

Sintesis Nanomaterial Magnetit (Fe_3O_4) Termodifikasi Ampas Teh (*Camellia sinensis*) dan Aplikasinya dalam Mengdegradasi Zat Warna Metilen Biru dalam Sistem Multikomponen

Siti Maratus Sholikhah¹

¹Departemen Kimia, Universitas Islam Negeri Yogyakarta, Indonesia

¹sitimaratusholikhah11@gmail.com

ABSTRACT

Keywords:

Tea Waste,
Magnetic Nanomaterial,
Adsorption,
Methylene Blue

Abstract: This study aimed to synthesize magnetite nanomaterials (Fe_3O_4) based on Tea Waste (*Camellia sinensis*) and evaluate their potential as adsorbents for methylene blue (MB) removal in both single and multicomponent systems. MNMs-CS were synthesized using the inverse co-precipitation method with $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ and $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ as iron precursors, tea waste extract as the reducing and stabilizing agent, and NaOH as the precipitating agent. FTIR characterization confirmed the successful formation of magnetite through the presence of characteristic Fe–O bonds at 439.77 and 578.64 cm^{-1} , while XRD analysis revealed a crystallite size of 19.8 nm. The optimum adsorption conditions for MB in the single-component system were obtained at pH 8, an equilibrium contact time of 15 min, and an initial MB concentration of 15 mg/L. Kinetic studies showed that the adsorption process followed the pseudo-second-order model, indicating that the adsorption rate was primarily governed by surface reactions. Furthermore, equilibrium data for both single- and multicomponent systems were best described by the Freundlich isotherm model, suggesting multilayer adsorption on a heterogeneous surface. Overall, these findings demonstrate that MNMs-CS are stable, efficient, and environmentally friendly adsorbents with strong potential for application in wastewater treatment, including under more complex multicomponent conditions.

Kata Kunci:

Ampas Teh,
Nanomaterial Magnetik,
Adsorpsi,
Metilen Biru

Abstrak: Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis nanomaterial magnetit (Fe_3O_4) berbasis ampas teh (*Camellia sinensis*) dan mengevaluasi potensinya sebagai adsorben untuk penyisihan metilen biru (MB) baik dalam sistem tunggal maupun multikomponen. MNMs-CS disintesis menggunakan metode kopresipitasi balik dengan $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dan $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ sebagai prekursor besi, ekstrak ampas teh sebagai agen pereduksi dan penstabil, serta NaOH sebagai agen pengendap. Karakterisasi FTIR mengonfirmasi keberhasilan pembentukan magnetit melalui keberadaan ikatan khas Fe–O pada bilangan gelombang 439,77 dan 578,64 cm^{-1} , sedangkan analisis XRD menunjukkan ukuran kristalit sebesar 19,8 nm. Kondisi adsorpsi optimum untuk MB dalam sistem komponen tunggal diperoleh pada pH 8, waktu kontak kesetimbangan 15 menit, dan konsentrasi awal MB sebesar 15 mg/L. Studi kinetika menunjukkan bahwa proses adsorpsi mengikuti model semu orde dua (*pseudo-second-order*), yang mengindikasikan bahwa laju adsorpsi utamanya dikendalikan oleh reaksi permukaan. Selain itu, data kesetimbangan untuk sistem tunggal maupun multikomponen paling baik dijelaskan oleh model isoterm Freundlich, yang menunjukkan terjadinya adsorpsi multilapis pada permukaan yang heterogen. Secara keseluruhan, temuan ini membuktikan bahwa MNMs-CS merupakan adsorben yang stabil, efisien, dan ramah lingkungan dengan potensi kuat untuk diaplikasikan dalam pengolahan air limbah, termasuk pada kondisi multikomponen yang lebih kompleks.

Article Histor:

Received : 01-10-2026

Accepted : 30-11-2026



This is an open access article under the [CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license

A. LATAR BELAKANG

Industri tekstil merupakan salah satu penyumbang limbah cair terbesar yang mengandung zat warna sintetis dalam volume signifikan, diperkirakan mencapai sekitar 10.000 ton per tahun di seluruh dunia (Slama et al., 2021). Rendahnya efisiensi penyerapan zat warna oleh serat kain menyebabkan sisa zat warna terbuang ke lingkungan melalui air limbah (Syakina & Rahmayanti, 2023). Metilen Biru (MB), suatu zat warna heterosiklik kationik, merupakan salah satu senyawa yang umum digunakan dalam skala industri; namun, senyawa ini sulit terdegradasi secara alami serta bersifat toksik, mutagenik, dan karsinogenik. Pembuangan limbah MB tanpa pengolahan terlebih dahulu memicu pencemaran serius pada badan air, mengganggu ekosistem perairan, dan menimbulkan potensi bahaya bagi kesehatan manusia (Aji et al., 2019; Khan, 2022).

