

Co-Incineración de pellets de paja y madera de arroz: Una estrategia sostenible para la valorización del arroz sobrante

Cristina Moliner , Dario Bove and Elisabetta Arato * 

Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale (DICCA), Università degli Studi di Genova,
Via Opera Pia 15A, 16145 Genova, Italy; cristina.moliner@edu.unige.it (C.M.); dario.bove@dicca.unige.it (D.B.)

* Correspondence: elisabetta.arato@unige.it

Received: 8 October 2020; Accepted: 30 October 2020; Published: 3 November 2020



Resumen: Las actividades agrícolas producen una cantidad estimada de 32,7 MToe/año de residuos en los países de la UE. En su mayoría se eliminan en vertederos, se incineran sin ningún control o se abandonan en los campos, lo que causa graves repercusiones en la salud humana y el medio ambiente. El arroz es uno de los cultivos más consumidos en todo el mundo, con una producción anual de 782 millones de toneladas, según la base de datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. En este contexto, el proyecto LIFE LIBERNITRATE, financiado por la Unión Europea, promueve el uso de fuentes residuales renovables (es decir, la paja de arroz) para obtener nuevos materiales con un valor añadido. La metodología se basa en la incineración de la paja de arroz en un sistema de valorización de diseño y construcción propios. Los pellets de paja y madera de arroz se queman en condiciones optimizadas para producir una cantidad máxima de cenizas con alto contenido de sílice. Estos materiales se utilizarán después para tratar el agua contaminada con nitratos, lo que representa un ejemplo óptimo de estrategia de economía circular. En este trabajo se describe la unidad de valorización de diseño propio, con especial atención a sus principales elementos constitutivos. El estudio teórico de la co-incineración de la paja de arroz y los pellets de madera permitió identificar las condiciones de combustión optimizadas. Las pruebas experimentales realizadas con las aportaciones teóricas confirmaron las condiciones de funcionamiento más adecuadas (10 g de pellets de paja de arroz/min + 10 g de pellets de madera/min, 6-7 Nm³/h de aire, T = 500 °C) y ayudaron a definir las mejoras en la planta experimental.

Key word: economía circular; paja de arroz; co-incineración.

1. Introducción

La producción anual de arroz con cáscara asciende a 782 millones de toneladas (2018) según la base de datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [1]. En Europa, Italia es el principal productor con 1.512.241 toneladas de arroz producidas en 2018. España sigue en el ranking con una producción de 808.167 toneladas. Los dos principales productos residuales de la industria del arroz son la paja de arroz (residuo de cultivo que permanece en los campos después de la cosecha) y la cáscara de arroz (subproducto obtenido después del postratamiento del arroz). Por cada kilogramo de arroz cosechado se produce 1 kilogramo de paja y 0,2 kilogramos de cascarilla [2], que se convierten en una gran cantidad de residuos a tratar.

Las prácticas actuales como el vertido o la incineración presentan graves problemas ambientales y de salud humana. El aumento indeseable de las emisiones de CO₂ y el abandono en los campos constituyen un importante peligro a combatir, debido a la elevada contaminación de las tierras y el agua que la descomposición de los materiales exacerba. Los problemas económicos también se derivan de una gestión incorrecta de las corrientes residuales, ya que constituyen costos adicionales para sus productores, que deben pagar por un correcto tratamiento de los residuos. En este marco, el uso eficiente de los recursos desempeña un papel fundamental en la activación de los agentes económicos, asegurando un estado de bienestar social y una calidad de vida. El desarrollo de nuevas estrategias para el suministro de recursos y la promoción de nuevos mercados debe ser primordial en las políticas de toda la Unión Europea.

Se han propuesto varias estrategias para gestionar eficientemente los residuos de arroz. La incorporación de la paja del arroz (parcial o totalmente) al suelo sigue siendo la opción más común. Esto aumenta el contenido de nutrientes (N, P y K), lo que redundaría en una mejora de los rendimientos. Sin embargo, una incorporación incorrecta de la paja de arroz puede generar efectos adversos, como la reducción de la absorción de N [3]. La paja de arroz tiene un escaso valor nutritivo y un alto contenido de sílice, lo que reduce su digestibilidad, y se utiliza como aditivo y no como única fuente de alimento. La paja también puede utilizarse en el sector manufacturero, incluida la producción de papel [4], el envasado de alimentos [5] y los materiales de carbono activado; en el sector de la construcción como material de construcción [6] o aislamiento térmico [7], y como fuente de energía renovable para producir biocombustible (bioetanol [8]), biogás [9] y electricidad [10].

La paja de arroz también puede ser el precursor de nuevas cadenas de materiales de valor añadido. El alto porcentaje de ceniza en la paja produce una gran cantidad de producto residual cuando se somete a procesos de conversión térmica. Este residuo es rico en sílice (SiO_2), un material inorgánico ampliamente utilizado en una amplia gama de aplicaciones como vidrios, fibras ópticas, aditivos alimentarios, aislantes eléctricos y térmicos, absorbentes, productos farmacéuticos [11]. La obtención de sílice a partir de la paja de arroz es uno de los objetivos del proyecto europeo LIFE LIBERNITRATE [12]. Esta sílice se activará y se utilizará en el tratamiento del agua para la eliminación de nitratos. En este marco, la obtención de cantidades máximas de ceniza de buena calidad es un paso crucial en todo el proceso.

En trabajos anteriores [13], estudiamos la idoneidad de la paja de arroz como fuente de energía renovable mediante tecnologías de gasificación en un reactor de lecho de chorro. Los principales productos fueron un gas de síntesis combustible y un material carbonoso residual, el carbón, con una producción casi nula de cenizas. En este trabajo, la combustión directa de la paja de arroz se lleva a cabo con el objetivo de maximizar el rendimiento de cenizas. La combustión directa de la paja de arroz presenta altas eficiencias energéticas con respecto a otras conversiones termoquímicas [14]. Sin embargo, entraña dificultades debido a su bajo valor calórico y a su alto contenido de cenizas [15], lo que da lugar a bajas temperaturas y estabilidad de la llama [10], a la sinterización, a la deposición de material (escoria) o a la acumulación de partículas no deseadas en las superficies sólidas (ensuciamiento) debido a la fusión de los silicatos de potasio [16]. También es importante un buen control de las emisiones debidas al contenido de N y S de la biomasa que puede dar lugar a compuestos tóxicos no deseados [17,18].

