

Obtención de Combustibles Líquidos a Partir de Residuos de Polietileno de Alta Densidad

Obtaining Liquid Fuels from High Density Polyethylene Waste

Williams Ramos, MSc.¹, Victor Pretell, MSc.¹

¹Universidad Nacional de Ingeniería, Perú

wramos@fip.uni.edu.pe, vpretell@fip.uni.edu.pe

Resumen- En el Perú la generación de residuos plásticos es creciente y deviene en un problema ambiental acuciante, solo el 0.3% de los residuos plásticos se recicla. El presente trabajo de investigación busca estudiar las variables que afectan la pirólisis de los residuos de polietileno de alta densidad (HDPE) para la obtención del máximo rendimiento de combustibles líquidos. Se estudió el efecto del tamaño de partícula y la temperatura de operación en los rendimientos de productos líquidos. Se adquirió 30 kg de residuos de HDPE compuesto de diferentes tamaños de partículas hasta un máximo de 8 cm, los residuos de HDPE fueron tamizados y clasificados en cuatro grupos, posteriormente la muestra fue caracterizada y comparada frente a un patrón de trabajo. Se diseñó y construyó un sistema a escala laboratorio para la pirólisis en la cual las condiciones operativas que maximizan la obtención de combustibles líquidos fueron una temperatura de operación de 550 °C, presión de operación de 34.66 kPa abs., velocidad de calentamiento de 20 °C/min y un tamaño de partícula de 4 a 6 mm. Los rendimientos de productos obtenidos fueron los siguientes: 88% de líquidos, 2% de sólidos (residuo carbonoso) y 10% de gases.

Palabras claves—Pirólisis, Combustibles, Residuos, Plásticos, Polietileno de alta densidad.

Abstract- In Peru, the generation of plastic waste is growing and becomes a pressing environmental problem, only 0.3% of plastic waste is recycled. This research work seeks to study the variables that affect the pyrolysis of high-density polyethylene (HDPE) waste to obtain the maximum performance of liquid fuels. The effect of particle size and operating temperature on the yields of liquid products was studied. 30 kg of HDPE waste composed of different particle sizes were acquired up to a maximum of 8 mm, the HDPE residues were sieved and classified into four groups, later the sample was characterized and compared against a standard. A laboratory-scale system for pyrolysis was designed and built in which the operating conditions that maximize the obtaining of liquid fuels were an operating temperature of 550 °C, operating pressure of 34.66 kPa abs., heating rate of 20 °C/min and a particle size of 4 to 6 mm. The yields of products obtained were the following: 88% of liquids, 2% of solids (carbonaceous residue) and 10% of gases.

Keywords — Pyrolysis, Fuels, Waste, Plastics, High-density polyethylene.

Digital Object Identifier (DOI):
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.94>
ISBN: 978-958-52071-8-9 ISSN: 2414-6390

I. INTRODUCCIÓN

En el Perú, la industria del plástico se desarrolla a partir de los años de 1930, desde sus inicios esta depende de la importación de materias primas e insumos provenientes de la industria petroquímica. Los únicos procesos que se manejan en el país son procesos mecánicos como el moldeado, el soplado, entre otros [1]–[4]. Debido a las ventajas que presentan los plásticos frente a otros productos, tales como su bajo costo, ligereza, estabilidad y durabilidad, son muy utilizados. Al ser desechados luego de su uso, todos los residuos plásticos tienen un tiempo de descomposición elevado, pudiendo persistir en el medio ambiente hasta miles de años debido a sus propiedades, por ello estos residuos son considerados contaminantes ambientales [5], [6].

Se estima que en el Perú solo el 0.3 % de los residuos plásticos son reciclados de forma mecánica, mientras que el 43.7 % son dispuestos a un relleno sanitario como residuos sólidos urbanos (RSU) [7]–[9]. Asimismo, se estima que el 56% de los residuos no son correctamente dispuestos, los cuales al quedarse en el medio ambiente son poco a poco fragmentados y degradados naturalmente, de esta forma disminuye su tamaño pudiendo llegar a los mares en forma de microplásticos (tamaño de partícula menor a 5 mm) [9]–[12].

Uno de los residuos plásticos que más abundan en el Perú son los polietilenos de alta densidad (HDPE). En el año 2020 se importó aproximadamente 166 200 toneladas de HDPE. Además, se estima que el 27 % de todos los residuos de termoplásticos en la basura, son residuos de HDPE [8], [13], [14]. Por esta razón, es necesario buscar procedimientos para reciclar los residuos plásticos que se generan en el Perú. Los procesos habituales de reciclaje mecánico pueden ser usados, pero se obtiene un producto de baja calidad comparado con el original. Adicionalmente, en el Perú existe un déficit en la producción de combustibles líquidos en las refinerías de petróleo (comparado con la demanda), por lo que los productos necesarios para abastecer dicha demanda son importados (se importa alrededor de 25 MMB por año de diésel 2 y 1 MMB por año de gasolinas), así como también existe importación de petróleo crudo (se importan alrededor de 38 MMB) para ser adicionado al producido localmente o ser procesado en refinerías de petróleo [15].

Actualmente investigadores como Miandad et al. en Arabia Saudita [16], Faisal Abnisa y su equipo de trabajo en Malasia [17] y Abbas-Abadi junto a su grupo de investigación en Irán [18] investigan métodos para el reciclaje químico de residuos plásticos y buscan nuevas alternativas para la obtención de combustibles líquidos, tratando de cumplir dos objetivos: reutilizar los residuos plásticos y evitar o minimizar su impacto ambiental.