Berbagai teknologi pengolahan limbah telah banyak dikembangkan, dan di antaranya metode adsorpsi dianggap efektif karena memiliki efisiensi tinggi, biaya operasional terjangkau, serta mampu menurunkan konsentrasi zat warna secara signifikan (Rahmayanti et al., 2020). Penggunaan nanopartikel magnetit Fe_3O_4 sebagai adsorben memberikan keuntungan yang nyata. Nanopartikel ini memiliki luas permukaan spesifik yang besar, sehingga meningkatkan kapasitas penyerapan terhadap polutan (Mahmuda et al., 2014). Selain itu, sifat superparamagnetiknya memungkinkan pemisahan adsorben dari larutan limbah secara mudah menggunakan medan magnet luar, yang memfasilitasi proses perolehan kembali (recovery) dan menekan biaya operasional (Fitria et al., 2021).

Peningkatan kesadaran akan kimia hijau (green chemistry) telah mendorong pengembangan metode sintesis nanopartikel yang lebih ramah lingkungan. Sintesis konvensional magnetit Fe_3O_4 sering kali melibatkan bahan kimia berbahaya. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan pendekatan inovatif dengan memanfaatkan limbah organik, khususnya ampas teh (*Camellia sinensis*), baik sebagai agen pereduksi maupun penstabil dalam metode kopresipitasi. Ampas teh kaya akan senyawa polifenol yang mengandung gugus fungsi aktif untuk mereduksi ion besi dan menstabilkan nanopartikel magnetit Fe_3O_4 yang terbentuk, sehingga meminimalkan aglomerasi selama proses sintesis (Aulia, 2024; Islamiyah, 2018).

Meskipun nanopartikel magnetit Fe_3O_4 telah terbukti efektif, studi adsorpsi sering kali terbatas pada sistem komponen tunggal, yang belum mencerminkan kondisi air limbah sebenarnya. Oleh karena itu, tujuan utama dari penelitian ini adalah: (1) Mensintesis nanopartikel magnetit Fe_3O_4 menggunakan metode kopresipitasi balik berbantuan ekstrak ampas teh; (2) Menganalisis serapan gugus fungsi dan kristalinitas nanopartikel hasil sintesis; serta (3) Evaluasi secara menyeluruh kinerja adsorpsi magnetit Fe_3O_4 yang dihasilkan dalam menyisihkan zat warna Metilen Biru dalam sistem multikomponen, sekaligus menganalisis kinetika dan isoterm adsorpsinya. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan solusi berkelanjutan untuk pengolahan limbah zat warna sekaligus mengoptimalkan pemanfaatan limbah biomassa.

B. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan ampas teh (*Camellia sinensis*), akuades (H_2O), akuabides tingkat analisis, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, NaOH, HCl, Metilen Biru (MB), dan Congo Red (CR). Peralatan laboratorium standar yang digunakan meliputi pengaduk magnetik (magnetic stirrer), ayakan 100 mesh, neraca analitik, oven, hot plate, pH meter digital, pengocok (shaker IKA KS 260 basic), dan pompa vakum Buchner. Karakterisasi dan pengukuran optik dilakukan menggunakan spektrofotometer UV-Vis (Jasco V-730 double beam), spektrofotometer FTIR (Shimadzu IRPrestige-21 dan IRSpirit), serta instrumen XRD (Bruker D2, $\text{Cu K}\alpha$ ($\lambda = 0,1545 \text{ nm}$)).

Untuk sintesis adsorben, ampas teh rumah tangga yang telah dikeringkan dihaluskan, diayak (100 mesh), dan diekstrak dalam akuabides pada suhu 60°C selama 20 menit (30 g/300 mL). Ekstrak yang telah disaring sebanyak 15 mL dicampurkan dengan larutan prekursor yang mengandung 1,668 g $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ dan 3,246 g $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dalam 150 mL akuabides. Campuran ini diteteskan ke dalam 20 mL NaOH 1 M di bawah pengadukan kontinu pada suhu 60°C selama 60 menit. Nanopartikel magnetik yang terbentuk (MNMs-CS) dipisahkan menggunakan magnet luar dan penyaringan Buchner, dikeringkan pada suhu 60°C selama 60 menit, kemudian digerus hingga menjadi serbuk halus. Gugus fungsi dan struktur kristal MNMs-CS masing-masing dikarakterisasi menggunakan FTIR dan XRD.

