

REMOCIÓN DE VERDE MALAQUITA USANDO UN COMPOSITO MAGNETITA/NANOPLAQUETAS DE GRAFENO

Biología y Química

MALACHITE GREEN REMOVAL USING A MAGNETITE/GRAPHENE NANOPLAQUET COMPOSITE

RESUMEN

Los ecosistemas acuáticos y la salud humana se han deteriorado debido a la presencia de contaminantes en el ambiente. Ante esta problemática, se han desarrollado diferentes técnicas de tratamiento y remediación, entre las cuales la adsorción ha demostrado ser una de las más eficientes y de menor costo. En este proyecto se reporta la aplicación del proceso de adsorción para la eliminación del colorante verde malaquita (VM), presente en soluciones acuosas, utilizando como material adsorbente un compuesto de magnetita y nanoplaquetas de grafeno (NPG). Dicho compuesto fue preparado en una proporción de 40/60 % m/m mediante mecosíntesis durante una hora a 3000 rpm. Las condiciones experimentales incluyeron una dosis de material adsorbente de 2 g/L en un medio con pH neutro, una concentración inicial de 1000 ppm de VM y temperatura ambiente. Los resultados obtenidos evidenciaron una eficiencia de remoción del 67,5 % ($q_e = 303$ mg/g); además, los datos experimentales se ajustaron al modelo matemático de pseudo-segundo orden. De esta manera, el estudio confirma el potencial del compuesto a base de magnetita y grafeno como una alternativa viable y prometedora para la depuración de aguas contaminadas con colorante VM, contribuyendo al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030 relacionados con el acceso al agua limpia.

Palabras clave: verde malaquita, adsorción, compuesto, magnetita/nanoplaquetas de grafeno.

ABSTRACT

Aquatic ecosystems and human health have been adversely affected by environmental pollutants. In response to this problem, various treatment and remediation techniques have been developed, among

Daniel De La Peña Aguirre¹, Lucía Fabiola Cano Salazar¹, Jorge Carlos Ríos Hurtado², Marco Antonio García Lobato¹, Denis Aidee Cabrera Munguía¹, Elia Martha Muzquiz Ramos¹

¹ Facultad de Ciencias Químicas de la UAdeC, Blvd. Venustiano Carranza 935, República, 25280 Saltillo, Coah.

² Facultad de Metalurgia, Carretera 57 Km 5, Los Bosques, 25710 Monclova, Coah.

Correspondencia: Elia Martha Muzquiz Ramos, Corre:

emuzquiz@uadec.edu.mx;

ORCID: 0000-0001-8626-678X



CienciAcierta

which adsorption has proven to be one of the most efficient and cost-effective. This project reports the application of adsorption for the removal of malachite green (MV) from aqueous solutions, using a magnetite-graphene nanoplatelet (GNP) composite as the adsorbent. This composite was prepared at a 40/60% w/w ratio via mechano-synthesis for 1 hour at 3000 rpm. The experimental conditions included an adsorbent dosage of 2 g/L in a neutral pH medium, an initial MV concentration of 1000 ppm, and ambient temperature. The results obtained showed a removal efficiency of 67.5% ($q_e = 303$ mg/g), and the experimental data fit the pseudo-second-order mathematical model. Thus, the study confirms the potential of the magnetite-graphene composite as a viable alternative for the treatment of water contaminated with VM dye, contributing to achieving the Sustainable Development Goals related to access to clean water by 2030.

