



TRABAJO TEORICO EXPERIMENTAL

Determinación de las áreas de transferencia de calor en un reactor tambor rotatorio

Determination of the heat transfer areas in rotary drum reactor

Isnel – Benítez Cortés¹

Agustín – García Rodríguez²

Luis Beltrán – Ramos Sánchez¹

Fernando – Prieto Montenegro³

¹Universidad de Camagüey Ignacio Agramonte Loynaz, Cuba.

²Universidad Central de las Villas, Martha Abreu, Villa Clara, Cuba.

³Central Eléctrica 10 de octubre, Nuevitás, Camagüey, Cuba

E-mail: isnel.benites@reduc.edu.cu

Recibido: febrero del 2017

Aprobado: octubre del 2017

Licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 Internacional



RESUMEN/ABSTRACT

Este trabajo presenta una metodología para determinar las áreas de transferencia de calor de un reactor tambor rotatorio con la presencia de deflectores en su interior. Se evaluaron diferentes flujos de sólidos, entre 3,4 y 7,6 g/s y dos velocidades de rotación, 11,6 y 14,7 rpm. A partir de la obtención de imágenes del perfil del reactor tambor rotatorio, se propone un procedimiento matemático para el estudio de la influencia de estas variables en el valor de las áreas de transferencia de calor gas-pared y sólido-pared. Los resultados muestran que, para el caso del contacto sólido – pared, a medida que aumenta el flujo de entrada de sólidos al reactor, el ángulo va aumentando, existiendo una relación directamente proporcional. Por otra parte, se observa que los ángulos de contacto son mayores a medida que aumenta la velocidad de rotación, para los mismos valores de flujo estudiados. Un efecto contrario se observa para el caso del contacto gas-pared.

Palabras clave: reactor sólido gas no catalítico, reactor tambor rotatorio, área de transferencia de calor.

This work presents a methodology to obtain the heat transfer areas of a rotary drum reactor in the presence of baffles therein are determined. Different solids flow are evaluated between 3.4 and 7.6 g / s, and two rotational speeds, and 14.7 and 11.6 mpr. Since imaging of the rotary drum reactor profile, a mathematical procedure to study the influence of these variables on the value of gas transfer areas and solid-wall heat-wall is proposed. The results show that, in the case of solid contact - wall, increasing the inflow of solids to the reactor, the angle increases, there is a direct relationship. Moreover, it is observed that the contact angles are greater as the rotation speed increases for the same flow values studied. An opposite effect is observed in the case of gas-wall.

Keywords: reactor solid- gas no catalytic, reactor rotary drum, heat transfer areas

INTRODUCCION

Uno de los sistemas de contacto sólido – gas de mayor utilización es el reactor tambor rotatorio, el cual tiene dentro de sus ventajas fundamentales la posibilidad de regular el tiempo de residencia de la fase sólida variando su flujo, ángulo de inclinación y velocidad de rotación del mismo, variables estas de gran importancia para su diseño y funcionamiento. Estos tienen una gran aplicación en la industria de procesos, destacándose su uso en sistemas reaccionantes gas – sólidos no catalíticos, son usados en la producción de productos químicos, metales y óxidos de metales, en la producción de cal, como incineradores de residuales sólidos y secadores [1], y su utilización más moderna es en las plantas de reciclaje de aluminio utilizando la energía dólar como fuente de energía [2].

En los reactores rotatorios sin presencia de deflectores interiores y teniendo en cuenta la posición de las partículas, existen diferentes modos de flujo para la fase sólida. Dentro de ellos se encuentran el modo de partículas durmiendo, el depresivo, el de partículas rodando, el modo cascada, el modo catarata y el modo de centrifuga [3]. Estos criterios están relacionados con la velocidad de rotación y el porcentaje de llenado del reactor por lo que resulta muy difícil la predicción del comportamiento de la fase sólida, mucho más cuando el equipo cuenta con deflectores interiores que favorecen el contacto entre las fases.

En el caso de los sistemas con deflectores internos, los modelos que describen la transferencia de calor dentro de estos equipos no han sido suficientemente tratados por la literatura [4].

