

# OBTENCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES PRODUCTO DE LA PIROLISIS RÁPIDA DE RESIDUOS DE PALMA AFRICANA (*Elaeis guineensis* Jacq.)

## BIOFUELS PRODUCTION BY FAST PYROLYSIS OF PALM OIL WASTES (*Elaeis guineensis* Jacq.)

## OBTENÇÃO DE BICOMBUSTÍVEIS POR PIRÓLISE RÁPIDA DE RESÍDUOS DE PALMA DE DENDÊ (*Elaeisg uineensis* Jacq.)

JUAN C. ARTEAGA V.<sup>1</sup>, ERIKA ARENAS C.<sup>2</sup>, DAVID A. LÓPEZ R.<sup>3</sup>, CARLOS M. SÁNCHEZ L.<sup>4</sup>, ZULAMITA ZAPATA B.<sup>5</sup>

### RESUMEN

*El objetivo de este trabajo es la obtención de biocombustibles por medio de la pirólisis rápida de residuos de palma africana (*Elaeis guineensis* Jacq.), en un reactor de caída libre. Previamente la biomasa es sometida a un proceso de tamizado y secado, para luego ser alimentada al reactor. Producto de la pirólisis se obtiene carbonizado, gases incondensables y un líquido condensado (bio-oil), compuesto de alcoholes, ácidos carboxílicos, alcanos y compuestos aromáticos. Las pruebas se realizaron en un rango de temperaturas entre 500-700°C y se*

**Recibido para evaluación:** 27/01/2012. **Aprobado para publicación:** 05/07/2012

- 1 Estudiante Facultad de Ingeniería Química. Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín. Colombia
- 2 Doctora en Ingeniería. Profesor Facultad de Ingeniería Química. Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín. Colombia
- 3 Estudiante Facultad de Ingeniería Química. Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín. Colombia
- 4 Ingeniero Mecánico. Grupo Energía y Termodinámica Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín. Colombia
- 5 Magister en Ingeniería. Profesor Facultad de Ingeniería Química. Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín. Colombia

**Correspondencia:** erika.arenas@upb.edu.co

encontró que a 600°C el rendimiento del proceso fue máximo con un 23.3 % de biocombustible condensado. La composición de los gases a 600°C fue CO<sub>2</sub>, 2,720%, H<sub>2</sub>O, 703 %, CH<sub>4</sub>, 1,289%, CO 2,472 % y el resto es N<sub>2</sub>. La mayor cantidad de gases incondensables se obtuvo a 700°C pero el rendimiento del bio-oil es solo del 14.9% en peso. Los resultados evidencian que la temperatura del reactor es un parámetro importante en la composición de los gases y el rendimiento del bio-oil. Una fase posterior será evaluar costos y beneficios para re-configurar el reactor de manera tal que se optimice el rendimiento en la producción de bio-oil evaluando la posibilidad de usar los gases incondensables como fuente de energía para la pirólisis.

## ABSTRACT

Biofuels were obtained by fast pyrolysis of palm oilwastes (*Elaeis guineensis* Jacq.) in a free fall reactor. Previously, palm oil wastes were dried and sieved and then were fed to the reactor. As pyrolysis products, char, non-condensable gas and bio-oil, a condensed liquid composed by alcohols, carboxylic acids, alkanes and aromatics, were obtained. The experiments were carried out at temperature range 500-700°C. The highest bio-oil yield, 23.3%, was obtained at 600°C. The gas compositional analysis showed CO<sub>2</sub> 2,720%, H<sub>2</sub>O, 703 %, CH<sub>4</sub> 1,289%, CO 2,472 % and N<sub>2</sub> for the non-condensable gas produced at 600°C. The highest gas yield was obtained at 700°C but bio-oil yield was 14.9%. Results indicate that temperature has an important effect on the product yields and composition. A future step will be an economical analysis in order to evaluate the possibility of using non-condensable gas as energy source for pyrolysis reactor.

