

Experimentos de combustión con cascarilla de arroz en lecho fluidizado para la producción de ceniza rica en sílice

Fluidized bed rice husk combustion experiments for the production of silica-rich ash

Juan Daniel Martínez Ángel, Tatiana Gisette Pineda Vásquez, Juan Pablo López Zapata, Mariluz Betancur Vélez*

Universidad Pontificia Bolivariana, Grupo de Investigaciones Ambientales, Circular 1 N.º 70-01 bloque 11 piso 2, Medellín, Colombia

(Recibido el 20 de febrero de 2009. Aceptado el 18 de Agosto de 2009)

Resumen

A fin de contribuir con la valorización de residuos agrícolas que presentan dificultades de disposición, la utilización de energéticos renovables y la obtención de formas de energía más limpias y amigables con el medio ambiente, fue investigada la combustión de cascarilla de arroz en un reactor de lecho fluidizado burbujeante y atmosférico. La metodología consistió en evaluar la influencia de altos excesos de aire, en la obtención de gases calientes y ceniza con altos contenidos de sílice en estado amorfo. Excesos de aire en el rango de 40% al 125%, mostraron que los valores cercanos al límite inferior establecido (40%) favorecieron temperaturas superiores a 700°C en el interior del reactor, dando origen a mayores eficiencias de conversión de la cascarilla, pero disminuyendo el potencial amorfo de la sílice contenida en la ceniza. Comportamiento contrario fue evidenciado en el límite superior del exceso de aire. Las concentraciones de los gases del proceso mostraron relativa variabilidad para cada condición de operación. Para el caso del CO, fueron reportadas emisiones promedio de 200ppm (en una base seca del 11% de O₂), para los excesos de aire comprendidos entre 40% y 82,5%.

----- *Palabras clave:* cascarilla de arroz, ceniza de cascarilla de arroz, combustión, lecho fluidizado, sílice.

Abstract

Aiming to contribute with the valorization of agricultural wastes that present disposal problems and the use of renewable energy sources, was researched

* Autor de correspondencia: teléfono: + 57 +4 + 448 83 88, correo electrónico: juandma@gmail.com (J. Martínez)

the rice husk combustion in atmospheric bubbling fluidized bed reactor. The methodology was to evaluate the air excess influence in the flue gases and the ash characteristics. It was determined the gases composition (CO , CO_2 and NO_x) and characterized the ash generated (XRD, XRF). 40% excess air promotes temperatures inside the reactor around 700°C with higher conversion efficiencies, but declining the amorphous silica potential of the ash. Contrary behavior was evidenced at 128% excess air. The flue gases showed relative variability for each operating condition. In the CO case, an average concentration of 200ppm was found (on a dry basis of 11% O_2) for air excess between 40% and 82,5%.

----- *Keywords:* rice husk, rice husk ash, combustion, fluidized bed, silica.

Introducción

En Colombia, según Agrocadenas [1], son producidas aproximadamente 520 mil toneladas anuales de cascarilla de arroz (CA) y su disposición es el principal problema ambiental que enfrenta la industria arrocera. Los principales componentes de la CA son la celulosa y la hemicelulosa (50%) además de lignina (26%) y componentes orgánicos como aceites y proteínas (4%). Aproximadamente, el 20% restante incluye diferentes sustancias de carácter inorgánico como SiO_2 , Al_2O_3 , K_2O , Na_2O , MgO , CaO , Fe_2O_3 , MnO , P_2O_5 . La ceniza de cascarilla de arroz (CCA) es el residuo sólido de cualquier transformación termoquímica (pirólisis, gasificación o combustión) desarrollada a partir de la CA. Sus características físico-químicas dependen principalmente de las condiciones implementadas en el proceso particular. La CCA corresponde a 14-25% de la CA dependiendo de la variedad de arroz, clima y suelo de la región [2]. El principal componente de la CCA generada a moderadas temperaturas de combustión es la sílice amorfa en composiciones comprendidas entre 80 y 97% [3, 4]. De otro lado, los reactores de lecho fluidizado burbujeantes y atmosféricos (RLFBA) son considerados como un método viable y eficaz para el desarrollo de diferentes operaciones y tratamientos que involucran transferencia de masa y energía. Esta tecnología permite la transformación termoquímica de materiales heterogéneos de forma irregular y de

