

Modeling and Estimation of Physicochemical Properties of the Liquid Fuel Obtained from the Catalytic Pyrolysis of Disposable Masks

Williams Ramos, MSc.¹, Johnny Nahui-Ortiz, PhD.¹, Raymundo Erazo, Dr.², Herbert Manrique, MSc.¹, and Victor Pretell, MSc.¹

¹National University of Engineering, Peru, wramosv@uni.edu.pe, jnahui@uni.edu.pe, hmanrique@uni.edu.pe, vpretellh@uni.edu.pe

²National University of San Marcos, Peru, rerae@unmsm.edu.pe

Abstract— The present research studies the modeling and estimating of the physicochemical properties of the liquid fuel obtained from the catalytic pyrolysis of disposable masks. The modeling and simulation of a liquid fuel stream obtained using the DWSIM Process Simulator (free software) was carried out, experimental results of the Distillation at 760 mmHg (ASTM D86) test were taken, and the simulator's distillation curve tool was used. Likewise, the Cold Flow properties estimation tool and the heating power estimation supplement were used to estimate the results. A comparison of the estimated results with the experimental results is performed, as well as a comparison of the results obtained with the technical specifications of Diesel B5 S-50. It is concluded that it is possible to model and simulate a liquid fuel stream obtained from disposable masks, and the estimation of the gross heating power and density properties of a liquid product stream of disposable masks are considered good estimates (error less than 5%). Likewise, it is concluded that the liquid product obtained from the pyrolysis of disposable masks is within the technical specifications of Diesel B5 S-50 for the analyzed parameters.

Keywords—physicochemical properties, modeling, simulation, catalytic pyrolysis, disposable masks

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).

ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).

DO NOT REMOVE

Modelamiento y Estimación de Propiedades Físicoquímicas del Combustible Líquido Obtenido de la Pirólisis Catalítica de Mascarillas Desechables

Williams Ramos, MSc.¹, Johnny Nahui-Ortiz, PhD.¹, Raymundo Erazo, Dr.², Herbert Manrique, MSc.¹, y Victor Pretell, MSc.¹

¹Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, wramosv@uni.edu.pe, jnahui@uni.edu.pe, hmanrique@uni.edu.pe, vpretellh@uni.edu.pe

²Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú, rerao@unmsm.edu.pe

Resumen— La presente investigación se enfoca en el modelado y la estimación de las características físicoquímicas del combustible líquido producido a partir de la pirólisis catalítica de mascarillas desechables. Se empleó el simulador de procesos DWSIM (software libre) para simular un flujo de combustible líquido, basado en los resultados experimentales obtenidos del ensayo de destilación a 760 mmHg (ASTM D86). Además, se utilizaron herramientas de estimación de propiedades de flujo frío y poder calorífico. La comparación de los resultados estimados con los resultados experimentales y las especificaciones técnicas peruanas del Diesel B5 S-50 revela que es viable modelar y simular un flujo de combustible líquido a partir de mascarillas desechables. Asimismo, se constata que la estimación de las propiedades de poder calorífico bruto y densidad es precisa, con un error menor al 5%. En conclusión, el combustible líquido producido a partir de la pirólisis de mascarillas desechables cumple con las especificaciones técnicas peruanas del Diesel B5 S-50 para los parámetros evaluados. **Palabras claves**—propiedades físicoquímicas, modelamiento, simulación, pirólisis catalítica, mascarillas desechables

I. INTRODUCCIÓN

La pandemia del COVID-19 está generando una gran demanda en el uso de mascarillas desechables, las cuales están compuestas por productos plásticos como el polipropileno. Luego de su uso estas mascarillas son desechadas, generando una gran acumulación de desechos en el medio ambiente [1]. Los residuos de mascarillas pueden ser transportados por ríos, fuertes vientos o vertidos directamente en ecosistemas terrestres o acuáticos. La interacción de estos residuos con el medio ambiente puede conducir a su fragmentación generando microplásticos [2].

