



Ingeniería Mecánica

ISSN: 1815-5944

Facultad de Ingeniería Mecánica. Instituto Superior
Politécnico

Bombino-Matos, Eugenio F.; Imbert-González, Josué; Arteaga-
Linzán, Ángel Rafael; Cantos-Macías, Manuel A.; Silva-Lora, Electo E.
Organización en capa de partículas de biomasa
capilaropora durante el movimiento en espiral ascendente
Ingeniería Mecánica, vol. 22, núm. 2, 2019, Mayo-Agosto, pp. 108-114
Facultad de Ingeniería Mecánica. Instituto Superior Politécnico

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=225160733007>

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

UDEM  redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso
abierto

Organización en capa de partículas de biomasa capilaroporosa durante el movimiento en espiral ascendente

Organization in layer form of porous biomass particles during ascending swirling movement

Eugenio F. Bombino-Matos^{1,*}, Josué Imbert-González¹, Ángel Rafael Arteaga-Linzán¹, Manuel A. Cantos-Macías¹, Electo E. Silva-Lora¹

I. Universidad de Oriente. Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial. Santiago de Cuba. Cuba

II. Universidad Técnica de Manabí. Portoviejo, Ecuador

III. Universidad Federal de Itajubá. Minas Gerais, Brasil

*Autor de correspondencia: bombino@uo.edu.cu

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional](#)



Recibido: 9 de marzo de 2019

Aceptado: 2 de abril de 2019

Resumen

Durante el movimiento de biomasa capilaroporosa, dentro de una llamada Columna para Movimiento en Espiral Ascendente, las partículas se organizaron en forma de una capa debido a la acción de la fuerza centrífuga. El objetivo fue determinar el espesor de la capa de material, que se visualiza, a través de una llamada zona activa de flujo. Los valores de velocidad del aire y caídas de presión se obtuvieron experimentalmente y a través de imágenes, procesadas mediante el programa Particle Image Velocimetry for MATLAB (PIV) se determinó la velocidad de

las partículas. Posteriormente, mediante comparaciones con resultados de simulaciones, se determinaron la porosidad y el espesor correspondientes de la capa de partículas formada en cada caso y se dedujo, analíticamente, la ecuación general para determinar el espesor de la capa de partículas formada durante este tipo de movimiento.

Palabras claves: movimiento en espiral ascendente, cámara rotatoria fluidizada, unidad de vórtice gas-sólido.

Abstract

During the movement of capillary biomass, within a called Column for Upward Spiral Movement, the particles pile up in the form of a layer due to the action of the centrifugal force. The objective was to determine the thickness of material layer that was visualized, through a called active flow Zone. The air speed and pressure drop values were experimentally obtained, and through images, processing by Particle Image Velocimetry for MATLAB (PIV) program, was determined the particles velocity. Subsequently, by comparison with

simulations values, were determined the porosity and thickness corresponding to each formed particles layer and was analytically deduced the general equation to determine the thickness of the particles layer formed during this kind of movement.

Key words: ascending swirling movement, rotating fluidized bed, gas-solid vortex unit.

Cómo citar este artículo:

Bombino Matos EF, Imbert González J, Arteaga Linsán RA, et al. Organización en capa de partículas de biomasa capilaroporosa durante el movimiento en espiral ascendente. Ingeniería Mecánica. 2019;22(2):108-114. ISSN 1815-5944.

Introducción

La biomasa es cada vez más investigada como fuente renovable de energía por constituir una importante alternativa sobre los combustibles fósiles entre otras cuestiones importantes, Abdel-Aziz MH, *et al* [1]. Según la evolución de la matriz energética global, presentada por el Instituto Copérnico para el desarrollo sostenible y la innovación, a partir del año 2030 se comenzará a incrementar significativamente la producción de energía a partir de la biomasa y la radiación solar, en contraposición con la obtenida proveniente de los combustibles fósiles y otras fuentes Agbor E, *et al* [2].

Las Unidades de Vórtice Gas-Sólido (*Gas-Solid Vortex Unit*, GSVU), una tecnología basada en el concepto de Camas Rotatorias Fluidizadas (*Rotating Fluidized Bed*, RFB), debido a su capacidad de superar limitaciones de la fluidización convencional, De Wilde en [3, 4], investigan actualmente para diferentes aplicaciones tales como: secado, combustión, moliendas, clasificación, propulsión de cohetes, pirolisis y en reactores nucleares [5, 6].

