

The The pyrolysis methods in the transformation of wasteplastics for obtaining fuels, a literature review

Shandira Araceli Delgado Álvarez Bach.¹, Jeferson Antonio Flores Zúñiga, Bach.², Italo Treviño-Zevallos, Dr.³
^{1,2,3}Universidad Tecnológica del Perú (UTP), Av. Tacna y Arica 160, Arequipa, Perú, E23542@utp.edu.pe,
U18311379@utp.edu.pe, U18312489@utp.edu.pe

Abstract– Pyrolysis is a chemical method in which plastic waste decomposes at high temperatures (300-700 °C), generating gaseous, liquid and solid products. This systematic literature review evaluated the pyrolysis methodology to reduce environmental pollution caused by plastic waste. Search strategies were used and 50 were identified. Study analysis was carried out. on pyrolysis, revealed that Asia leads with 52%, Europe with 38% and 10%. North America Operating conditions, such as temperature, play a crucial role in the quality of final results achieved by products- The fixed bed pyrolysis technique is widely used to convert polyethylene waste into fuels. Various catalysts are used, the most used being the natural mineral zeolite, which improves the process by directing pyrolysis towards the preferential formation of short hydrocarbons and avoiding the generation of unwanted byproducts [29]. In addition, it makes it possible to operate in an optimal temperature range of 450-550°C, thus maximizing the yield of the desired liquid fraction in a range of 60 to 85% [58]. The combination of these catalytic effects together with the presence of the fixed bed leads to increased fuel production. The research highlighted that fixed bed pyrolysis, especially when complemented with zeolite as a catalyst, is presented as a highly effective strategy for the thermal decomposition process of plastics (PP) and (HDPE), favoring the formation of valuable fractions and avoiding the generation of unwanted by-products. This combination resulted in an optimization of the process, allowing operation in a specific temperature range to maximize the yield of the liquid fraction of interest. Highlighting its feasibility and effectiveness in generating fuel from polymer waste.

Keywords- Plastic waste, Pyrolysis, Chemical decomposition Thermochemical conversion, Fuel generation

Métodos de Pirólisis en la transformación de residuos plásticos para la obtención de combustibles, una revisión sistemática de literatura

Shandira Araceli Delgado Álvarez Bach.¹, Jeferson Antonio Flores Zúñiga, Bach.², Italo Treviño-Zevallos, Dr.³
^{1,2,3}Universidad Tecnológica del Perú (UTP), Av. Tacna y Arica 160, Arequipa, Perú, E23542@utp.edu.pe,
U18311379@utp.edu.pe, U18312489@utp.edu.pe

Resumen– La pirólisis es un método de degradación térmica en el cual las sustancias se descomponen a altas temperaturas en ausencia de oxígeno, generando productos gaseosos, líquidos y sólidos. Hoy en día constituye una herramienta fundamental en la reducción de la contaminación causada por residuos plásticos. En el presente trabajo, se evalúan los distintos tipos de metodología de pirólisis, empleadas en la obtención de combustibles. Para ello se realizó una búsqueda sistematizada de literatura mediante las metodologías PICO y PRISMA. Los resultados obtenidos revelan el predominio del continente asiático sobre las investigaciones en este campo con un 52% de los trabajos realizados, seguido por Europa con el 38% y América del Norte con un 10%. Así mismo, las condiciones operativas, como la temperatura, juegan un papel crucial en la calidad de los productos obtenidos, siendo necesario, en algunos casos el uso de catalizadores como la zeolita mineral. Por otra parte, la pirólisis de lecho fijo, cuando se complementa con zeolita como catalizador, representa una estrategia altamente efectiva para el proceso de descomposición térmica de los plásticos. Finalmente, las metodologías de pirólisis ofrecen un gran potencial de uso en la reducción de contaminación por materiales plásticos representando una tecnología prometedora hacia la sostenibilidad ambiental.

Palabras clave- Residuos plásticos, Pirólisis, Descomposición química, Conversión termoquímica, Generación de combustible.

I. INTRODUCCIÓN

Los plásticos son muy empleados en envases, embalajes y otros productos debido a su bajo costo, liviandad, resistencia y durabilidad [2]. No obstante, estos materiales Tienen la capacidad de perdurar en el entorno durante períodos prolongados tras su uso, lo que los convierte en contaminantes altamente perjudiciales [1]–[3]. Aproximadamente se producen anualmente más de 29000 toneladas de desechos plásticos. Sin embargo, apenas el 0.3% (alrededor de 90 toneladas) se reciclan mediante procesos mecánicos, siendo la gran mayoría de estos desechos los que acaban en vertederos, ríos o mares, fragmentándose lentamente [4]. Entre los desechos sólidos urbanos más abundantes, se destacan el polietileno (PE), el polietileno de alta densidad (HDPE), el polipropileno (PP) y el poliestireno (PS) como los plásticos más prevalentes. Específicamente, el PE y HDPE representan aproximadamente el 27% del total, equivalente a unas 7800 toneladas al año, únicamente de este tipo de polímero [1].

La acumulación descontrolada de estos desechos plásticos constituye un creciente problema ambiental con impactos

negativos cada vez más evidentes en los ecosistemas acuáticos, terrestres y en la salud pública. Este problema supone un riesgo para la salud humana y animal debido a la acumulación de sustancias tóxicas [1]. Además, menos del 1% de estos residuos plásticos son reciclados, lo que conlleva a la pérdida de materiales valiosos como el PE, HDPE, PP y PS que podrían ser recuperados, [3], [4].

Mientras no existan alternativas de aprovechamiento, la disposición final en vertederos o cuerpos de agua implica un derroche de los recursos contenidos en estos polímeros [1], [3]. Es urgente desarrollar y adoptar alternativas sostenibles para la adecuada gestión integral y valorización de los residuos plásticos. Se necesitan soluciones que permitan reducir su impacto ambiental negativo, pero también tecnologías limpias para recuperar y reutilizar estos materiales abundantes como fuente de energía [4]. Ante este panorama la pirólisis aparece como una tecnología prometedora en la transformación sostenible de los residuos plásticos, agregando valor a los materiales recuperados ya que consiste en un proceso termoquímico, que permite craquear los polímeros en moléculas más simples y obtener así productos de alto interés como gases, químicos valiosos y combustibles líquidos [2], [4].