baja densidad como la CA dadas sus inherentes ventajas en cuanto a la flexibilidad del material que se desea tratar, bajas temperaturas y condiciones isoterma a lo largo del reactor. En éste sentido varios estudios en gasificación y combustión de cascarilla de arroz en éste tipo de reactores pueden ser encontrados en la literatura como los reportados por Barriga [5], Armesto y col. [6], Fang y col. [7], Cortés [8], Ramírez y col. [9], Okasha [10], Andrade [11], Rozainee y col. [12], Singh y col. [13], Vélez y col. [14]. Por otro lado, los estudios de obtención de sílice a partir de ésta biomasa se han concentrado en equipos de laboratorio en lecho fijo, donde son necesarios altos tiempos de reacción y un consumo considerable de electricidad como los reportados por Yalçin y col. [4], Liuo [15], y Della [16].

Con base a lo anterior, la combustión de CA en RLFBA a moderadas temperaturas, puede consolidarse como una alternativa atractiva para la generación de gases calientes con bajo contenido de contaminantes, con potencial en los diferentes procesos de secado industrial, como por ejemplo en las beneficiadoras de arroz. El presente trabajo muestra los resultados de la combustión de CA con altos excesos de aire en un RLFBA a escala piloto. Los resultados encontrados permiten concluir sobre la efectividad del proceso estudiado, en cuanto a la producción de gases calientes y ceniza rica en sílice de alta potencialidad para otros procesos industriales.

Experimentación

Cascarilla de arroz

La CA utilizada en los experimentos de combustión fue adquirida en la empresa Jardines de la Aguacatala, en Medellín, Colombia. La CA tuvo origen en la ciudad de Ibagué-Tolima, y no fue procesada o modificada para los experimentos de combustión. En la Tabla 1, se presenta el análisis elemental, inmediato y de poder calorífico en base seca de la CA utilizada en la investigación.

Tabla 1 Análisis elemental e inmediato en base seca de la CA

Análisis elemental	(%)	Análisis inmediato	(%)
Carbono	36,6	Volátiles	57,7
Hidrógeno	5,83	Humedad residual	9,3
Nitrógeno	3,31	Cenizas	17,6
Oxígeno	36,65	Carbono fijo	15,4
Azufre	0,01	Poder calorífico superior (MJ/kg)	14,612

Reactor de lecho fluidizado

El equipo empleado para la combustión de la CA fue un RLFBA, localizado en la empresa Premac S.A., y diseñado por investigadores de la Universidad Pontificia Bolivariana [17]. El reactor posee una cámara de reacción de 0,3m de diámetro interno, con expansión a 0,4 m en la zona de freeboard y 3m altura. Igualmente, posee un silo con capacidad para el almacenamiento aproximado de 1.400kg de CA, así como un sistema de roscas encargadas de la dosificación y la alimentación del material al reactor. Un esquema general del equipo se muestra en la Figura 1.

Combustión de cascarilla de arroz en lecho fluidizado burbujeante y atmosférico

Inicialmente fueron introducidos 40kg de arena en el reactor de lecho fluidizado a fin de obte-

ner una altura de lecho estático de 0,4m. Posteriormente, fue encendido el quemador industrial, hasta que el lecho de inertes alcanzara una temperatura promedio en torno a 400°C. Una vez lograda la temperatura de ignición de la cascarilla, es accionado el sistema de alimentación fijando condiciones estequiométricas de combustión ($\approx 3,6\text{Nm}^3/\text{kg}$) hasta que la temperatura en el interior del reactor alcanzara los 750°C. Finalmente, se ajustan las condiciones de exceso de aire (EA) deseadas para la experimentación por medio de la descarga de CA, la cual fue controlada a su vez por un variador de frecuencia (VFD) acoplado al motor que permite el movimiento de la rosca dosificadora. El exceso de aire es definido como la diferencia entre la relación aire/cascarilla real y la estequiométrica dividido por la relación aire/cascarilla estequiométrica. De igual forma, la velocidad de fluidización (U_f) fue controlada gracias a las lecturas del indicador de flujo (medidor térmico diferencial marca Magnetrol TA2) y la manipulación de la válvula ubicada después del soplador. Las condiciones de operación fueron 40%; 82,5% y 125% de exceso de aire, fijando en todos los casos una U_f de 0,14Nm/s.

