

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

Estudio de la pirólisis rápida de plástico PEBD

Erika Niccole Gutiérrez López

Ingeniería Química

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniera Química

Quito, 4 de mayo de 2020

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

HOJA DE CALIFICACIÓN DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA

Estudio de la pirólisis rápida de plástico PEBD

Erika Niccole Gutiérrez López

Nombre del profesor, Título académico

Daniela Almeida Streitwieser, Dr. Ing.

Quito, 4 de mayo de 2020

DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Nombres y apellidos: Erika Niccole Gutiérrez López

Código: 00131974

Cédula de identidad: 1723180012

Lugar y fecha: Quito, mayo de 2020

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETHeses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETHeses>.

RESUMEN

La distribución de productos de la pirólisis rápida de polietileno de baja densidad (PEBD) fue investigada llevando a cabo la reacción en un reactor tubular de caída libre. Además, se estudió el efecto de la temperatura en el rendimiento de los productos, pirolizando 100 mg de muestra a 450, 500, 550 y 600 °C. Los productos obtenidos de la pirólisis: combustible líquido (oil), gas y char fueron caracterizados para tener un acercamiento a sus aplicaciones. Adicionalmente, el combustible líquido se comparó con los combustibles convencionales comercializados en Ecuador para identificar composiciones similares. El gas fue el producto más abundante de la pirólisis, seguido del char y el combustible líquido. Un aumento de la temperatura de pirólisis favoreció la producción de gas, mientras que el rendimiento de char disminuyó. El mayor rendimiento de combustible líquido se obtuvo a 550 °C. El análisis GC-MS mostró que el combustible líquido de la pirólisis es un recurso potencial para ser convertido en diésel. Los componentes que se identificaron en el gas de pirólisis fueron metano, etano, acetileno, propano y propileno, los cuales pueden ser usados para generar electricidad o como componentes fundamentales en la industria. Se identificó que la estructura química del char no cambió significativamente con la temperatura, sin embargo, a 600°C se mostró una posible desaparición de la parte alifática de la molécula y un aumento en los componentes aromáticos. Además, se determinó que las partículas de char ganaron una morfología esférica y su diámetro promedio fue mayor con el aumento de temperatura. Estas características del char y estudios previos han mostrado que el char tiene potencial para ser utilizado en diversos usos como componente para producir material de construcción, adsorbente para tratamiento de agua y como combustible sólido.

Palabras clave: Plástico PEBD, pirólisis, combustible líquido, char, gas, reactor de caída libre

ABSTRACT

The product distribution from fast pyrolysis of low-density polyethylene (LDPE) was investigated by carrying out the reaction in a free fall tubular reactor. Additionally, the effect of temperature on the liquid oil yield was studied by pyrolyzing 100 mg of sample at 450, 500, 550 and 600°C. The products obtained from pyrolysis: liquid oil, gas and char were characterized to analyze their applications. Moreover, the liquid oil was compared with conventional fuels commercialized in Ecuador in order to identify similar compositions. Gas was the major product obtained from pyrolysis, followed by char and liquid oil. An increase of pyrolysis temperature favored the gas production, while the char yield decreased. The highest yield of liquid oil was obtained at 550°C and the GC/MS analysis showed that oil from pyrolysis is a potential source to be upgraded into diesel. The components that were identified in the pyrolysis gas were methane, ethane, acetylene, propane and propylene, which can be used to generate electricity or as fundamental components in the industry. It was identified that the chemical structure of the char did not change significantly with temperature. However, at 600 °C, a possible disappearance of the aliphatic part of the molecule and an increase in the aromatic components were shown. Furthermore, it was determined that char particles gained a spherical morphology and their average diameter was greater with increasing temperature. These char characteristics and previous studies have shown that char is a potential source for various uses as a component to produce building materials, adsorbent for water treatment and as a solid fuel.

Keywords: LDPE plastic, pyrolysis, liquid oil, char, gas, free-fall reactor

TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción	11
2. Materiales y métodos.....	14
2.1 Preparación y caracterización de la materia prima	14
2.2 Reactor y diseño de experimentos.	15
2.3 Métodos analíticos.....	17
3. Resultados y discusión	19
3.1 Caracterización de la materia prima.	19
3.2 Efecto de la temperatura sobre el rendimiento de los productos de pirólisis.	20
3.3 Caracterización de los productos de pirólisis.	22
3.3.1 Caracterización del Oil.	22
3.3.2 Caracterización del Gas.	25
3.3.3 Caracterización del Char.....	27
4. Conclusiones	30
5. Agradecimientos	32
6. Referencias	33

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Contenido de cenizas y humedad del plástico PEBD.....	19
Tabla 2. Rendimiento de los productos de la pirólisis de PEBD a diferentes temperaturas ...	21
Tabla 3. Rango de carbonos para fracciones de petróleo y muestras analizadas	25
Tabla 4. Compuestos identificados en el gas obtenido de la pirólisis de PEBD a 600°C.....	26

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Perfiles de temperatura y zona isotérmica del reactor.....	16
Figura 2. Esquema del equipo de pirólisis	17
Figura 3. a) Análisis termogravimétrico y b) espectro FTIR de PEBD virgen	20
Figura 4. Distribución de productos de la pirólisis de PEBD.....	22
Figura 5. Cromatograma GC-MS del combustible líquido obtenido de la pirólisis a 550°C .	23
Figura 6. Cromatogramas GC-MS de los estándares a) diésel, b) súper y c) extra	24
Figura 7. Cromatograma del GC-FID del gas de pirólisis a 600°C	26
Figura 8. Análisis FTIR de char obtenido a diferentes temperaturas.....	27
Figura 9. Imágenes obtenidas del microscopio óptico a una amplificación de 4x. a) PEBD triturado, y char obtenido a: b) 450°C, c) 500°C, d) 550°C y e) 600°C	28
Figura 10. Diámetro promedio de las partículas de char a diferentes temperaturas	29
Figura 11. Imágenes SEM del char obtenido de la pirólisis de PEBD a) 450°C-50x, b) 500°C-50x, c) 550°C-50x y d) 600°C-50x.....	30
Figura 12. Imágenes SEM del char a 600°C a diferentes amplificaciones a) 50x y b)250x ...	30

ESTUDIO DE LA PIRÓLISIS RÁPIDA DE PLÁSTICO PEBD

Erika Gutiérrez, Daniela Oña, Sebastián Salazar, Daniela Almeida Streitwieser

RESUMEN

La distribución de productos de la pirólisis rápida de polietileno de baja densidad (PEBD) fue investigada llevando a cabo la reacción en un reactor tubular de caída libre. Además, se estudió el efecto de la temperatura en el rendimiento de los productos, pirolizando 100 mg de muestra a 450, 500, 550 y 600 °C. Los productos obtenidos de la pirólisis: combustible líquido (oil), gas y char fueron caracterizados para tener un acercamiento a sus aplicaciones. Adicionalmente, el combustible líquido se comparó con los combustibles convencionales comercializados en Ecuador para identificar composiciones similares. El gas fue el producto más abundante de la pirólisis, seguido del char y el combustible líquido. Un aumento de la temperatura de pirólisis favoreció la producción de gas, mientras que el rendimiento de char disminuyó. El mayor rendimiento de combustible líquido se obtuvo a 550 °C. El análisis GC-MS mostró que el combustible líquido de la pirólisis es un recurso potencial para ser convertido en diésel. Los componentes que se identificaron en el gas de pirólisis fueron metano, etano, acetileno, propano y propileno, los cuales pueden ser usados para generar electricidad o como componentes fundamentales en la industria. Se identificó que la estructura química del char no cambió significativamente con la temperatura, sin embargo, a 600°C se mostró una posible desaparición de la parte alifática de la molécula y un aumento en los componentes aromáticos. Además, se determinó que las partículas de char ganaron una morfología esférica y su diámetro promedio fue mayor con el aumento de temperatura. Estas características del char y estudios previos han mostrado que el char tiene potencial para ser utilizado en diversos usos como componente para producir material de construcción, adsorbente para tratamiento de agua y como combustible sólido.

Palabras clave: Plástico PEBD, pirólisis, combustible líquido, char, gas, reactor de caída libre

1. Introducción

La contaminación por residuos plásticos afecta a todos los ecosistemas especialmente a los océanos, y además el plástico se filtra en la cadena alimenticia al ser ingerido por los animales de consumo humano. El uso de plástico está aumentando debido al crecimiento industrial. El plástico satisface la demanda de diversos sectores como el de empaquetado, construcción, sector automotriz, sector eléctrico, sector agrario, entre otros (Anuar Sharuddin et al., 2016). Algunos gobiernos y organizaciones ambientales han alentado a las personas a reducir el uso de plástico, sin embargo, la producción mundial de plástico ha aumentado de 2 a 381 toneladas métricas desde el 1950 al 2015 (Lam et al., 2018). La principal preocupación relacionada con el consumo de plástico es la cantidad de residuos generados. Las estadísticas muestran que el 10% del plástico se recicla, el 25% se incinera y el 65% se deposita en vertederos (J. P. Vas, . Ramya, A. L. Dsilva, E. Serrao, F. Demash, 2017). La última opción sigue siendo un problema mundial porque causa contaminación del agua y del aire, y consecuentemente problemas de salud.

