

# Análisis de la calidad de pellets de biomasa de *Agave durangensis*, para su posible uso como biocombustible sólido

**RESUMEN:** El aumento global en el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero ha generado un creciente interés en el uso de biomasa como fuente alternativa de energía, debido a su alta densidad energética, densidad a granel, vida útil en almacenamiento y facilidad de transporte. Este estudio se enfoca en evaluar la calidad de los pellets elaborados a partir de residuos de la producción de mezcal de *Agave durangensis*, específicamente el bagazo, siguiendo los estándares establecidos en la norma EN-14961-2 para la certificación de pellets de madera para usos térmicos.

Las características de los pellets usando materia prima con 10.7% de humedad, se determinaron con pruebas estandarizadas para biocombustibles sólidos densificados. Se obtuvieron pellets con una durabilidad del 93.81%, y una densidad a granel de  $765.07 \text{ kg/m}^3 \pm 18.93$ . Además, se observó un Índice de Resistencia al Impacto (IRI) de 187 y una densidad de partícula de  $1.09 - 1.19 \pm 0.09$ . Estos resultados indican que los pellets de *Agave durangensis* pueden equipararse en calidad a los pellets clasificados como Enplus-B, con potencial para mejorar aún más su calidad mediante innovaciones tecnológicas y alcanzar la clasificación Enplus-A1. A pesar de su calidad técnica, la producción de pellets para auto consumo en pequeñas vinatas productoras de mezcal en Durango resulta inviable, debido a los costos asociados a la producción. No obstante, su comercialización como biocombustible certificado sí representa una oportunidad económicamente viable.

**PALABRAS CLAVE:** Pellet, *Agave durangensis*, EN-14961-2, biomasa y bagazo.



## Colaboración

Pedro Rubén Reyes Corral; Manuel Ismael Mata Escobedo; Karla María Ortega Valdez, Tecnológico Nacional de México Campus Valle del Guadiana; Artemio Carrillo Parra; Universidad Juárez del Estado de Durango; Jazmín Ramírez Ayala, Tecnológico Nacional de México Campus Valle del Guadiana

Fecha de recepción: 04 de abril de 2024

Fecha de aceptación: 22 de mayo de 2025

**ABSTRACT:** The global increase in energy consumption and greenhouse gas emissions has generated a growing interest in the use of biomass as an alternative energy source, due to its high energy density, bulk density, storage life, and ease of transportation. This study focuses on evaluating the quality of pellets made from *Agave durangensis* mezcal production residues, specifically bagasse, following the standards established in EN-14961-2 for the certification of wood pellets for thermal uses.

The parameters of the pellets using raw material with 10.7% moisture were determined with standardized tests for densified solid biofuels. Pellets that were obtained had a durability of 93.81% and a bulk density of  $765.07 \text{ kg/m}^3 \pm 18.93$ . In addition, an Impact Resistance Index (IRI) of 187 and a particle density of  $1.09 - 1.19 \pm 0.09$  were observed. These results indicate that *Agave durangensis* pellets can be comparable in quality to pellets classified as Enplus-B, with the potential to further improve their quality through technological innovations and achieve Enplus-A1 classification. Despite their technical quality, pellet production for self-consumption in small mezcal distilleries in Durango is unfeasible due to production-related costs. However, their commercialization as certified biofuels represents an economically viable opportunity.

**KEYWORDS:** Pellet, *Agave durangensis*, EN-14961-2, biomass & bagasse.

## INTRODUCCIÓN

La industria del mezcal en México ha experimentado un crecimiento considerable debido a la creciente popularidad del destilado de agave tanto a nivel nacional como internacional. Este crecimiento presenta desafíos en varios aspectos, como

el aumento de la demanda de agave para su procesamiento, la necesidad de espacio y agua para su cultivo adecuado y la generación de residuos, lo que supone mayores costos para los productores.

En 2023, se produjeron en México 12,239,655 litros de mezcal, de los cuales el 1.07% correspondió a la región de Durango, equivalente a 130,964 L [1]. Estos procesos de producción generan residuos, como pencas, bagazo y vinazas, que en su mayoría no se desechan adecuadamente. Esto tiene un impacto negativo en el paisaje local y en los suelos y cuerpos de agua donde se descartan, causando modificaciones de pH y cambiando las condiciones del entorno [2].