Considerando lo anteriormente expuesto y la importancia que poseen los combustibles en la vida diaria de la población, en el presente trabajo se busca sintetizar la información disponible sobre las metodologías de pirólisis y la obtención de este producto, se busca también determinar el potencial impacto de la pirólisis en la reducción significativa de la contaminación ambiental ofreciendo así una visión más completa y precisa de su efectividad en la gestión ambiental y su relevancia para promover prácticas sostenibles en la minimización de los residuos plásticos.

II. METODOLOGIA

Se realizó una revisión sistemática de literatura (RSL) basada en un enfoque cualitativo, incluyendo la evaluación y comparación de diferentes técnicas de pirólisis para convertir residuos de plástico en combustible. Esta elección se justifica por la necesidad de recopilar información descriptiva y cualitativa sobre estos métodos, con el fin de determinar cuál de ellos es el más efectivo en este proceso. Para llevar a cabo

esta RSL, se implementó la estrategia PICO formulando la siguiente pregunta ¿Cómo la pirólisis sirve en la solución de la contaminación y cuál es su eficacia en la transformación de los residuos plásticos a combustible?

Esto facilitó la creación la fórmula ("Environmental pollution" OR "Plastic Waste" OR "Environmental impact" OR "Plastic pollution" OR "Plastic waste" OR "Harmful plastic" OR "Harmful plastic" OR "Plastic crisis" AND "Pyrolysis methodology" OR "Chemical decomposition" OR "thermochemical conversion" OR "Thermochemical transformation" OR "thermal decomposition" OR "Recycled plastic" OR "Plastic decomposition" OR "Plastic pyrolysis" OR "Plastic conversion" OR "Plastic decomposition" OR "Recycled polymers" AND "Fuel production" OR "Fuel liquid" OR "Gasoline production" OR "Plastic gasoline" OR "Fuel" OR "Gasoline manufacturing" OR "Recycled gasoline" OR "Plastic gasoline" OR "Sustainable fuel" OR "Sustainable gasoline" OR "Biofuel generation" OR "clean fuel" OR "Plastic biofuel" OR "Fuel manufacturing" OR "Fuel generation"), la cual fue empleada en la búsqueda de información pertinente en la base de datos SCOPUS debido a su extensa cobertura de documentos indexados.

Los trabajos obtenidos en dicha base (372 trabajos) fueron posteriormente procesados mediante la metodología PRISMA, considerando los siguientes criterios de inclusión (CI) y exclusión (CE):

- CI1: Artículos relacionado a la transformación de residuos de plásticos aplicando el proceso de pirólisis.
- CI2: Artículos en idioma inglés o español.
- CI3: Se incluirán trabajos realizados en el periodo 2018-2023.
- CI4: Artículos de acceso libre.
- CE1: Se excluirán los artículos publicados en fechas menores a 2018.
- CE2: Se excluirán trabajos publicados en idiomas distintos al inglés o español.
- CE3: Se excluirán trabajos que no aborden el tema de investigación.
- CE4: Se excluirán artículos sin acceso abierto.

Tras este proceso se obtuvo un total de 50 artículos seleccionados los cuales cumplían de manera estricta con los criterios establecidos. Dicha selección se documentó en un diagrama de flujo (fig. 1), lo que proporciona una representación visual que muestra de manera efectiva los pasos utilizados.

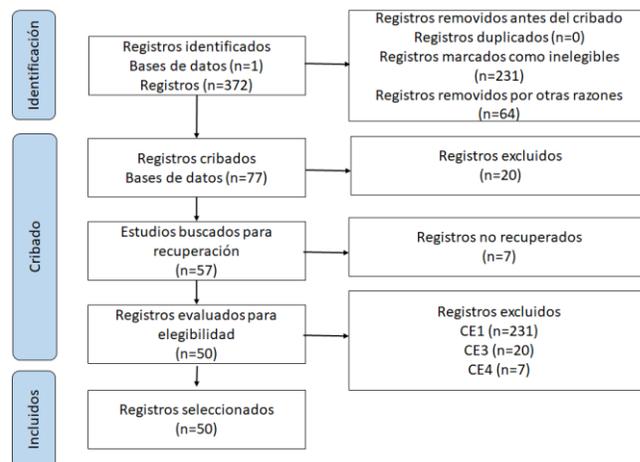


Fig. 1 Diagrama de flujo de Prisma de trabajos analizados.

III. RESULTADOS

La pirólisis, se destaca por su eficacia en transformar los materiales plásticos en productos valiosos, como combustibles líquidos o gaseosos, así como diversos compuestos químicos. Su contribución a la gestión sostenible de residuos y la producción de recursos útiles ha sido respaldada por numerosos estudios científicos llevados a cabo en diferentes lugares del mundo, principalmente en tres puntos clave: Europa, Asia y América del Norte, constituyendo una panorámica global de la aplicabilidad de esta tecnología.

Los datos obtenidos revelan una distribución significativa en la cantidad de estudios de pirólisis llevados a cabo en diferentes continentes como se muestra en la Fig. 2. Se observa que el continente asiático lidera con un 52% de las publicaciones recopiladas. Esta preeminencia se asocia con países como China, Corea del Sur, Indonesia, India, Malasia, Taiwán, Singapur e Irak, mostrando un compromiso sustancial en la exploración y aplicación de la pirólisis. Por otro lado, Europa representa el 38% de los estudios, con una presencia considerable en naciones como Austria, España, Eslovenia, Francia, entre otros, evidenciando una participación diversificada en el desarrollo de esta tecnología. En contraste, América del Norte muestra una menor presencia con el 10% de los estudios, implicando a países como Canadá y Estados Unidos, señalando una contribución más limitada en comparación con los otros continentes.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

