

Reciclaje del PET: revisión bibliográfica sobre la conversión termoquímica del PET

PET recycling: literature review on thermochemical conversion of PET

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 PET es uno de los polímeros más utilizados en la industria debido a sus propiedades mecánicas y químicas, así como su resistencia y resistencia. No obstante, su enorme acumulación en el medio ambiente ha generado inquietudes significativas. Los métodos tradicionales de reciclaje mecánico presentan limitaciones en la calidad del producto final, lo que ha dado lugar a un creciente interés en los procesos de reciclaje termoquímico como la pirólisis, la gasificación y la licuefacción. Estos métodos permiten la descomposición del PET en sus componentes químicos básicos mediante el calor y, en algunos casos, el uso de catalizadores. La pirólisis, en particular, ha demostrado un potencial para generar una variedad de productos valiosos como combustibles líquidos, gases y ceras. El presente trabajo aborda un análisis sistemático y bibliométrico de resultados obtenidos en la actualidad, realizando una crítica extensa de los parámetros operativos más influyentes en la pirólisis termo-catalítica del PET y sus residuos.

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

Introducción

La contaminación por residuos plásticos es una gran amenaza para los océanos, la vida silvestre y la salud humana. En 2019, el mercado global de plásticos se valoró en 568.9 mil millones de dólares y se espera que crezca a una tasa anual compuesta (CAGR) de 3.2% de 2020 a 2027 [1]. La mayoría de los residuos plásticos termina en vertederos o incineradores, desperdiciando su potencial de reciclaje. En 2015, de acuerdo con la Agencia de Protección del Ambiente (EPA por sus siglas en inglés), solo el 9.1% de los plásticos en EE. UU. fueron reciclados y el 15.5% se incineraron para obtener energía [2].

El poli(tereftalato de etileno) (PET) es un poliéster termoplástico semicristalino, fabricado por varias empresas bajo diferentes nombres comerciales. Es fuerte, duradero, estable química y térmicamente, tiene baja permeabilidad al gas y es fácil de procesar y manejar [3]. Estas propiedades hacen que el PET sea un material deseable para diversas aplicaciones, representando el 6.2% de la demanda de plásticos en el planeta (Ver Figura 1).

La Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas dio a conocer que en 2018 México se encontraba entre los países que producen mayor cantidad de PET, debido al alto consumo de refrescos y de agua embotellada. Se estima que al año se producen 200 botellas de PET por cada mexicano.

Al año, un poco más de ocho millones de toneladas de plásticos van a parar a los océanos, lo que es equivalente a la carga de un camión de basura cada minuto. Con el efecto del sol, el plástico libera toxinas en el agua, afectando a organismos que se encuentran a diferentes niveles de profundidad, incluso a aves marinas.

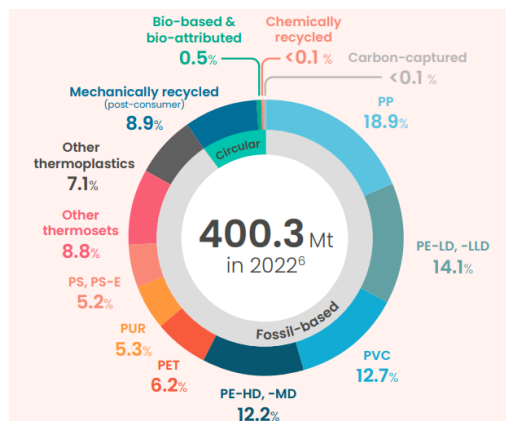


Figura 1. Producción global de plásticos por polímero [4].

Los plásticos de mayor tamaño provocan asfixia o atragantamiento en los animales, pero los microplásticos, que son pequeñas partículas sintéticas de difícil degradación (presentes en productos como detergentes, pasta dental, cosméticos, exfoliantes para la piel, protectores solares e incluso en muchas fibras sintéticas de ropa) son ingeridos por la fauna marina sin darse cuenta, provocándoles problemas alimenticios y reproductivos. Además, estos plásticos continúan su recorrido por la cadena alimenticia hasta regresar a nuestro plato de comida [5].

De las 400.3 millones de toneladas métricas de plástico producidas a nivel global en 2022, aproximadamente solo el 9.6 % llegaron a ser recicladas (Ver Figura 2).

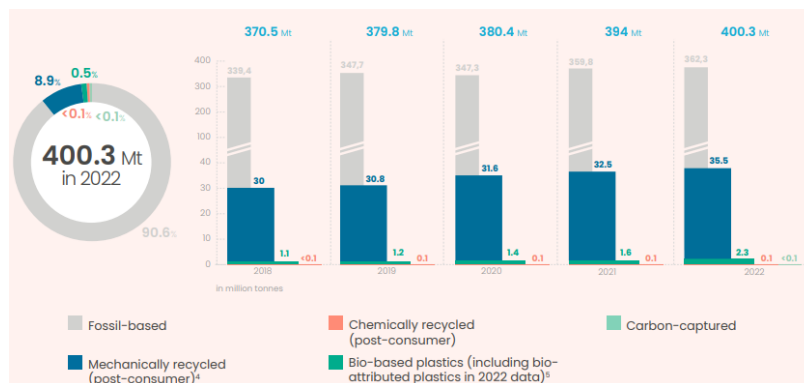


Figura 2. Producción global de plásticos en los últimos años [4].

El aumento continuo en el uso de plásticos ha incrementado la cantidad de plásticos que terminan en los residuos, lo que ha motivado un mayor interés en el reciclaje y reutilización de plásticos. En cuanto la recuperación y reciclaje de plásticos se destacan tres opciones principales: reutilización, reciclaje mecánico y reciclaje químico.

- Reutilización: Ejemplos comunes incluyen el retorno y limpieza de botellas de vidrio para reutilización, pero el reúso de envases plásticos es menos común debido a que suelen desecharse después del primer uso.
- Reciclaje mecánico: También conocido como reciclaje físico, implica moler el plástico y reprocesarlo para producir nuevos componentes que pueden o no ser idénticos a su uso original.
- Reciclaje químico: Aquí, los desechos de polímeros se convierten de nuevo en sus componentes de aceite/hidrocarburo en el caso de poliolefinas, o en monómeros en el caso de poliésteres y poliamidas, los cuales pueden ser utilizados como materias primas para la producción de nuevos polímeros en la industria petroquímica, o convertidos en polímeros puros mediante solventes químicos adecuados [6].

