

Valorización de Residuos de Bagazo de Caña y Plásticos para la Generación de Compuestos Energéticos¹

Valeria Correa Gallego², Paola Andrea Villegas-Bolaños³

Resumen

El consumo desmedido y la demanda energética a nivel mundial han generado la necesidad de incorporar los desechos plásticos y de origen agroindustrial a procesos de valorización, para obtener productos energéticos alternativos a partir de tratamientos termoquímicos como la pirólisis rápida, en la cual se generan productos sólidos, líquidos y gaseosos. Desarrollar metodologías que permitan realizar un reciclaje y/o aprovechamiento de residuos generados de diversas industrias, en específico, la polimérica y la agroindustrial, es de suma importancia, dada la contaminación crónica y el impacto ambiental en ecosistemas naturales, cuerpos hídricos y fauna. El objetivo de este artículo es analizar los impactos ambientales de la alta generación

de residuos plásticos y agroindustriales, así como determinar la relación entre las condiciones de operación y el rendimiento y selectividad de los productos generados con las características fisicoquímicas de los catalizadores empleados en la pirólisis rápida en pro de la valorización de dichos residuos. Lo anterior se realizó mediante una revisión de la literatura en bases de datos reconocidas para obtener artículos de investigación actualizados y con validez científica. Se encontró que la pirólisis catalizada presenta una mejora respecto al rendimiento y distribución de los productos según la fase activa seleccionada en la que la naturaleza de los metales usados conduce a diversas rutas químicas y por ende, a productos ricos en hidrocarburos.

1 Artículo de Reflexión derivado del proyecto de investigación “Efecto de diferentes sistemas zeolíticos sobre los productos obtenidos en la pirólisis rápida de bagazo de caña de azúcar”; realizado entre marzo de 2018 y diciembre de 2020. Financiado por el Instituto Tecnológico Metropolitano.

2 Valeria Correa Gallego estudiante de Química Industrial del Instituto Tecnológico Metropolitano, Grupo de Investigación en Química Básica, Aplicada y Ambiente Alquimia, miembro del Semillero de Estudio de Retos Químicos, SERQ. Correo: valeriacorrea252237@correo.itm.edu.co / ORCID: 0000-0001-9779-5724

3 Paola Andrea Villegas Bolaños, Ingeniera Química, Magíster en Ciencias Químicas y candidata a doctor en Ingeniería Ciencia y Tecnología de Materiales de la Universidad Nacional de Colombia, Docente-Investigador del Instituto Tecnológico Metropolitano, Grupo de Investigación en Química Básica, Aplicada y Ambiente Alquimia. Correo: paolavillegas@itm.edu.co / ORCID: 0000-0001-8697-8736

Autor para Correspondencia: Paola Andrea Villegas Bolaños, correo: paolavillegas@itm.edu.co

Recibido: 01/12/2020 Aceptado: 30/07/2021

*Las autoras declaran que no tienen conflicto de interés

Palabras clave: Pirólisis rápida, pirólisis catalítica, residuos agroindustriales, residuos plásticos, valorización de residuos.

Recovery of Waste from Sugarcane Bagasse and Plastics for the Generation of Energy Compounds

Abstract

Excessive consumption and global energy demand have generated the need to incorporate plastic and agro-industrial waste into recovery processes, to obtain alternative energy products from thermochemical treatments such as rapid pyrolysis, in which solid, liquid, and gaseous products are generated. The development of methodologies for the recycling and/or recovery of waste generated from various industries, specifically polymer and agro-industrial, is of the utmost importance, given the chronic pollution and environmental impact on natural ecosystems, water bodies and fauna. The objective of this article is to analyze the environmental impacts of the

high generation of plastic and agro-industrial waste, and to determine the relationship between the operating conditions and the performance and selectivity of the products generated with the physicochemical characteristics of catalysts used in rapid pyrolysis for the recovery of such waste. This was done through a review of the literature in recognized databases to obtain updated research articles with scientific validity. It was found that catalyzed pyrolysis presents an improvement with respect to the performance and distribution of the products according to the selected active phase in which the nature of the metals used leads to various chemical routes and, therefore, to hydrocarbon-rich products.

Keywords: Rapid pyrolysis, catalytic pyrolysis, agro-industrial waste, plastic waste, waste recovery.

Valorização de Resíduos do Bagaço da Cana-de-Açúcar e Plásticos para Geração de Compostos Energéticos

Resumo

O consumo desmedido e a procura energética a nível mundial criaram a necessidade de incorporar os resíduos plásticos e de origem agro-industrial em processos de valorização, para obter

produtos energéticos alternativos a partir de tratamentos termoquímicos como a pirólise rápida, na qual são gerados produtos sólidos, líquidos e gasosos. Tendo em conta a poluição crônica e o impacto ambiental nos ecossistemas naturais, é da maior importância desenvolver metodologias que permitam a reciclagem e/ou a valorização dos resíduos produzidos em diversas indústrias, nomeadamente a polimérica e a

agro-industrial, corpos hídricos e fauna. O objectivo deste artigo é analizar os impactos ambientais da alta geração de resíduos plásticos e agro-industriais, bem como determinar a relação entre as condições de operação e o rendimento e a seletividade dos produtos gerados com as características físico-químicas dos catalisadores utilizados na pirólise rápida para a valorização desses resíduos. Isto foi feito através de uma revisão da literatura em bases de dados reconhecidas para obter artigos de pesquisa atualizados

e com validade científica. Verificou-se que a pirólise catalisada apresenta uma melhoria relativamente ao rendimento e distribuição dos produtos segundo a fase activa seleccionada, em que a natureza dos metais usados conduz a diversas rotas químicas e, por conseguinte, a produtos ricos em hidrocarbonetos.

Palabras clave: Pirólise rápida, pirólise catalítica, resíduos agroindustriais, resíduos plásticos, valorização de resíduos.

Introducción

La sobrepoblación, la falta de sensibilización social y la necesidad de confort que ha tenido el ser humano a través de los años, lo ha vuelto dependiente y consumista, generado una alta demanda de productos agrícolas y compuestos provenientes de los combustibles fósiles, anteponiendo los aspectos económicos antes que las consecuencias sociales y/o ambientales provocadas por el mercado de productos o servicios de alto consumo. Por ejemplo, la obtención de materiales poliméricos como el polipropileno y el poliestireno, aunque suponen una alta versatilidad y variedad de aplicaciones, también representa cadenas de contaminación latentes debido a su baja degradación, aproximadamente de 400 años o más (Peñaranda et al., 2017; Congreso de la República de Colombia, 2019). En la última década en Colombia, se produjeron alrededor de 8.3 mil millones de toneladas de plásticos de los cuales solo el 9% fue reciclado, y dada su baja biodegradabilidad, alrededor

del 12% se incineró y el 79% restante terminó en cuerpos hídricos y sistemas naturales produciendo, el envenenamiento por acumulación de plásticos en tejidos de animales acuáticos, el desplazamiento de especies, la pérdida de las propiedades de las matrices contaminadas y la aparición de partículas en suspensión que causan problemas respiratorios (Congreso de la República de Colombia, 2019).

