

# Catalytic Pyrolysis of Polypropylene Residues for the Obtaining of Liquid Fuels

Williams Ramos, Ing<sup>1</sup>, Víctor Pretell, MSc<sup>1</sup>, Cesar Lujan, MSc<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Grupo de Investigación en Procesos Termoquímicos- Universidad Nacional de Ingeniería, Perú,  
wramos@fip.uni.edu.pe, vpretell@fip.uni.edu.pe, clujan@fip.uni.edu.pe

*Abstract -- The present research work seeks to study the variables related to the catalytic pyrolysis of polypropylene waste to obtain liquid fuels. The effect of the reactor temperature and the catalyst/raw material ratio on the yields of liquid products was studied. For the investigation, samples of polypropylene waste from urban solid waste (MSW) were collected and, as a catalyst, the equilibrium catalyst of the Fluidized Catalytic Cracking Unit (FCC) of a local refinery, a scale system was also designed and built. laboratory for catalytic pyrolysis. The experimental operating conditions that maximize the obtaining of liquid fuels were: pyrolysis temperature (reactor) = 873.15 K, ratio of catalyst / Raw Material = 10%.*

*Keywords-- pyrolysis, fuels, wastes, polypropylene, catalyst.*

Digital Object Identifier (DOI):  
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2019.1.1.302>  
ISBN: 978-0-9993443-6-1 ISSN: 2414-6390

# Pirólisis Catalítica de Residuos de Polipropileno para la Obtención de Combustibles Líquidos

## Catalytic Pyrolysis of Polypropylene Residues for the Obtaining of Liquid Fuels

Williams Ramos, Ing<sup>1</sup>, Víctor Pretell, MSc<sup>1</sup>, Cesar Lujan, MSc<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Grupo de Investigación en Procesos Termoquímicos- Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, [wramos@fip.uni.edu.pe](mailto:wramos@fip.uni.edu.pe), [vpretell@fip.uni.edu.pe](mailto:vpretell@fip.uni.edu.pe), [clujan@fip.uni.edu.pe](mailto:clujan@fip.uni.edu.pe)

**Resumen**– El presente trabajo de investigación busca estudiar las variables relacionadas con la pirólisis catalítica de los residuos de polipropileno para obtener combustibles líquidos. Se estudió el efecto de la temperatura del reactor y la relación catalizador/materia prima en los rendimientos de productos líquidos. Para la investigación se recolectaron muestras de residuos de polipropileno provenientes de residuos sólidos urbanos (RSU) y como catalizador, el catalizador de equilibrio de la unidad de Craqueo Catalítico Fluidizado (FCC) de una refinería local, además se diseñó y construyó un sistema a escala laboratorio para la pirólisis catalítica. Las condiciones operativas experimentales que maximizan la obtención de combustibles líquidos fueron: temperatura de pirólisis (reactor) = 873.15 K, relación de catalizador/ Materia Prima = 10 %.

**Palabras claves**– pirólisis, combustibles, polipropileno, catalizador, residuos.

**Abstract**– The present research work seeks to study the variables related to the catalytic pyrolysis of polypropylene waste to obtain liquid fuels. The effect of the reactor temperature and the catalyst/raw material ratio on the yields of liquid products was studied. For the investigation, samples of polypropylene waste from urban solid waste (MSW) were collected and, as a catalyst, the equilibrium catalyst of the Fluidized Catalytic Cracking Unit (FCC) of a local refinery, a scale system was also designed and built. laboratory for catalytic pyrolysis. The experimental operating conditions that maximize the obtaining of liquid fuels were: pyrolysis temperature (reactor) = 873.15 K, ratio of catalyst / Raw Material = 10%.

