

Valorization of LDPE–PET Plastic Waste through Co-Pyrolysis: Synergistic Effects on Liquid Product Quality

Johnnathan Vilcapoma, MSc¹; Luz Acharte, Dr¹; Victor Pretell, Dr²; Williams Ramos, MSc²

¹Universidad Nacional de Huancavelica, Perú, johnnathan.vilcapoma@unh.edu.pe, luzacharte@unh.edu.pe

²Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, vpretellh@uni.edu.pe, wramosv@uni.edu.pe

Abstract– This research evaluates the valorization of low-density polyethylene (LDPE) and polyethylene terephthalate (PET) waste through co-pyrolysis to obtain liquid fuel. The study analyzed the influence of temperature (500–600 °C), particle size (5–20 mm), and operation time (2–3 h) in a fixed-bed reactor under an inert atmosphere. Results from individual pyrolysis indicated that LDPE achieved a maximum liquid fuel yield of 77.45% w/w at 600 °C, with 5 mm particles and 3 hours of operation. In contrast, PET pyrolysis did not generate significant liquid fuel, producing mostly carbonaceous solids (up to 68.25%) and oxygenated waxes due to its complex aromatic structure and high oxygen content. In co-pyrolysis (1:1 mixture), no liquid fuel was obtained, though waxes (2.38% w/w), gases (50.50% w/w), and solids (47.12% w/w) were produced. It is confirmed that the presence of PET inhibits liquid formation due to its thermal stability and tendency to fragment into gaseous compounds and heavy carboxylic acid. Nevertheless, a synergistic effect was identified where LDPE acted as a hydrogen donor, moderating PET acidity and facilitating the formation of a hybrid wax with aliphatic chains and oxygenated group. The study concludes that while the linear structure of LDPE favors its conversion, PET requires additional strategies, such as the use of catalysts, to improve liquid yield.

Keywords– co-pyrolysis, LDPE, PET, pyrolysis, fuels.

Valorización de Residuos Plásticos de LDPE–PET por Copirólisis: Efectos Sinérgicos sobre la Calidad del Producto Líquido

Johnnathan Vilcapoma, MSc¹; Luz Acharte, Dr¹; Víctor Pretell, Dr²; Williams Ramos, MSc²

¹Universidad Nacional de Huancavelica, Perú, johnnathan.vilcapoma@unh.edu.pe, luzacharte@unh.edu.pe

²Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, vpretellh@uni.edu.pe, wramosv@uni.edu.pe

Resumen— Esta investigación evalúa la valorización de residuos de polietileno de baja densidad (LDPE) y tereftalato de polietileno (PET) mediante copirólisis para la obtención de combustible líquido. El estudio analizó la influencia de la temperatura (500-600 °C), el tamaño de partícula (5-20 mm) y el tiempo de operación (2-3 h) en un reactor de lecho fijo bajo atmósfera inerte. Los resultados de la pirólisis individual indicaron que el LDPE alcanzó un rendimiento máximo de combustible líquido del 77.45 % m/m a 600 °C, con partículas de 5 mm y 3 horas de operación. La pirólisis del PET, al contrario, no generó combustible líquido significativo, produciendo mayoritariamente sólidos carbonosos (hasta 68.25 %) y ceras oxigenadas debido a su compleja estructura aromática y alto contenido de oxígeno. En la copirólisis (mezcla 1:1), no se obtuvo combustible líquido, pero sí ceras (2.38 % m/m), gases (50.50 % m/m) y sólidos (47.12 % m/m). Se confirma que la presencia del PET inhibe la formación de líquidos debido a su estabilidad térmica y tendencia a la fragmentación en compuestos gaseosos y ácidos carboxílicos pesados. No obstante, se identificó un efecto sinérgico donde el LDPE funcionó como donante de hidrógeno, moderando la acidez del PET y facilitando la formación de una cera híbrida con cadenas alifáticas y grupos oxigenados. Se concluye que, si bien la estructura lineal del LDPE favorece su conversión, el PET requiere estrategias adicionales, como el uso de catalizadores, para mejorar su rendimiento líquido.

Palabras clave— copirólisis, LDPE, PET, pirólisis, combustibles.

I. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, los desechos plásticos se han convertido en un problema ambiental global debido al incremento de la producción mundial de plástico, que creció de dos millones de toneladas en 1950 a 400 millones de toneladas al 2022 [1], [2], [3]. La distribución de la producción mundial de plástico, desde el 2017 al 2024, en algunas regiones del mundo se ha incrementado significativamente en comparación con otras que se han mantenido en el mismo porcentaje [4]. En América Latina, específicamente en México y Chile, el consumo de plástico es de más de 50 kg/habitante/año; en Brasil y Argentina, alrededor de 40 kg/habitante/año, y en Colombia y Perú los valores están por encima de 30 kg/habitante/año [5], [6].

En el Perú se generan aproximadamente 1.2 millones de residuos plásticos al año (MINAM) con proyección de crecimiento continuo; esto equivale a cerca de 886 t/día solo en Lima y Callao (46 % del total nacional). En el año 2022 se tiene que se han generado 230 629.87 t de residuos de PET y

98 184.65 t de residuos de LDPE; otros plásticos (HDPE, PP, PS, PVC y bolsas) suman más de 1 000 000 t de plásticos en total. Respecto al reciclaje de residuos plásticos, entre el 9–10 % del residuo plástico generado se recicla adecuadamente y el resto acabó en los mares, ríos y en la superficie terrestre; no se cuenta con un desglose por tipo de residuo plástico (PET o LDPE) ni por método de reciclaje específico (mecánico, químico, térmico) en las estadísticas oficiales abiertas, pero el reciclaje es mayoritariamente de tipo mecánico. La valorización total de residuos sólidos (incluyendo plásticos y otros materiales) fue de 249 407.25 t en 2024, con crecimiento respecto al 2023 [7], [8], [9], [10].

Los plásticos son polímeros artificiales compuestos por largas cadenas de hidrocarburos obtenidas de fuentes no renovables como el petróleo [3], [11]. Sus propiedades físicas y químicas los han convertido en materiales indispensables en la sociedad moderna: son materiales ligeros, versátiles, de alta resistencia, duraderos y de alto valor económico [12], [13], [14]. Además, por su estabilidad química y térmica, se los puede moldear en una infinidad de productos útiles, desde envases de alimentos hasta equipos médicos [3], [11]. Sin embargo, estas mismas propiedades de resistencia y durabilidad pueden ser una grave amenaza ambiental debido a su escasa biodegradabilidad [8], [13]. Los plásticos se consideran contaminantes persistentes porque permanecen durante siglos en el medio ambiente; por ejemplo, se estima que una botella de plástico requiere aproximadamente 450 años para degradarse [13], [15]. Esta longevidad, más una gestión deficiente de los residuos plásticos, ha originado una acumulación masiva en los vertederos y océanos, donde actualmente flotan más de 5 billones de fragmentos plásticos [11], [15]. Ello origina problemas ambientales devastadores. La fauna silvestre se ve afectada por la ingesta y el enredo en los desechos plásticos, lo que causa la muerte de millones de aves y especies marinas anualmente por bloqueos intestinales y asfixia [12], [13]. Asimismo, la fragmentación física del residuo genera microplásticos (partículas menores a 5 mm), que son ubicuos en el aire, suelo y agua, ingresando en la cadena alimentaria y transportando toxinas y metales pesados hacia los seres humanos [3], [6], [11]. Además, el ciclo de vida del plástico contribuye al calentamiento global mediante la emisión de gases de efecto invernadero y la lixiviación de químicos peligrosos, como el bisfenol A, que alteran los ecosistemas y afectan la salud pública [3], [12], [13].