Con la creciente demanda de energía a nivel mundial en todos los niveles económicos, para el año 2017, el consumo energético dependiente del uso del petróleo alcanza 565 EJ con un aumento pronosticado de 1.7% anual en la década siguiente [3], por lo que es la fuente de energía principal a nivel mundial y se pronostica que lo seguirá siendo más allá del 2040 que para entonces las emisiones de dióxido de carbono, se espera, hayan aumentado un 46% [4], las consecuencias ambientales y económicas de ese consumo energético han generado la búsqueda y uso de fuentes de energía alternativas y/o renovables.

Una de las que generan más interés son biocombustibles sólidos densificados, entre los que están los pellets y las briquetas, que son partículas de biomasa comprimida a alta presión y temperatura a través de troqueles, teniendo ventajas sobre la madera como la alta densidad a granel, una mayor densidad energética, facilidad de manejo y almacenamiento, así como bajos niveles de desperdicio de materia prima [5].

El uso de la biomasa como fuente de energía ha aumentado a tal punto que para el 2020 el 10% [6] de la energía global se obtuvo de la biomasa. Desde el 2018 se ha observado un aumento aproximado del 8% anual de su uso en países como Japón, China, Alemania y el Reino Unido [4] por lo que el mercado para el biocombustible sólido densificado es bastante amplio. Se espera que el mercado de pellets para el 2024 sea similar al pronosticado por la USDA en 2020 ya que la tendencia se ha mantenido en los últimos años con alrededor de 50 millones de toneladas [7], por lo que la producción de pellets es una excelente opción para el manejo de los residuos agroindustriales.

Con el objetivo de abordar las problemáticas ambientales y económicas, se busca desarrollar una propuesta tecnológica y económicamente viable para la reutilización de las fibras residuales en forma de bagazo obtenidas del proceso de elaboración de mezcal, específicamente con *Agave durangensis* como principal materia prima. Esto mediante la generación de biocombustibles sólidos densificados en forma de pellets he-

chos de biomasa para la generación de energía, esto con el fin de que se utilicen en las partes del proceso de elaboración del mezcal que requieran calor, reduciendo los costos de producción y la contaminación de la industria, además de contar con la posibilidad de convertirse en una alternativa de ingresos económicos adicionales para los productores.

En este contexto, se priorizó el uso de recursos tecnológicos ya disponibles para los productores artesanales en la elaboración de pellets, con el objetivo de minimizar la inversión en recursos tecnológicos y garantizar accesibilidad. De forma simultánea, se evaluará la viabilidad económica de los pellets, tanto para cubrir demandas energéticas del proceso productivo de la vinata "La Herradura" ubicada en Nombre de Dios, Durango, como para su posible comercialización como subproducto de la industria mezcalera.

## MATERIAL Y MÉTODOS

### Lugar de Ejecución

El proceso de pelletizado y evaluación de las características físicas y energéticas de los mismos se realizó en Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera (ISIMA). El análisis económico se realizó en el Tecnológico Nacional de México campus Valle del Guadiana (ITVG).

### Material

#### Acondicionamiento de Materia Prima

Para su correcto procesamiento, el bagazo pasó por un proceso de secado y de reducción de granulometría. El proceso de secado de la materia prima fue en 2 instituciones, en el ISIMA en el patio de secado y en el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) campo experimental "Valle del Guadiana" en camas de secado en invernadero. El proceso de molienda se realizó en el ISIMA.

El bagazo utilizado fue donado por la vinata "La Herradura" ubicada en Nombre de Dios, Durango y extraídas de la localidad "El Venado" en el municipio de Nombre de Dios, Durango, todo del mismo lote. Toda la materia prima procedente exclusivamente de *Agave durangensis* de 19 años de edad.