**Keywords**– pyrolysis, fuels, wastes, polypropylene, catalyst.

### I. INTRODUCCIÓN

La Industria del plástico se desarrolla desde los años de 1930 en el Perú, esta empezó su desarrollo con el objetivo de abastecer a la industria del calzado con la elaboración caucho sintético y a la industria farmacéutica con la elaboración de envases. En los años de 1940 se tuvo una influencia europea, y se empezaron a producir plásticos similares a los que se producían en Europa como los acetatos, los butiratos, la bakelita, entre otros. Esta industria creció levemente hasta los años de 1960, fue en ese entonces donde se tuvo un amplio desarrollo debido al crecimiento de la demanda de los productos plásticos [1], [2]. Desde sus inicios hasta la fecha, la industria del plástico en el Perú ha dependido de la

importación de materias primas e insumos provenientes de la industria petroquímica. Los únicos procesos que se manejan en el país debido a que no existe industria petroquímica son procesos mecánicos como la extrusión, el soplado, entre otros. Dichos procesos son los encargados de darle una utilidad a la materia prima importada como producto final.

Como los plásticos son económicos, ligeros y duraderos son usados cotidianamente, al terminar su ciclo de vida son desechados pero todos los residuos plásticos tienen un tiempo de degradación muy largo, pudiendo persistir en el medio ambiente durante cientos o incluso miles de años, debido a su estabilidad y durabilidad por ello estos residuos son considerados contaminantes del medio ambiente [3]–[5]. En el Perú todos los residuos que genera la industria de los plásticos son desechados como basura o son reciclados mecánicamente, pero menos del 50% de estos residuos plásticos son reciclados y el 90% de lo reciclado se realiza de manera informal [6].

Uno de los plásticos más usados es el polipropileno (PP), en el año 2018 se importó al Perú 275,502 toneladas de polipropileno para uso industrial; asimismo se estima que aproximadamente el 22% de los residuos de termoplásticos en la basura, son residuos de PP [6], [7], [8], [9].

Por esta razón se requiere buscar maneras de reciclar los residuos de PP que se generan en el país producto del crecimiento de los niveles de producción y consumo. Los procesos normales de reciclado mecánico pueden ser aplicables, pero se obtiene un producto de menor calidad, asimismo hay restricciones legales para su uso. Adicional a eso, en el Perú existe un déficit (comparado con la demanda) en la producción de combustibles líquidos en las refinerías, por lo que una parte del combustible necesario para abastecer el mercado interno se importa (Se importan de 20,520 MB por año de Diésel 2 y 1,124 MB por año de Gasolinas), también existe importación de Crudo (Se importa alrededor de 46,238 MB por año) para adicionarlo al Crudo Nacional y ser procesado en las refinerías locales [10].

Actualmente se investigan métodos de reciclaje químico de plásticos y nuevas alternativas para la obtención de combustibles líquidos de manera no convencional, de esta forma se cumplen dos objetivos: reutilizar los residuos de plásticos y cubrir la demanda de combustibles. Uno de estos

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2019.1.1.302>

ISBN: 978-0-9993443-6-1 ISSN: 2414-6390

métodos es la pirólisis catalítica que consiste en la degradación térmica de una materia prima en ausencia de oxígeno y en presencia de un catalizador, siendo esta materia prima biomasa, residuos sólidos urbanos, residuos industriales, etc. Uno de los residuos sólidos urbanos que potencialmente pueden ser fuente de combustibles líquidos son los residuos de los plásticos como el PP [11].

Los catalizadores desempeñan un papel importante en la refinación del petróleo. Uno de los procesos donde se utiliza cotidianamente un catalizador es el proceso de Craqueo Catalítico Fluidizado (FCC). Durante la refinación del petróleo, dicho catalizador se contamina con impurezas como el coque, azufre, vanadio y níquel debido a que estas impurezas son parte del crudo. Estas impurezas desactivan el catalizador con el tiempo [12]. El coque es un subproducto indeseable y la causa principal de la desactivación catalizador. Por lo tanto, la selectividad al coque es siempre uno de los principales factores al momento de seleccionar un catalizador [13]. El catalizador que se recircula en la unidad de FCC es diferente al catalizador fresco proveniente de los fabricantes de catalizadores, ya que dicho catalizador es acondicionado en el regenerador de FCC antes de ser nuevamente introducido en el proceso (para retirarle el coque y demás impurezas), el ambiente que contiene vapor a aproximadamente 705 °C en la sección del regenerador induce fuertes cambios en las propiedades del catalizador. Estos cambios (desalineación, pérdida de acidez y cristalinidad, pérdida de área superficial específica) conducen a un estado promedio en el inventario del catalizador (una mezcla de catalizadores con una amplia distribución de tiempos de residencia), dicho catalizador promedio se denomina catalizador de equilibrio [14].