Por otro lado, los residuos agroindustriales a nivel nacional ascendieron a 71.943.813 t/año provenientes del procesamiento de café, palma de aceite, caña de azúcar, panela, maíz, arroz, plátano, entre muchos otros, los cuales casi en su totalidad fueron incinerados, provocando emisiones de gases de efecto invernadero (Greenpeace, 2018), igualmente, los desechos depositados en rellenos sanitarios generaron productos lixiviados, que son una de las fuentes de contaminación más significativas, puesto que se acompaña de compuestos sulfurados y la producción de metano (CH₄), aspectos que articulan el deterioro ambiental (Peñaranda et al., 2017).

Para la reducción del daño ambiental producido a causa de estos desechos, se han implementado una serie de procesos para su aprovechamiento en diversas áreas, por ejemplo, la biomasa proveniente de la agroindustria se utiliza en procesos de producción de biogás, bioetanol, abonos y, en las últimas décadas, se ha estudiado para la generación de biocombustibles (Rodríguez & Fernández, 2016; Martínez et al., 2013; Shu et al., 2006). Por otro parte, los residuos poliméricos se someten a procesos de reciclaje mecánicos o químicos, los cuales, a pesar de contribuir a la recuperación de estos desechos, no garantizan la reincorporación total de ellos a otros procesos de producción (Vázquez et al., 2018), por lo que buscar alternativas para su valoración se ha convertido en un foco de investigación en la actualidad.

La pirólisis es un tratamiento térmico prometedor que permite la descomposición de la materia, generando cambios físicos y químicos de manera simultánea, en el que se obtienen productos sólidos, líquidos o gaseosos. Por ejemplo, en cuanto a materiales sólidos se genera biochar (pirólisis no catalítica) y coque (pirólisis catalítica), los cuales pueden adecuarse y utilizarse como carbón activado. En relación con productos condensables, los aceites obtenidos por pirolisis de polipropileno y bagazo de caña de azúcar pueden tener una capacidad energética de 42 MJ/kg y de 13.380 kJ/kg, respectivamente. Finalmente, se generan también productos gaseosos de alto valor energético como el metano (CH_4) e hidrógeno (H_2) (Lin et al., 2004; Jayaraman et al., 2018; Collazos, 2015). Sin embargo, para

optimizar el proceso y obtener una mayor selectividad y rendimiento, la reacción se realiza de manera catalizada. De acuerdo con investigaciones preliminares, los catalizadores más ampliamente utilizados son zeolitas industriales (HZSM-5, Y, X), catalizadores ácidos y algunos óxidos metálicos (Buitrago, 2012; Wei et al., 2020).

Desarrollar metodologías que permitan realizar un reciclaje y/o aprovechamiento de residuos generados de diversas industrias, en específico, la polimérica y la agroindustrial, es de suma importancia, dada la contaminación crónica que se vive actualmente a raíz de su alta demanda (Vaikarar et al., 2019), con el fin de minimizar el cambio climático y el impacto ambiental en ecosistemas naturales, cuerpos hídricos y fauna (Ibro, 2015). Es por esto que, el objetivo de este artículo, es analizar los impactos ambientales de la alta generación de residuos plásticos y residuos agroindustriales, como por ejemplo el polipropileno y el bagazo de caña de azúcar, así como los desarrollos encontrados en pro de su valorización enfocados en la pirólisis rápida, para determinar así, la relación entre las condiciones de operación, las reacciones favorecidas y el rendimiento y selectividad de los productos generados con las características fisicoquímicas del catalizador.

La búsqueda de los artículos recopilados para la realización del presente artículo revisión se desarrolló mediante las bases de datos ScieDirect, Scopus, Dialnet y Redalyc, filtrando la búsqueda entre el año 2015 hasta el 2020 para obtener publicaciones actualizadas y con validez científica. Por otro lado, las palabras

claves utilizadas para las ecuaciones de búsqueda fueron: residuos agroindustriales, residuos plásticos, valorización de residuos, pirólisis, pirólisis rápida, pirólisis catalítica, catalizadores para pirólisis, entre otras. Además, se formularon de manera general y específica, según el tema concreto a tratar en cada apartado del artículo. Los criterios de selección fueron la relevancia del artículo asociada al número de citas y las alternativas de valorización de residuos de polímeros y bagazo de caña.

Impacto de Plásticos y Residuos Agroindustriales en el Ambiente

La alta demanda que existe actualmente hacia productos no biodegradables como son los plásticos, produce su acumulación en cualquier matriz, debido a su gran capacidad para transportarse y distribuirse por los ríos y océanos del mundo (Windsor et al., 2019), generando la muerte de especies por ingesta de cuerpos extraños, por enredarse en ellos (Duncan et al., 2019), y a su vez, por modificar los ecosistemas (Monteiro et al., 2018). A pesar de ser compuestos sintéticos de alto peso molecular y cadena larga (Bahl et al., 2020), pueden quedarse suspendidos en el aire al descomponerse y fraccionarse, ocasionando problemas respiratorios representando un riesgo de mayor magnitud para quien se encuentra expuesto a estos (Ribeiro et al., 2019).

Por otro lado, y representando una contaminación no menos significativa, se encuentran los residuos agroindustriales, los cuales provienen de diferentes etapas de procesos productivos (Corredor & Pérez, 2018) y que, a pesar de ser biodegradables,

si no son dispuestos de manera correcta, terminan contribuyendo a la contaminación ambiental. Por ejemplo, la incineración y/o disposición de estos residuos en un relleno sanitario provoca la producción de gases de efecto invernadero como el metano (CH_4), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2) y la lixiviación de compuestos sulfurados, respectivamente (Cury R et al., 2017), ocasionando deterioro de la capa de ozono (Hwang et al., 2017) y contribuyendo al calentamiento global (Qin et al., 2020), además de la filtración de contaminantes biológicos y químicos al suelo, como ácidos húmicos, nitrógeno amoniacal e incluso metales pesados (Quan et al., 2014), los cuales ya son problemáticas graves por sí solas.

