

# Pyrolysis of Expanded Polystyrene Waste to Obtain Liquid Fuels

Williams Ramos, MSc.<sup>1</sup>, Valery Zamudio, Bach.<sup>2</sup>, Erick Villegas, Bach.<sup>2</sup>, Herbert Manrique, MSc.<sup>1</sup> and Victor Pretell, MSc.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, wramosv@uni.edu.pe, hmanrique@uni.edu.pe, vpretellh@uni.edu.pe

<sup>2</sup>Universidad Nacional del Centro del Perú, Perú, vzamudiochavez@gmail.com, erickfini20@gmail.com

**Abstract**– This research studies the effect of operating temperature and particle size on the yield of liquid products from the pyrolysis process of expanded polystyrene (EPS) waste. For the experiment, the EPS samples were collected, washed and crushed, likewise a pretreatment was carried out in which the residues were heated at 150 °C for 10 min to reduce their volume, preserving the initial mass. The pretreated sample was ground and sieved into two different particle sizes (0–5 and 5–10 mm). For the experiments, a horizontal tubular reactor was used, which operated at a pressure of 34.66 kPa for 3 hours and at a heating rate of 10 °C/min. Pyrolysis was carried out at temperatures of 400, 450, 500 and 550°C, varying with the two particle sizes indicated above. It was determined that the operating temperature and particle size have a direct effect on the performance of liquid products. Likewise, the operating conditions that maximize the yield of liquid products were the temperature of 550 °C and the particle size of 5-10 mm, obtaining a yield of liquid products of 97.8%, gaseous products of 1.2% and solid products of 1.0%.

**Keywords**-- Pyrolysis, Expanded polystyrene, Waste, Fuels

**Digital Object Identifier (DOI):**  
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.353>  
**ISBN:** 978-628-95207-0-5 **ISSN:** 2414-6390

# Pirólisis de Residuos de Poliestireno Expandido para la Obtención de Combustibles Líquidos

Williams Ramos, MSc.<sup>1</sup>, Valery Zamudio, Bach.<sup>2</sup>, Erick Villegas, Bach.<sup>2</sup>, Herbert Manrique, MSc.<sup>1</sup> and Victor Pretell, MSc.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, wramosv@uni.edu.pe, hmanrique@uni.edu.pe, vpretellh@uni.edu.pe

<sup>2</sup>Universidad Nacional del Centro del Perú, Perú, vzamudiochavez@gmail.com, erickfini20@gmail.com

**Resumen**– La presente investigación estudia el efecto de la temperatura de operación y del tamaño de partícula en el rendimiento de productos líquidos del proceso de pirólisis de residuos de poliestireno expandido (EPS). Para el experimento, las muestras de EPS fueron recolectadas, lavadas y trituradas, asimismo se realizó un pretratamiento en la cual los residuos fueron calentados a 150 °C por 10 min para reducir su volumen, conservando la masa inicial. La muestra pretratada fue molida y tamizada en dos diferentes tamaños de partículas (0–5 y 5–10 mm). Para los experimentos se utilizó un reactor tubular horizontal el cual operó a una presión de 34.66 kPa por 3 horas y a una velocidad de calentamiento de 10 °C/min. Se realizó la pirólisis a temperaturas de 400, 450, 500 y 550°C variando con los dos tamaños de partícula señalados anteriormente. Se determinó que la temperatura de operación y el tamaño de partícula tienen un efecto directo en el rendimiento de productos líquidos. Asimismo, las condiciones operativas que maximizan el rendimiento de productos líquidos fueron la temperatura de 550 °C y el tamaño de partícula de 5–10 mm, obteniendo un rendimiento de productos líquidos de 97.8 %, productos gaseosos de 1.2 % y productos sólidos de 1.0 %.

**Palabra claves**-- Pirólisis, Poliestireno expandido, Residuos, Combustibles

**Abstract**– This research studies the effect of operating temperature and particle size on the yield of liquid products from the pyrolysis process of expanded polystyrene (EPS) waste. For the experiment, the EPS samples were collected, washed and crushed, likewise a pretreatment was carried out in which the residues were heated at 150 °C for 10 min to reduce their volume, preserving the initial mass. The pretreated sample was ground and sieved into two different particle sizes (0–5 and 5–10 mm). For the experiments, a horizontal tubular reactor was used, which operated at a pressure of 34.66 kPa for 3 hours and at a heating rate of 10 °C/min. Pyrolysis was carried out at temperatures of 400, 450, 500 and 550°C, varying with the two particle sizes indicated above. It was determined that the operating temperature and particle size have a direct effect on the performance of liquid products. Likewise, the operating conditions that maximize the yield of liquid products were the temperature of 550 °C and the particle size of 5–10 mm, obtaining a yield of liquid products of 97.8%, gaseous products of 1.2% and solid products of 1.0%.