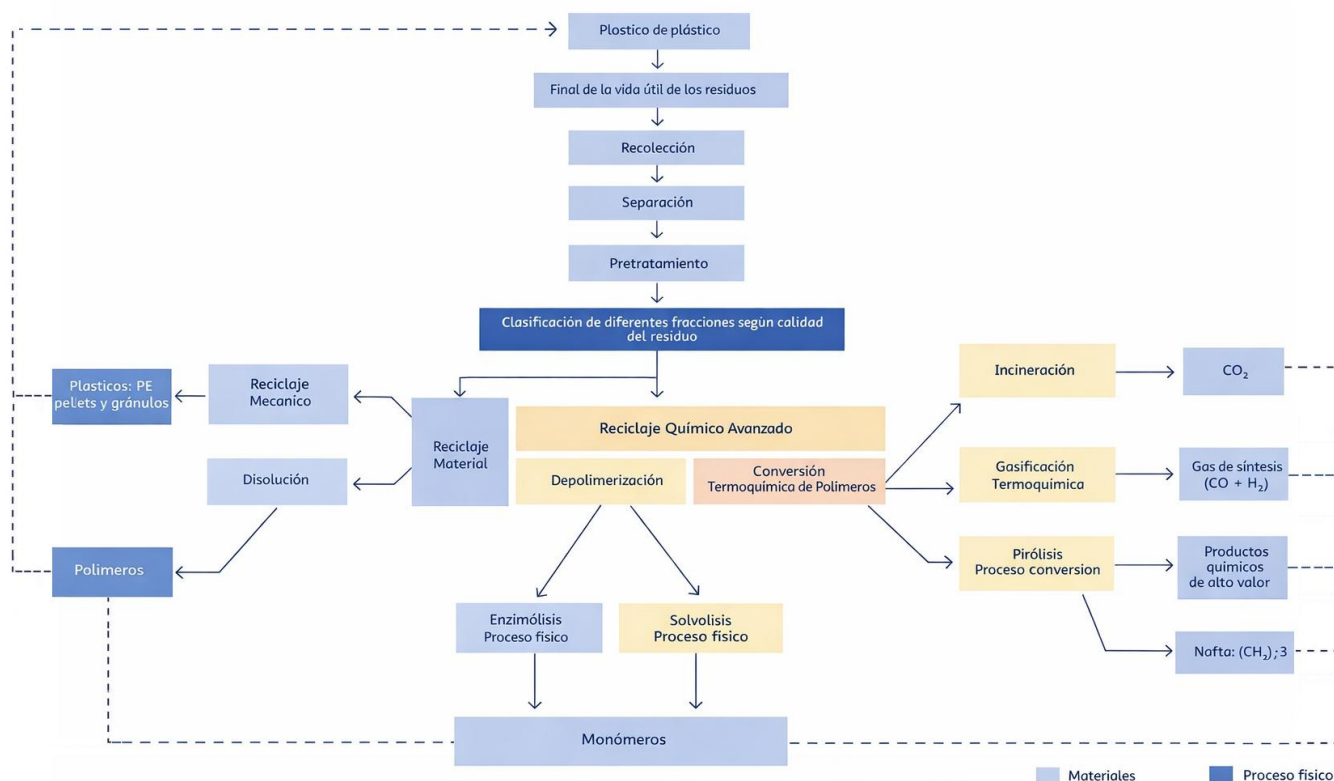


Fig. 1 Tecnologías de reciclaje de los residuos plásticos (adaptado de [16])

El impacto de los residuos plásticos sobre el planeta es inmenso y aún no los hemos cuantificado en toda su magnitud y por ello se requiere profundizar los medios de reciclaje para minimizar el daño en los ecosistemas.

En la Fig. 1 se muestra el esquema tecnológico que se puede aplicar para llevar a cabo el reciclaje de los residuos plásticos [16], [17]. Los residuos plásticos pueden ser dispuestos o reciclados; cuando son dispuestos, se envían a vertederos de residuos plásticos. Para el reciclaje, el proceso más extendido es el reciclaje mecánico, en el cual se transforman físicamente los plásticos post-consumo en gránulos o escamas que se emplean como materia prima para fabricar nuevos productos. La ventaja del proceso es su costo relativamente bajo y buena eficiencia energética; su principal desventaja es que requiere plásticos limpios y separados por tipo. El reciclaje químico es un conjunto de tecnologías emergentes como la pirólisis, gasificación, despolimerización, enzimólisis y solvólisis que descomponen el residuo plástico en sus componentes químicos básicos o en materias primas para otros procesos industriales. La recuperación energética (reciclaje térmico) consiste en la incineración con recuperación de energía [13], [18], [19].

La pirólisis de plásticos contribuye significativamente a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Ayuda a reducir los residuos sólidos plásticos (ODS 12), mejora la gestión eficiente de residuos en las ciudades (ODS 11) y protege los ecosistemas terrestres y marinos, mejorando la salud y la biodiversidad (ODS 15) [20]. La pirólisis puede

procesar plásticos contaminados que no son aptos por otros métodos de reciclaje, por lo que es una opción viable en regiones con altos volúmenes de residuos plásticos [21].

La pirólisis es un proceso termoquímico de craqueo que descompone térmicamente los materiales orgánicos, como la biomasa, o polímeros sintéticos en un ambiente libre de oxígeno [15], [19]. Definida como el fraccionamiento de hidrocarburos de cadena larga hacia moléculas de menor peso molecular mediante la aplicación de calor, la pirólisis transforma las materias primas en tres productos principales: bio-aceite o bio-crudo (líquido), bio-carbón o char (sólido) y bio-gas o gas de síntesis (gaseoso) [11], [15], [19], [22].

Los tipos principales de pirólisis se clasifican de acuerdo con sus condiciones de operación y según el producto que se desea obtener:

1) *Pirólisis lenta*: Se lleva a cabo a temperaturas moderadas (300-700 °C) y velocidades de calentamiento bajas con tiempos de residencia prolongados (de 10 a 100 minutos). Este método es el más eficiente para maximizar la producción de bio-carbón [11], [15].

2) *Pirólisis rápida*: Se usan altas velocidades de calentamiento y cortos tiempos de residencia de los vapores (segundos) para convertir los materiales en combustibles líquidos de manera económica y eficiente [11], [15].

3) *Pirólisis flash*: Ocurre a elevadas temperaturas (800-1000 °C) y con velocidades de calentamiento muy altas y tiempos de residencia de aproximadamente 0.5 segundos [11].

4) *Pirólisis catalítica*: Involucra el uso de catalizadores, como las zeolitas, para reducir la energía de activación del proceso, acelerar las reacciones y mejorar la calidad y selectividad de los hidrocarburos obtenidos [12], [15], [19].

5) *Copirólisis*: Consiste en procesar conjuntamente dos o más tipos de materias primas (por ejemplo, biomasa y plásticos), lo que genera interacciones sinérgicas que mejoran la cantidad y calidad del producto final en comparación con el procesamiento individual [11], [19].

Para que la pirólisis se lleve a cabo eficientemente, se requiere controlar varios parámetros operacionales. El más crítico es la temperatura, la cual determina la distribución de los productos; por ejemplo, altas temperaturas favorecen la producción de gases debido al craqueo secundario de los volátiles [14], [15]. La velocidad de calentamiento y el tiempo de residencia también son fundamentales, pues largos tiempos de residencia en el reactor permiten la ocurrencia de reacciones secundarias que generan alquitranes y carbón [11], [15], [11]. Asimismo, las propiedades de la materia prima, como su composición química, contenido de humedad y tamaño de partícula, influyen directamente en la transferencia de calor; por ello se prefieren tamaños de partículas por debajo de los 2 mm para asegurar un calentamiento homogéneo, aunque a escala de laboratorio se trabajan partículas menores a 5 cm [3], [11], [15], [14]. Finalmente, la atmósfera donde ocurre la pirólisis debe ser idealmente exenta de oxígeno para prevenir las reacciones de combustión, lo cual se consigue inyectando gas nitrógeno [15], [19], [22].

El proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) y polietileno de baja densidad (LDPE) produce rendimientos del 70-80 % de combustible líquido, siendo los factores de influencia la velocidad del calentamiento, la temperatura, el tiempo de procesamiento, el tipo de catalizador y el tipo de reactor [12]. En la pirólisis de residuos plásticos mixtos, polietileno de alta densidad (HDPE), polipropileno (PP) y poliestireno (PS); maximizando el rendimiento pirolítico, con temperaturas de 460–540 °C, tiempo de residencia de 30–150 min y tamaño de materia prima de 5–45 mm, produce un rendimiento de aceite líquido de 75.14 %, mostrando que la temperatura y el tiempo de residencia son los factores más influyentes, seguidos del tamaño de la materia prima [14]. En el estudio de pirólisis del polietileno de alta densidad (HDPE), la estructura del plástico se rompe a 380 °C sin oxígeno, logrando un rendimiento de 45.56 % de combustible, con porcentajes de gasolina (7.32 %), kerosene (32.90 %) y diésel (20.13 %) [23].

La pirólisis no catalítica del PET ocurre principalmente en reactores de lecho fijo, verticales u horizontales, aunque también se usan micro reactores acoplados a cromatógrafos o espectrómetros FTIR [24], [25]. Se reporta que la temperatura de pirólisis varía entre 500 °C y 700 °C para asegurar la descomposición de la materia prima; a mayores temperaturas se favorece la formación de gases [24], [26]. Asimismo, las velocidades de calentamiento empleadas están entre 10 °C/min y 20 °C/min [27], [24], y los tiempos de reacción, entre 20 y 60 minutos para los reactores de lecho fijo [28].

La pirólisis no catalítica del tereftalato de polietileno (PET) es un proceso de degradación térmica complejo que, debido a la estructura química del polímero y su alto contenido de oxígeno, genera principalmente productos gaseosos y residuos sólidos (ceras o carbón), con un rendimiento de aceite líquido generalmente bajo [24], [25]. Los rendimientos varían significativamente según la temperatura de operación y el diseño del proceso. Los productos gaseosos son una fracción considerable, con rendimientos entre el 35.50 % y el 53.40 % [25], [26]. Los gases principales son dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO) y bajas concentraciones de hidrocarburos gaseosos [25], [29]. El PET es difícil de convertir en aceite líquido de alta calidad en ausencia de catalizadores; a menudo produce una fracción de cera pesada que puede alcanzar hasta el 41.40 % a 500 °C [26]. El rendimiento de aceite líquido propiamente dicho suele ser bajo, situándose comúnmente entre el 2 % y el 24 % [24]. Estos líquidos contienen compuestos oxigenados como ácido benzoico y ácido tereftálico, además de cetonas y aldehídos [24], [30], [31]. El rendimiento de residuo sólido (char/residuo) es bastante alto, variando de un 5 % en condiciones optimizadas hasta un 49 % [24], [26]. Este residuo puede consistir en carbón aromático estable o subproductos de condensación, y en el caso de residuos, incluye materiales de relleno como SiO₂ [11], [29].

El objetivo de esta investigación es evaluar los efectos sinérgicos de la copirólisis Polietileno de baja densidad (LDPE) y el Tereftalato de Polietileno (PET) en la obtención de combustible líquido.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Materiales

Bolsas de polietileno de baja densidad (LDPE) y envases plásticos de tereftalato de polietileno (PET) fueron recolectados en la ciudad de Lircay, provincia de Angaraes, departamento de Huancavelica, según los puntos de muestreo indicados en la Tabla I. Las muestras se recogieron en bolsas plásticas y se trasladaron al centro de acopio del laboratorio de química de la Universidad Nacional de Huancavelica (UNH), filial Lircay. Durante la recolección, se siguieron protocolos estrictos para garantizar la integridad y representatividad de las muestras. Una vez en el laboratorio, las muestras se almacenaron hasta su preparación para el análisis.

TABLA I
PUNTOS DE MUESTREO EN LA CIUDAD DE LIRCAY

Punto	Latitud	Longitud	Altitud
Universidad Nacional de Huancavelica	-12.9967042	-74.7223261	3,276.3
Mercado-Lircay	-12.9938274	-74.7239466	3,277.0
Cuatro esquinas-Zona comercial	-12.9919817	-74.7235897	3,272.4
Plaza Andrés Acelino Cáceres	-12.9895833	-74.7203025	3,285.6
Terminal Terrestre-Lircay	-12.9875409	-74.7231023	3,259.4
Parque de Pueblo Viejo	-12.9830791	-74.7184405	3,329.8

B. Caracterización de las muestras

1) *Análisis próximo*: Se utilizó un analizador TGA 4000 (Perkin Elmer) y, de acuerdo con la norma ASTM D7582, se determinó el contenido de humedad, materia volátil, ceniza y carbono fijo. Se emplearon muestras de 10–20 mg con un tamaño de partícula de 500 μg . El ensayo se realizó inicialmente en atmósfera inerte con nitrógeno a 40 mL/min, calentando desde temperatura ambiente hasta 120 °C a 50 °C/min, seguida de una isoterma de 3 min. Luego se calentó de 120 °C a 950 °C a 100 °C/min y se enfrió hasta 450 °C a la misma velocidad. Para la determinación de ceniza, el nitrógeno se reemplazó por oxígeno a 40 mL/min y se calentó de 450 °C a 800 °C a 100 °C/min, seguido por una isoterma de 3 min. A partir del termograma se calcularon los contenidos de humedad, materia volátil, ceniza y carbono fijo.

2) *Análisis termogravimétrico*: La conducta térmica y estabilidad del LDPE y PET se analizaron empleando un analizador TGA 4000 de Perkin Elmer. Se efectuó en un rango de temperatura entre 30 °C y 900 °C, con una velocidad de calentamiento de 20 °C/min, en una atmósfera de nitrógeno con un flujo de 20 cm³/min. La muestra que se procesó tiene contenido de humedad menor al 10 % y se almacenó en un desecador un mínimo de doce horas antes de ser usada. Los datos obtenidos se procesaron con el software Pyris v 13.

3) *Análisis espectrométrico FTIR*: Se emplea para determinar la presencia de los grupos funcionales más importantes. Los espectros se obtuvieron en un espectrofotómetro FTIR Spectrum Two de Perkin Elmer. Los espectros se realizaron en un rango de número de onda de 450 a 4000 cm⁻¹ con resolución de 4 cm⁻¹ y 60 escaneos.

C. Procesamiento de la muestra

Con las protecciones necesarias de seguridad personal, se hizo la selección de las muestras de acuerdo con el tipo de residuo (bolsas y botellas). Se realizó el lavado y desinfección de las muestras con solución de hipoclorito de sodio al 5 % durante 5 min, y el secado a temperatura ambiente por 24 horas. Se procedió a la reducción de tamaño de las botellas, hasta un tamaño entre 5 y 20 mm; y las bolsas fueron comprimidas y almacenadas en bolsas grandes para el proceso de pirólisis.

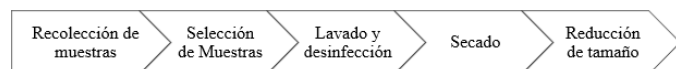


Fig. 2 Procesamiento de la muestra



Fig. 3 Selección y limpieza de LDPE y PET en el laboratorio de la UNH.

D. Diseño experimental

Inicialmente, se realizó la pirólisis del LDPE y PET por separado para hallar las mejores condiciones operativas; después se realiza la copirólisis del LDPE y el PET a esas condiciones.