Tereftalato de polietileno (PET)

El tereftalato de polietileno (PET) es un polímero termoplástico que se ha convertido en un componente fundamental en la industria del envasado, principalmente debido a su resistencia, transparencia y barrera a gases. Su fórmula química, $(C_{10}H_8O_4)_n$, consta de unidades repetitivas de etileno y ácido tereftálico, formando largas cadenas poliméricas que le confieren sus propiedades únicas [7].

El PET es un plástico que está por todas partes en nuestra vida diaria. El uso más conocido es en las botellas de bebidas, como las de agua y refrescos, por su transparencia y resistencia. Además, si miras las etiquetas de la ropa, muchas veces verás poliéster, que es otra forma de PET usado en textiles. También lo encuentras en envases de comida y medicamentos porque es muy duradero y protege bien su contenido. Y no nos olvidemos de las láminas y películas de PET, que se usan en todo, desde tarjetas de crédito hasta etiquetas adhesivas [8].

Análisis bibliométrico

El estudio de redes bibliométricas, como la autoría, citación y determinar los países líderes en publicaciones sobre un tema en específico ha sido de gran interés actualmente. Este tipo de análisis ayuda a conocer el estado del arte de un tema determinado y su potencial para futuros desarrollos e investigaciones. La investigación sobre el análisis de datos abarca distintos campos, como los materiales, educación, economía, medicina, medio ambiente, entre otros [9].

Para complementar la revisión bibliográfica del presente trabajo se realizó un análisis bibliométrico del reciclaje del PET con la recopilación de datos obtenida de la base de datos Web of Science (WoS); el análisis fue desarrollado mediante el uso del software VOSViewer 1.6.18.

La recolección de datos fue llevada a cabo mediante las siguientes consideraciones:

- La base de datos que se utilizó fue Web of Science.
- Se consideraron trabajos actuales; es decir dentro de un rango no mayor a 5 años de antigüedad representando en trabajos publicados en 2019 a 2024.
- La búsqueda se realizó con las palabras “PET recycling” y “Polyethylene Terephthalate recycling”.
- Los tipos de documentos que se tomaron en cuenta fueron: artículos, artículos de revisión, memorias y capítulos de libro.
- Se tomaron en cuenta todas las categorías de la base de datos, afiliaciones, idiomas y países.

De acuerdo con el mencionado criterio, la búsqueda resultó en 4383 trabajos de investigación en donde el top 3 de áreas de especialización se centran en ciencias ambientales, ciencias de polímeros e ingeniería ambiental con un 12.5%, 11.3% y 10.1% de publicaciones, respectivamente.

Las palabras clave de un artículo de investigación resultan en el contenido esencial de este, la Figura 3 muestra la red bibliométrica resultante del reciclaje de PET mediante la ocurrencia de palabras clave. La figura 3 muestra distintos clústeres que refieren a los enfoques de mayor interés en este tema.

Los enfoques que se le ha otorgado al reciclaje del PET se encuentra el estudio de los tipos de reciclaje donde abarcan temas de pirólisis, hidrogenación, polimerización, catalizadores, alcoholisis, entre otros (Clúster 1). Por otro lado, la investigación sobre este plástico comprende áreas de ciencia de polímeros incluyendo el estudio de su morfología, propiedades mecánicas, mezclas, materiales compuestos (Clúster 2). Finalmente, un área de estudio importante dentro el reciclaje del PET se ha centrado en estudios medioambientales analizando la generación de residuos, bioplásticos, el manejo de residuos, contaminación, estudios de ciclo de vida y proyectos que conlleven a una economía circular del PET (Clúster 3).

