

Valorization of Cocoa Residues through Pyrolysis: Effect of Reaction Conditions on the Yield of Obtained Products

Pilar Torres Urrutia¹ ; Paola Andrea Villegas Bolaños² ; Omar Dario Gutiérrez Flórez³ 

^{1,3}Institución Universitaria ITM, Colombia, pilartorres309359@correo.itm.edu.co, omargutierrez@itm.edu.co

²Institución Universitaria ITM, Colombia, paolavillegas@itm.edu.co

Abstract— The increasing cocoa production in Colombia is generating a large amount of agro-industrial waste, particularly cocoa pod husk (CPH) and cocoa bean shell (CBS). Inadequate waste management can lead to environmental issues such as soil contamination and greenhouse gas emissions. This study focuses on the energy valorization of CPH through pyrolysis, which is presented as an eco-friendly alternative for the utilization of these by-products, with emphasis on the distribution of the resulting products: biochar, bio-oil, and non-condensable gases.

The biomass was characterized prior to pyrolysis by means of proximate and elemental analyses. Then, It was subjected to thermal pyrolysis at a temperature range of 650–700 °C, at a heating rate of 100 °C/min, with a nitrogen flow rate of 140 ± 5 mL/min (carrier gas), and residence times of up to 10 min. Under these conditions, the yields of the three product fractions were determined through mass balance.

Preliminary results allow the analysis of the effect of temperature on product distribution, providing valuable information to strengthen energy recovery pathways for cocoa sector residues in Colombia, promote circular economy strategies, and support future studies in agro-industrial sustainability.

Keywords— pyrolysis, waste, cocoa, biochar, biomass.

Valorización de residuos de cacao mediante pirólisis: efecto de las condiciones de reacción sobre el rendimiento de los productos obtenidos

Pilar Torres Urrutia¹; Paola Andrea Villegas Bolaños²; Omar Dario Gutiérrez Flórez³

^{1,3}Institución Universitaria ITM, Colombia, pilartorres309359@correo.itm.edu.co, omargutierrez@itm.edu.co

²Institución Universitaria ITM, Colombia, paolavillegas@itm.edu.co

Resumen— La creciente producción de cacao en Colombia está generando una gran cantidad de residuos agroindustriales, especialmente la cáscara de cacao (CPH) y la cascarilla del grano de cacao (CBS). Si no hay una adecuada gestión de residuos, estos pueden provocar problemas ambientales, como la contaminación de suelo y la emisión de gases de efecto invernadero. Este estudio se centra en la valorización energética de la CPH a través de la pirólisis, que se presenta como una alternativa eco-amigable para la valorización de estos subproductos, enfocándose en la distribución de productos obtenidos: biochar, bioaceite y gases no condensables. Se caracterizó la biomasa antes de la pirólisis mediante análisis proximal y análisis elemental. Esta, fue sometida a pirólisis térmica en el intervalo 650-700 °C, velocidad de calentamiento de 100 °C/min, 140 ± 5 mL/min de N₂ (carrier) y tiempos de reacción isotérmica de hasta 10 min. Bajo las condiciones anteriores, se determinaron los rendimientos de las tres fracciones de productos mediante balance de masa. Los resultados preliminares permiten analizar el efecto de la temperatura sobre la distribución de productos, proporcionando información valiosa para fortalecer las rutas de aprovechamiento energético de residuos del sector cacaotero colombiano, promover la economía circular y respaldar futuros estudios en sostenibilidad agroindustrial.

Palabras claves—pirólisis, residuo, cacao, biochar, biomasa.