Entre los problemas que enfrentan actualmente las industrias agroforestales están las enormes cantidades de biomasa que se producen cada año y la baja eficiencia en su utilización. Actualmente se desarrollan trabajos sobre secado fluidizado de varios tipos de biomasa, que sirven como indicador de la eficiencia que genera el

contacto gas-sólido y el régimen de transferencia de calor y masa, bajo diferentes condiciones de operación, Denning, Jia *et al* [7, 8].

Al manipular la biomasa, de forma rotatoria fluidizada, se puede aumentar el tiempo de residencia de las partículas e intensificar el contacto gas-sólido para incrementar la transferencia de calor y masa dentro de la columna de tratamiento, entre otras ventajas. La fluidización en camas rotatorias puede permitir significativas intensificaciones de los procesos de tratamiento de biomasa proponiéndose su integración con otras tecnologías, Weber JM, *et al* [9]. Al hacerlo, mediante movimiento en espiral ascendente, a régimen de transporte neumático y en el entorno de la velocidad de disipación, se pueden lograr importantes reducciones en las dimensiones en la columna de tratamiento y en el consumo energético.

Como problema objeto de esta investigación se tiene que los modelos matemáticos, encontrados en la literatura, presentan limitaciones para la modelación, simulación y determinación de parámetros fundamentales del movimiento de partículas de biomasa capilaropora, en forma de capa en espiral ascendente, a través de una Zona activa de flujo, dentro de una columna de tratamiento con sección anular porque el material se agrupa en forma de una capa, cuyas dimensiones de referencia son importantes para la descripción del proceso, y se desconocen sus características, De Wilde [3, 4], Chokphomphun S *et al* [5]; Elliaers P *et al* [6], Weber JM, *et al* [9], entre otros.

En otros trabajos revisados, el movimiento en espiral ascendente se genera a través de elementos mecánicos móviles internos, Ibrahim KA, *et al*. [10]. Por tanto, los modelos obtenidos a partir de las condiciones físicas y geométricas consideradas en estos trabajos, no pueden dar respuesta al objeto de estudio de esta investigación en que se desarrolla un movimiento en forma de capa en espiral ascendente, a través de una Zona activa de flujo, en espacio anular y, para esto, es necesario determinar las dimensiones de referencia de la capa formada. Se dedujo, analíticamente, una expresión general para determinar el espesor de la capa, que se comprobó comparando la simulación desarrollada, del proceso estudiado, con resultados experimentales de las caídas de presión y las velocidades del aire obtenidos a través de un diseño experimental, para seis tamaños de partículas y tres flujos de material, Bombino EF, *et al* [11]. Se empleó, además, el método de Velocimetría por Imágenes de Partículas (*Particle Image Velocimetry*, PIV) para determinar velocidades de partículas, determinándose, además, la porosidad de la capa que es un parámetro importante para la descripción del proceso.

Métodos y Materiales

Para determinar el espesor de la capa de material, que se visualizaba durante la formación del movimiento en forma de capa espiral ascendente, fue necesario, de forma inicial, deducir físicamente la ecuación del espesor de esta capa que se forma a través de la llamada zona activa de flujo, figura 1.

