

Desintegración térmica de partículas de madera en un reactor tubular de lecho fijo

Thermal degradation of wood particles in a tubular fixed bed reactor

Santander Bolívar Solano¹, Reynel Rodríguez De La Vega¹, Kersy Campo Jerez¹, Alberto Albis^{1*}

¹ Universidad del Atlántico, Barranquilla, Colombia.

* albertoalbis@mail.uniatlantico.edu.co

Fecha de recepción del artículo: 18/05/2010 Fecha de aceptación del artículo: 17/06/2010

Resumen

En este trabajo se estudió la desintegración térmica de aserrín proveniente de tres tipos de madera, en condiciones limitadas de oxígeno utilizando un reactor de lecho fijo a escala experimental. Se evaluaron el efecto del tipo de madera, porosidad del lecho, diámetro de partícula y la presión en la línea de succión sobre la conversión y el rendimiento a los productos gaseosos, líquidos y sólidos de la descomposición de la biomasa utilizando temperaturas autogeneradas, las cuales también fueron registradas. Todos los factores estudiados mostraron efectos significativos sobre la distribución de productos, si bien el rendimiento de la reacción hacia la fase orgánica es pequeño en comparación con otros sistemas pirolíticos. Los mejores resultados se obtuvieron con aserrín proveniente de roble con diámetros de partícula comprendidos entre 1.5 mm y 2.0 mm, porosidad de lecho de 0.808 y una presión de succión de 720 mm Hg.

Palabras claves

Biomasa, desintegración térmica, lecho fijo, reactor tubular, aserrín.

Abstract

The thermal degradation of three samples of sawdust from three wood sources, in oxygen limited conditions in an experimental scale tubular fixed bed reactor was studied. The effects of type of wood, porosity of the bed, particle diameter and pressure in the suction line, on the conversion

and yield of gaseous, liquid and solid products of the thermal decomposition of biomass using self-generated temperatures was evaluated. Every evaluated experimental factor showed significant effects on the product distribution, however, the yield to the organic phase is low when compared to other pyrolytic systems. The best results were obtained with oak sawdust with particle diameter between 1.5 mm and 2.0 mm, porosity of the bed 0.808 and a pressure of 720 mm Hg in the suction line.

Key Words

Biomass, thermal degradation, fixed bed, tubular reactor, sawdust.

Introducción

El calentamiento global y la prevista futura escasez del petróleo han motivado la investigación de nuevas fuentes de energía y de sustancias que puedan reemplazar los actuales precursores de la industria petroquímica por otros de origen renovable. Como resultado de estas investigaciones la pirólisis ha sido identificada como un proceso promisorio ya que puede aplicarse a residuos agrícolas o cultivos no alimentarios. Los mecanismos y procesos involucrados en la combustión de partículas de biomasa son una pieza importantes en el desarrollo de nuevos sistemas eficientes de combustión. En la actualidad, existen un sin número de trabajos teóricos y experimentales sobre la descomposición térmica de los materiales celulósicos [1, 2]. Estos estudios se basan principalmente en la influencia

de la distribución de la temperatura sobre variables estructurales y la conversión del material sólido hacia los productos volátiles. Muchos de los aspectos de estos estudios son en parte empíricos y requieren investigaciones adicionales para poder implementarse a escala industrial [3].

El proceso de la desintegración térmica de la biomasa para la producción de bio-aceite y carbón sólido puede ser divididos en tres etapas: secado, pirólisis y oxidación del carbón. La etapa de secado consiste en la liberación de la humedad retenida en la partícula de biomasa, en la etapa de pirólisis se dan un elevado número de reacciones diferentes, que conducen en conjunto, a la formación de gases, carbón y material volátil [4], finalmente en la etapa de oxidación del carbón formado durante la pirólisis, pone en libertad la energía necesaria para el sostenimiento del proceso [5].

Por otra parte, la actividad agrícola del país genera grandes cantidades de residuos lignocelulósicos cuya disposición implica costos adicionales y problemas ambientales asociados. Sin embargo, a través de tecnologías como la pirólisis, en el corto/mediano plazo, puede aprovecharse el potencial de esta materia prima para producir combustibles líquidos o derivados químicos. Sin embargo, debido a las características propias del agro colombiano, los residuos agrícolas generalmente no se encuentran concentrados en zonas determinadas, sino más bien, se presentan dispersas en amplias zonas de producción, razón por la cual, la posible implementación de los sistemas pirolíticos que actualmente se estudian a nivel mundial, resultaría, para el caso colombiano de difícil implementación. Esto motiva el estudio de sistemas de pirólisis más simples, de mayor facilidad de implementación, como el presentado en este trabajo.