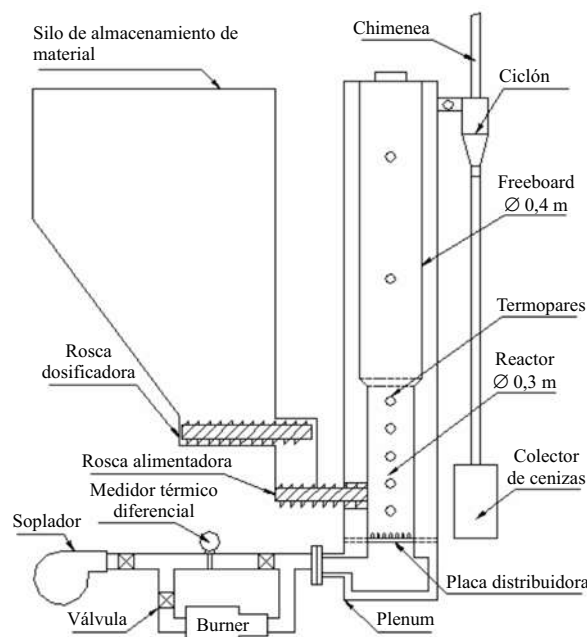


Figura 1 Esquema del reactor de lecho fluidizado atmosférico y burbujeante

Análisis de caracterización química y física

Una vez alcanzado el régimen permanente, determinado a partir de una temperatura estable en el interior del reactor, fueron efectuadas mediciones de CO, CO₂ y NO_x, por medio de un analizador portátil marca BACHARACH referencia NSX300 de sensores electroquímicos. Los datos correspondientes a la temperatura fueron obtenidos mediante termopares tipo K ubicados en el cuerpo del reactor. Los datos fueron capturados mediante un sistema de adquisición de datos marca ADAM referencia 4118, y almacenados en un PC a través del software SMILES VIEWER®.

De otro lado, la CCA obtenida, fue caracterizada para cada condición experimental, por medio de las técnicas de difracción de rayos X (DRX) y fluorescencia de rayos X (FRX). Para el análisis DRX, fue utilizado un difractómetro marca PANalytical, modelo XPERTPRO-MPD, con radiación sobre α , potencia de 45kV y corriente de 40mA a fin de conocer el carácter cristalino de la ceniza. Los análisis fueron realizados en muestras de polvo en el intervalo de medida 2θ entre 15 y 70°, y desarrollado en el Laboratorio de Caracterización de Materiales de la Universidad Nacional de Colombia (UNALMED), sede Medellín. Los análisis FRX, fueron realizados en un equipo PHILIPS, modelo PW 2400 con tubo de 3kW. Las pruebas fueron realizadas en el laboratorio de análisis instrumental de la empresa privada del grupo Corona, SUMICOL S.A.

Resultados y discusión

Combustión en lecho fluidizado

De acuerdo con experimentos previamente realizados, la velocidad de fluidización implementada en el proceso (0,14Nm/s) garantizó el desarrollo de la fluidización, para la mezcla CA y arena utilizados. De igual forma y según Fang y col. [7] y Qiaoqun y col. [18]; altos valores de U_f favorecen la disminución de los fenómenos de segregación en el lecho, obteniéndose una mejor distribución de los materiales a lo largo del reactor, así como