I. INTRODUCCIÓN

El procesamiento del cacao ha provocado un incremento en los residuos agroindustriales producidos, constituyendo una problemática ambiental relevante en países productores, donde grandes volúmenes de subproductos son generados y subutilizados. Se estima que entre el 80% y el 90% del peso total del fruto termina desechándose, dejando solo un 10% a 20% del producto para comercializar como granos, esto se traduce en alrededor de 48 millones de toneladas de residuos de cacao en todo el mundo solo en 2023 [1]. Entre estos residuos se encuentran materiales ricos en celulosa, hemicelulosa y lignina como lo son la cáscara de cacao (CPH) y la cascarilla de grano de cacao (CBS); esta última está generando más de 700.000 toneladas de residuos en todo el mundo [2]. En Colombia la Federación Nacional de Cacaoteros reportó una producción de aproximadamente, 73.000 toneladas de cacao [3], lo que evidencia la generación de grandes volúmenes de subproductos del cacao como la CPH, la CBS y el mucílago. De estos residuos, CPH representa la fracción más voluminosa, constituyendo entre el 52% y el 70% del peso total del fruto fresco, lo que se traduce en una generación anual de 37.960

a 51.100 toneladas de residuos [4].



Fig. 1 Acumulación de CPH en proceso de descomposición al aire libre después de cosecha [1].

La disposición inadecuada de estos subproductos (Fig. 1), está presentando un gran desafío ambiental por la enorme cantidad de residuos a lo largo de toda la cadena de valor. Es por eso que, los residuos agroindustriales como los derivados del cacao, son una materia prima prometedora para la generación productos de valor agregado en los sectores energético y químico. En este contexto, aprovechar la biomasa a través de procesos termoquímicos se presenta como una alternativa amigable con el medio ambiente para gestionar estos residuos.

La pirólisis es un proceso termoquímico que descompone macromoléculas en ausencia de oxígeno, generando tres fracciones principales: una fracción líquida conocida como bioaceite, un sólido carbonoso denominado biocarbón o biochar, y gases no condensables.

El bioaceite obtenido del proceso pirolítico es un líquido oscuro y complejo, compuesto por una mezcla de hidrocarburos y compuestos oxigenados. En cuanto a su composición, el bioaceite es una mezcla de compuestos orgánicos proveniente de la descomposición de la biomasa. Entre ellos se encuentran monómeros, oligómeros, y derivados de azúcares tales como ácidos carboxílicos, aldehídos, cetonas, ésteres y alcoholes [5]. Sin embargo, la calidad del bioaceite producido a partir de biomasa residuales se ve afectada por el alto contenido de oxígeno, perjudicando su estabilidad química, acidez y poder calorífico; presentando un desafío para su valorización energética [6].

El biochar que se produce mediante el proceso de pirólisis tiene una estructura porosa con alta área superficial, lo que permite su aplicación como enmienda en suelos, mejorando la retención de agua y nutrientes, además de incrementar la fertilidad y la productividad agrícola [7]. Por otro lado, la fracción gaseosa generada durante la pirólisis está compuesta principalmente por H_2 , CH_4 , CO y CO_2 [5]. Estos gases pueden ser aprovechados como una fuente de energía, y su producción se puede optimizar al ajustar parámetros operativos, como la velocidad de calentamiento y el tiempo de residencia [8].

Desde la crisis energética de los años 70, se ha intensificado la búsqueda de alternativas viables para la producción de biocombustibles renovables [9]. En este contexto, los residuos agroindustriales como los derivados del cacao representan una fuente potencial para la generación de energía y productos de valor agregado.

Sin embargo, en Colombia no se han realizado investigaciones que analicen y comparen el efecto de las condiciones de reacción sobre los productos de la pirólisis. Comprender cómo parámetros como la temperatura influye en el rendimiento de biochar, bioaceite y gases es fundamental para optimizar el proceso y reducir el impacto ambiental de estos residuos.

En este sentido, este trabajo tiene como objetivo evaluar el efecto de la temperatura de reacción en el rendimiento de los productos obtenidos de la pirólisis de residuos de cacao, contribuyendo así a la valorización de subproductos agroindustriales y al desarrollo de alternativas sostenibles.

II. METODOLOGÍA

A. Materia prima

La biomasa utilizada fue CPH, recolectada de la Finca Cannes (municipio de Maceo, Antioquia, Colombia), fue secada de manera natural en una marquesina durante 14 días, luego se trocó y se molió utilizando un molino turbo de pines (*Ateindus*). Luego se tamizó hasta conseguir un tamaño de partícula menor a $75\ \mu m$, siguiendo la Norma Técnica Colombiana NTC 77:2018. Finalmente, las muestras se guardaron en bolsas selladas al vacío en condiciones controladas hasta que se realizaran los análisis correspondientes.