Metodología

Materiales

Las muestras de aserrín fueron obtenidas de aserradores locales ubicados en la ciudad de Barranquilla. Se utilizaron tres tipos de muestras:

ceiba roja (*Pachira quinata*), roble (*Quercus humboldtii bonpland*) y una muestra no clasificada consistente en una selección aleatoria de diversas partes del tronco, incluyendo la corteza.

Equipos

La unidad experimental consistió en un reactor tubular, un sistema de condensación y una bomba de vacío, la cual extrae los productos volátiles de la reacción. En el interior del reactor se carga la muestra de biomasa previamente seca y durante el desarrollo de la desintegración térmica se produce el residuo carbonizado y la mezcla de gases que pasa por el sistema de condensación, tal y como se observa en la figura 1.

La unidad de reacción es fabricada en acero inoxidable, calibre 40, diámetro interno de 8 cm y un largo de 50 cm, la función del reactor es brindar el espacio y las condiciones necesarias para el desarrollo de la desintegración térmica de las partículas de aserrín. El reactor dispone de dos orificios ubicados estratégicamente por donde se introducen los medidores de temperaturas.

En la parte inferior del cuerpo del reactor se encuentra una línea de salida de los vapores de pirólisis, al que se conecta una manguera de teflón de alta temperatura de 12 mm de diámetro interno, para conducir la fase volátil al condensador en el cual se enfría rápidamente, con agua a temperatura

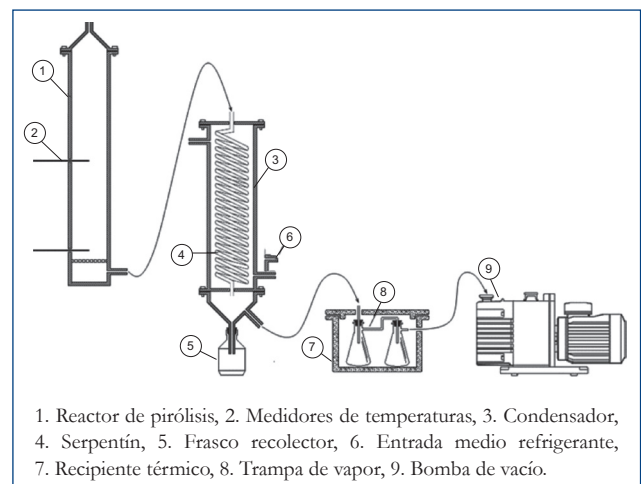


Figura 1. Unidad experimental.

ambiente, la fase volátil generada durante el proceso de desintegración térmica, recogándose en un frasco de vidrio ubicado en la parte inferior del equipo que sirve como depósito para el condensado. El flujo de aire y los productos de la reacción se originan en la diferencia de presión ocasionada por la bomba de vacío.

Métodos

Cada uno de los tipos de biomasa, con diámetro de partícula entre 0,5 y 3,0 mm fueron tamizados y separados en tres fracciones según el tamaño de partícula, así: partículas con tamaños entre 0,5 y 1,0 mm (fracción 1), entre 1,5 y 2,0 mm (fracción 2) y partículas entre 2,5 y 3,0 mm (fracción 3). Estas muestras se secaron en un horno microondas entre 5-10 min hasta alcanzar la temperatura de 106 °C.

Previamente al inicio de cada experimento, el equipo se limpió, se examinó la hermeticidad del mismo y la presencia de obstrucciones por acumulación de material sólido depositado en la línea producto del arrastre. En el caso de presentarse una obstrucción se circuló etanol hasta que la obstrucción fue removida. Posteriormente, se procedió a cargar el reactor con la biomasa correspondiente y finalmente se incineró la parte superior del lecho aplicando fuego directo a una primera sección de 0,5 cm de espesor impregnada con etanol. Una vez finalizada la reacción, las dos fases líquidas se separaron, pesaron y se registraron las masas de cada uno de los productos del residuo sólido, tiempo de reacción y temperaturas a lo largo del reactor.