## RESUMO

O objetivo deste trabalho foi a obtenção de biocombustíveis a partir da pirólise rápida de resíduos de palma de dendê (*Elaeis guineensis* Jacq.) num reator de queda livre. Inicialmente a biomassa passou por uma série de peneiras, havendo sido posteriormente secada e finalmente fornecida ao reator. Após da pirólise, foram obtidos um carbonizado sólido, uma fração gasosa e um líquido condensado (bio-oil), o qual é composto por alcoóis, ácidos carboxílicos, e hidrocarbonetos de tipo alcanos e aromáticos. Os testes foram feitos entre 500 – 700 °C, encontrando se o maior rendimento para o bio-oil a 600 °C com 23.3 % em peso. A composição dos gases para esta temperatura foi de 2.72 % vol. para o CO<sub>2</sub>, 0.706 % vol. para o H<sub>2</sub>, 1.289 % vol. para o CH<sub>4</sub>. A composição restante foi de N<sub>2</sub>. A maior quantidade de gases foi obtida quando o processo foi feito a 700 °C embora o rendimento do bio-oil foi de 14.9 % em peso. Os resultados mostraram que a temperatura no reator é um parâmetro importante na composição dos gases e no rendimento do bio-oil. Uma fase posterior consistiria na avaliação dos custos e os benefícios para re-configurar o reator a fim de otimizar o rendimento na produção do bio-oil, assim como de avaliar a possibilidade de usar a fração gasosa como fonte energética para levar a cabo o processo de pirólise.

## PALABRAS CLAVES:

Biomasa, Pirólisis Rápida, Bio-oil

## KEY WORDS:

Biomass, Fast pyrolysis, Bio-oil.

## PALAVRAS-CHAVE:

Biomassa, Pirólise rápida, Bio-oil.

## INTRODUCCIÓN

La biomasa es un recurso potencial de energía renovable, ya que podría sustituir los combustibles fósiles tanto sólidos como líquidos y gaseosos mediante la transformación de la biomasa por medio de procesos termoquímicos, físicos y biológicos.

Colombia es un país con un gran potencial de biomasa y residuos agroindustriales que en algunos casos son desperdiciados, sin aprovechar su potencial como materia prima en procesos alternos de conversión de energía tales como los procesos termoquímicos. En el caso de la palma africana durante la extracción del aceite se generan aceite crudo, 20%; torta de palmiste, 4%; raquis, 25%; fibra, 7%; cuesco, 10%; cachaza fibrosa, entre 3 y 5%, y otros efluentes [1]. La fibra puede ser usada directamente como combustible sólido en calderas. Sin embargo tanto la fibra como el cuesco tienen potencial para producir biocombustibles gaseosos y líquidos.

La transformación de residuos agroindustriales en combustibles líquidos y gaseosos se puede realizar a través de procesos termoquímicos como la gasificación y la pirólisis [2,3]. Dentro de éstos, la pirólisis rápida ha ganado un gran interés en el mundo académico y en la industria, por su alto rendimiento en conversión de líquidos ya que estos pueden ser fácilmente almacenados y transportados. El proceso de pirólisis rápida es preferible a una pirólisis lenta en cuanto a la alta producción de líquidos. Las principales características de este proceso son: altas tasas de calentamiento y transferencia de calor, control de la temperatura de proceso alrededor de 500°C en la fase vapor con cortos tiempos de residencia del vapor, usualmente menores a 2 s, y enfriamiento rápido de los vapores para obtener el bio-oil. [4]. Aunque el principal producto de la pirólisis rápida es el líquido, también se producen gases y residuos sólidos que tienen potencial uso como fuente de energía para el mismo proceso de pirólisis, o en el caso del sólido también puede ser usado como carbón activado y en la remediación de suelos. En el proceso de pirólisis rápida, la biomasa se calienta rápidamente en ausencia de oxígeno. Como resultado, la biomasa se descompone en gases y estos son condensados para obtener un líquido denominado bio-oil. Este es una mezcla compleja de compuestos que contienen agua, azúcares, ácidos, ésteres, aldehídos, cetonas, furanos, fenoles, cresoles y glicoles [5,6].

El bio-oil tiene muchas aplicaciones en el campo de la energía y los combustibles, ya que éste puede ser usado como precursor de otros compuestos químicos y ha sido probado para aplicaciones en calderas, hornos, turbinas y motores para la generación de calor, electricidad y/o vapor [7, 8, 9].

