

Co-pirólisis de PET y subproductos de la pirólisis de EPS: método alternativo de reciclaje circular

Co-pyrolysis of PET and EPS pyrolysis by-products: alternative recycling process

Zaira Jelena Mosqueda-Huerta ¹, Carlos Ariel Rodríguez-Hernández ², Kevin Emiliano Batalla-López ², Carlos Felipe Villafan-Parra ³, Alexa Sabine Smith-Ortega ⁴, Kevinn Noe Vázquez-Flores ⁴, José Manuel Riesco-Ávila ^{4*}.

¹Departamento de Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, Noria Alta s/n, Col. Noria Alta, Guanajuato, Guanajuato, 36050, México.

²Departamento de Ingeniería Mecatrónica, División de Ingenierías Campus Irapuato Salamanca, Universidad de Guanajuato, Carretera Salamanca - Valle de Santiago, Comunidad de Palo Blanco, 36787, México.

³Departamento de Artes Digitales, División de Ingenierías Campus Irapuato Salamanca, Universidad de Guanajuato, Carretera Salamanca - Valle de Santiago, Comunidad de Palo Blanco, 36787, México.

⁴Departamento de Ingeniería Mecánica, División de Ingenierías Campus Irapuato Salamanca, Universidad de Guanajuato, Carretera Salamanca - Valle de Santiago, Comunidad de Palo Blanco, 36787, México.

*riesco@ugto.mx

Resumen

El tereftalato de polietileno (PET) es ligero, resistente, transparente y versátil y sobre todo de bajo costo, dichas propiedades hacen que este material esté presente en variedad de aplicaciones como la industria alimentaria y empaques. Por tal motivo, existe una alta demanda y creciente producción del PET, se estima que se producen más de 24.8 Mt anuales. Si bien el reciclaje del PET está bien desarrollado y la tasa de reciclaje resulta ser mayor a la de otros plásticos, el uso repetitivo de este material hace que se desgaste y pierda ciertas propiedades mecánicas. La pirólisis se caracteriza por poder degradar aquellos materiales que ya no se pueden reciclar de manera tradicional transformándolos en productos de gran valor en la industria petroquímica. Sin embargo, la pirólisis térmica del PET resulta en la obtención de productos indeseables y en afectaciones en el sistema empleado, como taponamiento de tuberías; por lo tanto, es necesario emplear estrategias que permitan resolver dicha problemática. En el presente trabajo se aborda el uso de la co-pirólisis como alternativa para reciclaje del PET, en donde se le es añadido aceite pirolítico de residuos de EPS fungiendo como catalizador. El trabajo se centra en el estudio de la influencia de la temperatura y relación EPS:PET en la obtención de productos líquidos, sólidos y gaseosos. Los resultados permitieron identificar las condiciones de operación adecuadas para minimizar la obtención de productos no deseados (ceras) y favorecer la producción de fracciones líquidas.

Palabras clave: PET, co-pirólisis, EPS, reciclaje, residuos.

Introducción

El tereftalato de polietileno (PET) y el poliestireno expandido (EPS) son dos tipos de plásticos ampliamente utilizados en la industria y el comercio. El PET, conocido por su durabilidad y transparencia, se emplea comúnmente en la fabricación de botellas y envases para alimentos y bebidas. Esto se debe a sus propiedades intrínsecas que son muy adecuadas para equipos livianos y de gran capacidad y recipientes resistentes a la presión [Anuar Sharuddin et al., 2016]. Por otro lado, el EPS, reconocido por su ligereza y capacidad de aislamiento, se utiliza en embalajes y productos de construcción. Sin embargo, a pesar de sus beneficios, ambos plásticos tienen una vida útil relativamente corta y no son biodegradables ni compostables, por lo que su alta demanda implica una gran acumulación de materiales plásticos, llegando a ocasionar problemas ambientales, sociales y de salud pública en los sitios donde se acopian tales desechos [Amar Gil et al., 2019].