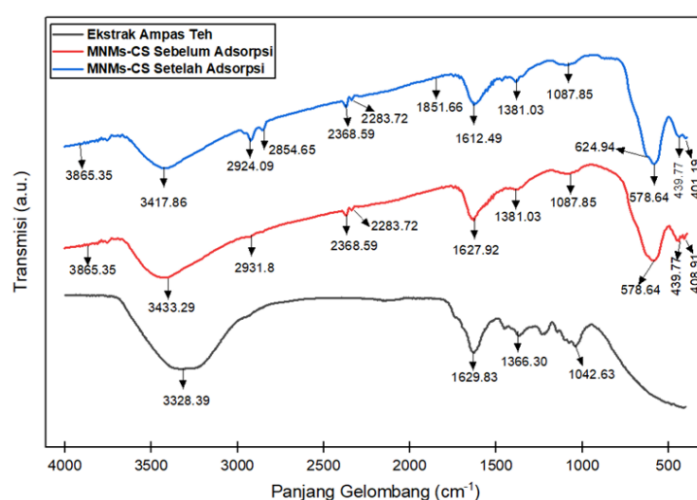
Kinerja adsorpsi dievaluasi dengan mengukur konsentrasi MB setelah adsorpsi menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang serapan maksimum (λ_{maks}) berdasarkan kurva kalibrasi 3–15 mg/L. Optimasi pH (2–10) dan waktu kontak (1–150 menit) dilakukan menggunakan 10 mg MNMs-CS dalam 25 mL larutan MB (150 rpm pada suhu ruang), dan data kinetika dicocokkan dengan model

semu orde satu Lagergren dan semu orde dua Ho. Isoterm adsorpsi diuji pada kondisi optimum baik dalam sistem komponen tunggal (10 mg MNMs-CS dalam 25 mL MB, 5–25 mg/L) maupun sistem multikomponen (20 mg MNMs-CS dalam campuran 25 mL MB [5–25 mg/L] dan 25 mL Congo Red [5 mg/L]), dilanjutkan dengan pemodelan isoterm Langmuir dan Freundlich.

C. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Karakterisasi MNMs-CS

Dalam penelitian ini, nanopartikel magnetik disintesis dari ampas teh menggunakan metode kopresipitasi balik dengan NaOH sebagai agen pengendap. Reaksi dilakukan pada pH 8, yang berada di atas atau sama dengan pHPZC magnetit, sehingga menyebabkan muatan permukaan berubah dari netral menjadi negatif. Berdasarkan diagram Pourbaix, ion Fe^{2+} dan Fe^{3+} pada pH 8 bereaksi dengan ion OH^- membentuk endapan Fe_3O_4 yang stabil secara termodinamika. Menjaga rentang pH spesifik ini mencegah ion besi terkonversi menjadi produk samping yang tidak diinginkan seperti goethite atau hematite, sehingga menjaga kemurnian dan sifat magnetik dari nanopartikel yang disintesis.



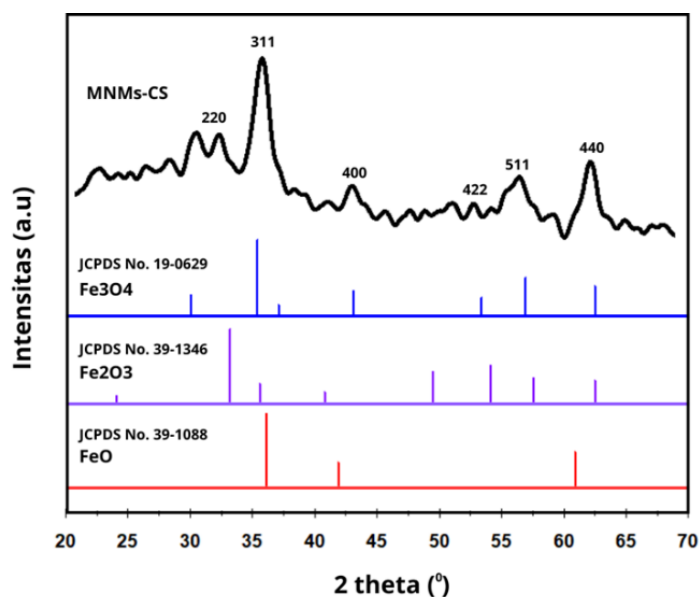
Gambar 1. Spektra FTIR ekstrak ampas teh, MNMs-CS sebelum adsorpsi, dan MNMs-CS setelah adsorpsi MB.

Spektrum FTIR dari ekstrak ampas teh mengonfirmasi keberadaan gugus fungsi organik utama, yang ditandai oleh puncak regangan broad -OH dan -NH pada $3328,39 \text{ cm}^{-1}$ serta pita aromatik C=O atau C=C pada $1629,83 \text{ cm}^{-1}$. Gugus-gugus ini berasal dari polifenol dan tanin yang bertindak sebagai agen pereduksi dan penstabil selama sintesis. Keberhasilan pembentukan MNMs-CS ditandai oleh pita regangan khas Fe-O pada $578,64 \text{ cm}^{-1}$ pada spektrum sebelum adsorpsi. Selain itu, pergeseran pita -OH/-NH dari $3328,39 \text{ cm}^{-1}$ ke $3417,86 \text{ cm}^{-1}$ mengindikasikan adanya interaksi kimia yang kuat antara gugus organik ampas teh dan ion besi di permukaan, yang mengonfirmasi bahwa bahan organik berhasil berfungsi sebagai agen pengelubung (capping agent).