La pirólisis es un proceso termoquímico que consiste en la descomposición térmica de una materia prima en ausencia de oxígeno, llevando a la formación de líquidos, gases y productos sólidos carbonosos. Los gases pueden ser parcialmente condensados para dar una fracción líquida dejando una fracción de gases no condensables. Cada una de las tres corrientes de productos tienen propiedades y aplicaciones que dan valor al proceso. Una de las posibles materias primas para la pirólisis son los residuos plásticos [19].

La pirólisis de residuos plásticos consiste en una reacción endotérmica que ocurre a altas temperaturas, presiones bajas o en vacío. Las reacciones de pirólisis buscan el craqueo de las largas cadenas que conforman los polímeros y obtener así hidrocarburos de menor peso molecular. En el caso de los productos líquidos estos tienen características similares a los combustibles líquidos formados por hidrocarburos en el rango de los destilados medios [20]. Estos hidrocarburos de menor peso molecular, para el caso de los termoplásticos como el HDPE, se obtienen a partir de un mecanismo de reacción consistente en una ruptura aleatoria que genera polímeros de menor masa molecular, y en caso la ruptura se dé en uno de los extremos del polímero se producen moléculas muy ligeras tales como metano, etano y propano [21].

Existen algunas referencias sobre la pirólisis de residuos de HDPE. En el 2019, Al-Salem en Kuwait, investigó la pirólisis térmica de HDPE en un reactor de lecho fijo. Los experimentos se realizaron a temperaturas entre 500 y 800 °C en presencia de nitrógeno como gas de acarreo de los cuales se obtuvieron productos líquidos gaseosos y sólidos. La temperatura en la que se obtuvo el máximo rendimiento de productos líquidos (70%) fue de 550 °C. Además, se realizó un análisis por cromatografía de gases en donde se determinó que los productos líquidos contienen hidrocarburos alifáticos especialmente en el rango de C₈ a C₁₂, mientras que los hidrocarburos aromáticos estaban en menor proporción [22].

De igual forma en el 2018 en la India, Das y su equipo de investigación, estudiaron la pirólisis de HDPE y PP provenientes de embalajes. Las pruebas se realizaron con pellets con un tamaño de partícula entre 3 a 5 mm, en un reactor semibatch con una velocidad de calentamiento de 1 °C/min. Los rendimientos de los productos para el caso del HDPE fueron de 82.6 % para los productos líquidos, 16.8 % para los gases y 0.6 % para los residuos sólidos. Los productos líquidos obtenidos están conformados por 67 % de parafinas, 30 % olefinas y 3 % de aromáticos [23].

Intiaz Ahmad en el 2015, a cargo de un proyecto de investigación en el Instituto de Ciencias Químicas de la

Universidad de Peshawar en Pakistán, estudió la pirólisis del polipropileno y polietileno para la obtención de productos líquidos. El estudio se llevó a cabo en un micro reactor de acero con 2 g de muestra y un flujo de nitrógeno como gas de acarreo, se trabajó en un rango de temperaturas de 250 a 400 °C obteniendo una conversión de 98.1 % y un rendimiento de 69.8 % de productos líquidos los cuales fueron analizadas por FTIR y GC-MS, obteniendo como resultado que los productos líquidos estaban conformados por hidrocarburos desde el C₆ al C₁₆. Asimismo, se concluyó que los productos líquidos (en el caso del HDPE) tienen un gran contenido de hidrocarburos presentes en la nafta, teniendo como composición 59.7% de hidrocarburos parafínicos, 31.9 % de compuestos olefínicos y 8.4% de compuestos nafténicos [24].

En la India en el año 2011, Kumar y colaboradores, estudiaron la pirólisis de residuos de HDPE con el objetivo de optimizar el rendimiento de productos líquidos obtenidos a una temperatura de 400 a 550 °C. Los resultados muestran que el máximo rendimiento de productos líquidos es 23.96 %, el cual se obtiene a una temperatura de 450 °C. Asimismo se determinó que el rendimiento de productos líquidos obtenidos aumenta con el tiempo de residencia de la alimentación. El producto líquido fue analizado usando FTIR y GC-MS. Las propiedades físicas del producto pirolítico muestran la presencia de una mezcla de diferentes fracciones de combustible como gasolina, kerosene y diésel [25].

En el 2009 en Corea del Sur, Jung y su equipo de investigación estudiaron la pirólisis de residuos del PP y PE para la obtención de compuestos aromáticos en un reactor de lecho fluidizado. Se investigó la influencia de la temperatura de operación en el rango 650 a 750 °C. Asimismo, en cada experimento la alimentación fue de 0.5 kg y se usaron 1.5 kg de arena de cuarzo como material de lecho fluidizado. El reactor fue calentado indirectamente por electricidad, estaba hecho de acero inoxidable tipo 316 con una altura de 300 mm y un diámetro interior de 80 mm. En el caso del HDPE se obtuvo un rendimiento de 61 % de productos líquidos [26].

En el 2004 en Turquía, Demirbas y sus colaboradores, investigaron la pirólisis de residuos plásticos, entre ellos el HDPE. La muestra tenía 1 g de masa y un tamaño de partícula de 3 mm x 5 mm, asimismo, el horno tenía una velocidad de calentamiento de 10 K/min. El reactor tubular estaba hecho de acero inoxidable con una altura de 76.4 mm y diámetro interno de 17 mm. La temperatura que maximiza el rendimiento de productos líquidos fue 725 K, obteniendo para el caso del HDPE, un rendimiento de 40 % aproximadamente. Asimismo, está compuesta por 39.8 % de parafinas, 38.9 % de olefinas, 18.5 % de naftenos, 1.7 % de aromáticos y 1.1 % de otros compuestos [27].