unas mejores condiciones de mezcla. Bajas U_f corresponden a mayores tiempos de residencia de las partículas, permitiendo mejores condiciones para la transformación del material orgánico presente en la cascarilla [8]. De otro lado, menores EA conducen a mayores valores de temperatura en el lecho, promoviendo la transformación de la sílice amorfa en cristalina [12, 19]. En la Figura 2, son presentadas las emisiones en base seca de CO, CO₂ y NO_x para las condiciones experimentales implementadas, con base a una concentración de O₂ del 11% (resolución 0058 de 2002 del MAVDT, artículo 25); así como la temperatura promedio del lecho. De igual forma en la Figura 3, se muestra la eficiencia de conversión de la CA en función de los excesos de aire implementados. La eficiencia de conversión de la CA (η), fue calculada con base a la fórmula presentada por Armeto y col. [6], como se muestra en la ecuación (1). Los términos involucrados en dicha ecuación corresponden a un balance de energía a fin de determinar la conversión del carbono presente en la CA. E_{CA} es la energía correspondiente a la cascarilla, E_{CCA} la energía de pérdida por el carbono residual presente en la CCA y E_{CO} la energía de pérdida correspondiente al CO en la corriente gaseosa que abandona el reactor. El cálculo de E_{CCA} , consideró el porcentaje de cenizas reportado en el análisis inmediato con base al flujo másico de CA alimentado al proceso, así como los valores de pérdidas por ignición que son reportados en la Tabla 2.

$$\eta = \left(\frac{E_{CA} - E_{CCA} - E_{CO}}{E_{CA}} \right) 100\% \quad (1)$$

Los resultados presentados en la figura 2, muestran que excesos de aire en el rango comprendido entre 40% y 82,5% presentan concentraciones tolerables de CO en torno a 200 ppm (en una base seca del 11% de O₂). No obstante, incrementos del aire hasta el límite superior (125%) presentaron un aumento considerable en la concentración de éste compuesto. Este comportamiento es el esperado y es atribuido a la disminución de la temperatura del lecho (Figura 2d), que desfavorece la

transformación completa del carbono presente en la CA en CO₂. Esta tendencia también fue observada por Okasha [10] en experimentos de combustión de pellets de paja de arroz en RLFBA. De igual forma, la disminución en la concentración de NO_x (de 317ppm a 6,27ppm en una base seca del 11% de O₂), está acorde con el compor-

tamiento esperado. Incrementos en la cantidad de oxígeno alimentada al proceso, desfavorecen la formación de NO_x por mecanismo térmico, dadas las bajas temperaturas alcanzadas (Figura 2d), en comparación a los valores de temperatura de formación del compuesto, el cual comienza a ser considerable en torno a 1100 °C.

