



Energética

ISSN: 0120-9833

energetica\_nal@unal.edu.co

Universidad Nacional de Colombia

Colombia

Betancur, Yuli; Mondragón, Fanor; Ruiz, Wilson; López, Diana  
Comparación de los perfiles y parámetros de combustión y oxi-combustión para la  
cascarilla de arroz  
Energética, núm. 47, junio, 2016, pp. 16-22  
Universidad Nacional de Colombia  
Medellín, Colombia

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=147050091003>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto



# Comparación de los perfiles y parámetros de combustión y oxi-combustión para la cascarilla de arroz

## Comparison of profiles and combustion and oxy-combustion parameters for rice husk

Yuli Betancur<sup>a</sup>, Fanor Mondragón<sup>a</sup>, Wilson Ruiz<sup>a</sup> y Diana López<sup>a\*</sup>

Recibido: Marzo 09 de 2016  
Recibido con revisión: Junio 16 de 2016  
Aceptado: Junio 30 de 2016

<sup>a\*</sup> Instituto de Química, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Antioquia, AA 1226, Calle 70 No. 52-21 Medellín, Colombia. Tel: (+54) 219 6614  
Grupo Química de Recursos Energéticos y Medio Ambiente (QUIREMA)  
diana.lopez@udea.edu.co

Energética 47, Junio (2016), pp 16-22

ISSN 0120-9833 (impreso)  
ISSN 2357 - 612X (en línea)  
www.revistas.unal.edu.co/energetica  
© Derechos Patrimoniales  
Universidad Nacional de Colombia



### RESUMEN

En el presente trabajo se realizó una comparación de los perfiles y parámetros cinéticos de los procesos de combustión y oxi-combustión de la cascarilla de arroz utilizando un equipo termogravimétrico (TGA) con un régimen no isotérmico.

Los resultados muestran que en general al incrementar las velocidades de calentamiento y la concentración de O<sub>2</sub>, los perfiles para ambos procesos se hacen más angostos, con mayores pérdidas en masa instantáneas que causan tiempos de consumo más cortos. Adicionalmente, las energías de activación para las mezclas O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> son menores con respecto a las de O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> indicando que las posibles reacciones de gasificación entre CO<sub>2</sub> y la superficie del carbonizado de la cascarilla de arroz bajo condiciones de oxi-combustión no se estarían presentando o son despreciables.

### PALABRAS CLAVE

Combustión, oxi-combustión, parámetros cinéticos.

### ABSTRACT

Profiles and kinetic parameters of combustion and oxy-combustion processes of rice husk were compared using a thermogravimetric analyzer (TGA) and the obtained data was processed by a non- isothermal method. Increasing heating rates and O<sub>2</sub> concentrations make combustion and oxy-combustion profiles narrower as a consequence it conduces to instantaneous mass lost and shorter consumption time. Additionally, activation energies for O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> mixtures are lower compared to those of O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>, indicating that the possible gasification reactions between CO<sub>2</sub> and the surface of carbonized rice husk under oxy-combustion conditions would not been taking place or are negligible.

### KEYWORDS

Combustion, oxy-combustion, kinetics parameters.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad alrededor del 85% de la demanda energética es suplida por el uso de combustibles fósiles (IEA, 2013, Li et al., 2010, Mohr et al., 2015), tradicionalmente dicha energía ha sido obtenida mediante los procesos de combustión y gasificación, donde los principales productos de reacción son  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  (Toftegaard et al., 2010) y gas de síntesis ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ) (Couto et al., 2013, Sircar et al., 2014) respectivamente. Sin embargo, debido a la tendencia hacia el incremento en la demanda de energía para la realización de las actividades cotidianas, el impacto ambiental que se presenta con el uso de combustibles fósiles y la disminución en las reservas de éstos; se hace necesaria la implementación de nuevas alternativas energéticas, entre las que se plantea la utilización de fuentes de energía renovables, donde la biomasa juega un papel muy importante (Emami-Taba et al., 2013, Xu et al., 2011, Collard and Blin, 2014, López-González et al., 2014) y el uso de sistemas de captura de  $\text{CO}_2$ . Existen básicamente tres tecnologías que permiten la captura de  $\text{CO}_2$ , conocidas como post-combustión, pre-combustión y oxi-combustión (Kanniche et al., 2010).