En cuanto a la transferencia de calor, se presentan una serie de mecanismos que son necesarios tener en cuenta en el momento de realizar los balances de materiales y energía [3-6]. Dentro de estos aparecen los siguientes [7]:

- Conducción del calor a través del fluido estancado.
- Conducción térmica a través del sólido.
- Conducción térmica a través del área de contacto entre dos partículas.
- Transferencia de calor radiante entre superficies de partículas.
- Transferencia de calor radiante en la porosidad del lecho.
- Conducción térmica a través de la capa de fluido cerca de la superficie de contacto entre dos partículas.
- Transferencia de calor por convección entre el sólido- fluido-sólido.

La transferencia de calor en estos equipos se torna muy compleja porque están presentes los tres mecanismos fundamentales y porque esta se realiza entre el gas, el sólido y las paredes del equipo. Asimismo, depende de las propiedades termo físicas de las partículas, la pared y el gas, el tiempo de contacto y la forma de las partículas [3], así como de las áreas de transferencia de calor. Por otra parte, la presencia de deflectores en el interior permite un aumento considerable de la transferencia de calor. Todos estos aspectos tienen una importancia directa en los efectos de la transferencia de calor tanto en la dirección radial como axial [7].

Para el estudio de los procesos de intercambio de calor en estos equipos, se hace necesaria la estimación de las áreas de transferencia de calor entre el sólido y la pared, entre el gas y la pared y entre el sólido y el gas, aspecto este que se dificulta con la complejidad de la geometría interna del reactor cuando en su diseño tiene concebido la presencia de deflectores para aumentar el contacto entre las fases [8]. Este trabajo propone una metodología para la determinación de las áreas de transferencia de calor en reactores rotatorios con deflectores internos.

Estos efectos de intercambio energético dentro de este tipo de reactor, así como las variaciones de los perfiles de temperaturas, están afectados por varios factores. Dentro de estos, se destacan los mecanismos de transferencia de calor por conducción y radiación entre las altas temperaturas del flujo de gases, la pared del reactor y el sólido. Por otra parte, la velocidad de rotación y el ángulo de inclinación son otros factores de marcada influencia en estos mecanismos así como los efectos de transferencia de masa que ocurren durante los procesos físicos y químicos que tienen lugar en el interior de los mismos [9].

Debido a la alta complejidad de los procesos de transferencia de calor que ocurren en estos sistemas, se hace necesario determinar las áreas de transferencia de calor sólido – pared y gas –pared. Por tanto, el objetivo de este trabajo es proponer una metodología para determinar las áreas de transferencia de calor de un reactor tambor rotatorio con la presencia de deflectores en su interior

MATERIALES Y METODOS

Se parte para el estudio de un reactor para la reacción heterogénea entre el óxido de calcio y el dióxido de azufre contenido en los gases de la combustión, con un diámetro interno 0,22 m y 10 mm de espesor construido de acero CT3. Para su diseño se utilizan los criterios referidos por Perry [10]. Según estos criterios, se parte de una relación longitud / diámetro de 12, lo que resulta en una longitud de 2,5 m y un volumen de 0,0754 m³. Para la determinación de las áreas de transferencia de calor entre el gas y la pared y el sólido y la pared, se construye una sección de este reactor de 20 cm de longitud. Para mantener el mismo diseño del equipo original, en el interior se coloca un sistema de ocho deflectores separados de formas equidistantes, distribuidas en el perímetro interno del reactor, los cuales se construyen con perfiles lisos de angulares en “L” y en “I” de 3 cm y 0,03 cm de espesor. La figura 1, muestra un esquema del interior del reactor. Este tipo de arreglos de deflectores permite lograr la mayor área de transferencia de masa y calor en la fase aérea del reactor durante el vuelo de las partículas.

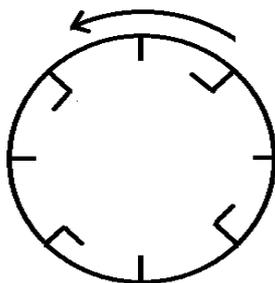


Fig. 1. Esquema del interior del reactor.