El rendimiento (c_i) a cada uno de los productos se calculó como:

$$\chi_1=100* \frac{(\text{masa de residuo sólido (g)})}{(\text{masa de aserrín alimentada (g)})} \quad (1)$$

$$\chi_2=100* \frac{(\text{masa de fase acuosa (g)})}{(\text{masa de aserrín alimentada (g)})} \quad (2)$$

$$\chi_3=100* \frac{(\text{masa de fase orgánica (g)})}{(\text{masa de aserrín alimentada (g)})} \quad (3)$$

Donde los subíndices 1, 2 y 3 corresponden al residuo sólido, fase acuosa y fase orgánica, respectivamente. De forma similar, se define χ_4 como la relación de fase orgánica a fase acuosa presente en la muestra de material condensado:

$$\chi_4=100* \frac{(\text{masa de fase orgánica (g)})}{(\text{masa de fase acuosa (g)})} \quad (4)$$

Para evaluar el efecto de las variables de interés sobre el rendimiento a cada uno de los productos, se utilizó un modelo factorial secuencial o enfoque de un factor a la vez [6]. El orden de los factores a evaluar fue: tipo de madera (ceiba, roble, muestra no clasificada), masa cargada al reactor (130 g, 140 g, 150 g, 160 g), tamaño de partícula (0,5-1,0 mm, 1,5-2,0 mm, 2,5-3,0 mm) y presión de succión a la entrada de la bomba (720 mm Hg, 540 mm Hg). La variable de respuesta/ decisión fue el rendimiento a la fase líquida orgánica.

La porosidad del lecho o masa por unidad de volumen fue calculada como:

$$\chi_4=100* \frac{(\text{masa de fase orgánica (g)})}{(\text{masa de fase acuosa (g)})} \quad (4)$$

Donde el volumen hueco esta dado por la diferencia entre el volumen total del reactor y el volumen ocupado por las partículas sólidas.

Resultados y Discusión

El efecto de cada uno de los factores estudiados sobre el rendimiento y tiempo de degradación de la muestra, en la degradación térmica del aserrín de madera en un reactor de lecho fijo operado discontinuamente se discute a continuación.

Efecto del tipo de madera

La lignina es el componente más estable térmicamente de los constituyentes principales de la biomasa y bajo condiciones similares produce más material carbonizado en la pirólisis. A su vez la ceniza y los extractos presentes en la biomasa catalizan las reacciones de la pirólisis que influyen de manera decisiva en la distribución de las fracciones de sus productos [7]. De acuerdo a información presentada en la literatura por Vassilev *et al.* [8], el roble a pesar de estar clasificado como

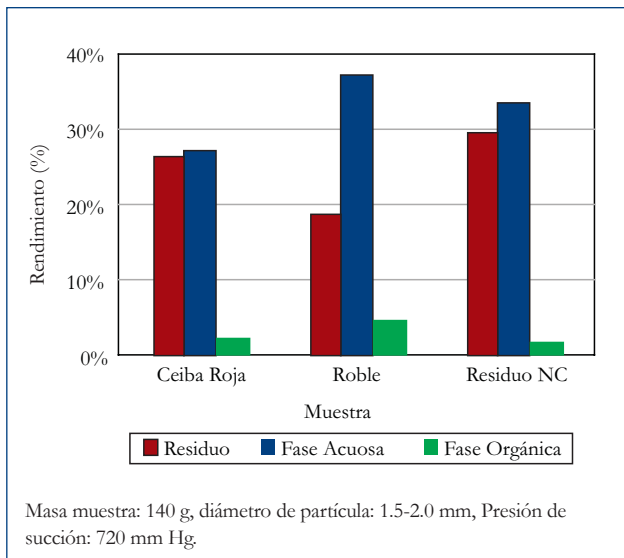


Figura 2. Efecto del tipo de madera sobre el rendimiento a cada una de los productos de la degradación térmica de aserrín.

madera dura, posee uno de los contenidos de material volátil más alto en la clasificación, hecho que es confirmado por los datos experimentales al presentar el mayor rendimiento a sustancias condensables (fase orgánica y fase acuosa) entre las tres muestras examinadas, tal como se puede observar en la figura 2. Consistentemente con esta observación, el roble, es también el tipo de madera que presenta una menor proporción de residuos sólidos parcialmente degradados. Como el objetivo de la degradación térmica es la obtención de compuestos orgánicos de bajo peso molecular, se tomó el roble como el factor escogido en esta etapa del estudio.