Setelah adsorpsi Metilen Biru (MB), perubahan intensitas pita -OH/-NH di sekitar 3417 cm^{-1} menunjukkan adanya ikatan hidrogen antara MB dan gugus hidroksil/amina di permukaan. Pergeseran pita aromatik C=O/C=C dari $1627,92 \text{ cm}^{-1}$ ke $1612,49 \text{ cm}^{-1}$ memberikan bukti interaksi penumpukan pi-pi (pi-pi stacking) antara cincin aromatik MB dan komponen fenolik yang tersisa. Keberadaan pita Fe-O yang tetap bertahan membuktikan bahwa MNMs-CS mempertahankan stabilitas strukturnya tanpa mengalami degradasi selama proses adsorpsi.

Analisis XRD dilakukan untuk mengevaluasi kemurnian fase dan struktur kristal. Pola XRD dari MNMs-CS menampilkan puncak-puncak difraksi tajam pada sudut 2-theta sekitar $30,1$; $35,5$; $43,4$; $53,8$; $57,2$; dan $62,7$ derajat, yang sesuai dengan bidang kristal (220), (311), (400), (422), (511), dan (440) dari magnetit spinel terbalik (JCPDS No. 19-0629). Puncak dominan pada $35,5$ derajat (311) mengonfirmasi magnetit sebagai fase kristal utama. Namun, pelebaran puncak dan tumpang-tindih (overlapping) pada $35,5$ dan $62,7$ derajat mengindikasikan koeksistensi Fe_2O_3 , yang kemungkinan terbentuk melalui oksidasi parsial selama atau

setelah sintesis. Karena kemiripan struktur antara spinel kubik Fe_3O_4 dan Fe_2O_3 , puncak difraksinya saling tumpang-tindih, membuat sampel ini menjadi campuran besi oksida yang didominasi oleh Fe_3O_4 .



Gambar 2. Difraktogram XRD dari MNMs-CS.

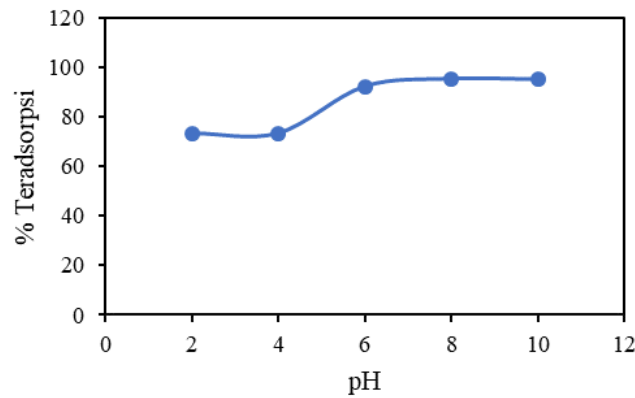
Ukuran kristalit rata-rata yang dihitung menggunakan persamaan Debye-Scherrer adalah sebesar 19,8 nm, dan material ini menunjukkan daya tarik magnetik yang kuat ketika dipaparkan pada medan magnet luar.



Gambar 3. Daya tarik magnetik MNMs-CS menggunakan medan magnet luar.

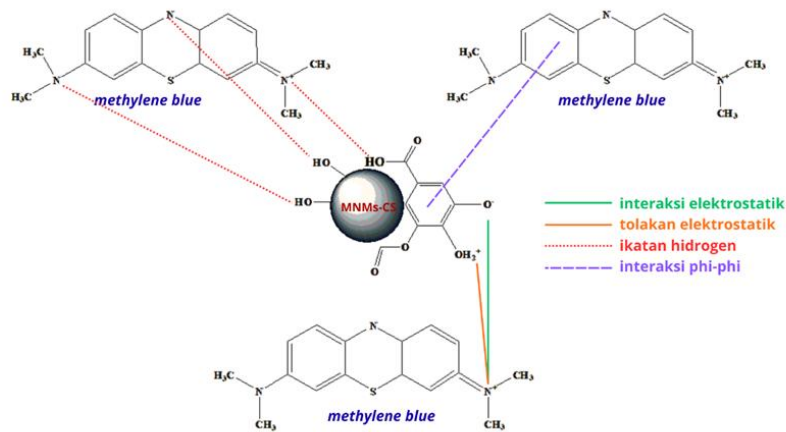
pH larutan memegang peranan penting dalam adsorpsi dengan mengubah muatan permukaan adsorben dan spesiasi molekul zat warna. Dalam kondisi asam (pH di bawah 3), permukaan MNMs-CS menjadi bermuatan positif akibat protonasi gugus fungsi, yang memicu gaya tolak elektrostatis terhadap molekul MB yang bersifat kationik sehingga menghasilkan efisiensi adsorpsi yang lebih rendah (73,26% pada pH 2). Seiring meningkatnya pH di atas pH_{PZC} (yang turun di bawah 3,0 untuk Fe_3O_4 termodifikasi ampas teh), permukaan mengalami deprotonasi membentuk gugus bermuatan negatif ($-\text{OH}$, $-\text{COOH}$, $-\text{O}^-$).

