kedua kondisi menunjukkan bahwa perubahan konsentrasi asam HCl memiliki pengaruh pada parameter isoterm Langmuir. Perubahan ini dapat disebabkan oleh perubahan pH larutan, yang dapat memengaruhi sifat-sifat permukaan arang aktif dan interaksi adsorpsi dengan metil jingga.

Isoterm Freundlich merupakan model empiris yang digunakan untuk mendeskripsikan interaksi antara molekul-molekul adsorbat dengan permukaan adsorben. Model ini memberikan

gambaran yang lebih mendalam tentang proses adsorpsi dibandingkan dengan model Langmuir yang lebih sederhana.



Gambar 6. Model freundlich adsorpsi zat warna metil jingga oleh karbon aktif apu-
 apu aktivasi HCl 0,5 M (a) dan HCl 1 M (b).

Data kedua, Pada kondisi HCl 0,5 M, data isoterm Freundlich menunjukkan bahwa arang aktif apu-
 apu memiliki kemampuan adsorpsi yang cukup baik terhadap metil jingga. Grafik isoterm Freundlich menunjukkan hubungan log-log antara konsentrasi kesetimbangan (Ce) dan kapasitas adsorpsi (Qe). Koefisien determinasi (R²) yang tinggi, yaitu 0,8421, menunjukkan bahwa model Freundlich dengan baik menjelaskan pola adsorpsi pada kondisi ini. Pada kondisi HCl 1 M, data isoterm Freundlich menunjukkan gambaran yang sedikit berbeda. Meskipun koefisien determinasi (R²) masih mencapai

0,6872, nilai ini menunjukkan bahwa model Freundlich mungkin kurang presisi dalam menjelaskan pola adsorpsi pada kondisi ini dibandingkan dengan kondisi HCl 0,5 M. Perbedaan ini dapat disebabkan oleh pengaruh peningkatan konsentrasi asam pada lingkungan adsorpsi. Peningkatan konsentrasi HCl dapat mempengaruhi sifat permukaan arang aktif dan interaksi adsorpsi dengan metil jingga. Data persamaan isoterm adsorpsi arang aktif teraktivasi HCl ditunjukkan pada Tabel 2 dibawah ini.

Tabel 2. Data Persamaan Model Isoterm Adsorpsi aktivasi HCl

HCl (Molar)	Langmuir				Freundlich				
	B (mg/g)	K (L/mol)	E (KJ/mol)	R ²	K _f (mg/g)	n	B (mg/g)	E (KJ/mol)	R ²
0,5	6,084	13641,5	23,51	0,904	2,81×10 ⁻⁵	2,786	1,0×10 ⁻⁴	7,25	0,842
1,0	1,942	29947,59	25,45	0,909	8,40×10 ⁻⁵	3,018	2,8×10 ⁻⁵	7,68	0,687

Keterangan: B = Kapasitas adsorpsi
 K = Konstanta adsorpsi
 E = Energi adsorpsi
 R² = Regresi linear
 K_f = Konstanta Freundlich
 n = Ketetapan Empiris

Dari tabel diatas menunjukkan hasil perhitungan kesetimbangan dan termodinamika reaksi adsorpsi arang aktif teraktivasi HCl terhadap zat warna metil jingga. Kespontanitasan reaksi adsorpsi zat warna metil orange pada adsorben karbon aktif dapat ditentukan dengan menghitung nilai Energi Bebas Gibbs (ΔG°) pada keadaan setimbang. berdasarkan hasil perhitungan menunjukkan bahwa penyerapan karbon aktif teraktivasi HCl terhadap zat warna metil jingga mengikuti pola adsorpsi isotherm Langmuir yang ditunjukkan dengan nilai R^2 sebesar 0,904 dan 0,909 pada konsentrasi HCl 0,5 M dan 0,1 M secara berturut turut. Hal ini menggambarkan bahwa proses adsorpsi metil jingga terjadi pada permukaan adsorben karbon aktif yang homogen. Nilai ΔG° yang diperoleh pada isotherm Langmuir sebesar 23,51 kJ/mol pada aktivasi HCl 0,5 M dan 25,34 kJ/mol untuk HCl 1 M. Nilai ΔG° yang lebih kecil menunjukkan bahwa reaksi adsorpsi berlangsung lebih spontan. Berdasarkan nilai ΔG° tersebut, dapat disimpulkan bahwa ikatan antara adsorben dan adsorbat cenderung bersifat kimia. Hal ini karena nilai ΔG° yang diperoleh berada di atas 20 kJ/mol [11]. Adsorpsi kimia ditandai dengan energi ikatan yang relatif kuat, sehingga adsorbat dengan mudah dapat diadsorpsi oleh adsorben. Dalam percobaan ini, adsorben yang digunakan memiliki energi ikatan yang rendah

KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan efektivitas arang aktif Apu-Apu dalam mengadsorpsi metil jingga 0.5 M dan HCl 1 M dengan model Langmuir memberikan koefisien determinasi (R^2) tinggi, yaitu 0.9097 dan 0.904, mengindikasikan eksplanasi yang baik terhadap pola adsorpsi. Penelitian ini mendukung potensi bioadsorben Apu-Apu dalam pengelolaan limbah dan pemurnian air dengan catatan pentingnya optimasi kondisi eksperimental. Energi bebas Gibbs yang diperoleh sebesar 23,51 kJ/mol dan 25,45 kJ/mol. Tetapan kesetimbangan adsorpsi yang diperoleh yaitu $1,36 \times 10^4$ L/mol dan

$2,99 \times 10^4$ L/mol untuk adsorben karbon aktif teraktivasi HCl 0,5 M dan 1 M berturut-turut. Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa proses adsorpsi zat warna metil jingga oleh karbon aktif dari tanaman apu-apu merupakan jenis adsorpsi kimia

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Z. Shamsollahi and A. Partovinia, "Recent advances on pollutants removal by rice husk as a bio-based adsorbent: A critical review," *Journal of Environmental Management*, vol. 246. Academic Press, pp. 314–323, Sep. 15, 2019. doi: 10.1016/j.jenvman.2019.05.145.
- [2] J. M. Pérez-Morales, G. Sánchez-Galván, and E. J. Olguín, "Continuous dye adsorption and desorption on an invasive macrophyte (*Salvinia minima*)," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 26, no. 6, pp. 5955–5970, Feb. 2019, doi: 10.1007/s11356-018-04097-8.
- [3] R. Lingam, R. Kashyap, and M. Donatus, "Removal of heavy metals from industrial effluent using *salvinia molesta*," 2016. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/304951224>
- [4] S. N. Motitsoe, J. A. Coetzee, J. M. Hill, and M. P. Hill, "Biological control of *Salvinia molesta* (D.S. Mitchell) drives aquatic ecosystem recovery," *Diversity (Basel)*, vol. 12, no. 5, May 2020, doi: 10.3390/D12050204.
- [5] L. S. Koutika and H. J. Rainey, "A review of the invasive, biological and beneficial characteristics of aquatic species *Eichhornia crassipes* and *Salvinia molesta*," *Appl Ecol Environ Res*, vol. 13, no. 1, pp. 263–275, 2015, doi: 10.15666/aeer/1301_263275.

- [6] R. Gong *et al.*, “Adsorptive Removal of Methyl Orange and Methylene Blue from Aqueous Solution with Finger Citron Residue-Based Activated Carbon.”
- [7] E. Rápó and S. Tonk, “Factors affecting synthetic dye adsorption; desorption studies: A review of results from the last five years (2017–2021),” *Molecules*, vol. 26, no. 17. MDPI, Sep. 01, 2021. doi: 10.3390/molecules26175419.
- [8] C. D. Hernández-Origel *et al.*, “Use of Eichhornia Crassipes as a Bioadsorbent for the Removal of Methyl Orange and Methylene Blue Present in Residual Solutions,” *Journal of Ecological Engineering*, vol. 23, no. 9, pp. 193–211, 2022, doi: 10.12911/22998993/151916.
- [9] A. Singh, S. Kumar, and V. Panghal, “Adsorption of chromium (Cr⁶⁺) on dead biomass of *Salvinia molesta* (Kariba weed) and *Typha latifolia* (broadleaf cattail): isotherm, kinetic, and thermodynamic study,” *Appl Water Sci*, vol. 11, no. 9, Sep. 2021, doi: 10.1007/s13201-021-01481-7.
- [10] S. Oko, Mustafa, A. Kurniawan, and E. S. B. Palulun, “Pengaruh Suhu dan Konsentrasi Aktivator HCl terhadap Karakteristik Karbon Aktif dari Ampas Kopi,” *Metana: Media Komunikasi Rekayasa Proses dan Teknologi Tepat Guna*, vol. 17, no. 1, pp. 15–21, 2021.
- [11] M. H. Pasaribu, K. Karelius, E. P. Ramdhani, R. Agnestisia, Z. Pereiz, and E. P. Toepak, “Synthesis of Mil-100(Fe)@Fe₃O₄ Composite using Zircon Mining Magnetic Waste as an Adsorbent for Methylene Blue Dye,” *BIO Web of Conferences*, vol. 70, p. 02010, Nov. 2023, doi: 10.1051/bioconf/20237002010.