### Métodos

El acondicionamiento de la materia prima se realizó en 2 etapas, una vez extraídas del lote, el bagazo se secó usando camas de secado con ventilación superior e inferior y en camas de secado a nivel del suelo por 3 semanas con una temperatura promedio de  $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  y humedad relativa de  $56.9\% \pm 2.56\%$ . Posteriormente, el material con una humedad aproximada de 8%-12% determinada por una termobalanza ROCQ modelo DSH-50-10 [8,9] fue procesado en un molino de martillos HAIGE modelo TSF 420 mediante alimentación directa de forma moderada del material seco obteniendo harina de bagazo hasta alcanzar un tamaño de partícula ideal  $> 1\text{ mm}$ , pero  $< 2\text{ mm}$  [10] Figura 1.



Figura 1. Bagazo molido.  
Fuente: Elaboración propia.

El pelletizado se realizó con una pelletizadora Mill modelo ZSLP-R300 de matriz plana, con capacidad de 350 kg/h a una temperatura promedio de trabajo aproximada de  $100^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  con una malla de 3.15mm, utilizando un vernier digital se obtuvieron las medidas promedio del largo y ancho Figura 2.



Figura 2. Pellets de Bagazo.  
Fuente: Elaboración propia.

Los pellets se dejaron enfriar por 24 horas para “madurarlos” o “curarlos” ya que al finalizar el pelletizado son frágiles y se rompen con facilidad. Adicionalmente el proceso de “curado” sirve para bajar los niveles de humedad y dejar que algunos de los componentes solubles en el material se recristalicen al bajar la temperatura [11].

La determinación de humedad de los pellets se realizó siguiendo los lineamientos establecidos en la norma UNE-EN14774-3 colocando crisoles de níquel en una mufla a  $550^{\circ}\text{C}$  por 1 hora, después se introdujeron en un desecador para enfriarse, se introdujo la muestra de 1 g y se secó en un horno a una temperatura de  $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  por 3 horas. Posteriormente se dejó enfriar y se pesó el crisol, utilizando la siguiente formula se calculó la humedad:

$$M_{ad} = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \times 100 \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde  $M_{ad}$  es el contenido de humedad en % de peso,  $m_1$  es el peso del crisol vacío,  $m_2$  es el peso del crisol y la muestra antes del secado y  $m_3$  es el peso del crisol y la muestra después del secado.

La durabilidad de los pellets se determinó utilizando el método de cámara de volteo (tumbling can method) por triplicado con 500g por 10 minutos a 50 RPM [8], posteriormente se tamizo el material utilizando una malla de 3.1mm para separar los finos bajo los lineamientos de la norma ASAE S269.4 ya que es el método más utilizado en EUA [12] y también se ha utilizado en conjunto con la norma ASTM D 440-86 para la determinación de resistencia al impacto [13], esto, para simular el desgaste por manejo y transporte del material y predecir la cantidad finos producidos mediante la ecuación:

$$D = \frac{M_2}{M_1} \times 100 \quad \text{Ec. (2)}$$

Donde  $D$  es la durabilidad,  $M_1$  es la masa de los pellets antes del ensayo y  $M_2$  es la masa de los pellets después del ensayo.

El índice de resistencia al impacto (IRI) se determinó adecuando los principios de la norma ASTM D440-86 [14] dejando caer 15 pellets de una altura de 1.85m sobre una superficie plana de concreto donde se cuantifica el número de partes en las que la pieza se quiebra después de 3 intentos, despreciando las piezas que pesen menos del 5% del peso total de la pieza. Mediante la ecuación de Richards [15] se obtiene el IRI:

$$IRI = \frac{(100 \times N)}{(n)} \quad \text{Ec. (3)}$$

Donde  $N$  es el número de caídas de la pieza y  $n$  es el número de piezas totales después del ensayo, por lo que el IRI máximo sería 300.

La densidad a granel se evaluó siguiendo los principios de la norma ASTM E873 - 82 [5] y adecuados a el material disponible utilizando un recipiente cilíndrico con un volumen determinado de 600 ml, el cual fue llenado con pellets hasta su máxima capacidad, posteriormente se registró el peso y se utilizó una película de polímero flexible para cubrir el recipiente con la finalidad de prevenir el derrame de material, a una altura de 25 cm se dejó caer en una superficie plana de concreto 5 veces para asentar el material lo más posible y se colocó más material en el recipiente hasta llegar a la máxima capacidad del mismo. La ecuación utilizada para calcular la densidad a granel es:

$$\rho_g = \frac{M_1 - M_2}{v} \quad \text{Ec. (4)}$$

Donde  $\rho_g$  es la densidad a granel  $M_1$  es la masa del contenedor con los pellets y  $M_2$  es la masa del contenedor y  $v$  es el volumen del contenedor.