Tasa de Generación de Residuos Agroindustriales y Plásticos en Colombia

Colombia es un alto generador de productos agrícolas, debido a su alta variedad de climas y topografía, encontrándose con zonas tropicales y templadas, también, zonas cálidas y frías, en las cuales se genera una alta cosecha de plátanos, caña de azúcar, y tabaco, así como papas, trigo y cebada (Bell, 2012). La alta actividad económica relacionada con este sector ha hecho inminente que la generación de residuos aumente cada día más, se estima que en la actualidad se generan aproximadamente 71.943.813 t/año de residuos producto de este sector (Peñaranda et al., 2017). Colombia, es uno de los productores de caña más importantes del mundo, siendo la caña de azúcar, el segundo producto con mayor superficie de cultivo a nivel nacional y representando el 1,3% de la

producción mundial ocupando la posición número trece (13) a nivel mundial (Carvajal et al., 2018). Los ingenios azucareros producen alrededor de 6 millones de toneladas de bagazo de caña (Federación Nacional de Cafeteros, 2020), de los cuales en su mayoría no tienen un proceso de aprovechamiento, por lo que son dispuestos en un relleno sanitario o incinerados. A su vez, Colombia también destaca por su alta demanda hacia productos plásticos y por ser un consumidor de este tipo de productos, se estima que se consumen aproximadamente 24 kg per cápita, lo que se traduce en un volumen de consumo de 1.250.000 toneladas anuales de plástico en el país (Lebreton et al., 2017).

Con base en un reporte emitido en octubre del año 2018 por parte de Greenpeace, en el territorio nacional se generan alrededor de 12 millones de toneladas por año de

residuos plásticos, de los cuales solo el 17 % es reciclado, lo que indica que más de 9.96 millones de toneladas de plástico terminan contaminando los ecosistemas terrestres y acuáticos, generando consecuencias irreparables para la fauna y salud pública a nivel nacional (Greenpeace, 2018; Abdallah et al., 2020).

Alternativas de Valorización Actuales para Residuos Plásticos y Agroindustriales

A continuación, se presentan diferentes alternativas que han sido estudiadas a nivel mundial para la implementación de estos residuos a otros procesos productivos. En la tabla 1, se reúnen algunos de los productos de valorización generados a partir de residuos plásticos y agroindustriales, y se describe brevemente el procesamiento.

Tabla 1 Algunas alternativas de valorización de residuos plásticos y agroindustriales (caña de azúcar)

Producto de valorización	País	Tipo de desecho	Descripción del proceso
Carbón activado	China	Agroindustrial - Bagazo de caña	Utilización de agentes activadores (aire, CO ₂ , H ₃ PO ₄ , NaOH) para activar los poros y modificar sus propiedades fisicoquímicas (Guo et al., 2019)
Biogás	Brasil	Agroindustrial - Bagazo de caña	Producción mediante digestión anaeróbica mediante la degradación por acción de enzimas (Vats et al., 2019)
Bioetanol	Cuba	Agroindustrial - Bagazo de caña	Hidrólisis del bagazo de caña para la obtención del bioetanol, mediante la fermentación (Margarita et al., 2015)
Fibras cortas para construcción de edificios	España	Agroindustrial - Bagazo de caña	Fibras ahumadas de bagazo, se tratan con NaOH, para formar aglomerados con yeso y cemento portland (Hernández et al., 2020)
CO ₂ biogénico	Escandinavia	Policloruro de vinilo Polietileno Polipropileno	Oxicombustión de residuos plásticos para producir CO ₂ y utilizarlo posteriormente en procesos de producción para obtener por ejemplo, gas de síntesis, oleofinas, entre otros (Thunman et al., 2019).

Producto de valorización	País	Tipo de desecho	Descripción del proceso
Fabricación de piezas para la restauración de forjados	España	Polipropileno	Manufactura de morteros con mezclas de polipropileno mixtas y áridos naturales, se emplean como materia prima para la fabricación de piezas de restauración, pasando por tratamientos de molienda y mezclado (Hita, 2018)
Hormigón ligero	Tailandia	Polietileno Polipropileno	Incorporación de la melanina (plástico termoendurecible) mediante la rectificación, molienda y tamizaje, para agregarlo como aditivo en la producción de hormigón ligero (Panyakapo & Panyakapo, 2008).
Materiales de carbono	China	Polietileno Poliestireno de alta densidad Tereftalato de polietileno	Carbonización de residuos plásticos para convertir los precursores de estos polímeros en materiales de carbono (Chen et al., 2020)

Fuente: elaborado por autores

Con base en la información anterior se puede afirmar, que los procesos de valorización de mayor interés para el bagazo de caña están relacionados con productos para la industria energética, debido principalmente a la gran cantidad de energía almacenada que posee la biomasa mientras que para los residuos plásticos se explora principalmente productos para la industria de la construcción, esto en relación con las propiedades mecánicas que ofrece la incorporación de residuos plásticos como aditivos.

Reciclaje Químico

El reciclaje químico, consiste en la descomposición de las moléculas de los polímeros en materias primas para la reincorporación a la industria petroquímica (Roncacio, 2017), esto debido al craqueo de las macromoléculas que lo componen para transformarlas así, en compuestos de bajo peso molecular, a los que posteriormente,

se les realizan procesos de separación y purificación para hacer posible su aprovechamiento en la producción de nuevos materiales, entre ellos, plásticos que pueden tener características diferentes o semejantes al de partida (Elgegren et al., 2012). Para realizar este tipo de tratamiento sobre los residuos plásticos es importante conocer el monómero de partida, entender su estructura, comportamiento frente al calor y biodegradabilidad (Kasar et al., 2020). Este proceso cuenta con cuatro metodologías de valorización, las cuales son la pirólisis (Conesa & Martin, 2009), la hidrogenación (Baena et al., 2020), la gasificación (Lazzarotto et al., 2020) y la metanólisis (Samak et al., 2020), de todas ellas, la más utilizada en la actualidad debido al potencial para obtener compuestos con valor energético es la pirólisis (Jha & Kannan, 2020; Chen et al., 2021).

¿Es la Pirólisis un Tratamiento que Facilita la Valorización de este Tipo de Residuos?

La pirólisis es un proceso termoquímico de descomposición, el cual se lleva a cabo sin presencia de oxígeno (Foong et al., 2020), a presión atmosférica y en medio inerte. La temperatura de este tratamiento depende del tipo de pirólisis, entre 300 a 500 °C se considera pirólisis rápida y la pirólisis lenta se encuentra en el rango de 800 a 1000 °C (Kim et al., 2014).