Se ha realizado una quema controlada de paja de arroz en reactores fluidificados [16,19] con resultados satisfactorios y se han minimizado los problemas de escoria si la temperatura del lecho se mantenía por debajo de $750\text{ }^\circ\text{C}$. En comparación con los lechos fluidizados, las calderas son más flexibles al tipo de combustible y menos sensibles a la escoria/ensuciamiento. Se han utilizado para la generación de calor y energía con eficiencias del 70-80% utilizando rejillas fijas, móviles y vibratorias [20]. La combustión directa de paja de arroz en un horno a escala de banco elevó la temperatura del aire de $14\text{ }^\circ\text{C}$ a más de $30\text{ }^\circ\text{C}$ por encima de la temperatura ambiente, lo que demostró ser suficiente para aplicaciones de secado de arrozales [21]. Hasta donde saben los autores, no se ha informado de ninguna central eléctrica de combustión directa a gran escala que utilice paja de arroz. Las unidades de pequeña escala cerca de los campos de cultivo son más comunes para optimizar la recogida y el transporte de la paja de arroz a las centrales eléctricas. El uso de los subproductos (es decir, cenizas, carbón) puede proporcionar valor a estas plantas, aumentando el grado de rentabilidad, especialmente a pequeña escala. Es el caso de la valorización de las cenizas de paja de arroz que puede aplicarse a numerosas aplicaciones [22] como su uso como materiales adsorbentes.

En este marco, el objetivo principal de este trabajo es presentar el diseño, la construcción y el funcionamiento de una unidad de incineración para la valorización de pellets de paja de arroz a escala piloto. En base a este objetivo, se han discutido las actividades teóricas (Sección 2.1) y experimentales (Sección 2.2) para obtener finalmente un funcionamiento optimizado de la unidad de valorización para producir cenizas de paja de arroz (Sección 3). Este trabajo muestra una estrategia exitosa para promover el uso de los residuos agrícolas para obtener productos de valor añadido (energía y cenizas) y para fomentar un enfoque de economía circular en la gestión de los residuos, haciendo estas tecnologías más convenientes tanto en términos económicos como ambientales.

2. Materiales y Métodos

La valorización de la paja de arroz se llevó a cabo a través de dos caminos complementarios. Los estudios de viabilidad se realizaron inicialmente desde un punto de vista teórico (Sección 2.1). Se obtuvieron los parámetros operativos optimizados que sirvieron de base para el diseño de la campaña experimental (Sección 2.2).

2.1. Estrategia de simulación

Las actividades de elaboración de modelos constituyen un instrumento útil para el diseño y la evaluación de las condiciones operacionales de los procesos industriales. También ayudan a definir los límites y limitaciones tecnológicas de un determinado proceso y permiten obtener las condiciones óptimas de trabajo de forma poco laboriosa.

El estudio de las variables del proceso (es decir, el porcentaje de mezcla de paja de arroz y madera, la tasa de entrada de aire, la temperatura, la cantidad de gas y los productos sólidos) se llevó a cabo utilizando Aspen Plus® (Bedford, MA, EE.UU.). El modelo ha sido descrito previamente en [23] con los datos de entrada según la caracterización de la materia prima que se muestra en el cuadro 1. El modelo se basa en supuestos de equilibrio que se mantienen válidos para simular las reacciones de combustión. Por consiguiente, estos resultados representan las condiciones ideales y pueden utilizarse para establecer la combinación factible de las variables operacionales y definir los límites tecnológicos. En la figura 1 se muestra el diagrama de flujo para la simulación de la coincineración de paja de arroz y pellets de madera. En resumen, los pellets de madera y paja se descomponen en primer lugar en sus principales constituyentes elementales (bloques: DECOMP/DECOMP2). Dos corrientes que contienen la composición (DEC1/DEC2) y el calor de la descomposición (QD1/QD2) salen del bloque y se dirigen a la unidad de reacción (GIBBS). En ella, junto con la humedad (H2OI) y el agente comburente en condiciones estequiométricas (AIR), se produce la combustión asumiendo el equilibrio. Como resultado, se obtiene una corriente que contiene el equilibrio de materiales (GASSÓLIDO) y otra corriente con el calor de combustión producido (QCOMB). Los detalles específicos de este modelo se pueden encontrar en [23].

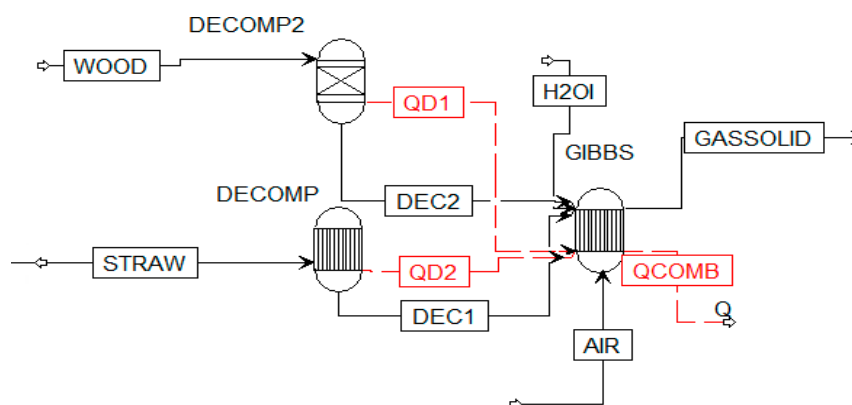


Figura 1. Hoja de flujo para la simulación de la coincineración de paja de arroz y pellets de madera.

Se han discutido los balances de material (corrientes negras) y energía (corrientes rojas). Se ha evaluado la influencia en la mezcla inicial de alimentación (es decir, el porcentaje de pellets de madera) y la tasa de entrada de aire para lograr una cantidad máxima de productos de alta calidad (gas y cenizas) mediante un proceso energético autosostenido.

2.2. Materials and Description of the Incineration Plant

2.2.1. Materiales

Los pellets de madera y los pellets de paja de arroz se utilizaron como materia prima en las actividades experimentales. Como se verá en la sección 3.2, los pellets de madera se necesitaban para mantener un balance térmico positivo para asegurar una combustión autosostenida. Los pellets de madera se adquirieron comercialmente a EN-Plus-A1 (España).

Los pellets de paja de arroz se produjeron in situ siguiendo las indicaciones de los anteriores ensayos a escala de laboratorio [24]. La tabla 1 recoge sus principales propiedades físicas y físico-químicas [13,15].

Tabla 1. Propiedades físicas y físico-químicas de los pellets de madera y paja de arroz

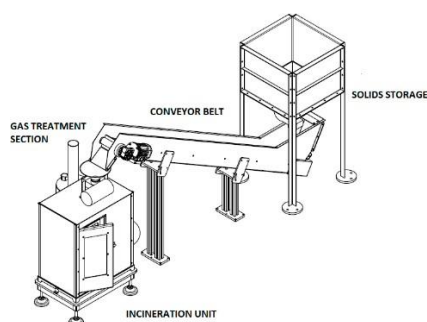
| Physical Properties | Wood Pellets | Rice Straw Pellets |
|------------------------------------|---------------------|---------------------|
| Length (m) | $3.0 \cdot 10^{-3}$ | $3.2 \cdot 10^{-3}$ |
| Density (kg/m^3) | 600 | 600 |
| Proximate Analysis (wt. %) | Wood Pellets | Rice Straw Pellets |
| Moisture content (MC) ^a | 5.1 | 9.1 |
| Fixed Carbon (FC) ^b | 22.4 | 16.1 |
| Volatile Matter (VM) ^b | 77.3 | 63.3 |
| Ash ^b | 0.3 | 20.6 |
| Ultimate Analysis (wt. %) | Wood Pellets | Rice Straw Pellets |
| Ash ^b | 0.3 | 20.6 |
| C ^c | 50.1 | 35.1 |
| H ^c | 6.2 | 4.5 |
| O ^c | 43.4 | 57.8 |
| N ^c | 0.2 | 2.3 |
| S ^c | 0.1 | 0.3 |
| HHV (MJ/kg) | 19.5 | 11.6 ^d |

a base húmeda, b base seca, c base sin cenizas; d según [25].