El uso del catalizador de equilibrio de FCC en la pirólisis catalítica del PP — utilizando al PP sin adición de reactivos o tratamiento previo— es muy limitado. En el año 1999 en España, Cardona y colaboradores investigaron la pirólisis catalítica del PP virgen (pellets) usando catalizador de equilibrio de FCC en un reactor semi batch agitado. Dicha investigación estudio la influencia de la naturaleza del catalizador de craqueo y las condiciones de reacción sobre la conversión y la selectividad. Las condiciones operativas óptimas estudiadas fueron a 653.15 K de temperatura, 10 K/min de velocidad de calentamiento, tiempo de residencia de 24 min, relación catalizador/ materia prima de 4.2%, obteniendo un rendimiento de 93.7% de productos líquidos, de lo que se muestra que, desde un punto de vista práctico, el uso de un catalizador de equilibrio agotado de las unidades FCC puede ser la solución más adecuada comparada con otros catalizadores [15].

En el año 2002 en Corea del Sur, Lee y su equipo de investigación estudiaron la degradación catalítica de diferentes residuos plásticos (entre ellos los residuos de PP) sobre catalizador gastado de FCC. La investigación se llevó a cabo a presión atmosférica en un reactor semi batch agitado a una temperatura de 673.15 K, una velocidad de calentamiento de 7

K/min y una relación de catalizador/materia prima de 10%. El objetivo fue investigar la influencia de los tipos de plástico en el rendimiento, el rendimiento de productos líquidos y la distribución de componentes de los productos líquidos de la pirólisis catalítica. La pirólisis catalítica de los residuos del PP dio un rendimiento de líquidos entre 80-85% y un rendimiento de sólidos inferior a 1%. Asimismo, se mostró un contenido de 80% de componentes de olefina en el producto líquido obtenido [16].

En el 2007 en Taiwán, Lin y colaboradores, investigaron la pirólisis catalítica de residuos de PP. Los residuos de PP se pirolizaron con catalizador gastado de FCC, utilizando un reactor de lecho fluidizado de laboratorio que funciona isotérmicamente a presión atmosférica. Se estudió la influencia de las condiciones de reacción, incluidos el catalizador, la temperatura y la relación catalizador/materia prima y los caudales del gas de fluidización. Las condiciones operativas fueron: Temperatura de 563.15 K, tiempo de residencia de 30 min y una relación catalizador/materia prima de 30%. El rendimiento de productos líquidos fue de 60.9%. La selectividad podría verse influenciada por los cambios en las condiciones de reacción. En este estudio se produjeron hidrocarburos entre olefinas e iso-olefinas [17].

En el 2014, en Irán, Abbas-Abadi y su equipo de investigación, estudiaron la pirólisis catalítica del PP con catalizador de equilibrio de FCC en un reactor agitado para la obtención de combustibles. Se determinó el efecto de los parámetros del proceso, como la temperatura de degradación, la relación catalizador/PP, el tipo de gas portador y la velocidad del agitador en el rendimiento y la composición del producto condensado. Las condiciones operativas usadas fueron una temperatura de 723.15 K, una velocidad de calentamiento de 25 K/min, y una relación de catalizador/PP de 10%. Los productos de pirólisis se determinaron mediante análisis de cromatografía de gases (GC) y se demostró que contenían naftenos, parafinas, olefinas y compuestos aromáticos. Se demostró que la temperatura influye en la pirólisis de los residuos de PP. La adición del catalizador mejoró la viabilidad económica del proceso para producir hidrocarburos ligeros [18].