Se estima que en el 2021 se utilizaron alrededor de 5364 millones de mascarillas desechables en el Perú [3], de las cuales se estima que el 37% son de tres capas o también conocidas como mascarillas quirúrgicas, dando un total de 1984.7 millones de unidades de mascarillas de este tipo [4]. Asimismo, se sabe que una mascarilla pesa entre 3 a 4 g [5], lo que equivale a un estimado de 18 774 t/año, de los cuales 6 946 t/año corresponden a los residuos de mascarillas quirúrgicas. Por lo que es necesario buscar soluciones a la generación de estos residuos, los procesos de reciclaje mecánico requieren previamente la segregación y desinfección de los residuos, sumado a esto los altos costos de producción debido al pretratamiento a realizarse [6], [7].

Por otro lado, los combustibles fósiles son la principal fuente de energía en el Perú. Debido a la insuficiencia de la producción nacional en las refinerías de petróleo, se requiere importar combustibles para satisfacer la demanda interna. Se estima que se importan aproximadamente 18.9 MMB/año de Diesel B5 S-50, que es ampliamente utilizado como combustible tanto en la industria para maquinarias como en vehículos [8]. Por lo que es necesario desarrollar procesos que permitan contribuir con la producción de combustibles tales como el Diesel B5 S-50.

Asimismo, los catalizadores son muy importantes en los procesos de conversión de la refinación de petróleo como el Craqueo Catalítico Fluidizado (FCC), el catalizador usado es llamado catalizador de FCC y contiene principalmente Zeolita Y [9]. Las unidades de FCC renuevan diariamente alrededor del 1 al 2% de catalizador (llamado catalizador de equilibrio (E-Cat)) del inventario para mantener el rendimiento y la calidad del producto, en el Perú se estima que se consume alrededor de 2800 TM/año en las unidades de FCC [10]–[12]. Por lo que es importante estudiar procedimientos de reutilización de estos residuos industriales.

En la actualidad, se están investigando procesos químicos de reciclaje de residuos plásticos, como las mascarillas desechables, con el fin de desarrollar nuevas alternativas para la obtención de combustibles líquidos. De esta manera, se busca cumplir con dos objetivos importantes: reducir la cantidad de residuos de mascarillas desechables y al mismo tiempo satisfacer la demanda de combustibles. Uno de los procesos que se encuentra en estudio es la pirólisis catalítica que consiste en la degradación térmica de una carga en presencia de un catalizador, esto se consigue llevando a la materia prima a elevadas temperaturas en una ausencia de oxígeno. Las materias primas para la pirólisis pueden ser biomásas, residuos sólidos urbanos, residuos industriales, etc. Uno de los residuos sólidos urbanos con potencial para ser fuente de combustibles líquidos son los residuos de las mascarillas desechables [13]–[15]. Asimismo, en la pirólisis catalítica de mascarillas desechables también se produce productos sólidos y gaseosos como subproductos [7]. A pesar de todas las ventajas de la pirólisis catalítica, aún persisten algunas limitaciones, como la alta demanda de energía, los costos del catalizador y la poca reutilización del catalizador [15].

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Adicionalmente, los simuladores de procesos químicos son programas informáticos utilizados para modelar la dinámica de los procesos químicos en condiciones estacionarias. Esto se logra mediante la identificación de las variables críticas como las presiones, temperaturas y flujos. Actualmente, estos simuladores han evolucionado en su capacidad y han ampliado su uso para el estudio tanto de la dinámica de los procesos como en la regulación y control de los sistemas químicos, incluyendo su respuesta a las perturbaciones presentes en la operación [16].