La gran cantidad de PET utilizado en productos cotidianos genera una necesidad urgente de procesos de reciclaje eficientes. De acuerdo con PlasticEurope (2023), la producción mundial de plásticos en 2022 fue de 400.3 megatoneladas, de las cuales 362.3 fueron producidas a partir de fuentes fósiles. Dentro de los plásticos producidos con esta fuente se encuentra el PET, con una producción equivalente de 24.8 megatoneladas.

En este contexto, la pirólisis atrae la atención como un enfoque sólido para mejorar la tasa de reciclaje de plástico [Park, K.-B., and Kim, J.-S., 2023]. La pirólisis es un proceso de descomposición térmica de materiales orgánicos en ausencia de oxígeno. Este proceso permite convertir residuos plásticos en productos de valor añadido como combustibles líquidos, gases, cera y sólidos carbonosos [Henneberg, R. U., Nielsen, R. P., and Simonsen, M. E., 2023]. Sin embargo, reciclar

PET mediante pirólisis presenta ciertas dificultades debido a su estructura química y la formación de subproductos indeseables. No obstante, la combinación del PET con otros plásticos como el poliestireno o los productos obtenidos de la pirólisis de EPS (aceite pirolítico), pueden mejorar la eficiencia del proceso de pirólisis de PET y la calidad de los productos obtenidos.

Existen varios tipos de pirólisis, incluyendo la pirólisis rápida, lenta y catalítica. Cada tipo varía en función de la velocidad de calentamiento, la temperatura de operación y el tiempo de residencia de los materiales. Los factores que influyen en la eficiencia y los resultados de la pirólisis incluyen la temperatura, la naturaleza y cantidad de catalizadores utilizados y el tipo de reactor empleado. La elección de estos parámetros es crucial para optimizar la descomposición de los plásticos y maximizar la producción de subproductos valiosos. A continuación se presenta un análisis sobre la influencia de diferentes parámetros en el proceso de pirólisis:

- **Temperatura:** La temperatura es uno de los parámetros operativos más importantes en la pirólisis, ya que controla la reacción de craqueo de la cadena polimérica [Anuar Sharuddin et al., 2016]. A temperaturas más altas, la velocidad de descomposición de los polímeros aumenta, lo que puede llevar a una mayor producción de productos volátiles y una menor cantidad de residuos sólidos. Sin embargo, temperaturas excesivamente altas pueden provocar la formación de subproductos no deseados y una menor selectividad en los productos.
- **Catalizadores:** La utilización de catalizadores puede mejorar significativamente la eficiencia de la pirólisis. Los catalizadores pueden reducir la temperatura requerida para la descomposición de los plásticos y aumentar la selectividad hacia productos específicos [Anuar Sharuddin et al., 2016]. Diferentes tipos de catalizadores, como zeolitas, metales y óxidos metálicos, pueden ser utilizados para optimizar el proceso y los productos obtenidos.
- **Tipo de reactor:** El tipo de reactores tiene un impacto importante en la mezcla de los plásticos y catalizadores, y la eficiencia de la reacción para lograr el producto final deseado [Anuar Sharuddin et al., 2016]. Reactores de lecho fijo, lecho fluidizado y de tubo rotatorio son algunos de los tipos utilizados. Cada diseño ofrece ventajas y desventajas en términos de transferencia de calor, contacto entre el catalizador y el material, y la facilidad de control del proceso.
- **Velocidad de calentamiento:** La velocidad a la que se calienta el material plástico puede influir en la distribución de los productos de la pirólisis. Calentamientos rápidos suelen favorecer la producción de gases y líquidos volátiles, mientras que calentamientos más lentos pueden producir una mayor cantidad de residuos sólidos.
- **Tiempo de residencia:** El tiempo durante el cual el material se mantiene a la temperatura de pirólisis también afecta la composición de los productos. Tiempos de residencia más largos permiten una descomposición más completa del material, pero pueden también incrementar la formación de subproductos no deseados [Anuar Sharuddin et al., 2016].
- **Composición del material:** La presencia de otros plásticos y aditivos en el material de alimentación puede influir en la eficiencia del proceso y la calidad de los productos obtenidos. La interacción entre diferentes tipos de plásticos, como PET y EPS, puede modificar los mecanismos de descomposición y la distribución de los productos.