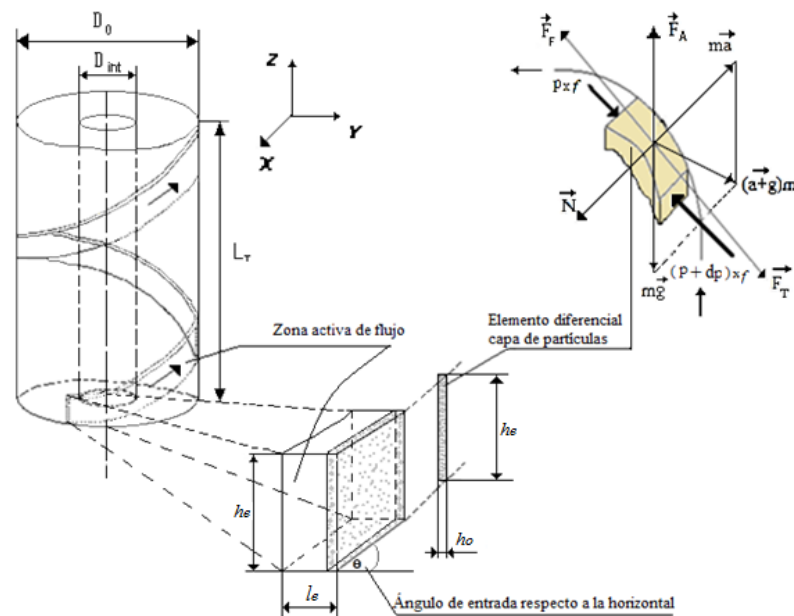


Fig. 1. Elemento diferencial de una capa de material con altura (h_e) y espesor (h_o), durante el movimiento en forma de capa en espiral ascendente, a través de una llamada zona activa de flujo, en espacio anular

La llamada zona activa de flujo, en este caso investigado, figura 1, se define como la zona por donde se produce el movimiento, de la mezcla bifásica, condicionado por la configuración geométrica que tienen las toberas, de entrada y salida, de la llamada Columna para Movimiento en Espiral Ascendente.

El espesor y la porosidad, de la capa de partículas, son parámetros importantes para describir las fuerzas que intervienen durante el movimiento en forma de capa en espiral ascendente, a través de una llamada Zona activa de flujo, así como para describir los fenómenos de transferencia de calor y masa, Bombino EF, *et al*. [11].

Como se dijo, en este tipo de flujo, las partículas se organizan en forma de capa y, por tanto, fue necesario deducir una ecuación para determinar el espesor de esta capa.

La ecuación de continuidad aplicada al flujo de una capa de material (G_m), a través de una llamada Zona activa de flujo, con movimiento en espiral ascendente, se puede expresar de la forma siguiente, ecuación 1:

$$G_m = V \cdot \rho_p \cdot f \cdot (1 - \varepsilon_c) = V_o \cdot \rho_p \cdot (1 - \varepsilon_c); \text{ kg/s} \quad (1)$$

Aplicando el concepto de porosidad (ε_c) a la capa de partículas, ecuación 2:

$$\varepsilon_c = 1 - \frac{V_o}{V_c} \quad (2)$$

Despejando V_o , sustituyendo en (1) y teniendo en cuenta que dL_i es la longitud infinitesimal del recorrido, para un elemento de la capa de partículas, en un intervalo de tiempo infinitesimal dt , se obtiene la ecuación 3:

$$G_m = \rho_p \cdot (1 - \varepsilon_c)^2 \cdot h_o \cdot h_e \cdot \frac{dL_i}{dt} \quad (3)$$

Teniendo en cuenta que $\frac{dL_i}{dt} = V$ y sustituyendo en (3), se obtiene la ecuación 4:

$$G_m = \rho_p \cdot (1 - \varepsilon_c)^2 \cdot h_o \cdot h_e \cdot V \quad (4)$$

Al despejar en 4 (h_o) se obtiene la expresión del espesor de la capa, ecuación 5:

$$h_o = \frac{G_m}{\rho_p \cdot (1 - \varepsilon_c)^2 \cdot h_e \cdot V}; \text{ m} \quad (5)$$

Donde:

V : velocidad del material que forman la capa; m/s

ρ_p : densidad del material húmedo; kg/m³

f : area de la sección transversal de la capa de partículas; m²

V_o : volumen por unidad de tiempo de las partículas contenidas en la capa; m³/s

V_c : volumen por unidad de tiempo de la capa de partículas; m³/s

Los valores de velocidad del aire (W) y caídas de presión (ΔP) se obtuvieron experimentalmente [11]. Luego, a través de imágenes que fueron procesadas mediante el programa *PivLab-time-resolved digital Particle Image Velocimetry tool for MatLab*, PIV [12, 13], se determinó la velocidad de las partículas en cada caso. De igual forma, mediante comparaciones de estas velocidades de las partículas con los resultados de la simulación [11] se pudo determinar la porosidad (ε_c) y el espesor (h_o) correspondientes a cada capa de material formada, figura 2.



Fig. 2. Fotografías de una de las capas de material formadas durante el funcionamiento de la llamada Columna para Movimiento en Espiral Ascendente

Resultados y Discusión

Al comparar los resultados de la velocidad del material, obtenidos experimentalmente mediante el programa PIV, con los obtenidos de las simulaciones realizadas para diferentes porosidades de la capa, resultó que para las simulaciones hechas con porosidades, que oscilaron entre 0,93 y 0,95, se obtuvieron resultados semejantes a los parámetros fundamentales de los procesos: velocidad de las partículas, velocidad del aire y caídas de presión, lo que demuestra que en ese rango estuvo el valor de la porosidad de la capa durante los experimentos, para el rango de flujos bifásicos estudiado.