Keywords: malachite green, adsorption, composite, magnetite/graphene nanoplatelets

INTRODUCCIÓN

El medio ambiente ha sufrido un deterioro progresivo como consecuencia del avance industrial, de la vida doméstica y del desarrollo tecnológico. Uno de los problemas más preocupantes es la contaminación del agua, causada principalmente por el uso indiscriminado de productos químicos en diversas actividades industriales. Entre los contaminantes más frecuentes se encuentran los metales pesados, como el plomo y el arsénico, que son altamente tóxicos tanto para los organismos acuáticos como para los seres humanos. También destacan los nitratos, responsables de la eutrofización y del crecimiento excesivo de algas, así como los microplásticos, que afectan la vida marina e ingresan en la cadena alimenticia. A ello se suman los residuos industriales y una gran variedad de colorantes que alteran la claridad y la salubridad del agua, impactando de manera directa al ecosistema acuático (Andrade-Guel y col., 2023).

Una de las industrias más antiguas y contaminantes es la textil, caracterizada por el uso excesivo de colorantes. Estos compuestos se clasifican de diversas maneras; sin embargo, los de naturaleza sintética, catiónica y aromática presentan una mayor estabilidad en el medio y



resultan difíciles de biodegradar (Muinde y col., 2017). Entre estos se encuentra el VM, un colorante básico y soluble en agua, perteneciente a la familia de los trifenilmetanos, que se emplea ampliamente en los sectores alimentario, sanitario y textil, así como en otras aplicaciones, incluyendo su uso como parasiticida en acuicultura (Qu y col., 2019). La Figura 1 muestra la estructura química del colorante VM o cloruro de N-(4 - {[4- (dimetilamino) fenil] (fenil) metilenciclohexa-2,5-dien-1-ilideno) - N-metilmetanaminio.

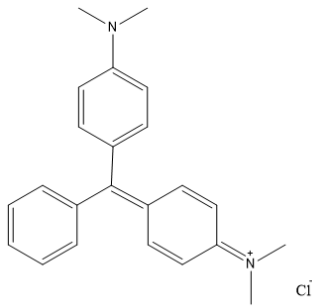


Figura. 1. Estructura química del VM (elaboración propia)

Esta industria ha generado un problema ambiental significativo: el vertido de colorantes en aguas residuales, lo que contribuye de manera considerable a la contaminación hídrica y representa un riesgo para la salud humana. Dichos compuestos reducen la penetración de la luz en el manto acuático, lo que interfiere con la fotosíntesis de los organismos del medio. Además, muchos de los colorantes empleados actualmente, son sustancias químicas tóxicas que se acumulan en los cuerpos de agua, constituyendo una amenaza persistente para la biodiversidad acuática (Firdaus y col., 2019; Mokarram y col., 2020; Dwivedi Babasaheb Bhimrao, 2023)

En términos de salud, los colorantes pueden provocar reacciones alérgicas y dermatitis y, en casos más graves, algunos compuestos sintéticos presentan propiedades cancerígenas, lo que aumenta el riesgo de desarrollar enfermedades a largo plazo. La exposición prolongada a estos contaminantes, especialmente en entornos industriales, puede generar efectos tóxicos acumulativos en el organismo humano (Li y col., 2014).

Para enfrentar esta problemática se han desarrollado distintos métodos de eliminación de contaminantes, entre los que destacan la

electrocoagulación, la filtración por membranas, los procesos de oxidación avanzada y la adsorción. Esta última resulta especialmente atractiva por su bajo costo, facilidad de operación y la amplia disponibilidad de materiales adsorbentes. Entre ellos, los compuestos a base de carbón y las nanopartículas de ferritas han demostrado ser altamente eficientes en la remoción de una gran variedad de contaminantes, incluidos los colorantes (Bayantong y col., 2021; Choudhary y col., 2020).

Las NPG han despertado un creciente interés debido a su forma de nanopolvo y sus atractivas propiedades fisicoquímicas, lo que las convierte en el material predilecto para aplicaciones avanzadas. Las NPG presentan propiedades interesantes, como ligereza, alta conductividad eléctrica y térmica, tenacidad mecánica, bajo costo y estructura plana. Las NPG resultan más económicas que las nanofibras y los nanotubos de carbono; además, presentan un desempeño comparable al de estos últimos en la mejora de las propiedades mecánicas de los materiales compuestos. Además, la conductividad eléctrica de las NPG es un orden de magnitud superior a la de los óxidos de grafeno, lo que las hace un material óptimo para la adsorción (Cataldi y col., 2018).