**Keywords**-- Pyrolysis, Expanded polystyrene, Waste, Fuels

## I. INTRODUCCIÓN

La industria del plástico en el Perú se desarrolla aproximadamente desde 1930, desde su inicio es abastecida por la importación de materias primas e insumos provenientes de la industria petroquímica mundial. Los únicos procesos que actualmente se realizan en el Perú son procesos mecánicos como el moldeado, el soplado, entre otros. Debido sus características tales como su bajo costo, ligereza, estabilidad y durabilidad, son muy utilizados. Los productos plásticos son desechados luego de su utilización, teniendo 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 [1], [2].

Se estima que en el Perú solo el 0.3 % de los residuos plásticos son reciclados mecánicamente, mientras que el 43.7 % son dispuestos en rellenos sanitarios como residuos sólidos urbanos (RSU) [2], [3]. De igual forma, se estima que el 56% de los residuos no son dispuestos correctamente, los cuales al permanecer en el medio ambiente son poco a poco fraccionados y degradados naturalmente, de esta forma se reduce su tamaño pudiendo llegar a los mares en forma de microplásticos (partículas menores a 5 mm) [2]–[6].

Uno de los productos plásticos más abundantes en el Perú es el Poliestireno Expandido (EPS), el cual contiene un 98% de aire y un 2% de poliestireno (PS), el PS es un polímero compuesto de una cadena larga de hidrocarburos con un grupo fenil unido a cada uno de los otros átomos de carbono. El EPS es muy utilizado en el envasado y embalaje debido a sus cualidades para la protección contra impactos, propiedades térmicas (buen aislante), ligereza y facilidad de conformado que le permiten adaptarse a las necesidades de cada producto a proteger. Los productos de EPS tienen un tiempo de vida relativamente corto, a diferencia de otros usos del PS donde el producto presenta un empleo más prolongado, pero la descomposición del EPS en el ambiente tarda más de 500 años por esta razón los residuos de EPS son considerados no aprovechables y tienen restricciones legales para su comercialización en ciertos usos [7]–[9].

Durante el año 2021 se estima que la producción total de residuos plásticos aprovechables en el Perú fue 29 762 toneladas de plásticos, de las cuales 2098 toneladas fueron PS. Asimismo, se generó aproximadamente 3 500 toneladas de residuos de EPS [10]. Por esta razón, es necesario buscar

**Digital Object Identifier (DOI):**

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.353>

**ISBN:** 978-628-95207-0-5 **ISSN:** 2414-6390

procedimientos para reciclar los residuos de EPS que se generan en el Perú.

En el Perú la principal fuente de energía son los combustibles fósiles y entre los más utilizados están el diésel y las gasolinas. A la fecha existe un déficit (comparado con la demanda) en la producción de combustibles líquidos en las refinerías de petróleo, por lo que es necesario importar combustibles y petróleo para abastecer el mercado interno. Se importan alrededor de 16.2 MMB al año de diésel y 7.9 MMB por año de gasolinas y 40.9 MMB de petróleo por año [11].

Actualmente se investigan métodos para el reciclaje químico de los residuos plásticos y se buscan nuevos procesos para la obtención de combustibles líquidos, tratando de cumplir dos objetivos: reutilizar los residuos plásticos y evitar o minimizar su impacto ambiental [12]–[15]

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 productos que salen del reactor pueden ser parcialmente condensados para obtener 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 agregado al proceso. Una de las posibles materias primas para la pirólisis son los residuos de EPS [13], [15]

La pirólisis de residuos plásticos es una reacción endotérmica que ocurre a altas temperaturas, presiones bajas o en vacío y en una atmósfera deficitaria en oxígeno. Las reacciones de pirólisis buscan la ruptura de las largas cadenas que conforman los polímeros para obtener 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. Estos productos de menor peso molecular, para el caso del PS, se obtienen a partir de un mecanismo de reacción consistente en una ruptura aleatoria que genera en su mayoría productos líquidos y gaseosos de menor masa molecular [15], [16]

Existen múltiples referencias sobre la pirólisis de PS. En 1999, en la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad del Petróleo en Beijing de China, se estudió la pirólisis de poliestireno un reactor de lecho fluidizado a temperaturas entre 450 a 700 °C. El mayor rendimiento de productos líquidos fue de 98.7 % a una temperatura de 600 °C. Un rendimiento similar de producto líquido (97.6 %) se obtuvo a una temperatura menor de 450 °C. Se concluyó que es preferible la temperatura más baja debido a que se obtiene ahorro energético [17].