De las referencias estudiadas se puede comprobar que algunos investigadores prefieren trabajar con materia prima virgen (pellets) de PP en vez de residuos de plásticos porque los residuos de PP contienen aditivos y colorantes [19] que podría afectar negativamente la pirólisis, por ello en esta investigación se trabajara con un residuo PP. Asimismo en las referencias se realizó la pirólisis en reactores semi batch o de lecho fluidizado, pero esta investigación se realizó en un reactor tubular vertical.

La presente investigación tiene como objetivo principal determinar el rendimiento de los productos líquidos y evaluar la influencia de la temperatura y de la relación catalizador/materia prima en los rendimientos de combustibles

líquidos en la pirólisis catalítica de los residuos de PP usando catalizador de equilibrio de FCC.

## II. MÉTODOS Y MATERIALES

### A. Residuos de polipropileno

Se adquirió sesenta (60) kg de residuos de polipropileno (molidos y lavados) a 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. El tamaño de partícula de la población varía desde 0 mm hasta 8 mm aproximadamente. 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. En la presente investigación se trabajó con residuos de PP de tamaño de partícula entre 2 a 4 mm.

### B. Catalizador de equilibrio de FCC

El catalizador de equilibrio que se usó proviene de una refinería local y es el empleado en la Unidad de Craqueo Catalítico de dicha refinería, generalmente se toman muestras del catalizador que se encuentra en circulación en la unidad (catalizador de equilibrio) para realizar análisis rutinarios de calidad (el catalizador proporcionado proviene de esas muestras tomadas). El total de la muestra de catalizador de equilibrio fue de dos kg.

### C. Procedimiento experimental de la pirólisis catalítica

De acuerdo con la revisión bibliográfica realizada [20], [21], se consideró como parámetros en el proceso a la presión de vacío de 34,664 kPa y la velocidad de calentamiento de 20 K/min. Se investigó el efecto de la temperatura en el reactor (773.15 K, 823.15 K, 873.15 K, 923.15 K y 973.15 K) y el efecto de la relación catalizador/materia prima (0%, 10% y 20%) sobre los rendimientos de productos líquidos.

La pirólisis se llevó a cabo en un reactor tubular vertical de acero inoxidable, en el cual se colocó 50 g de residuos de PP y el catalizador en la proporción adecuada (encima del PP), el calentamiento es generado mediante un horno eléctrico con velocidad de calentamiento de 20 K/min, el experimento se desarrolla durante tres horas para cada nivel de temperatura. El oxígeno dentro del sistema y los vapores generados por la pirólisis se remueven mediante una bomba de vacío y son llevados a un sistema de condensación que es enfriado mediante un baño de hielo y agua a 278.15 K, los gases no condensables son enviados a un sistema de lavado de gases que consiste en un baño de metanol e hidróxido de sodio, para luego ser venteados. El esquema del sistema se muestra en la Figura 1. Todos los experimentos se realizaron por triplicado para asegurar su repetibilidad.

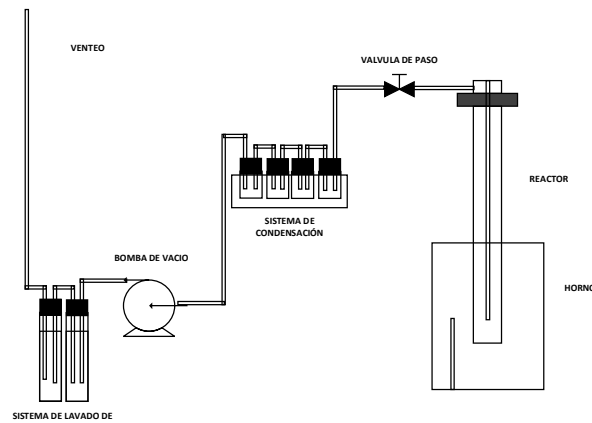


Fig. 1 Esquema experimental del proceso de pirólisis catalítica

## III. RESULTADOS

### A. Propiedades físicas de los residuos de PP

Antes de realizar las pruebas experimentales, se realizó una caracterización de los residuos de PP. La Tabla I muestra sus propiedades físicas.

