

Modelamiento matemático para la pirolisis del cuesco de palma aceitera*

Mathematical Modeling for the Pyrolysis of the Oil Palm Kernel Shell

Recibido: 17 de mayo de 2017 - Aceptado: 7 de junio de 2017

Para citar este artículo: J. Sechage, D. Gómez, A. Meléndez, M. Mayorga «Modelamiento matemático para la pirolisis del cuesco de palma aceitera», *Ingenium*, vol.18, n.º 36, pp. 44-56, junio de 2017



Jorge Serafín Sechage Cortes**
Daniel Leonardo Gómez Sandoval***
Anderson Guillermo Rodríguez Meléndez****
Manuel Alejandro Mayorga Betancourt*****

Resumen

En Colombia hay diferentes procesos en los cuales se desperdician los residuos, uno de ellos es la obtención de aceite para producir biodiesel a partir de palma aceitera, proceso en el cual se generan importantes cantidades de cuesco de palma, siendo los procesos termoquímicos una de las formas de aprovechamiento energético. El resultado del presente trabajo, es proponer un modelo matemático para el comportamiento del cuesco de palma africana en el proceso de pirolisis y en un estudio posterior para la gasificación. Este trabajo fue desarrollado haciendo una descripción del proceso en un reactor de lecho

* Grupo de Investigación en Aprovechamiento Tecnológico de Materiales y Energía, GIATME., Universidad Escuela Colombiana de Carreras Industriales, Universidad ECCI.

** Ingeniero Químico de la Fundación Universidad de América. Aspirante a estudiante a magister en ingeniería mecánica Universidad Nacional de Colombia. e-mail: jorge.sechague@hotmail.com.

*** Ingeniero Mecánico y Tecnólogo en Mecánica Automotriz de la Universidad ECCI. M.Sc. (c) en Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional de Colombia. e-mail: dlomezsa@unal.edu.co.

**** Ingeniero Mecánico y Tecnólogo en Mecánica Industrial de la Universidad ECCI. M.Sc. (c) en Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional de Colombia. Experto en Aplicación de las Energías Renovables de la Universidad UNINI y FUNIBER. Proyectista en Diseño de Tuberías y plantas industriales energéticas del sector Oil & Gas. e-mail: anrodriguezme@unal.edu.co.

***** Ingeniero Químico, Magister en Ingeniería Química y estudiante de Doctorado en Ingeniería Química de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. Investigador de la Universidad ECCI. Experto en el área térmica, energía sostenible, biocombustibles, procesos químicos, materiales y tratamiento de residuos. Líder del Grupo de investigación en Aprovechamiento Tecnológico de Materiales y Energía, GIATME. e-mail: mmayorgab@ecc.edu.co.

fijo tubular, el cual se utiliza para ambos procesos, tanto pirolisis como gasificación, con calentamiento directo, siendo muy exotérmico el proceso, identificando la fenomenología en la cual se aplican los conceptos de transferencia de energía, masa.

Para el proceso de pirolisis se plantearon los balances de transferencia de energía y masa, despreciando el balance de momento debido a que los gases de síntesis se retiran para que no se generen reacciones heterogéneas, eliminando la fase gaseosa para no tener caídas de presión, por lo cual solo se tuvo en cuenta la fase sólida, lo que permitió que se tratara como una reacción homogénea. Como resultados se generaron dos modelos que describen el comportamiento del reactor en el proceso de pirolisis como un paso inicial para contribuir a la estandarización del proceso a nivel industrial.

Palabras Claves

Pirolisis, Modelo Matemático, Reactor de Lecho Fijo, Cuesco de Palma.

Abstract

In Colombia, there are different processes in which wastes are wasted, one of them is the production of palm oil to produce biodiesel from oil palm, a process in which important amounts of palm oil are generated, the thermo-chemical processes being one of the forms of energy use. The goal of the present work is to propose a mathematical model for the behavior of the oil palm kernel shell in the pyrolysis process and in a subsequent study will be studied the gasification of the same. This work was developed by doing a description of the process in a fixed bed tubular reactor, which is used for both processes, both pyrolysis

and gasification, with direct heating, being very exothermic is the process, identifying the phenomenology in which the concepts of energy and mass transfer.