En el 2004, el Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Selcuk Turquía, realizó la pirólisis de PS en un reactor batch y obtuvieron un rendimiento de producto líquido de 89.5 % a una temperatura de 581 °C. Concluyeron que realizar el proceso a una temperatura mayor a 500 °C no es recomendable si se desea maximizar la obtención de productos líquidos [18].

En el 2009, en el Instituto de Investigación de Energía y Recursos de la Universidad de Leeds en el Reino Unido, se realizó la investigación sobre la pirólisis de PS en una autoclave presurizada a temperaturas entre 300 a 500 °C con una duración de 60 minutos. La velocidad de calentamiento del reactor fue de 10 °C/min y la presión operacional varió entre 0.31 a 1.6 MPa. Los investigadores encontraron que la pirólisis del PS tenía un rendimiento de aproximadamente 97% a una temperatura de 425 °C, el máximo rendimiento de productos gaseosos fue de 2.5 % [19].

En el año 2016, la Universidad King Abdulaziz, la Universidad King Khalid de Arabia Saudita junto con la Universidad Cork de Irlanda realizaron una investigación sobre el efecto de la temperatura y el tiempo de reacción en el rendimiento de productos líquidos de la pirólisis de PS, la cual se realizó en un reactor batch a escala piloto. Donde se encontró que la temperatura y el tiempo de reacción óptimos fueron 450 °C y 75 minutos respectivamente; a estas condiciones de operación el rendimiento de productos gaseosos se fue 13 %, los productos sólidos fueron un 6.2 % y el rendimiento de productos líquidos llegaba a 80.8 %. El análisis de espectrofotometría de masa mostró que los productos líquidos estaban compuestos por un 48 % de estireno, un 26 % de tolueno y un 21 % de etil benceno. En cuanto a sus propiedades físicas, se encontró que el producto líquido tenía una viscosidad dinámica de 1.77 MPa, una densidad de 0.92 g/cm<sup>3</sup>, un punto de fluidez de -60 °C, un punto de enfriamiento de -64 °C, un punto de inflamación de 30.2 °C y un poder calorífico de 41.6 MJ/kg, el cual es similar al del diésel convencional [20].

Ese mismo año, se realizó estudios en la Universidad de Leeds de Reino Unido, la Universidad King Abdulaziz de Arabia Saudita y la Universidad de Aligarh Muslim de India, con el objetivo de comparar el rendimiento y la calidad del producto líquido obtenido en la pirólisis catalítica y pirólisis térmica de residuos de PS usando reactores a escala piloto. En la pirólisis térmica se obtuvo un rendimiento máximo de productos líquidos de 80.8 %, un rendimiento de productos gaseosos de 13 % y de producto sólido un 6.2 %. Mientras que en la pirólisis catalítica usando zeolita sintética, el rendimiento de productos líquidos decrece a 52 %, con incremento de productos gaseosos y productos sólidos de 17% y 30.1% respectivamente. Sin embargo, se observó que, aunque el rendimiento era menor, la calidad del producto líquido mejoraba al usar el catalizador. En cuanto a su composición química, el 99 % fueron hidrocarburos aromáticos, resultados que se obtuvieron de los análisis GC-MS y FTIR [21].

La presente investigación busca determinar el rendimiento en combustibles líquidos obtenido mediante pirólisis de residuos de EPS, asimismo se estudiará la influencia de la temperatura de operación y el efecto del tamaño de la partícula en el rendimiento de productos líquidos de pirólisis.

## II. MÉTODOS Y MATERIALES

### A. Muestra de Poliestireno Expandido

Se intento recolectar residuos de EPS de fuentes convencionales como envases, vasos, platos, empaques, etc. Sin embargo, debido a que este material es muy liviano y ocupa un gran volumen, se optó por adquirir 5 kg de residuos de EPS (conocido comúnmente en Perú como tecnopor) de la empresa “La Casa del Tecnopor S.R.L.”, el EPS fue previamente lavado, secado y molido. En la Fig. 1 se muestran los residuos de EPS usados.