Perubahan ini menciptakan gaya tarik elektrostatis yang kuat terhadap ion kationik MB, menyebabkan efisiensi adsorpsi meningkat tajam dari pH 4 (73,3%) ke pH 6 (93,3%). Efisiensi adsorpsi maksimum dicapai pada pH 8, mencapai 95,4% (dan 92,3% pada uji batch optimal), di mana situs aktif bermuatan negatif telah terbentuk secara sempurna.



Gambar 4. Pengaruh pH larutan terhadap adsorpsi Metilen Biru pada MNMs-CS.

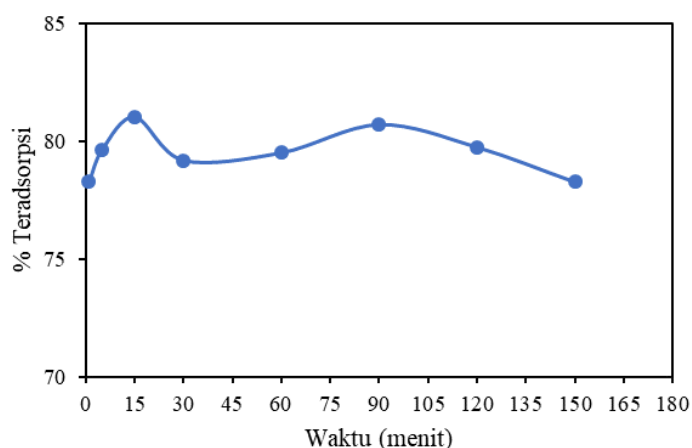
Selain daya tarik elektrostatis, proses adsorpsi disokong secara sinergis oleh ikatan hidrogen antara gugus hidroksil/karboksil pada MNMs-CS dengan atom nitrogen/sulfur pada MB, serta interaksi penumpukan pi-pi antara polifenol ampas teh dan cincin aromatik MB di bawah pengaruh gaya van der Waals.



Gambar 5. Usulan mekanisme adsorpsi Metilen Biru pada MNMs-CS.

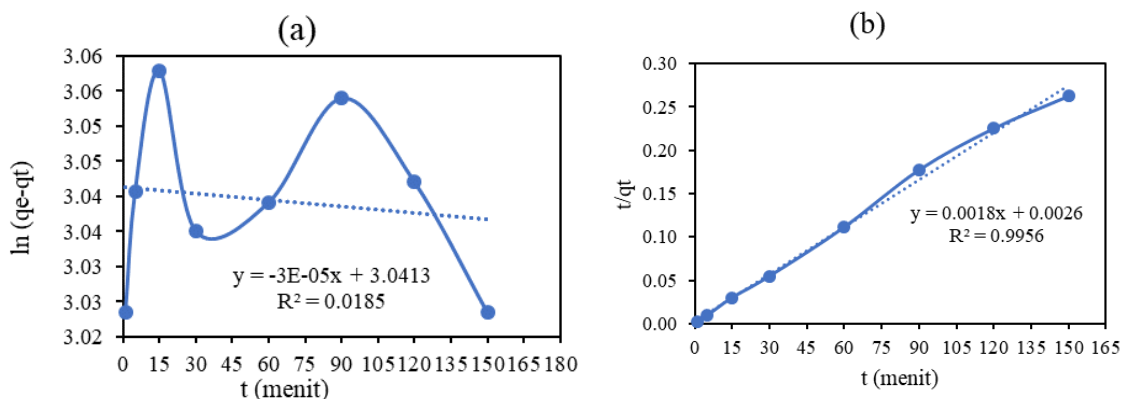
2. Karakterisasi MNMs-CS Kinetika Adsorpsi dalam Sistem Komponen Tunggal

Studi kinetika yang dilakukan pada pH 8 dengan variasi waktu kontak dari 1 hingga 150 menit menunjukkan penyerapan zat warna yang cepat pada tahap awal, mencapai penyisihan 81% dalam waktu 15 menit karena melimpahnya ketersediaan situs aktif yang masih kosong. Setelah 15 menit, laju adsorpsi mulai melandai seiring jenuhnya situs aktif hingga mencapai kondisi kesetimbangan.



Gambar 6. Pengaruh waktu kontak terhadap adsorpsi Metilen Biru pada MNMs-CS.