A continuación se muestra la tabla 1 correspondiente a las simulaciones realizadas para los seis tamaños de partículas y los tres valores del flujo de material con que se realizó esta investigación, que coinciden con los reportados por [11]. Se simuló para distintos valores de porosidad de la capa (ϵ_c). En la tabla 1 se muestran, además, las comparaciones de los valores de los parámetros velocidad del aire (W), caídas de presión (ΔP) y velocidad del material (V), obtenidos experimentalmente, con los simulados, para porosidad de la capa de 0,94.

Tabla 1. Simulaciones y valores obtenidos experimentalmente [exp], para los seis tamaños de partículas y los tres flujos de material con los que se realizó esta investigación

dp (mm)	Gm (kg _b /h)	C_c (kg _b /kg _f)	V (m/s) [exp]	ϵ_c	h_o (mm)	ΔP (Pa) [exp]	W (m/s) [exp]
0,80	10	0,05	7,72 [7,77]	0,94	5,40	14 [13]	9,72 [9,73]
	20	0,10	7,72 [7,78]	0,94	10,90	16 [15]	9,72 [9,76]
	30	0,15	7,72 [7,76]	0,94	16,30	18 [17]	9,72 [9,75]
1,30	10	0,05	7,78 [7,84]	0,94	7,00	21 [20]	10,23 [10,23]
	20	0,10	7,78 [7,82]	0,94	14,00	24 [23]	10,23 [10,25]
	30	0,15	7,78 [7,81]	0,94	21,00	28 [27]	10,23 [10,24]
1,80	10	0,04	7,85 [8,00]	0,94	8,20	29 [28]	10,66 [10,69]
	20	0,09	7,85 [8,03]	0,94	16,50	34 [33]	10,66 [10,71]
	30	0,15	7,85 [8,02]	0,94	24,80	41 [40]	10,66 [10,70]
2,24	10	0,04	7,99 [8,05]	0,94	9,50	33 [32]	11,12 [11,12]
	20	0,09	7,99 [8,04]	0,94	19,00	40 [39]	11,12 [11,14]
	30	0,14	7,99 [8,05]	0,94	28,50	48 [47]	11,12 [11,13]
2,82	10	0,04	8,08 [8,14]	0,94	10,60	41 [40]	11,54 [11,55]
	20	0,09	8,08 [8,12]	0,94	21,30	51 [50]	11,54 [11,56]
	30	0,14	8,08 [8,13]	0,94	32,10	67 [66]	11,54 [11,58]
3,25	10	0,04	8,24 [8,31]	0,94	11,30	49 [48]	11,99 [12,03]
	20	0,09	8,24 [8,29]	0,94	22,50	62 [61]	12,00 [12,04]
	30	0,13	8,24 [8,30]	0,94	33,80	76 [75]	12,00 [12,01]

Mediante el parámetro, $\Delta V (PIV)_{95-[exp.]} \text{ vs } \Delta V (PIV)_{[exp.]-93}$, se realizó una comparación de los valores de velocidades del material, simulados y obtenidos experimentalmente, que permitió determinar los valores del espesor y porosidad de la capa.

Con esta comparación se midió la diferencia existente entre las velocidades simuladas, del material, para porosidades de la capa entre 0,93 y 0,95 y las obtenidas experimentalmente mediante el programa PIV para MATLAB.

A través de este parámetro, $\Delta V (PIV)_{95-[exp.]} \text{ vs } \Delta V (PIV)_{[exp.]-93}$, al comparar los valores de la velocidad del material simulados con los obtenidos experimentalmente con el programa PIV, se pudo determinar que la porosidad de la capa estuvo alrededor de 0,94 con una tendencia a estar más cerca de 0,95, como se puede apreciar, cuando se cumple, en todos los casos, que: $\Delta V (PIV)_{95-[exp.]} < \Delta V (PIV)_{[exp.]-93}$.

En las figuras de la 3 a la 8 se muestra el comportamiento del espesor de la capa como una función de su porosidad para los seis tamaños de partículas y los tres flujos de material con que se realizaron los experimentos. Se obtuvo, para cada caso, una correlación que ajusta con R^2 mayor que 0,99.