En la captura post-combustión, el  $\text{CO}_2$  es separado de los demás gases de exhosto por medio de adsorbentes químicamente activos (Wall, 2007), generalmente aminas, que reaccionan selectivamente con el  $\text{CO}_2$  a bajas concentraciones (Figueroa et al., 2008). Las aminas son regeneradas por medio de calentamiento y el  $\text{CO}_2$ , altamente puro, es liberado para ser comprimido y almacenado (Rochelle, 2009). La principal desventaja de este proceso la constituye el alto consumo energético requerido para la reactivación del adsorbente empleado (Kanniche et al., 2010, Thiruvengkatachari et al., 2009).

La captura pre-combustión consiste en agregar vapor de agua u oxígeno al combustible transformándolo en gas de síntesis ( $\text{CO}$  e  $\text{H}_2$ ); el  $\text{CO}$  es oxidado a  $\text{CO}_2$  y posteriormente separado, mientras el  $\text{H}_2$  es utilizado como combustible. Al igual que en el proceso anterior, una de las desventajas más representativas es el alto consumo energético, seguida de la necesidad de modificar las plantas existentes para permitir el uso de  $\text{H}_2$  como combustible (Kanniche et al., 2010, Nord and Bolland, 2011, Thiruvengkatachari et al., 2009).

Finalmente, el proceso oxi-combustión sugerido por diversos autores como uno de los sistemas más

promisorios en comparación con los mencionados anteriormente (Toftegaard et al., 2010, Gil et al., 2012, Wang et al., 2014, Chen et al., 2012, Riaza et al., 2012, Buhre et al., 2005, Shah et al., 2011, Shaddix and Molina, 2009, Shaddix and Molina, 2011) emplea concentraciones de oxígeno más altas en comparación con la combustión convencional con el fin de producir una mayor concentración de  $\text{CO}_2$  en los gases de escape, facilitando el proceso de separación y purificación de este gas antes de ser almacenado. De este modo, el gas de escape estará básicamente constituido por  $\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{CO}_2$ , los cuales pueden ser fácilmente separados por condensación sin necesidad de procesos adicionales (Kanniche et al., 2010, Tan et al., 2006, Buhre et al., 2005, Thiruvengkatachari et al., 2009).

Teniendo en cuenta que la cascarilla de arroz es uno de los residuos agrícolas-industriales más abundantes en Colombia, producto del proceso de molienda o trilla del arroz (<http://www.dane.gov.co/>, 2011), resulta de gran interés su uso en diferentes aplicaciones con el propósito de evitar posibles problemas medioambientales relacionados con su disposición final. De este modo, la presente investigación se enfocó en el análisis del comportamiento de la cascarilla de arroz cuando es sometida al proceso de combustión ( $\text{O}_2/\text{N}_2$ ) y oxi-combustión ( $\text{O}_2/\text{CO}_2$ ) con el propósito de establecer las diferencias en los perfiles de combustión y las variaciones de los parámetros cinéticos, a fin de evaluar la viabilidad de la implementación del proceso oxi-combustión, teniendo como punto de referencia los valores obtenidos para la combustión convencional.

## 2. METODOLOGÍA - EXPERIMENTAL

### 2.1 Muestra

Se empleó cascarilla de arroz con un tamaño de partícula aproximado de  $35 \mu\text{m}$ , la humedad fue eliminada en un horno a  $100^\circ\text{C}$  durante 12 horas.

### 2.2 Caracterización del material

Los análisis próximo y elemental para la muestra se indican en las Tablas 1 y 2. Estos se realizaron usando un analizador termogravimétrico 2950 – TA Instruments

y analizador elemental TruSpec CHNS – O Micro – LECO respectivamente.

Las características del material indicadas en la Tabla 1, como porcentajes de humedad, material volátil, carbono fijo y cenizas fueron obtenidas usando aproximadamente 12 mg de muestra y empleando el método que se describe a continuación:

1. Purga de la muestra por 20 min en N<sub>2</sub>, flujo (60 mL/min).
2. Calentamiento a 40 °C/min hasta 120 °C.
3. Isotherma por 12 minutos (Eliminación de humedad).
4. Calentamiento a 40 °C/min hasta 800 °C.
5. Isotherma por 10 minutos (Eliminación de materia volátil).
6. Cambio de gas: Aire (60 mL/min)
7. Isotherma por 20 minutos (Combustión, determinación de carbón fijo y cenizas).