La presente investigación busca determinar el rendimiento de combustibles líquidos obtenido mediante pirólisis de residuos de HDPE en un reactor tubular vertical, asimismo se pretende estudiar la influencia de la temperatura de operación y el efecto del tamaño de la partícula en el rendimiento de líquidos de pirólisis.

II. MÉTODOS Y MATERIALES

A. Residuos de polietileno de alta densidad

Se adquirió treinta (30) kg de una muestra de residuos de HDPE lavados y molidos por parte de la empresa "Multiservicios de Molido y Lavado de Plástico E.I.R.L." (MMOLPLAST E.I.R.L.) ubicada en el distrito de Puente Piedra - Lima. Los gránulos con los cuales está conformado la muestra son de color plomo y presentan un tamaño de partícula que varía desde 0 mm hasta 8 mm aproximadamente. En la Fig. 1 se presenta la muestra de residuos de HDPE.



Fig. 1 Muestra de residuos de HDPE

B. Caracterización del polietileno de alta densidad

Se realizó un tamizado clasificando en cuatro grupos según el tamaño de partícula: de 0 a 2 mm, de 2 a 4 mm, de 4 a 6 mm y de 6 a 8 mm de lado respectivamente. Luego la muestra de HDPE fue caracterizada mediante la determinación de sus propiedades físicas como el poder calorífico (ASTM D240) y densidad aparente (ASTM E873) mediante el uso de procedimientos estandarizados por la American Society for Testing and Materials (ASTM) los cuales fueron realizados en las instalaciones del Laboratorio de Normalización de Petróleo y Derivados de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI).

El poder calorífico de una muestra es la cantidad de calor que esta produce cuando combustiona completamente. Se determina empleando una bomba calorimétrica. El poder calorífico superior o bruto considera al agua en estado líquido y el poder calorífico inferior o neto considera al agua como vapor. Se midió el poder calorífico bruto de los residuos de HDPE pesando una muestra de aproximadamente 0.8 g y quemándola en un calorímetro adiabático Parr modelo 1341, con oxígeno a alta presión bajo condiciones controladas. El poder calorífico superior se calcula a partir de observaciones de la temperatura antes, durante y después de la combustión, realizando las correcciones necesarias por la transferencia de calor y formación de productos [19], [28], [29].

La determinación del contenido de humedad es importante en el análisis de una muestra, ya que el agua está presente casi siempre. Puede permanecer ocluida en los poros, estar combinada químicamente o presentarse como un contenido superficial adquirido durante su lavado, transporte y almacenamiento. El agua superficial desaparece mediante secado al aire a la temperatura ambiente; calentando a poco más de 100 °C (110 °C) desaparece totalmente [19], [30].

La densidad es la relación existente entre la masa de un cierto volumen y el valor de ese volumen. Salvo que no se indique lo contrario, el valor de la densidad corresponde a unas condiciones de 15°C. Se halló mediante pesado en una balanza y luego se determinó el volumen en un vaso de precipitado graduado [28].

Asimismo, se realizó el análisis la muestra mediante Espectroscopia infrarroja de transformada de Fourier (FTIR) en un equipo Shimadzu IRAffinity-1 con ayuda de un ATR modelo MIRacle de la marca Pike Technology, para la generación de los espectros fue utilizado el software IRSolution. De igual forma se realizó un análisis termogravimétrico en un analizador TGA 4000 de Perkin Elmer usando el software Pyrys Manager para generar la curva de análisis termogravimétrico (TG) y la curva de análisis de la derivada termogravimétrica (DTG). La curva TG mide el cambio de masa de la sustancia en función de la temperatura y el tiempo [25]. Por otro lado, la curva DTG nos da información sobre la etapa de degradación ocurrida durante el proceso, ello se indica mediante el número de picos [25], [31].

C. Caracterización de Patrón de HDPE

Para validar la caracterización de la muestra de residuos de HDPE se empleó un patrón de trabajo con el cual los resultados obtenidos puedan ser comparados, este patrón de trabajo se estableció que fuera un residuo plástico donde este impreso el símbolo de reciclaje y el código numérico de identificación del polímero, el número dos (2) para el caso del HDPE [29], [32]. Se realizó un análisis FTIR y análisis termogravimétrico al patrón de trabajo, posteriormente los resultados fueron comparados con los de la muestra de residuos de HDPE.

D. Procedimiento de pirólisis de residuos de HDPE

Para el procedimiento experimental se pensó usar un reactor horizontal tubular (velocidad de calentamiento de 10 °C/min) empleado anteriormente en otra investigación para el uso de obtención de bio-petróleo a partir de biomasa de palma aceitera y bagazo de caña de azúcar [19]. Se realizaron pruebas experimentales en dicho reactor y se obtuvo como resultado la formación de ceras (no se obtuvo productos líquidos) a pesar de que se variaron las temperaturas entre 450 °C y 700 °C. Las ceras son un producto no deseado ya que la investigación está orientada a la producción de combustibles líquidos, por esta razón se planteó el diseño de un nuevo reactor.

De los resultados de las propiedades físicas y de las referencias revisadas, se diseñó y construyó un reactor tubular vertical de acero inoxidable con una zona de reflujo y con capacidad para 50g de residuos de HDPE. Como fuente de calor se utilizó un horno eléctrico tipo mufla de la marca Thermoline (Modelo F30400), junto a un controlador PID, se proporciona el flujo de calor al reactor de pirólisis mediante una resistencia eléctrica lográndose una velocidad de calentamiento de 20 °C/min.