La temperatura de ignición (T_i) y la temperatura de combustión (T_b) de los gránulos de paja de arroz también se determinaron mediante termogravimetría (TG) y termogravimetría derivada (DTG) [15]. Estas dos temperaturas son cruciales para definir el régimen térmico del sistema, ya que indican las temperaturas de proceso mínimas (T_i) y máximas (T_b). Un mínimo de $T_i = 264 \text{ °C}$ (condiciones oxidativas) fue necesario para empezar a producir compuestos volátiles. Representa la temperatura mínima de funcionamiento necesaria para iniciar los procesos termoquímicos y, por lo tanto, los requisitos mínimos de energía inicial del sistema. Análogamente, el análisis de los termogramas en condiciones oxidativas proporcionó una $T_b = 450 \text{ °C}$ que indicaba la temperatura mínima del sistema para asegurar una combustión completa.

2.2.1. Planta de incineración

La valorización de la paja de arroz se llevó a cabo en una planta de incineración de diseño propio. El diseño de la unidad se hizo de forma muy personalizada considerando los principales objetivos cuantitativos y las posibles dificultades técnicas. En la figura 2 se muestra la unidad en la etapa de diseño (figura 2a) y la planta final construida (figura 2b).



(a)



(b)

Figure 2. Diseño de la planta de incineración (a) y de la planta final construida (b).

Los requisitos iniciales cuantitativos establecen la línea de base para el dimensionamiento de la planta. El incinerador debe producir 120 kg de cenizas en 170 días. El silo debe tener la capacidad suficiente para almacenar suficiente paja de arroz y pellets de madera para una semana. El contenedor de cenizas debe tener suficiente capacidad para almacenar la cantidad de cenizas que se produce diariamente. Los parámetros de entrada y las variables calculadas de diseño inicial se recogen en el cuadro 2.

Table 2. Input parameters and initial design calculated variables.

| Input Data | Value | Unit |
|--------------------------------------|--------|----------------|
| Target silica | 120 | kg |
| Ash-silica yield [12] | 0.8 | - |
| Rice straw-ash yield [12] | 0.12 | - |
| High heating value rice straw pellet | 11 | MJ/kg |
| Ratio of mass overflow | 0.4 | - |
| Time of work | 170 | days |
| Daily working hours | 8 | h |
| Calculated design values | | |
| Silica | 150 | kg |
| Rice straw | 1227 | kg |
| Rice straw pellets daily mass flow | 10 | kg/d |
| Rice straw pellets hourly mass flow | 1.25 | kg/h |
| Storage volume | 0.0833 | m ³ |

La planta se compone de 4 elementos: almacenamiento, cinta transportadora, unidad de incineración y sección de tratamiento de gases que se explican en detalle en los siguientes párrafos.

Almacenamiento de sólidos

El silo (Figura 3a) está diseñado para garantizar el almacenamiento de la materia prima durante una semana completa de trabajo. La unidad de acero tiene un volumen de 0,0833 m³ (longitud cuadrada de la base = 0,5 m) y tiene paredes inclinadas para facilitar el descenso de los pellets. Una barra cilíndrica (Figura 3b) está en continuo movimiento creando ligeras vibraciones para evitar bloqueos. El flujo másico de alimentación está controlado por una válvula rotativa de 0,0486 m de diámetro cuya velocidad está previamente calibrada para cumplir con los caudales másicos deseados. Entre la válvula rotativa y la parte inferior de la cinta transportadora se encuentra un sensor de nivel de sólidos para evitar la acumulación de materia prima.



Figura 3. Almacenamiento de sólidos: Unidad principal del silo (a) y barra cilíndrica (b).

Cinta transportadora

La cinta transportadora permite el transporte de la materia prima desde el silo hasta la unidad de incineración. Los pellets caen desde el almacenamiento inicial y viajan hacia arriba en la cinta (materiales: acero + PVC (transportando

lado) + TPU (lado inferior)) (Figura 4a) en la parte superior donde caen en una segunda unidad de almacenamiento (volumen: 0,005 m³). La cinta tiene una longitud de 4,55 m y una anchura de 0,15 m con tabiques regularmente espaciados cada 0,175 m. Este segundo silo (Figura 4b) permite un mayor control de los caudales másicos, al tiempo que actúa como un elemento de seguridad adicional. Al igual que en la unidad de almacenamiento anterior, se ha colocado un sensor de nivel en el interior de la unidad de almacenamiento para evitar la acumulación de materia prima.

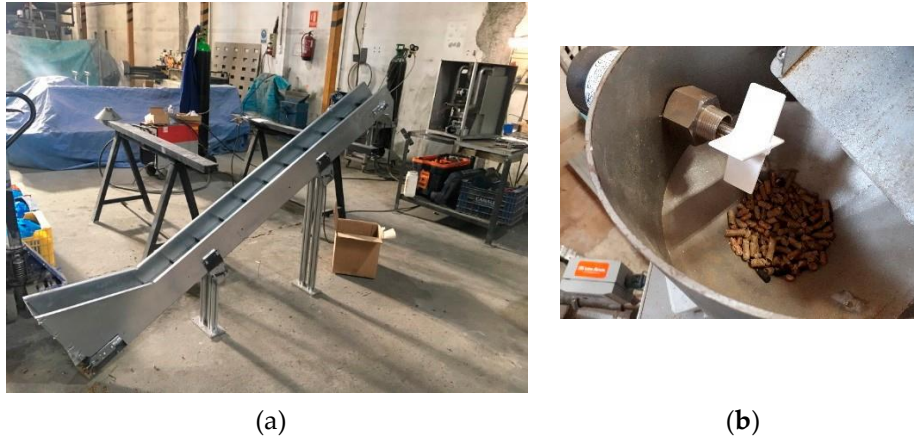


Figura 4. Cinta transportadora: vista general (a) y segunda unidad de almacenamiento (b).

Unidad de incineración

La unidad de incineración (figura 5a) es la parte central del sistema y permite la combustión y recuperación de las cenizas. Consiste en una cámara de combustión de hierro fundido con una rejilla móvil de acero inoxidable (Figura 5b) situada en la parte interior. Esta parrilla se mantendrá en movimiento circular controlado durante el proceso para evitar los posibles efectos de la escoria debido a la fusión de las cenizas. Además, se coloca un cepillo de limpieza en la superficie interior de la cámara para eliminar cualquier incrustación en la parrilla (Figura 5b).