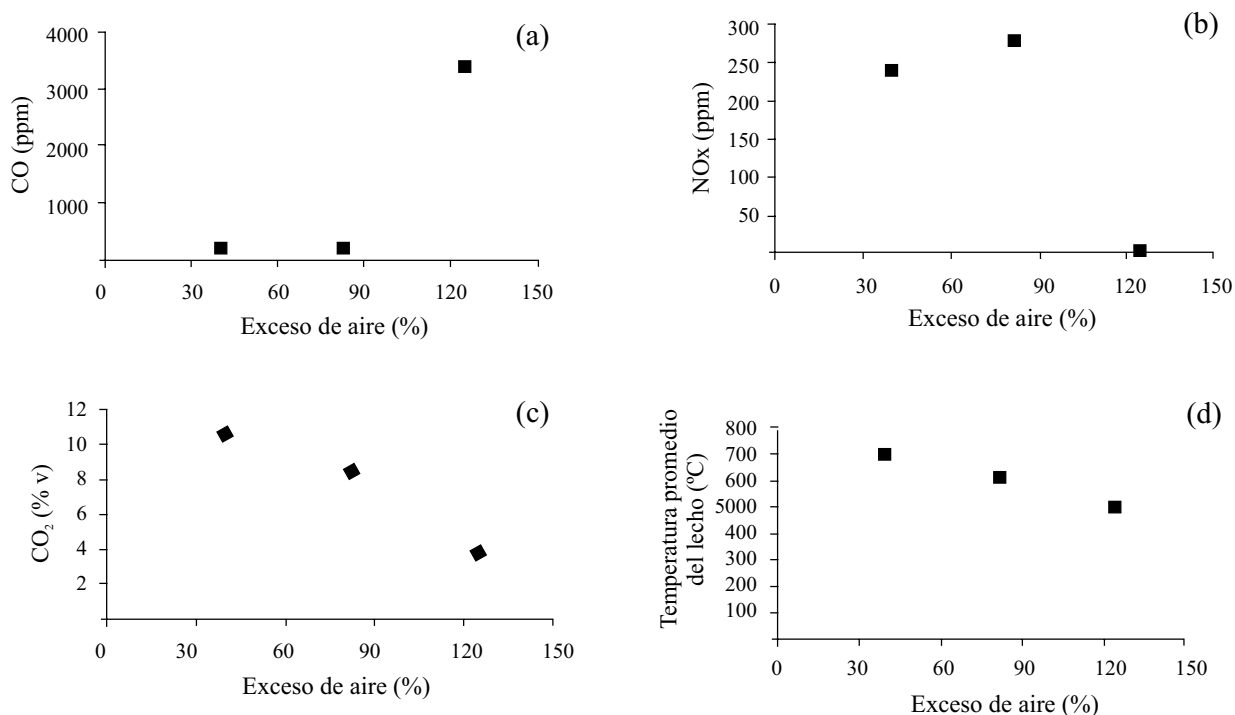


Figura 2 a) Emisiones de CO (ppm) al 11% de O₂, b) Emisiones de NO_x (ppm) al 11% de O₂, c) Emisiones de CO₂ (%v) al 11% de O₂, d) Temperatura promedio del lecho (°C) en función del exceso de aire

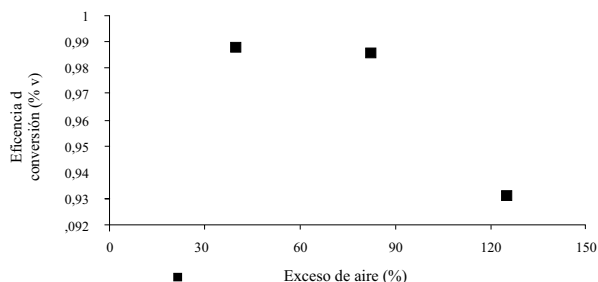


Figura 3 Eficiencia de transformación termoquímica de la CA en RLFBA con U_f de 0,14Nm/s, en función del exceso de aire

Para el caso de la eficiencia de transformación, valores en torno a 98% pueden alcanzarse a excesos de aire hasta de un 82,5%. Mayores cantida-

des de oxígeno en el proceso, originan menores valores de temperatura de reacción ocasionando un menor aprovechamiento de la energía contenida en la biomasa. La tendencia mostrada en la Figura 3, está acorde con los comportamientos encontrados para la temperatura del lecho y las emisiones de CO. La eficiencia de transformación termoquímica no debe confundirse con la eficiencia global del proceso, la cual usualmente considera la energía de pérdida por paredes.

Difracción de rayos X

Mediante el análisis de DRX se encontró que los sólidos obtenidos en el proceso de combustión,

para los diferentes excesos de aire implementados, presentan un predominio amorfo, es decir con estructura formada por átomos con orientación a corta distancia, altamente reactivo y de fácil procesamiento. En las Figuras 4a, 4b y 4c, se presentan los difractogramas respectivos a las condiciones de EA trabajados. Para el caso del difractograma de la CCA obtenida a partir de la condición de combustión de 40% de exceso de aire (Figura 4a), son evidenciados tres picos importantes destacándose el situado en a 22° que indica la presencia de la fase amorfa de la sílice en la CCA. Los dos picos restantes, de mediana intensidad, localizados en las posiciones $26,63^\circ$ y $50,1^\circ$ son asociados a pequeñas cantidades de sílice cristalina, dada la temperatura alcanzada en el lecho (700°C , Figura 2d). De acuerdo con Della [16] la temperatura y el tiempo de oxidación de la CA son factores importantes que rigen las propiedades de la sílice contenida en la CCA, determinando el contenido de SiO_2 , su carácter amorfo o cristalino y por consiguiente su reactividad.