El aire dentro del reactor y los vapores generados fueron retirados mediante una bomba de vacío marca Gast Modelo DOA-P504-BN y llevados a un sistema de condensación que consiste en recipientes de recolección sumergidos en un baño de agua a 1 °C de temperatura, el cual es enfriado mediante un Chiller de la marca Polyscience. Los gases no condensables fueron enviados a un sistema de lavado de gases que emplea frascos lavadores y una solución metanol e hidróxido de sodio, para luego ser venteados. El esquema del sistema se muestra en la Fig. 2.

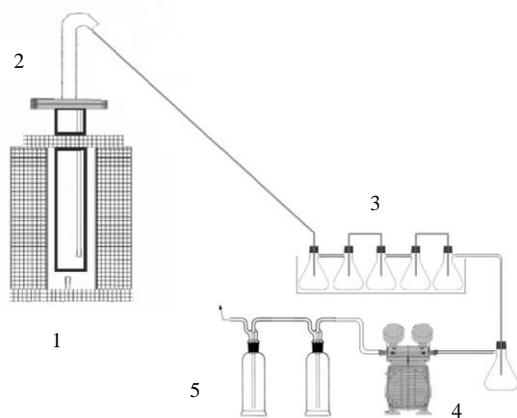


Fig. 2 Esquema experimental del proceso de pirólisis: 1) Horno y reactor, 2) Zona de reflujo del reactor, 3) Sistema de condensación, 4) Bomba de vacío, 5) Sistema de lavado de gases

De acuerdo con las referencias [33]–[35], se estableció como parámetros del proceso la presión de operación de 66.6 kPa abs. y la velocidad de calentamiento de 20 °C/min. Con lo cual se estudió el efecto de la temperatura en el reactor (525 550 y 575 °C) sobre los rendimientos de productos líquidos en las muestras con un tamaño de partícula de 2 a 4 mm y 4 a 6 mm respectivamente, posteriormente se estudió el efecto del tamaño de partícula (2 - 4 mm, 4 - 6 mm y 6 - 8 mm) a la temperatura de 550 °C para el mismo fin. Cada ensayo experimental duro 180 minutos para cada condición operativa y fueron realizados por triplicado para asegurar su repetibilidad.

III. RESULTADOS

A. Resultados de la caracterización de la muestra de HDPE

Del proceso de tamizado realizado a la muestra de HDPE, se clasificó en cuatro grupos según el tamaño de partícula (desde el grupo 0 al grupo 3). En la Fig. 3 se muestra cada uno de los grupos de residuos de HDPE generados luego del tamizado.

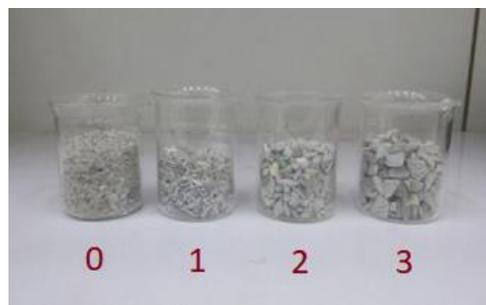


Fig. 3 Clasificación en grupos según el tamaño de partícula de residuos de HDPE

Además, se determinó la composición en porcentaje en masa de cada grupo respecto a la muestra original, en la Tabla I se presentan los resultados del proceso de tamizado.

TABLA I
RESULTADOS DEL PROCESO DE TAMIZADO DE RESIDUOS DE HDPE

Grupo	Tamaño de Partícula mínimo (mm)	Tamaño de Partícula máximo (mm)	Composición de cada grupo en la muestra (%masa)
0	>0	2	5%
1	2	4	25%
2	4	6	50%
3	6	8	20%

De los grupos mostrados en la Tabla 1, el grupo 0 fue usado para caracterizar a la muestra mediante la determinación de sus propiedades físicas y los grupos del 1 al 3 fueron usados para el proceso de pirólisis. En la Tabla II se muestran los resultados de las propiedades fisicoquímicas de la muestra de HDPE.

TABLA II
PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS RESIDUOS DE HDPE

Ensayo	Método de ensayo	Resultado
Poder Calorífico Bruto (MJ/kg)	ASTM D240	36.85
Densidad Aparente (kg/m ³)	ASTM E873	1250

Asimismo, se realizó un análisis FTIR a la muestra de residuos de HDPE. En la Fig. 4 se observa el espectro del análisis FTIR de dicha muestra generado por el Software IRSolution.

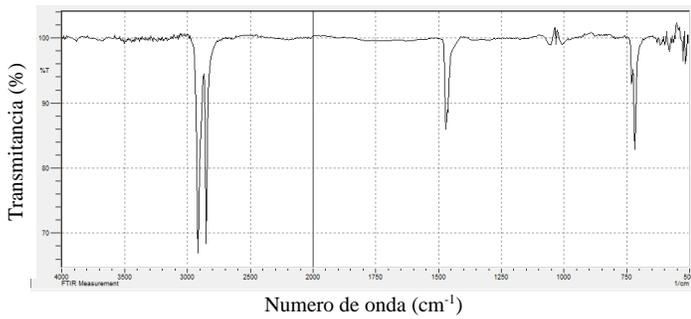


Fig. 4 Resultados del análisis FTIR a los residuos de HDPE

De igual forma, en la Fig. 5 se presentan la curva TG y la curva DTG de la muestra de residuos de HDPE usando el software Pyrys Manager.