Para el análisis elemental, la muestra fue sometida a combustión completa para convertir el material orgánico en gases como CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub>. La detección de los gases obtenidos en la combustión es realizada mediante celdas de infrarrojo para dióxido de carbono, dióxido de azufre, agua y oxígeno; y para el nitrógeno la detección se realiza mediante detectores de conductividad térmica.

Es importante resaltar de la Tabla 2 que el bajo contenido de nitrógeno y azufre presentes en el material, indican una emisión despreciable de contaminantes como SO<sub>x</sub> y NO<sub>x</sub> cuando el material carbonoso es empleado en procesos de combustión.

Adicionalmente, de acuerdo a los resultados de fluorescencia de rayos x, realizados en un espectrómetro de rayos x Thermo – OPTIM X, que se indican en la Tabla 3, se observó un alto contenido de silicio presente en las cenizas de la cascarilla, lo cual es consistente con la intensidad de la señal asignada a la sílice, obtenida en el espectro IR de la Figura 1; lo cual hace interesante el uso no sólo de la cascarilla, sino también de sus cenizas puesto que esta sílice puede ser empleada para mejorar las propiedades mecánicas de materiales de construcción como el concreto, en aislantes térmicos, filtros de agua, entre otros (Alavéz-Ramírez et al., 2012, Roschat et al., 2016).

Análisis próximo			
Humedad %	Materia Volátil %	Carbono fijo %	Cenizas %
8.1	60.7	13.2	18.7

Tabla 1. Análisis próximo para la cascarilla de arroz  
Fuente: Elaboración propia

Análisis elemental				
(C) %	(H) %	(N) %	(S) %	(O) %
35.7	4.8	0.6	0.1	30.2

Tabla 2. Análisis elemental para la cascarilla de arroz  
Fuente: Elaboración propia

Óxido	%p/p
SiO <sub>2</sub>	95.6
K <sub>2</sub> O	1.61
CaO	0.72
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.49
MnO	0.39
AlO <sub>3</sub>	0.35
SO <sub>3</sub>	0.29
MgO	0.27
Otros	0.27

Tabla 3. Fluorescencia de rayos x para la cascarilla de arroz  
Fuente: Elaboración propia

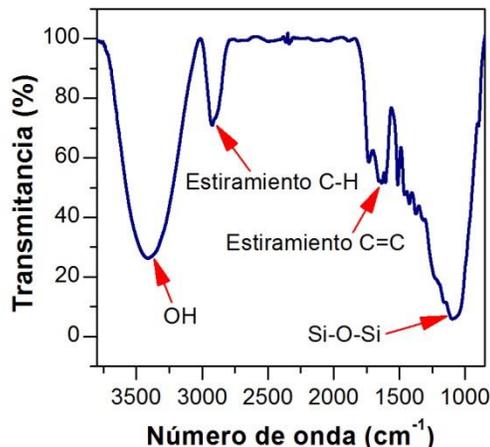


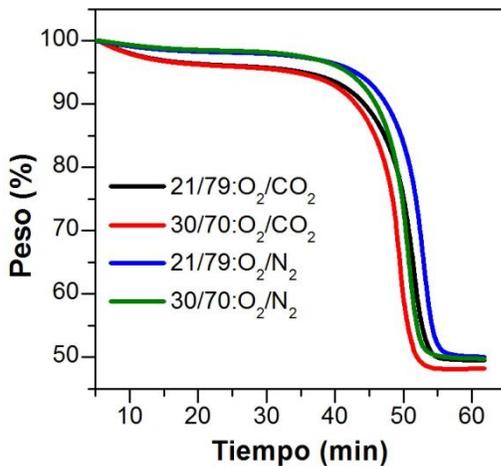
Figura 1. Espectro IR para la cascarilla de arroz  
Fuente: Elaboración propia



### 3. RESULTADOS

Los análisis termogravimétrico (TGA) y termogravimétrico derivativo (DTG) fueron usados para este estudio. El modelo no-isotérmico fue llevado a cabo en el TGA 2950 empleando velocidades de calentamiento 3 °C/min, 5 °C/min y 10 °C/min hasta 650 °C, empleando concentraciones de O<sub>2</sub> en los gases de reacción de (21 y 30) % en volumen, con N<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> como gases de balance.