Para el cálculo de densidad de partícula, se emplearon 30 pellets a los cuales se les determinaron sus dimensiones con un vernier y se utilizó un cálculo estereométrico del pellet para posteriormente pesarlo y determinar su densidad mediante la ecuación:

$$\rho = \frac{m}{v} \rightarrow \pm 8.7\% dep \quad \text{Ec. (5)}$$

Donde  $\rho$  es la densidad en g/cm<sup>3</sup>, m es la masa del pellet, v es el volumen calculado estereométricamente y al final se hace un ajuste por el porcentaje de variabilidad existente [16].

Para la evaluación general de los pellets se siguieron las guías señaladas en el “Manual para la certificación de pellets de madera para usos térmicos” que opera bajo los principios de la norma EN-14961-2 [17] donde se puede clasificar la calidad del material mediante parámetros establecidos para cada una de las pruebas, en la Tabla 1 se exponen los parámetros que evalúa la norma.

Tabla 1: Valores límites para los parámetros de pellets.

Parámetro	Unid.s	ENplus-A1	ENplus-A2	EN-B
Diámetro	mm	6 or 8		
Longitud	mm	3.15 ≤ L ≤ 40 <sup>3)</sup>		
Humedad	p-% <sup>1)</sup>	≤ 10		
Cenizas	p-% <sup>2)</sup>	≤ 0.7	≤ 1.5	≤ 3.0
Durabilidad mecánica	p-% <sup>1)</sup>	≥ 97.5 <sup>4)</sup>		≥ 96.5 <sup>4)</sup>
Finos (< 3.15 mm)	p-% <sup>1)</sup>	<1		
Poder Calorífico Inferior	MJ/kg <sup>1)</sup>	16,5 ≤ Q ≤ 19	16,3 ≤ Q ≤ 19	16,0 ≤ Q ≤ 19
Densidad aparente	kg/m <sup>3</sup>	≥ 600		
Nitrogeno	p-% <sup>2)</sup>	≤ 0.3	≤ 0.5	≤ 1.0
Sulfur content	p-% <sup>2)</sup>	≤ 0.03		≤ 0.04
Cloro	p-% <sup>2)</sup>	≤ 0.02		≤ 0.03
Fusibilidad cenizas <sup>4)</sup>	°C	≥ 1200	≥ 1100	

1) Base húmeda 2) Base seca

3) Un máximo de 1 p-% de los pellets pueden ser más largos de 40 mm, no se permiten pellets > 45 mm

4) Temperatura de Deformación, preparación de la muestra a 815 °C

Fuente: Manual EN-Plus14961-2 para la certificación de pellets de madera para usos térmicos (recortada).

Los parámetros que se evaluaron son los que se expusieron previamente en la metodología

Para el análisis económico se plantearon 2 escenarios posibles donde todo se calculo en pesos mexicanos (MXN), el primero (E1) estipula la adquisición de un molino de martillos de una capacidad de 2,000 Kg/h con un valor de \$35,000 (Agosto 2024) para el ajuste de granulometría, costos mensuales de producción de \$18,185.54 (Agosto 2024) incluyendo gastos de operación e insumos y una inversión inicial de \$140,219.54 (Agosto 2024).

En contraste, el segundo escenario (E2) establece la renta de de dicho molino con un costo de \$400 por hora (Agosto 2024) con una tasa de molienda de 135 Kg/h, costos mensuales de producción de \$27,044.54 (Agosto 2024) y una inversión inicial de \$114,078.54 (Agosto 2024).