Efecto de la porosidad del lecho

Los efectos producidos por la porosidad en la distribución de los productos de pirólisis se evidencian a través de la relación entre la pérdida de presión y la velocidad de flujo a través de los intersticios existentes entre las partículas que constituyen el lecho.

En la figura 3, se puede observar la distribución de los productos del proceso de desintegración térmica para distintos niveles de porosidad. A partir de estos resultados es factible suponer que

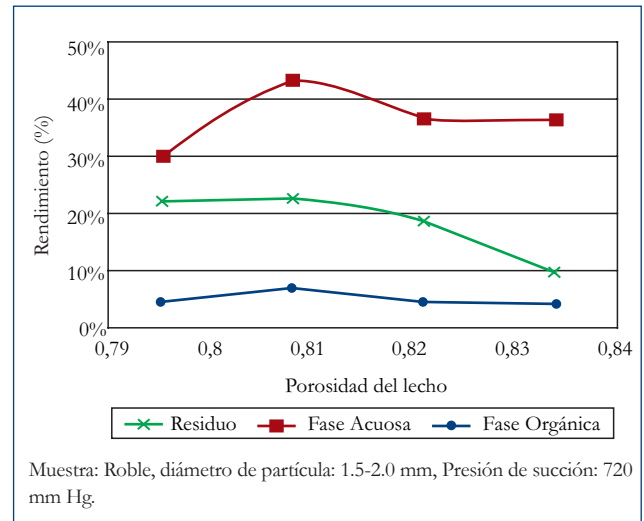


Figura 3. Efecto de la porosidad del lecho sobre el rendimiento a cada uno de los productos de degradación térmica

a medida que se aumenta la cantidad de biomasa por unidad de volumen, el tiempo de residencia de los productos volátiles se hace mayor, ocasionando reacciones paralelas no deseadas debido a una mayor resistencia al flujo. Por otra parte, entre mayor sea la porosidad o el espacio existente entre las partículas de aserrín que conforman el lecho, mayor es la cantidad de oxígeno alimentado al proceso, produciendo la oxidación del material volátil antes de entrar a la unidad de condensación.

En la figura 4 se presentan los datos de tiempo de reacción en función de la porosidad, observándose un mayor tiempo de reacción cuando la porosidad

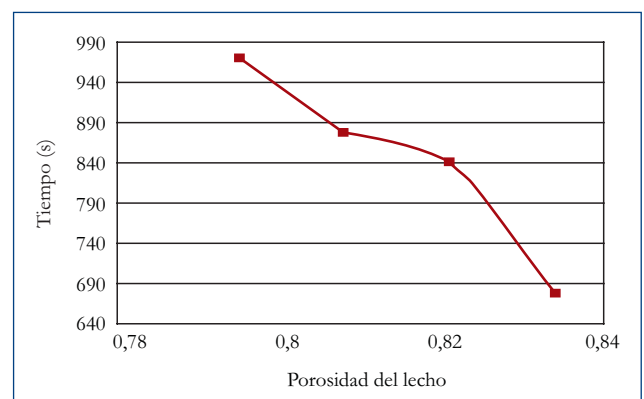


Figura 4. Tiempo de pirólisis para distintas porosidades del lecho.

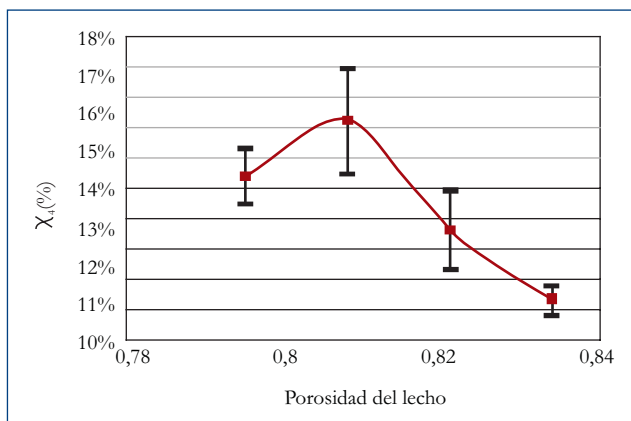


Figura 5. Rendimiento de fase orgánica a fase acuosa para la prueba de porosidad del lecho.

es menor. Los efectos de transferencia de calor y velocidad de flujo, se ponen en contraposición ocasionando un máximo en la relación entre rendimiento a la fase orgánica y la fase acuosa, como se observa en la figura 5, en la cual se identifica un punto máximo para la conversión a producto volátil cuando la masa de la muestra cargada es de 150 g ($\epsilon = 0.808$).