Metodología

Obtención de aceite pirolítico de residuos de EPS

El aceite pirolítico es un producto derivado de la descomposición termoquímica a través del proceso de pirólisis de residuos de EPS. Para obtener este producto, se realizó un proceso de pirólisis en un reactor de tipo semi-batch. Los gases generados por la degradación se condensan mediante un condensador a temperatura ambiente y el líquido se recolecta al final de éste.

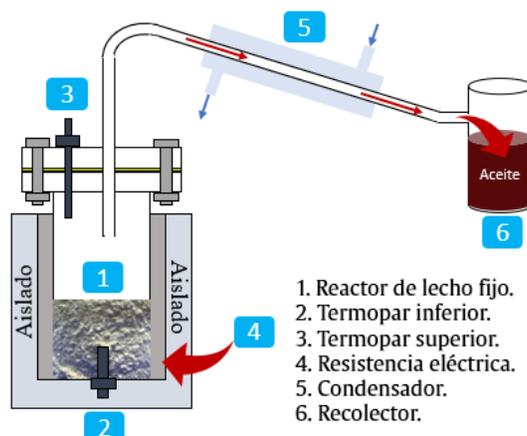


Figura 1. Diagrama del sistema empleado para la pirólisis de EPS y PET.

El aceite pirolítico contiene mayormente compuestos aromáticos como estireno, tolueno, etilbenceno, benceno, entre otros; siendo el estireno el de mayor presencia. Al tener una composición similar a la de los solventes orgánicos comerciales más utilizados, es que se decide utilizar este producto para la co-pirólisis junto con PET.

En este artículo, exploraremos en profundidad el proceso de co-pirólisis del PET y el aceite pirolítico de EPS, analizando cómo la interacción entre estos plásticos y las condiciones de operación pueden influir en la eficiencia del reciclaje y la calidad de los productos finales.

Diseño de experimentos

Para el diseño de experimentos se decidió usar un Diseño Factorial con Punto Central mediante el software Minitab. Se decidió utilizar este diseño debido a que constituye una técnica estadística importante para analizar el efecto de dos o más variables independientes en una respuesta de salida determinada. Lo anterior nos permite conformar un experimento formado por la combinación de niveles intermedios de los dos factores escogidos (temperatura y composición) dentro del rango de valores. La estructura de los experimentos se muestra en la Figura 2.

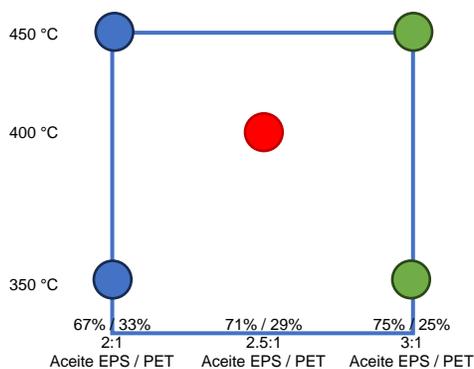


Figura 2. Diseño Experimental Factorial con Punto Central.

Para las pruebas realizadas se utilizó la metodología siguiente:

- Recolección.** Se recolecta PET principalmente de caretas de protección personal utilizadas durante la pandemia de COVID.

- b) *Corte*. Las caretas son cortadas en pedazos de aproximadamente 2 x 2 cm.
- c) *Pirólisis*. Los trozos de PET, así como el aceite pirolítico de residuos de EPS se depositan en un reactor semi-batch de acuerdo con la composición establecida en el diseño factorial (500 g en total) para realizar las pruebas. La mezcla se dejó reaccionar a 100 °C durante 1 hora previo al proceso de pirólisis, con el objetivo de diluir el PET en el aceite pirolítico de EPS. En el momento que ya no se obtiene aceite co-pirolítico, se aumenta la temperatura para obtener un residuo líquido que también es cuantificado y almacenado. En la Figura 3 se muestra el reactor utilizado en las pruebas.
- d) *Recolección del aceite co-pirolítico*. El aceite co-pirolítico es recolectado en una probeta para cuantificar el volumen obtenido, posteriormente es depositado en un frasco de vidrio para su almacenamiento, como se muestra en la Figura 4.
- e) *Recolección del carbón*. El reactor se deja enfriar para poder abrirlo y coleccionar el carbón producido para su posterior almacenamiento (Figura 5).
- f) *Limpieza*. Después de recolectar el bio-carbón se procede a limpiar el equipo experimental y la cristalería utilizada.