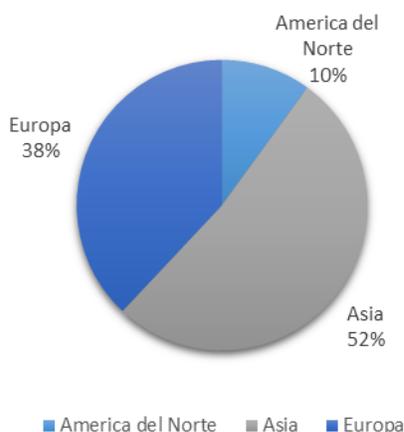


Fig. 2 Participación Geográfica de estudios de Pirólisis

El proceso de pirólisis se ve significativamente afectada por las variadas características químicas y físicas de los distintos tipos de plásticos, como su estructura molecular y densidad. Estas diferencias impactan en la eficiencia de la descomposición y la calidad de los productos resultantes. Además, las condiciones de operación (Tabla 1), también son críticas para determinar la calidad de los productos finales que se obtienen, ya que estos factores son esenciales para optimizar y/o mejorar la transformación mediante calor. La temperatura en este sentido, desempeña un papel fundamental, en la variedad y cantidad de productos obtenidos, mientras más elevada sea, se produce una mayor cantidad de productos gaseosos con composiciones más complejas y, cuanto menor sea, la eficiencia disminuye, y se obtiene una menor cantidad.

CONDICIONES DE OPERACIÓN QUE AFECTAN EL PROCESO DE PIRÓLISIS

Condiciones de operación	Influencia	Referencia
Temperaturas altas (500-700 °C)	Se produce una mayor descomposición de los residuos plásticos, generando una mayor cantidad de productos gaseosos (gas de síntesis). Estos productos suelen tener una composición más compleja. También pueden formarse productos líquidos, como alquitrán y aceites y a temperaturas mayor de 600°C se obtiene coque.	[5]–[6]
Temperaturas medias (Rango 400-500 °C)	Se logra una descomposición más completa de los polímeros, lo que resulta en una mayor producción de productos de valor añadido en forma de líquidos y sólidos (aceite de pirólisis, coque de pirólisis y residuos sólidos).	[7]–[9]
Temperaturas bajas (Rango de Temperaturas:	La descomposición de los residuos plásticos es menos eficiente a temperaturas bajas, y se obtiene una menor cantidad	[10], [11]

Menos de 400 °C)	de productos líquidos y gaseosos.	
Velocidad de reacción	Rapidez con la que ocurren las transformaciones químicas.	[12][13] [14], [15]
Velocidad de calentamiento	Velocidad a la que se aumenta la temperatura de la muestra de plástico durante la pirólisis.	[13], [16], [17]
Presión	Es la fuerza ejercida sobre los materiales en el sistema.	[16][5], [18][19]
Tiempo de residencia	Tiempo en que un material de plástico permanece dentro del reactor de pirólisis antes de ser recogido como producto.	[12], [20], [21][6], [11], [22]–[24]
Tiempo de reacción	Tiempo durante el cual los materiales de plástico se someten a la temperatura y las condiciones de reacción.	[8], [15], [25]–[27]
Flujo de gas	Se refiere a la cantidad y la velocidad a la que se suministra un gas como nitrógeno, hidrógeno o vapor.	[11], [17], [23], [28], [29]
Tamaño de partícula	Tamaño de las partículas de plástico utilizadas ya que puede influir en velocidad de reacción, la eficiencia y la calidad.	[10], [18], [25], [30]–[32]

El polietileno (PE) y el polietileno de alta densidad (HDPE) son dos de los polímeros más utilizados, en gran parte debido a su presencia masiva en los residuos sólidos urbanos [33]. Sus propiedades químicas y físicas los hacen ideales para la pirólisis, ya que ambos poseen una estructura simple de cadenas hidrocarbonadas sin grupos funcionales, lo que facilita su descomposición térmica y tienen un alto contenido de partículas de carbono e hidrógeno que les confiere un elevado poder calorífico, lo que lo convierte en un material adecuado para la generación de productos de alto valor [15], [34].

Existen diversos métodos experimentales para llevar a cabo la Pirólisis donde, cada método tiene sus propias ventajas y desventajas, lo que brinda flexibilidad en la elección de la técnica más adecuada para un propósito específico. En la Tabla II se presenta una definición de algunas metodologías aplicadas y los estudios de referencia.

METODOLOGÍAS DE PIRÓLISIS

Metodología de Pirólisis	Definición	Referencia
Co-pirólisis	Combina dos o más tipos de residuos de plástico para ser pirolíticos.	[32]
Pirólisis de tipo pistón	Proceso que implica la descomposición térmica del material en un reactor con movimiento alternativo similar al de un pistón	[35]
Pirólisis catalítica	Implica la utilización de un catalizador para acelerar la descomposición de los materiales a temperaturas más bajas.	[5], [13], [22], [36], [33], [37], [38], [39]

Pirólisis catalítico continua	Proceso en el que los residuos, como los plásticos, se descomponen en productos químicos más simples en presencia de un catalizador, de manera continua y sin interrupciones.	[13]
Pirólisis catalítica rápida	Proceso que implica la descomposición térmica de materiales, en presencia de un catalizador a altas temperaturas y tiempos de residencia muy cortos.	[32]
Pirólisis catalítica no	Proceso de descomposición térmica de materiales en ausencia de oxígeno y sin la adición de un catalizador específico.	[5][34]
Pirólisis Lecho fijo	Se lleva a cabo en un recipiente cerrado en ausencia de oxígeno o en una atmósfera con una cantidad muy limitada de oxígeno.	[12][16] [20][28] [40][33][41][39], [42][27], [7]
Pirólisis de Lecho Fluidizado	Los residuos de plásticos se calientan en un recipiente en el que se hace circular un gas a temperaturas elevadas en ausencia de oxígeno.	[16][10] [43][25] [23][29] [9][39], [28]
Pirólisis estática	Se lleva a cabo en un sistema cerrado o estático, donde los materiales son sometidos a descomposición térmica en ausencia de oxígeno sin ningún tipo de movimiento o agitación.	[10]
Pirólisis en fase supercrítica	Combina la pirólisis con las propiedades de un fluido supercrítico	[10]
Pirólisis térmica	Se basa en la aplicación de calor para la descomposición de los plásticos en sus componentes básicos.	[12][22], [37]
Pirólisis convencional	En este proceso, los materiales se descomponen en productos más simples, como gases, líquidos y sólidos.	[36]
Pirólisis flujo continuo	Proceso que implica la descomposición térmica de materiales en un flujo constante a través de un reactor diseñado específicamente.	[44]