Este tratamiento supone una alternativa de valorización de plásticos post-consumo y desechos agroindustriales, minimizando el impacto ambiental causado por décadas debido a la mala disposición de estos residuos (Kasar et al., 2020). Las variables de operación de la pirólisis permiten controlar diversos aspectos del proceso; en la Tabla 2, se muestra de manera detallada los efectos de algunas variables consideradas.

Tabla 2. Efecto de algunas variables de operación de la pirólisis sobre el producto líquido obtenido

Variable	Efecto en el proceso
Composición de la biomasa	<p>El contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina varía según el tipo de biomasa, lo que afecta la distribución de la composición de productos generados y las características de los mismos (Baray et al., 2019).</p> <ul style="list-style-type: none"> • La biomasa rica en celulosa genera productos ricos en líquido inorgánico, gases no condensables (CO, CO₂, H₂, CH₄), agua y sólidos carbonosos. • La biomasa rica en celulosa genera productos ricos en líquido inorgánico, gases no condensables (CO, CO₂, H₂, CH₄) y agua. • La biomasa rica en lignina genera productos ricos en líquido inorgánico, gases no condensables (CO, CO₂, H₂, CH₄) y sólidos carbonosos.
Velocidad de calentamiento	<p>El aumento de la velocidad de calentamiento (Wang et al., 2008):</p> <ul style="list-style-type: none"> • disminuye el tiempo de reacción • aumenta el gradiente de temperatura entre la superficie y el interior de las partículas de biomasa • disminuye la tasa de pérdida de peso
Temperatura de reacción	<p>La temperatura influye en el rendimiento de los productos y en la composición del gas que se produce (Sun et al., 2010).</p> <p>Si la temperatura aumenta:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aumenta la concentración de gases no condensables (CO, CO₂, H₂, CH₄). • Conlleva a que el poder calorífico del gas obtenido de la pirólisis sea mayor (Arteaga et al., 2012)
Tamaño de partícula de la biomasa	<p>A menor tamaño de partícula, mayor área superficial, lo que implica mayor transferencia de calor (Luo et al., 2010)</p> <p>A mayor tamaño de partícula menor transferencia de calor, lo que implicaría un menor rendimiento de bioaceite y una mayor generación de gas (Hoyos & Figueroa, 2009)</p>

Variable	Efecto en el proceso
Presencia de catalizador	<p>La presencia de un catalizador en la reacción de pirólisis mejora la calidad de bioaceite en términos de composición (fracciones aromáticas más grandes), aumentando la estabilidad térmica y química, aromatización, desoxigenación y reutilización, disminuyéndola producción de compuestos oxigenados (Liu et al., 2020).</p> <p>Promueve la escisión de los enlaces C-C y C-O en los sitios ácidos y aumenta la selectividad a los hidrocarburos en el bioaceite (Qiao et al., 2017).</p> <p>Afecta de manera significativa el rendimiento y la selectividad del producto (Escola et al., 2011).</p>

Fuente: elaborado por autores

Productos de Pirólisis

Dependiendo de las condiciones de operación es posible a través de la pirólisis de compuestos orgánicos obtener diferentes tipos de productos. El rendimiento para cada uno de ellos depende directamente del tipo de pirólisis que se realice, en caso de la pirólisis rápida el rendimiento para el producto líquido, sólido y gaseoso es de 75 %, 12 % y 13 % respectivamente (Baray et al., 2019; Dai et al., 2020).

A continuación se detalla el tipo de producto y algunas características.

Sólidos. El residuo sólido que queda al completarse la pirólisis es llamado carbón o más conocido como biochar; esta fracción de producto representa la parte orgánica y las cenizas. Contiene alrededor de 5-25% de la energía del material de alimentación, a su vez, este producto puede ser utilizado para la generación de energía (Bridgwater, 2011).

Para determinar las aplicaciones idóneas del residuo es necesario realizar una caracterización completa, la cual influye la medida de carbono fijo, contenido de humedad, materia volátil, pH, granulometría y el contenido de hidrocarburos aromáticos

policíclicos (HAP) (Miliotti et al., 2020). Aunque, usualmente es utilizado como carbón activado y en la remediación de suelos.

Gaseosos. Los productos gaseosos (gases no condensables), se componen principalmente de dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO) y metano (CH₄) e hidrógeno (H₂) (Banks & Bridgwater, 2016), el rendimiento de estos aumenta a medida que aumenta la temperatura y pueden ser utilizados como fuente de energía, siendo lo más adecuado utilizarlo en procesos donde es generado (Baray et al., 2019). Sin embargo, puede ser empleado en motores de combustión interna después de ser sometido a un tratamiento para remover los vapores ácidos y material orgánico suspendido que pudiera estar presente en él (Tran et al., 2020).

En algunos casos, el gas de pirólisis (compuesto por los gases no condensables antes mencionados), pueden ser utilizados como parte de la corriente de fluidización aumentando la relación H₂/C dentro del reactor, promoviendo el rendimiento de hidrocarburos en el bioaceite (Ren et al., 2020).

Líquidos. El bioaceite que se obtiene es una mezcla compleja, dividida en dos capas,

la superior es un aceite de color marrón claro que se disuelve en agua mientras que la inferior es un aceite pesado de color oscuro e insoluble en agua (Vamvuka et al., 2018)

Entre las aplicaciones más prometedoras de los bioaceites obtenidos a partir de la pirólisis, están la incorporación como biocombustible para calderas (Soni & Karmee, 2020), motores y turbinas (Jiat et al., 2020), así como en motores diésel (Safana et al., 2017).

¿Qué Catalizadores se han Empleado en la Pirólisis de Biomasa y Polipropileno, (PP)?

Mediante la revisión bibliográfica se encontraron algunos estudios en los que se emplea la pirólisis catalítica tanto rápida como lenta, para la valorización de residuos poliméricos y agroindustriales. En la Tabla 3, se presentan algunas condiciones de dichos estudios como el producto de interés, el tipo de residuo implementado y el pretratamiento realizado en los catalizadores empleados con el fin de mejorar el rendimiento de la reacción.