En la Figura 2 se muestran los termogramas para las diferentes concentraciones de O<sub>2</sub> evaluadas al emplear las mezclas O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> a una velocidad de calentamiento de 10 °C/min. Es posible apreciar que en ambos casos, al aumentar la presión parcial de O<sub>2</sub> se presenta un incremento en la pendiente de la curva que describe la disminución en peso de la cascarilla debido a la combustión de ésta, llevando a una disminución en el tiempo requerido para el consumo total del material.



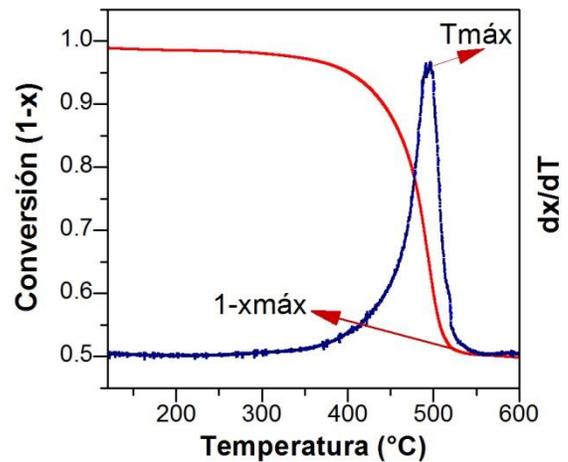
**Figura 2.** Comparación de los perfiles termogravimétricos a (21 y 30) % O<sub>2</sub> empleando N<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> como gases de balance y una velocidad de 10°C/min

Fuente: Elaboración propia

Es importante considerar que las leves diferencias observadas en los perfiles de combustión y oxi-combustión pueden ser atribuidas a las diferencias en las propiedades fisicoquímicas de los gases de balance en los procesos de combustión convencional y el proceso oxi-combustión (N<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>), respectivamente, puesto que como se ha reportado (Bejarano and Levendis, 2008, Rathnam et al., 2009, Liu et al., 2005), éstas modifican características de combustión como temperatura del gas y de partícula, los procesos de ignición y propagación de

la llama, la transferencia de calor, evolución de contaminantes, entre otras.

A partir de las curvas de las derivadas de pérdida en peso, ilustrada en la Figura 3 en color azul, las cuales fueron obtenidas para cada una de las atmósferas empleadas y velocidades de calentamiento evaluadas, fue posible obtener la temperatura de máxima descomposición de la cascarilla de arroz, que está relacionada con un máximo en la conversión. En la Tabla 4 se indican los valores obtenidos.



**Figura 3.** Metodología para obtener la temperatura máxima en los procesos de combustión convencional y oxi-combustión

Fuente: Elaboración propia

Gases	Temperaturas máximas (°C)		
	3°C/min	5°C/min	10°C/min
21O <sub>2</sub> /79N <sub>2</sub>	460.18	475.12	498.18
21O <sub>2</sub> /79CO <sub>2</sub>	451.16	470.22	493.07
30O <sub>2</sub> /70N <sub>2</sub>	441.51	466.11	486.12
30O <sub>2</sub> /70CO <sub>2</sub>	434.49	460.74	467.60

**Tabla 4.** Valores de las temperaturas máximas variando las atmósferas de reacción

Fuente: Elaboración propia

Los datos en la Tabla 4 indican que la concentración de O<sub>2</sub> afecta de manera significativa la temperatura a la cual se está dando la mayor descomposición del material puesto que para ambas atmósferas (O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>) se presenta una tendencia hacia la disminución de dichas



temperaturas al incrementar la presión parcial de O<sub>2</sub>, estos resultados están indicando un favorecimiento de las reacciones de combustión respecto a las posibles reacciones de gasificación que se podrían estar presentando bajo condiciones de oxi-combustión por la presencia del CO<sub>2</sub>; puesto que si se estuvieran presentando dichas reacciones, para las dos concentraciones de O<sub>2</sub> evaluadas, debería presentarse un desplazamiento del máximo de conversión a mayores temperaturas respecto a la combustión convencional, debido a la endotermicidad del proceso de gasificación, que al consumir parte del calor liberado durante la combustión, produciría cambios importantes sobre las características de ignición y consumo del material.