En la literatura analizada destaca la pirólisis de lecho una metodología ampliamente aplicada en investigaciones para la transformación de residuos de polietileno (PE) y polietileno de

alta densidad (HDPE) en combustibles [7], [12], [16], [20], [27], [33], [39]–[42]. En este proceso la operación comienza con el pretratamiento, en el cual los residuos se someten a la trituración y molienda con el objetivo principal de obtener partículas de tamaño regular en milímetros (mm) y así mejorar la distribución uniforme de calor y la consistencia en la alimentación [7], [8], [10], [15]–[18], [20], [27], [31], [32], [35], [38], [42], [44]–[48]. Este paso de trituración es esencial, ya que aumenta el área superficial de los residuos y a cuanto mayor sea la superficie de reacción, más rápida y eficaz será la reacción de termólisis de los polímeros, lo que acelera el proceso y mejora la calidad de los productos finales [19]. En algunos casos, antes de verter los residuos en el reactor, es común llevar a cabo una etapa de secado de las partículas porque la humedad puede tener un impacto negativo en la eficiencia ya que se evapora a temperaturas más bajas que las requeridas para la descomposición térmica, lo que significa que una parte significativa del calor suministrado se gasta inicialmente en eliminar la humedad [13], [19], [32], [34], [49]. Una vez que los plásticos triturados están listos, se alimentan de forma continua al reactor de pirólisis a una velocidad constante que contribuye a una mayor eficiencia al evitar fluctuaciones en la producción. Esto se logra mediante un sistema de alimentación que garantiza un flujo uniforme de los residuos plásticos hacia el reactor [21], [50].

Por otra parte, para mejorar y optimizar el proceso de pirólisis, se recurre a una amplia variedad de catalizadores que pueden desempeñar roles distintos en función del producto deseado ya que estos tienen la capacidad de facilitar y/o acelerar la transformación térmica de los materiales, lo que a su vez permiten operar a temperaturas más bajas y tiempos de residencia más cortos. La elección del reactivo catalítico adecuado puede ejercer un impacto significativo en la selectividad de productos, la velocidad de reacción y, en última instancia, la eficiencia. Entre los catalizadores más utilizados destaca la zeolita mineral natural siendo utilizadas en el 18% de los trabajos revisados, mientras el 6% no utilizo ninguno, tal como se evidencia en la Fig. 3.

Distribucion Porcentual de Uso de Catalizadores



Fig. 3 Distribución porcentual de uso de catalizadores del total de literatura analizada.

La zeolita actúa como un catalizador heterogéneo disperso en el lecho, acelerando las reacciones de craqueo térmico (ruptura selectiva de enlaces en las largas cadenas poliméricas) de los vapores producidos orientando la pirólisis hacia la formación de hidrocarburos cortos y evitando la producción de subproductos indeseables como el coque, entre otros [51]–[56]. Además, permite trabajar en un intervalo óptimo de temperatura de 450-550°C para maximizar el rendimiento de la fracción líquida de interés entre 60-85% [55]. La acción combinada de estos efectos catalíticos y del lecho fijo resultan en una mayor producción de combustibles [51], [53], [55], [57].

La reutilización de los residuos plásticos PE y HDPE mediante un proceso optimizado representa una solución prometedora para la gestión de desechos y la producción de recursos renovables. Al emplear esta tecnología es posible transformar dichos materiales de escaso valor en productos energéticos, logrando obtener rendimientos entre 60-85% de fracciones valiosas que consiste principalmente en una mezcla de hidrocarburos como parafinas y olefinas [52], [58]–[60]. La factibilidad de la técnica es promisoría para recuperar los componentes intrínsecos en los polímeros desechados y reutilizarlos en aplicaciones sustentables que, en caso contrario, de no ser aplicada correctamente podría conllevar beneficiar a la contaminación del aire, agua y suelo generando subproductos no deseados como compuestos orgánicos volátiles (COV), halogenados (HOC), dioxinas, furanos y algunos otros metales pesados [55], [57], [61]–[71]. También para mitigar dichos subproductos se realizan diferentes métodos de reciclaje como la incineración, enterramiento, compostación, gasificación, encapsulación, reciclaje mecánico y químico [51], [58], [62], [72]–[77]. De esta manera, la pirólisis representa una alternativa prometedora tanto para la gestión eco-amigable de los crecientes volúmenes de residuos plásticos, como para la producción de energía renovable.

IV. DISCUSIÓN

La metodología de pirólisis más utilizada en los estudios analizados fue el método de lecho fijo (LF), el cual es aplicado para la transformación de residuos de polietileno (PE) y polietileno de alta densidad (HDPE) en combustibles. En dicho método, el proceso inicia con un pretratamiento donde los residuos plásticos son sometidos a trituración y molienda, obteniéndose así partículas pequeñas y regulares que mejoran la distribución uniforme del calor y mantienen una alimentación consistente al reactor en un rango de temperatura de 450-550°. Durante este proceso, los materiales se descomponen en productos gaseosos y líquidos (combustibles). Sin embargo, existen otros diferentes métodos para llevar a cabo esta técnica [15], [18], [20]. Como el de

lecho Fluidizado, que, a diferencia del otro, este consiste en la circulación de gas (aire o vapor) a través de partículas de plástico triturado, lo que permite la descomposición de residuos plásticos comunes como el (PE), (PP) y (PS) a temperaturas que oscilan entre los 400 y 500 °C [38], [48], [52]. Destacando que esta transferencia de calor no perjudica el proceso de incineración de los residuos, pero sí influye en la disminución de la cantidad de productos finales obtenidos tras el proceso [36]. Además, tiene la capacidad para generar una menor cantidad de residuos sólidos, y generar una reducción de subproductos no deseados, como el carbón y el coque [48].

Un segundo método que también se aplica en diferentes estudios es la pirólisis estática o lenta que implica la descomposición térmica de residuos en ausencia de oxígeno, a temperaturas bajas de 300 a 400°C, durante un tiempo prolongado de aproximadamente 2 horas. En contraste, el método de Lecho Fijo tiene una descomposición térmica más rápida, a temperaturas de 450 a 550°C. Esta variación en la temperatura se debe a la reducción del calentamiento del reactor a niveles más bajos, y esta disminución en la velocidad de descomposición afecta la incineración de plásticos y reduce la producción de productos finales, como la gasolina [38].