Tabla 3 Catalizadores reportados para reacciones de pirólisis de residuos plásticos y de origen agroindustrial

Composición catalizador	Material pirolisado	Producto de interés	Rendimiento	Pretratamiento	Referencia
Fe-Ni	PP	Material Carbono	T = 800° C; 36%	Sin pretratamiento	Yao, 2020
Ni-CaO-C Ni- Al ₂ O ₃	Polietileno de alta densidad, (HDPE) Polipropileno, (PP) Poliestireno, (PS) Aserrín de pino	Hidrógeno	80.36 mmol/ g HDPE 59.35 mmol/ g PP 38.51 mmol/g PS	Sin pretratamiento	Chai, et al, 2020
Al ₂ O ₃	PP	Líquidos (aceites)	25 g de aceite	Sin pre-tratamiento	(Kumar et al., 2020)
K ₂ Ca(CO ₃) ₂ K ₂ Ca ₂ (CO ₃) ₃	Paja de arroz	Líquidos y gases	Aproximadamente, 57% bioaceite y 18 % gas	Impregnación de las muestras con Ca (OH) ₂ , se agitó y seco en horno.	Tian, X., et al, 2021
K ₃ PO ₄ /Fe ₃ O ₄ MSB	Residuos de madera de álamo	Fenol	27.6 %	Molienda, tamizaje y calcinación	Zhang, et al., 2019,
Cenizas de alto horno (BFGA) CaO Fe ₂ O ₃ Na ₂ O	Pellets de residuos de pino	Líquidos y gases	60.30% líquidos a 550 °C 21.12 % gases a 750°C	Comprimidos relación másica 2:8 BFGA/Biomasa	Pang,et al, 2020

Fuente: elaborado por autores

Yao, 2020, estudiaron el efecto de la presencia del catalizador Fe-Ni, la temperatura y el método de síntesis del catalizador en la pirólisis de polipropileno, (PP), la cual se llevó a cabo entre 600 y 800°C con una rampa de 15°C/min. Los resultados mostraron que bajas temperaturas permitieron la generación de compuestos líquidos con un rendimiento de 60% y a 800°C se favorecía la producción de gas y material carbonoso a 48.5% y 36% de rendimiento, respectivamente. Mientras que, en ausencia del catalizador solo se observó material carbonoso a alta temperatura. Por lo que ambos aspectos: el metal presente en el catalizador y la temperatura son condiciones esenciales para la generación de productos de valorización de este residuo. Respecto a la fase gaseosa se observó principalmente la producción de H₂ seguida por CH₄. En cuanto al efecto de la síntesis del catalizador se identifican cambios en la morfología del material carbonoso, por lo que se recomienda el catalizador obtenido por método sol-gel para la generación de nanotubos de carbono con características más homogéneas.

Chai, et al, 2020 desarrollaron un catalizador de Ni-CaO-C para gasificar el material volátil de la pirólisis de una mezcla de polímeros: polietileno de alta densidad, (HDPE), polipropileno, (PP), poliestireno, (PS) y aserrín de pino, en un sistema de soporte catalítico dual para la producción de H₂. Los resultados experimentales indicaron que el rendimiento H₂ mejora con presencia del catalizador y que la relación másica de biomasa: plástico 7:3. Además, se encontró que en comparación con el HDPE y el PP, el PS requiere una temperatura de reformado y un

caudal de agua más altos para garantizar una producción aceptable de H₂, lo que consume más energía. Los productos gaseosos principales fueron H₂ y CO₂ para el HDPE, que tuvo una menor temperatura de reformado 700 °C y 5 ml/h como flujo de agua. Por los estudios anteriores, se puede observar que el tipo de fases activas empleadas en la pirólisis, la temperatura, la composición del plástico y las atmósferas de reacción definen los cambios en la proporción de productos generados y su composición debido a la activación de diversas reacciones.

Pang, et al, 2020, estudiaron la pirólisis de residuos de pino entre temperaturas de 350°C a 750°C con tiempos de retención de 15 minutos a una velocidad de calentamiento de 50°C/min. Los resultados revelaron que la presencia de Fe en el catalizador facilitó la obtención de H₂ a altas temperaturas y una reducción del 5.08% en el rendimiento de productos líquidos a 550°C, sin embargo, promueve la reacción de desoxigenación de los productos líquidos, lo cual favorece a la calidad del bioaceite obtenido. La sinergia entre el Fe y los metales Ca, Na y K explica estos fenómenos.

Zhang, et al., 2019, analizaron la pirólisis de residuos de madera catalizada con K₃PO₄/Fe₃O₄ encontraron que la basicidad de K₃PO₄ permite optimizar la producción de fenol, además la reacción debe ser desarrollada a 550°C en presencia de H₂ para estabilizar los radicales e intermediarios activos durante la descomposición del lignina, incrementando la formación de compuestos fenólicos en productos líquidos. Por otro lado, encontraron que el rendimiento de la fase condensada es inversamente proporcional con la relación

másica de catalizador/biomasa siendo más favorable cuando es uno.

Tian, et al, 2021 estudiaron el efecto sinérgico de dos metales durante la pirólisis de paja de arroz mediante el carbonato binario $K_2Ca(CO_3)_2/K_2Ca_2(CO_3)_3$, los resultados muestran que la adición de K_2CO_3 promueve la descomposición y condensación de lignina, la cual incrementa la energía de activación. En el proceso de co-catálisis la impregnación de $Ca(OH)_2$ mejora la distribución de K_2CO_3 a bajas proporciones y la mezcla de K_2CO_3 también facilita la distribución uniforme de $Ca(OH)_2$. La óptima condición fue de una impregnación de 1% peso de $Ca(OH)_2$ y un 10% peso de la mezcla K_2CO_3 con lo cual se evita el crecimiento de las partículas de $CaCO_3$ y con ello se mejora la distribución de Ca y K, se evidencia que la cantidad de cenizas afecta el desempeño del catalizador propuesto, el cual es efectivo entre más alto sea el contenido de cenizas generado por la biomasa.

En consecuencia, de acuerdo a la naturaleza de los metales usados como fases activas en los catalizadores, la pirólisis se lleva a cabo hacia diversas rutas químicas, reduciendo la temperatura de la descomposición térmica de los diversos compuestos de la biomasa, favoreciendo la producción de compuestos fenólicos o la eliminación de compuestos oxigenados, entre otras.

Conclusiones

La pirólisis representa una alternativa atractiva para la valorización de residuos agroindustriales y plásticos, ya que es

posible obtener productos con potencial energético que constituirán en el futuro una oportunidad de reducir el uso de combustibles fósiles, minimizar la contaminación producida a causa de ellos, reducir en gran medida la producción de gases de efecto invernadero y disminuir la contribución de todos estos efectos al calentamiento global, y tal vez, a largo plazo, mitigar el uso de combustibles fósiles.