Por otra parte, se puede usar como combustible para vehículos de transporte, mediante el tratamiento de algunas propiedades negativas como la acidez, el alto contenido de oxígeno, la viscosidad y el bajo poder calorífico. Una revisión detallada de sus aplicaciones y propiedades se documentan en [6,10]. Algunas de estas propiedades negativas pueden ser removidas mediante el procesamiento del bio-oil a través de tratamientos físicos y químicos [11, 12].

Una gran variedad de configuraciones del reactor han sido desarrolladas para la pirólisis rápida de la biomasa [13]; para este estudio se usó un reactor de caída libre con N<sub>2</sub> como gas de arrastre. Muchos estudios han informado la influencia de parámetros como la temperatura, composición de la biomasa, tamaño de las partículas y contenido de humedad sobre el rendimiento del bio-oil [14, 15]. Otros estudios han reportado la influencia de estos parámetros en las propiedades físico-químicas del bio-oil [16,17]. En este trabajo, se estudió la variación de la composición química de los gases y el rendimiento de bio-oil de la pirólisis rápida de residuos de palma africana (cuesco), en función de la temperatura con el fin de optimizar el proceso y aprovechar en un futuro la energía de los gases en el proceso. El poder calorífico del sólido (carbonizado) se calculó con base en la norma ASTM (D-240) y la caracterización de los gases, se realizó por medio de cromatografía gaseosa.

## MÉTODO

### Preparación de la biomasa

Los residuos de cuesco de palma africana fueron secados y triturados para su envío desde la región de producción (Región Caribe de Colombia) al sitio de realización de los experimentos. Este material fue tamizado y se encontró que el tamaño de partículas era inferior a 1.0 mm. Previo a la alimentación al reactor los residuos fueron secados en mufla a 110°C durante

dos horas para llevar su humedad a valores inferiores a 15%. El análisis elemental del material se presenta en el Cuadro 1.

**Cuadro 1.** Análisis elemental del cuesco

C	H	N	S	O
38,95	5,07	2,17	0,32	53,49

## Producción de Bio-oil usando un reactor de caída libre

Se utilizó un reactor de caída libre para la producción de bio-oil. La temperatura de operación es una de las variables que más afecta los rendimientos de productos de pirólisis [4], por lo cual se seleccionó esta variable como factor a variar en la experimentación. Con base en la revisión bibliográfica, se establecieron valores de operación de 500, 600 y 700°C para evaluar el rendimiento de bio-oil. La pirólisis es un proceso endotérmico por lo cual se debe suministrar energía al reactor. En el equipo usado se realizó el calentamiento mediante resistencias eléctricas. Un diagrama esquemático de la configuración del reactor se presenta en la Figura 1.

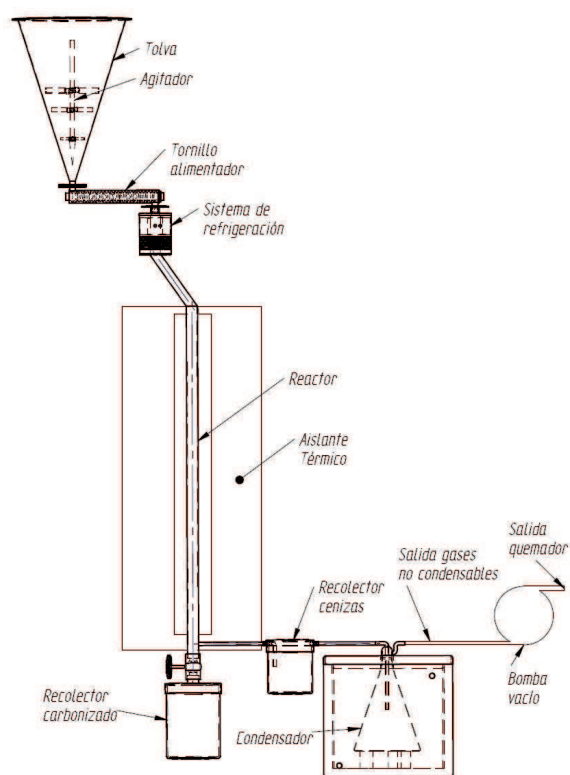
En cada experimento, se alimentan 2 g·min<sup>-1</sup> de biomasa en el reactor usando un tornillo sinfín alimentador. Previamente se dispuso de una válvula para evacuar todo el oxígeno presente en el equipo, por medio de una purga con N<sub>2</sub> para garantizar un medio no oxidante para la pirólisis rápida.