Una vez establecidos los escenarios, se determinaron los supuestos económicos que son iguales en ambos escenarios, los cuales son:

- Una pelletizadora con capacidad de producción de 150 Kg/h con un costo de \$35,000 (Agosto 2024).
- 3,590 Kg de bagazo base seca anual.
- Un rendimiento de pelletizado del 86.2%.
- Un consumo anual de madera para la producción de mezcal de 50 t.
- Un costo de \$1,200 por tonelada de madera (Agosto 2024).
- Un precio de venta de \$100 por una bolsa de 10 Kg de pellets (Agosto 2024).
- Una venta total mensual del producto.

El periodo simple de retorno (PSR) se realizo una relación entre el monto de la inversión inicial (II) y las ganancias anuales estimadas (FEA).

$$PSR = \frac{II}{FEA} \quad \text{Ec. (6)}$$

## RESULTADOS

### Propiedades Físicas

Los pellets elaborados con bagazo de penca de Agave presentaron una humedad de 10.7% ± la desviación estándar de 0.49% siendo está a la que se obtuvieron de una forma más constante y alargada. Las dimensiones obtenidas de los pellets son 15.3mm en promedio para los pellets mas cortos ~ 34.33mm de largo en promedio para los pellets mas largos ± la desviación estándar de 0.08mm y 6.09mm ~ 6.13mm ± la desviación estándar de 0.82mm de diámetro, con una humedad promedio de 1.9% ± la desviación estándar de 0.042% después del proceso de “madurado”. Se encontró también que el color de los mismos se tornó ligeramente más oscuro. La densidad de partícula obtenida fue de 1.09 – 1.20 ± 0.09 g/cm<sup>3</sup> el cual está dentro de los parámetros esperados para materiales lignocelulósicos [16]. La densidad a granel obtenida fue de 765.07 ± 18.93 kg/m<sup>3</sup>, el cual está por encima del estándar europeo de 500 – 600 kg/m<sup>3</sup> dependiendo de la norma [17,18].

### Propiedades Mecánicas

La durabilidad mecánica de los pellets fue de 93.81%, por lo que la cantidad de los residuos en forma de finos fue relativamente bajo. Sin embargo, hay que señalar que el bagazo de penca se pelletizó en crudo, es decir, que no se le dio ningún pretratamiento térmico, químico o biológico; por lo que la durabilidad se puede mejorar por acondicionamiento de muestra, adición de agentes aglomerantes o condiciones de pelletizado. Los procesos sugeridos han reportado mejoras de durabilidad de

otros residuos agroindustriales [19] y lignocelulósicos [20].

Por otra parte, el índice de resistencia al impacto obtenido fue de 187, el cual es similar con otros pellets compuestos de residuos lignocelulósicos los cuales se clasifican como Enplus-A1 [18]. La correlación entre las propiedades mecánicas y las características de la materia prima (químicas y físicas) [21], respaldan la posibilidad de que se podría mejorar la calidad de los pellets mediante ajustes en el tratamiento de la materia prima o durante el proceso de obtención de lo pellets.

Siguiendo los parámetros de evaluación en el manual para la certificación de pellets, los pellets de bagazo de penca de Agave durangensis obtenidos califican en Enplus-A1 en 4 de los 5 parámetros evaluados, como se muestra en la Tabla 2, la única que está ligeramente abajo es la durabilidad mecánica, estando 2.69% bajo el mínimo aceptable para la clasificación Enplus-B, de acuerdo al manual. La clasificación se emplea en pellets hechos de madera virgen de baja calidad, residuos de la industria maderera y madera usada que no ha sido tratada químicamente por lo que obtener un biocombustible sólido a partir de Agave durangensis amplía el panorama para la mejora y obtención de biocombustibles sólidos densificados a partir de estos residuos, puesto que los pellets obtenidos a partir de maderas suelen tener propiedades físicas muy superiores a otros hechos a partir de otros residuos agroindustriales como paja de trigo, paja de maíz, paja de arroz, entre otros [19, 21].

Tabla 2: Resultados y clasificación de los parámetros evaluados a los pellets de bagazo de agave durangensis.

Parámetro	Resultado	Categoría
Diámetro	6.09 mm – 6.13 mm	Enplus-A1
Longitud	15.30mm – 34.33mm	Enplus-A1
Humedad	1.90%	Enplus-A2
Durabilidad Mecánica	93.81%	Posible Enplus-B
Densidad Aparente	765.07 kg/m <sup>3</sup>	Enplus-A1

Fuente: Elaboración propia.