El sector de empaquetado representa el mercado más grande para resinas plásticas. Por lo tanto, la mayoría de los plásticos producidos por esta industria son de un solo uso y muchas veces terminan como parte de los residuos sólidos municipales (RSM). Según los datos del Banco Mundial, los desechos plásticos representarán entre el 9 y el 13% de los RSM en el 2025 (Sipra et al., 2018). Este porcentaje es considerado como los residuos sólidos plásticos y contienen una mezcla de diferentes tipos de plásticos. Se incluye el tereftalato de polietileno (PET), polietileno de alta densidad (PEAD), cloruro de polivinilo (PVC), polietileno de baja densidad (PEBD), polipropileno (PP) y poliestireno (PS) (Miandad et al., 2017). A pesar de que el plástico PET tiene la mayor tasa de recuperación, el PEBD es un plástico de interés debido a su consumo masivo. En base a estadísticas europeas, la demanda de PEBD y PET son 17.5% y 7.7% respectivamente (PlasticsEurope, 2019; Rahimi & Garcíá, 2017). Las resinas de

PEBD se utilizan principalmente para producir bolsas de plástico, películas de envoltura y componentes de computadora, sin embargo, su tasa de recuperación es solo del 5% (Rahimi & Garcíá, 2017). Hoy en día, el objetivo principal es aumentar la tasa de recuperación del PEBD y manejar estos residuos plásticos con diferentes métodos para reducir la contaminación ambiental y ahorrar recursos (Anuar Sharuddin et al., 2016).

Los sistemas de gestión de residuos han sido mejorados con el paso del tiempo con el propósito de disminuir la cantidad de plástico que termina en vertederos. Los desechos plásticos pueden tratarse por cuatro métodos diferentes: reciclaje primario, reciclaje secundario, reciclaje químico e incineración (Rahimi & Garcíá, 2017). El reciclaje primario reprocesa el plástico reciclado para generar productos con el mismo uso que el plástico original y el reciclaje secundario convierte el plástico reciclado en productos con menor valor y uso diferente. El reciclaje químico consiste en un proceso químico que recupera energía y componentes petroquímicos con alto valor en la industria. Además, la incineración de residuos plásticos es otra alternativa donde el calor se utiliza para generar electricidad. Este método es la forma más fácil de gestionar los residuos sin tener en cuenta los vertederos, pero causa efectos negativos debido a que los subproductos de la combustión de plástico son gases de efecto invernadero (Sevigné-Itoiz et al., 2015; Verma et al., 2016).

En términos de sostenibilidad, el reciclaje químico es la mejor opción. El reciclaje primario y secundario requieren más recursos porque el plástico reciclado debe ser clasificado, lavado y extruido (Rahimi & Garcíá, 2017). Además, el plástico teñido reciclado tiene un valor menor porque en ocasiones no satisface las necesidades de los fabricantes. El reciclaje químico no solo requiere menos procesos mecánicos, sino que también genera energía. Este método ha ganado interés porque reduce el uso de combustibles fósiles (Anuar Sharuddin et al., 2016). Los plásticos se derivan del petróleo y esta alternativa incluye tecnologías que permiten recuperar diversos precursores químicos (Uzoejinwa et al., 2018). Estos componentes son los bloques

químicos fundamentales en la industria, y son usados como materia prima para fabricar productos de alto valor en el mercado. Un proceso químico que se usa comúnmente para transformar los desechos en energía es la pirólisis. Esta tecnología es ecológica porque satisface parte de la demanda de energía y no causa contaminación del agua (Anuar Sharuddin et al., 2016).

La pirólisis es una degradación térmica que rompe las cadenas largas de los polímeros produciendo moléculas más simples. Este proceso ocurre en ausencia de oxígeno a altas temperaturas entre 300 y 600 °C, los productos obtenidos son: combustible líquido (oil), gas y coque (char) (Miandad et al., 2017; Miandad, Barakat, et al., 2016; Sogancioglu et al., 2017). La mayoría de los estudios han mostrado especial interés en el combustible líquido debido a sus aplicaciones (Miandad et al., 2017; Miandad, Nizami, et al., 2016; Rehan et al., 2017). Este producto tiene un gran potencial para ser convertido en gasolina, sin embargo, este puede ser usado sin tratamientos previos como combustible para hornos, turbinas, calderas y otro tipo de maquinaria (Bridgwater, 2012). Los parámetros del proceso tienen una influencia significativa en la calidad y el rendimiento del combustible líquido. Los principales parámetros que se consideran son: temperatura, tipo de reactor, tiempo de residencia, gas de arrastre, presión y uso de catalizadores (Miandad, Nizami, et al., 2016). Además, hay dos tipos de pirólisis en base a algunos de estos parámetros: pirólisis lenta y rápida. La pirólisis lenta implica un tiempo de residencia prolongado y velocidades de calentamiento menores. El rango de temperatura es más bajo en comparación con la pirólisis rápida y el producto primario es el char. La pirólisis rápida tiene un tiempo de residencia de solo unos segundos, la velocidad de calentamiento es rápida y la producción de combustible líquido y gas es mayor (Duman et al., 2011; Sipra et al., 2018).

Ecuador produce aproximadamente 12 897 toneladas / día de residuos sólidos municipales (RSM) y alrededor del 11.31% representa residuos plásticos (Narvaez et al.,

2013). Un previo estudio ha analizado cuatro escenarios para generar energía a partir de residuos en Ecuador, los cuales son: combustión en un ciclo de vapor, tratamiento mecánico y biológico, recolección de gas producido en vertederos y gasificación (Narvaez et al., 2013). Sin embargo, estas tecnologías no generan una cantidad significativa de componentes petroquímicos, causan contaminación y son procesos poco flexibles. La pirólisis es un proceso más ventajoso, pero no ha sido implementado en este país (Ponce-Jara et al., 2018). Hoy en día, hay pocos estudios sobre esta tecnología en Ecuador y, en consecuencia, muchos materiales residuales y parámetros del proceso pueden ser estudiados y mejorados. Por lo tanto, este estudio tiene como objetivo investigar la distribución de productos de la pirólisis rápida de PEBD y el efecto de la temperatura sobre el rendimiento de los productos. Se caracterizó el producto líquido, gaseoso y char con el propósito de investigar sus aplicaciones. Adicionalmente, se comparó la composición del combustible líquido con estándares, los cuales fueron combustibles convencionales usados en Ecuador. Esto se llevó a cabo para establecer una futura aplicación.

2. Materiales y métodos

2.1 Preparación y caracterización de la materia prima.

La muestra de plástico usada fue pellets de PEBD virgen tipo 2601, obtenidos de Dow Chemical Company. El PEBD virgen fue elegido en lugar de residuos plásticos porque en este estudio se observará la distribución de productos de la pirólisis de PEBD puro para comparar en estudios posteriores con diferentes materiales plásticos residuales. La presencia de contaminantes en los residuos plásticos podría afectar el rendimiento y la calidad de los productos. La materia prima se congeló a $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ para facilitar la molienda. Luego, la muestra se tamizó para obtener un tamaño de partícula homogéneo y el rango seleccionado fue entre 250 y 355 μm .

En este estudio, se llevaron a cabo dos métodos para analizar el contenido de humedad y de cenizas de la materia prima. El contenido de humedad se determinó de forma gravimétrica secando la muestra de plástico a 60 °C durante 48 horas hasta obtener una masa constante. Se utilizó el método gravimétrico al calcinar la muestra de plástico a 550 °C por 4 horas para determinar el contenido de cenizas.

El análisis termogravimétrico (TGA) se realizó para caracterizar la materia prima y para establecer el rango de temperatura de los experimentos en un analizador PerkinElmer Simultaneous Thermal Analyzer STA 8000. Este análisis se llevó a cabo bajo una atmósfera de nitrógeno con un flujo de 20 ml/min a presión atmosférica. El peso de la muestra fue aproximadamente 50 mg, y se la calentó de 25 °C a 700 °C a una tasa de calentamiento de 10 °C/min.

La espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) se realizó para identificar cambios en la estructura química del plástico después de la pirólisis mediante el análisis de la muestra no pirolizada y el char. Se utilizó el espectrómetro FTIR Cary 630 de Agilent Technologies con un detector ATR para obtener los espectros IR, los cuales fueron registrados en un rango de número de onda de 4000 y 650 cm^{-1} con 128 escaneos de muestra.