For the pyrolysis process, energy and mass transfer balances were proposed, neglecting the momentum balance because the synthesis gases are removed so that heterogeneous reactions are not generated, eliminating the gas phase to avoid pressure drops, for which only took into account the solid phase, which allowed it to be treated as a homogeneous reaction. As results two models were generated that describe the behavior of the reactor in the pyrolysis process as an initial step to contribute to the standardization of the process at the industrial level.

Keywords

Pyrolysis, Mathematical Model, Fixed-bed Reactor, Oil Palm Kernel Shell.

1. Introducción

En la industria de la palma, durante la extracción del aceite (que es la materia prima para la producción de biodiesel en el país), se genera una cantidad importante de biomasa, representando más del 50%, teniendo en cuenta solamente el fruto de palma, omitiendo

la biomasa residual compuesta por raquis, hojas, troncos y florescencias. El fruto de palma aceitero está compuesto de endocarpio, mesocarpio, y semilla (o almendra); la cáscara de la semilla aparece en la extracción del aceite, más conocida como cuesco de palma, en Colombia tuvo un volumen de generación de 271518.26 Ton en el año 2013 y se estima un pronóstico de 358404.89 Ton para el año 2020 [1]. Entonces los cuescos o semillas de palma son un residuo representativo de la industria de extracción de aceite, actualmente se estima que alrededor del 70 % es usado para combustible en calderas, el resto es empleado como abono, siendo de muy buena calidad debido a su riqueza en nutrientes orgánicos o simplemente usado como relleno de vías debido a su alta dureza y poco peso. Actualmente, hay 58 focos de producción de aceite de palma en Colombia, distribuidos en cuatro zonas: la zona norte la componen la Costa y el Cesar con 15 focos en la zona central se encuentran el Sur del Cesar, Bucaramanga y Norte de Santander con 13 focos; la zona oriental está compuesta por el Meta y Casanare con 25 focos; y el suroccidente abarca Tumaco y Caquetá con 5 focos. Aunque el cuesco está distribuido a lo largo de todo el país, la mayor parte de la producción se encuentra en la zona oriental (meta y Casanare) y debido a su baja densidad se puede transportar de una manera cómoda hacia el centro del país.

El cuesco de palma aceitera por su composición química fundamentalmente en lignina y celulosa presenta potenciales aplicaciones como aceites esenciales, saborizantes, principios activos, fenoles, bioabsorbentes, biocompuestos y combustible; de hecho esta última es una de las más atractivas ya que posee unas características importantes para ser usado en procesos térmicos debido a sus bondades en el alto contenido de carbono, bajo contenido de cenizas, y de cenizas fundentes, además de una excelente estabilidad de almacenamiento, gracias a su bajo contenido de humedad y presenta una dureza adecuada y bajo contenido de material volátil; varios estudios se han realizado con el uso de cuesco de palma debido a propiedades como lo son alta densidad, alto contenido de carbón, bajo contenido de cenizas y cantidad de material volátil, y una alta dureza, por lo que se convierte en un buen material para la obtención de productos como carbón activado [2, 3].

Los procesos de pirólisis y gasificación de este tipo de biomasa es una buena opción para suplir requerimientos energéticos y brindar además una adecuada disposición de los residuos generados en la industria del aceite de palma. Además, durante la pirólisis del cuesco, si es lenta, se generan subproductos principalmente biocarbón y carbón activado mientras que si es rápida se obtiene biocrudo. En ambos procesos se produce gas de síntesis rico en hidrógeno el cual para este caso de estudio es retirado rápidamente en medio del proceso con el fin de no generar reacciones secundarias [4, 5, 6].

Por otro lado, uno de los problemas que tienen las industrias para la optimización de sus procesos es poder conocer información, ya sea datos o propiedades sobre el comportamiento de los materiales empleados, debido a que en la simulación de procesos también se pueden hacer estimaciones de propiedades fisicoquímicas, siendo un apoyo durante el diseño del proceso. lo que hace de la simulación de procesos una herramienta muy útil por lo ya mencionado.

