

Depolimerización Heterocatalítica del Tereftalato de Polietileno (PET) Mediante Ferratos: Estudio y Caracterización

A. Velázquez Villalobos^{#1}, G. A. Torres Avalos^{#2}, R. González Rodríguez^{*3}, A. Bernal Alcocer^{#4}

[#]Tecnológico Nacional de México: Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez, Unidad Académica Lagos de Moreno, Departamento Académico, Jalisco, México

[#]Tecnológico Nacional de México: Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez, Unidad Académica Mascota, Departamento Académico, Jalisco, México

¹artemio.velazquez@lagos.tecmm.edu.mx, ²gerardo.torres@lagos.tecmm.edu.mx,

³rigoberto.gonzalez@mascota.tecmm.edu.mx, ⁴artemiza.bernal@lagos.tecmm.edu.mx

Resumen— Este estudio presenta una metodología avanzada para la degradación del tereftalato de polietileno (PET) mediante un proceso catalítico utilizando ferrato de potasio (K_2FeO_4) como agente oxidante. Se investigó la eficiencia de la depolimerización del PET en un sistema de disolventes fenol-glicerol y su posterior descomposición catalítica empleando nanopartículas de ferrato de potasio soportadas en sílica gel bajo condiciones de reflujo controladas. El análisis de los productos de reacción se llevó a cabo mediante destilación fraccionada y su posterior estudio mediante cromatografía y RMN. Las propiedades fuertemente oxidantes del ferrato de potasio y su actividad catalítica facilitan la ruptura de las cadenas poliméricas del PET, ofreciendo un enfoque innovador para el reciclaje químico de plásticos.

Palabras clave— PET, Reciclaje, Ferratos, Catálisis Heterogénea, Depolimerización.

Abstract— This study presents an innovative methodology for the degradation of polyethylene terephthalate (PET) through a catalytic process using potassium ferrate (K_2FeO_4) as an oxidizing agent. The research focuses on evaluating the efficiency of PET depolymerization in a solvent system composed of phenol and glycerol, followed by its catalytic decomposition with potassium ferrate nanoparticles supported on silica gel under controlled reflux conditions. The reaction products were analyzed using fractional distillation, chromatography, and nuclear magnetic resonance (NMR). The results highlight the oxidizing properties of potassium ferrate and its high catalytic activity, which facilitate the breakdown of PET polymer chains, providing a promising strategy for the chemical recycling of plastics.

Keywords—PET, Recycling, Ferrates, Heterogeneous Catalysis, Depolymerization.

I. INTRODUCCIÓN

La acumulación de plásticos en el medio ambiente representa un desafío significativo para la sostenibilidad global. El tereftalato de polietileno (PET), ampliamente utilizado en la industria de envases, es resistente a la biodegradación, lo que complica su reciclaje. La degradación química del PET utilizando disolventes y catalizadores especializados es un área de investigación activa.

Este estudio explora el uso del ferrato de potasio (K_2FeO_4), un potente agente oxidante, para catalizar la descomposición del PET en condiciones de reflujo [1-2]. El enfoque se centra en mejorar la eficiencia del proceso de degradación y en la caracterización de los productos resultantes, potenciando su posible reutilización o eliminación segura [3-4].

El desarrollo de tecnologías avanzadas para la degradación del PET tiene implicaciones significativas desde múltiples perspectivas. Económicamente, la conversión eficiente del PET en productos de valor añadido podría reducir los costes asociados con la gestión de residuos plásticos y fomentar la economía circular. Ambientalmente, la reducción de la persistencia del PET en el entorno contribuye a minimizar los impactos negativos sobre los ecosistemas. Socialmente, la adopción de tecnologías sostenibles de reciclaje puede mejorar la calidad de vida al disminuir la exposición a contaminantes y apoyar la salud pública [5-6].

II. OBJETIVOS

General

1.-Determinar la eficiencia de la degradación del PET utilizando ferrato de potasio [7].

Específicos

1.-Purificar y analizar los productos de la descomposición del PET [8].

2.-Caracterizar los productos mediante técnicas de cromatografía y espectroscopía de masas [9].

3.-Desarrollar un catalizador basado en ferrato de potasio impregnado en sílica gel [10].