Las variables sobre las cuales debe tenerse control para asegurar la obtención del producto deseado son la composición de la biomasa, la velocidad de calentamiento, la temperatura de reacción, el tamaño de partícula y la presencia y composición del catalizador. El papel que juega el catalizador en la reacción de pirólisis es importante dado que es este quien garantiza en la mayoría de los casos una mayor selectividad del producto a obtener, rendimientos más altos, diferencias en la composición de los productos obtenidos y reducción en la temperatura de pirólisis.

En consecuencia, los estudios encontrados muestran que la naturaleza de los metales usados como fases activas en los catalizadores permiten conducir la pirólisis hacia diversas rutas químicas, reduciendo la temperatura de la descomposición térmica de los componentes de la biomasa, favoreciendo la producción de compuestos fenólicos o la eliminación de compuestos oxigenados, entre otras.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto Tecnológico Metropolitano por el financiamiento del proyecto de investigación:

“Efecto de diferentes sistemas zeolíticos sobre los productos obtenidos en la pirólisis rápida de bagazo de caña de azúcar” y al programa Jóvenes investigadores e innovadores para Grupos de investigación ITM – 2020. Además, al apoyo recibido del Grupo de Investigación en Química Básica, Aplicada y Ambiente: Alquimia.

Referencias

- Abdallah, M., Ni, D., & Simson, A. (2020). Evaluation of biochars derived from food waste for synthesis gas production via pyrolysis and CO₂ gasification. *Biomass and Bioenergy*, 143, 105883. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105883>
- Arteaga, J. C., Arenas, E., López, D. A., Sánchez, C. M., & Zapata, Z. (2012). Revista completa Biotecnología II_10_13. pdf. In *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial* (Vol. 10, Issue 2).
- Baena, J., Santamaria, A., Aguirre, L., & González, S. (2020). *Chemical recycling of plastic waste: Bitumen, solvents, and polystyrene from pyrolysis oil*. 118, 139–149. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.08.035>
- Bahl, S., Dolma, J., Jyot Singh, J., & Sehgal, S. (2020). Biodegradation of plastics: A state of the art review. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.096>
- Banks, S. W., & Bridgwater, A. V. (2016). Catalytic fast pyrolysis for improved liquid quality. In *Handbook of Biofuels Production: Processes and Technologies: Second Edition* (pp. 391–429). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100455-5.00014-X>
- Baray, M., Porras, A., Hoffmann, H., & Manjarrez, C. (2019). Tratamiento de la biomasa lignocelulósica mediante la pirólisis lenta y a baja temperatura para la producción de biocombustibles. *Revista de Energías Renovables*, 3(9), 1–9. <https://doi.org/10.35429/jre.2019.9.3.1.9>
- Bell, P. L. (2012). Colombia: manual comercial e industrial. *Colombia: Manual Comercial e Industrial*, 207–418. <https://doi.org/10.32468/ebook.664-247-7>
- Bridgwater, A. V. (2011). *Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading*. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>
- Buitrago, R. (2012). *Catalizadores para el aprovechamiento energético de derivados de biomasa*.
- Chai, Y., Wang, M., Gao, N., Duan, Y., & Li, J. (2020). Experimental study on pyrolysis/gasification of biomass and plastics for H₂ production under new dual-support catalyst. *Chemical Engineering Journal*, 396(November 2019), 125260. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125260>
- Chen, S., Liu, Z., Jiang, S., & Hou, H. (2020). Carbonization: A feasible route for reutilization of plastic wastes. In *Science of the Total Environment*

- (Vol. 710, p. 136250). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136250>
- Chen, Y., Du, L., Li, S., Song, W., Jensen, P., & Lin, W. (2021). Pyrolysis of antibiotic mycelial dreg and characterization of obtained gas, liquid and biochar. *Journal of Hazardous Materials*, 402, 123826. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123826>
- Collazos, J. (2015). *Pirólisis del bagazo de caña panelera para la producción de combustibles líquidos*.
- Conesa, J. A., & Martín, I. (2009). *Comparison between emissions from the pyrolysis and combustion of different wastes* *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis Comparison between emissions from the pyrolysis and combustion of different wastes*. January 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2008.11.022>
- Congreso de la República de Colombia. (2019). *PROYECTO DE LEY No. 080 DE 2019 "Por medio de la cual se establecen medidas tendientes a la reducción de la producción y el consumo, de los plásticos de un solo uso en el territorio nacional, se regula un régimen de transición para reemplazar progresivamente*.
- Corredor, Y., & Pérez, L. (2018). Aprovechamiento de residuos agroindustriales en el mejoramiento de la calidad del ambiente. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 14(1), 59–72. <https://doi.org/10.18359/rfcb.3108>
- Cury R, K., Aguas M, Y., Martínez M, A., Olivero V, R., & Chams Ch, L. (2017). Residuos agroindustriales: su impacto, manejo y aprovechamiento. *Revista Colombiana de Ciencia Animal-RECIA*, 9(S), 122. <https://doi.org/10.24188/recia.v9.ns.2017.530>
- Dai, L., Wang, Y., Liu, Y., He, C., Ruan, R., Yu, Z., Jiang, L., Zeng, Z., & Wu, Q. (2020). A review on selective production of value-added chemicals via catalytic pyrolysis of lignocellulosic biomass. *Science of the Total Environment*, 749, 142386. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142386>
- Duncan, E. M., Arrowsmith, J. A., Bain, C. E., Bowdery, H., Broderick, A. C., Chalmers, T., Fuller, W. J., Galloway, T. S., Lee, J. H., Lindeque, P. K., Omeyer, L. C. M., Snape, R. T. E., & Godley, B. J. (2019). Diet-related selectivity of macroplastic ingestion in green turtles (*Chelonia mydas*) in the eastern Mediterranean. *Scientific Reports*, 9(1), 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48086-4>
- Elgegren, M., Tiravanti, G. J., Ortiz, B. A., Otero, M. E., Wagner, F., Cerrón, D. A., & Nakamatsu, J. (2012). Chemical Recycling of Plastic Wastes. *Rev Soc Quím Perú*, 78(2), 105–119. <http://www.redalyc.org/pdf/3719/371937627005.pdf>
- Escola, J. M., Aguado, J., Serrano, D. P., García, A., Peral, A., Briones, L.,