B. Métodos de caracterización

1. Análisis proximal

El análisis proximal de CPH se llevó a cabo a través de un análisis termogravimétrico (TGA), siguiendo el protocolo que establece la norma ASTM E1131-20. Este análisis permitió conocer el contenido de humedad, materia volátil, cenizas y carbono fijo de las muestras.

2. Análisis elemental

El análisis elemental de CPH se realizó mediante un analizador elemental CHNS (*Eurovector EA 3000*). Esto permitió determinar el contenido de carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N) y azufre (S).

C. Proceso de pirólisis

Las reacciones de pirólisis se llevaron a cabo en condiciones isotérmicas, utilizando un reactor de lecho fijo en forma de U como se muestra en la Fig. 2., fabricado en vidrio *Pyrex* y situado dentro de un horno tubular (*Terrígenos*).

El reactor se cargó con 2 g de CPH, la cual fue soportada con lana de vidrio para evitar el desplazamiento del material durante el proceso.

La temperatura real del lecho reaccionante se monitoreó con una termocupla conectada a un sistema de adquisición de datos utilizando el *software OMEGA*, lo que permitió registrar y controlar las condiciones térmicas del proceso.

Se utilizó nitrógeno como gas portador, manteniendo un flujo constante de $140 \pm 5\ mL/min$ para garantizar una atmósfera inerte, antes de cada experimento se purgó el sistema con nitrógeno para eliminar cualquier rastro de oxígeno.

Los vapores condensables se recogieron en un matraz de dos bocas, mientras que los gases no condensables se dirigieron al sistema de extracción, y la fracción sólida (biocarbón) permaneció en el reactor.

Los experimentos de pirólisis se llevaron a cabo a temperaturas de 650 y 700 °C, empleando una velocidad de calentamiento 100 °C/min, así como tiempos de reacción isotérmica de hasta 10 min con el fin de evaluar la temperatura sobre la distribución de productos. El esquema experimental del proceso pirolítico se muestra en la Fig. 2.

Adicionalmente, los experimentos de pirólisis se realizaron por cuadruplicado para cada condición de temperatura, con el fin de evaluar la reproducibilidad del proceso.

D. Determinación del rendimiento del bioaceite

El rendimiento de los productos de pirólisis (fracciones líquida, sólida y gaseosa) se determinó mediante un balance de masa. La fracción sólida se obtuvo a partir de la masa final del reactor tras la reacción, la fracción líquida se calculó restando las masas del balón volumétrico de recolección antes y después del experimento, mientras que la fracción gaseosa se estimó por diferencia respecto a la masa inicial de la biomasa alimentada.

Los rendimientos de productos se determinaron de acuerdo con las ecuaciones (1) - (3).

Para el análisis de los resultados, se empleó estadística descriptiva, expresando los datos como promedio $\pm$ desviación estándar. Asimismo, se utilizaron diagramas de caja (boxplot) para representar la dispersión y variabilidad de los datos bajo cada condición experimental. Debido al carácter preliminar del estudio, no se realizaron pruebas estadísticas inferenciales.

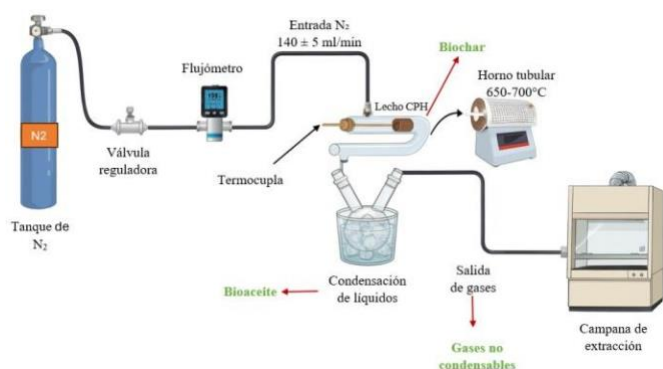


Fig. 2 Diagrama esquemático de la pirólisis de CPH

$$\%RL = \frac{\text{masa del bioaceite obtenido}}{\text{masa biomasa alimentada}} * 100\% \quad (1)$$

$$\%RS = \frac{\text{masa del biochar obtenido}}{\text{masa biomasa alimentada}} * 100\% \quad (2)$$

$$\%RG = 100 - (\%RL + \%RS) \quad (3)$$

Siendo:

%RL: Rendimiento de líquidos. Representa el porcentaje de bioaceite producido respecto a la masa inicial de biomasa.

%RS: Rendimiento de sólidos. Representa el porcentaje de carbón sólido (biochar) formado.

%RG: Rendimiento de gases. Porcentaje de gases generados durante la pirólisis.

Masa del bioaceite: Masa total del bioaceite obtenido al final ensayo. Este valor permite cuantificar la fracción líquida generada durante la pirólisis.

Masa biomasa alimentada: Masa inicial de la biomasa alimentada (CPH). Esta variable se emplea como base para expresar los rendimientos de cada fracción en términos porcentuales.

Masa del biochar obtenido: Masa de los sólidos generados al final de la pirólisis. Esta medición incluye los sólidos formados durante la reacción.

III. RESULTADOS PRELIMINARES Y DISCUSIÓN

A. Caracterización de la biomasa

Con el fin de evaluar el comportamiento de la biomasa durante el proceso de pirólisis, se realizó la caracterización fisicoquímica de la CPH mediante análisis proximal y elemental, lo que permitió identificar propiedades clave como el contenido de humedad (W), cenizas (CZ), materia volátil

(MV), carbono fijo (CF), junto con la composición de los principales elementos (C, H, O, N y S), las cuales influyen directamente en el potencial energético y en la distribución de productos durante la conversión termoquímica.

En la tabla I, se muestran los resultados obtenidos sobre la composición elemental y el análisis proximal de CPH.

TABLA I
COMPOSICION ELEMENTAL Y PROXIMAL DE CPH

Biomasa	CPH				
	W	MV	CF	CZ	
Análisis proximal (%)	8,88	71,55	8,91	10,01	
Análisis elemental (%)	C	H	N	S	O
	44,36	5,77	N.I.	0,66	49,21

1. Análisis elemental del CPH

El análisis elemental permitió identificar la composición química de la biomasa, la cual presentó características típicas de biomasa lignocelulósica, dominada por carbono (C), oxígeno (O) e hidrógeno (H), con valores que se encuentran dentro de los rangos reportados en la literatura (C: 39–50%, O: 33–43%, H: 5–7%) [1]. Específicamente, se han reportado valores para la CPH de (41,5% C, 6,2% H y 41,6% O) [10].

No se detectó nitrógeno (N) y se identificaron trazas de azufre (S), que en altas concentraciones pueden favorecer la formación de NO_x y SO_x durante procesos termoquímicos [10]. Además, el alto contenido de oxígeno puede disminuir el poder calorífico de los productos líquidos obtenidos y aumentar su acidez, así como la distribución de productos durante la pirólisis.

2. Análisis proximal del CPH

El análisis proximal mostró un contenido de humedad del 8,88%, un valor favorable para los procesos de conversión térmica, ya que un menor contenido de humedad mejora el poder calorífico del material.

Se observó un alto contenido de materia volátil exactamente de 71,55%, lo que indica una gran susceptibilidad a la degradación térmica, en línea con otras biomazas lignocelulósicas como los residuos de maíz [11].

El contenido de carbono fijo fue de 8,91%, un valor relativamente bajo para aplicaciones orientadas a la producción de biocarbón, un parámetro relacionado con el potencial energético del material [12].

Este comportamiento térmico se ve reflejado en la curva de descomposición obtenida a través del TGA como se muestra en la Fig. 3.