III. MARCO TEÓRICO

La catálisis es un proceso fundamental en la química moderna que permite acelerar las reacciones químicas mediante el uso de sustancias conocidas como catalizadores. Un catalizador actúa disminuyendo la energía de activación de una reacción, lo que facilita la transformación de reactivos en productos sin consumirse en el proceso. En la degradación del tereftalato de polietileno (PET), la catálisis juega un papel

crucial al mejorar la eficiencia del proceso y reducir el tiempo de reacción necesario para descomponer este polímero resistente a la degradación [11].

En particular, la heterocatálisis, un tipo de catálisis en la que el catalizador está en una fase distinta a la de los reactivos, es de gran importancia en procesos industriales y ambientales. Los catalizadores heterogéneos, como los basados en ferrato de potasio (K_2FeO_4), son ampliamente utilizados debido a su facilidad de separación del medio de reacción y su capacidad para ser reciclados y reutilizados en múltiples ciclos de reacción. Estos catalizadores suelen estar soportados en materiales sólidos, lo que aumenta su estabilidad y actividad catalítica [12].

El uso de sílica gel como soporte para oxidantes en reacciones catalíticas ha ganado atención en la última década debido a su alta superficie específica y estabilidad térmica. Recientes estudios han demostrado que la sílica gel puede mejorar significativamente la eficiencia de diversos procesos catalíticos. Véase la figura 1.

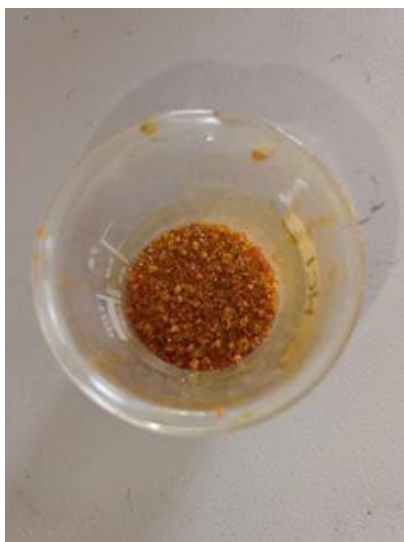


Fig. 1. Catalizador Soportado en Sílica Gel.

Por otra parte, en otro estudio realizado por destaca cómo la sílica gel modificada con peróxido de hidrógeno puede actuar como un excelente soporte para la oxidación selectiva de alcoholes a aldehídos y cetonas bajo condiciones suaves.

Asimismo, Johnson y colaboradores [13] reportaron que la impregnación de sílica gel con permanganato de potasio no solo aumenta la capacidad oxidante del sistema, sino que también mejora la selectividad hacia productos específicos en reacciones de oxidación orgánica, destacando el potencial de este material como soporte en aplicaciones catalíticas avanzadas.

La degradación del PET a través de procesos químicos y térmicos es fundamental para reducir su impacto ambiental. El uso de disolventes como fenol y glicerol permite la

solubilización efectiva del PET, facilitando su posterior degradación catalítica.

El ferrato de potasio (K_2FeO_4) se destaca como un catalizador eficiente debido a sus propiedades oxidativas robustas, que promueven la ruptura de las cadenas poliméricas del PET. Este trabajo investiga la impregnación de sílica gel con ferrato de potasio para mejorar la dispersión del catalizador y maximizar la superficie de contacto, optimizando así la eficiencia de degradación [14].

La degradación del PET a través de procesos químicos y térmicos es fundamental para reducir su impacto ambiental. El uso de disolventes como fenol y glicerol permite la solubilización efectiva del PET, facilitando su posterior degradación catalítica. El ferrato de potasio (K_2FeO_4) se destaca como un catalizador eficiente debido a sus propiedades oxidativas robustas, que promueven la ruptura de las cadenas poliméricas del PET. Este trabajo investiga la impregnación de sílica gel con ferrato de potasio para mejorar la dispersión del catalizador y maximizar la superficie de contacto, optimizando así la eficiencia de degradación [15].

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

1.-Catalizador de K_2FeO_4

La síntesis de ferrato de potasio (K_2FeO_4) se realizó mediante la reacción de hidróxido de potasio (KOH), hipoclorito de potasio (KClO) y óxido férrico (Fe_2O_3) en una solución acuosa bajo condiciones controladas de temperatura.

Inicialmente, se disuelve el KOH en agua para crear una solución concentrada, a la cual se añade el hipoclorito de potasio mientras se agita vigorosamente. Posteriormente, se agrega el óxido férrico lentamente a la mezcla, lo que permite la formación del ferrato de potasio.