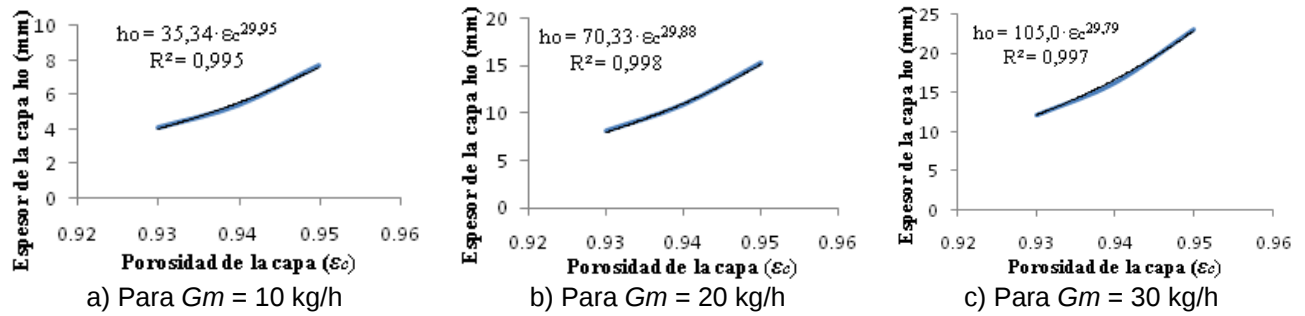


Fig. 3. Espesor de la capa como una función su porosidad para partículas de 0,80 mm

a) $\Delta V (PIV)_{95-[exp.]} = 0,12 \text{ m/s} < \Delta V (PIV)_{[exp.]-93} = 0,19 \text{ m/s}$

b) $\Delta V (PIV)_{95-[exp.]} = 0,11 \text{ m/s} < \Delta V (PIV)_{[exp.]-93} = 0,19 \text{ m/s}$

c) $\Delta V (PIV)_{95-[exp.]} = 0,13 \text{ m/s} < \Delta V (PIV)_{[exp.]-93} = 0,17 \text{ m/s}$

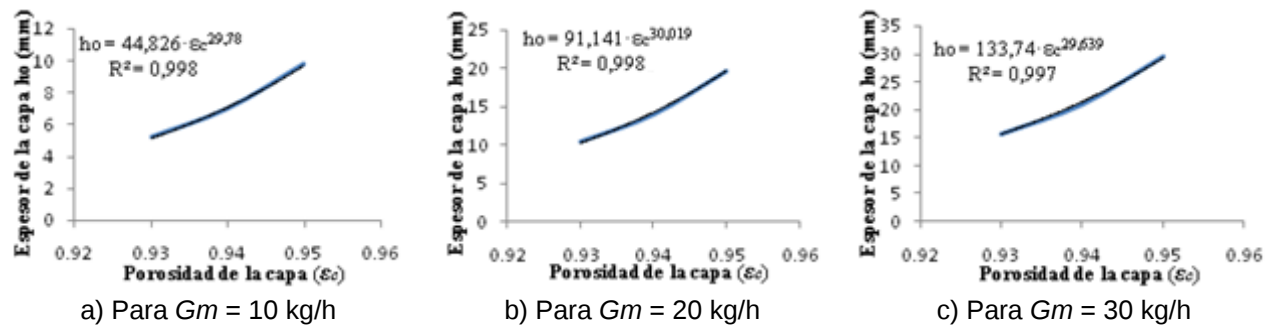


Fig. 4. Espesor de la capa como una función de la porosidad para partículas de 1,30 mm

a) $\Delta V (PIV)_{95-[exp.]} = 0,13 \text{ m/s} < \Delta V (PIV)_{[exp.]-93} = 0,21 \text{ m/s}$

b) $\Delta V (PIV)_{95-[exp.]} = 0,15 \text{ m/s} < \Delta V (PIV)_{[exp.]-93} = 0,19 \text{ m/s}$

c) $\Delta V (PIV)_{95-[exp.]} = 0,16 \text{ m/s} < \Delta V (PIV)_{[exp.]-93} = 0,18 \text{ m/s}$