DWSIM es un simulador de procesos químicos creado por Daniel Medeiros, el cual es de código abierto (acceso libre) basado en el modelamiento de procesos con uso de corrientes de masa, corriente de energía, equipos, operaciones unitarias, procesos unitarios, etc. DWSIM también cuenta con herramientas para la caracterización de petróleo y derivados, así como utilitarios para la estimación de propiedades fisicoquímicas [17], [18]. Es posible utilizar DWSIM para poder modelar y estimar las propiedades fisicoquímicas de un combustible líquido.

Además, se han desarrollado investigaciones que estudian la estimación de propiedades fisicoquímicas a través de la utilización de simuladores de procesos. En 2018, Adeniyi y colaboradores llevaron a cabo un estudio en Nigeria que investigó la simulación por computadora de la pirólisis de aceite lubricante residual utilizando el simulador Aspen Hysys. En este estudio, se logró estimar las propiedades del combustible resultante de la pirólisis [19].

En el 2019 en Colombia, Amar y su equipo de investigación estudiaron la simulación y obtención de combustibles sintéticos a partir de la pirólisis de residuos plásticos. Para llevar a cabo este estudio, se utilizó el simulador de procesos Aspen Plus. Los resultados de la investigación incluyeron la estimación de las propiedades fisicoquímicas del combustible líquido, tales como la densidad, la gravedad API, el punto de anilina y el índice de refracción [20].

En el 2021, Fonts y colaboradores investigaron acerca de la estimación de propiedades termodinámicas y propiedades fisicoquímicas de compuestos derivados de la pirólisis rápida de materiales lignocelulósicos [21].

De las referencias revisadas, se observa que no existe una referencia donde se realice la estimación de propiedades fisicoquímicas del combustible líquido obtenido de la pirólisis catalítica de mascarillas desechables.

La presente investigación tiene como objetivo modelar y estimar las propiedades fisicoquímicas del combustible líquido obtenido a través de la pirólisis catalítica de mascarillas desechables, utilizando el simulador de procesos DWSIM, para lo cual se caracterizará una corriente del combustible líquido con uso de la curva de destilación obtenida en laboratorio y posteriormente se estimarán las propiedades fisicoquímicas las cuales serán discutidas frente a los resultados experimentales.

A. Obtención de combustible líquido por pirólisis catalítica de mascarillas desechables

Los experimentos de pirólisis catalítica se realizaron en el Laboratorio del Grupo de Procesos Termoquímicos y Energéticos de la Universidad Nacional de Ingeniería, se utilizó un reactor tubular vertical de acero inoxidable a escala de laboratorio [7]. Las condiciones operativas para la obtención del combustible líquido fueron una temperatura de 700 °C y una relación catalizador/materia prima del 3.3 % en masa, el catalizador usado fue un Catalizador de Equilibrio (E-Cat) de la Unidad de Craqueo Catalítico Fluidizado (FCC) de una refinera de petróleo local. En la figura 1 se observa el equipo experimental utilizado para la obtención del combustible líquido.



Fig. 1 Equipo experimental de pirólisis catalítica de mascarillas desechables

B. Resultados experimentales de las propiedades del producto líquido de pirólisis catalítica de mascarillas desechables

El producto líquido obtenido de la pirólisis catalítica fue caracterizado como un combustible líquido mediante la determinación de sus propiedades fisicoquímicas, estos ensayos siguieron los métodos normalizados de la *American Society for Testing and Materials* (ASTM) y se realizaron en el Laboratorio de Normalización de Petróleo y Derivados. En la Tabla I se presentan los resultados experimentales de las propiedades fisicoquímicas del producto líquido obtenido de la pirólisis catalítica de mascarillas desechables.