Los experimentos se realizaron por duplicado, los rendimientos de bio-oil y carbonizado, se calcularon midiendo su peso al final de cada experimento, mientras que el rendimiento de gas se determinó por diferencia en el balance de materia.

## Caracterización de gases no condensables

Diferentes autores han caracterizado los gases no condensables que están compuestos principalmente por CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> y C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> diluidos en N<sub>2</sub>. Becidan [18] para la caracterización de gases utilizó las técnicas de FTIR (Análisis infrarrojo con transformada de Fourier) y cromatografía de gases, encontrando una buena

**Figura 1.** Diagrama del equipo



concordancia de los resultados obtenidos con ambas técnicas. Sin embargo, la técnica de cromatografía de gases es la más usada en investigaciones que reportan el análisis de gases de pirólisis [19-23].

Para la recolección de las muestras de gas se usaron bolsas Tedlar y su análisis se realizó con un cromatógrafo Agilent 7890 A, detectores FID y TCD, equipado con dos columnas: HP Plot Q: Longitud 15 m (software: EZChromElite) y HP Molsieve 5A: Longitud 30 m (software: EZChromElite); para elución de N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO, CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>, el gas de arrastre es helio alta pureza (99,9999%) con un flujo de 4,7 mL·min<sup>-1</sup>. La rampa de temperatura es 60°C·min<sup>-1</sup> hasta una temperatura final de 240°C durante 2 minutos, con una tasa de incremento de 30°C·min<sup>-1</sup>, con ello se asegura una correcta separación cromatográfica; la temperatura en el puerto de inyección es de 120°C asegurando un estado gaseoso en la inyección. La curva de calibración fue hecha con mezclas de gases que incluyen H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> balance en helio.

## RESULTADOS

### Rendimiento del bio-oil

Los rendimientos de bio-oil, gases no condensables y carbonizado (*char*) o residuo sólido producto de la pirólisis en función de la temperatura se presentan en la Figura 2.

La pirólisis del residuo de palma a 500°C dio un rendimiento de 9.6% en peso de bio-oil y 71.4% en peso de residuo sólido o carbonizado, aunque para este caso se observó que en el residuo sólido había alta presencia de materia prima sin reaccionar. A medida que la temperatura de pirólisis iba aumentando la producción de bio-oil también lo hacía, hasta que alcanzó el máximo rendimiento a 600°C, donde el rendimiento de bio-oil fue del 23.3% en peso, luego a medida que la temperatura aumentaba el rendimiento decrecía hasta un 14.9% en peso de bio-oil. La medida de los rendimientos de bio-oil tuvo una desviación estándar de 1.3. En el caso de las medidas de rendimiento de residuo sólido, la desviación estándar tuvo un valor de 1.0 y para los gases una desviación estándar de 0.56.

La tendencia del rendimiento es similar a la encontrada en estudios previos realizados por otros autores [14,24], aunque los valores de rendimiento de bio-oil son relativamente bajos ya que los autores mencionados reportan rendimientos de bio-oil hasta del orden de 65%. También se observa que al aumentar la temperatura aumenta la producción de gases no condensables, este fenómeno se debe a que las altas temperaturas llevan reacciones secundarias de craqueo de los volátiles liberados inicialmente en la pirólisis favoreciendo la presencia de hidrocarburos gaseosos de bajo peso molecular, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y CO.

### Análisis de los gases incondensables

La caracterización de los gases incondensables producto de la pirólisis del residuo de palma de aceite, se realizó a las mismas temperaturas (500, 600 y 700°C) ya antes trabajadas, para encontrar el efecto de estas en la composición de los gases incondensables, las sustancias a cuantificar son CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO y N<sub>2</sub>. Se tomaron cuatro muestras con intervalos de 30 minutos por experimento a cada temperatura, y se reporta la composición de los gases a cada temperatura como el