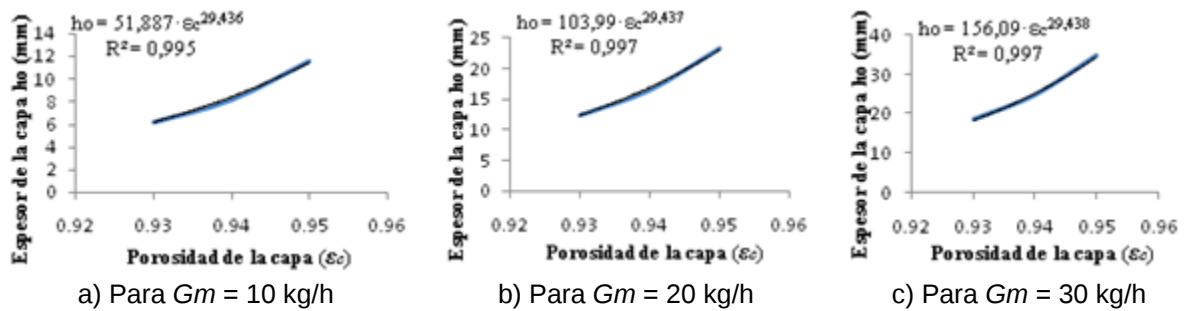


Fig. 5. Espesor de la capa como una función de la porosidad para partículas de 1,80 mm

a) $\Delta V (PIV)_{95-[exp.]} = 0,05 \text{ m/s} < \Delta V (PIV)_{[exp.]-93} = 0,31 \text{ m/s}$

b) $\Delta V (PIV)_{95-[exp.]} = 0,02 \text{ m/s} < \Delta V (PIV)_{[exp.]-93} = 0,34 \text{ m/s}$

c) $\Delta V (PIV)_{95-[exp.]} = 0,04 \text{ m/s} < \Delta V (PIV)_{[exp.]-93} = 0,33 \text{ m/s}$

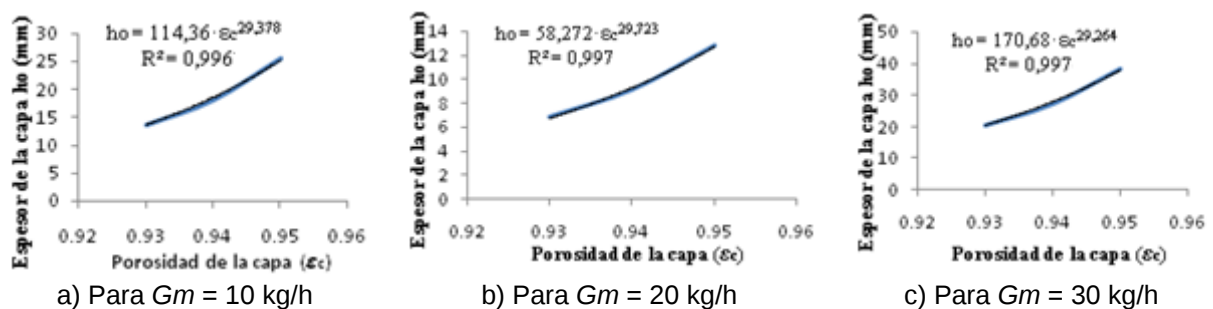


Fig. 6. Espesor de la capa como una función de la porosidad para partículas de 2,24 mm

a) $\Delta V (PIV)_{95-[exp.]} = 0,15 \text{ m/s} < \Delta V (PIV)_{[exp.]-93} = 0,24 \text{ m/s}$

b) $\Delta V (PIV)_{95-[exp.]} = 0,17 \text{ m/s} < \Delta V (PIV)_{[exp.]-93} = 0,22 \text{ m/s}$

c) $\Delta V (PIV)_{95-[exp.]} = 0,16 \text{ m/s} < \Delta V (PIV)_{[exp.]-93} = 0,23 \text{ m/s}$