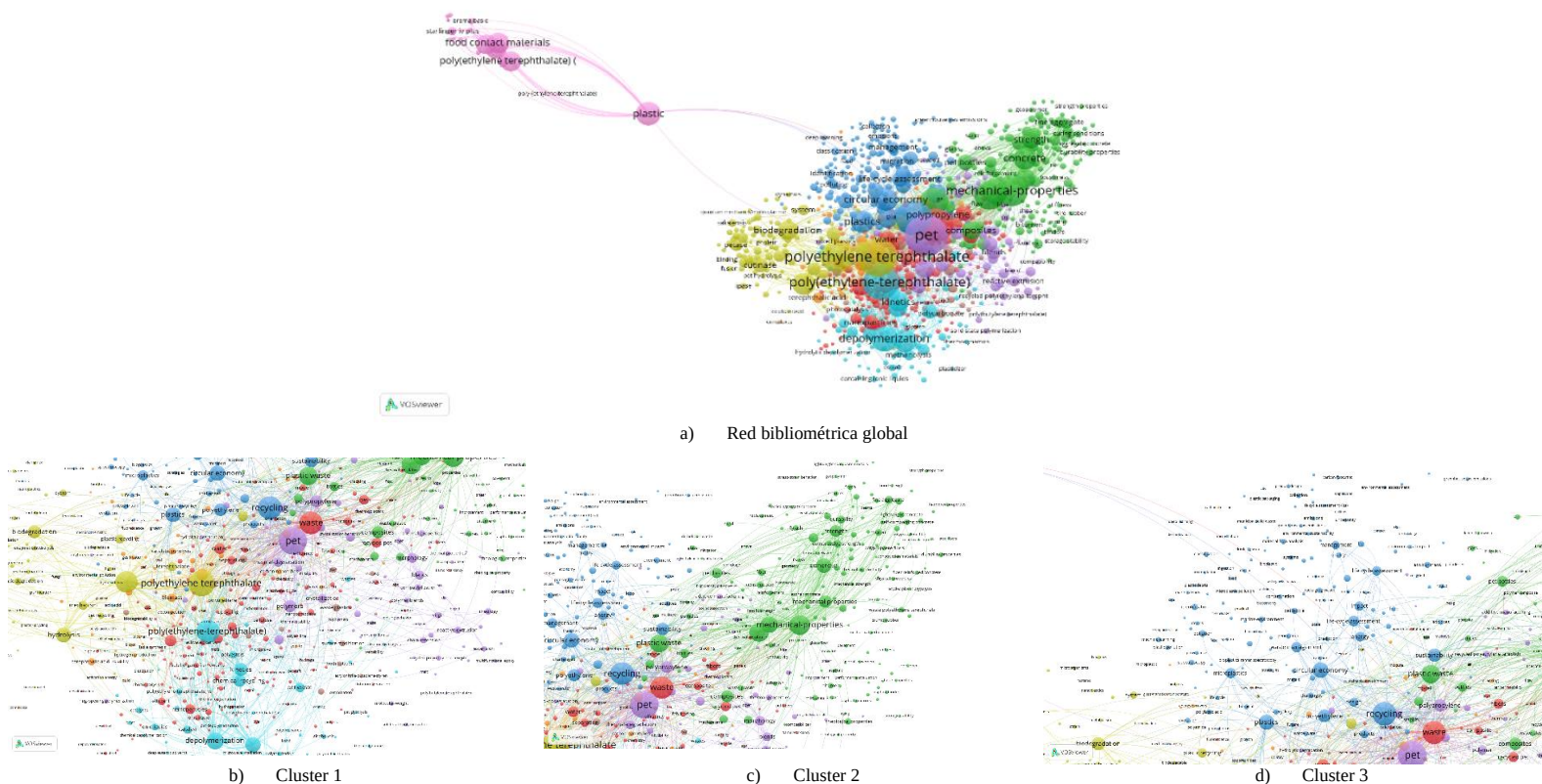


Figura 3. Red bibliométrica de reciclaje de PET.

La Figura 4 muestra los resultados de los países líderes con mayores publicaciones en temas de reciclaje del PET en donde destacan China, India, Estados Unidos y Alemania. Dichos resultados podrían estar atribuidos a la alta demanda y producción de plásticos en esos países, llevándolos a resolver la gran cantidad de residuos que se generan; además, la buena cultura de reciclaje que tienen esos países, lo cual facilita el manejo de residuos y procesamiento de estos. México ha contribuido con investigaciones acerca del reciclaje del PET, aunque a menor escala, colabora con países que tienen tecnologías más desarrolladas como países europeos y asiáticos.

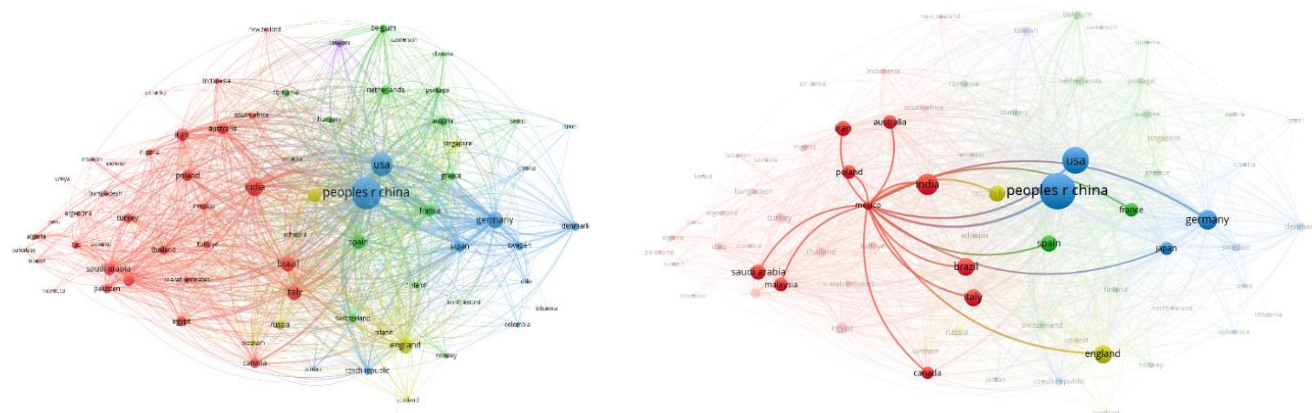


Figura 4. Países con mayor productividad científica acerca del reciclaje del PET.

Pirólisis de residuos plásticos

Los polímeros plásticos son, en principio, derivados de combustibles fósiles y petroquímicos. Las largas cadenas de polímeros tienen varios miles de unidades repetitivas de monómeros, lo que hace que el plástico sea duradero. Dado que se utilizan hidrocarburos no renovables para la producción de polímeros, el procesamiento químico de residuos poliméricos para producir combustibles o materias primas petroquímicas es más favorable en comparación con otros métodos de reciclaje. Además, el reciclaje químico de residuos plásticos para obtener productos químicos básicos representa una ruta de reciclaje prometedora, ya que se espera que sea más robusta frente a corrientes de residuos plásticos impuros y contaminados.

En la pirólisis, los residuos plásticos se descomponen térmica o catalíticamente a altas temperaturas (300 a 900 °C) sin oxígeno para convertir los polímeros en moléculas pequeñas y obtener fracciones líquidas, gaseosas y sólidas. Gestionar los residuos plásticos mediante pirólisis es una técnica de valorización prometedora, ya que permite utilizar estos residuos sin procesamiento previo para obtener productos de alto valor añadido. Las principales aplicaciones del aceite pirolítico derivado de residuos plásticos son combustibles o materias primas químicas que pueden usarse para fabricar polímeros de calidad virgen. La pirólisis es un método de reciclaje flexible porque los productos pirolíticos pueden modificarse variando las condiciones de reacción. Los factores significativos que influyen en la distribución molecular de los productos de la pirólisis de plásticos incluyen la temperatura, tipo de reactores, presión, tiempo de residencia y catalizadores.

Las discusiones sobre los parámetros operativos se revisan en las siguientes subsecciones.

Tipos de reactores

El tipo de reactor afecta significativamente la mezcla de plásticos y catalizadores, el tiempo de residencia, la transferencia de calor y la eficiencia de la reacción. Los experimentos de pirólisis de plásticos a escala de laboratorio suelen realizarse en reactores de lote, semilote o de flujo continuo, como el lecho fluidizado, el reactor de lecho fijo y el reactor de lecho cónico de surtidor (CSBR). Las ventajas y desventajas de cada tipo de reactor se examinarán en las subsecciones siguientes.