Figura 2. Rendimiento del bio-oil a diferentes temperaturas

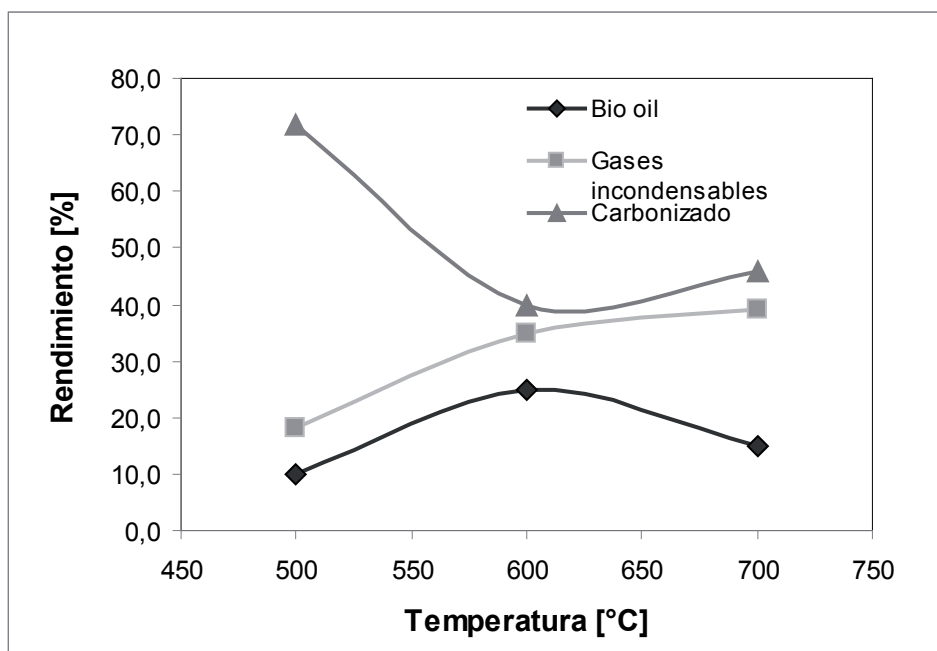
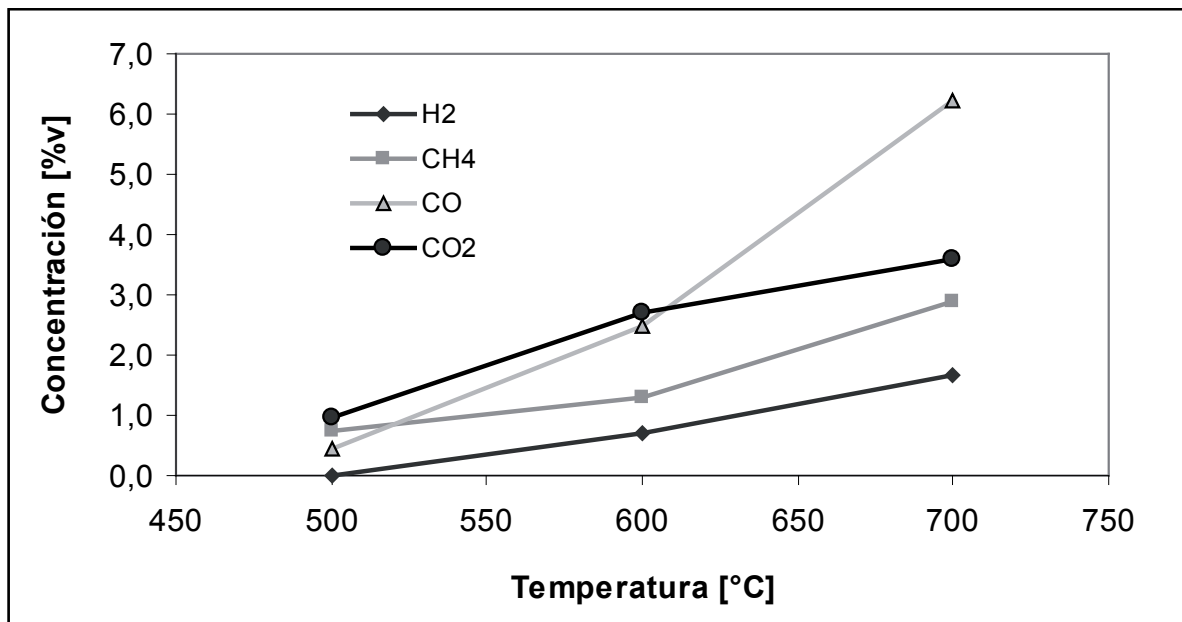


Figura 3. Composición de los gases en función de la temperatura.



promedio de los cuatro muestreos. Posteriormente se grafica la composición de los gases producto de la pirólisis en función de la temperatura como se muestra en la Figura 3.