Fig. 1 Muestra de residuos de EPS  
Fuente: Elaboración propia

### B. Caracterización de la Muestra de EPS

Para la caracterización de la muestra de EPS se determinó sus propiedades físicas, para lo cual se realizaron el análisis del poder calorífico mediante el método ASTM D240, la densidad aparente por el método ASTM E873, el contenido de humedad por el método ASTM E1756 y el contenido de ceniza por el método ASTM E1755 los cuales fueron realizados en el Laboratorio de Normalización de Petróleo y Derivados de la Universidad Nacional de Ingeniería.

Asimismo, se determinaron los grupos funcionales presentes en la muestra mediante Espectroscopia infrarroja de transformada de Fourier (FTIR) en un equipo Shimadzu IRAffinity-1 con ayuda de un ATR modelo Miracle 10 de la marca Pike Technology, para la generación de los espectros se empleó el software IRSolution. De igual forma se realizó un análisis termogravimétrico (TGA) en un analizador TGA 4000 de Perkin Elmer usando el software Pyrys Manager para generar la curva de análisis termogravimétrico (TG). La curva TG mide el cambio de masa de la muestra en función de la temperatura y el tiempo [2].

### C. Pretratamiento y Clasificación de la Muestra de EPS

De los resultados de caracterización, se estableció un proceso de pretratamiento para el EPS, y de esta manera poder reducir su volumen (aumentar densidad). El procedimiento consistió en tomar 100 g de EPS e introducirlo en una estufa y llevarlo a una temperatura de 150 °C por 10 min. El calentamiento en la estufa permitió que el EPS se compacte, aumentando su densidad. Este mismo procedimiento se realizó

por lotes hasta completar 5 kg de residuos de EPS. En la Fig. 2 se observan los trozos de EPS pretratado.



Fig. 2 Trozos de residuos de EPS pretratado  
Fuente: Elaboración propia

Después de ser realizado el pretratamiento, los trozos de EPS obtenidos fueron molidos con un mortero y posteriormente tamizados para ser clasificados en dos grupos en base a su tamaño de partícula, en la Tabla I y Fig. 3 se observa la clasificación por tamaño de partícula de la muestra de EPS pretratada.

TABLA I  
CLASIFICACIÓN DE MUESTRA DE EPS PRETRATADA

Grupo	Tamaño de partícula mínimo (mm)	Tamaño de partícula máximo (mm)
1	> 0	5
2	> 5	10

Fuente: Elaboración propia

En la Fig. 3 se observa cada uno de los grupos obtenidos luego del tamizado de la muestra de EPS pretratada.



Fig. 3 Clasificación en grupos de según tamaño de partícula de residuos de EPS pretratado: izquierda) Grupo 1, Derecha) Grupo 2  
Fuente: Elaboración propia

### D. Procedimiento de Pirólisis de los Residuos de EPS

Para el procedimiento experimental se usó un reactor horizontal tubular con capacidad de carga de 30 g de residuos de EPS pretratados, este reactor fue empleado anteriormente en una investigación para la de obtención de bio-petróleo a partir de biomasa de palma aceitera y bagazo de caña de azúcar donde es descrito en detalle [22]. Como fuente de calor se utilizó un horno eléctrico junto a un controlador PID, el cual proporciona el flujo de calor al reactor de pirólisis de acero inoxidable mediante una resistencia eléctrica lográndose una velocidad de calentamiento de 10 °C/min.

El aire dentro del reactor y los vapores generados son retirados de reactor mediante una bomba de vacío de la marca Gast Modelo DOA-P504-BN y llevados a un sistema de condensación que consiste en recipientes de recolección de vidrio sumergidos en un baño de agua enfriados mediante hielos gel. Los gases no condensables son removidos del sistema por la bomba de vacío para luego ser venteados. En la Fig. 4 se muestra el esquema del reactor de pirólisis utilizado en la investigación.