Una ferrita es un material cerámico que está formado por óxido de hierro como (Fe_3O_4) en gran proporción mezclado con elementos metálicos como el Bario (Ba), manganeso (Mn), níquel (Ni) y zinc (Zn) en pequeñas proporciones, la naturaleza tanto del óxido de hierro como del metal es eléctricamente no conductora, ferromagnética y una alta permeabilidad lo cual lo hace un material apto para combinarse con otros aumentar la capacidad de adsorción (Thakur y col., 2020).

En este contexto, el presente proyecto se orienta a la exploración, el diseño y el desarrollo de materiales compuestos adsorbentes basados en magnetita y nanoplaquetas de grafeno. El objetivo principal es evaluar su eficacia para eliminar las VM presentes en el agua modelo. De esta manera, se busca aportar soluciones innovadoras y sostenibles que contribuyan de manera significativa a mitigar la problemática ambiental relacionada con la calidad y disponibilidad de este recurso vital, tal como lo indican los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los reactivos utilizados fueron: nanoplaquetas de grafeno de la marca Cheap Tubes, sin modificación previa; colorante verde malaquita de la marca CTR; y agua desionizada. Todos los experimentos se realizaron por triplicado.

La síntesis de la magnetita se realizó según el método descrito por Macías y colaboradores (2016). Se preparó una disolución acuosa de cloruro férrico ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), cloruro ferroso ($\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) en una proporción 2:1. Simultáneamente se calentó agua destilada hasta 70 °C y, bajo agitación magnética, se agregó hidróxido de amonio (NH_4OH) hasta tener una solución 1.6 molar, dejando tiempo suficiente para que la solución se estabilice a 70 °C. Luego, se añadió la solución de cloruros gota a gota a la solución de hidróxido de amonio hasta obtener un precipitado negro, correspondiente a la magnetita, y se mantuvo la agitación durante 30 min. El precipitado se lavó varias veces con agua destilada para eliminar los cloruros residuales y se secó al aire a temperatura ambiente, para su posterior molienda (Macías-Martínez y col., 2016).

Mecanosíntesis

El compuesto de magnetita y nanoplaquetas de grafeno fue preparado en un molino de bolas (bench-top modelo MSK-SFM-1), con una proporción de las materias primas 40/60 % m/m (4/6 g) mediante un proceso de mecano-síntesis en un molino de bolas durante una hora a 3000 rpm.

PRUEBAS DE ADSORCIÓN

Se utilizó una masa de 10 mg del compuesto, durante un tiempo de contacto de una hora, a temperatura ambiente y con agitación mecánica constante. La concentración inicial de la mezcla fue de 1000 ppm utilizando un volumen de 5 mL de esta solución de VM. Transcurrido el tiempo de contacto se filtraron las muestras y se leyeron en el espectro UV-Vis a la longitud de onda correspondiente del colorante (620 nm)

EFFECTO DEL TIEMPO DE CONTACTO

Para analizar el comportamiento de adsorción del colorante VM sobre el compuesto a lo largo del tiempo, se realizó un estudio cinético de adsorción. Se emplearon concentraciones iniciales de 1000 ppm y



tiempos de contacto que oscilaron entre 0 y 180 minutos, utilizando una masa específica del adsorbente y 5 mL de las soluciones de VM.

ESTUDIO CINÉTICO

Una vez obtenidos los resultados de las pruebas de efecto de tiempo de contacto, los datos se utilizaron para probarlos en los modelos cinéticos de Elovich, Pseudo Primer Orden y Pseudo Segundo Orden, las ecuaciones utilizadas para el análisis matemático de los datos, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Ecuaciones de diferentes modelos cinéticos (Sevim y col., 2021)(Musah y col., 2022).