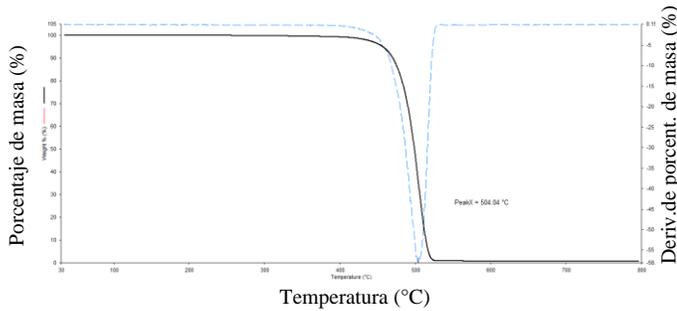


Fig. 5 Curvas TG y DTG de la muestra de residuos de HDPE (Negro: TGA, Azul: DTG)

B. Resultados de la caracterización de Patrón de HDPE

Se realizó el análisis FTIR al patrón de trabajo. En la Fig. 6 se observa el espectro FTIR del patrón de HDPE generado con el software IRSolution.

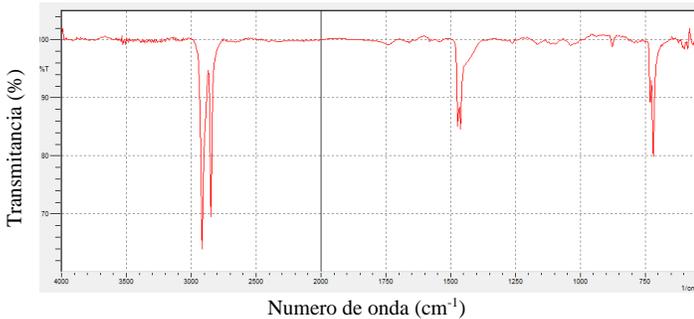


Fig. 6 Resultados del análisis FTIR del patrón de residuos de HDPE

Asimismo, se realizó el análisis termogravimétrico al patrón de residuos de HDPE. En la Fig. 7 se observa las curvas TG y DTG de dicho análisis con ayuda del software Pyrys Manager.

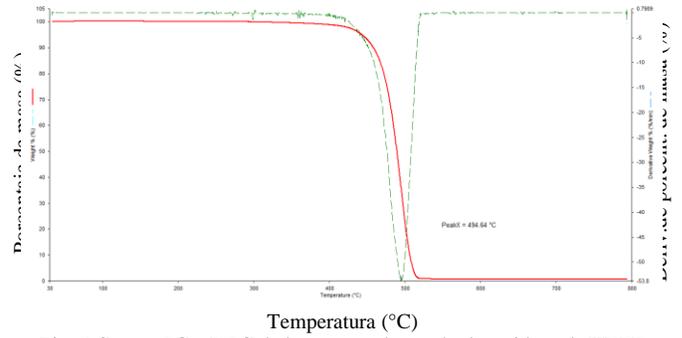


Fig. 7 Curvas TG y DTG de la muestra de patrón de residuos de HDPE (Rojo: TGA, Verde: DTG)

C. Resultados del efecto de la temperatura en el rendimiento de productos líquidos

Se obtuvieron resultados experimentales del efecto de la temperatura de pirólisis sobre los rendimientos de los productos líquidos para los tamaños de partícula de 2 a 4 mm y 4 a 6 mm respectivamente. En la Tabla III se muestran los rendimientos de productos obtenidos a cada temperatura de operación para los tamaños de partícula mencionados.

TABLA III
EFECTO DE LA TEMPERATURA EN EL RENDIMIENTO DE PRODUCTOS DE LA PIRÓLISIS DE RESIDUOS DE HDPE

Temperatura de operación (°C)	Tamaño de partícula 2 a 4 mm			Tamaño de partícula 4 a 6 mm		
	Productos Líquidos (% masa)	Productos Sólidos (% masa)	Productos Gaseosos (% masa)	Productos Líquidos (% masa)	Productos Sólidos (% masa)	Productos Gaseosos (% masa)
525	81	7	12	81	4	15
550	85	8	7	88	5	7
575	86	9	5	82	7	11

D. Resultados del efecto del tamaño de partícula en el rendimiento de productos líquidos

De los resultados obtenidos se fijó la temperatura a 550 °C y se varió el tamaño de partícula para estudiar el efecto del tamaño de partícula en el rendimiento de productos líquidos. En la Tabla IV se muestran los rendimientos de productos obtenidos a dicha temperatura.

TABLA IV
EFECTO DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA EN EL RENDIMIENTO DE PRODUCTOS DE LA PIRÓLISIS DE RESIDUOS DE HDPE

Tamaño de partícula (mm)	Temperatura de operación 550°C		
	Productos Líquidos (% masa)	Productos Sólidos (% masa)	Productos Gaseosos (% masa)
2 a 4	85	8	7
4 a 6	88	5	7
6 a 8	86	8	6

IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A. Discusión de la caracterización de HDPE

Se comparó los resultados del Análisis FTIR de la muestra de HDPE frente al espectro del patrón. En la Fig. 8 se muestran los espectros FTIR mencionados.

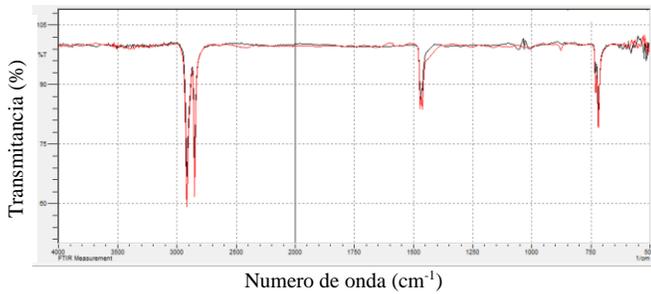


Fig. 8 Espectros FTIR de la muestra de residuos de HDPE y el patrón (Negro: Muestra de residuos de HDPE, Rojo: Patrón de HDPE)

Los espectros generados, posteriormente con ayuda del software IRSolution son superpuestos y comparados. En la Fig. 8, se observa que la superposición de los espectros coincide a lo largo de todo el número de onda analizado (de 500 cm^{-1} a 4000 cm^{-1}), con esto se comprueba que la muestra está conformada por residuos de HDPE.