Reactor de lote y semilote

Un reactor de lote (Ver Figura 5) es básicamente un sistema cerrado sin entrada ni salida de reactivos o productos mientras se lleva a cabo la reacción. La alta conversión en un reactor de lote se puede lograr dejando el reactivo en el reactor durante un tiempo prolongado, lo cual es una de sus ventajas. Sin embargo, las desventajas del reactor de lote incluyen la variabilidad del producto de un lote a otro, altos costos de mano de obra por lote y la dificultad de la producción a gran escala.

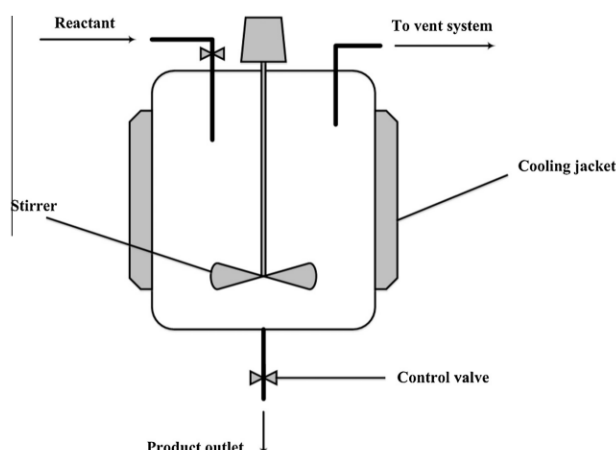


Figura 5. Ilustración de reactor por lotes con equipo agitador [10].

En contraste, un reactor semilote permite la adición de reactivos y la eliminación de productos al mismo tiempo. La flexibilidad de añadir reactivos con el tiempo es una ventaja adicional del reactor semilote en términos de selectividad de la reacción. La desventaja del reactor semilote es similar a la del reactor de lote en términos de costos de mano de obra, por lo que es más adecuado para la producción a pequeña escala [11].

Reactor de lecho fijo y lecho fluidizado

En un reactor de lecho fijo, el catalizador suele estar en forma de pellets y empaquetado en un lecho estático (Ver Figura 6). Es fácil de diseñar, pero presenta algunas limitaciones, como el tamaño y la forma irregulares de las partículas de plástico que causan problemas durante el proceso de alimentación. Además, la superficie disponible del catalizador accesible para la reacción es limitada. Sin embargo, varios investigadores han optado por usar el reactor de lecho fijo para la pirólisis de plásticos. En ciertas condiciones, los reactores de lecho fijo se utilizan únicamente como reactores de pirólisis secundaria porque el producto de la pirólisis primaria puede alimentarse fácilmente en el reactor de lecho fijo, que generalmente consiste en fase líquida y gaseosa. Onu et al. y Vasile et al. utilizaron un proceso de dos pasos en el estudio de la pirólisis de varios plásticos. Sin embargo, se han realizado muy pocos estudios en el proceso de dos pasos, ya que no es rentable y los resultados obtenidos son bastante comparables con un proceso de un solo paso. Por otro lado, el reactor de lecho fluidizado (Ver Figura 7) resuelve algunos de los problemas que ocurren en el reactor de lecho fijo. A diferencia del reactor de lecho fijo, el catalizador en el reactor de lecho fluidizado se encuentra sobre una placa distribuidora donde el gas de fluidización pasa a través de ella y las partículas se transportan en un estado fluido. Por lo tanto, hay un mejor acceso al catalizador, ya que el catalizador está bien mezclado con el fluido y proporciona una mayor superficie para que ocurra la reacción. Esto reduce la variabilidad de las condiciones del proceso con una buena transferencia de calor. Además, es más flexible que el reactor de lote, ya que se puede evitar la carga frecuente de materia prima y el proceso no necesita reanudarse a menudo. Por lo tanto, en cuanto a la escala de diseño convencional, el reactor de lecho fluidizado sería el mejor reactor para usar en la planta piloto debido a su menor costo operativo [12].

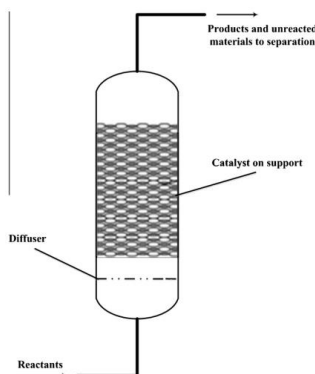


Figura 6. Diagrama de Reactor de lecho fijo [10].

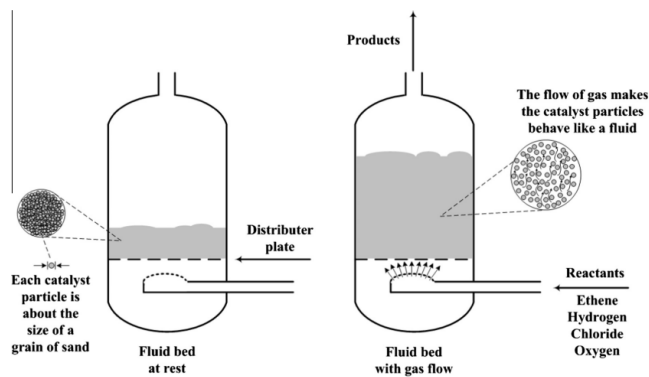


Figura 7. Diagrama de Reactor de lecho fluidizado [10].

Reactor de lecho cónico de surtidor (CSBR)

El reactor de lecho cónico de surtidor (CSBR) (Ver Figura 8) proporciona una buena mezcla con la capacidad de manejar una gran distribución del tamaño de partículas, partículas más grandes y diferencias en las densidades de partículas [11]. Algunos investigadores utilizaron el CSBR para sus experimentos de craqueo catalítico de plásticos [13–18]. Olazar et al. [16] afirmaron que el CSBR tenía menor desgaste y menor segregación del lecho que el lecho fluidizado burbujeante. También tenía una alta transferencia de calor entre fases y menor problema de defluidización al manejar sólidos pegajosos. Sin embargo, se han encontrado una variedad de desafíos técnicos durante la operación de este reactor, como

la alimentación del catalizador, el arrastre del catalizador y la recolección de productos (sólidos y líquidos) que lo hacen menos favorable. Además, su diseño complicado que requiere muchas bombas en el sistema lo hace desfavorable debido al alto costo operativo involucrado [11].