Para lograr el movimiento rotatorio se utiliza un sistema de 4 ruedas y se acopla a un reductor de velocidad instalado a un motor eléctrico de corriente directa que permite el estudio de varias velocidades de rotación. Los estudios se realizan con un 20 % de llenado. Para ello, se determina el volumen real del prototipo partiendo del volumen sin los deflectores menos el volumen de los deflectores y los tornillos de fijación y se determina el volumen real de sólido a adicionar. Estas determinaciones se realizan considerando diferentes flujos de alimentación del sólido. Posteriormente, se llena el reactor prototipo con el sólido finamente dividido para las diferentes velocidades de alimentación de sólidos determinadas.

Posteriormente, se ajusta el ángulo de inclinación que se desea estudiar con el sistema de rodamientos (en el caso de estudio es 5°) y se ajusta el motor para lograr las diferentes velocidades de rotación. En la parte anterior del reactor, se coloca una placa de acetato con la medida de los ángulos, en el rango de 0-360°, marcados de manera que facilite la medición de los ángulos que describen el contacto sólido-pared o gas-pared, siendo este ángulo la variable dependiente en función de la velocidad de rotación y el flujo de sólido, que resultan ser las variables independientes. De las mediciones de los ángulos se realizan tres réplicas. La tabla 1, muestra el diseño experimental.

Tabla 1. Diseño experimental

Angulo de contacto gas-pared y sólido-pared	Flujo de sólidos (g/s)	Velocidad de rotación (rpm)
φ_1	3,4	11,4
φ_2	4,4	11,4
φ_3	6,7	11,4
φ_4	7,6	11,4
φ_5	3,4	14,7
φ_6	4,4	14,7
φ_7	6,7	14,7
φ_8	7,6	14,7

Con los resultados del tratamiento gráfico se pasa a la aplicación de un procedimiento matemático para obtener los valores de las áreas de transferencia de calor. El procedimiento está concebido en una serie de etapas o pasos que permiten, a través del análisis de la imagen obtenida, estimar estos valores. Los pasos son los siguientes:

Determinación de los ángulos de contacto entre el sólido y la pared y entre el gas y la pared: Para esto se determina la sumatoria de todos los ángulos para cada uno de los contactos definidos a partir de la ecuación (1):

$$\varphi = \sum \varphi_i \quad (1)$$

Donde φ es la sumatoria de los ángulos individuales que se observan en la imagen gráfica para cada uno de los contactos en estudio y φ_i es el ángulo obtenido para cada tipo de contacto en cada una de los deflectores. Estos ángulos se expresan en radianes.

Determinación de la longitud del segmento: Partiendo del ángulo obtenido y del radio interior del reactor se puede determinar la longitud de todos los segmentos de circunferencia para cada tipo de contacto estudiado a partir de la ecuación (2):

$$S = R\varphi \quad (2)$$

Determinación del área de transferencia de calor: El valor de los segmentos determinados se multiplica por la longitud del reactor a partir de la ecuación (3), donde se obtiene el área de transferencia de calor.

$$A_{TC} = SL \quad (3)$$

Para cada una de las combinaciones establecidas se toman fotografías digitales a las que se les realiza un tratamiento de la imagen para visualizar las zonas correspondientes al sólido y medir las superficies de contacto sólido-pared y gas-pared. La figura 2, muestra un esquema de la instalación experimental mientras que en la figura 3, se observa una foto de la placa de acetato, con la división de las zonas donde la pared está en contacto con el sólido (sp) y con el gas (gp).

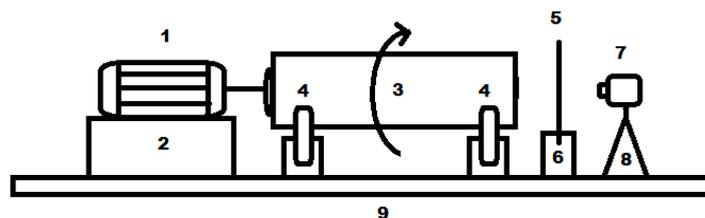


Fig. 2. Esquema de la instalación experimental: 1- motor eléctrico de corriente directa, 2- base del motor eléctrico, 3- reactor tambor rotatorio, 4- ruedas con los pedestales, 5- lámina transparente con la señalización de los ángulos, 6- soporte de la lámina, 7- cámara fotográfica, 8- soporte de la cámara fotográfica, 9- soporte de la instalación experimental.