### 3.1 Parámetros cinéticos de la cascarilla de arroz

Con el propósito de observar las variaciones en los parámetros cinéticos bajo las diferentes atmósferas evaluadas, se determinaron los valores de energía de activación y factor pre-exponencial para la cascarilla de arroz empleando un método termogravimétrico no-isotérmico y tratando los datos obtenidos bajo el modelo matemático de la velocidad máxima (Soto, 2010); donde, para cada velocidad de calentamiento, fue posible obtener los valores de temperatura y conversión máxima para los procesos de combustión u oxi-combustión, mediante la ecuación 1:

$$\ln \left[ \frac{(-\ln(1-x))}{T_{m\acute{a}x}^2} \right] \approx \ln \frac{A * R}{E_a} - \frac{E_a}{R * T_{m\acute{a}x}} \quad Ec. (1)$$

De este modo, al graficar la relación indicada en la ecuación 2 y mostrada en la Figura 4 para la combustión convencional en la proporción 21/79: O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> empleando las diferentes velocidades de calentamiento mencionadas previamente, se halló la energía de activación (E<sub>a</sub>) y factor pre-exponencial (A) a partir de la pendiente y el intercepto, respectivamente.

$$\ln \left[ \frac{(-\ln(1-x))}{T_{m\acute{a}x}^2} \right] \text{ vs } \frac{1}{T_{m\acute{a}x}} \quad Ec. (2)$$

Este mismo procedimiento se realizó para todas las concentraciones y velocidades de reacción evaluadas en ambas atmósferas O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>.

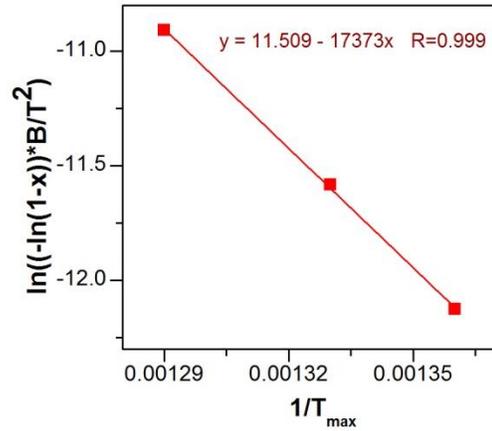


Figura 4. Gráfica de Arrhenius para la combustión de cascarilla de arroz empleando 21% O<sub>2</sub>/79% N<sub>2</sub>.

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos de los parámetros cinéticos a diferentes concentraciones de oxígeno tanto en N<sub>2</sub> como en CO<sub>2</sub> se presentan en la Tabla 5, donde puede apreciarse una disminución en los valores de energía de activación en ambos procesos al incrementar la concentración de oxígeno, evidenciándose de este modo, una mayor reactividad para el proceso oxi-combustión, comparada con el proceso de combustión convencional, puesto que se presenta una disminución de 39 y 18 kJ/mol al pasar de 21% O<sub>2</sub> a 30% O<sub>2</sub> empleando CO<sub>2</sub> como gas de balance.

Mezcla de reacción	E <sub>a</sub> KJ/mol	A (s <sup>-1</sup> )
O <sub>2</sub> (21%) en N <sub>2</sub>	144.44	9.96x10 <sup>5</sup>
O <sub>2</sub> (30%) en N <sub>2</sub>	105.48	9.75x10 <sup>1</sup>
O <sub>2</sub> (21%) en CO <sub>2</sub>	116.55	1.48x10 <sup>3</sup>
O <sub>2</sub> (30%) en CO <sub>2</sub>	98.51	1.48x10 <sup>2</sup>

Tabla 5. Valores de los parámetros cinéticos

## 4. CONCLUSIONES

- El cambio de atmósfera O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> en la combustión convencional por O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> en el proceso oxi-combustión tiene un efecto bastante significativo sobre las características de consumo y parámetros cinéticos medidos para la cascarilla de arroz. De este modo, es posible concluir que tanto el cambio de gas de balance,



como el incremento en la presión parcial del O<sub>2</sub> tienen un efecto importante en el proceso.

- El modelo de velocidad máxima, empleado para la determinación de los parámetros cinéticos de la cascarilla de arroz, arrojó valores confiables ya que están en el rango de los reportados empleando estas fuentes de energía en procesos de combustión y oxi-combustión (Jeong et al., 2014, Ramakrishna, 2011, Soto, 2010).
- El incremento en la concentración de O<sub>2</sub> durante los procesos de combustión y oxi-combustión conduce a sistemas más reactivos, siendo más reactivo el proceso oxi-combustión, puesto que comparado con el proceso de combustión convencional se presentan disminuciones de 39 y 18 kJ/mol al pasar de 21 a 30% O<sub>2</sub> respectivamente.
- Los resultados obtenidos para la cascarilla de arroz bajo las condiciones de temperatura y concentración de CO<sub>2</sub> evaluadas indican que las reacciones de gasificación por el CO<sub>2</sub> presente en el medio de combustión no se están presentando, lo cual puede ser debido tanto por la naturaleza del material, cómo por las condiciones de reacción puesto que se ha demostrado que el CO<sub>2</sub> se comporta como un gas inerte hasta temperaturas (Lunbo Duan, 2009, Yuzbasi and Selçuk, 2012).