En las distintas metodologías de pirólisis se emplean diferentes tipos de catalizadores ya que estos controlan la temperatura, reducen la energía necesaria y previenen la degradación excesiva, disminuyendo la generación de subproductos no deseados como alquitrán y coque. Así mismo, mejoran la selectividad de los productos obtenidos, como la gasolina [49]. El catalizador de Zeolita natural (ZN) es un mineral poroso que tiene la capacidad de adsorber y de sorber moléculas, además de ser un material estable y resistente a altas temperaturas, que permite su reutilización en múltiples ciclos de reacción [56]. Y su uso en el reactor de LF permite mejorar la eficiencia del proceso al acelerar las reacciones químicas, ya que a medida que se calienta el reactor, los desechos de plásticos se descomponen en productos líquidos, gaseosos o sólidos [61], [49]. En comparación al catalizador de Zeolita ZSM-5, que ha sido aplicado en diversos estudios, cumple la misma función que la ZN, sin embargo, su composición es diferente ya que es sintética, utilizado básicamente en diversas reacciones químicas, como la producción de biodiesel, entre otros [56].

Los residuos plásticos representan un grave problema ambiental por sus consecuencias negativas sobre ecosistemas y salud pública. Sin embargo, la evidencia sugiere que su reutilización mediante pirólisis es una alternativa prometedora y positiva, ya que los productos derivados de la aplicación de este método como combustibles líquidos y otros compuestos valiosos podrían aprovecharse como fuentes de energía renovable o materias primas, contribuyendo así al reciclaje energético y reduciendo la dependencia de los combustibles fósiles [63], [65]. Adicionalmente, al darle valor a estos

residuos mediante su transformación, se lograría disminuir los volúmenes que terminan contaminando el ambiente. En este sentido la pirólisis puede representar una mejor alternativa frente a otros métodos de tratamiento de residuos plásticos (PE – HDPE), como la incineración y el enterramiento, que han demostrado no ser opciones tan viables ni beneficiosas porque generan impactos negativos sobre los ecosistemas.

V. CONCLUSIÓN

Los resultados muestran que la pirólisis de lecho fijo es la metodología más ampliamente utilizada y eficiente para la descomposición térmica de polietileno (PE) y polietileno de alta densidad (HDPE), logrando rendimientos del 60-85% en fracciones valiosas como hidrocarburos que pueden ser aprovechados como combustibles. La literatura denota que la incorporación de zeolita como catalizador en el lecho de pirólisis mejora significativamente el craqueo térmico de los vapores poliméricos, orientando selectivamente las reacciones hacia la formación de fracciones livianas y evitando la producción de subproductos no deseados. Su acción en combinación con el lecho fijo resulta en la optimización del proceso, permitiendo operar en un rango óptimo de temperatura de 450-550°C para maximizar el rendimiento de la fracción líquida de interés.