Efecto del diámetro de partícula

Los efectos producidos por el diámetro de partícula en la distribución de los productos de Pirólisis se evidencian a través de los fenómenos de transferencia de masa y calor involucrados en el proceso. La diferencia que se detecta entre la distribución de los productos, puede asociarse a gradientes térmicos al interior de las partículas de aserrín, que hacen que el calentamiento interno del material se retrase y reaccione aparentemente a temperaturas mayores.

En la figura 6 se muestra la distribución de los productos del proceso de desintegración térmica para distintos diámetros de partículas. A partir de los resultados experimentales, se puede observar que aumentar el tamaño de las partículas de aserrín aumenta la producción de residuo carbonoso, mientras una disminución de las dimensiones de la partícula favorece la gasificación de la biomasa que resulta en una mayor producción de material volátil, pero con una conversión menor hacia la fase orgánica. El gradiente de

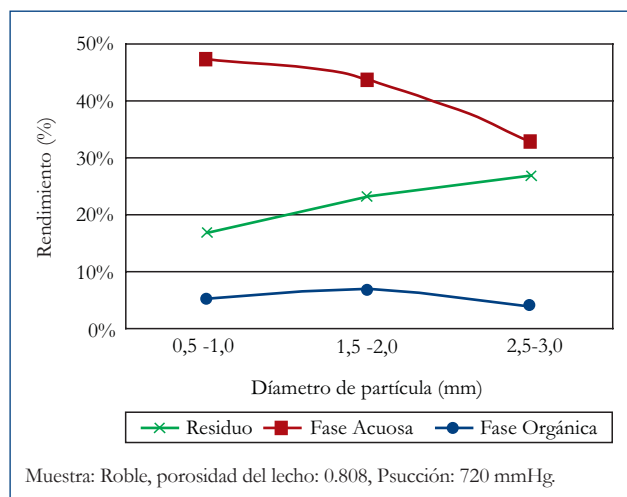


Figura 6. Efecto del diámetro de partícula sobre el rendimiento a cada uno de los productos de degradación térmica.

temperatura al interior de la muestra reactiva tiene otras consecuencias sobre los fenómenos de transporte, ya que induce el desarrollo de reacciones secundarias de los volátiles en las porosidades o grietas de las partículas [9], lo que lleva a una disminución en la evolución de los mismos, aumentando la producción de los gases de Pirólisis. Este fenómeno puede ocurrir debido a la formación de un gradiente de temperatura al interior de la partícula que influye directamente en la transferencia de masa y energía. También puede explicarse esta observación experimental por el aumento del flujo de aire, y por ende de oxígeno, debido a la menor caída de presión en el caso de partículas más grandes, lo que ocasionaría un aumento de productos oxigenados de bajo peso molecular.

Por otro lado el aumento del tamaño de partícula hace que la resistencia interna a la transferencia de calor por conducción sea mayor, aumentando los tiempos de reacción (figura 7) y favoreciendo la transferencia de calor por convección. De esta manera tenemos que aunque la reducción del tamaño de partícula disminuya los tiempos de reacción y favorezca la conversión a material volátil, el rendimiento hacia la fase orgánica es menor en comparación con el caso de partículas de mayor tamaño, sin embargo los fenómenos al