- Calvo, R., & Fernandez, E. (2011). Catalytic hydroreforming of the polyethylene thermal cracking oil over Ni supported hierarchical zeolites and mesostructured aluminosilicates. *Applied Catalysis B: Environmental*, 106, 405–415. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2011.05.048>
- Federación Nacional de Cafeteros. (2020). *Producción de café de Colombia cerró el 2019 en 14,8 millones de sacos*. <https://federaciondecafeteros.org/wp/listado-noticias/produccion-de-cafe-de-colombia-cerro-el-2019-en-148-millones-de-sacos/>
- Foong, S. Y., Liew, R. K., Yang, Y., Cheng, Y. W., Yek, P. N. Y., Wan Mahari, W. A., Lee, X. Y., Han, C. S., Vo, D. V. N., Van Le, Q., Aghbashlo, M., Tabatabaei, M., Sonne, C., Peng, W., & Lam, S. S. (2020). Valorization of biomass waste to engineered activated biochar by microwave pyrolysis: Progress, challenges, and future directions. *Chemical Engineering Journal*, 389, 124401. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124401>
- Greenpeace. (2018, August). *Colombia, mejor sin plásticos*. http://greenpeace.col/pdf/reporte_plasticos.pdf
- Guo, Y., Tan, C., Sun, J., Li, W., Zhang, J., & Zhao, C. (2019). *Porous activated carbons derived from waste sugarcane bagasse for CO₂ adsorption*. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122736>
- Hernández, F., Medina, R., Burneo, X., & Zúñiga, A. (2020). *Short sugarcane bagasse fibers cementitious composites for building construction*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118451>
- Hita, P. R. (2018). *Reuse of plastic waste of mixed polypropylene as aggregate in mortars for the manufacture of pieces for restoring jack arch floors with timber beams rez-G a. 198*, 1515–1525. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.065>
- Hoyos, L. ., & Figueroa, D. R. (2009). *EFFECTO DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA Y DE LA TEMPERATURA DE SECADO EN LA PIROLISIS A VELOCIDAD MEDIA DE ASERRÍN*. 1–11.
- Hwang, K. L., Choi, S. M., Kim, M. K., Heo, J. B., & Zoh, K. D. (2017). Emission of greenhouse gases from waste incineration in Korea. *Journal of Environmental Management*, 196, 710–718. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.071>
- Ibro, S. (2015). *Environmental pollution and waste management*. September.
- Jayaraman, K., Gokalp, I., Petrus, S., Belandria, V., & Bostyn, S. (2018). Energy recovery analysis from sugar cane bagasse pyrolysis and gasification using thermogravimetry , mass spectrometry and kinetic models. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 132(February 2017), 225–236. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2018.02.003>
- Jha, K. K., & Kannan, T. T. M. (2020). *Recycling of plastic waste into fuel by*

- pyrolysis—a review. *Materials Today: Proceedings*, *xxxx*, 3–5. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.181>
- Jiat, X., Chyuan, H., Yang, Y., & Chen, W. (2020). State of art review on conventional and advanced pyrolysis of macroalgae and microalgae for biochar , bio-oil and bio-syngas production. *Energy Conversion and Management*, *210*(March), 112707. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112707>
- Kasar, P., Sharma, D. K., & Ahmaruzzaman, M. (2020). Thermal and catalytic decomposition of waste plastics and its co- processing with petroleum residue through pyrolysis process. *Journal of Cleaner Production*, *265*, 121639. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121639>
- Kim, J.-Y., Oh, S., Hwang, H., Moon, Y.-H., & Choi, J. W. (2014). Assessment of miscanthus biomass (*Miscanthus sacchariflorus*) for conversion and utilization of bio-oil by fluidized bed type fast pyrolysis. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.08.010>
- Kumar, K., Kannan, T. T. M., & Senthivelan, N. (2020). Materials Today :Proceedings Optimization of catalytic pyrolysis process for change of plastic waste into fuel. *Materials Today: Proceedings*, *xxxx*, 10–13. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.263>
- Lazzarotto, I. P., Ferreira, S. D., Junges, J., Bassanesi, G. R., Manera, C., Perondi, D., & Godinho, M. (2020). The role of CaO in the steam gasification of plastic wastes recovered from the municipal solid waste in a fluidized bed reactor. *Process Safety and Environmental Protection*, *140*, 60–67. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.04.009>
- Lebreton, L. C. M., Van Der Zwet, J., Damsteeg, J. W., Slat, B., Andrady, A., & Reisser, J. (2017). River plastic emissions to the world’s oceans. *Nature Communications*, *8*. <https://doi.org/10.1038/ncomms15611>
- Lin, Y., Yang, M., Yeh, T., & Ger, M. (2004). Catalytic degradation of high density polyethylene over mesoporous and microporous catalysts in a fluidised-bed reactor. *86*, 121–128. <https://doi.org/10.1016/j.polyimdegradstab.2004.02.015>
- Luo, S., Xiao, B., Hu, Z., Liu, S., Guan, Y., & Cai, L. (2010). Influence of particle size on pyrolysis and gasification performance of municipal solid waste in a fixed bed reactor. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.03.060>
- Margarita, Z.-D. C. L., Osney, P.-O., Antonio, R.-R. P., María, Z.-D. C. B., & Geraldo, L. (2015). Potencialidades del bagazo para la obtención de etanol frente a la generación de electricidad. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, *16*(3), 407–418. <https://doi.org/10.1016/j.riit.2015.05.001>
- Martínez, T., Ramírez, D., & Hernández, O. (2013). *Paja de la caña de azúcar. Sus usos en la actualidad*.
- Miliotti, E., Casini, D., Rosi, L., Lotti, G., Rizzo, A. M., & Chiaramonti, D. (2020). Lab-