REFERENCIAS

- [1] W. Ramos y V. Pretell, «Obtaining Liquid Fuels from High Density Polyethylene Waste | Obtención de Combustibles Líquidos a Partir de Residuos de Polietileno de Alta Densidad», en Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology, 2021. doi: 10.18687/LACCEI2021.1.1.94.
- [2] W. Ramos, R. Silva, y V. Pretell, «Catalytic pyrolysis of high-density polyethylene residues using FCC equilibrium catalyst | Pirólisis Catalítica de Residuos de Polietileno de Alta Densidad Usando Catalizador de Equilibrio de FCC», en Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology, 2020. doi: 10.18687/LACCEI2020.1.1.105.
- [3] W. Ramos y V. Pretell, «Optimization and Characterization of Liquid Fuels Obtained from Catalytic Pyrolysis of Plastic Waste | Optimización y Caracterización de Combustibles Líquidos Obtenidos a partir de la Pirólisis Catalítica de Residuos Plásticos», en Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology, 2021. doi: 10.18687/LACCEI2021.1.1.95.
- [4] W. Ramos, V. Zamudio, E. Villegas, H. Manrique, y V. Pretell, «Pyrolysis of Expanded Polystyrene Waste to Obtain Liquid Fuels | Pirólisis de Residuos de Poliestireno Expandido para la Obtención de Combustibles Líquidos», en Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology, 2022. doi: 10.18687/LACCEI2022.1.1.353.
- [5] R. Pan, B. G. Lougou, Y. Shuai, y G. Debenest, «A multidimensional numeric study on smoldering-driven pyrolysis of waste polypropylene», Process Safety and Environmental Protection, vol. 172, pp. 305-316, abr. 2023, doi: 10.1016/j.psep.2023.02.018.
- [6] M. Zhang et al., «Numerical investigation on the heat transfer of plastic waste pyrolysis in a rotary furnace», Chemical Engineering Journal, vol. 445, oct. 2022, doi: 10.1016/j.cej.2022.136686.
- [7] V. Sharma et al., «Plastic waste to liquid fuel: A review of technologies, applications, and challenges», Sustainable Energy Technologies and Assessments, vol. 53, oct. 2022, doi: 10.1016/j.seta.2022.102651.
- [8] L. Quesada, A. Pérez, V. Godoy, F. J. Peula, M. Calero, y G. Blázquez, «Optimization of the pyrolysis process of a plastic waste to obtain a liquid fuel using different mathematical models», Energy Convers Manag, vol. 188, pp. 19-26, may 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.03.054.
- [9] M. Tomar, A. Jain, P. C. Pujari, H. Dewal, y N. Kumar, «Potentials of waste plastic pyrolysis oil as an extender fuel for diesel engine», Arabian Journal of Geosciences, vol. 13, n.o 13, jul. 2020, doi: 10.1007/s12517-020-05574-6.
- [10] S. Papari, H. Bamdad, y F. Berruti, «Pyrolytic conversion of plastic waste to value-added products and fuels: A review», Materials, vol. 14, n.o 10, may 2021, doi: 10.3390/ma14102586.
- [11] K. Kohli et al., «Pyrolytic Depolymerization Mechanisms for Post-Consumer Plastic Wastes †», Energies (Basel), vol. 15, n.o 23, dic. 2022, doi: 10.3390/en15238821.
- [12] Y. Cheng, E. Ekici, G. Yildiz, Y. Yang, B. Coward, y J. Wang, «Applied machine learning for prediction of waste plastic pyrolysis towards valuable fuel and chemicals production», J Anal Appl Pyrolysis, vol. 169, ene. 2023, doi: 10.1016/j.jaap.2023.105857.
- [13] N. Zhou et al., «Catalytic pyrolysis of plastic wastes in a continuous microwave assisted pyrolysis system for fuel production», Chemical Engineering Journal, vol. 418, ago. 2021, doi: 10.1016/j.cej.2021.129412.
- [14] H. Zhu et al., «Study on coupled combustion behaviors and kinetics of plastic pyrolysis by-product for oil», Energy, vol. 262, ene. 2023, doi: 10.1016/j.energy.2022.125452.
- [15] L. Quesada, M. Calero, M. A. Martín-Lara, A. Pérez, y G. Blázquez, «Characterization of fuel produced by pyrolysis of plastic film obtained of municipal solid waste», Energy, vol. 186, nov. 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.115874.
- [16] T. Xayachak, N. Haque, D. Lau, R. Parthasarathy, y B. K. Pramanik, «Assessing the environmental footprint of plastic pyrolysis and gasification: A life cycle inventory study», Process Safety and Environmental Protection, vol. 173, pp. 592-603, may 2023, doi: 10.1016/j.psep.2023.03.061.
- [17] P. K. Ghodke, A. K. Sharma, K. Moorthy, W. H. Chen, A. Patel, y L. Matsakas, «Experimental Investigation on Pyrolysis of Domestic Plastic Wastes for Fuel Grade Hydrocarbons», Processes, vol. 11, n.o 1, ene. 2023, doi: 10.3390/pr11010071.
- [18] T. S. Singh, T. N. Verma, y H. N. Singh, «A lab scale waste to energy conversion study for pyrolysis of plastic with and without catalyst: Engine emissions testing study», Fuel, vol. 277, oct. 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2020.118176.
- [19] L. S. Diaz-Silvarrey, A. McMahan, y A. N. Phan, «Benzoic acid recovery via waste poly(ethylene terephthalate) (PET) catalytic pyrolysis using sulphated zirconia catalyst», J Anal Appl Pyrolysis, vol. 134, pp. 621-631, sep. 2018, doi: 10.1016/j.jaap.2018.08.014.
- [20] M. Sigit Cahyono, A. Prasetya, y M. Syamsiro, «Combustion of plastic pyrolysis oil in steam-atomizing burner and its application for pyrolysis process», International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering, vol. 8, n.o 11, pp. 1488-1492, sep. 2019, doi: 10.35940/ijitee.J9855.0981119.
- [21] M. Constantinescu et al., «From plastic to fuel - New challenges», Materiale Plastice, vol. 56, pp. 721-729, 2019, doi: 10.37358/mp.19.4.5259.
- [22] S. Parrilla-Lahoz et al., «Materials challenges and opportunities to address growing micro/nanoplastics pollution: a review of thermochemical upcycling», Materials Today Sustainability, vol. 20, dic. 2022, doi: 10.1016/j.mtsust.2022.100200.
- [23] P. Tripathi y L. Rao, «Pyrolysis and combustion kinetics of refuse derived fuel having different plastic ratio», Bioresour Technol Rep, vol. 23, sep. 2023, doi: 10.1016/j.biteb.2023.101559.
- [24] S. Wang et al., «Experimental investigation of plastic waste pyrolysis fuel and diesel blends combustion and its flue gas emission analysis in a 5