2.2 Reactor y diseño de experimentos.

La pirólisis rápida de PEBD se estudió en un reactor de caída libre vertical de cerámica con un diámetro interno de 2.5 cm y una longitud total de 75 cm (Vargas et al., 2020). Según los perfiles de temperatura mostrados en la Figura 1, la zona isotérmica del reactor es de 19 cm con un volumen efectivo de reacción de 0.093 L. El rango de tiempos de residencia de las partículas de plástico en el reactor tomando en cuenta la gravedad está entre 8.951×10^{-2} y 8.961×10^{-2} s. El helio se utilizó como gas de arrastre con un caudal de 2 L/min. El sistema de alimentación consiste en un tubo de vidrio con un sistema de tres válvulas para purgar y

alimentar la muestra. Después de que la reacción haya ocurrido, los productos se obtienen en la parte inferior del reactor.

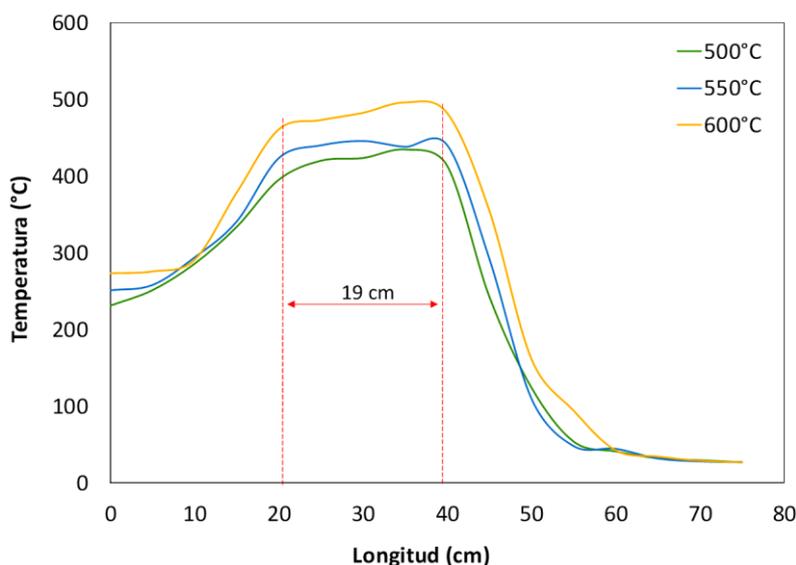


Figura 1. Perfiles de temperatura y zona isotérmica del reactor

El sistema de separación consiste en un ciclón donde se recolectan los productos sólidos y una trampa fría que funciona con un mini-chiller para condensar los hidrocarburos livianos. El etilenglicol se usa como refrigerante, manteniendo el sistema a $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. El combustible líquido se recolecta principalmente en la trampa fría, y para extraerlo, se usa el disolvente éter dietílico debido a su volatilidad. El combustible líquido se pesa después de que el disolvente se haya evaporado por completo. La corriente de gas sale por la purga, donde se analizan los productos gaseosos, parte de la corriente puede ingresar directamente al cromatógrafo de gases. El esquema del equipo de pirólisis se muestra en la Figura 2.

Las muestras de plástico se pirolizaron a 450, 500, 550 y 600 $^{\circ}\text{C}$. Este rango de temperatura fue seleccionado de acuerdo con el análisis del TGA. A pesar de que la degradación térmica del plástico se completa a 500 $^{\circ}\text{C}$, se consideraron dos temperaturas más altas para determinar el efecto en la distribución de productos obtenida de la pirólisis. En cada experimento, se usaron 100 mg de muestra para alimentar el reactor. Los productos sólidos y líquidos fueron pesados para determinar el balance de masa y calcular el rendimiento de cada

producto usando la ecuación (1). El rendimiento del gas se obtuvo por diferencia. También se consideró en el balance de masa las pérdidas en el sistema de alimentación y en el reactor causadas por la acumulación.

$$\text{Rendimiento del producto (\%)} = \frac{\text{Producto (mg)}}{\text{Alimentación neta (mg)}} \times 100\% \quad (1)$$

Donde la alimentación neta es la masa de la muestra inyectada menos las pérdidas en el sistema de alimentación.

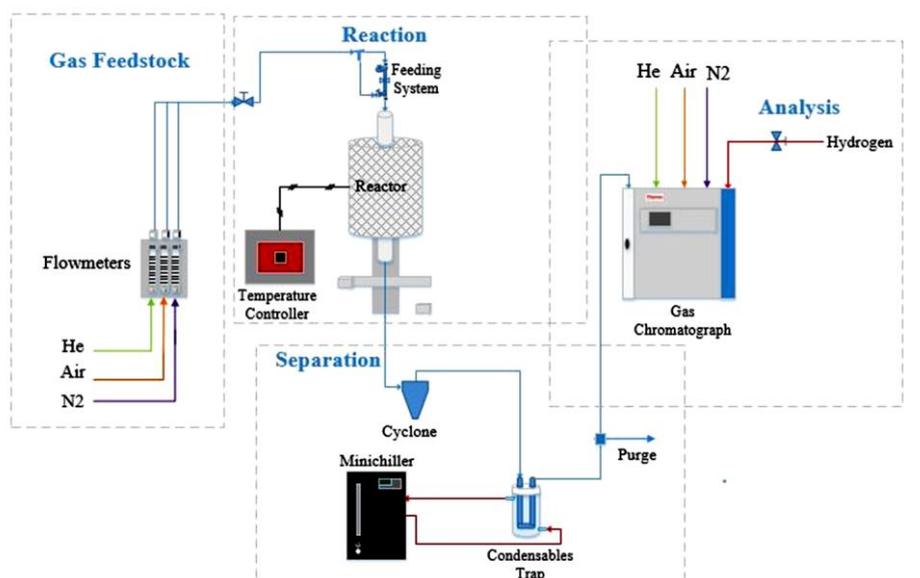


Figura 2. Esquema del equipo de pirólisis

2.3 Métodos analíticos.

El combustible líquido de pirólisis se caracterizó mediante un cromatógrafo de gases acoplado con un espectrómetro de masas (GC-MS). El cromatógrafo de gases usado fue un equipo Thermo Fisher Scientific Trace 1310-ISQ 7000. El GC tiene una columna TraceGOLD TG-5MS con una fase no polar con 5% de bifenilo y 95% de dimetilpolisiloxano. La longitud de la columna es de 30 m con un diámetro de 0.24 m y un espesor de película de 0.25 μm . El inyector se usó en modo *splitless* con una temperatura de 320 $^{\circ}\text{C}$ y un flujo de división de 100 ml/min. El flujo de la columna de helio fue de 1.2 ml/min. El horno comenzó a 50 $^{\circ}\text{C}$ por 1 minuto y luego se calentó hasta 280 $^{\circ}\text{C}$ a una tasa de calentamiento de 4 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$, manteniendo

esta temperatura durante 10 minutos. La temperatura de la línea de transferencia del espectrómetro de masas fue 320 °C y la temperatura de la fuente de iones fue de 230 °C. Los cromatogramas se obtuvieron en el modo *full-scan* y los picos se analizaron utilizando la biblioteca NIST MS.

Los productos gaseosos se analizaron mediante un cromatógrafo de gases junto con un detector de ionización de llama (GC-FID). Este análisis se realizó recolectando el gas en una funda Tedlar. La columna utilizada fue una TG-Bond Q Thermo Scientific con una longitud de 15 m y un diámetro de 0.53 mm. El espesor de la película fue de 20 µm y la fase de la columna fue no polar con 100% de divinilbenceno. El inyector operó a 250 °C y en modo *split* con un flujo de división de 21 ml/min. El flujo de la columna fue de 2.1 ml/min. La temperatura inicial del horno fue de 30 °C y se calentó inmediatamente a 200 °C a una tasa de calentamiento de 10 °C/min, manteniéndose a esta temperatura por 8 minutos. El detector operó a 200 °C con un flujo de aire, helio e hidrógeno de 350, 40 y 35 ml/min respectivamente. El helio utilizado es de Linde de grado 5 con una pureza del 99,999%.

Los productos sólidos se caracterizaron por tres métodos incluido el análisis FTIR, análisis en el microscopio óptico y en el microscopio electrónico de barrido (SEM). Se usó el microscopio Leica DM-500 para tener un primer acercamiento de la morfología de las muestras de char a diferentes temperaturas. Se obtuvieron varias imágenes con una amplificación de 4x y 10x y se analizaron en el software Imagen J para determinar el diámetro promedio de las partículas de char. El análisis en el SEM se realizó para sustentar los resultados obtenidos con el microscopio óptico y para investigar con mayor detalle la morfología de las muestras de plástico y char. El microscopio electrónico de barrido JSM-IT300 InTouchScope de Jeol se utilizó para obtener imágenes a 50, 100 y 250x en bajo vacío.