En el país se han realizado estudios que buscan analizar los factores que afectan los procesos termoquímicos, primordialmente en la pirólisis del cuesco de palma africana, enfocados principalmente en la determinación de los parámetros del sistema como la velocidad de reacción química [7, 3]. Sin embargo, solo se ha realizado a nivel experimental en un equipo de termogravimetría, sin profundizar en los mecanismos asociados a los fenómenos de transporte que controlan el proceso.

Como primera medida se estudió la fenomenología del proceso de pirólisis, la cual se realiza en un reactor de lecho fijo tubular, en segunda medida se plantean balances de masa y energía, los cuales enlazados a condiciones iniciales y de frontera dan forma a modelos matemáticos, estos que a su vez son realizados con suposiciones, el primero de la manera ideal y el segundo desarrollando términos que los aproximan un poco más al caso real.

2. Materiales y Métodos

2.1 Caracterización del Cuesco de Palma

Para poder realizar los balances de materia y energía en el proceso y para correlacionar las propiedades del carbón activado obtenido se debe partir de las propiedades del cuesco, como la composición aproximada y otras de carácter físico-químico del cuesco de palma de aceite, así como los subproductos (gases y sólidos); este camino es viable ya que no se hicieron ensayos experimentales sino que se partió de informes de resultados realizados por otros autores, consignando las propiedades físicas, químicas y estructurales en la **Tablas 1, 2, 3 y 4** [3].

Tabla 1. Contenido lignocelulósico de cuesco de palma de aceite [2].

Celulosa	Holocelulosa	Lignina
29.7	47.7	53.4

Tabla 2. Componentes y poder calorífico del cuesco de palma [3].

Poder Calorífico (MJ/kg b.s.)	Componentes químicos (% b.s.)				
	Celulosa	Hemicelulosa	Lignina	Extractivos	Cenizas
20.09	20.8	22.7	50.7	4.8	1.0

Tabla 3. Análisis fisicoquímico del cuesco de palma [3].

Análisis Elemental %				Análisis Próximo %			Poder Calorífico MJ/kg	
C	H	N	O	Humedad	Volátiles	Ceniza	PCS	PCI
52.8	5.7	<1	40.5	11.2	79	1.4	22.2	21.1

El contenido de azufre es de 0%.

Tabla 4. Análisis morfológico del cuesco. Adaptado de [3].

Densidad kg/m ³			Volumen de poros mm ³ /g			Porosidad (Fracción Vacía)	Área superficial m ² /g		Ángulos característicos °	
ρ_b	ρ_s	ρ_w	V _{Ma}	V _{Me}	V _{Mi}	ϵ	A _{Hg}	ABET	α	γ
773	1208	1381	48.5	51.2	<1	0.13	24.4	<1	34.8	25.8

Donde:

ρ_b : Densidad a granel

ρ_s : Densidad aparente

ρ_w : Densidad verdadera

V_{Ma}: Volumen específico de macroporos

V_{Me}: Volumen específico de mesoporos

V_{Mi}: Volumen específico de microporos

α : Ángulo de reposo (a granel)

γ : Ángulo dinámico de reposo (a granel)

2.2. Descripción Fenomenológica

Trata sobre el fenómeno físico y químico que ocurre en el reactor de lecho fijo, debido a que tiene un comportamiento similar al horno tubular vertical en el trabajo del grupo de investigación BIOT (Biomasa y Optimización Térmica de Procesos) de la Universidad Nacional de Colombia [3], como los procesos de pirólisis y gasificación se presentan en el mismo equipo, pero en condiciones diferentes, se analiza de forma separada cada proceso con el fin de tener una mayor aproximación sobre cómo es su comportamiento respecto al cambio de materia, energía y de momento, así como la termodinámica y la cinética de las reacciones químicas. Estas ecuaciones describen físicamente un proceso mediante el uso de los principios fundamentales que rigen los fenómenos de transporte: la conservación de la materia, la energía y la cantidad de movimiento (Segunda Ley de Newton).

Primero que todo, se debe tener en cuenta que para que un sistema concentrado se pueda considerar con distribución uniforme de transferencia de calor y masa, es necesario que el número de biot sea menor a 0.1. Si esta condición se cumple se espera que el cambio de la temperatura y la concentración sea muy pequeño dentro del cuerpo, por lo que se puede considerar que estas magnitudes no varían espacialmente.