TABLA I.  
PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS RESIDUOS DE POLIPROPILENO

Ensayo	Método de ensayo	Resultados
Poder Calorífico (Kcal/Kg)	ASTM D-240	8808.1
Contenido de Humedad (%)	ASTM E-1756	6.40
Contenido de Cenizas (%)	ASTM E-1755	1.67
Densidad Aparente (Kg/m <sup>3</sup> )	ASTM E-873	335.2
Materia Volátil (%)	ASTM E-872	92.8

### B. Área superficial del catalizador de equilibrio

Se realizó el análisis BET para determinar el área superficial y el tamaño promedio de poro del catalizador de equilibrio antes y después del experimento de pirólisis, se empleó un analizador Gemini VII 2390t de Micromeritics Instrument Corporation. Los resultados se dan en la Tabla II.

TABLA II.  
ÁREA SUPERFICIAL DEL CATALIZADOR DE EQUILIBRIO

Condición	Área superficial (m <sup>2</sup> /g)	Tamaño promedio de poro (nm)
Antes del experimento de pirólisis	109	4.66
Después del experimento de pirólisis (T=873.15 K)	87	14.02

### C. Análisis termogravimétrico del catalizador de equilibrio

Se realizó el análisis termogravimétrico del catalizador de equilibrio en un analizador termogravimétrico TGA4000 de Perkin Elmer, las condiciones fueron: Velocidad de calentamiento de 20 K/min, masa inicial de 32.021 mg, temperatura inicial de 303.15 K, temperatura final de 1073.15

K y un flujo de nitrógeno de  $2 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{min}$ . El termograma se muestra en la Fig. 2.

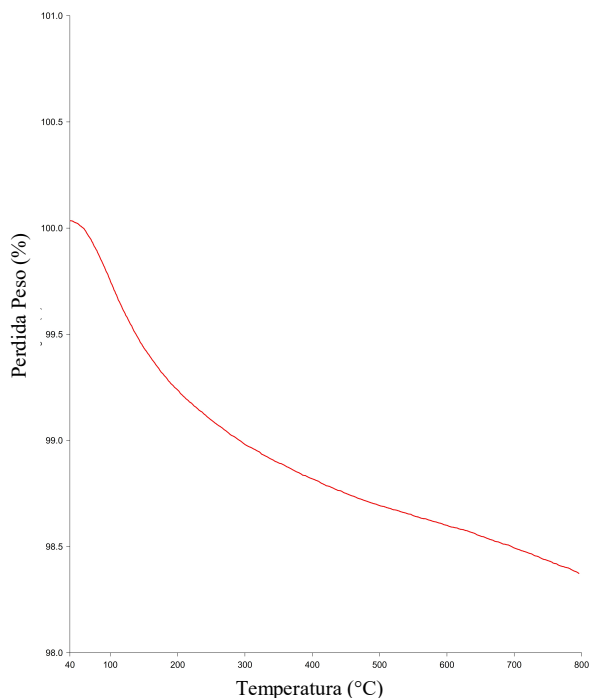


Fig. 2 Termograma de la muestra de catalizador de equilibrio antes de los experimentos de pirólisis

#### D. Resultados de la pirólisis catalítica

Los rendimientos de productos líquidos, sólidos y gaseosos obtenidos en la pirólisis catalítica del PP se muestran en la Tabla III.

TABLA III  
RENDIMIENTOS DE PRODUCTOS DE LA PIRÓLISIS CATALÍTICA DE RESIDUOS DE POLIPROPILENO

Temp. (K)	Rel. Cat/PP = 0%			Rel. Cat/PP = 10%			Rel. Cat/PP = 20%		
	Liq.	Gas.	Sol.	Liq.	Gas.	Sol.	Liq.	Gas.	Sol.
823.15	ND	ND	ND	63.87	36.12	0.01	66.48	33.51	0.01
873.15	74.05	25.94	0.01	80.25	19.74	0.01	66.34	33.66	0.01
923.15	79.41	20.57	0.03	73.88	26.09	0.03	65.98	32.77	0.02
973.15	74.59	25.75	0.04	72.28	27.68	0.04	64.04	35.94	0.02

PP Polipropileno ND No detectable

Al realizar los experimentos a la temperatura de 773.15 K no se observaron resultados, de igual manera sucedió para el caso de 823.15 K a 0% de relación catalizador/materia prima. Esto debido a que el tiempo de operación (3 horas) establecido para el procedimiento experimental, es menor al tiempo necesario para que la reacción se lleve a cabo dentro del reactor, el tiempo de residencia de la reacción es mayor a tres horas.

## IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### A. Catalizador

Se observa de los resultados que el área superficial del catalizador de equilibrio disminuye luego del proceso de pirólisis y que el tamaño promedio de los poros aumenta, esto puede ser porque los poros del catalizador se cubren con coque e impurezas disminuyendo dicha área [13] o que el catalizador está sufriendo un daño estructural por la temperatura (873.15 K), la atmósfera de reacción o una combinación de ambas. Asimismo, se observa del análisis termogravimétrico (Fig. 2) que el catalizador va perdiendo masa al aumentar la temperatura, esto puede deberse a pérdida de humedad, coque (No fue tratado previamente) y en la zona de alta temperatura a la deformación del soporte del catalizador. Algunas referencias también mencionan que la exposición a altas temperaturas puede generar que el catalizador pierda sus propiedades [13], [14]. En ninguna serie experimental se reusó el catalizador.

### B. Efecto de la temperatura en el rendimiento

De los resultados experimentales y de las referencias [17], [18] se observan que a condiciones moderadas, la temperatura tiene un efecto directo en el rendimiento de productos líquidos (a mayor temperatura, mayor rendimiento de productos líquidos) pero al aumentar la temperatura a condiciones severas, se aprecia que hay una máxima temperatura necesaria para generar el mayor rendimiento de combustibles líquidos (Existe una temperatura óptima a la cual se generan la mayor cantidad de productos líquidos) esto debido a que a mayor temperatura existe mayores rupturas de enlaces, formando productos de menor tamaño que a condiciones ambientales se encuentran en estado líquido. Asimismo, se observa que la velocidad de calentamiento afecta al rendimiento de productos líquidos a mayor velocidad de calentamiento, mayor rendimiento de productos líquidos [22].

### C. Efecto de la relación catalizador/PP en el rendimiento

Al observar las pruebas experimentales y la referencia [17], se aprecia que hay una cantidad máxima de catalizador necesaria para generar el mejor rendimiento de combustibles líquidos (Existe una cantidad óptima de relación catalizador/materia prima para generar la mayor cantidad de productos líquidos), ya que al adicionar catalizador por encima de este valor, ocurrirá que las moléculas del polímero se rompan más fácilmente y se generen productos que a condiciones ambientales son gaseosos, disminuyendo de esta forma el rendimiento de productos líquidos. Asimismo se observa que al utilizar mayor relación de catalizador/PP, la temperatura de operación disminuye [22].

De los resultados se tiene que el mayor rendimiento de productos líquidos (80.25%) se obtiene a las condiciones de 873.15 K y una relación catalizador/materia prima de 10%.

## V. CONCLUSIONES

Se determinó el efecto de la temperatura de operación 873.15 (K) y la relación catalizador/materia prima en la producción de combustibles líquidos, encontrándose que los mejores valores a las condiciones del diseño experimental son: Presión de 34.6 kPa abs, velocidad de calentamiento de 20 K/min, temperatura del reactor de 873.15 K y una relación catalizador/materia prima de 10% en masa. A estas condiciones el rendimiento de productos líquidos es 80.25%, sólidos 0.01% y gases 19.74%. Siendo las condiciones de presión y velocidad de calentamiento establecidas, como las mejores que se podían alcanzar con los equipos utilizados.

## AGRADECIMIENTOS

Los Investigadores agradecen al Grupo de Investigación en Procesos Termoquímicos y 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.