Modelo cinético	Ecuación lineal	Gráfico
Elovich	$q_t = \beta * \ln(\delta * \beta) + \beta * \ln(t)$	$q_e VS \ln t$
Pseudo primer orden	$\ln(q_e - q_t) = \ln(q_e) - k_{-1}p \times t$	$\ln(q_e - q_t)$ vs. t
Pseudo segundo orden	$t/q_t = (1/k_{2p} \times q_e^2) + (t/q_e)$	t/q_t vs. t

Donde: q_t y q_e son, respectivamente, la cantidad de colorante adsorbido en el tiempo t y en el equilibrio ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$). k_{1p} , k_{2p} y k_p son respectivamente el modelo cinético constante de pseudo-primer orden (min^{-1}), de pseudo-segundo orden ($\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) y difusión intraarticular ($\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-0.5}$); a ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) y β ($\text{g} \cdot \text{mg}^{-1}$) son las constantes del modelo cinético de Elovich

RESULTADOS

Las pruebas de adsorción de colorantes desempeñan un papel clave tanto en la investigación científica como en la industria, ya que permiten eliminar estos contaminantes de cuerpos de agua y optimizar procesos industriales. En estos experimentos, factores como la masa del adsorbente, el pH de la solución y el tiempo de contacto influyen directamente en la eficiencia del proceso de adsorción (Teo y col., 2022).

PRUEBAS DE ADSORCIÓN

La cantidad de adsorbente es un aspecto crucial para determinar la capacidad máxima de adsorción, el pH de la solución influye en la



ionización tanto del adsorbente como del colorante, lo que afecta su interacción y, en consecuencia, la cantidad de colorante retenido. Este efecto es especialmente relevante para colorantes con distintos comportamientos en medios ácidos o básicos (Wang y col., 2023).

En esta sección se presentan y analizan los resultados obtenidos en las pruebas de adsorción del (VM) empleando el compósito como adsorbente. Con el objetivo de establecer una base comparativa con un estudio previo del mismo proyecto de investigación, en el que se evaluó el desempeño de nanoplaquetas de grafeno, se emplearon condiciones experimentales equivalentes. En particular, se fijaron la masa del adsorbente en 10 mg y el pH de la solución en 7, a fin de mantener la coherencia metodológica. Asimismo, se evaluó el efecto del tiempo de contacto sobre la eficiencia del proceso de adsorción del colorante en magnetita (De la Peña Aguirre y col., 2025; de la Peña-Aguirre y col., 2025)

EFFECTO DEL TIEMPO DE CONTACTO

Para observar el comportamiento de la adsorción del VM sobre el compósito en relación con el tiempo de contacto, se realizó un estudio cinético de adsorción utilizando una concentración inicial de 1000 ppm de VM, con un tiempo de 180 minutos leyendo en un intervalo de 15 min en la primera hora y en intervalos de 60 min en las siguientes dos horas, a temperatura ambiente y bajo agitación constante de 250 rpm. El porcentaje total de adsorción fue de 67% (668 ppm), en la Figura 2 se muestra como en los primeros minutos (15 min) la adsorción se llevó a cabo muy rápido alcanzándose el 55%, y durante los 120 a 180 min se puede observar cómo se estabiliza y va en un aumento más lento que al principio de la cinética.