C. Modelamiento y simulación de combustible líquido

Con los resultados experimentales de la destilación ASTM obtenidos por el método ASTM D86, se realizó el modelamiento y la simulación de una corriente de combustible líquido obtenido a partir de la pirólisis catalítica de mascarillas desechables usando el simulador de procesos DWSIM. Para el modelo se consideró el paquete termodinámico Peng-Robinson y el paquete de unidades C5 proporcionado por el software. Para el modelamiento de la corriente se utilizó la herramienta de caracterización de petróleo y derivados por curvas de destilación del software, asimismo se seleccionó la

opción de curva de destilación diferencial sin reflujo (ASTM D86) y la creación de 30 pseudocomponentes. Los métodos y correlaciones seleccionadas para la determinación de las propiedades termodinámicas de la corriente se muestran en la Tabla II. En el caso de la gravedad específica se activa la opción para que los resultados se ajusten a los parámetros de Rackett [22].

En la Tabla III se observa los resultados experimentales de la destilación ASTM introducidos en la herramienta de caracterización del simulador de procesos DWSIM.

TABLA I
RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LAS PROPIEDADES FISCOQUÍMICAS DEL PRODUCTO LIQUIDO OBTENIDO DE LA PIRÓLISIS CATALÍTICA DE MASCARILLAS DESECHABLES

Ensayo	Método	Resultado
Destilación a 760 mmHg	ASTM D86	
	Punto inicial - IBP (°C)	158
	Vol 5% (°C)	190
	Vol. 10% (°C)	203
	Vol 15% (°C)	211
	Vol 20% (°C)	216
	Vol 30% (°C)	230
	40	243
	50	258
	60	274
	70	297
	80	314
	85	329
	90	352
95	360	
Punto Final - FBP (°C)	363	
Volumen destilado	98.0	
Residuo	0.5	
Perdida	1.5	
Punto de Inflamación P.M. (°C)	ASTM D93	69.0
Viscosidad Cinemática, 40 °C (cSt)	ASTM D445	3.385
Punto de Escurrimiento (°C)	ASTM D97	<-30
Índice de Cetano	ASTM D 976	60.5
Poder Calorífico Bruto (MJ/kg)	ASTM D240	45.572
Gravedad API a 60°F	ASTM 1298	43.3
Densidad a 60 °F (kg/m ³)	ASTM 1298	810.4

TABLA II
MÉTODOS Y CORRELACIONES TERMODINÁMICAS UTILIZADAS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE COMBUSTIBLE LÍQUIDO

Propiedades termodinámicas	Métodos y correlaciones
Temperatura crítica	Riazi-Daubert (1985)
Presión crítica	Riazi-Daubert (1985)
Factor acéntrico	Korsten (2000)
Gravedad específica	Riazi-Al-Sahhaf(1996)
Masa molar	Winn (1956)
Viscosidad cinemática	Abbott (1971)

D. Estimación de propiedades fisicoquímicas del combustible líquido

Se utilizó el utilitario disponible en DWSIM para estimar las propiedades flujo en frío (en inglés *Cold Flow Properties*) de la corriente de combustible líquido de pirólisis catalítica de mascarillas desechables modelada y simulada, las propiedades de flujo en frío estimadas fueron el punto de inflamación, viscosidad, punto de escurrimiento e índice de cetano. Del

mismo modo se utilizó el complemento de calculadora de calor de combustión para determinar el poder calorífico de la corriente de combustible líquido. Las ecuaciones matemáticas aplicadas para la estimación de las propiedades fisicoquímicas utilizadas por el simulador de procesos DWSIM se encuentran detalladas en el la guía de usuario del software, el resultado de estas ecuaciones dependen de otros resultados experimentales previamente determinados en laboratorio [22].

TABLA III
RESULTADOS EXPERIMENTALES DE DESTILACIÓN ASTM INTRODUCIDOS AL SIMULADOR DE PROCESOS DWSIM

Volumen de destilado (%)	Temperatura (°C)
0	158
5	190
10	203
15	211
20	216
30	230
40	243
50	258
60	274
70	297
80	314
85	329
90	352
95	360
98	363

III. RESULTADOS

A. Resultados de modelamiento y simulación de combustible líquido

Del modelamiento mediante la caracterización que utiliza los resultados experimentales de la destilación ASTM (ASTM D86), se generó la curva de destilación del combustible líquido obtenido de la pirólisis catalítica de mascarillas desechables la cual se muestra en la Fig. 2.