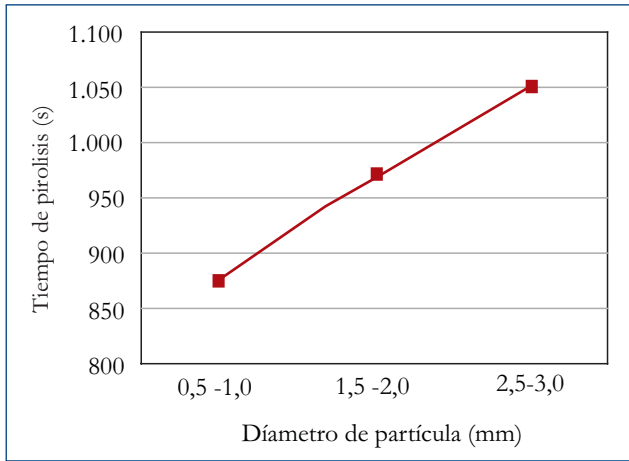


Figura 7. Tiempo de pirólisis para distintos diámetros de partículas.

interior de la muestra de biomasa con dimensiones mayores ocasiona una desviación hacia productos no deseados, tales como el residuo carbonoso, producto de la degradación parcial de la biomasa y gas de Pirólisis producto de reacciones secundarias al interior de las partículas. Esto se refleja en la existencia de un tamaño de partícula óptimo entre los estudiados, el cual se identifica en la figura 8 cuando el diámetro de partícula se encuentra en el rango de 1.5 – 2.0 mm.

Efecto de la Presión de Succión

La modificación de este parámetro se realizó a través de la manipulación de la presión de la bomba, que bajo condiciones de caída de presión

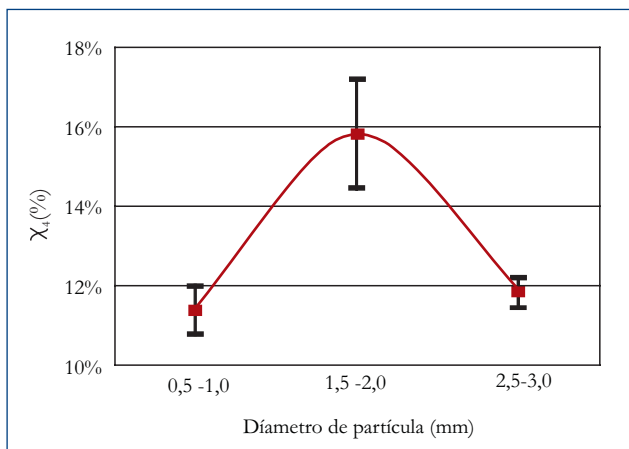
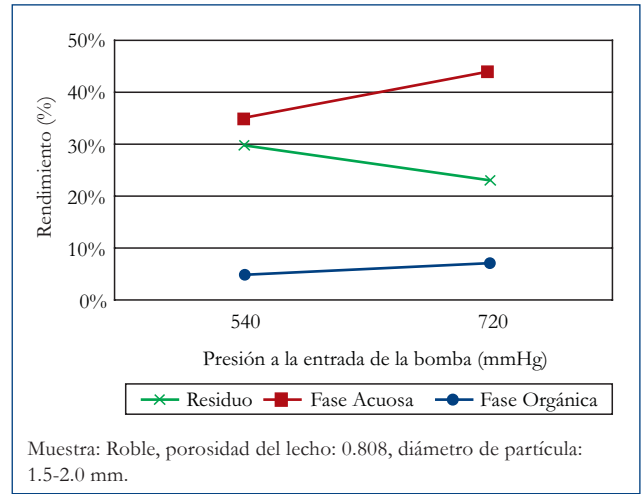


Figura 8. Relación de fase orgánica a fase acuosa en función del diámetro de partícula.



Muestra: Roble, porosidad del lecho: 0.808, diámetro de partícula: 1.5-2.0 mm.

Figura 9. Efecto de la presión de succión sobre el rendimiento.

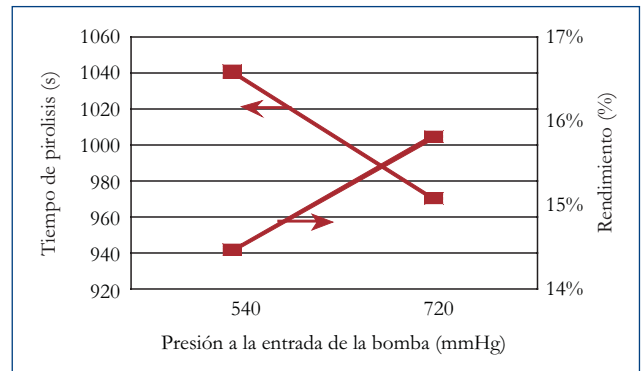


Figura 10. Tiempo de pirólisis y relación fase orgánica a fase acuosa a diferentes presiones de succión.

similares, tiene una influencia directa sobre el flujo volumétrico de la mezcla aire + productos de degradación térmica y por ende en el avance del frente de reacción en el reactor tubular.