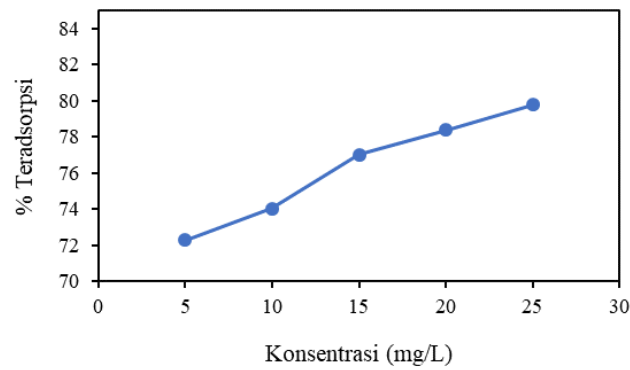
Untuk mengevaluasi mekanisme dan langkah penentu laju reaksi, data eksperimen dicocokkan dengan model semu orde satu (PFO) Lagergren dan semu orde dua (PSO) Ho. Model PFO mengasumsikan bahwa laju adsorpsi bergantung pada situs kosong (khas untuk adsorpsi fisika), sedangkan model PSO mendeskripsikan proses yang dikendalikan oleh interaksi kimia seperti pemakaian bersama atau transfer elektron. Model PSO menunjukkan kesesuaian yang sangat baik dengan nilai R^2 sebesar 0,9956 dibandingkan dengan koefisien determinasi model PFO yang rendah. Nilai kapasitas adsorpsi kesetimbangan (q_e) dan konstanta laju yang lebih tinggi pada kalkulasi model PSO mengonfirmasi bahwa penyerapan MB pada MNMs-CS utamanya didorong oleh kemisorpsi yang melibatkan pembentukan ikatan kimia antara kationik MB dan gugus fungsi permukaan.



Gambar 7. Plot linier kinetika adsorpsi MB: (a) Model PFO Lagergren, (b) Model PSO Ho.

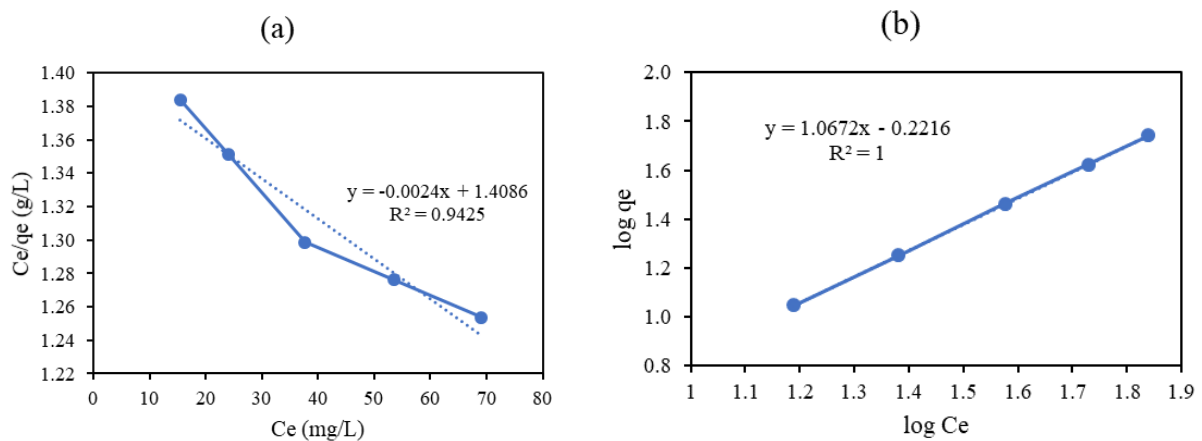
3. Isoterm Adsorpsi dalam Sistem Tunggal dan Multikomponen

Dalam pengujian komponen tunggal (konsentrasi awal MB 5 hingga 25 mg/L pada pH 8 dan waktu kontak 15 menit), persentase adsorpsi meningkat dari 72% menjadi 80% seiring peningkatan konsentrasi zat warna. Peningkatan ini didorong oleh gaya dorong (driving force) yang lebih kuat untuk transfer massa antara fase cair dan padat.



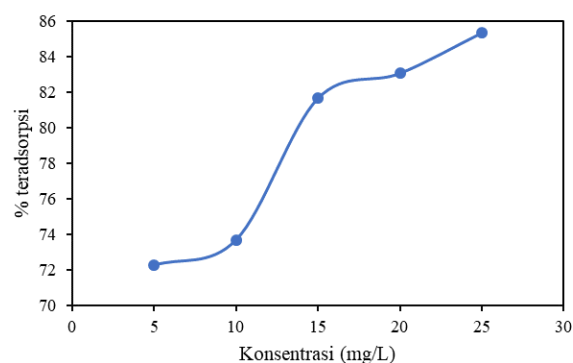
Gambar 8. Pengaruh konsentrasi awal terhadap adsorpsi MB dalam sistem komponen tunggal.

Pencocokan isoterm menunjukkan bahwa model Freundlich memberikan kesesuaian yang ideal dengan $R^2 = 1.0000$, $K_F = 1.6657 \text{ mol/g}$, dan $n = 0.9370$, mengungguli model Langmuir ($R^2 = 0.9425$, $q_{\text{max}} = 0.0013 \text{ mol/g}$, $K_L = 544.966 \text{ L/mol}$). Nilai konstanta Freundlich $n < 1$ mengonfirmasi terjadinya fisisorpsi pada permukaan yang heterogen dengan potensi pembentukan multilapis (multilayer).