## 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la financiación del “Programa Sostenibilidad de la Universidad de Antioquia.

Y.B. agradece al proyecto HIBRELEC “Prototipo de generación de energía eléctrica y térmica en núcleos aislados de Iberoamérica mediante hibridación” y al “Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación”- COLCIENCIAS a través del programa “Investigación e Innovación en Combustión Avanzada de Uso Industrial”, código N° 1115-543-31906 contrato N° 0852-2012 por el apoyo financiero.

## 6. REFERENCIAS

- IEA 2013. World energy outlook.
- LI, Q., ZHAO, C., CHEN, X., WU, W. & LIN, B. 2010. Properties of char particles obtained under O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> combustion environments. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 49, 449-459.
- MOHR, S. H., WANG, J., ELLEM, G., WARD, J. & GIURCO, D. 2015. Projection of world fossil fuels by country. *Fuel*, 141, 120-135.
- TOFTEGAARD, M. B., BRIX, J., JENSEN, P. A., GLARBORG, P. & JENSEN, A. D. 2010. Oxy-fuel combustion of solid fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 36, 581-625.
- COUTO, N., ROUBOA, A., SILVA, V., MONTEIRO, E. & BOUZIANE, K. 2013. Influence of the Biomass Gasification Processes on the Final Composition of Syngas. *Energy Procedia*, 36, 596-606.
- SIRCAR, I., SANE, A., WANG, W. & GORE, J. P. 2014. Experimental and modeling study of pinewood char gasification with CO<sub>2</sub>. *Fuel*, 119, 38-46.
- EMAMI-TABA, L., IRFAN, M. F., WAN DAUD, W. M. A. & CHAKRABARTI, M. H. 2013. Fuel blending effects on the co-gasification of coal and biomass – A review. *Biomass and Bioenergy*, 57, 249-263.
- XU, Q., PANG, S. & LEVI, T. 2011. Reaction kinetics and producer gas compositions of steam gasification of coal and biomass blend chars, part 1: Experimental investigation. *Chemical Engineering Science*, 66, 2141-2148.
- COLLARD, F.-X. & BLIN, J. 2014. A review on pyrolysis of biomass constituents: Mechanisms and composition of the products obtained from the conversion of cellulose, hemicelluloses and lignin. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 594-608.
- LÓPEZ-GONZÁLEZ, D., FERNANDEZ-LOPEZ, M., VALVERDE, J. L. & SANCHEZ-SILVA, L. 2014. Gasification of lignocellulosic biomass char obtained from pyrolysis: Kinetic and evolved gas analyses. *Energy*, 71, 456-467.
- KANNICHE, M., GROS-BONNIVARD, R., JAUD, P., VALLE-MARCOS, J., AMANN, J.-M. & BOUALLOU, C. 2010. Pre-combustion, post-combustion and oxy-combustion in thermal