- kW heater», *Energy*, vol. 247, may 2022, doi: 10.1016/j.energy.2022.123408.
- [25] F. Abnisa, S. D. A. Sharuddin, M. F. bin Zaniil, W. M. A. W. Daud, y T. M. I. Mahlia, «The yield prediction of synthetic fuel production from pyrolysis of plastic waste by Levenberg-Marquardt approach in feedforward neural networks model», *Polymers (Basel)*, vol. 11, n.o 11, nov. 2019, doi: 10.3390/polym11111853.
- [26] M. Maniscalco et al., «Slow pyrolysis of an LDPE/PP mixture: Kinetics and process performance», *Journal of the Energy Institute*, vol. 96, pp. 234-241, jun. 2021, doi: 10.1016/j.joei.2021.03.006.
- [27] R. Pan, J. V. F. Duque, y G. Debenest, «Investigating Waste Plastic Pyrolysis Kinetic Parameters by Genetic Algorithm Coupled with Thermogravimetric Analysis», *Waste Biomass Valorization*, vol. 12, n.o 5, pp. 2623-2637, may 2021, doi: 10.1007/s12649-020-01181-4.
- [28] S. Armenise et al., «Plastic waste recycling via pyrolysis: A bibliometric survey and literature review», *J Anal Appl Pyrolysis*, vol. 158, sep. 2021, doi: 10.1016/j.jaap.2021.105265.
- [29] A. Pacheco-López, F. Lechtenberg, A. Somoza-Tornos, M. Graells, y A. Espuña, «Economic and Environmental Assessment of Plastic Waste Pyrolysis Products and Biofuels as Substitutes for Fossil-Based Fuels», *Front Energy Res*, vol. 9, jun. 2021, doi: 10.3389/feeng.2021.676233.
- [30] D. Lee et al., «Characteristics of fractionated drop-in liquid fuel of plastic wastes from a commercial pyrolysis plant», *Waste Management*, vol. 126, pp. 411-422, may 2021, doi: 10.1016/j.wasman.2021.03.020.
- [31] R. Krzywdy y B. Wrzesińska, «Simulation of the Condensation and Fractionation Unit in Waste Plastics Pyrolysis Plant», *Waste Biomass Valorization*, vol. 12, n.o 1, pp. 91-104, ene. 2021, doi: 10.1007/s12649-020-00994-7.
- [32] J. Wang et al., «Converting polycarbonate and polystyrene plastic wastes into aromatic hydrocarbons via catalytic fast co-pyrolysis», *J Hazard Mater*, vol. 386, mar. 2020, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121970.
- [33] J. Z. X. Heng et al., «Unraveling the catalytic activity of CaClOH-rich incineration fly ash in the pyrolysis of single-use plastics», *Mater Today Chem*, vol. 31, jul. 2023, doi: 10.1016/j.mtchem.2023.101608.
- [34] R. K. Singh, B. Ruj, A. K. Sadhukhan, y P. Gupta, «Thermal degradation of waste plastics under non-sweeping atmosphere: Part 2: Effect of process temperature on product characteristics and their future applications», *J Environ Manage*, vol. 261, may 2020, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110112.
- [35] P. Murugesan et al., «Exploration of low heat rejection engine characteristics powered with carbon nanotubes-added waste plastic pyrolysis oil», *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 176, pp. 1101-1119, ago. 2023, doi: 10.1016/j.psep.2023.06.051.
- [36] B. Alawa, J. Choudhary, y S. Chakma, «Discernment of synergism in co-pyrolysis of HDPE and PP waste plastics for production of pyro-oil: Mechanistic investigation with economic analysis and health risk assessment», *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 169, pp. 107-131, ene. 2023, doi: 10.1016/j.psep.2022.10.077.
- [37] R. M. Khazaal y D. A. Abdulaaima, «Valuable oil recovery from plastic wastes via pressurized thermal and catalytic pyrolysis», *Energy Conversion and Management: X*, vol. 20, oct. 2023, doi: 10.1016/j.ecmx.2023.100430.
- [38] R. Xu et al., «Development of metal-doping mesoporous biochar catalyst for co-valorizing biomass and plastic waste into valuable hydrocarbons, syngas, and carbons», *Fuel Processing Technology*, vol. 227, mar. 2022, doi: 10.1016/j.fuproc.2021.107127.
- [39] A. Antelava et al., «Energy Potential of Plastic Waste Valorization: A Short Comparative Assessment of Pyrolysis versus Gasification», *Energy and Fuels*, vol. 35, n.o 5, pp. 3558-3571, mar. 2021, doi: 10.1021/acs.energyfuels.0c04017.
- [40] R. A. A. Nugroho, A. F. Alhikami, y W. C. Wang, «Thermal decomposition of polypropylene plastics through vacuum pyrolysis», *Energy*, vol. 277, ago. 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.127707.
- [41] K. Muthukumar y G. Kasiraman, «Downcycling of one-time used plastic waste to DICI engine combustion energy through pyrolysis with less NOx emission», *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 175, pp. 744-752, jul. 2023, doi: 10.1016/j.psep.2023.05.097.
- [42] V. L. Mangesh et al., «Green energy: Hydroprocessing waste polypropylene to produce transport fuels», *J Clean Prod*, vol. 276, dic. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124200.
- [43] S. Wang et al., «Drop-in fuel production with plastic waste pyrolysis oil over catalytic separation», *Fuel*, vol. 305, dic. 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2021.121440.
- [44] R. L. Ware, S. M. Rowland, J. Lu, R. P. Rodgers, y A. G. Marshall, «Compositional and Structural Analysis of Silica Gel Fractions from Municipal Waste Pyrolysis Oils», *Energy and Fuels*, vol. 32, n.o 7, pp. 7752-7761, jul. 2018, doi: 10.1021/acs.energyfuels.8b00596.
- [45] F. Abnisa, «Enhanced Liquid Fuel Production from Pyrolysis of Plastic Waste Mixtures Using a Natural Mineral Catalyst», *Energies (Basel)*, vol. 16, n.o 3, feb. 2023, doi: 10.3390/en16031224.
- [46] C. Wongkhorsub, W. Chaowasin, y K. Theinnoi, «Experimental Evaluation of Performance and Combustion Characteristics of Blended Plastic Pyrolysis Oil in Enhanced Diesel Engine», *Energies (Basel)*, vol. 15, n.o 23, dic. 2022, doi: 10.3390/en15239115.
- [47] M. Sekar, V. K. Ponnusamy, A. Pugazhendhi, S. Nižetić, y T. R. Praveenkumar, «Production and utilization of pyrolysis oil from solid plastic wastes: A review on pyrolysis process and influence of reactors design», *J Environ Manage*, vol. 302, ene. 2022, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.114046.
- [48] M. Sekar, T. R. Praveenkumar, V. Dhinakaran, P. Gunasekar, y A. Pugazhendhi, «Combustion and emission characteristics of diesel engine fueled with nanocatalyst and pyrolysis oil produced from the solid plastic waste using screw reactor», *J Clean Prod*, vol. 318, oct. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128551.
- [49] U. Žvar Bašković, T. Katrašnik, G. C. Faussone, M. Grile, y T. Seljak, «Ultra-low emission power generation utilizing chemically stabilized waste plastics pyrolysis oil in RCCI combustion concept», *J Environ Manage*, vol. 344, oct. 2023, doi: 10.1016/j.jenvman.2023.118711.
- [50] S. Das, C. Liang, y J. B. Dunn, «Plastics to fuel or plastics: Life cycle assessment-based evaluation of different options for pyrolysis at end-of-life», *Waste Management*, vol. 153, pp. 81-88, 2022, doi: 10.1016/j.wasman.2022.08.015.
- [51] Y. Cheng, E. Ekici, G. Yildiz, Y. Yang, B. Coward, y J. Wang, «Applied machine learning for prediction of waste plastic pyrolysis towards valuable fuel and chemicals production», *J Anal Appl Pyrolysis*, vol. 169, 2023, doi: 10.1016/j.jaap.2023.105857.
- [52] C. Wongkhorsub, W. Chaowasin, y K. Theinnoi, «Experimental Evaluation of Performance and Combustion Characteristics of Blended Plastic Pyrolysis Oil in Enhanced Diesel Engine», *Energies (Basel)*, vol. 15, n.o 23, 2022, doi: 10.3390/en15239115.
- [53] B. Alawa, J. Choudhary, y S. Chakma, «Discernment of synergism in co-pyrolysis of HDPE and PP waste plastics for production of pyro-oil: Mechanistic investigation with economic analysis and health risk assessment», *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 169, pp. 107-131, 2023, doi: 10.1016/j.psep.2022.10.077.
- [54] R. M. Khazaal y D. A. Abdulaaima, «Valuable oil recovery from plastic wastes via pressurized thermal and catalytic pyrolysis», *Energy Conversion and Management: X*, vol. 20, 2023, doi: 10.1016/j.ecmx.2023.100430.
- [55] M. Constantinescu et al., «From plastic to fuel - New challenges», *Materiale Plastice*, vol. 56, pp. 721-729, 2019, doi: 10.37358/mp.19.4.5259.
- [56] S. Parrilla-Lahoz et al., «Materials challenges and opportunities to address growing micro/nanoplastics pollution: a review of thermochemical upcycling», *Materials Today Sustainability*, vol. 20, 2022, doi: 10.1016/j.mtsust.2022.100200.
- [57] F. Abnisa, «Enhanced Liquid Fuel Production from Pyrolysis of Plastic Waste Mixtures Using a Natural Mineral Catalyst», *Energies (Basel)*, vol. 16, n.o 3, 2023, doi: 10.3390/en16031224.
- [58] H. Zhu et al., «Study on coupled combustion behaviors and kinetics of plastic pyrolysis by-product for oil», *Energy*, vol. 262, 2023, doi: 10.1016/j.energy.2022.125452.