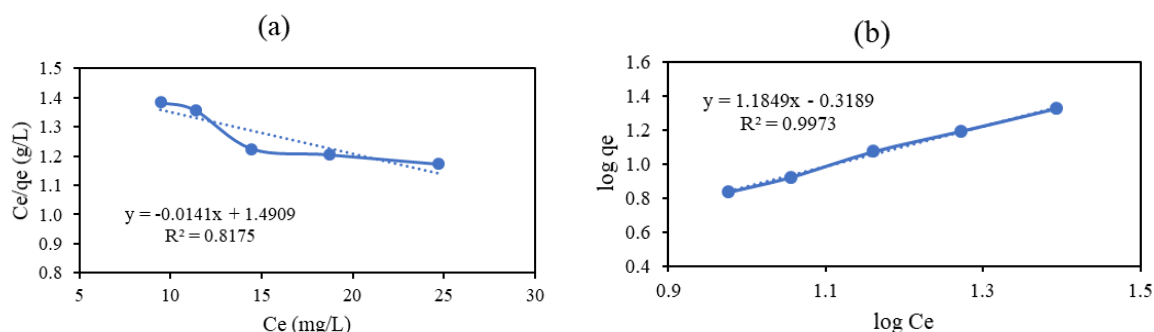
Gambar 9. Plot isoterm adsorpsi untuk sistem komponen tunggal: (a) Model Langmuir, (b) Model Freundlich.

Pada sistem multikomponen (konsentrasi MB divariasi dari 5 hingga 25 mg/L dengan konsentrasi Congo Red konstan sebesar 15 mg/L), persentase adsorpsi MB tetap mengalami peningkatan seiring dengan kenaikan konsentrasi awal MB, meskipun terdapat kompetisi dari molekul zat warna lain.



Gambar 10. Pengaruh konsentrasi awal terhadap adsorpsi MB dalam sistem multikomponen.

Data isoterm kembali menunjukkan kesesuaian yang lebih baik dengan model Freundlich ($R^2 = 0.9973$) dibandingkan model Langmuir ($R^2 = 0.8175$). Namun, nilai konstanta kapasitas KF turun dari 1.6657 mol/g pada sistem tunggal menjadi 0.4798 ml/g pada sistem multikomponen, yang secara langsung mencerminkan adanya persaingan perebutan situs aktif antara MB kationik dan Congo Red anionik pada permukaan heterogen MNMs-CS.



Gambar 11. Plot isoterm adsorpsi untuk sistem multikomponen: (a) Model Langmuir, (b) Model Freundlich.

D. SIMPULAN DAN SARAN

Nanopartikel magnetit (Fe_3O_4) telah berhasil disintesis melalui jalur ramah lingkungan memanfaatkan ampas teh (*Camellia sinensis*) dan menunjukkan kinerja yang efektif dalam penyisihan zat warna Metilen Biru (MB). Proses adsorpsi berlangsung optimal pada pH 8 dengan waktu kontak 15 menit, mengikuti model kinetika semu orde dua (PSO) Ho, yang mengindikasikan adanya interaksi kimia antara permukaan adsorben dan molekul MB. Studi isoterm adsorpsi baik dalam sistem komponen tunggal maupun multikomponen menunjukkan bahwa penyerapan MB pada Fe_3O_4 sesuai dengan model Freundlich, yang menandakan permukaan adsorben bersifat heterogen dan terjadi perilaku fisisorpsi dengan potensi pembentukan multilapis. Hasil ini membuktikan bahwa Fe_3O_4 berbasis ampas teh memiliki potensi besar sebagai nanomaterial adsorben magnetik yang ramah lingkungan untuk pengolahan limbah zat warna tekstil dalam sistem multikomponen.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Farmasi Universitas Muhammadiyah Yogyakarta atas fasilitas ruangan dan peralatan yang disediakan. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Kimia UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta atas dukungannya, khususnya kepada Prof. Dr. Maya Rahmayanti, S.Si., M.Si. selaku dosen pembimbing penelitian ini sehingga penelitian ini dapat berjalan dengan baik.

REFERENSI

- Aji, M. P., Yulianto, A., & Bijaksana, S. (2019). Sintesis nanopartikel magnetit, maghemit dan hematit dari bahan lokal. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:197495944>
- Asfiya, I. (2025). Sintesis Nanopartikel Magnetit (Fe_3O_4) Termodifikasi Ekstrak Kulit Jeruk Manis (*Citrus Sinensis*) dan Aplikasinya Sebagai Adsorben Zat Warna Methylene Blue Dalam Sistem Multikomponen [UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta]. <http://digilib.uin-suka.ac.id/id/eprint/70736>
- Aulia, M. (2024). Pembuatan adsorben ampas teh termodifikasi material magnetit (Fe_3O_4) untuk pengolahan limbah metilen biru. Universitas Negeri Jakarta.
- Azizian, S. (2004). Kinetic Models of Sorption: A Theoretical Analysis. *J. Colloid Interface Sci.*, 276, 47.
- Bukit, N., Nasution, F. H., Ginting, M., Sebayang, K., & Pasaribu, F. L. (2015). Sintesis dan Karakterisasi Nanopartikel Magnetik dari Pasir Besi Alam dengan Metode Kopresipitasi. *Jurnal Ilmu Fisika*, 7(2), 52–59.
- Fitria, G., Patriati, A., Mujamilah, Prihatiningsih, M. C., Putra, E. G. R., & Soontaranon, S. (2021). Hierarchical structure of magnetic nanoparticles- Fe_3O_4 -ferrofluids revealed by small angle x-ray scattering. *Indonesian Journal of Chemistry*, 21(3), 635–643. <https://doi.org/10.22146/ijc.59114>
- Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2010). Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chemical Engineering Journal*, 156(1), 2–10. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.09.013>