Figure 5. Unidad de incineración: cámara de combustión (a) y parrilla giratoria y cepillo de limpieza (b).

Los pellets entran en la cámara de combustión desde el silo de dosificación a través del tubo de alimentación regulado por una válvula rotativa. El aire es transportado desde el exterior a la cámara de combustión a través de un transportador de aire. En el interior de esta cámara, en su superficie posterior, se instalan dos calentadores de encendido (250 W cada uno) (longitud = 140 mm). Más abajo de la cámara de combustión, se instala un ventilador de humo con una doble función:

i) extraer los humos de la cámara de combustión hacia el exterior y ii) asegurar la entrada de aire. En el fondo de la cámara se coloca una caja (longitud = 0,19; anchura = 0,304 m; altura = 0,094 m, para un volumen total = 0,0055 m³) para recoger las cenizas producidas durante la combustión (Figura 6a). La cámara se cierra con una puerta aislada con una ventana de vidrio (Figura 6b) para observar la llama y controlar visualmente el proceso. En el interior de la cámara se colocan cuatro sensores de temperatura (superior, salida de gases, hogar de la cámara de combustión y colector de cenizas) cuyas medidas se registran en el controlador.

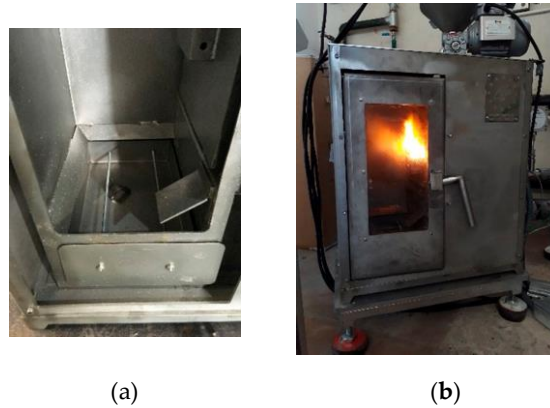


Figure 6. Planta de incineración: caja para la recogida de cenizas (a) y puerta con ventana de cristal (b).

Sección de tratamiento de gases

El gas extraído de la cámara de combustión se dirige al sistema de limpieza de gases (Figura 7). El tanque de acero (volumen = 0,046 m³) se llena con agua que permite la eliminación de las partículas sólidas que podrían haberse llevado a cabo en el flujo de gas, así como un descenso de su temperatura. Después de fluir al agua, el gas sale del sistema a través del tubo de salida y se descarga en la atmósfera.



Figure 7. Sección de tratamiento de gases.

Para determinar la composición del gas de salida (metano, nitrógeno, oxígeno, dióxido de carbono, monóxido de carbono e hidrógeno) se utiliza un cromatógrafo de gases portátil (GC) (ETG MCA 100 Syn, ETG Risorse e Tecnologia S.r.l, Montiglio M.to (AT)-ITALIA) (Figura 8a). La calibración del instrumento con muestras certificadas se realizó antes del inicio de los experimentos. Antes de entrar en el GC, el gas pasa por un enfriador (ETG PSS 100, ETG Risorse e Tecnologia S.r.l, Montiglio M.to (AT)-ITALIA) (Figura 8b) para eliminar el alquitrán, el agua y las cenizas para evitar daños en el GC.



Figure 8. Cromatógrafo de gases (a) y enfriador (b).

Se utilizan varios elementos de control en los diferentes elementos de la planta: i) los controladores de temperatura: aire de entrada, cámara de combustión, gas de salida, recipiente de cenizas; ii) flujo de entrada de alimentación y velocidad de la cinta; iii) flujo volumétrico: Aire de entrada y gas de salida. Todas estas variables se supervisan mediante un controlador que puede funcionar en modo automático según las condiciones de trabajo definidas. Todos los elementos del sistema siguen el criterio de seguridad en caso de avería, en el que en caso de fallo permanecen en la forma más segura.

3. Resultados

Los resultados teóricos obtenidos con Aspen Plus© (Sección 3.1) se utilizaron como base inicial para la campaña experimental. Una vez definidos los límites termodinámicos, se realizaron actividades experimentales para establecer las desviaciones de la unidad real con respecto a la idealidad y definir los límites tecnológicos. Esto ayudó a mejorar el diseño del valorizador como se explicará en la sección 3.2.

3.1. Resultados de simulación

La combustión de la paja de arroz se realizó inicialmente teniendo en cuenta los parámetros de diseño fijos iniciales y el equipo disponible. La primera variable evaluada fue el porcentaje de pellet de madera necesario para lograr un régimen térmico autosostenido. El bajo valor del mayor valor calorífico HHV de los pellets de paja de arroz (11,6 MJ/kg [15]) hace necesario el uso de pellets de madera (HHV = 19,5 MJ/kg [13]) para aumentar el valor calorífico de la mezcla, de modo que la combustión pueda tener lugar sin ninguna fuente de calor adicional. Sin embargo, es importante optimizar este porcentaje ya que un valor alto implica una menor producción de cenizas de paja de arroz y una menor calidad del producto, lo que puede aumentar los costos y disminuir los rendimientos.

En el cuadro 3 se muestra la simulación de la coincineración de paja de arroz y pellets de madera a 60 wt. % de paja de arroz/40 wt. % de pellets de madera (50 g/min de mezcla). El aire de entrada se varió en el rango de 1-10 Nm³/h correspondiente a las características experimentales disponibles de la diversión del aire. La temperatura se fijó en 450 °C definida como la temperatura óptima de combustión, véase la sección 2.2.1.

Table 3. Simulación de coincineración de 60 wt. % paja de arroz/40 wt. % pellets de madera (base libre de N₂).

| Air Inflow (Nm ³ /h) | C (kg/h) | O ₂ (wt. %) | CO (wt. %) | CO ₂ (wt. %) | Other (CH ₄ , H ₂ , H ₂ O) (wt. %) |
|---------------------------------|----------|------------------------|------------|-------------------------|---|
| 1 | 0.60 | 0.00 | 0.02 | 0.60 | 0.38 |
| 2 | 0.51 | 0.00 | 0.02 | 0.65 | 0.33 |
| 3 | 0.41 | 0.00 | 0.02 | 0.68 | 0.29 |
| 4 | 0.31 | 0.00 | 0.02 | 0.71 | 0.26 |
| 5 | 0.21 | 0.00 | 0.03 | 0.74 | 0.24 |
| 6 | 0.10 | 0.00 | 0.03 | 0.76 | 0.22 |
| 7 | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 0.77 | 0.20 |
| 8 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.77 | 0.21 |
| 9 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.76 | 0.24 |
| 10 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.73 | 0.27 |

Estos resultados muestran que el carbono sólido reacciona con la creciente cantidad de aire hasta un valor de 7 Nm³/h cuando se consume totalmente (hipótesis de equilibrio, por lo tanto, condiciones ideales). La combustión procede hasta una concentración de CO₂ = 0,77 % en peso, que corresponde a la máxima eficiencia de combustión. El exceso de aire se muestra en una entrada de aire superior a 10 Nm³/h. De estos resultados teóricos se puede concluir que las condiciones estudiadas no pueden aplicarse en la unidad experimental disponible, ya que la capacidad máxima del soplante de aire es de 10 Nm³/h. Estos resultados fueron validados experimentalmente como se describirá en la sección 3.2. Se tomó como válido un porcentaje del 50 % en peso de cada tipo de pellet de la mezcla para cumplir con los requisitos de material y energía.