1) *Pirólisis LDPE y PET*: Se estableció un diseño factorial de 2 niveles y 3 factores, destinado a evaluar los efectos y las interacciones de diferentes variables en el rendimiento de la pirólisis de dos tipos de plásticos: PET y LDPE. Se realizaron un total de 16 corridas experimentales, dividiéndose en 8 corridas para las muestras de PET y 8 corridas para las muestras de LDPE. Las variables independientes consideradas en el experimento fueron la temperatura, el tamaño de la muestra y el tiempo de operación. Para la temperatura, se establecieron dos niveles: 500 °C y 600 °C. El tamaño de la muestra se ajustó en dos rangos: de 0 a 5 mm y de 20 mm. Finalmente, el tiempo de operación también se evaluó en dos niveles, 2 y 3 horas. Cada combinación de estas variables se probó siguiendo un esquema factorial, permitiendo así la observación de efectos principales. Los datos obtenidos de estas corridas se analizaron posteriormente utilizando herramientas estadísticas para interpretar los efectos y significancias de cada factor.

E. Pirólisis a escala de laboratorio

La pirólisis se llevó a cabo en un reactor de lecho fijo vertical. En general, el equipo experimental consta de cuatro partes: el reactor tubular de acero inoxidable, horno eléctrico de 2.2 kW, controlador de temperatura con un sistema de control tipo PID, sistema de adquisición de datos y sistema de condensación y vacío. En la Fig. 4 se muestra un esquema del sistema experimental.

En cada ensayo, se mantuvieron constantes la presión del vacío en -0.66 bar. La velocidad de calentamiento se fijó en 3.5 °C/min y el sistema de condensación operó a una temperatura constante de 1.7 °C durante todos los ensayos.

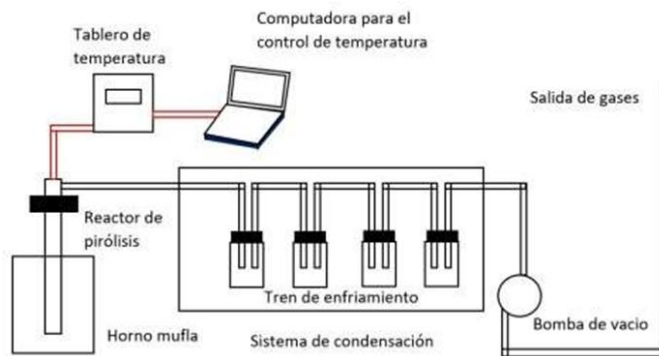


Fig. 4 Equipo de pirólisis.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Caracterización de la materia prima

1) *Análisis próximo*: En la Tabla II se muestran los resultados del análisis próximo del LDPE y PET. Se aprecia que el análisis próximo del LDPE concuerda con lo reportado en [32] respecto al contenido de humedad (0 %), pero difiere

ligeramente en el contenido de materia volátil porque en [32] se reporta 100 % y en esta investigación se obtiene 99.40 %, diferencia debida a la carga de aditivos porque el contenido de ceniza en este caso es 0.26 % y en [32] se reporta 0 %. En el caso del PET, también existe una ligera diferencia en todos los parámetros, posiblemente debido a que el PET de esta investigación es un residuo real y en [32] se trabajó con un polímero virgen.

TABLA II
RESULTADOS DEL ANÁLISIS PRÓXIMO

Parámetro	Análisis Próximo (%)	
	LDPE	PET
Humedad	0	0
Materia volátil	99.44	91.82
Ceniza	0.26	0
Carbono fijo	0.30	8.18

2) *Análisis termogravimétrico*: En las Figs. 5 y 6 se muestra el termograma del LDPE y el PET y la DTG de ambos polímeros. La curva TGA del LDPE tiene una pérdida de masa prácticamente nula hasta $\sim 350\text{--}380^\circ\text{C}$, lo que indica ausencia de humedad y alta estabilidad térmica inicial. La degradación ocurre en una sola etapa principal, asociada a la ruptura de cadenas poliméricas por ruptura aleatoria, con pérdida de masa rápida entre ~ 380 y 500°C . El residuo a 900°C es prácticamente cero.

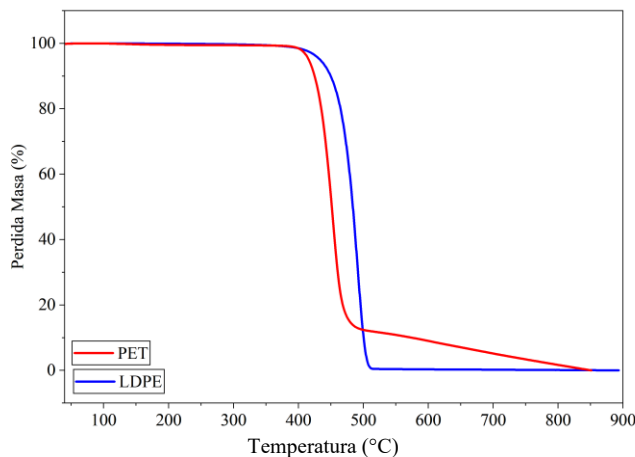


Fig. 5 Curvas termogravimétricas del PET y LDPE.

La curva TGA del PET tiene menor estabilidad térmica que el LDPE. La degradación inicia entre $\sim 300\text{--}330^\circ\text{C}$ y ocurre en una etapa principal más amplia (como se ve en la curva DTG, véase la Fig. 6), relacionada con la descomposición de los grupos éster y la liberación de compuestos oxigenados. A diferencia del LDPE, el PET deja un residuo sólido apreciable a altas temperaturas, atribuible a la formación de carbón y a su mayor contenido de oxígeno aromático. Basados en esta información se estableció que la temperatura de pirólisis debía estar entre 500°C a 600°C .

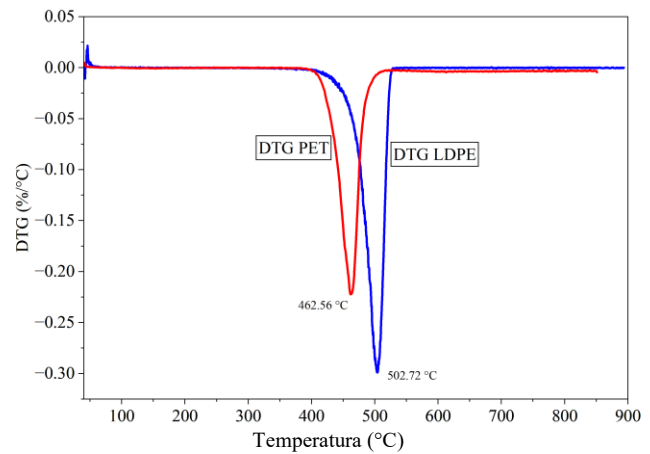


Fig. 6 Curvas DTG del termograma del PET y LDPE.

La curva TGA del PET tiene menor estabilidad térmica que el LDPE. La degradación inicia entre $\sim 300\text{--}330^\circ\text{C}$ y ocurre en una etapa principal más amplia (como se ve en la curva DTG), relacionada con la descomposición de los grupos éster y la liberación de compuestos oxigenados. A diferencia del LDPE, el PET deja un residuo sólido apreciable a altas temperaturas, atribuible a la formación de carbón y a su mayor contenido de oxígeno aromático.

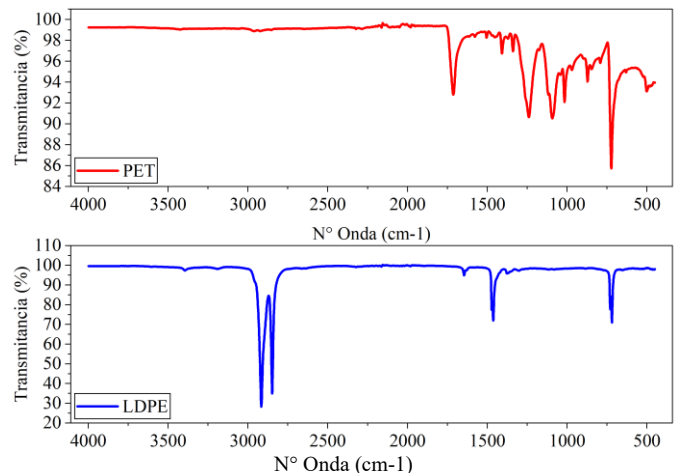


Fig. 7 Espectros FTIR del PET y LDPE.