Una vez sintetizado, el K_2FeO_4 se introduce en los poros de sílica gel mediante un proceso de impregnación húmeda, donde la sílica gel es sumergida en una solución del ferrato de potasio y posteriormente secada bajo condiciones suaves para asegurar una distribución uniforme del compuesto en los poros del soporte. En la figura 2 se puede observar una partícula de sílica bajo microscopía electrónica de barrido (SEM) [15-16]. Este método permite la obtención de ferrato de potasio de alta pureza, destacan la efectividad de la sílica gel como soporte para aplicaciones catalíticas al aumentar la estabilidad del ferrato de potasio en reacciones de oxidación.

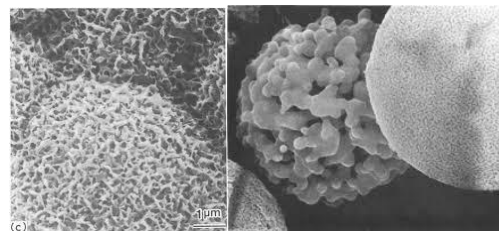


Fig. 2. Poros de catalizador de sílica gel observadas bajo SEM.

2. Equipo de Reflujo

Se procedió calentando 50.0 $\pm$ 0.5 cristales de fenol a su punto de fusión a los cuales se les agregaron 15.23 $\pm$ 0.45 gramos de PET cortado en pequeñas láminas y posteriormente se agitó la mezcla resultante hasta formar una solución transparente.

Después se procedió a agregar a la solución anterior 24.5 $\pm$ 0.6 gramos de glicerina. Se agitó la mezcla resultante y se procedió agregar 5.3 $\pm$ 0.2 gramos de K₂FeO₄ soportados en sílice y después se llevó a cabo el reflujo (véase figura 3) durante un tiempo de 5.6 $\pm$ 0.6 horas. Al final del experimento se observó un cambio drástico en la coloración de la mezcla reactiva.

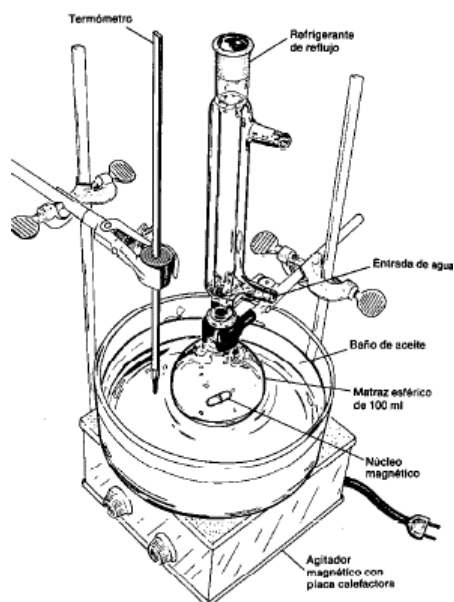


Fig. 3. Sistema típico de reflujo.

3.-Experimentación

Se realizó por último una destilación fraccionada (véase figura 4) resultando tres destilados diferentes de los cuales se llevó a cabo un análisis espectral de RMN H¹. Véase la figura 5 de uno de los productos destilados.



Fig. 4 Equipo de destilación fraccionada utilizado



Fig. 5. Destilado rosa.

V. RESULTADOS

A-Una vez llevado a cabo el reflujo se separó cada fracción destilada y se midió el punto de ebullición. TABLA I.

TABLA I
RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE ALGUNOS
PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS.

Parámetro	Valor	Color
Punto de Ebullición del Primer Destilado	245°C	Transparente
Punto de Ebullición del Segundo Destilado	265°C	Transparente
Punto de Ebullición del Tercer Destilado	280°C	Rosa

B-Y además se llevó a cabo un análisis espectroscópico por medio de la Técnica conocida como RMN H¹ de cada uno de los destilados lo que dio como resultado los siguientes espectros.

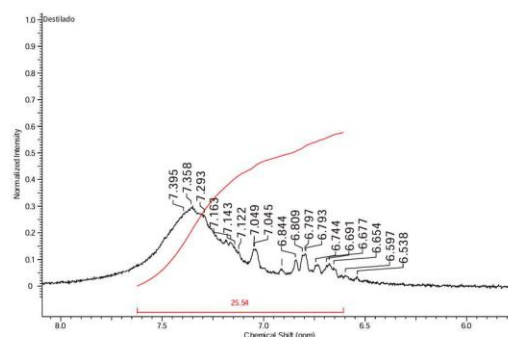


Fig. 4. Espectro de RMN primer destilado.