### Análisis Económico

En el E1 para su posible comercialización, se proyecta una ganancia mensual de \$2,744.46, esto debido a que los gastos de operación fueron menores que las ventas mensuales proyectadas resultando en una utilidad. Por lo que se estimó una ganancia anual total de \$51,119 con un periodo simple de retorno de 2.74 años. Adicionalmente, el costo de producción total anual de la materia prima disponible para la elaboración de pellets para auto consumo resultó en \$218,226.48 para un 71.76% del requerimiento energético anual de la vinata. Por el contrario, en el E2 se proyectaron pérdidas mensuales de \$6,114.54 a causa del alto costo de producción mensual debido a la renta del molino (\$8,859). Esto resultó en un periodo de retorno nulo donde se calculó que en un plazo de 2.46 años, se habrá perdido

el mismo monto que la inversión inicial. Similarmente, los costos de producción para el auto consumo resultaron en \$324,534.48.

Ambos escenarios resultan en un aumento del 363% (E1) y 540% (E2) en comparación del costo anual de madera (\$60,000) para suplir las necesidades energéticas de producción de mezcal en la vinata.

### CONCLUSIONES

Los resultados muestran que el uso de bagazo de Agave durangensis para la obtención de biocombustibles sólidos densificados en forma de pellets con calidad Enplus-A1 es posible. Las propiedades físicas muestran una densidad a granel favorable. En relación a las propiedades mecánicas, los parámetros evaluados de durabilidad que está por debajo del límite aceptable y el IRI menor a 200 podría ser causado por la procedencia de la materia prima, debido a que es un subproducto de la producción de mezcal, por lo que las estructuras moleculares de las fibras podrían tener degradación. Adicionalmente, hay altas probabilidades de que aun tenga materiales volátiles que podrían lubricar la biomasa lo que disminuiría la fricción en el pistón de pelletizado resultando en una unión intermolecular y temperaturas más bajas a las posibles propiciando un decremento en la propiedades mecánicas.

El auto consumo de los pellets obtenidos a partir de los subproductos de la producción de mezcal resultan económicamente no viables debido a los altos costos de producción en comparación a la madera pero resultan en una opción económicamente redituable para su posible comercialización.

Es posible optimizar las propiedades de los pellets de Agave durangensis para alcanzar clasificaciones superiores como Enplus-B o incluso Enplus-A1, con potencial de cumplir los estándares Enplus-A2. Esta mejora técnica no solo ampliaría su aplicabilidad a mercados mas amplios (industrias alimentarias o sistemas de calefacción urbana), sino que incrementaría su valor comercial, garantizando una viabilidad económica sólida.

### AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Laboratorio Nacional CONAHCYT de Biocombustibles Sólidos (Bioener) con sede en el Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera, al Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera, al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias por el apoyo brindado con sus equipo e instalaciones para la realización de este estudio, así como a la vinata "Madre Tierra" en Nombre de Dios, Durango por la donación del bagazo utilizado para la elaboración de este estudio.

### BIBLIOGRAFÍA

[1] COMERCAM (2024). Informe Estadístico 2024; Consejo Mexicano Regulador de la Calidad del

Mezcal, A. C.: Oaxaca, México, 2024; Available online: [https://comercam-dom.org.mx/wp-content/uploads/2024/04/PUBLICO\\_INFORME\\_2024.pdf](https://comercam-dom.org.mx/wp-content/uploads/2024/04/PUBLICO_INFORME_2024.pdf).

[2] Garzón Rocha, E. C. y Rodríguez Leiton, M. C. (2023) Aprovechamiento de residuos generados en procesos agroindustriales en la industria mezcatera. [Trabajo de grado, Fundación Universidad de América] Repositorio Institucional Lumieres. <https://hdl.handle.net/20.500.11839/9313>.

[3] Pradhan, P., Mahajani, S. M., & Arora, A. (2018). Production and utilization of fuel pellets from biomass: A review. *Fuel Processing Technology*, 181, 215-232.