3) *Análisis espectrométrico FTIR*: El espectro FTIR del LDPE muestra en las bandas 2915 y 2848 cm^{-1} : estiramientos C-H asimétrico y simétrico de $-\text{CH}_2-$, característicos del polietileno. En $1470\text{--}1460\text{ cm}^{-1}$ presenta flexión (scissoring) de $-\text{CH}_2-$. En la banda $730\text{--}720\text{ cm}^{-1}$ hay balanceo de $-\text{CH}_2-$, típico de cadenas largas y semicristalinas. Hay una leve absorción ancha en $3400\text{--}3200\text{ cm}^{-1}$ y señales débiles alrededor de 1700 cm^{-1} , típicas de los grupos hidroxilo y carbonilo formados por oxidación durante el uso y envejecimiento térmico/fotoquímico. No se identifican contaminantes polares dominantes. En el caso del PET las bandas $1715\text{--}1720\text{ cm}^{-1}$ tienen estiramiento C=O típico del grupo éster, banda dominante del PET. En la banda $1240\text{--}1100\text{ cm}^{-1}$ se evidencian estiramientos C-O-C del enlace

éster. Entre 1600–1500 cm^{-1} hay vibraciones atribuibles a anillos aromáticos. En la banda 870–725 cm^{-1} hay flexión fuera del plano del anillo bencénico y en la banda 2970–2870 cm^{-1} se tienen estiramientos C–H alifáticos. Además, se aprecia ensanchamiento del carbonilo y ligeros cambios de intensidad en la región 3200–3500 cm^{-1} , consistentes con hidroxilos terminales y productos de hidrólisis u oxidación, típicos de PET post-consumo. Los espectros confirman la identidad química de LDPE y PET. Los dos polímeros tienen señales de envejecimiento, más evidentes en el PET por su química éster. El LDPE tiene oxidación leve, mientras que el

PET presenta degradación química incipiente (oxidación/hidrólisis).

B. Pirólisis del PET y LDPE

1) *Rendimientos*: Los resultados (ver Tabla III) muestran que, para las pirólisis de PET, no se obtuvo combustible líquido significativo en ninguno de los ocho ensayos realizados, pero sí de ceras. Inicialmente, se forma líquido que va tomando consistencia cerosa, y al final del proceso solo se obtiene una cera y sólidos carbonosos que quedan en el reactor.

TABLA III
RESULTADOS DE LA PIROLISIS DEL LDPE Y PET

Ensayo	Plástico	Temp. (°C)	Tamaño partícula (mm)	Tiempo operación (h)	Líquido (%)	Cera (%)	Sólido (%)	Gas (%)
1	PET	500	5	2	ND	ND	ND	ND
2	PET	600	5	2	ND	3.5	67.9	28.6
3	PET	500	20	2	ND	ND	ND	ND
4	PET	600	20	2	ND	7	68.25	24.75
5	PET	500	5	3	ND	ND	ND	ND
6	PET	600	5	3	ND	4	67.1	28.9
7	PET	500	20	3	ND	ND	ND	ND
8	PET	600	20	3	ND	6	66.75	27.25
9	LDPE	500	5	2	63.16	--	26.53	10.32
10	LDPE	600	5	2	69.13	--	25.87	5.00
11	LDPE	500	20	2	60.79	--	29.00	10.20
12	LDPE	600	20	2	66.63	--	27.59	5.78
13	LDPE	500	5	3	71.28	--	10.43	18.30
14	LDPE	600	5	3	77.45	--	9.89	12.66
15	LDPE	500	20	3	70.76	--	8.70	20.54
16	LDPE	600	20	3	76.97	--	10.23	12.79

ND: No Disponible

Los resultados obtenidos y la revisión bibliográfica muestran que el PET es un polímero difícil de convertir en aceite líquido de alta calidad por su estructura química estable y su alto contenido de oxígeno [24], [25], [26]. A diferencia de las poliolefinas, en la pirólisis térmica (no catalítica) del PET predominan los productos gaseosos, residuos sólidos (carbonilla) y ceras oxigenadas, con un rendimiento de aceite líquido muy limitado o inexistente. Las ceras normalmente son compuestos oxigenados como el ácido benzoico y el ácido tereftálico [24], [26].

El rendimiento de combustible líquido en la pirólisis del PET tiende a ser bajo. Los estudios reportan que el rendimiento de combustible líquido está entre el 2 % y el 24 % [24]. En experimentos específicos a 500 °C, se obtiene un rendimiento de cera del 41.40 %, mientras que la formación de combustible líquido fue nula o insignificante en ausencia de catalizadores o mezclas con otros polímeros, lo que corrobora

los resultados obtenidos en esta investigación donde se obtuvo ceras y ningún líquido significativo [26].

Los resultados de las pirólisis del LDPE muestran que en las ocho corridas se obtuvo combustible líquido (en ningún caso se obtuvo ceras), con un rendimiento máximo de 77.45% a una temperatura de 600°C, con un tamaño de muestra de 5 mm y un tiempo de operación de 3 horas. En comparación en [33] se reporta que la pirólisis de LDPE virgen rinde 43.4 % de líquidos y la pirólisis del LDPE usado rinde 47 % de combustible líquido en ambos casos la temperatura de pirólisis fue de 400 °C, velocidad de calentamiento 2.5 °C/min y 3 h de tiempo de operación, condiciones similares a esta investigación. Asimismo, en [34] se reporta que el máximo rendimientos de líquidos es de 89.8 % y 2.12 % de ceras a 350 °C, 10 °C/min de velocidad de calentamiento y 2 h de tiempo de operación y un tamaño de partícula de 2.5 cm^2 . Es claro que las condiciones experimentales influyen en los

rendimientos de combustible líquido y como el objetivo es maximizar la conversión del LDPE en líquidos las condiciones operativas halladas en esta investigación son mejores a las de [33] y [34] porque los rendimientos de [33] son menores y pese a que [34] obtiene mayor rendimiento al mismo tiempo se obtienen ceras que es un producto no deseable.

2) *Temperatura de pirólisis y obtención de combustibles líquidos:* Los resultados obtenidos en la pirólisis del LDPE muestran una mejora en el rendimiento con el aumento de temperatura de 500 a 600 °C, destacando que a 600°C se obtuvo un máximo rendimiento de 77.45%, lo que indica una influencia significativa de la temperatura en la pirólisis. Según [35] la temperatura contribuye con la ruptura de los enlaces del termoplástico, facilitando la producción de líquidos. [34] tiene resultados diferentes porque encuentra un máximo de rendimiento a 350 °C con 89.8 % pero con 2.12 % de formación de ceras. Ambos estudios y esta investigación sugieren que la temperatura juega un papel crucial en la eficiencia de la pirólisis de LDPE. El aumento de la temperatura favorece la ruptura de los enlaces moleculares, mejorando así el rendimiento de la producción de líquidos. A su vez los estudios analizados indican que mayores temperaturas conducen a un mayor rendimiento de combustible líquido. Sin embargo, se debe tener en cuenta que temperaturas más altas pueden llevar a una mayor producción de gases y residuos sólidos, lo que debe ser controlado para optimizar los resultados, por lo que es necesario realizar un estudio con comparación de tres o más temperaturas para ubicar un punto óptimo.

3) *Tiempo de residencia y obtención de combustibles líquidos:* El tiempo de residencia depende básicamente de la geometría del reactor y la velocidad de los gases en la zona de reacción. Si los gases permanecen mucho tiempo en la zona de reacción se promueve la fragmentación del polímero hacia cadenas cortas que llevan a la formación de gases. El tiempo de residencia en el reactor influye en la distribución y el rendimiento de los productos de pirólisis. Generalmente, mayor tiempo de residencia aumenta la conversión a hidrocarburos ligeros y gases, pero reduce el rendimiento de aceite líquido. Nuestros resultados concuerdan con los estudios previos, que destacan la influencia del tiempo de residencia en la optimización del proceso de pirólisis para maximizar el rendimiento de productos deseados. Sin embargo, las diferencias en las condiciones experimentales, como el tipo de reactor y la temperatura, pueden explicar las variaciones observadas [11], [36].