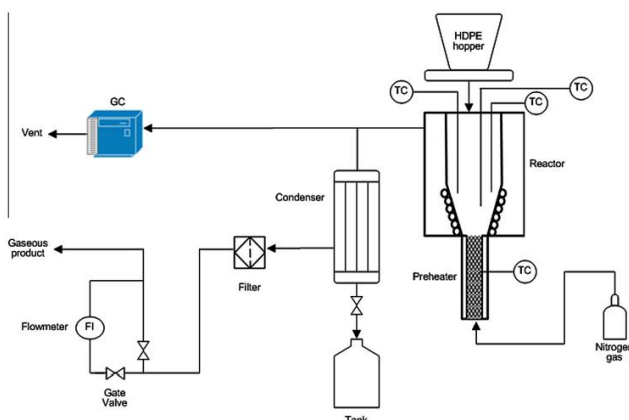


Figura 8. Diagram of CSBR in HDPE pyrolysis using zeolite catalyst [19].

Tecnología asistida por microondas

El reciente interés en la tecnología de microondas ofrece una nueva técnica para la recuperación de residuos a través del proceso de pirólisis. En este proceso, un material altamente absorbente de microondas, como el carbono particulado, se mezcla con los materiales de desecho. El absorbente de microondas absorbe la energía de microondas para crear suficiente energía térmica con el fin de alcanzar las temperaturas requeridas para que ocurra la pirólisis extensa. La radiación de microondas ofrece varias ventajas sobre el método de pirólisis convencional, como calentamiento rápido, mayor velocidad de producción y menores costos de producción. A diferencia de los métodos convencionales, la energía de microondas se suministra directamente al material a través de la interacción molecular con el campo electromagnético, por lo que no se pierde tiempo en calentar el área circundante. A pesar de las ventajas del calentamiento por microondas, también hay una limitación importante que impide que esta tecnología sea ampliamente explorada a escala industrial, como la falta de datos suficientes para cuantificar las propiedades dieléctricas de la corriente de desechos tratada. La eficiencia del calentamiento por microondas depende en gran medida de las propiedades dieléctricas del material. Por ejemplo, los plásticos tienen una constante dieléctrica baja y la mezcla con carbono como absorbente de microondas durante la pirólisis puede mejorar la energía absorbida para convertirse en calor en un tiempo más corto. Por lo tanto, la eficiencia del calentamiento puede diferir para cada material y ha sido un gran desafío para las industrias [20].

Temperatura

La temperatura es uno de los parámetros operativos más significativos en la pirólisis, ya que controla la reacción de craqueo de la cadena de polímeros. Las moléculas se atraen entre sí por la fuerza de Van der Waals, lo que impide que las moléculas colapsen. Cuando la temperatura del sistema aumenta, la vibración de las moléculas dentro del sistema será mayor y las moléculas tienden a evaporarse de la superficie del objeto. Esto ocurre cuando la energía inducida por la fuerza de Van der Waals a lo largo de las cadenas poliméricas es mayor que la entalpía del enlace C-C en la cadena, resultando en la ruptura de la cadena de carbono [21].

Presión y tiempo de residencia

El efecto de la presión sobre el producto de la pirólisis de HDPE fue estudiado por Murata et al. en un reactor de tanque agitado continuo a temperaturas elevadas de 0.1-0.8 MPa. Descubrieron que el producto gaseoso aumentó significativamente de alrededor del 6% en peso a 13% en peso a 410°C, pero solo aumentó ligeramente de 4% en peso a 6% en peso a 440°C cuando la presión subió de 0.1 a 0.8 MPa. Esto muestra que la presión tiene una gran influencia en el producto gaseoso a temperaturas más altas. La presión también afectó la distribución del número de carbonos del producto líquido, desplazándola hacia el lado de menor peso molecular cuando era alta. Además, la presión tuvo un efecto significativo en la tasa de formación de dobles enlaces. Según informaron Murata et al., la tasa de formación de dobles enlaces disminuyó cuando la presión aumentó, lo que sugiere que la presión afecta directamente la tasa de ruptura de

enlaces C–C en el polímero. También descubrieron que la presión tenía un mayor impacto en el tiempo de residencia a temperaturas más bajas. Sin embargo, a medida que la temperatura aumentaba por encima de 430°C, el efecto de la presión sobre el tiempo de residencia se volvía menos aparente.

El tiempo de residencia se define como la cantidad promedio de tiempo que la partícula pasa en el reactor y puede influir en la distribución del producto. Un tiempo de residencia más largo aumenta la conversión del producto primario, produciendo así un producto más estable térmicamente, como hidrocarburos de peso molecular ligero y gas no condensable. No obstante, existe una limitación de temperatura en el proceso que puede influir en la distribución del producto, donde hasta ese momento, el tiempo de residencia no tiene mucho efecto en la distribución del producto. Mastral et al. estudiaron el efecto del tiempo de residencia y la temperatura en la distribución del producto de craqueo térmico de HDPE en un reactor de lecho fluidizado. Se encontró que se obtenía un mayor rendimiento de líquido a un tiempo de residencia más largo (2.57 s) cuando la temperatura no superaba los 685°C. Sin embargo, el tiempo de residencia tuvo menos influencia en el rendimiento de líquido y gas a temperaturas más altas, por encima de 685°C.

Por lo tanto, se concluyó que la presión y el tiempo de residencia son factores dependientes de la temperatura que pueden tener una influencia potencial en la distribución del producto de la pirólisis de plásticos a temperaturas más bajas. Una mayor presión aumentó el rendimiento del producto gaseoso y afectó la distribución del peso molecular tanto para productos líquidos como gaseosos, pero solo fue aparente a altas temperaturas [22].