Para excesos de aire alrededor de 82,5%, cuando la temperatura promedio en el interior del reactor se sitúa alrededor de 606°C (Figura 2d), se aprecia una disminución en la intensidad de los picos en las posiciones $26,63^\circ$ y $50,1^\circ$, tal y como se observa en la Figura 4b. Diferentes investigadores como Armesto y col. [6], Rozainee y col. [12] y Della [16] evidenciaron transformación de la sílice amorfa en cristalina, específicamente en la forma de cristobalita, a partir de elevadas temperaturas y prolongados periodos de tiempo. De acuerdo con los autores, la cristalización de la sílice de la CA, se caracteriza primero por la formación de cristales de cristobalita y luego de tridimita, influenciados principalmente por la temperatura. Para excesos de aire en torno a 125%, cuando la temperatura promedio en el interior del reactor está en torno a 500°C (Figura 2d), sólo se aprecia la presencia de la fase amorfa con un pico de base amplia correspondiente a 22° , sin ningún pico considerable que muestre presencia de cristales en la CCA (Figura 4c).

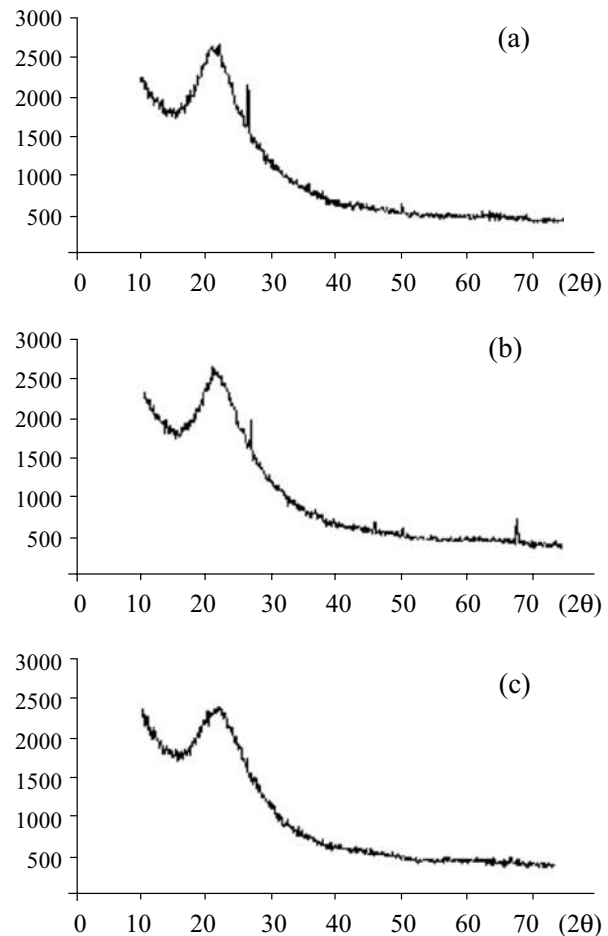


Figura 4 Difractograma para la CCA obtenida. (a) para la condición de 40% de EA, (b) para la condición de 82,5 de % EA, (c) para la condición de 125% de EA

Fluorescencia de rayos X

De acuerdo con el análisis de FRX, presentado en la Tabla 2, la composición química de la CCA obtenida en los experimentos de combustión para las condiciones de trabajo implementadas, mostraron como principal componente al SiO_2 con valores entorno a 92% en masa (para los excesos de aire de 40 y 82,5%), seguido por K_2O (<2,3%), P_2O_5 (<0,8%) y CaO (<0,5%). En general, y de acuerdo con los resultados de eficiencia, los resultados obtenidos mostraron que incrementos en el EA desfavorecen la transformación del carbono presente en la cascarilla, dando origen a una mayor concentración de in-

quemados en las cenizas. Con relación a los inorgánicos (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , Cl , SO_3 , MnO , P_2O_5), principalmente para la sílice (SiO_2), menores excesos de aire (y por consiguiente mayores temperaturas de reacción) favorecen mayores cantidades del compuesto en la ceniza, precisamente por la disminución en la cantidad de carbono en la misma.