4) *Tamaño de partícula y obtención de combustibles líquidos:* Los resultados para la pirólisis de LDPE muestran una mejora relativa en el rendimiento con la disminución de tamaño de 5 mm y 20 mm. Este hallazgo está en línea con los resultados reportados por [37], quienes realizaron la pirólisis de desechos plásticos de LDPE, logrando un rendimiento del 70.2 % en combustibles líquidos a 450 °C, velocidad de calentamiento de 10 °C/min, tiempo de 2.5 h. [35] también señalan que los tamaños de partícula pequeños tienden a disminuir el rendimiento de productos líquidos debido a que la

temperatura de operación genera más productos gaseosos y residuos carbonosos. Por otro lado, partículas de mayor tamaño también resultan en un menor rendimiento porque las grandes moléculas del polímero dificultan la ruptura de los enlaces, lo que reduce la formación de los productos líquidos y gaseosos. En comparación, nuestros resultados coinciden en parte con los hallazgos de [35], que indican una disminución en el rendimiento de productos líquidos con tamaños de partícula pequeños. Sin embargo, la diferencia de tamaños de muestra y las condiciones experimentales específicas, como la temperatura y el tiempo de residencia, pueden explicar las variaciones en los resultados obtenidos. Estas discrepancias resaltan la necesidad de optimizar las condiciones de pirólisis para maximizar el rendimiento de combustible líquido según las características específicas del LDPE utilizado.

5) *Caracterización de los productos:* El análisis espectrométrico FTIR de los productos de la pirólisis a 600 °C del LDPE y del PET (por separado) se muestran en la Fig. 8.

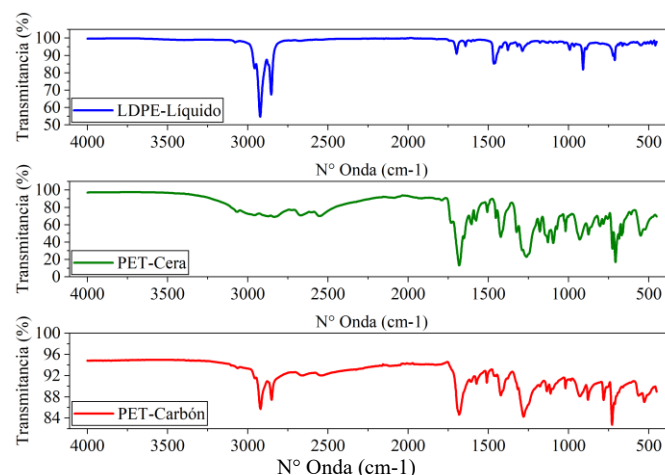


Fig. 8 Espectros FTIR de los productos de pirólisis del PET y LDPE.

El espectro FTIR del líquido del LDPE muestra bandas características de olefinas y parafinas, típicas de la pirólisis de LDPE, con picos pronunciados en ~ 2920 y ~ 2850 cm^{-1} (tensión C-H de CH_2/CH_3), ~ 1450 cm^{-1} (deformación CH_2) y ~ 720 cm^{-1} (balanceo CH_2), indicando cadenas alifáticas largas. El espectro de las ceras producto de la pirólisis del PET revela bandas de éster degradado: ~ 1710 cm^{-1} (C=O de ácido/éster), ~ 1260 cm^{-1} (C-O de éster), y ~ 1100 cm^{-1} (C-O-C), junto a picos alifáticos $\sim 2920/2850$ cm^{-1} , indicando la condensación de productos de despolimerización del PET en una mezcla cerosa con grupos carboxílicos, alquilo y éster residual. El espectro del carbón o char producto de la pirólisis del PET presenta una señal casi plana sin bandas FTIR significativas, lo que confirma la carbonización completa del PET a 600 °C, con material convertido en carbono amorfo o grafitico donde los enlaces orgánicos han desaparecido. Se puede concluir que la pirólisis del LDPE genera hidrocarburos líquidos alifáticos, el PET a 600 °C produce carbón sin funcionalidad orgánica, y la fracción cerosa del PET conserva grupos oxigenados provenientes de la estructura original del polímero.

C. Copirólisis del PET y el LDPE

Los rendimientos de la copirólisis de 50 g de PET y 50 g de LDPE a 600 °C, con un tiempo de operación de 3 h y tamaño de partícula de 5 mm se muestran en la Tabla IV.

TABLA IV
RESULTADOS DE LA COPIRÓLISIS LDPE Y PET

% Líquidos	% Ceras	% Sólidos	% Gases
0	2.38	47.12	50.50

No se obtuvieron líquidos, entonces se establece que el efecto de agregar PET en igual proporción que LDPE tiene un efecto negativo en la producción de combustible líquido. La copirólisis del PET y LDPE genera principalmente gases y ceras (Fig. 9) debido a la estabilidad térmica y contenido de oxígeno del PET. A 500 °C, se han reportado rendimientos de 39.7 % de gases, 32.3 % de ceras y solo 8 % de aceite líquido [24], [26]. El residuo sólido varía entre el 4.8 % y 20 %, que se deriva del PET. El LDPE aporta hidrógeno y el PET tiende a fragmentarse en ácidos carboxílicos pesados y gases (CO, CO₂), limitando la licuefacción efectiva [24], [26].



Fig. 9 Ceras producto de la copirólisis del LDPE y PET a 600 °C, 3 h de tiempo de residencia y 5 mm de tamaño de partícula.

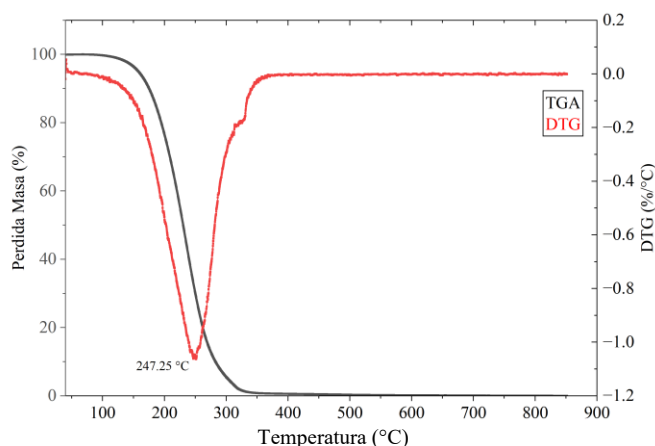


Fig. 10 Curvas TG y DTG de la cera obtenida por la copirólisis del LDPE y PET a 600 °C.

La curva termogravimétrica (Fig. 10) de la cera producto de la pirólisis del PET:LDPE (1:1) a 600 °C muestra una degradación térmica en un solo evento entre ~300 y 520 °C, con pérdida de masa casi total y residuo final muy bajo, lo que confirma su naturaleza mayoritariamente volátil. La DTG muestra un pico principal amplio, con un máximo en 247.25 °C, atribuible a la descomposición simultánea de cadenas alifáticas del LDPE y fragmentos aromáticos/oxigenados derivados del PET. La ausencia de etapas a baja temperatura indica mínima humedad o compuestos livianos. El comportamiento es consistente con una cera de pirólisis homogénea y con baja tendencia a la formación de char.