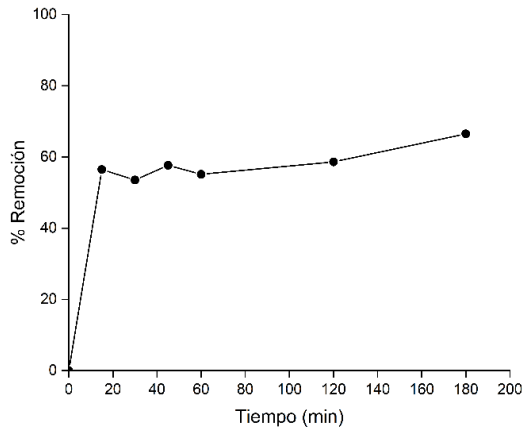


Figura. 2.
Efecto de
tiempo de
contacto

MODELOS CINÉTICOS

Los datos obtenidos del análisis cinético se ajustaron a los modelos de Elovich, Pseudo Primer Orden y Pseudo Segundo Orden, según las ecuaciones presentadas en la Tabla 1. Estos modelos permiten determinar si el proceso de adsorción se debe a quimisorción o a fisorción. De los tres modelos evaluados (Figura 3), el de Pseudo Segundo Orden fue el que mejor se ajustó a los datos experimentales, lo que indica que la adsorción depende del número de sitios desocupados en la superficie del material adsorbente (Zheng y col., 2024). Para comprender mejor el comportamiento de la adsorción de VM en magnetita, en la Tabla 2 se muestran los coeficientes de correlación (R^2) de los modelos cinéticos usados.

Tabla 2. R^2 de los diferentes modelos cinéticos

Modelo cinético usado	R^2
Elovich	0.4956
Pseudo primer orden	0.3331
Pseudo segundo orden	0.9975

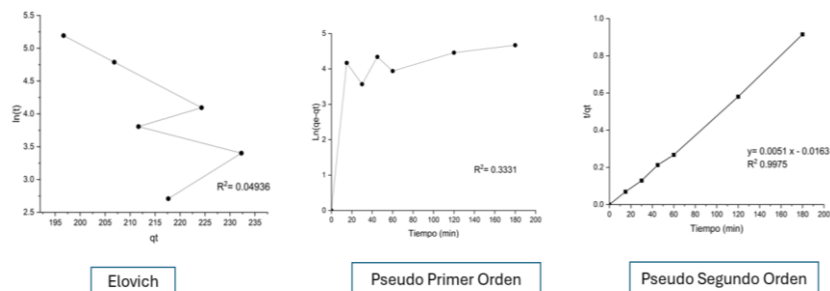


Figura 3. Modelos cinéticos analizados.

En la Tabla 3 se presenta una comparación entre los diferentes materiales analizados y el material estudiado en este trabajo.

Tabla 3. Tabla comparativa de las propiedades de los materiales adsorbentes.

Material adsorbente	Colorante	q_e mg/g	Referencia
Magnetita con Ácido húmico	Verde Malaquita	41	(Ahmad y col., 2022)
Magnetita funcionalizada superficialmente con ácido cítrico	Cristal violeta	14	(Jangra y col., 2023)
Ni-Al/Magnetita	Azul de metileno	20	(Zahara y col., 2023)
Goma esterculia ferromagnética	Verde Malaquita	20	(Tank & Sharma, 2023)
Fe_3O_4 /Ácido húmico	Verde Malaquita	83	(Ahmad y col., 2022)
Compuesto Magnetita/nanoplaquetas de grafeno	Verde malaquita	303	Este trabajo

Lo que evidencia la Tabla 3 es que nuestro material posee una capacidad de adsorción (q_e) mayor que la reportada por otros autores, lo que demuestra su superioridad en términos de eficiencia como adsorbente.

CONCLUSIONES

Ante la necesidad de mejorar la calidad del agua y contribuir al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030, se buscaron alternativas eficientes para el tratamiento de la contaminación hídrica. Los resultados del presente estudio demostraron que, empleando una masa de 10 mg y un pH neutro durante el proceso de adsorción, se alcanzó una tasa de eliminación del 67 %, equivalente a 668 ppm. El análisis cinético reveló que los datos experimentales se ajustan al modelo de pseudo-segundo orden, lo que indica que el mecanismo de adsorción está principalmente gobernado por interacciones químicas entre el adsorbato y la superficie del adsorbente. La capacidad máxima de adsorción obtenida fue de 303 mg/g, lo que evidencia el potencial del material para la remoción de VM en condiciones controladas.