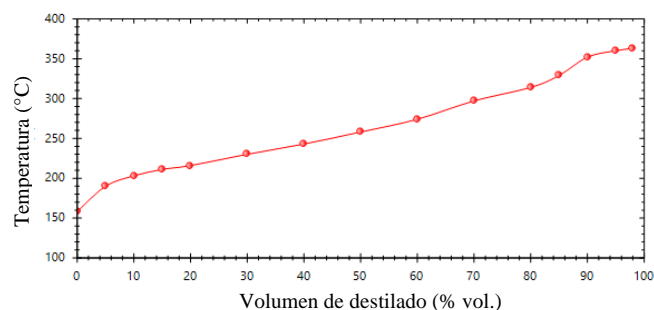


Fig. 2 Curva de destilación de combustible líquido obtenido a partir de la pirólisis catalítica de mascarillas desechables

Asimismo, se crearon 30 pseudocomponentes para el modelamiento de la corriente de combustible líquido obtenido de la pirólisis catalítica de mascarillas desechables, en la Fig. 3 se observan los pseudocomponentes generados.

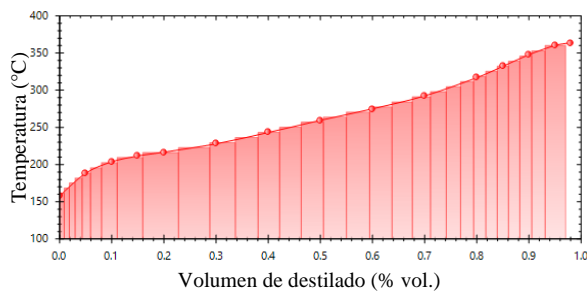


Fig. 3 Pseudocomponentes generados para el modelamiento del combustible líquido obtenido de la pirólisis catalítica de mascarillas desechables

B. Resultados de estimación de propiedades fisicoquímicas del combustible líquido

En la Tabla IV se muestran los resultados estimados de las propiedades fisicoquímicas del combustible obtenido de la pirólisis catalítica de mascarillas desechables.

TABLA IV
RESULTADOS ESTIMADOS DE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL COMBUSTIBLE LÍQUIDO

Propiedad del combustible	Resultado estimado
Punto de inflamación (°C)	94.2
Viscosidad cinemática a 40 °C (cSt)	2.673
Punto de escurrimiento (°C)	-19.3
Índice de cetano	54.0
Poder calorífico bruto (kJ/kg)	45.801
Densidad a 60 °F (kg/m ³)	824.3

IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A. Discusión de Resultados de modelamiento y simulación de combustible líquido

En la Fig. 4 se observa la comparación de las curvas de destilación del producto líquido obtenido por la pirólisis catalítica de mascarillas desechables y la de una muestra de Diesel B5 S-50 que se encuentra dentro de las especificaciones técnicas peruanas.

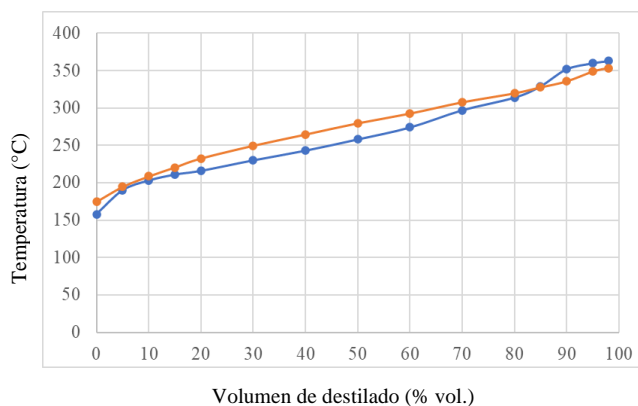


Fig. 4 Comparación de las curvas de destilación combustible líquido obtenido de la pirólisis catalítica de mascarillas desechables y de Diesel B5 S-50 (Azul: Producto líquido obtenido de pirólisis catalítica de mascarillas desechables Naranja: Diesel B5 S-50)