- power plant for CO<sub>2</sub> capture. *Applied Thermal Engineering*, 30, 53-62.
- WALL, T. F. 2007. Combustion processes for carbon capture. *Proceedings of the Combustion Institute*, 31, 31-47.
- FIGUEROA, J. D., FOUT, T., PLASYNSKI, S., MCILVRIED, H. & SRIVASTAVA, R. D. 2008. Advances in CO<sub>2</sub> capture technology—The U.S. Department of Energy's Carbon Sequestration Program. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2, 9-20.
- ROCHELLE, G. T. 2009. Amine Scrubbing for CO<sub>2</sub> Capture. *Science*, 325, 1652-1654.
- NORD, L. O. & BOLLAND, O. 2011. Plant flexibility of a pre-combustion CO<sub>2</sub> capture cycle. *Energy Procedia*, 4, 2556-2563.
- THIRUVENKATACHARI, R., SU, S., AN, H. & YU, X. X. 2009. Post combustion CO<sub>2</sub> capture by carbon fibre monolithic adsorbents. *Progress in Energy and Combustion Science*, 35, 438-455.
- GIL, M. V., RIAZA, J., ÁLVAREZ, L., PEVIDA, C., PIS, J. J. & RUBIERA, F. 2012. Oxy-fuel combustion kinetics and morphology of coal chars obtained in N<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> atmospheres in an entrained flow reactor. *Applied Energy*, 91, 67-74.
- WANG, G., ZANDER, R. & COSTA, M. 2014. Oxy-fuel combustion characteristics of pulverized-coal in a drop tube furnace. *Fuel*, 115, 452-460.
- CHEN, L., YONG, S. Z. & GHONIEM, A. F. 2012. Oxy-fuel combustion of pulverized coal: Characterization, fundamentals, stabilization and CFD modeling. *Progress in Energy and Combustion Science*, 38, 156-214.
- RIAZA, J., GIL, M. V., ÁLVAREZ, L., PEVIDA, C., PIS, J. J. & RUBIERA, F. 2012. Oxy-fuel combustion of coal and biomass blends. *Energy*, 41, 429-435.
- BUHRE, B. J. P., ELLIOTT, L. K., SHENG, C. D., GUPTA, R. P. & WALL, T. F. 2005. Oxy-fuel combustion technology for coal-fired power generation. *Progress in Energy and Combustion Science*, 31, 283-307.
- SHAH, M., DEGENSTEIN, N., ZANFIR, M., KUMAR, R., BUGAYONG, J. & BURGERS, K. 2011. Near zero emissions oxy-combustion CO<sub>2</sub> purification technology. *Energy Procedia*, 4, 988-995.
- SHADDIX, C. R. & MOLINA, A. 2009. Particle imaging of ignition and devolatilization of pulverized coal during oxy-fuel combustion. *Proceedings of the Combustion Institute*, 32, 2091-2098.
- SHADDIX, C. R. & MOLINA, A. 2011. Fundamental investigation of NO<sub>x</sub> formation during oxy-fuel combustion of pulverized coal. *Proceedings of the Combustion Institute*, 33, 1723-1730.
- TAN, Y., CROISET, E., DOUGLAS, M. A. & THAMBIMUTHU, K. V. 2006. Combustion characteristics of coal in a mixture of oxygen and recycled flue gas. *Fuel*, 85, 507-512.
- [HTTP://WWW.DANE.GOV.CO/](http://www.dane.gov.co/) 2011.
- ALAVÉZ-RAMÍREZ, R., MONTES-GARCÍA, P., MARTÍNEZ-REYES, J., ALTAMIRANO-JUÁREZ, D. C. & GOCHI-PONCE, Y. 2012. The use of sugarcane bagasse ash and lime to improve the durability and mechanical properties of compacted soil blocks. *Construction and Building Materials*, 34, 296-305.
- ROSCHAT, W., SIRITANON, T., YOOSUK, B. & PROMARAK, V. 2016. Rice husk-derived sodium silicate as a highly efficient and low-cost basic heterogeneous catalyst for biodiesel production. *Energy Conversion and Management*, 119, 453-462.
- BEJARANO, P. A. & LEVENDIS, Y. A. 2008. Single-coal-particle combustion in O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> environments. *Combustion and Flame*, 153, 270-287.
- RATHNAM, R. K., ELLIOTT, L. K., WALL, T. F., LIU, Y. & MOGHTADERI, B. 2009. Differences in reactivity of pulverised coal in air (O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>) and oxy-fuel (O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>) conditions. *Fuel Processing Technology*, 90, 797-802.
- LIU, H., ZAILANI, R. & GIBBS, B. M. 2005. Comparisons of pulverized coal combustion in air and in mixtures of O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>. *Fuel*, 84, 833-840.
- SOTO, N. A., MACHADO, W. R., LÓPEZ, D. L. 2010. Determinación de los parámetros cinéticos en la pirólisis del pino ciprés. *Química Nova*, 33, 1500-1505.
- LUNBO DUAN, C. Z., WU ZHOU, CHENGRUI QU, AND XIAOPING CHEN 2009. Investigation on Coal Pyrolysis in CO<sub>2</sub> Atmosphere. *Energy and Fuels*, 3826-3830.
- YUZBASI, N. S. & SELÇUK, N. 2012. Air and oxy-fuel combustion behaviour of petcoke/lignite blends. *Fuel*, 92, 137-144.