Una vez establecida la mezcla de alimentación óptima, se dedicaron esfuerzos a maximizar el flujo de masa de entrada para optimizar la cantidad de ceniza producida. La simulación de tres escenarios se realizó utilizando el modelo descrito en la sección 2.1.

Simulación #1: 40 g de mezcla/min: 20 g de madera/min + 20 g de paja de arroz/min

La figura 9a muestra la composición de la masa del gas producido (lado izquierdo) y el flujo de masa de carbono sólido restante (lado derecho) a una entrada de aire variable. Como era de esperar, el contenido de carbono (puntos rojos) disminuyó con el aumento del flujo de aire debido a las reacciones de combustión, mientras que el O₂ permaneció igual a 0 hasta un valor igual a 7,5 Nm³/h (aire estequiométrico). Por encima, el carbono se quemó completamente y el O₂ fue en exceso.

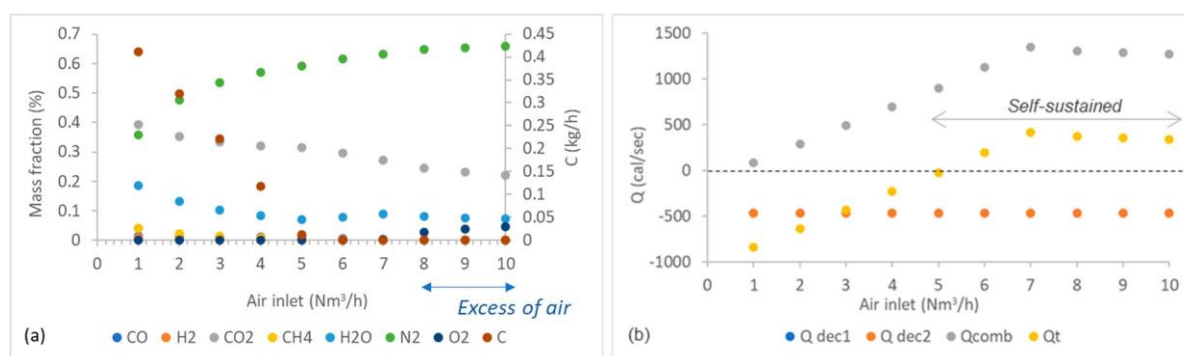


Figure 9. Masa; y a) energía; b) equilibrios para la coincineración de 40 g de mezcla/min.

Además, el balance de energía se muestra en la figura 9b. El calor de descomposición de ambos materiales (Q dec1 y Q dec2, coincidiendo con los puntos azules y naranjas) se elimina del calor producido por la combustión (Q comb, puntos grises) para obtener el calor total producido (Q t, puntos amarillos). El proceso es térmicamente autosostenido cuando Q t es superior a 0, lo que corresponde a un flujo de aire superior a 5 Nm³/h.

En resumen, la simulación indica que se debe alimentar un mínimo de 7,5 Nm³/h de aire al para quemar completamente todo el carbono de la biomasa en condiciones autosuficientes.

Simulación #2: 30 g de mezcla/min: 15 g de madera/min + 15 g de paja de arroz/min

De manera similar, la figura 10a muestra la composición de la masa del gas producido y el flujo de masa de carbono restante a diferentes valores de entrada de aire y la figura 10b muestra el balance energético correspondiente. En este caso, el flujo de aire estequiométrico se encontró a casi 6,5 Nm³/h, mientras que la entrada de aire que asegura una reacción térmicamente autosostenida se encontró por encima de 5 Nm³/h. Un mínimo de 6,5 Nm³/h de aire debe ser introducido en el reactor para quemar completamente todo el carbono de la biomasa mediante una combustión autosostenida.

Simulación #3: 20 g de mezcla/min: 10 g de madera/min + 10 g de paja de arroz/min

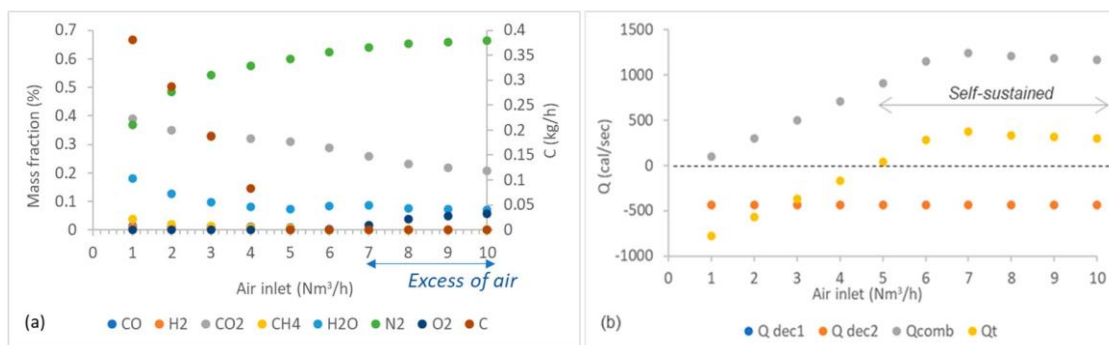


Figure 10. Los equilibrios de masa (a) y energía (b) para la coincineración de 30 g de mezcla/min.

Por último, se simuló una cantidad total de 20 g de mezcla/min. La figura 11a muestra la composición de masa del gas producido y el flujo de masa de carbono restante a diferentes valores de entrada de aire y la figura 11b muestra el balance energético correspondiente. En este caso, 5 Nm³/h fue el flujo de aire estequiométrico para la combustión completa y 3,5 Nm³/h se calculó como la entrada de aire que asegura una reacción térmicamente autosostenida. La simulación indica que se debe alimentar el reactor con un mínimo de 5 Nm³/h de aire para quemar completamente todo el carbono de la biomasa mediante una combustión autosostenida.