2.3. Definición del Sistema

El reactor de lecho fijo tubular es un equipo que está compuesto por dos partes el horno y el reactor, cada una ellas descrita así:

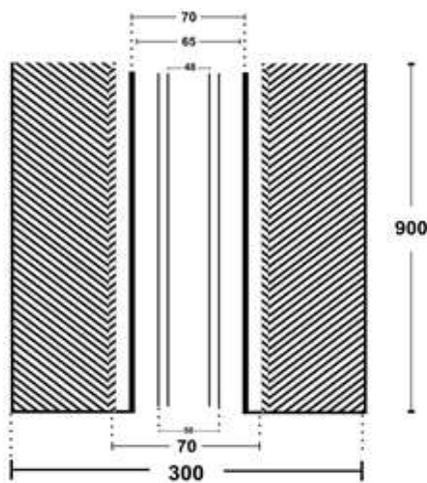
2.3.1 Horno

La capacidad de procesamiento del horno está en un rango de 1 a 10 g, este equipo está compuesto por un horno tubular con una potencia eléctrica de 2,6 kW, el cual alcanza una temperatura máxima de 1300 °C, también está conformado por dos cilindros concéntricos, el pequeño de diámetro interno y externo de 65 mm y 70 mm respectivamente y el grande de diámetro interno y externo de 85 mm y 300 mm respectivamente, sobre el cual se ubica una resistencia eléctrica por toda la longitud del horno en la superficie interna brindando un calentamiento homogéneo en todo el horno, en la parte superior e inferior de los cilindros se ubican láminas de aislamiento térmico.

2.3.2 Reactor

El reactor es de vidrio de cuarzo, con dimensiones de diámetro externo de 50 mm y espesor de 2 mm y longitud de 900 mm, con soportes en la parte superior e inferior que permiten la entrada del gas de arrastre, la fase volátil es evacuada por la parte superior en el que su diámetro tiene un aumento de 50 a 70 mm, como se aprecia en la **Figura 1**.

Figura 1 Reactor de lecho fijo para el proceso



Fuente: elaboración propia 2017

2.4. Proceso

2.4.1 Fenómenos de Transporte

En el proceso de pirolisis solo hay calentamiento de la biomasa, debido a esto se genera producción de gases que se retiran rápidamente por la parte superior del reactor. En

el proceso de pirolisis lleva a cabo la degradación de la materia por medio de energía en forma de calor, proceso que se desarrolla tomando la materia prima que en este caso es cuesco de palma, teniendo en cuenta que está previamente tratado y con un tamaño de grano menor a 0.5 mm, que permite que se logren llevar a cabo los modelos planteados posteriormente.

El proceso está basado en el reactor de lecho fijo que consta de un horno, una resistencia eléctrica y un reactor; la resistencia se encuentra en la pared interna del horno y pared externa del reactor a lo largo del eje axial y cumple la función de brindar la energía necesaria para llevar el proceso desde temperatura ambiente (25°C), hasta una temperatura final de (900°C), permitiendo así un calentamiento uniforme.

En esta etapa del proceso el cuesco de palma sufre una degradación térmica a tal punto que queda únicamente el carbono fijo, el cual está a una temperatura de 550°C, habiendo evacuado antes los volátiles y gases condensables, que aparecen mediante el siguiente mecanismo global de reacción y del cual se obtuvo la cinética de reacción la que se realizó de forma experimental [3].

En primer lugar, se va a tratar sobre los aspectos de transferencia de energía que ocurren en el interior del reactor, empezando por la transferencia desde la resistencia (pared del reactor) hacia el interior, llevando a cabo de este modo una transferencia por conducción con las partículas sólidas del cuesco; en esta parte se va a considerar que la transferencia por radiación es despreciable por caso de estudio, estas partículas a su vez van reaccionando y forman productos volátiles y gases condensables que también aportan transferencia de tipo convectivo y de radiación entre sí, este fenómeno de transporte de energía se presenta en todas las direcciones, radial, axial y angular.