Asimismo, con ayuda del software Pyrys Manager se superpusieron las curvas TG de la muestra de residuos de HDPE y del patrón. En la Fig. 9, se observa la superposición de las curvas TG mencionadas entonces ambas curvas TG tienen un comportamiento similar y prácticamente coinciden, lo que se confirma el análisis FTIR de que en ambos casos (muestra y patrón) los residuos son HDPE [36].

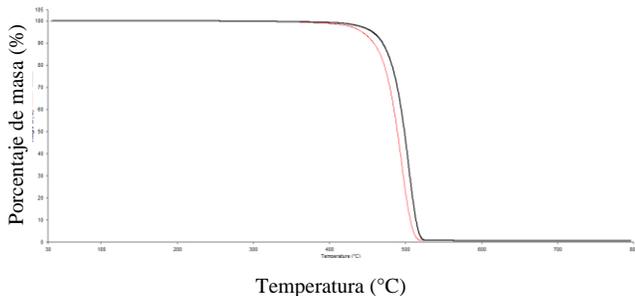


Fig. 9 Curvas TG de la muestra de residuos de HDPE y patrón (Negro: Muestra, Rojo: Patrón)

B. Discusión de los resultados del efecto de la temperatura en el rendimiento de productos líquidos

En la Fig. 10 se muestran los resultados obtenidos sobre el rendimiento de productos líquidos de la pirólisis de residuos de HDPE y la influencia de la temperatura. Se observa que, para el tamaño de partícula de 2 a 4 mm, la temperatura de operación tiene un efecto directo sobre el rendimiento de combustibles líquidos —a mayor temperatura, mayor rendimiento—, esto debido a que la temperatura ayuda a la

ruptura de los enlaces del termoplástico, formando productos en estado líquido.

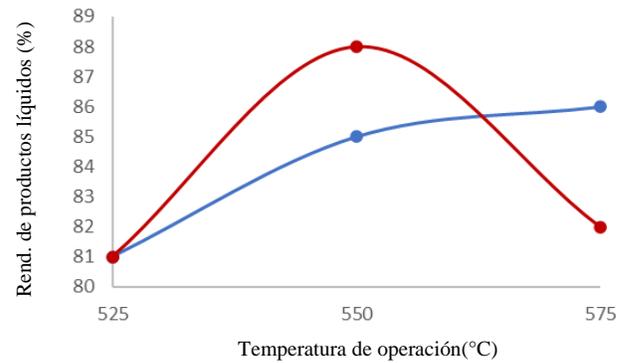


Fig. 10 Influencia de la temperatura en el rendimiento de productos líquidos (Azul: Tamaño de partícula de 2 a 4 mm, Rojo: Tamaño de partícula de 4 a 6 mm)

Para el tamaño de partícula de 4 a 6 mm, se observa que, a temperaturas moderadas, la temperatura de operación tiene un efecto directo al igual que en el caso de las partículas de 2 a 4 mm de tamaño. Pero a temperaturas severas, las rupturas de los enlaces del polímero son más efectivas que a condiciones moderadas, generando producción de componentes gaseosos, disminuyendo la formación de productos líquidos. Es por esta razón que existe una temperatura a la cual se obtiene el máximo rendimiento de productos líquidos. Asimismo, según las referencias revisadas otro factor que influye en el rendimiento es la velocidad de calentamiento donde a mayor velocidad de calentamiento, mayor rendimiento de productos líquidos [24], [27], [31].

C. Discusión de los resultados del efecto del tamaño de partícula en el rendimiento de productos líquidos

En la Fig. 11 se muestran los resultados obtenidos del rendimiento de productos líquidos de la pirólisis de residuos de HDPE a 550 °C y la influencia del tamaño de partícula.

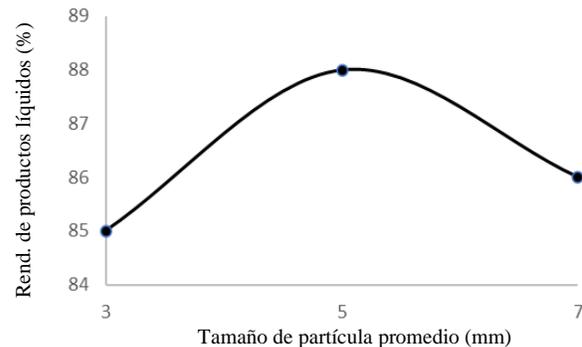


Fig. 11 Influencia del tamaño de partícula en el rendimiento de productos líquidos

De las referencias revisadas [22]–[27] y los resultados experimentales obtenidos a la temperatura de 550 °C mostrados en la Fig. 11, se puede establecer que el tamaño de

REFERENCIAS

partícula tiene influencia sobre el rendimiento de productos líquidos. Existe un tamaño de partícula (tamaño de partícula óptimo) en el cual se obtiene el mayor rendimiento de productos líquidos. En relación con lo mencionado —a tamaños de partícula bajos, el rendimiento de productos líquidos disminuye—, esto debido que las rupturas generadas por la temperatura de operación se vuelven más efectivas generando productos gaseosos y residuo carbonoso, disminuyendo así el rendimiento de productos líquidos. Asimismo, —A tamaño de partícula altos, el rendimiento de productos líquidos también disminuye— ya que la molécula del polímero al ser de mayor tamaño, dificulta la rupturas de enlaces, disminuyendo así el rendimiento de productos líquidos y gaseosos [37].