Catalizadores

Un catalizador acelera la reacción química, pero permanece sin cambios al final del proceso. Los catalizadores se utilizan ampliamente en industrias e investigaciones para optimizar la distribución de productos y aumentar la selectividad del producto. Por lo tanto, la degradación catalítica es particularmente interesante para obtener productos de gran interés comercial, como combustibles automotrices (diésel y gasolina) y olefinas C2-C4, que tienen una gran demanda en la industria petroquímica. Cuando se usa un catalizador, la energía de activación del proceso se reduce, lo que acelera la tasa de reacción. Por lo tanto, el catalizador reduce la temperatura óptima requerida, lo cual es crucial, ya que el proceso de pirólisis requiere mucha energía (altamente endotérmico), lo que obstaculiza su aplicación comercial. El uso de catalizadores puede ayudar a ahorrar energía, ya que el calor es uno de los costos más caros en la industria. Además, muchos investigadores han utilizado catalizadores para la mejora del producto, con el fin de mejorar la distribución de hidrocarburos y obtener líquidos de pirólisis con propiedades similares a los combustibles convencionales, como gasolina y diésel [23].

Pirólisis del PET

Cuando se somete el PET a pirolisis, básicamente lo descomponemos con calor sin oxígeno, obteniendo varias cosas útiles. Primero, tenemos gases como el hidrógeno y el metano, que pueden usarse como combustibles o en procesos industriales. Luego están los líquidos, principalmente compuestos aromáticos como benceno y tolueno, que se usan mucho en la industria química para fabricar otros productos. También se puede obtener cera, útil en la fabricación de lubricantes y velas. Y finalmente, el residuo sólido es carbón, que puede ser usado como material adsorbente o quemado como fuente de energía [24].

A través de la pirolisis, el PET se puede transformar en una variedad de productos que tienen muchas aplicaciones en la industria, ofreciendo una manera de reciclar este plástico tan común de forma eficiente.

El reciclaje del PET mediante pirolisis presenta varios retos, en particular debido a la necesidad de condiciones específicas para descomponer su estructura polimérica de manera eficiente. Algunas de las principales dificultades incluyen:

1. **Pureza del Material:** El PET reciclado a menudo contiene impurezas, como etiquetas, adhesivos y otros contaminantes. Estos pueden afectar la eficiencia de la pirolisis y la calidad de los productos finales.
2. **Condiciones de Proceso:** La pirolisis del PET requiere temperaturas elevadas (generalmente entre 400 y 600 °C) para romper los enlaces de la cadena polimérica. Las condiciones óptimas pueden variar significativamente dependiendo del diseño del reactor y de la presencia de catalizadores.

3. Productos de Descomposición: Los productos de la pirólisis del PET incluyen gases (como CO y CO₂), líquidos (principalmente compuestos aromáticos) y sólidos (carbón). La proporción de estos productos puede variar, lo que requiere un control preciso del proceso para maximizar la producción de los productos deseados [25].

Tabla 1. Resultados de la pirólisis del PET.

Tipo de reactor	Temperatura [°C]	Rendimiento (wt%)			Contenido y Observaciones	Ref.
		Líquido	Gas	Sólido		
Batch	410	54.3	25.8	19.9	Acetaldehído, CO ₂ y CO como principales productos gaseosos; aceite que contiene principalmente derivados del ácido benzoico.	[26]
	430	52.9	29.3	17.8		
	450	55.5	27.5	17		
	480	52.2	30.7	17.1		
	750	23.56	8.5	67.94	El CO, el CO ₂ , el CH ₄ y el C ₂ H ₆ son los principales gases; el ácido benzoico y el ácido acetilbenzoico son los principales productos de la fracción petrolífera.	[27]
Lecho Fluidizado	510	2	37	49	La cantidad de ácidos disminuye al aumentar la temperatura; los principales productos son el ácido benzoico, el ácido tereftálico y el tereftalato de monometilo.	[28]
	630	4	39	46		
Lecho de caño cónico	500	13	42.78	27.22	Sólido que contiene ácidos orgánicos y teroxigenados; el CO ₂ es el principal producto gaseoso, seguido del CO y el etileno; el acetaldehído es el principal producto líquido.	[29]
	600	6	49.1	42.9		

Co-pirólisis del PET con otros polímeros

La co-pirólisis del PET con otros plásticos, como el poliestireno (PS) o el polietileno (PE), puede mejorar la eficiencia del proceso y diversificar los productos obtenidos. La interacción entre diferentes plásticos durante la copirólisis puede:

1. Mejorar la Reactividad: La combinación de PET con plásticos más fácilmente degradables, como el poliestireno, puede facilitar la descomposición del PET a temperaturas más bajas.
2. Modificar los Productos: La presencia de otros plásticos puede alterar la distribución de productos, aumentando la producción de líquidos o gases útiles.
3. Catalizadores Específicos: La introducción de catalizadores específicos puede optimizar la descomposición conjunta, reduciendo la formación de subproductos no deseados y mejorando la selectividad hacia productos valiosos [30].

Los estudios sobre la co-pirólisis del PET con otros plásticos han demostrado resultados variados, dependiendo de los reactores utilizados, los catalizadores aplicados y las temperaturas de reacción. En la Tabla 2 se presenta un resumen de algunos de estos resultados, los cuales muestran cómo la elección de materiales y condiciones de reacción pueden influir significativamente en los productos obtenidos, destacando la versatilidad y los desafíos asociados con la pirólisis y la co-pirólisis del PET [34].

Tabla 2. Resultados de la co-pirólisis del PET con otros plásticos.

Tipo de polímero	Tipo de reactor	Catalizador	Temperatura [°C]	Productos	Rendimiento (wt%)	Observaciones	Ref
------------------	-----------------	-------------	------------------	-----------	-------------------	---------------	-----

PET+ Poliestireno	Lecho fijo	Zeolita ZSM-5	500	Gases, líquidos aromáticos	65%	Alta producción de hidrocarburos aromáticos	[31]
PET+ Polietileno	Lecho fluidizado	Alúmina Al ₂ O ₃	450	Gases (CO, CO ₂ , H ₂)	20%	Gases con alto contenido energético	[¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.]
PET+ Polipropileno	Lecho fijo	Ni-Mo	550	Cera (parafinas)	75%	Producción de ceras	[¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.]
PET+ Poliestireno	Lecho fijo	Zeolita ZSM-5	600	Líquidos (hidrocarburos aromáticos)	70%	Aumento en la producción de líquidos con la temperatura	[¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.]
PET+ Polietileno	Lecho fluidizado	Alúmina Al ₂ O ₃	500	Gases (CO, CO ₂ , H ₂)	25%	Mayor rendimiento de gases comparado con menor temperatura	[¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.]
PET+ Polipropileno	Lecho fijo	Ni-Mo	600	Cera (parafinas)	80%	Rendimiento de cera óptimo a esta temperatura	[¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.]