AGRADECIMIENTOS

Daniel de la Peña Aguirre agradece a la SECIHTI la beca otorgada para sus estudios de posgrado. Además, a los proyectos CBF-2025-I-4203, (SECIHTI) y al proyecto DIP-UADEC-C01-2025-40 (UAdeC) por el apoyo financiero recibido para esta investigación.

REFERENCIAS

- Ahmad, N., Arsyad, F. S., Royani, I., & Lesbani, A. (2022). Selectivity of Malachite Green on Cationic Dye Mixtures Toward Adsorption on Magnetite Humic Acid. *Environment and Natural Resources Journal*, 20(6): 634–643. <https://doi.org/10.32526/enrj/20/202200142>
- Andrade-Guel, M. L., Cabello-Alvarado, C. J., Cano-Salazar, L. F., Ávila-Orta, C. A., & Cruz-Delgado, V. J. (2023). Recent Developments in Wastewater Treatments. In *Current Status of Fresh Water Microbiology* (pp. 241–263). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-5018-8_10
- Bayantong, A. R. B., Shih, Y. J., Ong, D. C., Abarca, R. R. M., Dong, C. Di, & de Luna, M. D. G. (2021). Adsorptive removal of dye in wastewater



- by metal ferrite-enabled graphene oxide nanocomposites. *Chemosphere*, 274: 129518. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129518>
- Cataldi, P., Athanassiou, A., & Bayer, I. S. (2018). Graphene nanoplatelets-based advanced materials and recent progress in sustainable applications. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 8, Issue 9). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/app8091438>
- Choudhary, M., Kumar, R., & Neogi, S. (2020). Activated biochar derived from *Opuntia ficus-indica* for the efficient adsorption of malachite green dye, Cu²⁺ and Ni²⁺ from water. *Journal of Hazardous Materials*, 392: 122441. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122441>
- De la Peña Aguirre, D., Múzquiz Ramos, E. M., Ríos Hurtado, J. C., Claudio Rizo, J. A., Gallardo Heredia, M., & Cano Salazar, L. F. (2025). Adsorción de Verde Malaquita Utilizando Magnetita: Estudio Cinético y Termodinámico. *Tópicos de Investigación En Ciencias de La Tierra y Materiales*, 12(12): 70–77. <https://doi.org/10.29057/aactm.v12i12.15261>
- de la Peña-Aguirre, D., Cano-Salazar, L. F., Covarrubias-Gordillo, C. A., Flores-Guía, T. E., Claudio-Rizo, J. A., Cabrera-Munguia, D. A., Ávila-Orta, C. A., & Cruz-Delgado, V. J. (2025). Kinetic and Thermodynamic Study of the Adsorption of Malachite Green Dye Using Graphene Nanoplatelets. *Green Energy and Environmental Technology*, 4: 20250022. <https://doi.org/10.5772/geet.20250022>
- Dwivedi Babasaheb Bhimrao, S. (2023). Modulation of Photoactive Nanocomposite Cu Doped SnO₂ Anchored on G-C₃N₄ Polymeric Sheets by Green Synthesis and Degradation of Dye Malachite Green Modulation of Photoactive. *International Journal on Engineering Science and Technology*, 10: 201. <https://doi.org/10.46328/ijonest.201>
- Firdaus, R. M., Rosli, N. I. M., Ghanbaja, J., Vigolo, B., & Mohamed, A. R. (2019). Enhanced adsorption of methylene blue on chemically modified graphene nanoplatelets thanks to favorable interactions. *Journal of Nanoparticle Research*, 21(12): 47014 <https://doi.org/10.1007/s11051-019-4701-4>
- Jangra, A., Singh, J., Kumar, J., Rani, K., Kumar, P., Kumar, S., Singh, D., & Kumar, R. (2023). Dye Elimination by Surface-Functionalized Magnetite Nanoparticles: Kinetic and Isotherm Studies. *Biointerface*