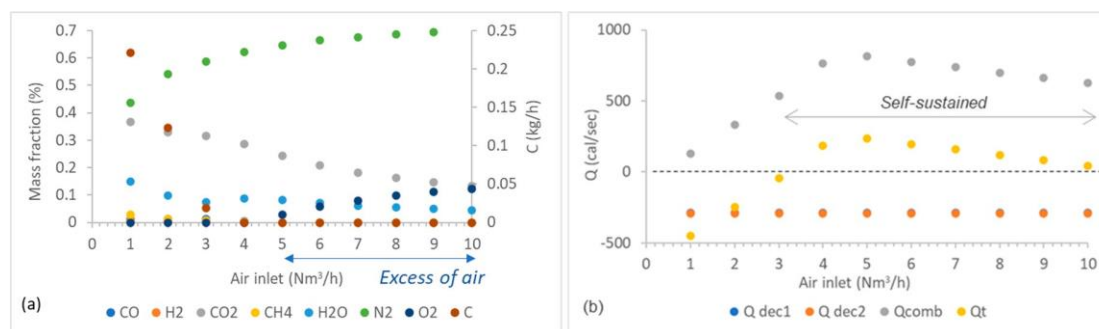


Figure 11. Los equilibrios de masa (a) y energía (b) para la coincineración de 20 g de mezcla/min.

En resumen, la tabla 4 recoge los resultados de todas las simulaciones. Como era de esperar, los flujos de masa de biomasa más elevados necesitan más aire para quemar completamente la mezcla y, por lo tanto, las reacciones autosostenidas se produjeron con flujos de aire más elevados. Estos valores serán la referencia para los ajustes iniciales durante la campaña experimental. Además, es importante destacar que representan las condiciones ideales y, por lo tanto, indican los límites termodinámicos del proceso.

Table 4. Requisitos de aire para las mezclas ensayadas

| Biomass Flow Rates | 40 g/min | 30 g/min | 20 g/min |
|--|----------|----------|----------|
| Stoichiometric air (Nm ³ /h) | 7.5 | 6.5 | 5.0 |
| Air for self-sustained combustion (Nm ³ /h) | 5.0 | 5.0 | 3.5 |

3.2. Resultados Experimentales

El primer conjunto de actividades experimentales se dedicó a la investigación de los procedimientos de puesta en marcha de la planta piloto y al funcionamiento adecuado de todos sus elementos. Una vez optimizado el procedimiento y confirmado el correcto comportamiento de la planta, se realizaron pruebas utilizando los parámetros operativos de las actividades de simulación anteriores (Sección 3.1) para evaluar la desviación del modelo con respecto a la unidad real. Estas comparaciones permitieron identificar posibles mejoras en la planta para lograr la máxima eficiencia.

3.2.1. Procedimiento de arranque

Se utilizó una cantidad inicial de 500 g de pellets de madera debido a su menor temperatura de ignición y su mayor valor de calentamiento. Se necesitaron tiempos más cortos para la puesta en marcha y, al mismo tiempo, se lograron temperaturas más altas para calentar la parte interna de la cámara de combustión. La ignición de los pellets de madera se produjo después de 4 minutos de calentamiento con los calentadores. Una vez que la llama aparecía, se apagaban y eran reemplazados por un flujo continuo de aire. Los pellets de madera se quemaron con aire a una velocidad de masa de 10 g/min hasta que se alcanzó una temperatura constante de 500 °C dentro de la cámara de combustión. Después de 30 minutos, la alimentación se cambió a la mezcla de pellets de madera/paja de arroz.

3.2.2. Prueba y ajuste de los elementos individuales

Los elementos individuales se probaron individualmente y se conectaron para detectar posibles fallos de funcionamiento en el sistema. Tres de los elementos requirieron una calibración inicial; los dos sistemas de alimentación y la velocidad de la red interna. Las válvulas de alimentación se ajustaron para cumplir con los flujos de masa requeridos y la velocidad de rotación de la rejilla se ajustó en forma binaria (tiempo ON/tiempo OFF).

3.2.3. Pruebas de arranque en la planta piloto

Se realizaron pruebas iniciales de arranque para evaluar el comportamiento correcto de toda la planta. Primero, se realizaron pruebas usando sólo pellets de paja de arroz, pero no se pudo realizar la combustión sin proporcionar calor externo. Entonces, se probó una mezcla inicial de 60 wt. % paja de arroz/40 wt. % pellets de madera. Como se esperaba de la sección 3.1, el sistema no fue capaz de lograr un régimen autotérmico y después de algunos minutos la llama se apagó. Esta validación experimental confirmó que las mezclas que contienen menos del 50 % de peso de pellets de madera no son apropiadas para una combustión exitosa. Después de algunas pruebas, se indicó que el 50 % de peso de los pellets de madera era el valor mínimo para establecer un régimen térmico adecuado.

Una vez establecido el porcentaje de los componentes de la mezcla, las pruebas se dedicaron a evaluar el comportamiento de la planta a diferentes flujos de masa de alimentación y entradas de aire estequiométricas. En estas pruebas, la comparación entre el comportamiento experimental observado y los resultados teóricos esperados permitió identificar algunos fallos de diseño y construcción. En primer lugar, cierta cantidad de pellets permaneció sin quemar dentro de la cámara de combustión. Una observación más atenta de este hecho indicó que algunos pellets cayeron dentro de la cámara pero, después de algunos minutos de acumulación, salieron de la parte interior de la cámara. Por esta razón, se introdujo un trozo extra para evitar la acumulación de pellets fuera de la cámara (Figura 12a). Además, las cenizas tendían a acumularse en el fondo de la cámara en lugar de salir volando con la llama. Se hizo una ventana de apertura controlada para ayudar a que las cenizas cayeran hacia la caja recolectora (círculo en la figura 12a). El aire estequiométrico calculado (Tabla 4) era considerablemente inferior al observado experimentalmente y se decidió introducir una capa aislante adicional en el interior de la cámara y reforzar las uniones con silicona (Figura 12b).

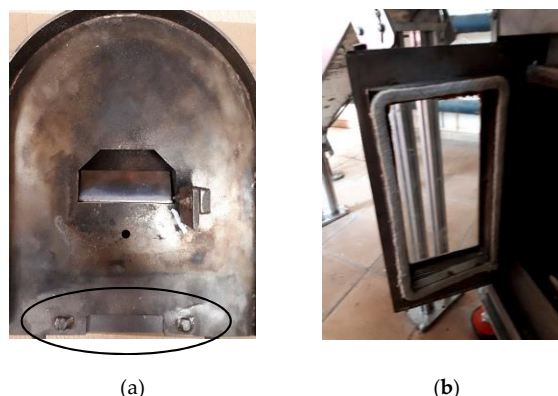


Figure 12. Mejoras en la cubierta del horno (a) y en la capa aislante adicional (b).

Después de estas mejoras, la planta finalmente se comportó como se esperaba y las actividades experimentales se centraron entonces en la maximización de la entrada de biomasa para maximizar la cantidad de cenizas producidas. Con este fin, se probaron tres flujos de masa diferentes (a 50 wt. % madera/paja de arroz): 40 g/min, 30 g/min y 20 g/min.