De la Fig. 4, se puede observar que ambas curvas de destilación cumplen con lo establecido por la norma legal referente a las especificaciones técnicas peruanas del Diesel B5 S-50 para el parámetro de 90% de volumen recuperado de la destilación a 760 mmHg (temperatura entre 282 °C y 360 °C) [23] Por lo que el combustible líquido obtenido de la pirólisis catalítica de mascarillas desechables se encuentra en especificación para el parámetro analizado. Asimismo, se observa que ambas curvas tienen una misma tendencia a lo largo del proceso de destilado (valores muy cercanos de temperatura de ebullición).

B. Discusión de resultados de estimación de propiedades fisicoquímicas del combustible líquido

En la Tabla V se muestra la comparación de los resultados estimados de las propiedades fisicoquímicas del combustible líquido obtenido de la pirólisis catalítica de mascarillas desechables utilizando el Simulador de Procesos DWSIM y los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio. Además, se presenta el cálculo del error (%) de cada resultado estimado.

TABLA V
COMPARACIÓN DE RESULTADOS ESTIMADOS DE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL COMBUSTIBLE LÍQUIDO

Propiedad de combustible	Resultado estimado	Resultado experimental	Error (%)
Punto de inflamación (°C)	94.2	69.0	36.5
Viscosidad cinemática a 40 °C (cSt)	2.673	3.385	21.0
Punto de escurrimiento (°C)	-19.26	-30.0	35.8
Índice de cetano	54.0	60.5	10.7
Poder calorífico bruto (MJ/kg)	45.801	45.772	0.1
Densidad a 60 °F (kg/m ³)	824.3	810.4	1.7

Considerando un margen de error del 5% como el máximo permitido, se puede concluir que, de acuerdo con los datos presentados en la Tabla V, las propiedades de poder calorífico bruto y densidad a 60°F son consideradas buenas estimaciones, ya que su error se encuentra por debajo del 5% establecido.

Para el poder calorífico bruto se observa un error de 0.1%, esto debido a que el poder calorífico se estima a partir de la masa molecular de los pseudocomponentes, y este a su vez se estima solo utilizando la información experimental de la destilación ASTM la cual fue ingresada al software. Además, ya que el modelo presenta un alto número de pseudocomponentes (30 pseudocomponentes) la estimación del poder calorífico bruto es cercana a la experimental.

Para la densidad a 60 °F se observa un error del 1.7%, esto debido a que la densidad es estimada a partir del cálculo de las propiedades termodinámicas mostradas en la Tabla II, asimismo el paquete termodinámico seleccionado para el modelamiento (Peng-Robinson) funciona muy bien para

moleculas no polares como lo hidrocarburos presente en el combustible liquido, obteniendose asi una buena estimación de la densidad.

En el caso de las propiedades de punto de inflamación, viscosidad cinematica, punto de escurrimiento e indice de cetano, las estimaciones presentan un error por encima del 5% respecto al resultado experimental, esto se debe a que las ecuaciones utilizadas por el simulador procesos necesitan más información experimental que las ingresadas al software, por lo que el simulador estima los datos necesarios para los calculos, generando mayor variación frente al resultado experimental [22].

De la tabla VI se puede observa que los resultados obtenidos (experimentales y estimados) se encuentra dentro de los rangos establecidos de la especificación del diesel B5 S-50 para los parametros del punto de inflamación, viscosidad cinematica, punto de escurrimiento e indice de cetano, por lo tanto, el que el producto liquido obtenido de la pirólisis catalítica de mascarillas desechables se encuentra dentro de la especificaciones tecnicas peruanas del Diesel B5 S-50 para los parametros analizados.