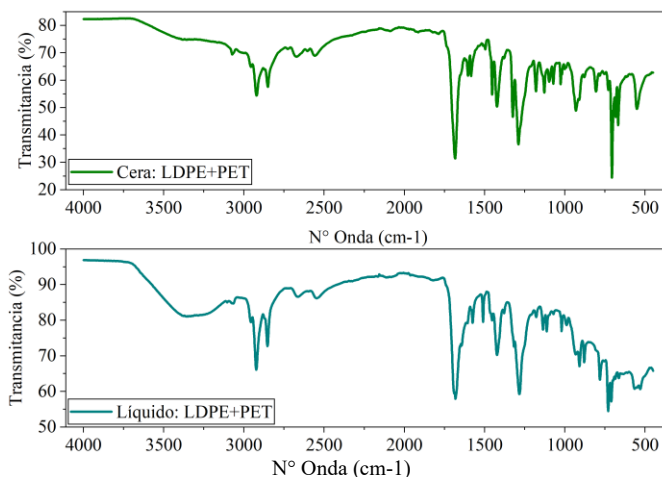


Fig. 11 Espectros FTIR de los productos de pirólisis de la mezcla de PET y LDPE.

En la Fig. 11 tenemos el espectro de la cera producto de la copirólisis del LDPE y el PET que refleja una combinación química de ambos polímeros. Se presentan picos muy intensos en 2915-2848 cm⁻¹ (enlaces C-H) propios del LDPE y una banda significativa en ~1710 cm⁻¹ (C=O) derivada del PET. Estas señales confirman un producto híbrido donde coexisten cadenas alifáticas y grupos oxigenados. La presencia del LDPE modera la naturaleza puramente ácida del PET, originando una cera con mayor contenido de hidrocarburos, lo que valida el efecto sinérgico de transferencia de hidrógeno observado en la copirólisis.

El espectro del líquido de la copirólisis del LDPE y PET muestra la presencia de componentes de ambos polímeros. Los picos intensos en 2920-2850 cm⁻¹ confirman una fuerte presencia de hidrocarburos alifáticos provenientes del LDPE. Simultáneamente, la banda aguda en ~1710 cm⁻¹ (C=O) revela la existencia de compuestos oxigenados derivados del PET.

IV. CONCLUSIONES

La copirólisis de LDPE y PET a 600 °C dio un rendimiento del 0 % de combustible líquido, lo que demuestra que la adición de PET tiene un efecto negativo directo en generación de líquidos en el proceso. Se formaron principalmente gases (50.50 %) y sólidos (47.12 %), debido a la estabilidad térmica del PET y su tendencia a fragmentarse en compuestos gaseosos y ácidos carboxílicos pesados. Pese a

ello, se identificó un efecto sinérgico en los subproductos: el LDPE actuó como donante de hidrógeno, moderando la acidez del PET y permitiendo la formación de una cera híbrida que combina cadenas alifáticas con grupos oxigenados.

La pirólisis del PET no generó productos líquidos, encontrándose residuos de masa cerosa y sólidos; el rendimiento máximo de líquido de la pirólisis de LDPE fue de 77.45 % a una temperatura de 600 °C, con un tamaño de muestra de 5 mm y un tiempo de operación de 3 horas, en un reactor tubular, con una velocidad de calentamiento de 3.5 °C/min, un sistema de condensación que operó a una temperatura de 1.7 °C, bajo una presión de vacío de -0.66 bar. El análisis comparativo sugiere varias estrategias para mejorar el rendimiento de combustible líquido. Entre ellas, destaca el uso de catalizadores y la variación en la velocidad de calentamiento. Además, se puede observar que la pirólisis del LDPE es más sencilla debido a su estructura lineal, lo que la hace más fácil de descomponer en comparación con la estructura química de carácter aromático del PET.

El aumento de la temperatura es significativo para el rendimiento de combustible líquido, alcanzando un 77.45 % a 600 °C. Es necesario llevar a cabo análisis comparativos con tres niveles de temperatura, desde los 450 °C hasta los 650 °C.

El aumento en el tiempo de operación de 2 a 3 horas mejora el rendimiento del combustible líquido, alcanzando una mayor significancia.

La disminución del tamaño de las partículas mejora el rendimiento del combustible líquido. Sin embargo, las diferencias en los tamaños de muestra y las condiciones experimentales, como la temperatura y otras variables no consideradas en este estudio pueden variar los resultados.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de Petróleo, Gas Natural y Petroquímica de la Universidad Nacional de Ingeniería por el apoyo brindado para el desarrollo del proyecto.

REFERENCIAS

- [1] STATISTA, "Producción de plástico a nivel mundial de 2002 a 2022." Accessed: Aug. 07, 2024. [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/282732/global-production-of-plastics-since-1950/#:~:text=The worldwide production of plastics,production has soared since 1950s>
- [2] Avery Schuyler Nunn, "Whatever happened to the zero waste movement?," National Geographic. Accessed: Dec. 13, 2023. [Online]. Available: <https://www.nationalgeographic.com/environment/article/zero-waste-movement-plastic-straw-bans-evolution#:~:text=más residuos plásticos que cualquier,entendemos eso%2C nada cambiará>
- [3] A. K. Priya *et al.*, "A study on managing plastic waste to tackle the worldwide plastic contamination and environmental remediation," *Chemosphere*, vol. 341, no. August, p. 139979, 2023, doi: 10.1016/j.chemosphere.2023.139979.
- [4] Plastics Europe AISBL, "Plastics the Fast Facts 2025," 2025. [Online]. Available: https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2025/09/PE_TheFacts_25_digital-1pager-scrollable.pdf
- [5] F. I. y M. M. Cecilia Bianco, "Plásticos en América Latina," 2021. [Online]. Available: [https://www.no-burn.org/wp-](https://www.no-burn.org/wp-content/uploads/2022/03/Plasticos-en-America-Latina-2022.pdf)