En la Figura 3 se observa que la tendencia de la concentración de H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO y CO<sub>2</sub> es aumentar a medida que la temperatura aumenta lo cual conlleva a que el poder calorífico del gas sea mayor. Esta tendencia coincide con reportes realizados por otros autores [25, 26]. Los gases con mayor producción son CO y CO<sub>2</sub> mientras que H<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> se producen en menor proporción. La composición de los gases a 600°C, la temperatura en la cual se obtuvo el mayor rendimiento de bio-oil, fue 2.720% de CO<sub>2</sub>, 0.703 % de H<sub>2</sub>, 1.289% de CH<sub>4</sub>, 2.472 % de CO y el resto es N<sub>2</sub>. Estos valores indican que el gas podría ser usado en el proceso de pirólisis para ser aprovechado como fuente de energía.

El poder calorífico del carbonizado se calculó con base en la norma ASTM (D 240), y esta se aplicó al carbonizado obtenido a 600°C, dado que a esta temperatura se obtuvo el mayor rendimiento de bio-oil, dando como resultado un poder calorífico superior de 22529,59 kJ/kg.

## CONCLUSIONES

La pirólisis de residuos de palma africana se realizó a diferentes temperaturas, en un reactor de caída libre, el rendimiento máximo de bio-oil se obtuvo a 600°C con un valor del 23.3%. La concentración de CH<sub>4</sub> y H<sub>2</sub> se incrementó mientras que el rendimiento de bio-oil se redujo con el aumento de la temperatura por encima de 600°C. Aunque la temperatura es una de las variables que más afecta el rendimiento de productos, para optimizar la operación del proceso, se hace necesario realizar más experimentaciones, con el fin de establecer que otras variables influyen en el rendimiento, composición y propiedades físicas y químicas del bio-oil, carbonizado y gases incondensables.

Adicionalmente se debe evaluar los costos y beneficios económicos que se podrían obtener si se utilizan los gases no condensables como fuente de energía para el proceso de pirólisis. Esto se evidencia en el caso de 700°C donde el rendimiento de bio-oil es solo de 14.9% pero la composición de los gases no condensables refleja un gas con mayor poder calorífico que podría ser usado como fuente de energía y sustituir la energía eléctrica, el cual es un recurso más costoso.



## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación brindada por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia y Empresas Públicas de Medellín E.S.Pa través del convenio CIEN.