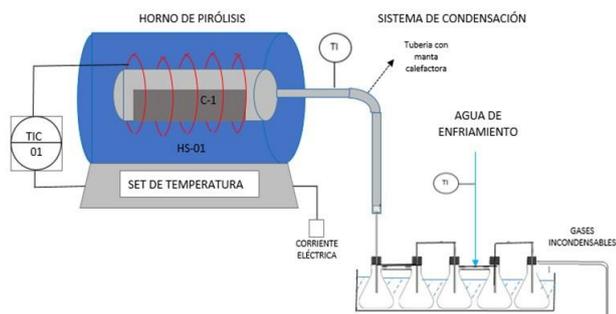


Fig. 4 Esquema experimental del proceso de pirólisis  
Fuente: [23]

De los resultados de las propiedades físicas y de las referencias revisadas, se estableció como condiciones operativas del proceso una presión de 34.66 kPa abs. y la velocidad de calentamiento de 10 °C/min. Con lo cual se estudió el efecto de la temperatura en el reactor (400, 450, 500 y 550 °C) sobre los rendimientos de productos líquidos en las muestras con un tamaño de partícula de 0 a 5 mm y 5 a 10 mm respectivamente, posteriormente se estudió el efecto del tamaño de partícula a las temperaturas y tamaño de partículas mencionadas anteriormente. Cada ensayo experimental duro 180 minutos para cada condición operativa y fueron realizados por triplicado para asegurar su repetibilidad.

### III. RESULTADOS

#### A. Caracterización de la Muestra de EPS

Los resultados de los ensayos de caracterización de la muestra de EPS se muestran en la Tabla II. Su alto contenido energético evidenciado por el PCS similar al diésel, su bajo contenido de humedad y cenizas indican el potencial de la carga para ser convertido en un combustible líquido.

TABLA II  
PROPIEDADES FÍSICAS DE MUESTRA DEEPS

Ensayo	Método	Resultado
Poder Calorífico Bruto (MJ/kg)	ASTM D240	41.058
Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )	ASTM E873	1.05
Contenido de humedad (%)	ASTM E1765	0.046
Contenido de ceniza (%)	ASTM E1755	0.063

Fuente: Elaboración propia a partir de [24]

El espectro IR se muestra en la Fig. 5, vemos que alrededor de 3120 a 2800 cm<sup>-1</sup> se presentan señales que

representan la vibración de estiramiento de los enlaces C-H en grupos aromáticos, luego en la región entre 1600 a 1400 cm<sup>-1</sup> existen tres señales que representan la vibración de estiramiento de los enlaces C-H en los grupos aromáticos, pero mejor definidas, los picos entre 1300 a 600 cm<sup>-1</sup> corresponden a la vibración de deformación de los enlaces C-H aromáticos. Alrededor de 1700 cm<sup>-1</sup> hay una pérdida característica de señal que indica la presencia del doble enlace (C=C) del grupo vinilo [25].

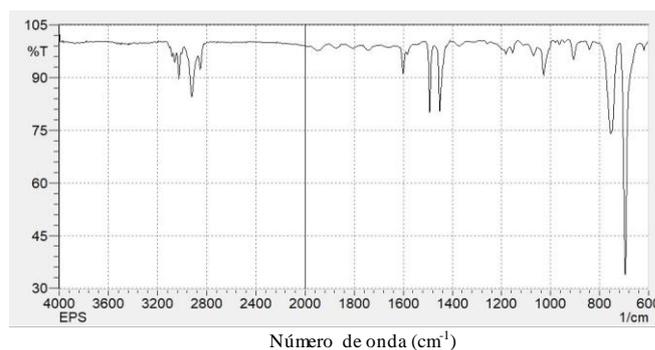


Fig. 5 Espectro FTIR de residuos de EPS  
Fuente: Elaboración propia

Se realizó el TGA de la muestra de EPS con una masa inicial de 10 mg, una temperatura inicial de 30 °C y una temperatura final de 800 °C. En la Fig. 6 se observa el termograma de la muestra de residuos de EPS donde se aprecia que la descomposición empieza a 380 °C y más del 95% esta descompuesto a 550 °C.

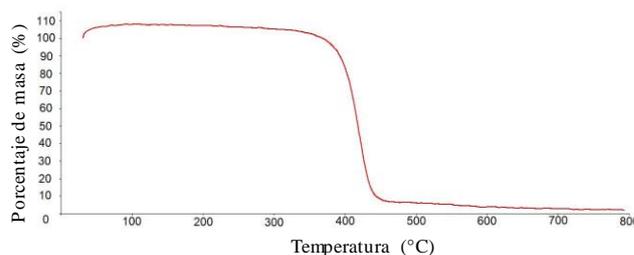


Fig. 6 Termograma de residuos de EPS  
Fuente: Elaboración propia

#### B. Resultados de la Pirólisis de los Residuos de EPS

Se obtuvieron resultados experimentales del efecto de la temperatura de pirólisis sobre los rendimientos de los productos líquidos para los tamaños de partícula de 0 a 5 mm y 5 a 10 mm respectivamente. Asimismo, se obtuvieron resultados del efecto del tamaño de partícula a las temperaturas de 400, 450, 500 y 550 °C. En la Tabla III se muestran los rendimientos de los productos obtenidos a cada condición operativa mencionada.