Figura 3. Reactor semi-batch.



Figura 4. Sistema de recolección del aceite co-pirolítico.



Figura 5. Recolección del carbón.

Caracterización de fracción líquida obtenida

Una de las principales propiedades físicas de un material es su densidad; en este estudio, la densidad de las muestras líquidas obtenidas fue evaluada con un densímetro y bajo la norma ASTM D1298. Por otro lado, un viscosímetro Cannon-Fenske fue utilizado para determinar la viscosidad cinemática de las muestras y el procedimiento de medición fue establecido mediante la norma ASTM D445.

Resultados

Influencia de la relación EPS:PET y temperatura en la obtención de productos en la co-pirólisis de EPS/PET

En la Tabla 1 se presentan los resultados obtenidos para las pruebas realizadas a las diferentes temperaturas y composiciones de aceite de EPS/PET propuestas.

Tabla 1. Rendimiento promedio de los productos obtenidos de la co-pirólisis del PET con aceite pirolítico de EPS.

Temperatura [°C]	Relación EPS:PET	EPS [%]	PET [%]	Rendimiento de los productos [%]				
				Líquido	Cera	Sólido	Gas	Total
350	2.0: 1.0	67	33	48	4.8	7.6	39.6	100
350	3.0: 1.0	75	25	55	3.2	7.2	34.6	100
400	2.5: 1.0	71	29	64.4	7.2	9.8	18.6	100
450	2.0: 1.0	67	33	63.8	2.4	7.8	26	100
450	3.0: 1.0	75	25	69.6	2.4	5.8	22.2	100

Como se logra apreciar, para la misma composición de alimentación se obtiene una mayor fracción líquida a la temperatura más alta. De manera similar, cuando la fracción de aceite pirolítico de EPS en la alimentación del reactor es mayor, la fracción líquida del producto aumenta.

Uno de los propósitos de utilizar una mezcla con aceite de EPS en la alimentación es mejorar el rendimiento de la pirólisis favoreciendo la formación de líquido como producto, como se observa en la Tabla 2, en ninguna de las condiciones utilizadas se logra este objetivo, pero cabe destacar que a temperatura de 450 °C y una relación de 2:1 se presenta una menor diferencia entre la cantidad de líquido alimentada y la obtenida.

Tabla 2. Masa de líquido obtenido de la co-pirólisis del PET con aceite pirolítico de EPS.

Temperatura [°C]	Relación EPS:PET	Masa de líquido [g]	
		EPS (Entrada)	Producto obtenido
350	2.0: 1.0	335	240
350	3.0: 1.0	375	275
400	2.5: 1.0	355	322
450	2.0: 1.0	335	319
450	3.0: 1.0	375	348

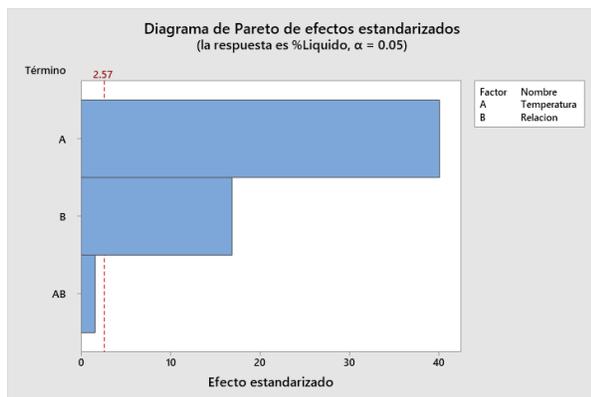
Adicionalmente, se realizaron pruebas de caracterización a los aceites pirolíticos obtenidos en las pruebas. Se incluyen pruebas de viscosidad en las cuales los productos tienen viscosidades de $1.079 \pm 0.164 \text{ mm}^2/\text{s}$ con densidades de $0.934 \pm 0.011 \text{ g/cm}^3$.