- Ho, Y. S., & McKay, G. (1999). Pseudo-second order model for sorption processes. *Process Biochemistry*, 34(5), 451–456.
- Islam, M. A., Chowdhury, M. A., Mozumder, M. S. I., & Uddin, M. T. (2021). Langmuir Adsorption Kinetics in Liquid Media: Interface Reaction Model. *ACS Omega*, 6(22), 14481–14492. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c01449>
- Islamiyah, N. P. (2018). Sintesis dan karakterisasi nanopartikel magnetit (Fe_3O_4) tanpa dan dengan penambahan asam sitrat serta aplikasinya sebagai koagulan. Universitas Negeri Malang.
- Khaira, R., Ulinas, A., Azhar, M., & Mawardi. (2020). Sintesis Nanopartikel Magnetik Besi Oksida (Fe_3O_4) Menggunakan Ekstrak Daun Sirih Merah (*Piper Crocatum*) sebagai Agen Pelindung (Capping Agent). *Chemistry Journal Universitas Negeri Padang*, 9(2). <http://ejournal.unp.ac.id/index.php/kimia>
- Khan, M. . et al. (2022). Adsorpsi pewarna methylene blue pada adsorben berbasis biomassa: studi kinetika dan mekanisme. *Chemical Engineering Journal Storage*, 2(2), 75–86.
- Liu, J., Yu, Y., Zhu, S., Yang, J., Song, J., Fan, W., Yu, H., Bian, D., & Huo, M. (2018). Synthesis and characterization of a magnetic adsorbent from negatively-valued iron mud for methylene blue adsorption. *PLoS ONE*, 13(2). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0191229>
- Prasetyowati, D., Handayani, R., & Wardani, S. (2021). Sintesis Nanopartikel Magnetit (Fe_3O_4) dari Besi Sulfat Menggunakan Ekstrak Daun Teh sebagai Bioreduktor. *Jurnal Penelitian Sains*, 18(2), 10–18.
- Rahmayanti, M., Yahdiani, A., & Afifah, I. Q. (2022). Eco-friendly synthesis of magnetite based on tea dregs (Fe_3O_4 -TD) for methylene blue adsorbent from simulation waste. *Communications in Science and Technology*, 7(2), 119–126. <https://doi.org/10.21924/cst.7.2.2022.965>
- Rahmayanti, M., Yunita, E., & Putri, N. F. Y. (2020). Study of Adsorption-Desorption on Batik Industrial Dyes (Naphthol Blue Black) on Magnetite Modified Humic Acid ($\text{HA-Fe}_3\text{O}_4$). *Jurnal Kimia Sains Dan Aplikasi*, 23(7), 244–248. <https://doi.org/10.14710/jksa.23.7.244-248>
- Sharma, P., Saini, V., & Singh, R. (2021). Biosorption of methylene blue by bone meal powder: Adsorption mechanism and kinetics study. *Frontiers in Environmental Chemistry*, 2.
- Slama, H. Ben, Bouket, A. C., Pourhassan, Z., Alenezi, F. N., Silini, A., Cherif-Silini, H., Oszako, T., Luptakova, L., Golińska, P., & Belbahri, L. (2021). Diversity of synthetic dyes from textile industries, discharge impacts and treatment methods. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(14). <https://doi.org/10.3390/app11146255>
- Syakina, A. N., & Rahmayanti, M. (2023). Removal of methyl violet from aqueous solutions by green synthesized magnetite nanoparticles with *Parkia Speciosa* Hassk. peel extracts. *Chemical Data Collections*, 44. <https://doi.org/10.1016/j.cdc.2023.101003>
- Youssif, M. M., El-Attar, H. G., Hessel, V., & Wojnicki, M. (2024). Recent Developments in the Adsorption of Heavy Metal Ions from Aqueous Solutions Using Various Nanomaterials. *Materials*, 17(21). <https://doi.org/10.3390/ma17215141>
- Yuliani, H., A., A., Z., I., I., & Setiawati, H. (2023). Equilibrium Model and Adsorption Kinetics of Methylene Blue with Kluwak Shell Carbon. 800–805. <https://doi.org/10.5220/0010953900003260>
- Zhang, S., Malik, S., Ali, N., Khan, A., Bilal, M., & Rasool, K. (2022). Covalent and Non-covalent Functionalized Nanomaterials for Environmental Restoration. *Topics in Current Chemistry*, 380(5). <https://doi.org/10.1007/s41061-022-00397-3>