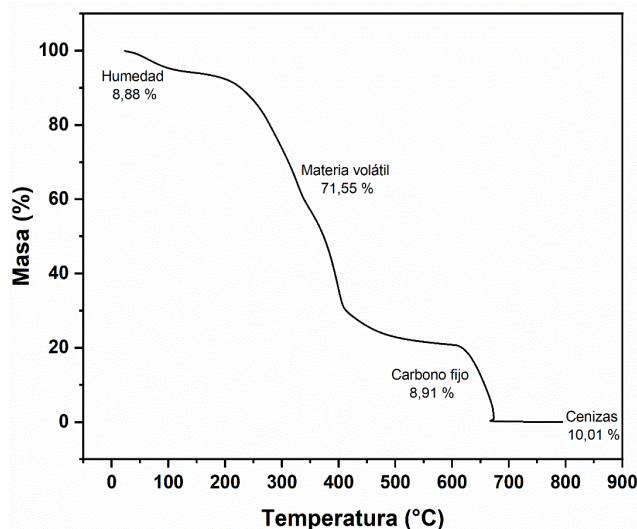


Fig. 3 Curva termogravimétrica (TGA) del CPH utilizada para la determinación de análisis proximal según norma ASTM E1131-20

B. Efecto de la temperatura sobre la distribución de productos

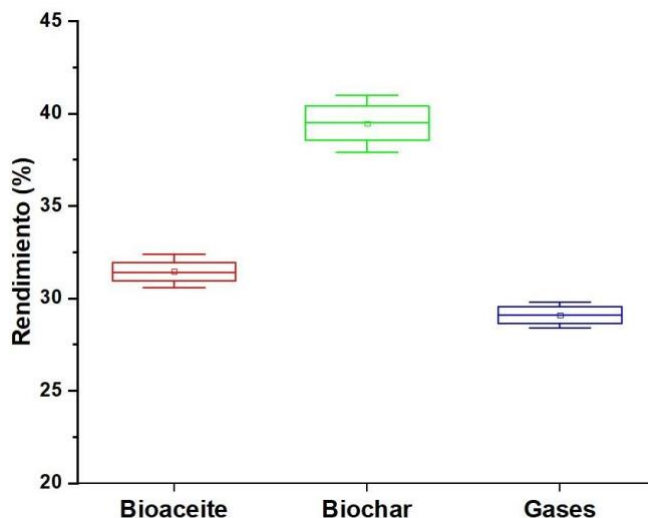
Los resultados preliminares de la pirólisis muestran que la temperatura de reacción tiene un impacto significativo en la distribución de productos, como el biochar, el bioaceite y los gases. Esto coincide con lo que se ha reportado en la literatura, donde se indica que este parámetro es clave para controlar las rutas de descomposición térmica y las reacciones secundarias durante el proceso [13].

En la Tabla II, se presentan los valores promedio junto con la desviación estándar de los rendimientos obtenidos a 650 y 700 °C. Por otro lado, en la Fig. 4, se pueden observar los diagramas de caja, que permiten visualizar la dispersión de los datos experimentales.