3. Resultados y discusión

3.1 Caracterización de la materia prima.

El contenido de humedad y cenizas del plástico PEBD utilizado en este estudio se muestra en la Tabla 1. En base a algunos estudios (Anuar Sharuddin et al., 2016, 2017), el contenido de cenizas es un factor importante que influye en el rendimiento del combustible líquido obtenido de la pirólisis. El alto contenido de cenizas representa una disminución en el rendimiento de este producto. Como se puede observar, la muestra analizada tuvo un bajo contenido de cenizas que alcanzó el $0.097 \pm 0.016\%$. Por lo tanto, la muestra de plástico utilizada es una fuente potencial para producir combustible líquido. Según (Eke et al., 2019) y (Syamsiro et al., 2014), el alto contenido de humedad tiene un efecto negativo en el rendimiento de los productos líquidos de la pirólisis. Sin embargo, se observó que la muestra de PEBD tuvo un contenido de humedad poco significativo del $0.069 \pm 0.002\%$.

Tabla 1. Contenido de cenizas y humedad del plástico PEBD

Plástico	Cenizas (wt%)	Humedad (wt%)
PEBD	0.097 ± 0.016	0.069 ± 0.002

El análisis de TGA fue realizado para determinar el comportamiento de la degradación térmica del plástico y establecer el rango de temperatura óptimo para la pirólisis. La Figura 3a ilustra la curva termogravimétrica en donde se observó que la descomposición térmica del plástico comenzó aproximadamente a 400 °C y se completó a 500 °C. Adicionalmente, la curva derivada termogravimétrica de primer orden también se presenta en la Figura 3a. Esta curva brinda la información sobre el paso de degradación ocurrido durante el proceso. De acuerdo con el número de picos, la muestra de PEBD mostró dos etapas de degradación (Anuar Sharuddin et al., 2016). Sin embargo, el primer pico es pequeño, y podría atribuirse posiblemente a la humedad o la presencia de algunos aditivos en el plástico. En base a estos

resultados, los experimentos se realizaron a las siguientes temperaturas: 450, 500, 550 y 600 °C.

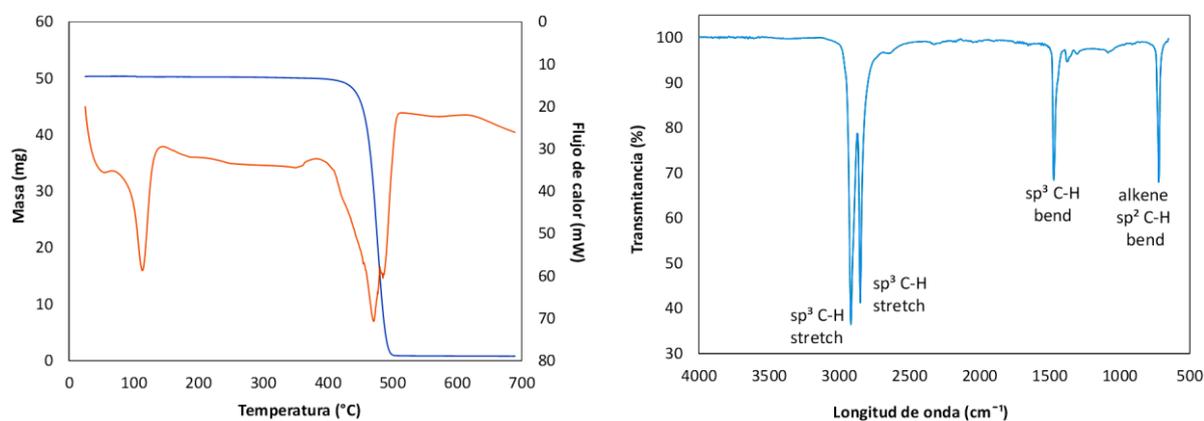


Figura 3. a) Análisis termogravimétrico y b) espectro FTIR de PEBD virgen

El análisis FTIR se llevó a cabo para detectar los grupos funcionales en la muestra. La Figura 3b muestra el espectro FTIR del plástico no pirolizado. Los picos en el rango de 2916 y 2849 cm^{-1} mostraron la presencia de un alcano al representar un enlace C–H con una vibración de tensión. El pico a 1472 cm^{-1} representó un grupo aromático mostrando un enlace C=C con una vibración de tensión. Los pequeños picos como el que está entre 1000 y 653 cm^{-1} implicaron la presencia de un alqueno con un enlace =C–H con una vibración de flexión (Anuar Sharuddin et al., 2017). Esta estructura está asociada a un compuesto alifático que contiene solo hidrógenos y carbonos, tiene una cadena lineal y es más reactivo que los compuestos aromáticos. Los compuestos alifáticos pueden ser lineales, circulares o ramificados de varias maneras (Sheetal B, 2018).

3.2 Efecto de la temperatura sobre el rendimiento de los productos de pirólisis.

El rendimiento de los productos obtenidos de la pirólisis a diferentes temperaturas se presenta en la Tabla 2. El rendimiento máximo de combustible líquido se obtuvo a 550 °C con un valor de 5.75%. Sin embargo, disminuyó cuando los experimentos se realizaron a 600 °C. La Figura 4 ilustra que un aumento de temperatura no necesariamente mejora el rendimiento

de los productos líquidos. De acuerdo con (Yang et al., 2016) y (Williams & Williams, 1999), el mayor rendimiento de combustible líquido obtenido de la pirólisis de PEBD se encuentra a 550 °C y 600 °C respectivamente. En ambos estudios, cuando la temperatura de operación aumentó 50 °C más que la temperatura óptima, el rendimiento del combustible líquido disminuyó.

El rendimiento del gas a 450 °C fue de 53.92%, pero cuando la temperatura de pirólisis fue 600 °C, el rendimiento alcanzó el 68.00%. Esta tendencia muestra claramente que la producción de gas fue mayor cuando la temperatura aumenta. Otros estudios muestran resultados similares (Anuar Sharuddin et al., 2016; Sogancioglu et al., 2017) y esto sucede porque la ruptura en la estructura de las moléculas es más fácil a altas temperaturas y las moléculas tienden a evaporarse. La tendencia de la producción de char se muestra en la Figura 4. A medida que la temperatura aumentó, el rendimiento de char fue menor. El mayor rendimiento de char fue 42.03% a 450 °C y disminuyó a 17.71% cuando la temperatura fue 600 °C. Estos resultados son sostenidos por (Sogancioglu et al., 2017) y (Williams & Williams, 1999). Estos estudios reportaron que el rendimiento más bajo de char se obtuvo a la temperatura de pirólisis más alta.

Tabla 2. Rendimiento de los productos de la pirólisis de PEBD a diferentes temperaturas

Temperatura de pirólisis (°C)	Rendimiento (%)		
	Oil	Char	Gas
450	1.49	42.03	53.92
500	4.52	35.53	54.50
550	5.75	21.67	50.74
600	4.69	17.71	68.00

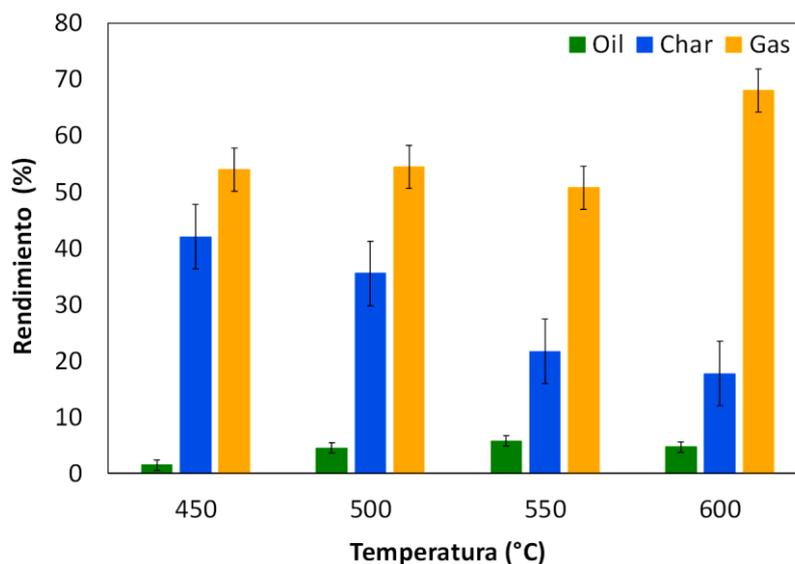


Figura 4. Distribución de productos de la pirólisis de PEBD

3.3 Caracterización de los productos de pirólisis.

3.3.1 Caracterización del Oil.

El combustible líquido fue analizado mediante GC-MS para estudiar la distribución de los carbonos. El cromatograma de combustible líquido obtenido de la pirólisis a 550 °C, temperatura a la cual se obtuvo el mayor rendimiento de este producto, se muestra en la Figura 5. El cromatograma reveló que el rango de carbonos se encontró entre C₁₄ y C₃₅. El pico con el área más grande representa un compuesto con 19 carbonos y fue el componente más abundante en la composición del combustible líquido. El rango de carbonos de esta muestra se comparó con tres combustibles: super, extra y diésel, que se usan comúnmente en Ecuador. Estos combustibles fueron utilizados como estándares. La principal diferencia entre las gasolinas super y extra es el octanaje. Super se comercializa con 92 octanos y extra con 87 octanos. Adicionalmente, el diésel es usado para el transporte y para operar maquinaria a nivel industrial.