- Research in Applied Chemistry*, 13(4): 134325.
<https://doi.org/10.33263/BRIAC134.325>
- Li, Y. Q., Samad, Y. A., Polychronopoulou, K., Alhassan, S. M., & Liao, K. (2014). Carbon aerogel from winter melon for highly efficient and recyclable oils and organic solvents absorption. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 2(6): 1492–1497.
<https://doi.org/10.1021/sc500161b>
- Macías-Martínez, B. I., Cortés-Hernández, D. A., Zugasti-Cruz, A., Cruz-Ortíz, B. R., & Múzquiz-Ramos, E. M. (2016). Heating ability and hemolysis test of magnetite nanoparticles obtained by a simple co-precipitation method. *Journal of Applied Research and Technology*, 14(4): 239–244. <https://doi.org/10.1016/j.jart.2016.05.007>
- Mokarram, M., Saber, A., & Sheykhi, V. (2020). Effects of heavy metal contamination on river water quality due to release of industrial effluents. *Journal of Cleaner Production*, 277: 123380.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123380>
- Musah, M., Azeh, Y., Mathew, J., Umar, M., Abdulhamid, Z., & Muhammad, A. (2022). Adsorption Kinetics and Isotherm Models: A Review. *Caliphate Journal of Science and Technology*, 4(1): 20–26.
<https://doi.org/10.4314/cajost.v4i1.3>
- Qu, W., Yuan, T., Yin, G., Xu, S., Zhang, Q., & Su, H. (2019). Effect of properties of activated carbon on malachite green adsorption. *Fuel*, 249: 45–53. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.03.058>
- Sevim, F., Lacin, O., Ediz, E. F., & Demir, F. (2021). Adsorption capacity, isotherm, kinetic, and thermodynamic studies on adsorption behavior of malachite green onto natural red clay. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 40(1): 13471.
<https://doi.org/10.1002/ep.13471>
- Tank, S. K., & Sharma, N. (2023). Adsorptive removal of malachite green using ferromagnetic sterculia gum – graftpoly(n-isopropylacrylamide-co-acrylamide)/magnetite nanocomposite. *Indian Journal of Chemical Technology*, 30(5): 643–655.
<https://doi.org/10.56042/ijct.v30i5.5193>
- Teo, S. H., Ng, C. H., Islam, A., Abdulkareem-Alsultan, G., Joseph, C. G., Janaun, J., Taufiq-Yap, Y. H., Khandaker, S., Islam, G. J., Znad, H., & Awual, M. R. (2022). Sustainable toxic dyes removal with advanced materials for clean water production: A comprehensive review.



- Journal of Cleaner Production*, 332: 130039.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130039>
- Thakur, P., Chahar, D., Taneja, S., Bhalla, N., & Thakur, A. (2020). A review on MnZn ferrites: Synthesis, characterization and applications. *Ceramics International*, 46 (10): 15740–15763.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.03.287>
- Wang, K., Kou, Y., Wang, K., Liang, S., Guo, C., Wang, W., Lu, Y., & Wang, J. (2023). Comparing the adsorption of methyl orange and malachite green on similar yet distinct polyamide microplastics: Uncovering hydrogen bond interactions. *Chemosphere*, 340: 139806.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139806>
- Zahara, Z. A., Royani, I., Palapa, N. R., Mohadi, R., & Lesbani, A. (2023). Treatment of Methylene Blue Using Ni-Al/Magnetite Biochar Layered Double Hydroxides Composite by Adsorption. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering and Catalysis*, 18(4): 659–674.
<https://doi.org/10.9767/bcrec.20049>
- Zheng, Z., Wang, S., Yang, F., & Pan, J. (2024). Controlled surface multifunctional groups over halloysite nanotube enabling reinforced lead adsorption in vitro. *Separation and Purification Technology*, 339: 126632. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.126632>