Como se puede apreciar en la figura 9, la presión de succión representa en estas condiciones de operación un factor importante en la producción de líquidos pirolíticos: una reducción de $\frac{1}{4}$ del valor inicial en la presión de succión, provoca una disminución de casi el 10% en el rendimiento a material volátil y un aumento visible en el residuo obtenido. A pesar de que el aumento de la velocidad de calentamiento conlleva a un aumento en la cantidad de oxígeno alimentado, los efectos producidos son despreciables al obtenerse un

menor tiempo de residencia de la fase gaseosa, esto se traduce en menores tiempos de reacción como se puede evidenciar en la figura 10.

Conclusión

Se investigó la desintegración térmica de diferentes muestras de biomasa en un reactor de lecho fijo para distintos tamaños de partícula, tipos de biomasa, tiempo de residencia y presión de succión. Para la optimización de los rendimientos a productos líquidos, se han identificado como variables más significativas en la zona experimental explorada las siguientes:

- Tipo de residuo maderero utilizado.
- La porosidad del lecho.
- El diámetro de partícula.
- La velocidad de calentamiento.

Se aplicó la pirólisis a distintos residuos de la industria maderera, lográndose un rendimiento hasta del 44 % para la fase acuosa y 7 % para la fase orgánica. Siendo los rendimientos de gas y sólido del 26 % y 23 %, respectivamente. Las condiciones experimentales que favorecen la mayor conversión a líquidos pirolíticos se obtienen en los experimentos realizados a la muestra de Roble con un diámetro de partícula entre 1.5-2.0 mm, una porosidad de 0.808 y a 720 mm Hg de presión a la entrada de la bomba de vacío.

Los productos condensados de la desintegración térmica son una mezcla compuesta de una gran fracción acuosa y una reducida cantidad de producto oleaginoso a diferencia de otros sistemas experimentales. Este estudio ha encontrado diversas dificultades a nivel experimental, relacionadas con la optimización de la conversión a producto líquido a partir de la degradación térmica de partículas de aserrín.

Para la optimización del proceso es necesario la realización de más experimentos incluyendo la disminución del flujo de oxígeno al reactor y

la caracterización fisicoquímica e identificación de los productos obtenidos. Actualmente, se realiza un trabajo donde se intenta simular en forma simplificada la degradación térmica de la biomasa en este tipo de reactores, con el objetivo de tener más herramientas para la interpretación de los datos experimentales y la optimización del proceso.

Referencias

- [1] Yaman, S. (2004). Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemical feedstocks, *Energy Conversion and Management*, 45, 651-671.
- [2] Goyal, H., Seal, D., Saxena, R. (2008). Bio-fuels from thermochemical conversion of renewable resources: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, 504-517.
- [3] Shen, D.K., Fang, M.X., Luo, Z.Y., Cen, K.F. (2007). Modelling Pyrolysis of wet wood under external heat flux, *Fire Safety Journal*, 42, 210-217.
- [4] Goldstein (1981) *Organic chemical from biomass*. CRC press, Boca Raton Florida, USA.
- [5] Benkoussas, B., Consalvi, J.L., Porteira, B., N., S., Loraud, J.C. (2007). Modelling thermal degradation of woody fuel particles, *International journal of thermal science*, 46, 319-327.
- [6] Montgomery, D. (2002) *Diseño y análisis de experimentos*. Editorial Limusa Wiley, México.
- [7] Beall, F.C., Eickner, H.W. (1970). Thermal Degradation of Wood Component: A review of the literature, *U.S.D.A Forest Service Research Paper FPL*, 130.
- [8] Vassilev, S., Baxter, D., Andersen, L., Vassileva, C. (2009). An overview of the chemical composition of biomass, *Fuel*, doi:10.1016/j.fuel.2009.10.022.
- [9] Wey, L., Xu, S., Zhang, L., H., Z. (2006). Characteristics of fast pyrolysis of biomass in a free fall reactor, *Fuel Processing Technology*, 87, 863-871.