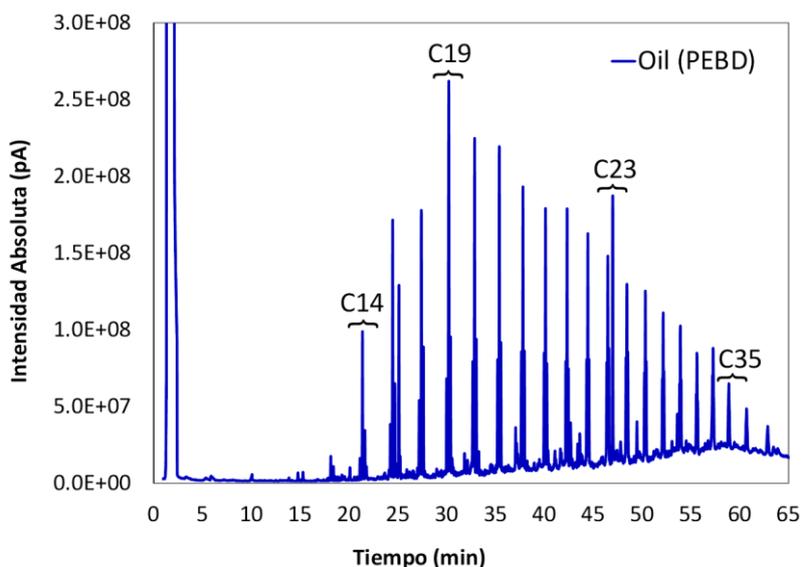


Figura 5. Cromatograma GC-MS del combustible líquido obtenido de la pirólisis a 550°C

Los cromatogramas de los estándares se presentan en la Figura 6 y sus rangos de carbonos están resumidos en la Tabla 3. En base al rango teórico de carbonos de las fracciones de petróleo, se corroboró que súper y extra son tipos de gasolina. La muestra de diésel mostró un rango de carbono de $C_{11} - C_{27}$, y estos resultados fueron respaldados por la información teórica que establece que el rango típico de carbonos para el diésel es $C_{10} - C_{28}$ (Douglas et al., 2016). La comparación entre el combustible líquido de pirólisis y los estándares mostró evidentemente que el cromatograma para el combustible líquido se acerca más al cromatograma para el diésel. Las gasolinas súper y extra presentaron cromatogramas completamente diferentes debido a que poseen carbonos de menor número. Por lo tanto, el combustible líquido de la pirólisis de PEBD tiene un gran potencial como fuente de energía porque tiene un amplio número de cadenas de carbono y un alto contenido de hidrocarburos aromáticos. Además, el combustible líquido puede ser convertido en diésel mediante tratamientos posteriores como destilación y refinamiento para remover los hidrocarburos pesados e impurezas, o se puede mezclar con diésel convencional mejorando su calidad (Miandad et al., 2017).

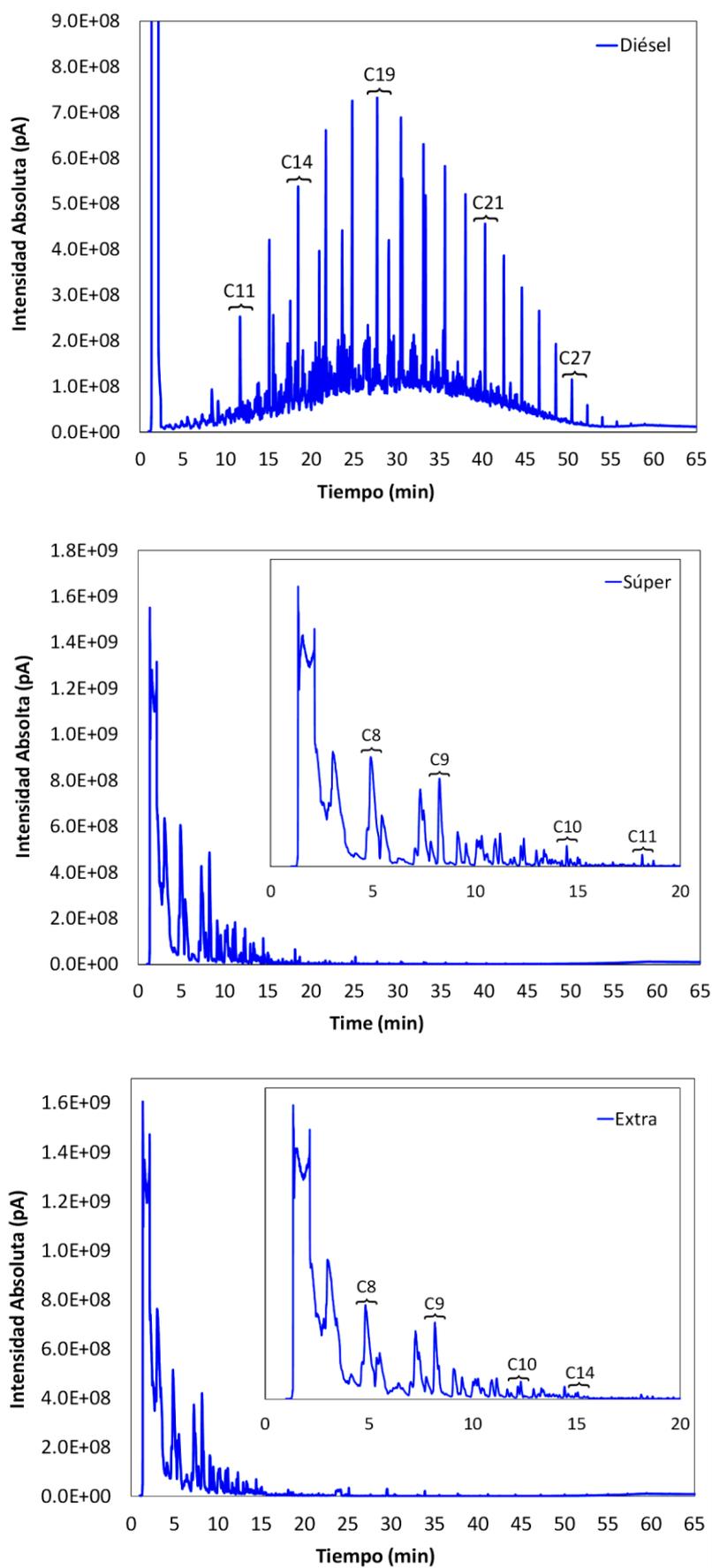


Figura 6. Cromatogramas GC-MS de los estándares a) diésel, b) súper y c) extra

Tabla 3. Rango de carbonos para fracciones de petróleo y muestras analizadas

Fracción de petróleo	Rango típico de carbonos	Muestras analizadas	Rango de carbonos
Gasolina	C ₅ –C ₁₂	Súper	C ₈ –C ₁₁
		Extra	C ₈ –C ₁₄
Diésel	C ₁₀ –C ₂₈	Diésel	C ₁₁ –C ₂₇
Oil (aceites, lubricantes)	C ₂₀ –C ₃₅	Oil (PEBD)	C ₁₄ –C ₃₅

La información en la tabla se obtuvo de la literatura (Douglas et al., 2016; Vempatapu & Kanaujia, 2017)

3.3.2 Caracterización del Gas.

Los compuestos identificados en el gas de pirólisis fueron: metano, etano, acetileno, propano y propileno, los cuales se presentan en la Tabla 4. Estos compuestos se identificaron utilizando el estándar Scott Cat. No. 22566 que contiene metano, etano, etileno, acetileno, propano, propileno y n-butano, cada uno a 15 ppm en nitrógeno. La muestra de gas y de estándar fueron analizadas en el cromatógrafo de gases junto con un detector de ionización de llama (FID) y se compararon los picos de los cromatogramas obtenidos. La Figura 7 ilustra el cromatograma del gas obtenido de la pirólisis a 600 °C. Los primeros cinco picos representaron los compuestos mencionados anteriormente. El metano, el etano y el propano son alcanos, los cuales son compuestos valiosos en la industria porque son utilizados para calefacción, cocina y generación de electricidad. Además, estos hidrocarburos ligeros son ampliamente utilizados para la producción de cosméticos y plásticos (Pokharel et al., 2018). El acetileno y propileno son bloques químicos base importantes en la industria química. El acetileno se utiliza para la fabricación de fibras acrílicas, vidrios, pinturas, resinas y polímeros (Mukherjee et al., 2019) mientras que el propileno sirve como fuente para producir monómeros, polímeros e intermediarios, un ejemplo de esto es el polipropileno (Li et al., 2007).