TABLA III  
RENDIMIENTO DE PRODUCTOS DE PIRÓLISIS DE RESIDUOS DE EPS

Temperatura de operación (°C)	Tamaño de partícula 0 a 5 mm			Tamaño de partícula 5 a 10 mm		
	Productos Líquidos (% masa)	Productos Sólidos (% masa)	Productos Gaseosos (% masa)	Productos Líquidos (% masa)	Productos Sólidos (% masa)	Productos Gaseosos (% masa)
400	87.2	3.5	9.3	94.3	3.7	2.0
450	87.7	6.7	5.6	96.3	2.3	1.4
500	94.2	3.5	2.3	96.8	2.0	1.2
550	96.3	3.2	0.5	97.8	1.0	1.2

Fuente: Elaboración propia

#### IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

##### A. Caracterización de la Muestra de EPS

Los resultados de las propiedades físicas coinciden prácticamente con las propiedades del EPS mostradas en la referencia [26]. El espectro FTIR mostrado en la figura coincide en los grupos funcionales del espectro de EPS mostrado en la referencia [27]. Por lo que se trataría de una muestra de EPS. Del análisis termogravimétrico se observa que los residuos de EPS pierden masa a partir de la exposición a una temperatura mayor que 250 °C, además según la referencia [7] se determina que la temperatura de reblandecimiento del EPS es 106.2 °C por lo que se estableció la temperatura de 150 °C para realizar el pretratamiento como lo indica la referencia [26].

##### B. Efecto de la Temperatura en el rendimiento de Productos Líquidos

En la Fig. 7 se muestran los resultados obtenidos del rendimiento de productos líquidos de la pirólisis de residuos de EPS y la influencia de la temperatura. Se observa que, para ambos tamaños de partícula, 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 polímero, formando productos que a condiciones ambientales se encuentran en fase líquida [15].

Además, las referencias indican que, a temperaturas más severas, las rupturas de los enlaces del polímero son más efectivas que a condiciones moderadas (condiciones operativas trabajadas en la investigación), generando una mayor producción de componentes gaseosos, disminuyendo la formación de productos líquidos. Asimismo, otro factor que influye en el rendimiento de productos líquidos es la velocidad de calentamiento, donde a mayor velocidad de calentamiento, mayor rendimiento de productos líquidos [12], [15], [18].

##### C. Efecto del Tamaño de Partícula en el Rendimiento de Productos Líquidos

En la Fig. 8 se muestran los rendimientos de productos líquidos de la pirólisis de residuos de EPS a cada una de las temperaturas de operación y la influencia del tamaño de partícula.

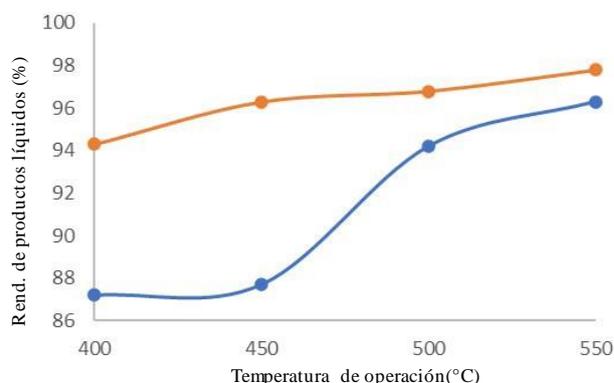


Fig. 7 Influencia de la temperatura en el rendimiento de productos líquidos (Azul: Tamaño de partícula de 0 a 5 mm, Naranja: Tamaño de partícula de 5 a 10 mm)