- scale pyrolysis and hydrothermal carbonization of biomass digestate: Characterization of solid products and compliance with biochar standards. *Biomass and Bioenergy*, 139, 105593. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105593>
- Monteiro, R. C. P., Ivar do Sul, J. A., & Costa, M. F. (2018). Plastic pollution in islands of the Atlantic Ocean. *Environmental Pollution*, 238, 103–110. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.01.096>
- Pang, Y., Wu, D., Chen, Y., Xu, J., Wu, J., & Zhai, M. (2020). Pyrolysis of pine pellets catalyzed by blast furnace gas ash. *Chemical Engineering and Processing–Process Intensification*, 156(August), 108094. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.108094>
- Panyakapo, P., & Panyakapo, M. (2008). Reuse of thermosetting plastic waste for lightweight concrete. *Waste Management*, 28(9), 1581–1588. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.08.006>
- Peñaranda, L., Gómez, P., & Abad, A. (2017). *Aprovechamiento de residuos agroindustriales en Colombia*. 141–150.
- Qiao, K., Shi, X., Zhou, F., Chen, H., Fu, J., Ma, H., & Huang, H. (2017). *Catalytic fast pyrolysis of cellulose in a microreactor system using hierarchical zsm-5 zeolites treated with various alkalis* A R T I C L E I N F O. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2017.07.034>
- Qin, P., Xu, H., Liu, M., Xiao, C., Forrest, K. E., Samuelsen, S., & Tarroja, B. (2020). Assessing concurrent effects of climate change on hydropower supply, electricity demand, and greenhouse gas emissions in the Upper Yangtze River Basin of China. *Applied Energy*, 279, 115694. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115694>
- Quan, S., Yan, B., Lei, C., Yang, F., Li, N., Xiao, X., & Fu, J. (2014). Distribution of heavy metal pollution in sediments from an acid leaching site of e-waste. *Science of the Total Environment*, 499, 349–355. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.08.084>
- Ren, J., Zhang, A., & Wang, X. (2020). Catalytic upgrad for pyrolysis of food waste in a bubbling fluidized-bed reactor. *Pharmacological Research*, 104743. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116023>
- Ribeiro, F., O'Brien, J. W., Galloway, T., & Thomas, K. V. (2019). Accumulation and fate of nano- and micro-plastics and associated contaminants in organisms. In *TrAC–Trends in Analytical Chemistry* (Vol. 111, pp. 139–147). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.12.010>
- Rodríguez, E. C., & Fernández, V. L. (2016). *Caracterización de residuos agroindustriales con vistas a su aprovechamiento*. 43, 27–35.
- Roncacio, K. (2017). *Análisis del reciclaje químico como alternativa tecnológica para la valorización y disposición final de residuos plásticos post-consumo*. 13–14. <https://repository.unimilitar.edu>.

- co/bitstream/handle/10654/16986/RoncancioCardonaKellyLizzeth2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Safana, A., Idowu, I. I., Saadu, I., Adamu, B. I., & Murtala, I. (2017). *Potential Application of Pyrolysis Bio-Oil as a Substitute for Diesel and Petroleum Fuel*. January.
- Samak, N. A., Jia, Y., Sharshar, M. M., Mu, T., Yang, M., Peh, S., & Xing, J. (2020). Recent advances in biocatalysts engineering for polyethylene terephthalate plastic waste green recycling. *Environment International*, 145, 106144. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106144>
- Shu, L., Berndt, C. C., & Hodzic, A. (2006). *Sugar Cane Bagasse Fibre for Sustainable Manufacturing: An Overview of Applications Sugar Cane Bagasse Fibre for Sustainable Manufacturing: An Overview of Applications*. August.
- Soni, B., & Karmee, S. K. (2020). Towards a continuous pilot scale pyrolysis based biorefinery for production of biooil and biochar from sawdust. *Fuel*, 271(March), 117570. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117570>
- Sun, S., Tian, H., Zhao, Y., Sun, R., & Zhou, H. (2010). Experimental and numerical study of biomass flash pyrolysis in an entrained flow reactor. *Bioresource Technology*, 101(10), 3678–3684. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.12.092>
- Thunman, H., Berdugo Vilches, T., Seemann, M., Maric, J., Vela, I. C., Pissot, S., & Nguyen, H. N. T. (2019). Circular use of plastics—transformation of existing petrochemical clusters into thermochemical recycling plants with 100% plastics recovery. *Sustainable Materials and Technologies*, 22, e00124. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2019.e00124>
- Tian, X., Wang, Y., Zeng, Z., Dai, L., Peng, Y., Jiang, L., Yang, X., Yue, L., Liu, Y., & Ruan, R. (2021). Bioresource Technology Study on the mechanism of co-catalyzed pyrolysis of biomass by potassium and calcium. *Bioresource Technology*, 320(PB), 124415. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124415>
- Tran, T. K., Kim, N., Leu, H. J., Pham, M. P., Luong, N. A., & Vo, H. K. (2020). The production of hydrogen gas from modified water hyacinth (*Eichhornia Crassipes*) biomass through pyrolysis process. *International Journal of Hydrogen Energy*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.225>
- Vaikarar, K., Rajmohan, S., Ramya, C., Viswanathan, M. R., & Varjani, S. (2019). Plastic pollutants : effective waste management for pollution control and abatement. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 12, 72–84. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2019.08.006>
- Vamvuka, D., Sfakiotakis, S., & Pantelaki, O. (2018). *Evaluation of gaseous and solid products from the pyrolysis of waste biomass blends for energetic and*

- environmental applications*. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.08.145>
- Vats, N., Khan, A. A., & Ahmad, K. (2019). *Observation of biogas production by sugarcane bagasse and food waste in different composition combinations*. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.080>
- Vázquez, A., Navarro, P., Espinosa, R., Velasco, M., Quecholac, X., Piña, X. Q., Beltrán, M., & Álvarez, J. C. (2018). Degradación & Biodegradación de Plásticos. In *Asociación Nacional de la Industria Química*.
- Wang, G., Li, W., Li, B., & Chen, H. (2008). TG study on pyrolysis of biomass and its three components under syngas. *Fuel*, 87(4–5), 552–558. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.02.032>
- Wei, B., Jin, L., Zhu, J., & Hu, H. (2020). X In-situ detection of initial products from lignite pyrolysis over modified Y-type zeolites by pyrolysis photoionization time-of-flight mass spectrometry. *Chemical Engineering Science: X*, 8, 100081. <https://doi.org/10.1016/j.cesx.2020.100081>
- Windsor, F. M., Durance, I., Horton, A. A., Thompson, R. C., Tyler, C. R., & Ormerod, S. J. (2019). A catchment-scale perspective of plastic pollution. In *Global Change Biology* (Vol. 25, Issue 4, pp. 1207–1221). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1111/gcb.14572>
- Yao, D., Li, H., Dai, Y., & Wang, C. H. (2020). Impact of temperature on the activity of Fe-Ni catalysts for pyrolysis and decomposition processing of plastic waste. *Chemical Engineering Journal, July*. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127268>
- Zhang, Z., Li, K., Ma, S., Cui, M., Lu, Q., & Yang, Y. (2019). Industrial Crops & Products Fast pyrolysis of biomass catalyzed by magnetic solid base catalyst in a hydrogen atmosphere for selective production of phenol. *Industrial Crops & Products*, 137(April), 495–500. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.05.066>