TABLA VI
COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL COMBUSTIBLE LÍQUIDO CON DIESEL B5 S-50

Propiedad fisicoquímica	Producto liquido de obtenido de la pirólisis catalítica mascarillas desechables		Diesel B5 S-50	
	Resultado estimado	Resultado experim.	Diesel min.	Diesel max.
Punto de inflamación (°C)	94.2	69	52	-
Viscosidad cinematica A 40 °C (cSt)	2.673	3.385	1.9	4.1
Punto de escurrimiento (°C)	-19.26	-30	-	-4
Índice de cetano	54	60.5	45	-
Poder calorífico bruto (kJ/kg)	45.801	45.772	-	-
Densidad a 60 °F (kg/m ³)	824.3	810.4	-	-

CONCLUSIONES

Los resultados de la investigación indican la viabilidad de modelar y simular una corriente de combustible líquido obtenido a partir de la pirolisis catalítica de mascarillas desechables usando el Simulador de Procesos DWSIM. Además, se ha demostrado la posibilidad de estimar propiedades fisicoquímicas, como el poder calorífico y la densidad a 60°F, con un error menor al 5%, por lo que se consideran buenas estimaciones. Asimismo, los resultados indican que el producto líquido obtenido a través de la pirolisis catalítica de mascarillas desechables cumple con las especificaciones técnicas peruanas del Diesel B5 S-50 para los parámetros analizados.

AGRADECIMIENTOS

Los Investigadores agradecen al Grupo de Investigación en Procesos Termoquímicos y Energéticos de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) por el apoyo experimental e intelectual en el proyecto y a la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de Petróleo, Gas Natural y Petroquímica de la UNI por el financiamiento del proyecto.

REFERENCIAS

- [1] S. B. Lee *et al.*, "Production of value-added aromatics from wasted COVID-19 mask via catalytic pyrolysis," *Environ. Pollut.*, vol. 283, p. 117060, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117060.
- [2] C. I. Pizarro-Ortega *et al.*, "Degradation of plastics associated with the COVID-19 pandemic," *Marine Pollution Bulletin*, vol. 176, Elsevier Ltd, Mar. 01, 2022, doi: 10.1016/j.marpolbul.2022.113474.
- [3] G. E. De-la-Torre, M. R. J. Rakib, C. I. Pizarro-Ortega, and D. C. Dioses-Salinas, "Occurrence of personal protective equipment (PPE) associated with the COVID-19 pandemic along the coast of Lima, Peru," *Sci. Total Environ.*, vol. 774, p. 145774, 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145774.
- [4] R. Hurtado-Cuba and N. Espíritu, "Factores sociodemográficos relacionados con el uso adecuado de las mascarillas y el distanciamiento social apropiado para evitar el contagio del SARS-CoV-2 en un mercado de abastos en Lima, Perú," *Horiz. Médico*, vol. 21, no. 3, p. e1360, Jul. 2021, doi: 10.24265/horizmed.2021.v21n3.05.
- [5] A. L. Patrício Silva *et al.*, "Rethinking and optimising plastic waste management under COVID-19 pandemic: Policy solutions based on redesign and reduction of single-use plastics and personal protective equipment," *Sci. Total Environ.*, vol. 742, p. 140565, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140565.
- [6] F. G. Torres and G. E. De-la-Torre, "Face mask waste generation and management during the COVID-19 pandemic: An overview and the Peruvian case," *Sci. Total Environ.*, vol. 786, p. 147628, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147628.
- [7] W. Ramos, J. Nahui-Ortiz, R. Erazo, and V. Pretell, "Pirólisis catalítica de cubrebocas de polipropileno desechables para la obtención de combustibles líquidos," *Inf. tecnológica*, vol. 34, no. 1, pp. 1–10, Feb. 2023, doi: 10.4067/S0718-07642023000100001.
- [8] MINEM, "Estadísticas - Hidrocarburos," 2023. https://www.minem.gob.pe/_estadisticaSector.php?idSector=5 (accessed Jan. 05, 2023).
- [9] E. F. Sousa-Aguiar, "Y Zeolites as a Major Component of FCC Catalysts: Main Challenges in the Modification Thereof," in *Zeolites and Zeolite-like Materials*, Elsevier Inc., 2016, pp. 265–282. doi: 10.1016/B978-0-444-63506-8.00007-0.
- [10] M. Bertero, J. R. García, M. Falco, and U. Sedran, "Equilibrium FCC catalysts to improve liquid products from biomass pyrolysis," *Renew. Energy*, vol. 132, pp. 11–18, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.renene.2018.07.086.
- [11] W. Ramos, "Obtención de combustibles líquidos mediante pirólisis catalítica de residuos plásticos," Universidad Nacional de Ingeniería, 2020.
- [12] W. Ramos and V. Pretell, "Optimización y Caracterización de Combustibles Líquidos Obtenidos a Partir de la Pirólisis Catalítica de Residuos Plásticos," 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, doi: 10.18687/LACCEI2021.1.1.95.
- [13] 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.
- [14] S. Jain, B. Yadav Lamba, S. Kumar, and D. Singh, "Strategy for repurposing of disposed PPE kits by production of biofuel: Pressing