Tabla 2 Composición química de la CCA

Componente	40% de EA	82,5% de EA	125% de EA
SiO_2	93,3	92,1	83,6
Al_2O_3	0,15	0,26	0,16
Fe_2O_3	0,14	0,2	0,088
CaO	0,38	0,42	0,45
MgO	0,31	0,33	0,32
Na_2O	0,01	0,01	0,01
K_2O	2,2	2,25	2,08
Cl	0,23	0,27	0,17
SO_3	0,24	0,26	0,06
MnO	0,18	0,17	0,21
P_2O_5	0,64	0,7	0,76
PPI ⁽¹⁾	2,6	3	12,6

(1) de 110 a 1000°C

Experimentos de obtención de sílice a partir de CA en horno eléctrico a condiciones de 700°C y 4 horas de calcinación, con altas y bajas velocidades de calentamiento desarrollados por Krishnarao y col. [2]; reportaron cantidades de carbono, sílice (SiO_2) y potasio (K_2O), en torno a los 4,2; 90,0 y 2,0% respectivamente. Los investigadores resaltan el efecto del potasio en la fijación del carbono en la ceniza, debido a la disociación y fundición del mismo a temperaturas relativamente bajas, 620 y 336,8K respectivamente. En este sentido, y considerando la auto-suficiencia energética de la combustión de CA en RLFBA, la continuidad del proceso con relación a la producción de ceniza con contenidos sílice predominantemente amorfa con cantidades de carbono

(pérdidas por ignición) pequeñas (en torno a 3,0% para excesos de aire en torno a 82,5%) se evidencia la efectividad de la conversión termoquímica de CA en reactores de lecho fluidizado.

Conclusiones

Mayores excesos de aire permiten menores temperaturas de reacción, menores eficiencias de transformación termoquímica de la CA, y menores cantidades de sílice en la CCA. No obstante, el carácter amorfo del sólido obtenido (CCA) se ve favorecido de acuerdo a las menores cantidades de sílice cristalina gracias al efecto de las bajas temperaturas del lecho. Los resultados encontrados a partir de las experimentaciones desarrolladas, demuestran la viabilidad técnica de valorizar un residuo agroindustrial como la CA en la obtención de energía en forma de calor, útil en diferentes procesos industriales de secado.

De igual forma, el proceso implementado mostró potencial en la obtención sostenible de ceniza con altos contenidos de sílice amorfa (>93%) y bajos contenidos de carbono (perdidas por ignición) inferiores al 3,5%. En este sentido, fue evidenciado el potencial de este tipo de reactores en la obtención de ceniza de cascarilla de arroz rica en sílice amorfa con relación a la continuidad y auto-suficiencia energética del proceso, en comparación a los métodos usualmente investigados en lecho fijo, que consideran fuentes externas de energía y altos tiempos de reacción. La CCA generada en el proceso de combustión en RLFBA, puede servir como base inicial en la obtención de materia prima con potencialidad en industria cerámica (para la elaboración de pigmentos o abrasivos), en el área de la construcción (como material puzolánico) o para la elaboración de piezas electrónicas.

Agradecimientos

Los autores expresan sus agradecimientos a las empresas PREMAC S.A., y TINPES S.A., así como a COLCIENCIAS por el apoyo financiero recibido en el proyecto: Desarrollo de pellets abrasivos a partir de ceniza producto de la transformación termoquímica de cascarilla de arroz en lecho fluidizado, código 1210-327-18494.