Test #1: 40 g de mezcla/min: 20 g de madera/min + 20 g de paja de arroz/min

Después de una hora del procedimiento de arranque, el sistema era térmicamente estable y el flujo inicial de madera fue reemplazado por la mezcla. La cámara contenía el combustible no quemado acumulado después de sólo 30 minutos. La llama no era estable, y se dispersaba abruptamente cada 5 min desapareciendo inmediatamente después. La velocidad de la rueda se incrementó para favorecer la reacción de combustión, pero el sistema era aún más inestable.

Se obtuvo una gran cantidad de ceniza en forma de granos del tamaño de un arroz negro después de 2 h. La ceniza presentaba grandes bloques derretidos que confirmaban la reacción no exitosa observada durante las pruebas. Un pienso total de 2,5 kg (1 kg de pellets de paja de arroz) produjo 152 g de cenizas, para una eficiencia del 15,2%. Estos resultados concuerdan con el comportamiento esperado de las simulaciones. Se definió un flujo de aire de 7,5 Nm³/h como valor óptimo en condiciones ideales. Esto representa la barrera tecnológica que debe superarse y, por lo tanto, en las pruebas experimentales debe aplicarse un flujo de aire superior a ese valor. Es importante destacar que la capacidad máxima del soplador es de 10 Nm³/h, sólo observada en la etapa inicial. El flujo de aire se mantuvo en 7-8 Nm³/h que, según las simulaciones, no era suficiente para mantener la combustión, como se observó visualmente.

Test #2: 30 g de mezcla/min: 15 g de madera/min + 15 g de paja de arroz/min

El proceso de quemado fue más estable que en el ensayo anterior, aunque a veces se observaron algunas acumulaciones de materia prima no quemada. La velocidad óptima de la red de movimiento creó algunas inestabilidades. La entrada de aire se mantuvo alrededor de 6-7 Nm³/h, justo por encima de las condiciones ideales. Después de casi 4 h de trabajo continuo y una alimentación total de 4,5 kg (2 kg de pellets de paja de arroz), se recogieron 310 g de cenizas, con una eficiencia del 15,5%. Las cenizas producidas eran más finas con respecto a la prueba 1 y tenían un color gris más claro.

Test #3: 20 g de mezcla/min: 10 g de madera/min + 10 g de paja de arroz/min

El proceso fue estable todo el tiempo con la red en continuo movimiento de luz. La entrada de aire se mantuvo en 6-7 Nm³/h y la temperatura se mantuvo alrededor de 500 °C. Después de casi 3 h de trabajo continuo y una alimentación total de 3,5 kg (1,5 kg de pellets de paja de arroz), se recogieron 242 g de cenizas, para una eficiencia del 16,1%. Como se esperaba de las simulaciones, esta mezcla se quemó con éxito, con un aumento del suministro de aire de 1-2 Nm³/h con respecto a los resultados teóricos. Este valor se tomó como la desviación debida a la no idealidad de la planta experimental. Las cenizas recogidas eran finas y grises, lo que indica una buena calidad visual.

Se han diseñado muy pocas unidades para la valorización de los residuos de arroz con el objetivo de obtener tanto energía como sílice. La gran mayoría utiliza cáscara de arroz en lugar de paja de arroz debido a su mayor porcentaje de sílice y a la facilidad de manejo de los sólidos. Aunque se puede producir sílice de alta calidad a partir de la cáscara de arroz y la paja de arroz, la mayoría de los estudios se realizaron en hornos de mufla a escala de laboratorio [26,27] y las investigaciones a escala de banco son escasas. Sólo Schliermann y otros [28] utilizaron una caldera comercial para obtener cenizas a partir de muestras de cáscara de arroz pretratadas. Demostraron que era posible realizar operaciones continuas y de bajas emisiones para ajustar el manejo de las cenizas.

En resumen, este trabajo presenta una de las primeras unidades a escala piloto diseñadas para la obtención de sílice. La retroalimentación entre la simulación y las actividades experimentales permitió definir las condiciones de trabajo más adecuadas para la coincineración de paja de arroz y pellets de madera para maximizar la calidad y cantidad de las cenizas. Estas cenizas se envían a otras etapas

químicas (extracción y activación de sílice) que mostraron resultados prometedores de acuerdo con las anteriores pruebas a escala de laboratorio [12] y que se describirán en un trabajo posterior.

4. Conclusiones

Se ha discutido la obtención de cenizas de paja de arroz utilizando una unidad de valorización de diseño propio. La metodología se basa en la incineración de pellets de paja de arroz en condiciones optimizadas para producir una cantidad máxima de cenizas con alto contenido de sílice. Estos materiales se utilizarán después para tratar el agua contaminada con nitratos en el marco del proyecto financiado por la Unión Europea LIFE LIBERNITRATE, que constituye un ejemplo óptimo de estrategia de economía circular.

Se ha descrito la unidad de valorización, centrándose especialmente en sus principales elementos constitutivos: unidad de almacenamiento, cinta transportadora, estufa y sistema de depuración de gases. Como se trata de una unidad de escala piloto de diseño propio, fue necesaria una amplia campaña preliminar para la selección de los parámetros de puesta en marcha y funcionamiento de la planta. Esta selección se basó en los estudios teóricos de la coíncineración de paja de arroz y pellets de madera en diferentes condiciones de funcionamiento. Estos resultados ayudaron a identificar las posibles mejoras de la planta y condujeron a la optimización de las condiciones de combustión. Sucesivamente, se realizaron pruebas experimentales utilizando los aportes teóricos anteriores y se aplicaron más mejoras hasta que los resultados obtenidos estuvieron en línea con los esperados. Al final, las condiciones operativas más adecuadas se establecieron como 10 g de pellets de paja de arroz/min + 10 g de pellets de madera/min, 6-7 Nm³/h de aire y

T = 500 °C. **Contribuciones del autor:** Conceptualización; metodología; software; validación; análisis formal; investigación; curaduría de datos; preparación del borrador original del manuscrito, C.M. y D.B.; revision-edición del manuscrito; supervisión; administración del proyecto; adquisición de fondos, E.A. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiación: Esta investigación fue financiada por el proyecto LIFE LIBERNITRATE, subvención número LIFE16 ENV/ES/000419.

Conflictos de intereses: Los autores declaran que no hay conflicto de intereses.