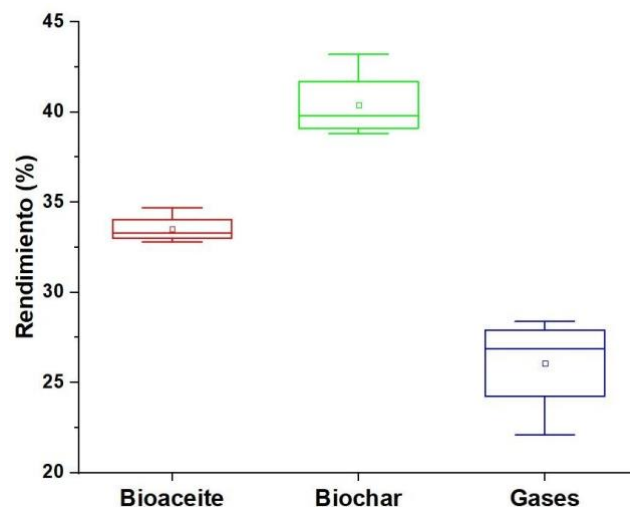
A temperaturas de 650 y 700 °C el biochar se mantuvo como la fracción más abundante, con rendimientos cercanos al 40%, seguido del bioaceite y, por último, los gases. Este comportamiento se puede atribuir a la naturaleza lignocelulósica de la biomasa, donde la lignina tiene una mayor resistencia térmica, lo que favorece la formación de residuos sólidos carbonosos [14]. El bioaceite mostró rendimientos intermedios, principalmente relacionados con la descomposición de celulosa y hemicelulosa, cuyos productos volátiles se pueden condensar parcialmente. Sin embargo, a temperaturas más altas, estos compuestos pueden experimentar reacciones secundarias de craqueo, generando compuestos más ligeros y contribuyendo a la formación de gases [13]. En cuanto a la fracción gaseosa, que está compuesta principalmente por CO, CO₂, H₂ y CH₄, se observó una mayor dispersión de los resultados, lo que podría estar relacionado con la sensibilidad de las reacciones secundarias a las condiciones de operación [14].

TABLA II
RENDIMIENTOS DE PRODUCTOS DE PIROLÍISIS DE CPH A DIFERENTES TEMPERATURAS (650 Y 700°C) A 100°C/MIN

Temperatura nominal del horno (°C)	Temperatura de reacción (°C)	Rendimiento (%)			Velocidad de calentamiento (°C/min)
		Bioaceite	Biochar	Gases	
650	491,6	31,5 ±0,7	39,5 ±1,3	29,1 ±0,6	100
700	536,8	33,5 ±0,8	40,4 ±1,9	26,1 ±2,8	100



a) 650°C



b) 700°C

Fig. 4. Diagramas de caja de la distribución de rendimientos de biochar, bioaceite y gases durante la pirólisis de CPH a) 650 °C y b) 700 °C (100 °C/min).

IV. RESULTADOS ESPERADOS

Se espera profundizar en la comprensión del proceso al evaluar un mayor número de condiciones operativas y realizar un análisis detallado de la distribución de productos. Además, los resultados obtenidos sentarán las bases para optimizar el proceso de pirólisis de residuos de cacao, centrándose en aplicaciones energéticas específicas, considerando que bajo las condiciones evaluadas de 650 y 700 °C, el biochar se presenta como la fracción con mayor rendimiento, se planea llevar a cabo su caracterización fisicoquímica para evaluar su potencial en aplicaciones como mejoramiento de suelos o material adsorbente.

Este análisis será clave para complementar la valorización integral de los productos generados en el proceso de pirólisis. Por otro lado, se espera que este estudio contribuya a futuras investigaciones sobre la viabilidad de escalar el proceso de pirólisis en asociaciones de productores de cacao, promoviendo el uso sostenible de residuos agroindustriales y el desarrollo de estrategias de economía circular.

IV. CONCLUSIONES

Los resultados preliminares evidencian que la CPH presenta propiedades fisicoquímicas favorables para su valorización termoquímica, destacándose su alto contenido de materia volátil y su comportamiento térmico adecuado para procesos de pirólisis. Asimismo, la temperatura influye en la distribución de productos, donde se observa que el biochar se mantiene como la fracción predominante bajo las condiciones evaluadas seguido por el bioaceite y los gases. Este comportamiento destaca el gran potencial de la CPH para generar materiales carbonosos, así como compuestos líquidos y gaseosos que son de interés energético.

Como trabajo futuro, se plantea la caracterización fisicoquímica del biochar y del bioaceite con el fin de evaluar su potencial de aprovechamiento. Además, se pretende ampliar el estudio hacia otras condiciones de operación que permitan optimizar la distribución de productos y contribuir al desarrollo de estrategias sostenibles para la valorización de residuos agroindustriales.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Los autores agradecen el apoyo institucional y técnico brindado para el desarrollo de esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] O. Salcedo-Puerto, C. Mendoza-Martinez, and E. Vakkilainen, "Solid residues from cocoa production chain: Assessment of thermochemical valorization routes," Feb. 01, 2025, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.rser.2024.115048.
- [2] R. S. Gonzalez, R. A. da Silveira Rossi, L. G. M. Vieira, and C. E. Hori, "Catalyst evaluation for renewable fuels production from cocoa bean shell pyrolysis," *Biomass Bioenergy*, vol. 204, Jan. 2026, doi: 10.1016/j.biombioe.2025.108411.