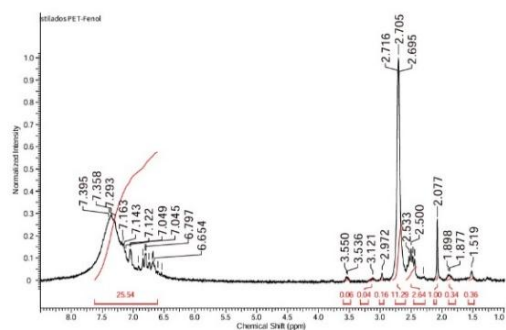


Fig. 5. Espectro de RMN segundo destilado

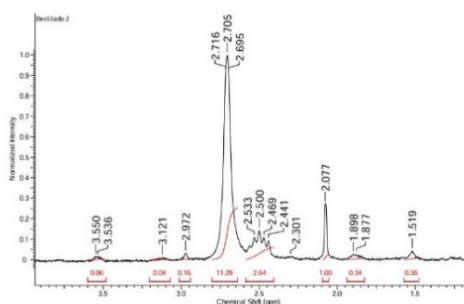


Fig. 6. Espectro de RMN tercer destilado.

VI. DISCUSIÓN

Realizando un análisis de los espectros obtenidos de cada uno de los destilados se pueden realizar las siguientes deducciones:

De la figura 4 que corresponde al espectro de RMN H1 del primer destilado se tiene la siguiente interpretación del espectro se tiene:

Región de 6.5-7.5 ppm: Estas señales corresponden generalmente a protones aromáticos en anillos de benceno o estructuras similares. Las múltiples señales indican un patrón de acoplamiento complejo, lo que sugiere la presencia de diferentes ambientes químicos en los protones aromáticos.

Región de 7.5-8.0 ppm: Esta región puede estar relacionada con protones en posiciones meta o para en anillos aromáticos, especialmente si hay sustituyentes que desestabilicen la densidad electrónica.

Este espectro parece estar asociado con un compuesto aromático con varios protones en diferentes posiciones del anillo.

De la figura 5 que corresponde al espectro de RMN H1 del segundo destilado se puede interpretar que:

La región de 0.5-1.5 ppm: Generalmente, estas señales corresponden a grupos alquilo ($-\text{CH}_3$, $-\text{CH}_2$). La región de 1.8-2.8 ppm: Podría indicar la presencia de grupos metileno ($-\text{CH}_2$) adyacentes a un grupo carbonilo ($\text{C}=\text{O}$). Y por último la región de 3.0-3.5 ppm: Señales en esta región suelen corresponder a grupos metileno ($-\text{CH}_2$) adyacentes a oxígeno, como en éteres ($-\text{O}-\text{CH}_2$).

Y por último de la figura 6 que de igual manera pertenece al espectro de RMN H1, corresponde a:

Región de 0.5-1.5 ppm: Estas señales generalmente corresponden a protones de grupos alquilo ($-\text{CH}_3$, $-\text{CH}_2$). En este espectro, se observa una señal alrededor de 1.5 ppm, que podría indicar la presencia de grupos metil ($-\text{CH}_3$).

Región de 1.5-3.0 ppm: Señales en este rango suelen estar asociadas con protones alifáticos en posiciones alfa con respecto a grupos funcionales como carbonilos ($\text{C}=\text{O}$) o aromáticos. Las señales alrededor de 2.0 ppm podrían indicar metilenos adyacentes a carbonilos o aromáticos.

Región de 3.0-4.0 ppm: La señal alrededor de 3.1 ppm podría estar asociada a protones en grupos metil o metilenos adyacentes a átomos electronegativos como oxígeno (por ejemplo, éteres $-\text{O}-\text{CH}_2$).

El espectro parece corresponder a una mezcla de compuestos que contienen cadenas alifáticas con algunas posibles conexiones a grupos funcionales oxigenados o aromáticos.

VII. CONCLUSIONES

El estudio demuestra que el proceso de depolimerización heterocatalítica del tereftalato de polietileno (PET) utilizando ferrato de potasio (K_2FeO_4) como agente oxidante, soportado en sílica gel, es efectivo para romper las cadenas poliméricas del PET, logrando su degradación en un medio de disolventes fenol-glicerol bajo condiciones de reflujo controladas.