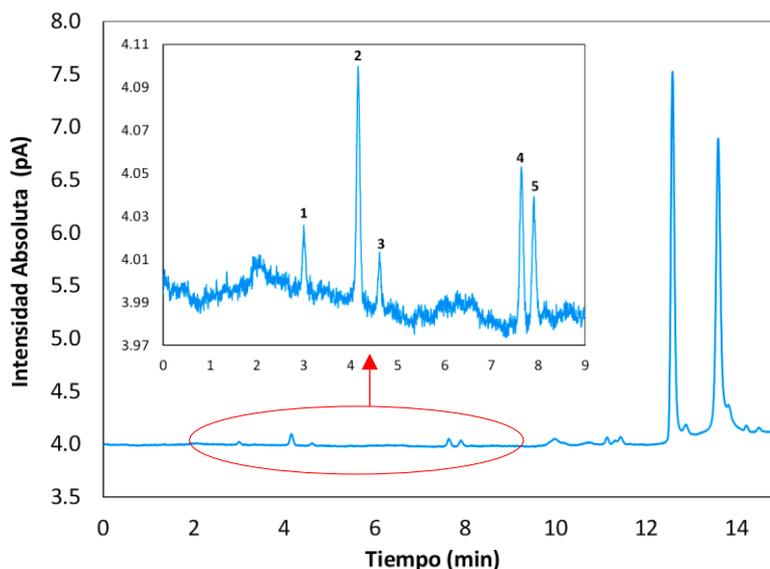


Figura 7. Cromatograma del GC-FID del gas de pirólisis a 600°C

Tabla 4. Compuestos identificados en el gas obtenido de la pirólisis de PEBD a 600°C

Pico	Tiempo de retención	Nombre	Fórmula	Peso molecular
1	3.00	Metano	CH ₄	16
2	4.15	Etano	C ₂ H ₆	30
3	4.67	Acetileno	C ₂ H ₂	26
4	7.59	Propano	C ₃ H ₈	44
5	7.91	Propileno	C ₃ H ₆	42

Los resultados obtenidos del análisis de los productos gaseosos son apoyados por otros autores: (Williams & Williams, 1999) reportaron los primeros cuatro alcanos, alquenos con 4 carbonos como etileno, propileno y butileno. Además, se identificó hidrógeno. (Encinar & González, 2008) determinaron que la composición del gas de la pirólisis de polietileno contenía alcanos y alquenos hasta C₃ e hidrógeno. Además, un estudio de co-pirólisis de biomasa y residuos plásticos (Uzoejinwa et al., 2018) identificó los alcanos y alquenos con un máximo de 4 carbonos y dos compuestos adicionales: CO y CO₂ que se obtuvieron como resultado de la pirólisis de biomasa.

3.3.3 Caracterización del Char.

Los espectros de FTIR obtenidos para el char a diferentes temperaturas se muestran en la Figura 8. Los picos de los espectros del char fueron similares en comparación con los picos del espectro para el PEBD virgen. Sin embargo, hubo una ligera variación en el espectro correspondiente al char obtenido a 600 °C. Los picos en el rango de 2916 y 2849 cm^{-1} fueron más pequeños y aparecieron más picos en longitudes de onda inferiores, los cuales fueron pequeños. De acuerdo con (Sogancioglu et al., 2017), como consecuencia del aumento de la temperatura de pirólisis, el número de picos en el espectro aumenta. Además, hay una disminución en el área de los picos que representan los alcanos con enlace C–H en vibración de tensión. Esto muestra una posible desaparición de la parte alifática de la molécula y un aumento de compuestos aromáticos. Este hecho se comprobó en el espectro FTIR para el char a 600 °C debido a que los picos en el rango de 1645 y 1464 cm^{-1} indicaron la presencia de grupos aromáticos con enlace C=C vibrando en el modo de tensión.

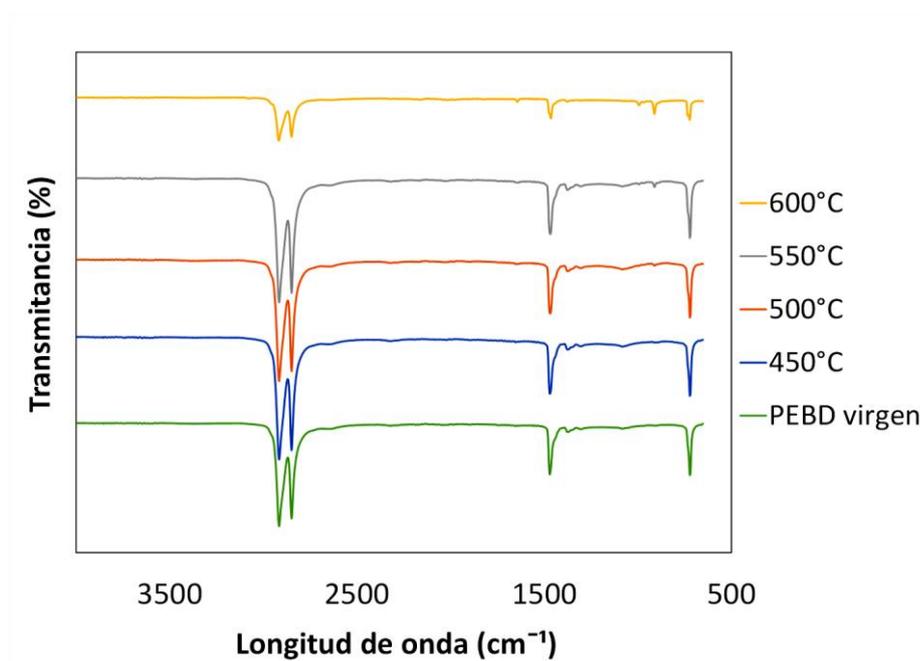


Figura 8. Análisis FTIR de char obtenido a diferentes temperaturas

Para investigar la morfología del char, se obtuvieron varias imágenes mediante el microscopio óptico y SEM. La Figura 9 muestra un primer acercamiento de la forma del char

en el microscopio óptico. Se observó en la Figura 9a que la muestra de PEBD triturado presentó una geometría irregular con pequeños filamentos alargados en las partículas. Esto sucedió debido a la alta tensión de rotura de los pellets de PEBD durante el proceso de trituración. El char fue adquiriendo una morfología esférica conforme la temperatura fue incrementando. El plástico al pasar por la zona isotérmica del reactor se funde y se forman los gases, los cuales se quedan atrapados en el interior de las partículas y al salir de la zona de calentamiento se solidifican de manera instantánea, manteniendo la geometría esférica. Las partículas de char a la temperatura más baja no adquirieron una forma esférica perfecta cuando se solidificaron y algunas de ellas no se pirolizaron en su totalidad. La Figura 9c y Figura 9d mostraron la presencia de más partículas esféricas cuando la temperatura fue mayor. Esto es evidente teniendo en cuenta al char obtenido a 550 °C, sin embargo, las partículas más oscuras sin una forma definida representaron las partículas que fueron carbonizadas por completo como consecuencia de una alta temperatura. A 600 °C, casi toda la muestra se carbonizó y se observó que las partículas comenzaron a perder su forma.

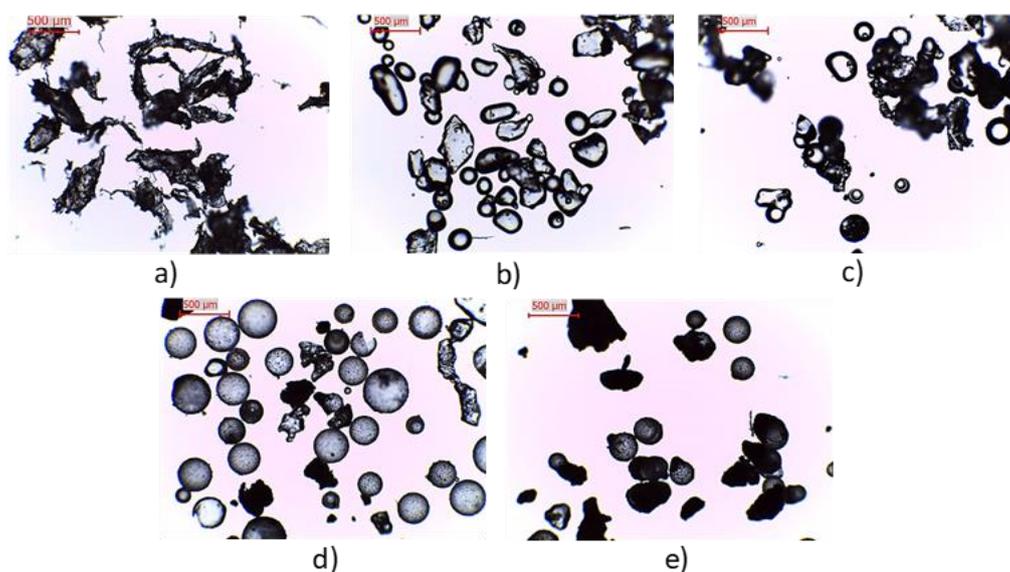


Figura 9. Imágenes obtenidas del microscopio óptico a una amplificación de 4x. a) PEBD triturado, y char obtenido a: b) 450°C, c) 500°C, d) 550°C y e) 600°C