Estos resultados ubican a los productos líquidos en viscosidades cercanas a $1 \text{ mm}^2/\text{s}$, viscosidad reportada del aceite lubricante para vehículos.

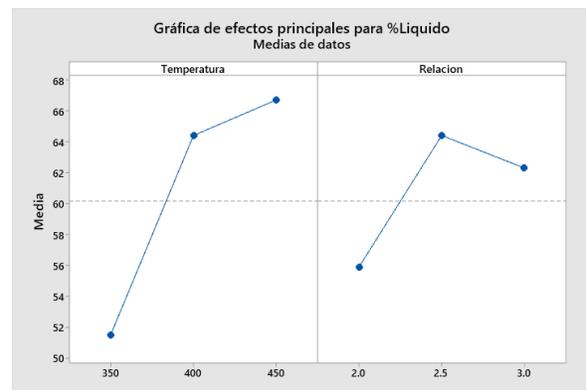
Análisis estadístico

El análisis estadístico es una herramienta de gran utilidad actualmente, dichos análisis llevan a la toma de decisiones sobre diseños experimentales. Los análisis estadísticos no solamente indican tendencia en nuestros resultados o evalúan su confiabilidad, si no que, además, permiten inferir observaciones determinando la influencia de factores experimentales sobre alguna respuesta determinada. Los resultados del análisis estadístico realizado en el presente trabajo se ilustran en la Figura 6(a) representado en un diagrama de Pareto de efectos estandarizados. El diagrama muestra la influencia de las variables experimentadas (temperatura y relación EPS:PET) sobre el rendimiento líquido obtenido con un $\alpha = 0.95$. Se puede observar que ambas variables tienen influencia significativa en el rendimiento del líquido co-pirolítico obtenido, siendo la temperatura la de mayor influencia. Por otro lado, no existe una interacción significativa entre ambas variables.

La Figura 6(b) muestra los efectos principales para el porcentaje de líquido co-pirolítico obtenido. Para el caso de la temperatura como variable, el efecto principal sobre la respuesta resultó ascendente; es decir, a medida que incrementa la temperatura, es posible obtener mayor rendimiento líquido. En contraste, la variable relación presenta un punto máximo; es decir relaciones mayores a 2.5 disminuye el rendimiento del líquido co-pirolítico obtenido.



(a) Diagrama de Pareto.



(b) Efectos principales.

Figura 6. Análisis estadístico de la co-pirólisis de EPS/PET.

Conclusiones

Aunque no se alcanzó el objetivo inicial de incrementar la producción de aceite pirolítico, se logró identificar condiciones de operación que minimizan las pérdidas y favorecen la formación de una fracción líquida mayor. Específicamente, se demostró que temperaturas de reacción elevadas (400 °C) resultan en un producto con densidad de 0.933 g/cm³ y viscosidad de 1.177 mm²/s, lo que indica un avance significativo hacia la optimización del proceso. Estos hallazgos proporcionan una base sólida para futuras investigaciones y ajustes en la estrategia de operación del reactor, con el potencial de mejorar el rendimiento del proceso de pirólisis.

Bibliografía/Referencias

- Amar Gil, S., Ardila Arias, A. N., & Barrera Zapata, R. (2019). Simulación y obtención de combustibles sintéticos a partir de la pirólisis de residuos plásticos. *Ingeniería y Desarrollo*, 37(02), 306–326. <https://doi.org/10.14482/inde.37.2.1285>.
- Anuar Sharuddin, S. D., Abnisa, F., Wan Daud, W. M. A., & Aroua, M. K. (2016). A review on pyrolysis of plastic wastes. *Energy Conversion and Management*, 115, 308–326. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.037>
- Henneberg, R. U., Nielsen, R. P., & Simonsen, M. E. (2023). Pyrolysis of mixed plastic fractions – Development of predictive models for yield and oil quality. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 173. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.106037>
- Park, K.-B., & Kim, J.-S. (2023). Pyrolysis products from various types of plastics using TG-FTIR at different reaction temperatures. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 171.
- PlasticEurope. (2023). *Plastics-the fast facts 2023*.