Conclusiones

Esta revisión proporciona un resumen exhaustivo de la pirólisis de plásticos y una cuestión sobre los principales parámetros que afectan la optimización del rendimiento. La mayoría de los expertos optaron por el procedimiento de pirólisis debido a su potencial para transformar la mayor cantidad de energía de los residuos plásticos en aceites líquidos valiosos, gas y carbón. En consecuencia, es la mejor opción para la conversión de residuos plásticos y también es económica en términos de funcionamiento. La flexibilidad que proporciona en términos de preferencia de productos puede ajustarse ajustando los parámetros en consecuencia. La pirólisis se puede llevar a cabo tanto en procesos térmicos como en procesos catalíticos. No obstante, el procedimiento catalítico proporciona una temperatura de operación más baja y un mayor rendimiento de aceite líquido para la mayoría de los plásticos, mediante la elección adecuada de catalizadores. La sostenibilidad del proceso es incuestionable, ya que la cantidad de residuos plásticos disponibles en cada país alcanza millones de toneladas. Con el método de pirólisis, la gestión de residuos se vuelve más eficiente, se necesita menos capacidad de vertederos, hay menos contaminación y también es rentable. Además, con la existencia del método de pirólisis para descomponer plásticos en combustibles energéticos valiosos, se puede reducir la dependencia de los combustibles fósiles como energía no renovable y esto resuelve el aumento de la demanda de energía.

Bibliografía/Referencias

1. R. A. M. Ltd, «Plastic Market Size, Share & Trends Analysis Report by product (PE, PP, PU, PVC, PET, polystyrene, ABS, PBT, PPO, epoxy polymers, LCP, PC, polyamide), by application, by end-use, by region, and segment Forecasts, 2023-2030», Research And Markets Ltd 2024. <https://www.researchandmarkets.com/reports/4751797/plastic-market-size-share-and-trends-analysis>

2. Leblanc, R. Plastic Recycling Facts and Figures. Available online: <https://www.liveabout.com/plastic-recycling-facts-and-figures-2877886>
3. H. Webb, J. Arnott, R. Crawford, y E. Ivanova, «Plastic Degradation and Its Environmental Implications with Special Reference to Poly(ethylene terephthalate)», *Polymers*, vol. 5, n.o 1, pp. 1-18, dic. 2012, doi: 10.3390/polym5010001.
4. Plastics Europe, «Plastics Europe • Enabling a sustainable future», Plastics Europe, 23 de julio de 2024. <http://www.plasticseurope.org/>
5. C. N. De Áreas Naturales Protegidas, «Con-su-mismo plástico», gob.mx. <https://www.gob.mx/conanp/es/articulos/con-su-mismo-plastico?idiom=es>
6. K. Hamad, M. Kaseem, y F. Deri, «Recycling of waste from polymer materials: An overview of the recent works», *Polymer Degradation And Stability*, vol. 98, n.o 12, pp. 2801-2812, dic. 2013, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2013.09.025.
7. P. S. Roy, G. Garnier, F. Allais, and K. Saito, “Strategic Approach towards Plastic Waste Valorization: challenges and promising chemical upcycling possibilities,” *ChemSusChem*, vol. 14, no. 19, pp. 4007–4027, Jul. 2021, doi: 10.1002/cssc.202100904.
8. V. K. Soni, G. Singh, B. K. Vijayan, A. Chopra, G. S. Kapur, and S. S. V. Ramakumar, “Thermochemical Recycling of waste Plastics by Pyrolysis: a review,” *Energy & Fuels*, vol. 35, no. 16, pp. 12763–12808, Aug. 2021, doi: 10.1021/acs.energyfuels.1c01292.
9. Gonzalez-Aguilar, A.M.; Pérez-García, V.; Riesco-Ávila, J.M. A Thermo-Catalytic Pyrolysis of Polystyrene Waste Review: A Systematic, Statistical, and Bibliometric Approach. *Polymers* 2023, 15, 1582, doi:10.3390/polym15061582.
10. A. Clements, *The essential chemical industry*. 2010. <https://archive.org/details/essentialchemica0000unse>
11. H. S. Fogler, *Essentials of Chemical Reaction Engineering: Essenti Chemica Reactio Engi*. Pearson Education, 2010. https://books.google.com.mx/books?hl=en&lr=&id=V5M1bMjOTQoC&oi=fnd&pg=PR7&dq=%5B46%5D+Fogler+H.S.+Elements+of+chemical+reaction+engineering.+4th+ed.+New+Jersey:+Pearson+Education+Inc.%3B+2010.&ots=XxzQNIH16x&sig=Yw7i-XUfZfh20DhrWVvr7klFUwI&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
12. W. Kaminsky y J.-S. Kim, «Pyrolysis of mixed plastics into aromatics», *Journal Of Analytical And Applied Pyrolysis*, vol. 51, n.o 1-2, pp. 127-134, jul. 1999, doi: 10.1016/s0165-2370(99)00012-1.
13. G. Elordi, M. Olazar, P. Castaño, M. Artetxe, y J. Bilbao, «Polyethylene Cracking on a Spent FCC Catalyst in a Conical Spouted Bed», *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 51, n.o 43, pp. 14008-14017, oct. 2012, doi: 10.1021/ie3018274.
14. M. Artetxe, G. Lopez, M. Amutio, G. Elordi, J. Bilbao, y M. Olazar, «Cracking of High Density Polyethylene Pyrolysis Waxes on HZSM-5 Catalysts of Different Acidity», *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 52, n.o 31, pp. 10637-10645, jul. 2013, doi: 10.1021/ie4014869.
15. G. Elordi et al., «Catalytic pyrolysis of HDPE in continuous mode over zeolite catalysts in a conical spouted bed reactor», *Journal Of Analytical And Applied Pyrolysis*, vol. 85, n.o 1-2, pp. 345-351, may 2009, doi: 10.1016/j.jaap.2008.10.015.
16. M. Olazar, G. Lopez, M. Amutio, G. Elordi, R. Aguado, y J. Bilbao, «Influence of FCC catalyst steaming on HDPE pyrolysis product distribution», *Journal Of Analytical And Applied Pyrolysis*, vol. 85, n.o 1-2, pp. 359-365, may 2009, doi: 10.1016/j.jaap.2008.10.016.
17. M. Arabiourrutia, G. Elordi, G. Lopez, E. Borsella, J. Bilbao, y M. Olazar, «Characterization of the waxes obtained by the pyrolysis of polyolefin plastics in a conical spouted bed reactor», *Journal Of Analytical And Applied Pyrolysis*, vol. 94, pp. 230-237, mar. 2012, doi: 10.1016/j.jaap.2011.12.012.
18. R. Aguado, M. Olazar, B. Gaisán, R. Prieto, y J. Bilbao, «Kinetic Study of Polyolefin Pyrolysis in a Conical Spouted Bed Reactor», *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 41, n.o 18, pp. 4559-4566, ago. 2002, doi: 10.1021/ie0201260.
19. Elordi G, Olazar M, Aguado R, Lopez G, Arabiourrutia M, Bilbao J. Catalytic pyrolysis of high density polyethylene in a conical spouted bed reactor. *J Anal Appl Pyrol* 2007;79:450–5.
20. S. S. Lam y H. A. Chase, «A Review on Waste to Energy Processes Using Microwave Pyrolysis», *Energies*, vol. 5, n.o 10, pp. 4209-4232, oct. 2012, doi: 10.3390/en5104209.
21. A. A. Sobko, «Generalized van der Waals-Berthelot equation of state», *Doklady Physics*, vol. 53, n.o 8, pp. 416-419, ago. 2008, doi: 10.1134/s1028335808080028.
22. S. D. A. Sharuddin, F. Abnisa, W. M. A. W. Daud, y M. K. Aroua, «A review on pyrolysis of plastic wastes», *Energy Conversion And Management*, vol. 115, pp. 308-326, may 2016, doi: 10.1016/j.enconman.2016.02.037.
23. G. Elordi et al., «Catalytic pyrolysis of HDPE in continuous mode over zeolite catalysts in a conical spouted bed reactor», *Journal Of Analytical And Applied Pyrolysis*, vol. 85, n.o 1-2, pp. 345-351, may 2009, doi: 10.1016/j.jaap.2008.10.015.
24. R. Prajapati, K. Kohli, S. Maity, and B. Sharma, “Potential Chemicals from Plastic Wastes,” *Molecules/Molecules Online/Molecules Annual*, vol. 26, no. 11, p. 3175, May 2021, doi: 10.3390/molecules26113175.
25. S. C. Kosloski-Oh, Z. A. Wood, Y. Manjarrez, J. P. De Los Rios, and M. E. Fieser, “Catalytic methods for chemical recycling or upcycling of commercial polymers,” *Materials Horizons*, vol. 8, no. 4, pp. 1084–1129, Jan. 2021, doi: 10.1039/d0mh01286f.