- [3] M. V. Correa, "Colombia reportó en 2024 producción histórica de cacao," Federación Nacional de Cacaoteros. Accessed: Nov. 28, 2025. [Online]. Available: <https://www.fedecacao.com.co/post/colombia-report%C3%B3-en-2024-producci%C3%B3n-hist%C3%B3rica-de-cacao>
- [4] Federación Nacional de Cacaoteros, "KOCOLATL." Accessed: Nov. 28, 2025. [Online]. Available: <https://www.fedecacao.com.co/post/kocolatl>
- [5] C. J. Mendoza-Meneses, A. A. Feregrino-Pérez, and C. Gutiérrez-Antonio, "Potential Use of Industrial Cocoa Waste in Biofuel Production," 2021, *Hindawi Limited*. doi: 10.1155/2021/3388067.
- [6] E. F. Iliopoulou, K. S. Triantafyllidis, and A. A. Lappas, "Overview of catalytic upgrading of biomass pyrolysis vapors toward the production of fuels and high-value chemicals," *Wiley Interdiscip. Rev. Energy Environ.*, vol. 8, no. 1, Jan. 2019, doi: 10.1002/wene.322.
- [7] Q. An *et al.*, "Microwave catalytic pyrolysis of solid digestate for high quality bio-oil and biochar," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 182, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.jaap.2024.106683.
- [8] W. long Li, Y. Guo, and B. ming Chen, "Research progress on pyrolysis gasification and resource utilization of tobacco waste: Component analysis and recovery strategies," Jan. 01, 2026, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.jaap.2025.107425.
- [9] L. Milian-Luperón, M. Hernández-Rodríguez, J. Falcón-Hernández, and A. Otero-Calvis, "Obtaining bioproducts by slow pyrolysis of coffee and cocoa husks as suitable candidates for being used as soil amendment and source of energy," *Revista Colombiana de Química*, vol. 49, no. 2, pp. 23–29, May 2020, doi: 10.15446/rev.colomb.quim.v49n2.83231.
- [10] P. Londoño-Larrea, E. Villamarín-Barriga, A. N. García, and A. Marcilla, "Study of Cocoa Pod Husks Thermal Decomposition," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 12, no. 18, Sep. 2022, doi: 10.3390/app12189318.
- [11] M. Adjin-Tetteh, N. Asiedu, D. Dodoo-Arhin, A. Karam, and P. N. Amaniampong, "Thermochemical conversion and characterization of cocoa pod husks a potential agricultural waste from Ghana," *Ind. Crops Prod.*, vol. 119, pp. 304–312, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.indcrop.2018.02.060.
- [12] J. Elisa Loppies Balai Besar Industri Hasil Perkebunan Jl Abdurahman Basalamah No, "KARAKTERISTIK ARANG KULIT BUAH KAKAO YANG DIHASILKAN DARI BERBAGAI KONDISI PIROLISIS The Characteristics of Cocoa Pod Husk Charcoal Produced in Various Pyrolysis Conditions," 2016.
- [13] A. Mukherjee, B. R. Patra, J. Podder, and A. K. Dalai, "Synthesis of Biochar From Lignocellulosic Biomass for Diverse Industrial Applications and Energy Harvesting: Effects of Pyrolysis Conditions on the Physicochemical Properties of Biochar," Jun. 03, 2022, *Frontiers Media S.A.* doi: 10.3389/fmats.2022.870184.
- [14] H. R. Nasriani and M. Nasiri Ghiri, "Biomass Pyrolysis: Recent Advances in Characterisation and Energy Utilisation," Apr. 01, 2026, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). doi: 10.3390/pr14081321