Fuente: Elaboración propia

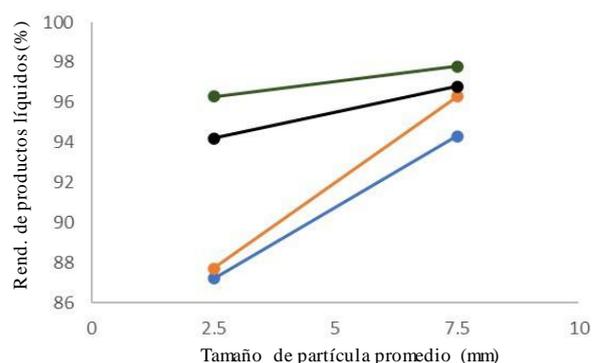


Fig. 8 Influencia del tamaño de partícula en el rendimiento de productos líquidos (Azul: 400 °C, Naranja: 450 °C, Negro: 500 °C, Verde: 550 °C)

Fuente: Elaboración propia

De las referencias revisadas y los resultados experimentales obtenidos mostrados en la Fig. 7, se puede establecer que el tamaño de partícula tiene influencia sobre el rendimiento de productos líquidos —a mayor tamaño de partícula, mayor rendimiento de productos líquidos— ya que mientras más grande sea la partícula, mayor es la resistencia a la transferencia de calor y menor la temperatura real en su interior, de esta manera dificulta la ruptura de los enlaces y disminuye el rendimiento de productos gaseosos, aumentando el rendimiento de productos líquidos [28].

#### 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 10 °C/min, temperatura de operación de 550 °C, tamaño de partícula de 5 a 10 mm con los cuales se obtiene un rendimiento de productos líquidos de 97.8 %, un rendimiento de productos gaseosos de 1.2 % y un rendimiento de residuo sólido (residuo carbonoso) de 1.0 %.

Las condiciones de presión y velocidad de calentamiento establecidas son las mejores que se podían alcanzar con los equipos disponibles. Por lo tanto, es factible obtener fracciones líquidas denominadas combustibles líquidos en la pirólisis al vacío de residuos de EPS. 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.

#### AGRADECIMIENTOS

Los Investigadores agradecen al Grupo de Procesos Termoquímicos y Energéticos de la Universidad Nacional de Ingeniería por el apoyo experimental e intelectual al proyecto.