- priority amidst COVID-19 pandemic,” *Biofuels*, vol. 13, no. 5, pp. 545–549, May 2022, doi: 10.1080/17597269.2020.1797350.
- [15] R. Miandad, M. A. Barakat, A. S. Aburizaiza, M. Rehan, and A. S. Nizami, “Catalytic pyrolysis of plastic waste: A review,” *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 102, no. June, pp. 822–838, Jul. 2016, doi: 10.1016/j.psep.2016.06.022.
- [16] A. ; Perez, I. ; Benítez, and J. Miño, *Simulación de procesos químicos y aplicaciones de simulador Superpro Designer*. 2020. [Online]. Available: <https://www.ptonline.com/articles/how-to-get-better-mfi-results>
- [17] DWSIM, “DWSIM – The Open Source Chemical Process Simulator – Just another WordPress site,” 2023. <https://dwsim.org/> (accessed Jan. 24, 2023).
- [18] K. Tangsriwong, P. Lapchit, T. Kittijungjit, T. Klamrassamee, Y. Sukjai, and Y. Laoonual, “Modeling of chemical processes using commercial and open-source software: A comparison between Aspen plus and DWSIM,” in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Apr. 2020, vol. 463, no. 1. doi: 10.1088/1755-1315/463/1/012057.
- [19] A. G. Adeniyi, L. T. Adewoye, and J. O. Ighalo, “Computer aided simulation of the pyrolysis of waste lubricating oil using aspen Hysys,” *Environ. Res. Eng. Manag.*, vol. 74, no. 2, pp. 52–57, 2018, doi: 10.5755/j01.erem.74.2.20537.
- [20] S. Amar Gil, A. N. Ardila Arias, and R. Barrera Zapata, “Simulación y obtención de combustibles sintéticos a partir de la pirólisis de residuos plásticos,” *Ing. y Desarro.*, vol. 37, no. 02, pp. 306–326, 2022, doi: 10.14482/inde.37.2.1285.
- [21] I. Fonts *et al.*, “Thermodynamic and physical property estimation of compounds derived from the fast pyrolysis of lignocellulosic materials,” *Energy and Fuels*, vol. 35, no. 21, pp. 17114–17137, 2021, doi: 10.1021/acs.energyfuels.1c01709.
- [22] D. Medeiros, *DWSIM – The Open Source Chemical Process Simulator*, no. November. 2022. [Online]. Available: <https://dwsim.org/index.php/about/>
- [23] MINEM, “DS-092-2009-EM,” 2009. http://www.minem.gob.pe/_legislacion.php?idSector=10&idLegislacion=3033