Del mismo modo sucede con la masa, en el momento en que la temperatura empieza a elevarse la materia prima sufre una pérdida de peso debido a la reacción de pirolisis que ocurre, presentando fenómeno de transferencia de masa en forma difusiva y convectiva que se puede presentar de forma natural o forzada.

2.4.2 Cinética

El proceso de pirolisis es muy complejo ya que contiene un conjunto de reacciones, por consiguiente, las velocidades de reacción se dedujeron experimentalmente en el trabajo [3] para la pirolisis.

El desarrollo de la cinética no es el enfoque de este trabajo, por lo que solo se presentará el orden de reacción y un breve desarrollo de cómo se realizaron las velocidades de reacción, ya que al tratar con biomasa como lo es el cuesco de palma es complejo determinar sus propiedades por lo que el desarrollo de la cinética se hace con base a la pérdida de masa de la fase sólida.

La cinética de reacción expresa la variación de la cantidad de una sustancia en función del tiempo, representada por el término r_i , este a su vez es función de la temperatura y la concentración. De acuerdo al modelo de Arrhenius:

$$r_i = \vartheta_i k_0 e^{-\frac{E_A}{RT}} c_i^{n_i}$$

En este caso, se enfocan las velocidades de reacción a la masa total del cuesco y a la pérdida de esta debida a los procesos de pirolisis y gasificación. Para poder determinar el orden de reacción y la energía de activación, se deben asumir las siguientes condiciones:

- No se presentan fenómenos de transporte en la fase sólida.
- Los gases y los productos de la pirolisis se evacuan rápidamente de la zona de reacción.
- Se evitan las reacciones secundarias debido a la salida rápida de los productos de reacción.
- La temperatura es constante en toda la muestra (pirolisis biomasa).

Dando lugar a la siguiente velocidad de reacción:

$$r_i = \frac{dw_i}{dt} = k_0 e^{-\frac{E_A}{RT}} c_i^{n_i}$$

Según el estudio realizado por el grupo BIOT, el mayor problema para determinar la cinética de reacción era introducir el término de la concentración porque no se sabía cuál era su peso molecular, por lo que fue necesario dejar ese término en términos del peso de la biomasa que iba reaccionando, generando así el término que se planteó por medio de la siguiente relación, que describe el peso del cuesco de palma inicial con respecto a la pérdida de la masa que está reaccionando:

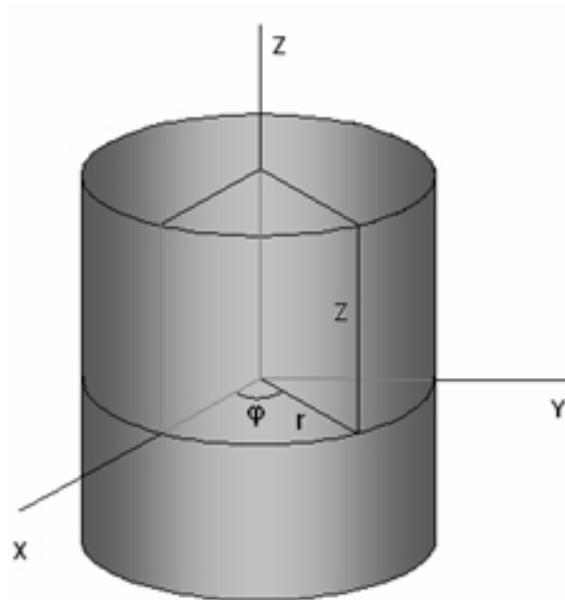
$$\ln \left[\frac{(dw_i/dt)}{w_{bm}} \right] = \ln(k_0) - \frac{E_A}{RT}$$

El desarrollo se presenta en el trabajo realizado por el grupo BIOT: "Pirolisis de biomasa: cuesco de palma de aceite" [7].

2.4.3 Balances Generales de Masa, Energía y Momentum

Para simplificar términos en los balances sólo se utilizaron coordenadas cilíndricas que permiten representar aproximadamente la geometría del reactor de lecho fijo que contiene partículas de cuesco, como se observa en la **Figura 2**. Al considerar en la pirolisis únicamente la fase sólida el balance de Cantidad de Movimiento (Momentum) no se aplica, ya que corresponde a fase fluida.