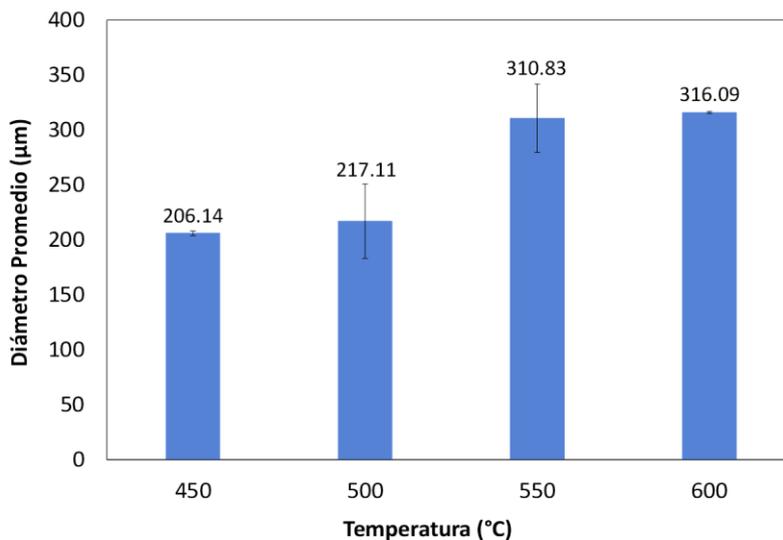


Figura 10. Diámetro promedio de las partículas de char a diferentes temperaturas

Usando el software ImageJ, se calculó el diámetro promedio de las partículas de char obtenidas a diferentes temperaturas de pirólisis. Estos resultados se muestran en la Figura 10. Para este cálculo se utilizaron las imágenes tomadas con una amplificación de 4x. El diámetro promedio de las partículas de char fue mayor al incrementar la temperatura. Las partículas de char a 450 °C tuvieron un diámetro promedio de 206 µm mientras que las partículas a 600 °C alcanzaron 316 µm. Esto puede ser explicado en detalle considerando los resultados obtenidos por el SEM. Las imágenes que se presentan desde la Figura 11a a la Figura 11d, confirmaron la morfología esférica del char discutida anteriormente. Además, la Figura 12a y la Figura 12b proporcionaron información adicional sobre las características de las partículas. Se observó que algunas esferas explotaron cuando se alcanzó 600 °C, mostrándose como esferas huecas. Por lo tanto, este hecho está relacionado con el tamaño de las partículas de char. Las partículas fueron completamente sólidas cuando salieron del reactor a una temperatura de 450 °C y luego estas partículas fueron ganando un mayor diámetro debido a que ocurrió un hinchamiento causado por el aumento de temperatura.

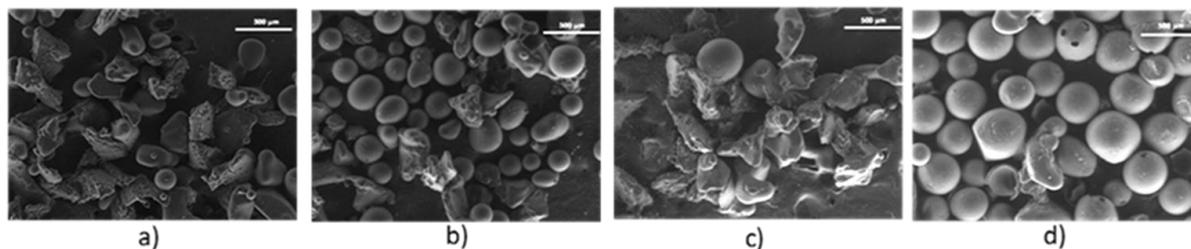


Figura 11. Imágenes SEM del char obtenido de la pirólisis de PEBD a) 450°C-50x, b) 500°C-50x, c) 550°C-50x y d) 600°C-50x

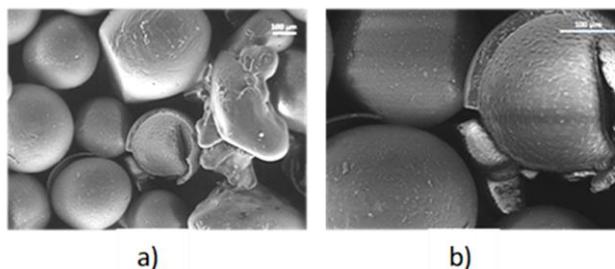


Figura 12. Imágenes SEM del char a 600°C a diferentes ampliaciones a) 100x y b)250x

Existen estudios que corroboran los resultados obtenidos a partir del análisis FTIR y las imágenes SEM. (Sogancioglu et al., 2017) reportó que a medida que aumentó la temperatura, los enlaces aromáticos aumentaron en la estructura del char. Además, las imágenes SEM de char obtenidas en este estudio, a pesar de no mostrar la misma morfología, mostraron una mayor aglomeración de partículas con el aumento de la temperatura. Esto también sucedió en este trabajo como se puede ver en la Figura 11. El char es considerado como un subproducto del proceso de pirólisis; sin embargo, el char también puede tener valor en la industria. En base a varios estudios (Jamradloedluk & Lertsatitthanakorn, 2014; López et al., 2011; Miandad et al., 2017; Sogancioglu et al., 2017), el char puede ser usado como material de construcción, puede ser procesado para convertirse como adsorbente útil para el tratamiento de aguas o puede ser usado como combustible sólido debido a su alto valor calorífico.

4. Conclusiones

Partículas de PEBD de tamaño entre 250 y 355 µm se sometieron a pirólisis rápida a temperaturas entre 450 y 600 °C para estudiar la distribución y el rendimiento de los productos. Los resultados mostraron que el gas fue el producto más abundante en la pirólisis,

seguido por el char y oil. La temperatura tuvo un efecto significativo en el rendimiento de los productos, un aumento de la temperatura favoreció la producción de gas, mientras que el rendimiento de char disminuyó. Esto sucedió debido a que la ruptura de la estructura de las moléculas sólidas se facilita a temperaturas elevadas y, en consecuencia, las moléculas tienden a evaporarse. Sin embargo, el rendimiento de oil no siguió una tendencia y el mayor rendimiento se obtuvo a 550 °C. Los productos de la pirólisis fueron caracterizados con diferentes métodos con el fin de investigar sus aplicaciones.

El oil fue analizado mediante GC-MS identificando el rango de carbonos ($C_{14} - C_{35}$) y esta muestra fue comparada con tres estándares los cuales fueron combustibles convencionales comercializados en Ecuador: súper, extra y diésel. En base al rango de carbonos de la muestra y los estándares, se determinó que el oil puede ser tratado para obtener diésel o puede ser mezclado con diésel convencional para mejorar su calidad. Este análisis en el GC-MS representó un acercamiento a las propiedades del oil que lo hacen un recurso potencial para la generación de combustibles líquidos con fines energéticos.

Los productos gaseosos se analizaron mediante GC-FID y los compuestos identificados fueron metano, etano, acetileno, propano y propileno. Todos estos compuestos tienen un alto valor en la industria y pueden usarse para generar electricidad o como precursores químicos para la fabricación de materias primas e intermedias. Los cambios en la estructura química del plástico pirolizado se identificaron analizando el char mediante FTIR. No se observó un cambio significativo entre el plástico no pirolizado y el char. Sin embargo, cuando la temperatura de pirólisis alcanzó 600°C, el espectro mostró una posible desaparición de la parte alifática de la molécula y un aumento de compuestos aromáticos.

El microscopio óptico y SEM se utilizaron para investigar la morfología y el tamaño de las partículas de char. Las imágenes mostraron que las partículas adquirieron una morfología esférica, convirtiéndose en esferas huecas al aumentar de temperatura. El diámetro promedio

de las partículas también fue aumentando como consecuencia de un incremento de temperatura. Adicionalmente, estudios previos han demostrado que el char puede usarse como material de construcción, combustible sólido alternativo o puede ser convertido en adsorbente para el tratamiento de aguas. En general, este estudio concluyó que la pirólisis es un método efectivo para manejar los desechos plásticos en Ecuador, esta tecnología no solo produce productos de alto valor a nivel industrial, sino que también es un proceso ecológico debido a la producción mínima de residuos.

5. Agradecimientos

Este proyecto se ha realizado con el apoyo del Instituto de Desarrollo de Energías y Materiales Alternativos (IDEMA) de la Universidad San Francisco de Quito, USFQ.