#### REFERENCIAS

- [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] W. Ramos and V. Pretell, "Obtención De Combustibles Líquidos A Partir De Residuos De Polietileno De Alta Densidad," in Proceedings of the 19th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: "Prospective and trends in technology and skills for sustainable social development" "Leveraging emerging technologies to construct the future," 2021, pp. 1–10, doi: 10.18687/LACCEI2021.1.1.94.
- [3] MINAM, "Consumo responsable del plástico y reducción del plástico de un solo uso," 2018.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] V. Pretell, L. Pinedo, E. Benites, and W. Ramos, "Evaluación y Caracterización de Microplásticos en Tres Playas Arenosas de Lima, Perú," 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, no. July, pp. 27–31, doi: 10.18687/LACCEI2020.1.1.71.
- [7] M. D. Samper, M. I. Rico, S. Ferrandiz, and J. López, "Reducción y caracterización del residuo de poliestireno expandido," *I Simp. Iberoam. Ing. Residuos*, pp. 1–8, 2008, [Online]. Available: <http://www.redisa.uji.es/artSim2008/tratamiento/A27.pdf>.
- [8] V. Cárdenas Blanco and Trujillo Rodríguez Laura Camila, "Propuesta de una estrategia para el aprovechamiento del poliestireno expandido utilizado en las concesiones alimentarias de la Universidad El Bosque," *Línea Investig. Gestión Integr. sustentable*, pp. 1–70, 2020, [Online]. Available: [https://repositorio.unbosque.edu.co/bitstream/handle/20.500.12495/4034/Cárdenas\\_Blanco\\_Valeria\\_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unbosque.edu.co/bitstream/handle/20.500.12495/4034/Cárdenas_Blanco_Valeria_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
- [9] Congreso de la República, "Ley N° 30884, Ley que regula el plásticos de un solo uso y los recipientes o envases descartables," *El Peru.*, no. 36, pp. 479932–479959, 2018, [Online]. Available: <https://busquedas.elperuano.pe/download/url/ley-que-regula-el-plastico-de-un-solo-uso-y-los-recipientes-ley-n-30884-1724734-1>.
- [10] MINAM, "SIGERSOL - Composición de Rs Ss Domiciliarios," 2021. <https://sistemas.minamgob.pe/SigersolMunicipal/#/accesoLibre/generacion> (accessed Feb. 09, 2022).
- [11] MINEM, "Informe estadístico - Downstream (Setiembre 2021)," 2021. [http://www.minemgob.pe/\\_estadistica.php?idSector=5&idEstadistica=13440](http://www.minemgob.pe/_estadistica.php?idSector=5&idEstadistica=13440) (accessed Jan. 30, 2022).
- [12] 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.
- [13] R. Miandad, M. A. Barakat, A. S. Aburiazaiza, M. Rehan, and A. S. Nizami, "Catalytic pyrolysis of plastic waste: A review," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 102, no. June, pp. 822–838, Jul. 2016, doi: 10.1016/j.psep.2016.06.022.
- [14] 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.
- [15] I. M. Mañá, "Pyrolysis of polystyrene waste: A review," *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 2, pp. 1–30, 2021, doi: 10.3390/polym13020225.
- [16] 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.
- [17] Y. Liu, J. Qian, and J. Wang, "Pyrolysis of polystyrene waste in a fluidized-bed reactor to obtain styrene monomer and gasoline fraction," *Fuel Process. Technol.*, vol. 63, no. 1, pp. 45–55, 2000, doi: 10.1016/S0378-3820(99)00066-1.
- [18] A. Demirbas, "Pyrolysis of municipal plastic wastes for recovery of gasoline-range hydrocarbons," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 72, no. 1, pp. 97–102, Aug. 2004, doi: 10.1016/j.jaap.2004.03.001.
- [19] J. A. Onwudili, N. Insura, and P. T. Williams, "Composition of products from the pyrolysis of polyethylene and polystyrene in a closed batch reactor: Effects of temperature and residence time," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 86, no. 2, pp. 293–303, 2009, doi: 10.1016/j.jaap.2009.07.008.
- [20] R. Miandad et al., "Influence of temperature and reaction time on the conversion of polystyrene waste to pyrolysis liquid oil Influence of temperature and reaction time on the conversion of polystyrene waste to pyrolysis liquid oil," *Waste Manag.*, no. September, 2016, doi: 10.1016/j.wasman.2016.09.023.
- [21] M. Rehan et al., "Effect of zeolite catalysts on pyrolysis liquid oil," *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, vol. 119, pp. 162–175, 2017, doi: 10.1016/j.ibiod.2016.11.015.
- [22] V. Pretell, "Pirólisis Rápida de Biomasa de Palma Africana y Caña de Azúcar para la obtención de Bio-Petroleo," Lima, 2013.
- [23] V. Pretell, M. Astorayme, A. Pilco, and W. Ramos, "Production of Liquid Fuels by Vacuum Pyrolysis of Used Tires [Producción de Combustibles Líquidos por Pirólisis al Vacío de Neumáticos Usados]," *Proc. LACCEI Int. Multi-conference Eng. Educ. Technol.*, vol. 2021-July, pp. 1–8, 2021.
- [24] E. Villegas and V. Zamudio, "Influencia de la temperatura y el tamaño de partícula durante el proceso de pirólisis en el rendimiento del combustible líquido obtenido a partir de residuos del poliestireno expandido (EPS)," *Universidad Nacional del Centro del Perú*, 2022.
- [25] V. Hermán, H. Takacs, F. Duclairoir, O. Renault, J. H. Tortai, and B. Viala, "Core double-shell cobalt/graphene/polystyrene magnetic nanocomposites synthesized by in situ sonochemical polymerization," *RSC Adv.*, vol. 5, no. 63, pp. 51371–51381, 2015, doi: 10.1039/c5ra06847a.
- [26] C. Quintero, "Reciclajetermo -mecánico poliestireno expandido (Icopor), mitigación de su impacto ambiental en rellenos sanitarios," p. 46, 2013, [Online]. Available: <http://ridumhumanizales.edu.co:8080/jspui/bitstream/6789/762/1/TE SIS CARLOS QUINTERO.pdf>.
- [27] M. D. Samper, D. Garcia-Sanoguera, F. Parres, and J. López, "Recycling of expanded polystyrene from packaging," *Prog. Rubber, Plast. Recycl. Technol.*, vol. 26, no. 2, pp. 83–92, 2010, doi: 10.1177/147776061002600202.
- [28] R. M. Morris, "Effect of particle size and temperature on evolution rate of volatiles from coal," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 27, no. 2, pp. 97–107, 1993, doi: 10.1016/0165-2370(93)80001-G.