Figura 2. Coordenadas cilíndricas para el Reactor de lecho fijo.



Fuente: <http://portales.puj.edu.co/objetosdeaprendizaje/Online/OA04/Sistemas%20de%20coordenadas.htm>

2.4.3.1 Continuidad (Masa):

$$\frac{d\rho}{dt} = - \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \rho v_r}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho v_\theta}{\partial r} + \frac{\partial \rho v_z}{\partial z} \right]$$

2.4.3.2 Energía:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = - \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial q_r}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial q_\theta}{\partial r} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right]$$

3. Análisis de resultados

Se elaboraron dos modelos matemáticos, el proceso de pirolisis de cuesco de palma en un reactor de lecho fijo, con sus ecuaciones pertinentes y condiciones límite y de frontera; el trabajo fue realizado con base en los estudio del grupo BIOT [7, 3], donde se hizo uso de parámetros como la caracterización de materias primas y cinética de reacción. Se debe hacer primero ciertas suposiciones, de tal manera que el primer modelo será el más sencillo, hasta uno final con todas las partes de las ecuaciones planteadas, las suposiciones establecidas que son generales para ambos modelos son estado estacionario, transferencia de masa y energía en ciertas direcciones de acuerdo al modelo.

Estos modelos carecen de antecedentes por lo que su comparación no puede realizarse y solo se podría realizar con datos experimentales. A continuación, se presenta un esquema para las ecuaciones y condiciones de cada modelo planteado, para fase sólida no aplica la ecuación de balance de momentum, ya que no es una fase fluida.

Opción 1

3.1.1 Consideraciones

3.1.1.1 Balance de Masa

- No hay transferencia de masa en el eje axial, debido a que la altura del cilindro es muy pequeña.
- No hay transferencia de masa en el eje radial, debido a que solo se tendrá en cuenta el término producido por la acumulación y al no haber transferencia de masa al interior de la partícula.
- Presión constante.

3.1.1.2 Balance de Energía

- No hay transferencia de energía en dirección axial, debido a que la temperatura a lo largo del eje axial es constante ya que se considera que la altura del cilindro es muy pequeña.
- No hay transferencia de energía en dirección radial, debido a que el cambio de la energía interna es muy grande comparado con la energía transferida en el eje radial y además toda la partícula se calentará instantáneamente.
- El sistema es adiabático al no transferir energía a sus alrededores debido a que el reactor tiene una chaqueta.
- Tamaño de partícula muy pequeño para que el calentamiento sea instantáneo y no haya transferencia de energía hacia el interior de la partícula.
- El proceso se realiza a presión constante por la evacuación rápida y continua de gases.

3.1.2 Modelo

De esta manera se obtiene el modelo planteado en la **Tabla 5**.

Tabla 5. Modelo 1 para pirolisis (Fuente propia).

Balance	Ecuación	Condiciones iniciales
Continuidad (masa)	$\frac{d(\rho v)}{dt} = -r_A$	$t = 0 \rightarrow c_i = c_{i,0}$

Balance	Ecuación	Condiciones iniciales
Energía	$mC_V \frac{dT}{dt} = UA(T_{Res} - T_{Cuesco}) + q_{rxn}$	$t = 0 \rightarrow T = T_{amb}$

Fuente: elaboración propia 2017

3.2. Modelo 2

3.2.1. Consideraciones

3.2.1.1 Balance de Masa

- No hay transferencia de masa en el eje axial.
- Tamaño de partícula muy pequeño por lo que no hay difusión al interior de la partícula.
- Densidad constante en el lecho de todas las partículas.
- No hay transferencia de masa por dispersión en ninguna dirección al no haber una fase fluida (gases).

3.2.1.2 Balance de Energía

- No hay transferencia de energía por conducción en dirección axial, porque la generada en la dirección radial es mucho mayor.
- No hay transferencia de energía por convección en la dirección axial debido a que no hay fase gaseosa en esa dirección.
- No hay transferencia de energía por convección en la dirección radial, debido a que no hay movimiento en ninguna dirección.
- El sistema es adiabático.