- [59] R. A. A. Nugroho, A. F. Alhikami, y W.-C. Wang, «Thermal decomposition of polypropylene plastics through vacuum pyrolysis», *Energy*, vol. 277, 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.127707.
- [60] S. Wang et al., «Experimental investigation of plastic waste pyrolysis fuel and diesel blends combustion and its flue gas emission analysis in a 5 kW heater», *Energy*, vol. 247, 2022, doi: 10.1016/j.energy.2022.123408.
- [61] D. Lee et al., «Characteristics of fractionated drop-in liquid fuel of plastic wastes from a commercial pyrolysis plant», *Waste Management*, vol. 126, pp. 411-422, 2021, doi: 10.1016/j.wasman.2021.03.020.
- [62] S. Armenise et al., «Plastic waste recycling via pyrolysis: A bibliometric survey and literature review», *J Anal Appl Pyrolysis*, vol. 158, 2021, doi: 10.1016/j.jaap.2021.105265.
- [63] F. Abnisa, S. D. A. Sharuddin, M. F. bin Zamil, W. M. A. W. Daud, y T. M. I. Mahlia, «The yield prediction of synthetic fuel production from pyrolysis of plastic waste by Levenberg-Marquardt approach in feedforward neural networks model», *Polymers (Basel)*, vol. 11, n.o 11, 2019, doi: 10.3390/polym11111853.
- [64] A. Gala, D. Catalán-Martínez, M. Guerrero, y J. M. Serra, «Simulation-assisted design of a catalytic hydrogenation reactor for plastic pyrolysis fuels», *Fuel*, vol. 287, 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2020.119400.
- [65] L. Quesada, M. Calero, M. A. Martín-Lara, A. Pérez, y G. Blázquez, «Characterization of fuel produced by pyrolysis of plastic film obtained of municipal solid waste», *Energy*, vol. 186, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.115874.
- [66] K. Muthukumar y G. Kasiraman, «Downcycling of one-time used plastic waste to DICI engine combustion energy through pyrolysis with less NOx emission», *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 175, pp. 744-752, 2023, doi: 10.1016/j.psep.2023.05.097.
- [67] S. Wang et al., «Drop-in fuel production with plastic waste pyrolysis oil over catalytic separation», *Fuel*, vol. 305, 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2021.121440.
- [68] A. Antelava et al., «Energy Potential of Plastic Waste Valorization: A Short Comparative Assessment of Pyrolysis versus Gasification», *Energy and Fuels*, vol. 35, n.o 5, pp. 3558-3571, 2021, doi: 10.1021/acs.energyfuels.0c04017.
- [69] C. Mase et al., «Molecular Characterization of a Mixed Plastic Pyrolysis Oil from Municipal Wastes by Direct Infusion Fourier Transform Ion Cyclotron Resonance Mass Spectrometry», *Energy and Fuels*, vol. 35, n.o 18, pp. 14828-14837, 2021, doi: 10.1021/acs.energyfuels.1c01678.
- [70] M. Zhang et al., «Numerical investigation on the heat transfer of plastic waste pyrolysis in a rotary furnace», *Chemical Engineering Journal*, vol. 445, 2022, doi: 10.1016/j.cej.2022.136686.
- [71] M. Tomar, A. Jain, P. C. Pujari, H. Dewal, y N. Kumar, «Potentials of waste plastic pyrolysis oil as an extender fuel for diesel engine», *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 13, n.o 13, 2020, doi: 10.1007/s12517-020-05574-6.
- [72] M. Sigit Cahyono, A. Prasetya, y M. Syamsiro, «Combustion of plastic pyrolysis oil in steam-atomizing burner and its application for pyrolysis process», *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, vol. 8, n.o 11, pp. 1488-1492, 2019, doi: 10.35940/ijitee.J9855.0981119.
- [73] T. S. Singh, T. N. Verma, y H. N. Singh, «A lab scale waste to energy conversion study for pyrolysis of plastic with and without catalyst: Engine emissions testing study», *Fuel*, vol. 277, 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2020.118176.
- [74] N. Zhou et al., «Catalytic pyrolysis of plastic wastes in a continuous microwave assisted pyrolysis system for fuel production», *Chemical Engineering Journal*, vol. 418, 2021, doi: 10.1016/j.cej.2021.129412.
- [75] U. Žvar Bašković, T. Katrašnik, G. C. Faussone, M. Grilc, y T. Seljak, «Ultra-low emission power generation utilizing chemically stabilized waste plastics pyrolysis oil in RCCI combustion concept», *J Environ Manage*, vol. 344, 2023, doi: 10.1016/j.jenvman.2023.118711.
- [76] P. Tripathi y L. Rao, «Pyrolysis and combustion kinetics of refuse derived fuel having different plastic ratio», *Bioresour Technol Rep*, vol. 23, 2023, doi: 10.1016/j.biteb.2023.101559.
- [77] R. K. Singh, B. Ruj, A. K. Sadhukhan, y P. Gupta, «Thermal degradation of waste plastics under non-sweeping atmosphere: Part 2: Effect of process temperature on product characteristics and their future applications», *J Environ Manage*, vol. 261, 2020, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110112.