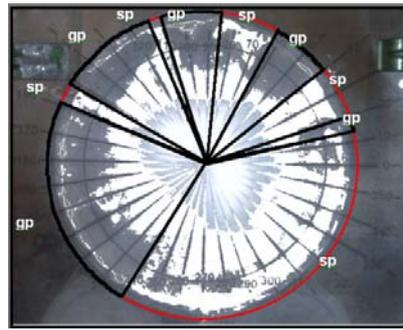


Fig. 3. Imagen de los perfiles de cada área de transferencia de calor (gp: contacto gas-pared, sp: contacto sólido-pared).

Como limitaciones de la aplicación de esta técnica, se destaca que la adherencia del sólido a las paredes del reactor, por la rugosidad de la superficie, forma una pequeña capa de sólidos que se opone a la transferencia de calor y afecta el contacto gas-pared. Por tanto, en este método se parte de considerar el sólido no adherente a la superficie interior del reactor lo que presupone que la capa de sólidos no constituya una resistencia a la transferencia de calor. Otro aspecto importante es considerar que el gas fluya a una velocidad pequeña que no provoque el arrastre de partículas que puedan afectar el contacto entre las fases.

Por otra parte, al encontrarse el reactor en movimiento giratorio, estas áreas de contacto no se mantendrán constantes e iguales, sino que cambiarán en función de la posición relativa de los deflectores respecto a la fuerza de gravedad. Para eliminar esta dificultad, se parte de considerar que, como son ocho deflectores y que son dos consecutivos de perfil diferente como muestra la figura 1, cuando el reactor realiza $\frac{1}{4}$ de vuelta, se repite la posición relativa de estos, lo que permite realizar el estudio en esta forma.

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

La aplicación de la metodología permite obtener los ángulos de las áreas de transferencia de calor para las velocidades de rotación de 11,6 y 14,7 rpm y flujos de sólido entre 3,4 y 7,6 g/s. Para cada una de las variantes estudiadas se obtienen los ángulos de contacto entre el gas y la pared y entre el sólido y la pared. De forma general, las áreas de transferencia de calor sólido-pared para las diferentes combinaciones de velocidad de rotación y flujos de sólidos estudiados oscilan en el rango de 1,128-1,275 m². Para el caso de las áreas gas-pared, los resultados para las mismas condiciones oscilan entre los 0,501-0,665m². Para ambos casos, los coeficientes de variación obtenidos se comportaron en el rango de 3-5 e⁻⁵. Estos resultados permiten trabajar con los valores promedios obtenidos en las condiciones experimentales estudiadas.

La figura 4, muestra los resultados de los ángulos que ocupan las áreas de transferencia de calor gas-pared así como de las áreas de transferencia de calor.

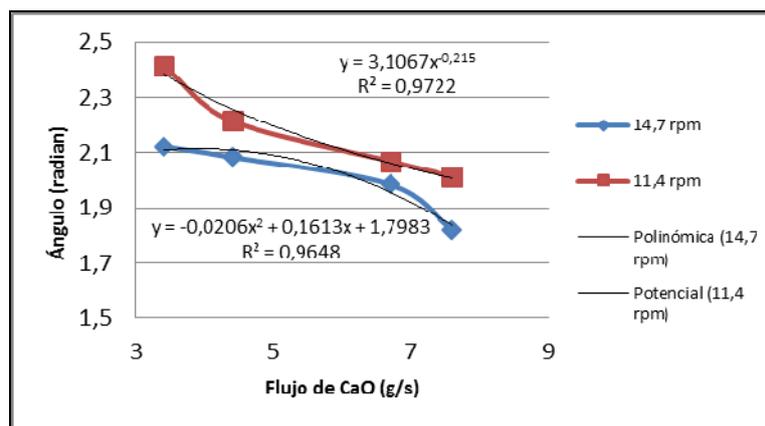


Fig. 4. Ángulos de contacto gas – pared.