Referencias

1. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Observatorio Agrociencias Colombia. La Cadena del Arroz en Colombia una Mirada Global de su Estructura y Dinámica 1991-2005. *Documento de Trabajo No. 52*. pp. 35
2. R.V. Krishnarao, J. Subrahmanyam, T. Jagadish Kumar. "Studies on the Formation of Black Particles in Rice Husk Silica Ash." *Journal of the European Ceramic Society*. Vol. 21. 2001. pp. 99-104.
3. S. Chandrasekhar, P. N. Pramada, L. Praveen. "Effect of Organic Acid Treatment on the Properties of Rice Husk Silica." *Journal of Materials Science*. Vol. 40. 2005. pp. 6535-6544.
4. N. Yalçın, V. Sevinç. "Studies on Silica Obtained from Rice Husk." *Ceramics International*. Vol. 27. 2001. pp. 219-224.
5. M. A. Barriga. "Experimentos de Gaseificação de Casca de Arroz em Leito Fluidizado." Disertación de Maestría. Universidad Estadual de Campinas. Brasil. 2002. pp. 68
6. L. Armesto, A. Bahillo, K. Veijonen, A. Cabanillas, J. Otero. "Combustion Behaviour of Rice Husk in a Bubbling Fluidized Bed." *Biomass and Bioenergy*. Vol. 23. 2002. pp. 171-179.
7. M. Fang, L. Yang, G. Chen, Shi Z, Z. Luo, K. Cen. "Experimental Study on Rice Husk Combustion in a Circulating Fluidized Bed." *Fuel Processing Technology*. Vol. 85. 2004, pp. 1273-1282.
8. M. Cortês. *Investigação Experimental de Gaseificação de Biomassa em Leito Fluidizado*. Tesis de Doctorado. Universidade Estadual de Campinas. Brasil. 2004. pp. 115
9. J. J. Ramírez, J. D. Martínez. "Experimentos de Gasificación con Cascarilla de Arroz Colombiana en Lecho Fluidizado." *Colección Monografías y Tesis*. Ed. Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín. Vol. 4. 2007. pp. 186
10. F. Okasha. "Staged Combustion of Rice Straw in a Fluidized Bed." *Experimental Thermal and Fluid Science*. Vol. 32. 2007. pp. 52-59.
11. R. Andrade. *Gaseificação de Biomassa: Uma Análise Teórica e Experimental*. Tesis de Doctorado. Universidade Federal de Itajubá. Brasil. 2007. pp. 205
12. M. Rozainee, S. P. Ngo, A. A. Salema, K. G. Tan, M. Ariffin, Z. N. Zainura. "Effect of Fluidising Velocity on the Combustion of Rice Husk in a Bench-Scale Fluidised Bed Combustor for the Production of Amorphous Rice Husk Ash." *Bioresource Technology*. Vol. 99. 2008. pp. 703-713.
13. R. I. Singh, S. K. Mohapatra, D. Gangacharyulu, "Studies in an Atmospheric Bubbling Fluidized-Bed Combustor of 10 MW Power Plant Based on Rice Husk." *Energy Conversion and Management*. Vol. 49. 2008. pp. 3086-3103.
14. J. F. Vélez, F. Chejne, C. F. Valdés, E. J. Emery, C. A. Londoño. "Co-Gasification of Colombian Coal and Biomass in Fluidized Bed: An Experimental Study." *Fuel*. Vol. 88. 2009. pp. 424-430.
15. T. H. Liou, "Preparation and Characterization of Nano-Structured Silica from Rice Husk," *Materials Science and Engineering*. Vol. 364. 2004. pp. 313-323.
16. V. Della. *Síntese e Caracterização do Pigmento Cerâmico de Hematita, Obtida a partir de Carepa de Aço, Encapsulada em Silica Amorfa Obtida a partir de Casca de Arroz*. Tesis de Doctorado. Universidad Federal de Santa Catarina. Brasil. 2005. pp. 145
17. J. J. Ramirez, J. D. Martinez, S. L. Petro. "Basic Design of a Fluidized Bed Gasifier for Rice Husk on a Pilot Scale." *Latin American Applied Research*. Vol. 37. 2007. pp. 299-306.
18. S. Qiaoqun, L. Huilin, L. Wentie, H. Yurong, Y. Lidan, D. Gidaspow. "Simulation and Experiment of Segregating/Mixing of Rice Husk-Sand Mixture in a Bubbling Fluidized Bed." *Fuel*. Vol. 84. 2005. pp. 1739-1748.
19. V. Della, D. Hotza. "Estudo Comparativo entre Sílica Obtida por Lixívia Ácida da Casca de Arroz e Sílica Obtida por Tratamento Térmico da Cinza de Casca de Arroz." *Química Nova*. Vol. 29. 2006. pp. 1175-1179.