## REFERENCIAS

- [1] Exploplast Perú, "Inicios de la industria plástica nacional | Plast Perú Digital Noticia 2017." [Online]. Available: <http://expoplastperu.com/plastnews/inicios-de-la-industria-plastica-nacional-32/>. [Accessed: 10-Oct-2018].
- [2] C. Alday, M. Socorro, M. Atanacio, and N. Elizabeth, "Análisis de las condiciones de trabajo y su impacto en el clima laboral de los operadores del área de producción en las empresas manufactureras de plástico en Lima. Propuesta de un plan de mejora del clima laboral en la empresa Melaform SAC.," 2017.
- [3] Universidad de Piura, "Los Plásticos y La industria del Plástico en el Perú (Capítulo 1)," *I*, p. 20, 2004.
- [4] D. C. Ashworth, P. Elliott, and M. B. Toledano, "Waste incineration and adverse birth and neonatal outcomes: A systematic review," *Environ. Int.*, vol. 69, pp. 120–132, 2014.
- [5] Asociación Peruana de Industria Plástica, "Situación de la Industria Plástica en el Perú. Importaciones de Materia Prima de los últimos seis años," 2017.
- [6] "Perú: El 90% del reciclaje de plásticos es informal | Sophimania." [Online]. Available: <https://sophimania.pe/medio-ambiente/contaminacion-y-salud-ambiental/pera-el-90-del-reciclaje-de-plasticos-es-informal/>. [Accessed: 10-Oct-2018].
- [7] ICIS, "Chemical Prices -Polypropylene Europe," 2017.
- [8] Asociación Peruana de Industria Plástica, "REPORTE ESTADISTICO DE IMPORTACIÓN DE MATERIA PRIMA - OCTUBRE 2017," 2017.
- [9] "Guía de la Industria Plástica." [Online]. Available: <http://plastic-concept.com/Guia-dela-Industria-Plastica/>. [Accessed: 11-Feb-2019].
- [10] Osinergmin, "MERCADO DE HIDROCARBUROS PRIMER SEMESTRE DEL 2017 Año 6 – N° 10 – Julio del 2017," 2017.
- [11] 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.
- [12] T. Chiranjeevi, R. Pragya, S. Gupta, D. T. Gokak, and S. Bhargava, "Minimization of Waste Spent Catalyst in Refineries," *Procedia Environ. Sci.*, vol. 35, pp. 610–617, 2016.
- [13] S. Haitao, D. Zhijian, Z. Yuxia, and T. Huiping, "Effect of coke deposition on the remaining activity of FCC catalysts during gas oil and residue cracking," *Catal. Commun.*, vol. 16, no. 1, pp. 70–74, 2011.
- [14] M. Bertero, J. R. García, M. Falco, and U. Sedran, "Equilibrium FCC catalysts to improve liquid products from biomass pyrolysis," *Renew. Energy*, 2018.
- [15] S. C. Cardona and A. Corma, "Tertiary recycling of polypropylene by catalytic cracking in a semibatch stirred reactor. Use of spent equilibrium FCC commercial catalyst," *Appl. Catal. B Environ.*, vol. 25, no. 2–3, pp. 151–162, 2000.
- [16] Kyong-Hwan Lee; Nam-Sun Noh; Dae-Hyun Shin; Younghwa Seo, "Comparison of plastic types for catalytic degradation of waste plastics into liquid product with spent FCC catalyst," *Interfaces (Providence)*, vol. 17, no. 3, pp. 330–337, 2004.
- [17] Y. H. Lin and M. H. Yang, "Chemical catalysed recycling of waste polymers: Catalytic conversion of polypropylene into fuels and chemicals over spent FCC catalyst in a fluidised-bed reactor," *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 92, no. 5, pp. 813–821, 2007.
- [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.
- [19] M. Cherif Lahimer, N. Ayed, J. Horriche, and S. Belgaied, "Characterization of plastic packaging additives: Food contact, stability and toxicity," *Arab. J. Chem.*, vol. 10, pp. S1938–S1954, 2017.
- [20] W. Ramos, "Obtención de combustibles a partir de residuos de polipropileno," Universidad Nacional de Ingeniería, 2017.
- [21] D. Uriarte, "Experimentación de la obtención de combustibles líquidos a partir de polietileno de alta densidad.," Universidad Nacional de Ingeniería, 2018.
- [22] 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, pp. 822–838, 2016.