26. A. Dhahak, G. Hild, M. Rouaud, G. Mauviel, y V. Burkle-Vitzthum, «Slow pyrolysis of polyethylene terephthalate: Online monitoring of gas production and quantitative analysis of waxy products», *Journal Of Analytical And Applied Pyrolysis*, vol. 142, p. 104664, sep. 2019, doi: 10.1016/j.jaap.2019.104664.
27. S. Du, J. A. Valla, R. S. Parnas, y G. M. Bollas, «Conversion of Polyethylene Terephthalate Based Waste Carpet to Benzene-Rich Oils through Thermal, Catalytic, and Catalytic Steam Pyrolysis», *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, vol. 4, n.o 5, pp. 2852-2860, abr. 2016, doi: 10.1021/acssuschemeng.6b00450.
28. T. Yoshioka, G. Grause, C. Eger, W. Kaminsky, y A. Okuwaki, «Pyrolysis of poly(ethylene terephthalate) in a fluidised bed plant», *Polymer Degradation And Stability*, vol. 86, n.o 3, pp. 499-504, dic. 2004, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2004.06.001.
29. M. Artetxe, G. Lopez, M. Amutio, G. Elordi, M. Olazar, y J. Bilbao, «Operating Conditions for the Pyrolysis of Poly(ethylene terephthalate) in a Conical Spouted-Bed Reactor», *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 49, n.o 5, pp. 2064-2069, ene. 2010, doi: 10.1021/ie900557c.
30. J.-S. Lu, Y. Chang, C.-S. Poon, and D.-J. Lee, «Slow pyrolysis of municipal solid waste (MSW): A review», *Bioresource Technology*, vol. 312, p. 123615, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.biortech.2020.123615.
31. W. U. Eze, R. Umunakwe, H. C. Obasi, M. I. Ugboja, C. C. Uche, y I. C. Madufor, «Plastics waste management: A review of pyrolysis technology», *Clean Technologies And Recycling*, vol. 1, n.o 1, pp. 50-69, ene. 2021, doi: 10.3934/ctr.2021003.
32. M. H. Rahman, P. R. Bhoi, y P. L. Menezes, «Pyrolysis of waste plastics into fuels and chemicals: A review», *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, vol. 188, p. 113799, dic. 2023, doi: 10.1016/j.rser.2023.113799.
33. J. Chattopadhyay, T. S. Pathak, R. Srivastava, y A. C. Singh, «Catalytic co-pyrolysis of paper biomass and plastic mixtures (HDPE (high density polyethylene), PP (polypropylene) and PET (polyethylene terephthalate)) and product analysis», *Energy*, vol. 103, pp. 513-521, may 2016, doi: 10.1016/j.energy.2016.03.015.
34. O. J. Odejebi, A. A. Oladunni, J. A. Sonibare, and I. O. Abegunrin, «Oil yield optimization from co-pyrolysis of low-density polyethylene (LDPE), polystyrene (PS) and polyethylene terephthalate (PET) using simplex lattice mixture design», *Fuel Communications*, vol. 2-5, p. 100006, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.jfueco.2020.100006.