Referencias

1. FAO.FoodandAgricultureOrganisationoftheUnitedNations. Availableonline: <http://www.fao.org/home/en> (accessed on 2 October 2020).
2. Baetge, S.; Kaltschmitt, M. Rice straw and rice husks as energy sources – comparison of direct combustion and biogas production. *Biomass Convers. Biorefinery* **2018**, *8*, 719–737. [CrossRef]
3. Mandal, K.G.; Misra, A.K.; Hati, K.M.; Bandyopadhyay, K.K.; Ghosh, P.K.; Mohanty, M. Rice residue-management options and effects on soil properties and crop productivity. *Food Agric. Environ.* **2004**, *2*, 224–231.
4. Kaur, D.; Bhardwaj, N.K.; Lohchab, R.K. Prospects of rice straw as a raw material for paper making. *Waste Manag.* **2017**, *60*, 127–139. [CrossRef] [PubMed]
5. Elhussieny, A.; Faisal, M.; D’Angelo, G.; Aboulkhair, N.T.; Everitt, N.M.; Fahim, I.S. Valorisation of shrimp and rice straw waste into food packaging applications. *Ain Shams Eng. J.* **2020**. [CrossRef]
6. Cascone, S.; Rapisarda, R.; Cascone, D. Physical Properties of Straw Bales as a Construction Material: A Review. *Sustainability* **2019**, *11*, 3388. [CrossRef]
7. Wei, K.; Lv, C.; Chen, M.; Zhou, X.; Dai, Z.; Shen, D. Development and performance evaluation of a new thermal insulation material from rice straw using high frequency hot-pressing. *Energy Build.* **2015**, *87*, 116–122. [CrossRef]
8. Binod, P.; Sindhu, R.; Singhanian, R.R.; Vikram, S.; Devi, L.; Nagalakshmi, S.; Kurien, N.; Sukumaran, R.K.; Pandey, A. Bioethanol production from rice straw: An overview. *Bioresour. Technol.* **2010**, *101*, 4767–4774. [CrossRef]
9. Mothe, S.; Polisetty, V.R. Review on anaerobic digestion of rice straw for biogas production. *Environ. Sci. Pollut. Res.* **2020**. [CrossRef]
10. Logeswaran, J.; Shamsuddin, A.H.; Silitonga, A.S.; Mahlia, T.M.I. Prospect of using rice straw for power generation: A review. *Environ. Sci. Pollut. Res.* **2020**, *27*, 25956–25969. [CrossRef]

11. Jeelani, P.G.; Mulay, P.; Venkat, R.; Ramalingam, C. Multifaceted Application of Silica Nanoparticles. *A Review. Silicon* **2020**, *12*, 1337–1354. [[CrossRef](#)]
12. Moliner, C.; Teruel-Juanes, R.; Primaz, C.; Badia, J.; Bosio, B.; Campíns-Falcó, P.; Molíns-Legua, C.; Hernandez, F.; Sanjuan-Navarro, L.; Madramany, P.; et al. Reduction of Nitrates in Waste Water through the Valorization of Rice Straw: LIFE LIBERNITRATE Project. *Sustainability* **2018**, *10*, 3007. [[CrossRef](#)]
13. Bove, D.; Moliner, C.; Curti, M.; Baratieri, M.; Bosio, B.; Rovero, G.; Arato, E. Preliminary tests for the thermo-chemical conversion of biomass in a spouted bed pilot plant. *Can. J. Chem. Eng.* **2018**, *97*, 59–66. [[CrossRef](#)]
14. Moliner, C.; Bosio, B.; Arato, E.; Ribes-Greus, A. Comparative study for the energy valorisation of rice straw. *Chem. Eng. Trans.* **2014**, *37*, 241–246.
15. Moliner, C.; Bosio, B.; Arato, E.; Ribes, A. Thermal and thermo-oxidative characterisation of rice straw for its use in energy valorisation processes. *Fuel* **2016**, *180*, 71–79. [[CrossRef](#)]
16. Ewida, K.T.; El-Salmawy, H.; Atta, N.N.; Mahmoud, M.M. A sustainable approach to the recycling of rice straw through pelletization and controlled burning. *Clean Technol. Environ. Policy* **2006**, *8*, 188–197. [[CrossRef](#)]
17. Karatza, D.; Prisciandaro, M.; Lancia, A.; Musmarra, D. Sulfite Oxidation Catalyzed by Cobalt Ions in Flue Gas Desulfurization Processes. *J. Air Waste Manage. Assoc.* **2010**, *60*, 675–680. [[CrossRef](#)]
18. Nie, Y.; Li, S.; Dai, J.; He, D.; Mei, Y. Catalytic effect of Mn²⁺, Fe³⁺ and Mg²⁺ ions on desulfurization using phosphate rock slurry as absorbent. *Chem. Eng. J.* **2020**, *390*, 124568. [[CrossRef](#)]
19. Liu, H.; Bie, R. Study of the Bed Agglomeration during the Fluidized Bed Combustion of Rice Straw. In Proceedings of the 2009 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, Wuhan, China, 27–31 March 2009; pp. 1–4.
20. Suramaythangkoo, T.; Gheewala, S.H. Potential alternatives of heat and power technology application using rice straw in Thailand. *Appl. Energy* **2010**, *87*, 128–133. [[CrossRef](#)]
21. Maguyon-Detras, M.C.; Migo, M.V.P.; Van Hung, N.; Gummert, M. Thermochemical Conversion of Rice Straw. In *Sustainable Rice Straw Management*; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2020; pp. 43–64.
22. Sharma, G.; Kaur, M.; Punj, S.; Singh, K. Biomass as a sustainable resource for value-added modern materials: A review. *Biofuels Bioprod. Biorefining* **2020**, *14*, 673–695. [[CrossRef](#)]
23. Moliner, C.; Bove, D.; Bosio, B.; Ribes, A.; Arato, E. Feasibility studies on the energy valorisation of agricultural residues using Aspen Plus (c). In Proceedings of the 23rd European Biomass Conference and Exhibition, Vienna, Austria, 1–4 June 2015; pp. 803–809.
24. Moliner, C.; Lagazzo, A.; Bosio, B.; Botter, R.; Arato, E. Production and characterisation of pellets from rice straw and rice husk. In Proceedings of the European Biomass Conference and Exhibition Proceedings, Lisbon, Portugal, 27–30 May 2019; pp. 1023–1028.
25. Channiwala, S.A.; Parikh, P.P. A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels. *Fuel* **2002**, *81*, 1051–1063. [[CrossRef](#)]
26. Schneider, D.; Wassersleben, S.; Weiß, M.; Denecke, R.; Stark, A.; Enke, D. A Generalized Procedure for the Production of High-Grade, Porous Biogenic Silica. *Waste Biomass Valorization* **2020**, *11*, 1–15. [[CrossRef](#)]
27. Beidaghy Dizaji, H.; Zeng, T.; Hartmann, I.; Enke, D.; Schliermann, T.; Lenz, V.; Bidabadi, M. Generation of High Quality Biogenic Silica by Combustion of Rice Husk and Rice Straw Combined with Pre- and Post-Treatment Strategies – A Review. *Appl. Sci.* **2019**, *9*, 1083. [[CrossRef](#)]
28. Schliermann, T.; Hartmann, I.; Beidaghy Dizaji, H.; Zeng, T.; Schneider, D.; Wassersleben, S.; Enke, D.; Jobst, T.; Lange, A.; Roelofs, F. High Quality Biogenic Silica from Combined Energetic and Material Utilization of Agricultural Residues. In Proceedings of the Conference: 7th International Symposium on Energy from Biomass and Waste, Venice, Italy, 15 October 2018.

Publisher’s Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



© 2020 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).