6. Referencias

- Anuar Sharuddin, S. D., Abnisa, F., Wan Daud, W. M. A., & Aroua, M. K. (2016). A review on pyrolysis of plastic wastes. *Energy Conversion and Management*, *115*, 308–326. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.037>
- Anuar Sharuddin, S. D., Abnisa, F., Wan Daud, W. M. A., & Aroua, M. K. (2017). Energy recovery from pyrolysis of plastic waste: Study on non-recycled plastics (NRP) data as the real measure of plastic waste. *Energy Conversion and Management*, *148*, 925–934. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.06.046>
- Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, *38*, 68–94. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>
- Douglas, G. S., Stout, S. A., Uhler, A. D., Mccarthy, K. J., & Emsbo-mattingly, S. D. (2016). Mixed Hydrocarbon Contaminants. In *Standard Handbook Oil Spill Environmental Forensics* (Second Edi, Issue Chapter 21). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803832-1/00017-9>
- Duman, G., Okutucu, C., Ucar, S., Stahl, R., & Yanik, J. (2011). The slow and fast pyrolysis of cherry seed. *Bioresource Technology*, *102*(2), 1869–1878. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.07.051>
- Eke, J., Onwudili, J. A., & Bridgwater, A. V. (2019). Influence of Moisture Contents on the Fast Pyrolysis of Trommel Fines in a Bubbling Fluidized Bed Reactor. *Waste and Biomass Valorization*, *0*(0), 0. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-00560-2>
- Encinar, J. M., & González, J. F. (2008). Pyrolysis of synthetic polymers and plastic wastes. Kinetic study. *Fuel Processing Technology*, *89*(7), 678–686. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2007.12.011>
- J. P. Vas, . Ramya, A. L. Dsilva, E. Serrao, F. Demash, J. D. D. (2017). Production of High Grade Liquid Fuel for CI Engine by Thermo-Catalytic Cracking of Waste Plastic. *Energy and Power*, *7*(3), 81–87. <https://doi.org/10.5923/j.ep.20170703.05>
- Jamradloedluk, J., & Lertsatitthanakorn, C. (2014). Characterization and utilization of char derived from fast pyrolysis of plastic wastes. *Procedia Engineering*, *69*, 1437–1442. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.03.139>
- Lam, C. S., Ramanathan, S., Carbery, M., Gray, K., Vanka, K. S., Maurin, C., Bush, R., & Palanisami, T. (2018). A Comprehensive Analysis of Plastics and Microplastic Legislation Worldwide. *Water, Air, and Soil Pollution*, *229*(11). <https://doi.org/10.1007/s11270-018-4002-z>
- Li, J., Qi, Y., Zhang, D., & Liu, Z. (2007). Propylene production by co-reaction of ethylene and chloromethane over SAPO-34. In *Studies in Surface Science and Catalysis* (Vol. 170, Issue B). Elsevier B.V. [https://doi.org/10.1016/S0167-2991\(07\)81033-0](https://doi.org/10.1016/S0167-2991(07)81033-0)
- López, A., de Marco, I., Caballero, B. M., Laresgoiti, M. F., & Adrados, A. (2011). Influence of time and temperature on pyrolysis of plastic wastes in a semi-batch reactor. *Chemical Engineering Journal*, *173*(1), 62–71. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.07.037>

- Miandad, R., Barakat, M. A., Aburizaiza, A. S., Rehan, M., Ismail, I. M. I., & Nizami, A. S. (2017). Effect of plastic waste types on pyrolysis liquid oil. *International Biodeterioration and Biodegradation*, *119*, 239–252. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.09.017>
- Miandad, R., Barakat, M. A., Aburizaiza, A. S., Rehan, M., & Nizami, A. S. (2016). Catalytic pyrolysis of plastic waste: A review. *Process Safety and Environmental Protection*, *102*, 822–838. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.06.022>
- Miandad, R., Nizami, A. S., Rehan, M., Barakat, M. A., Khan, M. I., Mustafa, A., Ismail, I. M. I., & Murphy, J. D. (2016). Influence of temperature and reaction time on the conversion of polystyrene waste to pyrolysis liquid oil. *Waste Management*, *58*, 250–259. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.09.023>
- Mukherjee, S., Kumar, A., & Zaworotko, M. J. (2019). 2 - Metal-organic framework based carbon capture and purification technologies for clean environment. In *Metal-Organic Frameworks (MOFs) for Environmental Applications*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814633-0.00003-X>
- Narvaez, R. A., Vargas, G., & Espinoza, F. (2013). Potencial of waste-to-energy implementation in Ecuador. *International Journal of Energy Engineering*, *3*(6), 279–286. <https://doi.org/10.5923/j.ijee.20130306.01>
- PlasticsEurope. (2019). *The Circular Economy for Plastics - A European Overview*. 1–36. <https://www.plasticseurope.org/en/resources/publications/1899-circular-economy-plastics-european-overview>
- Pokharel, S., Aryal, N., Niraula, B. R., Subedi, A., & Adhikari, N. P. (2018). Transport properties of methane, ethane, propane, and n-butane in water. *Journal of Physics Communications*, *2*(6), 065003. <https://doi.org/10.1088/2399-6528/aabc45>
- Ponce-Jara, M. A., Castro, M., Pelaez-Samaniego, M. R., Espinoza-Abad, J. L., & Ruiz, E. (2018). Electricity sector in Ecuador: An overview of the 2007–2017 decade. *Energy Policy*, *113*(August 2017), 513–522. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.11.036>
- Rahimi, A. R., & Garcíá, J. M. (2017). Chemical recycling of waste plastics for new materials production. *Nature Reviews Chemistry*, *1*, 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41570-017-0046>
- Rehan, M., Miandad, R., Barakat, M. A., Ismail, I. M. I., Almeelbi, T., Gardy, J., Hassanpour, A., Khan, M. Z., Demirbas, A., & Nizami, A. S. (2017). Effect of zeolite catalysts on pyrolysis liquid oil. *International Biodeterioration and Biodegradation*, *119*, 162–175. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.11.015>
- Seigné-Itoiz, E., Gasol, C. M., Rieradevall, J., & Gabarrell, X. (2015). Contribution of plastic waste recovery to greenhouse gas (GHG) savings in Spain. *Waste Management*, *46*(2015), 557–567. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.08.007>
- Sheetal B, K. (2018). Comparative study of aliphatic and aromatic compounds. *The Pharma Innovation Journal*, *7*(9), 175–177. <https://doi.org/10.1021/ja00167a011>
- Sipra, A. T., Gao, N., & Sarwar, H. (2018). Municipal solid waste (MSW) pyrolysis for bio-fuel production: A review of effects of MSW components and catalysts. *Fuel Processing Technology*, *175*(February), 131–147. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.02.012>

- Sogancioglu, M., Yel, E., & Ahmetli, G. (2017). Pyrolysis of waste high density polyethylene (HDPE) and low density polyethylene (LDPE) plastics and production of epoxy composites with their pyrolysis chars. *Journal of Cleaner Production*, *165*, 369–381. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.157>
- Syamsiro, M., Saptoadi, H., Norsujianto, T., Noviasri, P., Cheng, S., Alimuddin, Z., & Yoshikawa, K. (2014). Fuel oil production from municipal plastic wastes in sequential pyrolysis and catalytic reforming reactors. *Energy Procedia*, *47*, 180–188. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.212>
- Uzoejinwa, B. B., He, X., Wang, S., El-Fatah Abomohra, A., Hu, Y., & Wang, Q. (2018). Co-pyrolysis of biomass and waste plastics as a thermochemical conversion technology for high-grade biofuel production: Recent progress and future directions elsewhere worldwide. *Energy Conversion and Management*, *163*(March), 468–492. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.02.004>
- Vargas, D. C., Salazar, S., Mora, J. R., Van Geem, K. M., & Almeida Streitwieser, D. (2020). Experimental and theoretical study of the thermal decomposition of ethyl acetate during fast pyrolysis. *Chemical Engineering Research and Design*, *157*, 153–161. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2020.03.001>
- Vempatapu, B. P., & Kanaujia, P. K. (2017). Monitoring petroleum fuel adulteration: A review of analytical methods. *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*, *92*, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2017.04.011>
- Verma, R., Vinoda, K. S., Papireddy, M., & Gowda, A. N. S. (2016). Toxic Pollutants from Plastic Waste- A Review. *Procedia Environmental Sciences*, *35*, 701–708. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.069>
- Williams, P. T., & Williams, E. A. (1999). Fluidised bed pyrolysis of low density polyethylene to produce petrochemical feedstock. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *51*(1), 107–126. [https://doi.org/10.1016/S0165-2370\(99\)00011-X](https://doi.org/10.1016/S0165-2370(99)00011-X)
- Yang, J., Rizkiana, J., Widayatno, W. B., Karnjanakom, S., Kaewpanha, M., Hao, X., Abudula, A., & Guan, G. (2016). Fast co-pyrolysis of low density polyethylene and biomass residue for oil production. *Energy Conversion and Management*, *120*, 422–429. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.05.008>