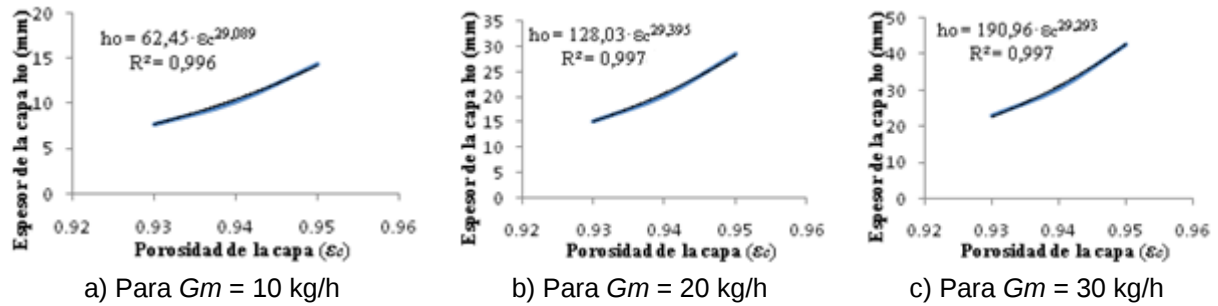


Fig. 7. Espesor de la capa como una función de la porosidad para partículas de 2,82 mm

- a) $\Delta V(PIV)_{95-[exp.]} = 0,17 \text{ m/s} < \Delta V(PIV)_{[exp.]-93} = 0,24 \text{ m/s}$
 b) $\Delta V(PIV)_{95-[exp.]} = 0,19 \text{ m/s} < \Delta V(PIV)_{[exp.]-93} = 0,22 \text{ m/s}$
 c) $\Delta V(PIV)_{95-[exp.]} = 0,18 \text{ m/s} < \Delta V(PIV)_{[exp.]-93} = 0,23 \text{ m/s}$

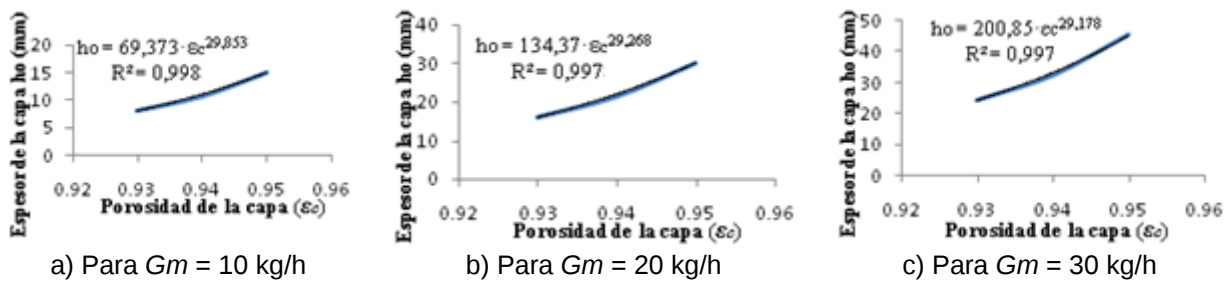


Fig.8. Espesor de la capa como una función de la porosidad para partículas de 3,25 mm

- a) $\Delta V(PIV)_{95-[exp.]} = 0,16 \text{ m/s} < \Delta V(PIV)_{[exp.]-93} = 0,27 \text{ m/s}$
 b) $\Delta V(PIV)_{95-[exp.]} = 0,18 \text{ m/s} < \Delta V(PIV)_{[exp.]-93} = 0,25 \text{ m/s}$
 c) $\Delta V(PIV)_{95-[exp.]} = 0,17 \text{ m/s} < \Delta V(PIV)_{[exp.]-93} = 0,26 \text{ m/s}$

Se pudo evidenciar, mediante los resultados de la simulación, que el espesor de la capa (h_o) se redujo entre 1,2 y 7,5 veces al entrar las partículas en la Zona activa de flujo y establecerse el movimiento en forma de capa en espiral ascendente, a través de la llamada Zona activa de flujo, debido a la acción de la fuerza centrífuga, en comparación con el ancho del conducto de entrada (l_e) por donde las partículas entran, en el instante inicial ocupándola completamente, antes de organizarse en forma de capa.

Se obtuvieron correlaciones del espesor de la capa de partículas, en función de la porosidad, para cada caso particular, y los resultados obtenidos con estas correlaciones, son semejantes a los obtenidos con la ecuación general (5), deducida analíticamente, para determinar el espesor de la capa.

Esta ecuación general (5), es válida para: partículas pequeñas ($d_p \leq 10 \text{ mm}$) y bajas concentraciones (0,061 - 0,406) kg_b/kg_r , que permiten considerar ausencia de colisiones entre las partículas, Liu Y,et al [16] del flujo bifásico gas-biomasa.