- [content/uploads/2022/03/Plasticos-en-America-Latina-2022.pdf](https://www.no-burn.org/wp-content/uploads/2022/03/Plasticos-en-America-Latina-2022.pdf)
- [6] D. C. Husaini, R. K. Mendez, M. Arzu, and L. Harris-Thurton, "Plastic Waste in Latin America and the Caribbean (LAC): Impact on the Environment and Public Health - A Systematic Review," *J. Toxicol.*, vol. 2024, 2024, doi: 10.1155/2024/5698516.
- [7] MINAM, "Alrededor de 1000 kilos de residuos se colectaron en campaña del Minam 'Menos plástico, más vida' en Tumbes," Web. Accessed: Jan. 09, 2026. [Online]. Available: <https://www.gob.pe/institucion/minam/noticias/988069-alrededor-de-1000-kilos-de-residuos-se-colectaron-en-campana-del-minam-menos-plastico-mas-vida-en-tumbes>
- [8] K. L. Lindo-Samar, "Contaminación por microplásticos, efectos en la microalga *Chlorella sp.* Beijerinck e implicaciones en el medio natural: Una revisión sistemática," Universidad Católica Sedes Sapientiae, 2025. [Online]. Available: <https://repositorio.uccs.edu.pe/backend/api/core/bitstreams/db10278a-61c4-4b8b-ae89-9eb3b98d2718/content?>
- [9] MINAM, "Perú: valorización de residuos en 2024 superó las 249 000 toneladas," Web. Accessed: Jan. 09, 2026. [Online]. Available: <https://www.gob.pe/institucion/minam/noticias/1248744-peru-valorizacion-de-residuos-en-2024-supero-las-249-000-toneladas?>
- [10] MINAM, "Cifras del mundo y el Perú," Web. Accessed: Jan. 09, 2026. [Online]. Available: [https://www.minam.gob.pe/menos-plastico-mas-vida/cifras-del-mundo-y-el-peru/?](https://www.minam.gob.pe/menos-plastico-mas-vida/cifras-del-mundo-y-el-peru/)
- [11] S. Nanda and F. Berruti, "Thermochemical conversion of plastic waste to fuels: a review," *Environ. Chem. Lett.*, vol. 19, no. 1, pp. 123–148, 2021, doi: 10.1007/s10311-020-01094-7.
- [12] P. G. I. Uthpalani, J. K. Premachandra, D. S. M. De Silva, and V. P. A. Weerasinghe, "Pyrolysis as a value added method for plastic waste management: A review on converting LDPE and HDPE waste into fuel," *Ceylon J. Sci.*, vol. 52, no. 3, pp. 277–296, 2023, doi: 10.4038/cjs.v52i3.8026.
- [13] G. Maitlo *et al.*, "Plastic Waste Recycling, Applications, and Future Prospects for a Sustainable Environment," *Sustain.*, vol. 14, no. 18, 2022, doi: 10.3390/su141811637.
- [14] F. Faisal, M. G. Rasul, A. A. Chowdhury, and M. I. Jahirul, "Optimisation of Process Parameters to Maximise the Oil Yield from Pyrolysis of Mixed Waste Plastics," *Sustain.*, vol. 16, no. 7, 2024, doi: 10.3390/su16072619.
- [15] A. B. Cuevas, D. E. Leiva-Candia, and M. P. Dorado, "An Overview of Pyrolysis as Waste Treatment to Produce Eco-Energy," *Energies*, vol. 17, no. 12, 2024, doi: 10.3390/en17122852.
- [16] W. Kwo, "How is plastic recycled?," TNO innovation for life. Accessed: Jan. 09, 2026. [Online]. Available: [https://www.tno.nl/en/newsroom/insights/2024/11/how-is-plastic-recycled/?](https://www.tno.nl/en/newsroom/insights/2024/11/how-is-plastic-recycled/)
- [17] EPA, "Plastics: Material-Specific Data," Web. Accessed: Jan. 09, 2026. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/plastics-material-specific-data>
- [18] BNTET, "What are the recycling methods for different plastics," Web. Accessed: Jan. 09, 2026. [Online]. Available: https://www.pyrolysispro.com/news/technology_news/what_are_the_recycling_methods_for_different_plastics.html?
- [19] W. H. Chen, K. Y. Ho, R. Aniza, A. K. Sharma, A. Saravanakumar, and A. T. Hoang, "A review of noncatalytic and catalytic pyrolysis and co-pyrolysis products from lignocellulosic and algal biomass using Py-GC/MS," *J. Ind. Eng. Chem.*, vol. 134, no. August 2023, pp. 51–64, 2024, doi: 10.1016/j.jiec.2024.01.020.
- [20] ONU, "Objetivos de desarrollo sostenible," Web. Accessed: Jan. 09, 2026. [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/>
- [21] D. Kim, M. Han, N. Kim, J. Kim, and S. P. Jung, "Waste Plastic Pyrolysis Industry: Current Status and Prospects," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, vol. 32, no. 3, pp. 167–186, 2021, doi: 10.4491/KSEE.2024.46.7.395.
- [22] M. A. Escobar Bolívar, "Valoración de productos sólidos en la pirólisis del pet," 2020. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/1992/45065>
- [23] Guachamin-Valencia Cristian Santiago; Castro-García Cristhian Jesús; García-Muentes Segundo Alcides; García-Ávila Segundo Alcides;

- Cevallos-Cedeño Ramón Eudoro; García-Vinces Gonzalo Oswaldo, "Obtención de Combustibles a Partir de Pirólisis de Material Plástico Reciclado de Polietileno de Alta Densidad (Pead)," *INGENIAR*, vol. 6, no. 11, p. 2023, 2023, [Online]. Available: <https://journalingeniar.org/index.php/ingeniar/article/view/121>
- [24] S. Okonsky, V. J. K. Jonnalagedda, and H. E. Toraman, "Catalytic co-pyrolysis of LDPE and PET with HZSM-5, H-Beta, and HY: Experiments and kinetic modelling," *React. Chem. Eng.*, vol. 7, pp. 2175–2191, 2022, doi: 10.1039/D2RE00144F.
- [25] A. A. Aboul-Enein, A. E. Awadallah, A. A. H. Abdel-Rahman, and A. M. Haggag, "Synthesis of multi-walled carbon nanotubes via pyrolysis of plastic waste using a two-stage process," *Fullerenes Nanotub. Carbon Nanostructures*, vol. 26, no. 7, pp. 443–450, 2018, doi: 10.1080/1536383X.2018.1447929.
- [26] H. Gulab, S. Malik, and K. Hussain, "Catalytic Pyrolysis of Polyethylene Terephthalate and Its Copyrolysis with Polyethylene," *Environ. Eng. Sci.*, vol. 41, no. 8, pp. 327–336, 2024, doi: 10.1089/ees.2024.0006.
- [27] G. Ozcair and A. Karaduman, "Chemical Recovery From Polystyrene Waste and Low Density Polyethylene Via Conventional Pyrolysis," *ESOGU Engin Arch Fac.*, vol. 28, no. 2, pp. 155–163, 2020, doi: 10.31796/ogummf.734475.
- [28] P. Wang, L. Qiao, W. Wang, and J. Yu, "Catalytic pyrolysis of waste composite plastics with waste FCC catalyst," *J. Energy Inst.*, vol. 110, no. May, p. 101338, 2023, doi: 10.1016/j.joei.2023.101338.
- [29] A. C. Dyer, M. A. Nahil, and P. T. Williams, "Catalytic co-pyrolysis of biomass and waste plastics as a route to upgraded bio-oil," *J. Energy Inst.*, vol. 97, pp. 27–36, 2021, doi: 10.1016/j.joei.2021.03.022.
- [30] M. Al-asadi and N. Miskolczi, "Hydrogen rich products from waste HDPE/LDPE/PP/PET over Me/Ni-ZSM-5 catalysts combined with dolomite," *J. Energy Inst.*, vol. 96, pp. 251–259, 2021, doi: 10.1016/j.joei.2021.03.004.
- [31] R. Liu, Z. Wang, H. Zhu, S. Yang, T. Lei, and A. K. Gupta, "Co-pyrolysis of Rice Straw With Polystyrene, Polyethylene Terephthalate, and LDPE With Focus on Product Distribution and Synergistic Effects," *ASME Open J. Eng.*, vol. 4, pp. 1–11, 2025, doi: 10.1115/1.4069358.
- [32] W. Chang *et al.*, "Recent progress on the synergistic preparation of liquid fuels by co-pyrolysis of lignocellulosic biomass and plastic wastes," *J. Energy Inst.*, vol. 119, no. December 2024, 2025, doi: 10.1016/j.joei.2025.102019.
- [33] I. Calinescu *et al.*, "Catalytic Pyrolysis of Low-Density Polyethylene Waste," *Sustain.*, vol. 16, no. 16, pp. 1–14, 2024, doi: 10.3390/su16166788.
- [34] W. Wijayanti, Musyaroh, and M. N. Sasongko, "Low-Density Polyethylene Plastic Waste to Liquid Fuel Using Pyrolysis Method: an Effect of Temperatures on the Oil Yields Physicochemical Properties," *J. Sustain. Dev. Energy, Water Environ. Syst.*, vol. 10, no. 3, pp. 1–18, 2022, doi: 10.13044/j.sdewes.d9.0402.
- [35] W. Ramos and V. Pretell, "Obtaining Liquid Fuels from High Density Polyethylene Waste," in *Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology*, 2021, pp. 1–8. doi: 10.18687/LACCEI2021.1.1.94.
- [36] A. Dauda, Z. B. Aminu, A. A. Olaleye, N. Adamu, and Y. Musa, "Conversion of Low-Density Polyethylene (LDPE) and Mixed Low-Density Polyethylene with Polyethylene Terephthalate (LDPE and PET) into Hybrid Fuel," *J. Energy Res. Rev.*, vol. 16, no. 1, pp. 21–27, 2024, doi: 10.9734/jenrr/2024/v16i1328.
- [37] J. Oufkir, R. Cherouaki, S. Zerraf, and S. Belaaouad, "Highly efficient conversion of plastic waste into fuel via thermal cracking: Thermo-structural analysis of the pyrolysis reactor and characterization of the final product," *Mater. Today Proc.*, no. February, 2024, doi: 10.1016/j.matpr.2024.02.027.