En el caso del contacto sólido – pared, se aprecia que, a medida que aumenta el flujo de entrada de sólidos al reactor, el ángulo va aumentando lo cual se debe a que este incremento del flujo de sólidos provoca una mayor acumulación de sólidos dentro del reactor el cual se adhiere a la superficie de las paredes y se acumula encima de los deflectores durante el movimiento de ascenso de estos. Esto provoca, al mismo tiempo, una disminución de los ángulos de contacto gas – pared como se muestra en la figura 5.

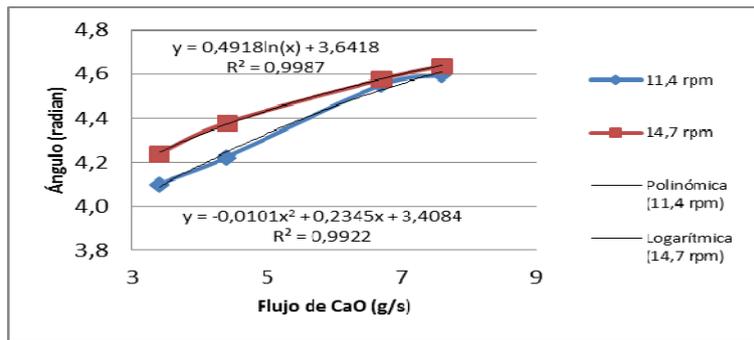


Fig. 5. Ángulos del contacto sólido – pared.

Por otra parte, en la figura 5, se observa que los ángulos de contacto son mayores a medida que aumenta la velocidad de rotación. Esto se debe a que, a medida que la velocidad de rotación del reactor aumenta, la fuerza centrífuga sobre las partículas de sólidos tiende a aumentar, provocando que las mismas sean empujadas contra la pared aumentando la adherencia de estas. En las figuras 6 y 7, se muestran los resultados del cálculo de las áreas de transferencia de calor. En estos resultados se puede observar como las áreas obtenidas para el contacto gas-pared disminuyen con el aumento del flujo de sólidos mientras que disminuye el caso del contacto sólido – pared. Este resultado es directamente proporcional al obtenido para el caso de los ángulos de contacto.

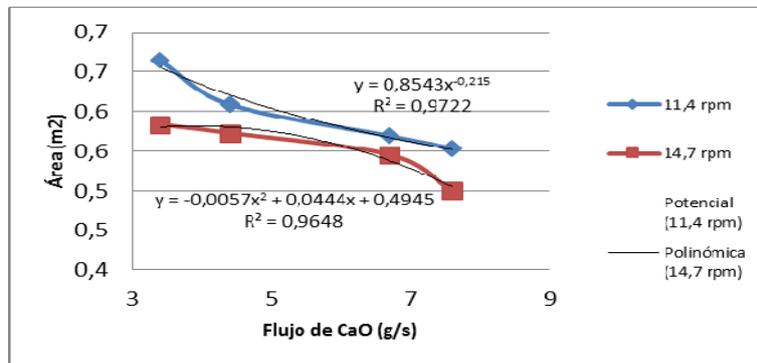


Fig. 6. Áreas de transferencia de calor gas – pared.

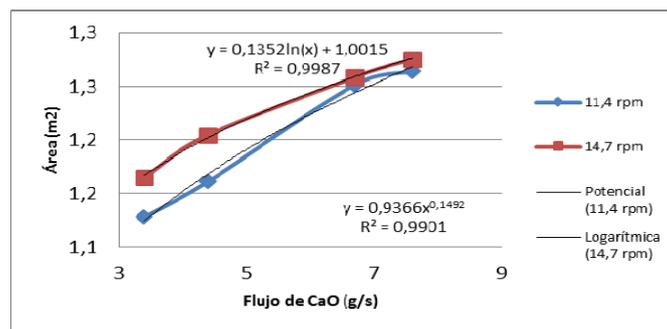


Fig. 7. Áreas de transferencia de calor sólido – pared.