Se determinó que la porosidad de la capa formada, durante el movimiento investigado está alrededor de 0,94, para los seis tamaños de partículas y los tres flujos de material con que se realizó esta investigación.

Las expresiones del espesor de la capa de partículas en función de la porosidad de la capa, obtenidas para cada uno de los casos particulares, correspondientes a los seis tamaños de partículas y los tres flujos de material, correlacionaron por encima de $R^2 = 0,99$, y coinciden, los resultados obtenidos a través de estas expresiones, para valores de porosidad alrededor de 0,94, con los resultados obtenidos por la ecuación general (5) deducida analíticamente.

A través del programa PIV, muy utilizado en la actualidad para el estudio de las GSVU, se pudo comprobar que la porosidad de la capa de partículas, para la llamada Epiral Normal, está entre 0,93 y 0,95 para las condiciones específicas de esta investigación, según los resultados reportados en la tabla 1 y los gráficos de las figuras de la 3 a la 8, en que se muestra el comportamiento del espesor de la capa en función de su porosidad, para los seis tamaños de partículas y los tres flujos de material, con los que se realizó este trabajo de investigación, notándose una marcada tendencia de la porosidad de la capa a estar más cerca de 0,95 que de 0,93 en todos los casos estudiados.

Conclusiones

Se determinó, para cada caso particular, el espesor de la capa de material y se dedujo, analíticamente, la ecuación general para obtener este parámetro, ecuación 5, válida entre los límites en que se desarrolló esta investigación. Quedó definido que el espesor de la capa formada (h_o) durante el movimiento de biomasa capilaroporosa en forma de capa en espiral ascendente, en espacio anular, a través de una llamada Zona activa de flujo, en una llamada Columna para Movimiento en Espiral Ascendente, es directamente proporcional al flujo de material e inversamente proporcional a la densidad y velocidad de las partículas y a la altura de la llamada zona activa de flujo.

Referencias

1. Abdel-Aziz MH, El-Abd MZ, Bassyouni M. Heat and mass transfer in three phases fluidized bed containing high density particles at high gas velocities. *International Journal of Thermal Sciences*. 2016;(102):145-53.
2. Agbor E, Zhang X, Kumar A. A review of biomass co-firing in North America. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014;(40):930-43.
3. De Wilde J. Gas-solid fluidized beds in vortex chambers. *Chemical Engineering and Processing*. 2014;(85):256-90.
4. De Wilde J, Richards G, Benyahia S. Qualitative numerical study of simultaneous high-G-intensified gas-solids contact, separation and segregation in a bi-disperse rotating fluidized bed in a vortex chamber. *Advanced Powder Technology*. 2016;(27):1453-63.
5. Chokphoemphun S, Chokphoemphun S. Moisture content prediction of paddy drying in a fluidized-bed dryer with a vortex flow generator using an artificial neural network. *Applied Thermal Engineering*. 2018;(145):630-36.
6. Eliaers P, Broqueville A, Poortinga A, et al. High-G, low-temperature coating of cohesive particles in a vortex chamber. *Powder technology*. 2014;(258):242-51.
7. Dening J, Océane C, Jianghong P, et al. Fluidization and drying of biomass particles in a vibrating fluidized bed with pulsed gas flow. *Fuel Processing Technology*. 2015;(138):471-482.
8. Dening J, Xiaotao B, Jim LC, et al. Biomass drying in a pulsed fluidized bed without inert bed particles. *Fuel*. 2016;(186):270-84.
9. Weber JM, Stehle RC, Breault RW, et al. Experimental study of the application of rotating fluidized beds to particle separation. *Powder Technology*. 2017;(316):123-30.
10. Ibrahim KA, Mofreh H, Hamed WA, et al. Swirling gas-solid flow through pneumatic conveying dryer. *Powder Technol*. 2013;(235):500-15.
11. Bombino, EF, Pineda RE. Simulación del secado neumático de biomasa con movimiento en espiral ascendente. *Ingeniería Mecánica*. 2017;20(3):107-114.
12. Friedle M, Niyogi K, Torregrosa MM, et al. A drag model for the gas-solid vortex unit. *Powder Technology*. 2017;(312):210-21.
13. Friedle M, Marin GB, Heynderickx GJ. Operational range of a Gas-Solid Vortex Unit. *Powder Technology*. 2018;(338):702-15.