Los resultados de la destilación fraccionada y el análisis espectroscópico de RMN H1 sugieren la presencia de una fracción considerable de fenoles en los destilados, lo cual es un indicador del rompimiento del PET. Sin embargo, los espectros de RMN H1 muestran solo indicios o fracciones muy pequeñas de PET no degradado, lo que confirma la efectividad del proceso catalítico para la ruptura del polímero.

Se requiere realizar más análisis para una caracterización completa de los destilados y para entender mejor la composición de los productos obtenidos, así como para optimizar el proceso y maximizar la eficiencia de la degradación. En el futuro, se espera que este enfoque contribuya significativamente al reciclaje.

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez por las facilidades para llevar a cabo la presente investigación, así al Dr. Roberto Flores Moreno y al Dr. Mario Ulises Delgado Jaime del CUCEI UdeG por las facilidades para el uso del equipo de RMN y también al Tecnológico Nacional de México y a la UNIVA Lagos.

REFERENCIAS

- [1] N. J. D. Graham, T. T. Khoi, and J. Q. Jiang, "Oxidation and coagulation of humic substances by potassium ferrate," *Water Science and Technology*, vol. 62, no. 5, pp. 929-936, 2010. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2010.369>.
- [2] J. Q. Jiang and B. Lloyd, "Progress in the development and use of ferrate (VI) salt as an oxidant and coagulant for water and wastewater treatment," *Water Research*, vol. 36, no. 6, pp. 1397-1408, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(01\)00358-X](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00358-X).
- [3] M. Belter, A. Renken, and R. Van Santen, *Catalysis: From principles to applications*, Wiley-VCH, Weinheim, Germany, 2012.
- [4] J. M. Thomas and W. J. Thomas, *Principles and practice of heterogeneous catalysis*. John Wiley & Sons, 2012.
- [5] G. A. Somorjai and Y. Li, *Introduction to surface chemistry and catalysis*. 2nd ed. John Wiley & Sons, 2010.
- [6] C. N. R. Rao, A. Müller, and A. K. Cheetham, *The chemistry of nanomaterials: Synthesis, properties and applications*. John Wiley & Sons, 2018.
- [7] Y. Jiang, J. E. Goodwill, and J. E. Tobiason, "Effect of different solutes, natural organic matter, and particulate Fe(III) on ferrate (VI) decomposition in aqueous solutions," *Environmental Science & Technology*, vol. 49, no. 5, pp. 2841-2848, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1021/es505516w>.
- [8] F. Kawai, T. Kawabata, and M. Oda, "Current knowledge on enzymatic PET degradation and its possible application to waste stream management and other fields," *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 103, pp. 4253-4268, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00253-019-09717-y>.
- [9] A. R. A. Lima, M. F. Costa, and M. Barletta, "Distribution patterns of microplastics within the plankton of a tropical estuary," *Environmental Research*, vol. 132, no. 146-155, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2014.03.031>.
- [10] S. M. Mintenig, M. G. J. Loeder, S. Primpke, and G. Gerdt, "Low numbers of microplastics detected in drinking water from ground water sources," *Science of The Total Environment*, vol. 648, pp. 631-635, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.178>.
- [11] J. Ma and W. Liu, "Effectiveness and mechanism of potassium ferrate(VI) preoxidation for algae removal by coagulation," *Water Research*, vol. 36, no. 4, pp. 871-878, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(01\)00282-2](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00282-2).
- [12] J. Lin, X. Wu, Y. Liu, J. Fu, Y. Chen, and H. Ou, "Sinking behavior of polystyrene microplastics after disinfection," *Chemical Engineering Journal*, vol. 427, pp. 130908, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130908>.
- [13] J. Q. Jiang, A. Panagouloupoulos, M. Bauer, and P. Pearce, "The application of potassium ferrate for sewage treatment," *Journal of Environmental Management*, vol. 79, no. 3, pp. 215-220, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.06.009>.
- [14] J. Q. Jiang, C. Stanford, and M. Alsheyab, "The online generation and application of ferrate (VI) for sewage treatment: A pilot scale trial," *Separation and Purification Technology*, vol. 68, no. 2, pp. 227-231, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2009.05.007>.
- [15] I. Novák and D. Berek, "Structural inhomogeneities in wide-pore silica gels" *Journal of Chromatography A*, vol. 665, no. 1, pp. 33-36, 1994. DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-9673\(94\)87028-4](https://doi.org/10.1016/0021-9673(94)87028-4).
- [16] K. L. Law and R. C. Thompson, "Microplastics in the seas," *Science*, vol. 345, no. 6193, pp. 144-145, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1254065>.