3.2.2 Modelo

De esta manera se obtiene el modelo planteado en la **Tabla 6**.

Tabla 6. Modelo 2 para pirolisis

Balance	Ecuación	Condiciones limite
Continuidad (masa)	$\frac{-W_A^n * d^2W_A}{kW^{2n}} + \frac{(dW_A)^2 * nW^{n-1}}{kW^{2n}}$ $= \frac{-kW_A^n}{\rho}$	Iniciales: De frontera: $t = 0 \rightarrow w_A = w_{A_0}$ $r = R \rightarrow w_A = w_{Ar}$

Balance	Ecuación	Condiciones limite
Energía	$\rho C_p \frac{dT}{dt} = k \left[\frac{1}{r} * \frac{\partial}{\partial r} * \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] + q_{rxn}$	Iniciales: $t = 0 \rightarrow T = T_{amb}$ De frontera: $r = 0 \rightarrow \frac{dT}{dr} = 0$ $r = R \rightarrow$ $-k \frac{\partial T}{\partial r} _{r=R} = u2\pi Rl(T_{resis} - T _{r=R})$

Fuente: elaboración propia 2017

4. Conclusiones

Con el estudio realizado se determinó que la complejidad para desarrollar los modelos rigurosos de producción de carbón activado a partir de cuesco de palma africana es encontrar los parámetros que permitan dar solución a las ecuaciones, debido a que se debe realizar parte experimental para hallar parámetros desconocidos, esto es habido al tipo de materia prima utilizada, en este caso cuesco de palma africana.

Partiendo de la fenomenología se puede determinar que para la pirolisis de cuesco de palma no es necesario hacer un balance de momento debido a que la fase fluida formada por la reacción se expulsa rápidamente y es bastante pequeña frente al sólido presente.

Se plantearon los balances generales de materia, energía y momento implicados en el proceso de producción de carbón activado, que partieron de diferentes elementos de volumen, (cilíndrico y esférico), formas que se tuvieron en cuenta para formular los supuestos usados en la construcción de modelos matemáticos.

Se llegó a dos modelos con los que se pueden encontrar los perfiles, de masa, energía, presiones y velocidad, lo que es necesario para poder interpretar el comportamiento que puede tener la materia prima en los procesos de pirolisis para la producción de carbón activado a partir de cuesco de palma africana.

La estructura final del carbón activado tiene dependencia principalmente de dos factores, uno de ellos es la materia prima, la cual para este caso y basados en estudios previos realizados, se determinó que era el cuesco de palma, teniendo en cuenta que era abundante y de fácil recolección y porque tiene alta densidad energética; el otro es la tasa de calentamiento ya que si es una tasa muy alta el carbón activado queda de baja calidad, mientras que con tasas bajas de calentamiento la calidad es bastante alta respecto al tamaño de poro y a la capacidad de absorción.

Referencias

- [1] FEDEPALMA, «Anuario Estadístico.» 2014.
- [2] A. D. W. M. A. W. & M. F. S. Arami-Niya, «Using granular activated carbon prepared from oil palm shell by ZnCl₂ and physical activation for methane adsorption» *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 89, n° 2, p. 197–203, 2010.
- [3] A. Gómez, S. Rincon y W. Klose, *Carbón Activado de Cuesco de Palma. Estudio de termogravimetría y estructura.*, Kassel: Kassel University Press GmbH., 2010.
- [4] S. Kong, «Biochar from oil palm biomass: A review of its potential and challenges» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 39, pp. 729-739., 2014.
- [5] M. Awalludin, «An overview of the oil palm industry in Malaysia and its waste utilization through thermochemical conversion, specifically via liquefaction» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 50, pp. 1469-1484, 2015.
- [6] N. Rebitanim, «Potential applications of wastes from energy generation particularly biochar» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 21, pp. 694-702., 2013.
- [7] A. Gómez, W. Klose y S. Rincón, *Pirólisis de biomasa: cuesco de palma.*, Kassel, Alemania: Kassel University Press., 2008.
- [8] J. Patiño y H. García, «Modelación de la Gasificación de Biomasa en un Reactor de Lecho Fijo».2012