CONCLUSIONES

El método utilizado para la determinación de las áreas de transferencia de calor en este tipo de reactor con deflectores internos es simple y puede ser utilizado para reactores rotatorios de pequeño diámetro. Existe una relación directa entre el flujo de sólidos y la velocidad de rotación con el área de transferencia de calor para el caso del contacto sólido – pared y una relación inversamente proporcional para el contacto gas-pared. Los resultados del análisis estadístico, muestra que no existen diferencias significativas en cuanto a la variación de estas áreas con el movimiento circular del equipo. Los modelos de ajustes del comportamiento de las áreas de transferencia de calor, pueden ser utilizados en la simulación de este tipo de equipamiento, ya que permiten evaluar la influencia de estos parámetros en los rangos de valores estudiados.

RECONOCIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la central termoeléctrica “10 de octubre” por su contribución a la construcción del equipo y al laboratorio de Reactores Químicos de la Universidad de Camagüey Ignacio Agramonte Loynaz, donde se realizaron las experiencias.

REFERENCIAS

- [1] RUNKANA, V. “Model-based optimization of industrial gas-solid reactors”, *KONA Powder and Particle Journal*, vol. 32, p. 115-130, 2015. [Consultado 15 de octubre de 2015]. Disponible en: https://www.jstage.jst.go.jp/article/kona/32/0/32_2015025/_article
- [2] SPIRIDON O. y col. “Simulation model for the transient process behaviour of solar aluminium recycling in a rotary kiln”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 78, p. 387-396, 2015. [Consultado 22 de octubre de 2015]. Disponible en: www.elsevier.com/locate/apthermeng
- [3] VARGAS-ESCOBAR, W.y.W., L. "Discrete modeling of heat conduction in granular media. Pittsburgh, USA, 2002. [Consultado el 6 de noviembre de 2014]. Disponible en: <http://d-scholarship.pitt.edu/6321/>
- [4] LAUREDAN, L. G. y col. “A wall heat transfer correlation for the baffled-rotary kilns with secondary air flow and recycled materials inlet”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 54, p. 110-116, 2014. [Consultado 10 de febrero de 2015]. Disponible en: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01016542>
- [5] LEGUEN, L. y col. "Drying and heating modelling of granular flow: Application to the mix-asphalt processes", *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 2011, vol. 4, p. 71-80. [Consultado 6 de noviembre de 2014]. Disponible en: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00612503/>
- [6] PATILLA, R. y col. "Heat transfer modeling of rotary kiln for cement plants", *International Journal for Advancements in Technical Research & Development*, vol. 1, 2012. [Consultado 21 de noviembre de 2014]. Disponible en: <http://iosrjournals.org/iosr-jmce/papers/RDME-Volume3/RDME-25.pdf>
- [7] YANG, L. y B. Farouk, “Modeling of Solid Particle Flow and Heat Transfer in Rotary Kiln Calciners”, *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, vol. 47, p. 1189-1196, 2012. [Consultado 11 de marzo de 2015]. Disponible en: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10473289.1997.10464069>
- [8] ZHENG-MING, Y. I. y col. “Mathematic simulation of heat transfer and operating optimization in alumina rotary kiln”, *J. Cent. South University*, vol. 20, p. 2775-2780, 2013. [Consultado 11 de marzo de 2015]. Disponible en: <https://rd.springer.com/article/10.1007/s11771-013-1796-0>
- [9] Li, G. y col. “Numerical simulation of the influence factors for rotary kiln in temperature field and stress field and the structure Optimization”, *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 7, n. 6, p. 1–15, 2015. [Consultado 21 de octubre de 2015]. Disponible en: <http://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1687814015589667>
- [10] PERRY, R.y.G., D. Chemical engineering handbook, 8va edición. McGraw-Hill, 2003. DOI: 10.1036/0071511245. Disponible en: <https://www.passeidireto.com/arquivo/30327673/perrys-chemical-engineers-handbook-8th-edition/6>