[4] Bajwa, D. S., Peterson, T., Sharma, N., Shojaeirani, J., & Bajwa, S. G. (2018). A review of densified solid biomass for energy production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96, 296-305.

[5] Liu, Z., Mi, B., Jiang, Z., Fei, B., & Cai, Z. (2016). Improved bulk density of bamboo pellets as biomass for energy production. *Renewable energy*, 86, 1-7.

[6] Mian, I., Li, X., Dacres, O. D., Wang, J., Wei, B., Jian, Y., ... & Rahman, N. (2020). Combustion kinetics and mechanism of biomass pellet. *Energy*, 205, 117909.

[7] Flach, B., Lieberz, S., & Bolla, S. (2014). EU-28 Biofuels Annual EU Biofuels Annual 2019. USDA: Washington, DC, USA.

[8] Kaliyan, N., & Morey, R. V. (2009). Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and bioenergy*, 33(3), 337-359.

[9] Tumuluru, J. S., Wright, C. T., Hess, J. R., & Kenney, K. L. (2011). A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 5(6), 683-707.

[10] Pradhan, P., Mahajani, S. M., & Arora, A. (2021). Pilot scale production of fuel pellets from waste biomass leaves: Effect of milling size on pelletization process and pellet quality. *Fuel*, 285, 119145.

[11] Žurovec, D., Jezerská, L., Nečas, J., Hlostá, J., Diviš, J., & Zegzulka, J. (2021). Spiral Vibration Cooler for Continual Cooling of Biomass Pellets. *Processes*, 9(6), 1060.

[12] Winowski, T. (1998). Examining a new concept in measuring pellet quality: which test is best. *Feed Management*, 49(1), 23-26.

[13] Kabaş, Ö., Ünal, İ., Sözer, S., Selvi, K. C., & Ungureanu, N. (2022). Quality Assessment of Biofuel Briquettes Obtained from Greenhouse Waste Using a Mobile Prototype Briquetting Machine with PTO Drive. *Energies*, 15(22), 8371.

[14] Fang, J., He, J., Hong, Y., Luo, Z., Ke, H., Fan, Z., ... & Lingjun, K. (2023). Coupling effect of the refuse and sludge on the physical and combustible properties of the densified pellets for energy production. *Renewable Energy*, 216, 119081.

[15] Richards, S. R. (1990). Physical testing of fuel briquettes. *Fuel Processing Technology*, 25(2), 89-100.

[16] Rabier, F., Temmerman, M., Böhm, T., Hartmann, H., Jensen, P. D., Rathbauer, J., ... & Fernández, M. (2006). Particle density determination of pellets and briquettes. *Biomass and Bioenergy*, 30(11), 954-963.

[17] Niedziółka, I., Szpryngiel, M., Kachel-Jakubowska, M., Kraszkiewicz, A., Zawiślak, K., Sobczak, P., & Nadulski, R. (2015). Assessment of the energetic and mechanical properties of pellets produced from agricultural biomass. *Renewable Energy*, 76, 312-317.

[18] Blancarte-Contreras, E., Corral-Rivas, S., Domínguez-Gómez, T. G., Lujan-Soto, J. E., Goche-Télles, J. R., & Montiel-Antuna, E. (2022). Improving the physical, mechanical and energetic characteristics of pine sawdust by the addition of up to 40% Agave durangensis gentry pellets. *Energies*, 15(10), 3711.

[19] Thapa, S., & Engelken, R. (2020). Optimization of pelleting parameters for producing composite pellets using agricultural and agro-processing wastes by Taguchi-Grey relational analysis. *Carbon Resources Conversion*, 3, 104-111.

[20] Castellano, J. M., Gómez, M., Fernández, M., Esteban, L. S., & Carrasco, J. E. (2015). Study on the effects of raw materials composition and pelletization conditions on the quality and properties of pellets obtained from different woody and non woody biomasses. *Fuel*, 139, 629-636.

[21] Sarker, T. R., Nanda, S., Meda, V., & Dalai, A. K. (2023). Densification of waste biomass for manufacturing solid biofuel pellets: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 21(1), 231-264.