V. CONCLUSIONES

Se determinó que las condiciones experimentales que maximizan el rendimiento de productos líquidos son: Presión de operación de 34.66 kPa abs., velocidad de calentamiento (horno) de 20 °C/min, temperatura de operación de 550 °C, tamaño de partícula de 4 a 6 cm. Con los cuales se obtiene un rendimiento de productos líquidos de 88 %, un rendimiento de productos gaseosos de 10 % y un rendimiento de residuo sólido (residuo carbonoso) de 2 %.

Las condiciones de presión y velocidad de calentamiento establecidas son las mejores que se podían alcanzar con los equipos disponibles. Por lo tanto, se concluye que es factible obtener fracciones líquidas denominadas combustibles líquidos en la pirólisis al vacío de residuos de HDPE. Las condiciones operativas son relativamente moderadas en presión (34.66 kPa abs.) y temperatura de operación (550 °C). Asimismo, se puede concluir que se obtienen subproductos como el residuo carbonoso con bajo porcentaje de rendimiento y gases incondensables los cuales no han sido investigados en el presente estudio.

Adicionalmente, también se puede concluir que los residuos de HDPE obtenidos de la industria plástica son reciclados de manera mecánica y limitada. La densificación energética empleando procesos termoquímicos como la pirólisis podría originar productos como los combustibles líquidos que pueden ser fácilmente almacenados, transportados y empleados en diversas industrias, de esta forma dando una valorización energética a los residuos sólidos, aportando al desarrollo sostenible basado en la economía circular.

AGRADECIMIENTOS

Los Investigadores agradecen al Grupo de Investigación en Procesos Termoquímicos y Energéticos por el apoyo experimental e intelectual en el proyecto. Asimismo, 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 financiamiento del proyecto.

- [1] J. Sánchez, "La industria plástica en el Perú – MAXIMIXE | Alerta Económica," 2017. <https://alertaeconomica.com/la-industria-plastica-en-el-peru/> (accessed Jun. 23, 2021).
- [2] Exploplast Perú, "Inicios de la industria plástica nacional | Plast Perú Digital Noticia 2017," 2017. <http://expoplastperu.com/plastnews/inicios-de-la-industria-plastica-nacional-32/> (accessed Oct. 10, 2018).
- [3] R. Rivera, "Propuesta de reciclaje mecánico de plásticos en la ciudad de Piura," *Repos. Inst. PIRHUA - Univ. Piura*, 2004.
- [4] C. Lujan, "Competitividad e innovación. Integración de la cadena petroquímica de plásticos en el Peru con origen en las olefinas a partir del Gas Natural de Camisea," Universidad Nacional de Ingeniería, 2013.
- [5] Asociación Peruana de Industria Plástica, "Situación de la Industria Plástica en el Perú. Importaciones de Materia Prima de los últimos seis años," 2017, Accessed: Apr. 25, 2018. [Online]. Available: <http://apiplastperu.com/situacion.pdf>.
- [6] Universidad de Piura, "Los Plásticos y La industria del Plástico en el Perú (Capítulo 1)," *I*, p. 20, 2004.
- [7] P. S. Varbanov *et al.*, "An argument for developing waste-to-energy technologies in Saudi Arabia," *Chem. Eng. Trans.*, vol. 45, pp. 337–342, 2015, doi: 10.3303/CET1545057.
- [8] R. Rivera, "Normatividad reciclaje de plásticos," p. 97, 2012, [Online]. Available: http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_63_186_28_551.pdf.
- [9] MINAM, "Consumo responsable del plástico y reducción del plástico de un solo uso," 2018.
- [10] L. Cai, J. Wang, J. Peng, Z. Wu, and X. Tan, "Observation of the degradation of three types of plastic pellets exposed to UV irradiation in three different environments," *Sci. Total Environ.*, vol. 628–629, pp. 740–747, 2018, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.02.079.
- [11] B. Gewert, M. M. Plassmann, and M. Macleod, "Pathways for degradation of plastic polymers floating in the marine environment," *Environ. Sci. Process. Impacts*, vol. 17, no. 9, pp. 1513–1521, 2015, doi: 10.1039/c5em00207a.
- [12] J. Wang, Z. Tan, J. Peng, Q. Qiu, and M. Li, "The behaviors of microplastics in the marine environment," *Mar. Environ. Res.*, vol. 113, pp. 7–17, 2016, doi: 10.1016/j.marenvres.2015.10.014.
- [13] APIPLAST, "Reporte estadístico de importaciones de materia prima - Agosto 2020," 2020.
- [14] Sociedad Nacional de Industrias, "Guía de la Industria Plástica," 2017. <http://plastic-concept.com/Guia-dela-Industria-Plastica/> (accessed Feb. 11, 2019).
- [15] OSINERGMIN, "Reporte Semestral de Monitoreo del mercado de hidrocarburos," Lima, 2019. [Online]. Available: <https://www.mendeley.com/viewer/?fileId=71bbb71a-89a9-2ff7-3977-9900f4188f8b&documentId=e4c3f701-4d03-3d67-9234-6dde7c080040>.
- [16] R. Miandad, M. Barakat, A. S. Aburizaiza, M. Rehan, and A.-S. Nizami, "Catalytic pyrolysis of plastic waste: A review," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 102, no. June, pp. 822–838, 2016, doi: 10.1016/j.psep.2016.06.022.
- [17] F. Abnisa and W. M. A. Wan Daud, "A review on co-pyrolysis of biomass: An optional technique to obtain a high-grade pyrolysis oil," *Energy Convers. Manag.*, vol. 87, pp. 71–85, 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2014.07.007.
- [18] M. S. Abbas-Abadi, M. N. Haghghi, H. Yeganeh, and A. G. McDonald, "Evaluation of pyrolysis process parameters on polypropylene degradation products," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 109, pp. 272–277, 2014, doi: 10.1016/j.jaap.2014.05.023.
- [19] V. Pretell, "Pirólisis Rápida de Biomasa de Palma Africana y Caña de Azúcar para la obtención de Bio-Petróleo," Lima, 2013.
- [20] M. Sarker, M. M. Rashid, M. Molla, and M. S. Rahman, "A new technology proposed to recycle waste plastics into hydrocarbon fuel in USA," *Int. J. Energy Environ.*, vol. 3, no. 5, pp. 749–760, 2012.
- [21] K. H. Lee and D. H. Shin, "Characteristics of liquid product from the pyrolysis of waste plastic mixture at low and high temperatures:

- Influence of lapse time of reaction," *Waste Manag.*, vol. 27, no. 2, pp. 168–176, 2007, doi: 10.1016/j.wasman.2005.12.017.
- [22] S. M. Al-Salem, "Thermal pyrolysis of high density polyethylene (HDPE) in a novel fixed bed reactor system for the production of high value gasoline range hydrocarbons (HC)," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 127, pp. 171–179, 2019, doi: 10.1016/j.psep.2019.05.008.
- [23] P. Das and P. Tiwari, "Valorization of packaging plastic waste by slow pyrolysis," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 128, no. June 2017, pp. 69–77, 2018, doi: 10.1016/j.resconrec.2017.09.025.
- [24] I. Ahmad *et al.*, "Pyrolysis Study of Polypropylene and Polyethylene Into Premium Oil Products," *Int. J. Green Energy*, vol. 12, no. 7, pp. 663–671, 2015, doi: 10.1080/15435075.2014.880146.
- [25] S. Kumar and R. K. Singh, "Recovery of hydrocarbon liquid from waste high density polyethylene by thermal pyrolysis," *Brazilian J. Chem. Eng.*, vol. 28, no. 4, pp. 659–667, 2011, doi: 10.1590/S0104-66322011000400011.
- [26] S. H. Jung, M. H. Cho, B. S. Kang, and J. S. Kim, "Pyrolysis of a fraction of waste polypropylene and polyethylene for the recovery of BTX aromatics using a fluidized bed reactor," *Fuel Process. Technol.*, vol. 91, no. 3, pp. 277–284, 2010, doi: 10.1016/j.fuproc.2009.10.009.
- [27] A. Demirbas, "Pyrolysis of municipal plastic wastes for recovery of gasoline-range hydrocarbons," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 72, no. 1, pp. 97–102, 2004, doi: 10.1016/j.jaap.2004.03.001.
- [28] W. Ramos, "Obtención de combustibles a partir de residuos de polipropileno," Universidad Nacional de Ingeniería, 2017.
- [29] W. Ramos, "Obtención de combustibles líquidos mediante pirólisis catalítica de residuos plásticos," Universidad Nacional de Ingeniería, 2020.
- [30] V. Pretell and R. Erazo, "Evaluación de las Propiedades Físicoquímicas y Termogravimétricas de Tres Biomásas Peruanas para su uso Energético," in *Proceedings of the 17th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: "Industry, Innovation, and Infrastructure for Sustainable Cities and Communities,"* 2019, no. July, pp. 24–26, doi: 10.18687/LACCEI2019.1.1.282.
- [31] S. D. Anuar Sharuddin, F. Abnisa, W. M. A. Wan Daud, and M. K. Aroua, "A review on pyrolysis of plastic wastes," *Energy Convers. Manag.*, vol. 115, pp. 308–326, 2016, doi: 10.1016/j.enconman.2016.02.037.
- [32] Y. Guardado, "Origen y significado de los símbolos de reciclaje," *Bioma*, vol. 1, no. 3, pp. 37–38, 2013.
- [33] M. Mancheno, P. Arévalo, J. Romero, I. Malo, and R. Ramos, "Introducción," vol. 26, no. 2, pp. 106–118, 2017.
- [34] V. Pretell, W. Ramos, and R. Silva, "Pirólisis Catalítica de Residuos de Polietileno de Alta Densidad Usando Catalizador de Equilibrio de FCC," in *Proceedings of the 18th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: Engineering, Integration, And Alliances for A Sustainable Development "Hemispheric Cooperation for Competitiveness and Prosperity on A Knowledge-Bas,* 2020, pp. 27–31, doi: 10.18687/LACCEI2020.1.1.105.
- [35] C. Lujan, V. Pretell, and W. Ramos, "Pirólisis Catalítica de Residuos de Polipropileno para la Obtención de Combustibles Líquidos," in *Proceedings of the 17th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: "Industry, Innovation, and Infrastructure for Sustainable Cities and Communities,"* 2019, no. July, pp. 24–26, doi: 10.18687/LACCEI2019.1.1.302.
- [36] E. Villegas, "Caracterización de polímeros aplicando el método termogravimétrico," pp. 25–32, 2012.
- [37] R. Bagri and P. T. Williams, "Catalytic pyrolysis of polyethylene," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 63, no. 1, pp. 29–41, 2002, doi: 10.1016/S0165-2370(01)00139-5.