## REFERENCIAS

- [1] OCAMPO DURAN A. La palma aceitera africana, un recurso de alto potencial para la producción animal en el trópico. *World Animal Review* [online]. Disponible:<http://www.fao.org/documents/en/docrep.jsp> [citado 2 de Noviembre de 2011]
- [2] MCKENDRY PETER. Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. *Bioresource Technology.*, 83, 2002, p.47-54.
- [3] DERMIBAS AYHAN. Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. *Energy Conv. & Mgmt.*, 42, 2001, p. 1357-1378.
- [4] Bridgwater A.V., Meier D., Radlein D. An overview of fast pyrolysis of biomass. *Organic Geochemistry.*, 30 (12), 1999, p.1479-1493.
- [5] Suchithra Thangalazhy-Gopakumar, Sushil Adhikari, Harideepan Ravindran, Ram B. Gupta, Oladiran Fasina, Maobing Tu, Sandun D. F. Physiochemical properties of bio-oil produced at various temperatures from pine wood using an auger reactor. *Bioresource Technology.*, 101, 2010, p. 8389-8395.
- [6] DIEBOLD J.P. A Review of the chemical and physical mechanisms of the storage stability of fast pyrolysis bio-oils. [Subcontractor Report]. National Renewable Energy Laboratory (NREL). Colorado (United States). 2000. 51 p.
- [7] Czernik, S., Bridgwater, A.V. Overview of applications of biomass fast pyrolysis oil. *Energy & Fuels.*, 18, 2004, p. 590-598.
- [8] YAMAN SEDAR. Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemical feedstocks. *Energy Conv. & Mgmt.*, 45, 2004, p. 651-671.
- [9] Brammer J.G., Lauer M., Bridgwater A.V. Opportunities for biomass-derived "bio-oil" in European heat and power markets. *Energy policy.*, 34, 2006, p.2871-2880.
- [10] Mohan, D., Pittman Jr., C.U., Steele, P.H. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review. *Energy & Fuels.*, 20, 2006, p. 848-889.
- [11] Adjaye, J.D., Bakhshi, N.N. Production of hydrocarbons by catalytic upgrading of a fast pyrolysis bio-oil. Part I: conversion over various catalysts. *Fuel Processing Technology.*, 45, 1995, p.161-183.
- [12] Diebold, J.P., Czernik, S. Additives to lower and stabilize the viscosity of pyrolysis oils during storage. *Energy & Fuels.*, 11, 1997, p. 1081-1091.
- [13] Bridgwater, A.V., Peacocke, G.V.C. Fast pyrolysis processes for biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 4, 2000, p. 1-73.
- [14] Asadullah, M., Rahman, M.A., Ali, M.M., Rahman, M.S., Motin, M.A., Sultan, M.B., Alam, M.R. Production of bio-oil from fixed bed pyrolysis of bagasse. *Fuel.*, 86, 2007, p. 2514-2520.
- [15] Sensoz, S., Demiral, I., Gercel, H.F. Olive bagasse (*Olea europea* L.) pyrolysis. *Bioresource Technology.*, 97, 2006, p. 429-436.
- [16] Horne, P.A., Williams, P.T. Influence of temperature on the products from the flash pyrolysis of biomass. *Fuel.*, 75, 1996, p. 1051-1059.
- [17] Lee, S. H, Eom, M.-S, Yoo, K.-S., Kim, N. C., Jeon, J. K., Park, Y. K., Song, B. H., Lee, S. H. The yields and composition of bio-oil produced from *Quercus Acutissima* in a bubbling fluidized bed pyrolyzer. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis.*, 83, 2008, p. 110-114.
- [18] BECIDAN MICHAËL. Experimental studies on Municipal solid waste and Biomass pyrolysis [Ph.D Thesis Engineering]. Trondheim (Norway): Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Engineering Science and Technology, 2007, 163 p.
- [19] PREDEL M. and kaminsky w. Pyrolysis of rape seed in a fluidized bed reactor. *Bioresource technology.*, 66, 1998, p. 113-117.
- [20] zanzi vigoureux rolando. Pyrolysis of biomass [Ph.D Thesis Chemical Engineering]. Stockholm (Sweden): Royal Institute of Technology, Department of Chemical Engineering and Technology, 2001, 113 p
- [21] yang haiping, yan rong, chen hanping, ho lee dong, tee liang david, zheng chuguang. Pyrolysis of palm oil wastes for enhanced production of hydrogen rich gases. *Fuel processing technology.*, 87, 2006, p. 935-942.

- [22] zabanioutou a., ioannidou o., antonakou e., lappas a. Experimental study of pyrolysis for potential energy, hydrogen and carbon material production from lignocellulosic biomass. *International Journal of Hydrogen Energy.*, 33, 2008, p. 2433-2444.
- [23] IMAN TAHMINA, CAPAREDA SERGIO. Characterization of bio-oil, syn-gas and bio-char from switchgrass pyrolysis at various temperatures. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis.*, 93, 2012, p.170–177.
- [24] Bhattacharya, P., Steele, P.H., Hassan, E.B.M., Mitchell, B., Ingram, L., Pittman Jr., C.U. Wood/plastic copyrolysis in an auger reactor: chemical and physical analysis of the products. *Fuel.*, 88, 2009, p.1251–1260.
- [25] WANG SHURONG, FANG MENGXIANG, YU CHUNJIANG, LUO ZHONGYANG and CEN KEFA. Bio-oil production via Flash pyrolysis of biomass particles in fluidized bed for bio-oil production. *China Particuology.*, 3, No 1-2, 2005, p.136–140.
- [26] BECIDAN MICHAËL, SKREIBERG ØYVIND, HUSTAD JOHAN E. Products distribution and gas release in pyrolysis of thermally thick biomass residues samples. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis.*, 78, 2007, p.207–213.