

# Tratamiento térmico de residuos procedentes de la digestión anaerobia de lodos de la industria papelera en un reactor spouted bed cónico

M.J. San José\*, S. Alvarez, R. López  
Grupo red META: UPV/EHU María José San José

Departamento de Ingeniería Química. Facultad de Ciencia y Tecnología. Universidad del País Vasco, UPV/EHU. Apartado 644. 48080 Bilbao

(\*) [mariajose.sanjose@ehu.es](mailto:mariajose.sanjose@ehu.es)

## Resumen

Se ha estudiado la aplicabilidad de la tecnología de Spouted Bed en geometría cónica para el tratamiento térmico de residuos de la digestión anaerobia de lodos de destintado de la industria papelera. Se han determinado los regímenes de flujo de lechos de lodo digerido en un secadero spouted bed cónico en diferentes condiciones de operación. Se ha evaluado el efecto de la temperatura del aire a la entrada en el valor de la velocidad mínima para alcanzar el régimen de spouted bed. Se ha llevado a cabo el proceso de secado del digestato con temperaturas del aire a la entrada a 105 °C.

**Palabras Clave:** Digestato; digestión anaerobia; lodos residuales; spouted beds cónicos; tratamiento térmico

## Introducción

La fabricación de papel prensa y papel tisú a partir de papel reciclado es una alternativa económica y ecológica. Sin embargo, este proceso genera gran cantidad de residuos, de los cuales aproximadamente el 70% es lodo de destintado, Figura 1, [1], entre 160 y 500 kg de lodo de destintado húmedo por tonelada de papel [2], generado en el proceso de eliminación de tintas. Este lodo requiere una gestión adecuada alternativa al depósito en vertedero y la aplicación en agricultura.



Figura 1. Lodo de destintado de la industria papelera

El tratamiento anaerobio con producción de biogás, con una concentración mayoritaria en metano, permite aumentar el valor añadido de los residuos y obtener un subproducto orgánico, digestato, susceptible de valorización en agricultura. Sin embargo, el digestato requiere tratamientos previos como decantación/sedimentación y/o secado cuando la aplicación es en suelos agrícolas.

La tecnología de spouted bed de geometría cónica se ha empleado en el tratamiento térmico por secado de residuos de lodos de papelera [3-5] y de residuos agroforestales [6-7]. Esta tecnología se ha aplicado a la valorización por secado del digestato obtenido en la digestión anaerobia de lodo de destintado de la industria papelera en un reactor spouted bed cónico en el régimen de spouted bed.

En el régimen de spouted bed en contactores cónicos se distinguen diferentes regiones: zona de spout, zona anular y fuente. Los sólidos que ascienden por la zona de spout en paralelo con el gas describen una fuente desde donde se distribuyen a la superficie superior de la zona anular, que rodea a la zona de spout, por donde descenden en contracorriente con el gas y se incorporan a la zona de spout en la interfase zona de spout-zona anular.

La tecnología de spouted beds se caracteriza por cuatro regímenes característicos, en función del caudal del aire, Figura 2. Al aumentar la velocidad del gas, el sistema pasa del estado del lecho fijo, Figura 2a, al régimen de spouted bed, Figura 2b, a la velocidad mínima de spouting.

Si se aumenta el caudal de gas se alcanza el régimen de transición, Figura 2c, en el que las zonas de spout y anular comienzan a confundirse y a mayores caudales se alcanza el régimen de spouted bed diluido (jet spouted bed), Figura 2d, con una gran porosidad del lecho superior a 0.95.

El buen comportamiento de la tecnología de spouted bed en operaciones y procesos se basa en un movimiento vigoroso cíclico de las partículas del sólido.

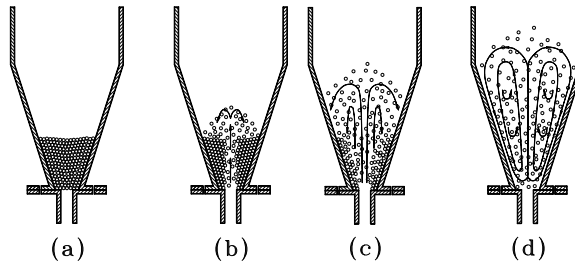


Figura 2. Posición de las partículas de lodo digerido en el contactor en los diferentes regímenes.

(a) lecho fijo, (b) régimen de spouted bed, (c) régimen de transición, (d) régimen de jet spouted bed.

## Materiales y Métodos

El proceso de secado del digestato de lodos de destintado de la industria papelera se ha llevado a cabo en una planta diseñada a tal efecto, Figura 3, que consta de un secadero spouted bed cónico, una soplante, una resistencia eléctrica antes de la entrada al secadero para el calentamiento del aire, termopares en diferentes posiciones longitudinales y radiales dentro del contactor, dos rotámetros y dos ciclones de alta eficacia.

El secadero, Figura 3, tiene un ángulo del cono de  $\gamma = 36^\circ$ , está fabricado en acero inoxidable AISI-310 y está aislado térmicamente.

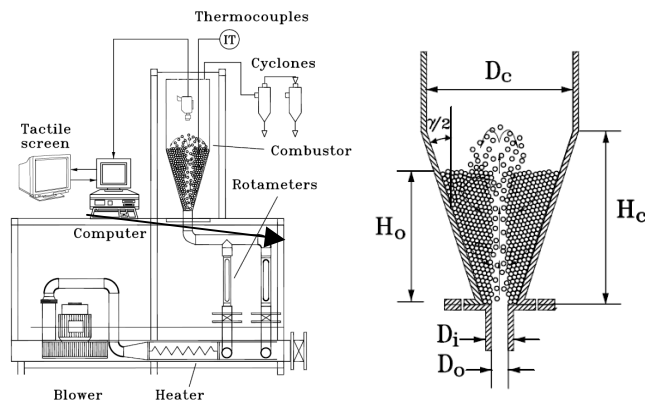


Figura 3. Planta piloto experimental con el secadero cónico spouted bed con partículas de lodo digerido en el régimen de spouted bed.

El material empleado ha sido digestato obtenido en la digestión anaerobia de lodo de destintado de la industria papelera, con un diámetro medio de partícula,  $d_s = 2.5-5 \text{ mm}$ , densidad,  $\rho_s = 1130 \text{ kg/m}^3$  y un contenido de humedad 100 wt% (dry basis) medido con un higrómetro Mettler Toledo HB43-S Halogen (precisión  $\pm 0.01 \%$ ).

Se han determinado las condiciones de operación y la velocidad mínima del gas para alcanzar el régimen de spouted bed. Durante el proceso de secado se han tomado muestras de digestato de lodos con el tiempo y se ha medido la humedad de los sólidos.

## Resultados y Discusión

Se han determinado las condiciones de operación de lechos de lodo digerido en el régimen de spouted bed a temperaturas del aire de entrada entre la temperatura ambiente y 140 °C. En la Figura 4 se han representado los valores de velocidad mínima necesaria para alcanzar el régimen de spouted bed en función de la temperatura de operación.

Se observa que comenzando en el lecho fijo, al aumentar la velocidad del gas se alcanza el régimen de spouted bed a todas las temperaturas del gas de entrada estudiadas.

La determinación de los valores de velocidad mínima del aire necesarios para alcanzar el régimen de spouted bed de los diferentes lechos de lodos digeridos se ha obtenido a partir de las de las fluctuaciones de presión, cuando la desviación estandar es menor de 10 Pa [8].

Al aumentar la temperatura del gas a la entrada, se requieren mayores caudales de aire para alcanzar el régimen de spouted bed.

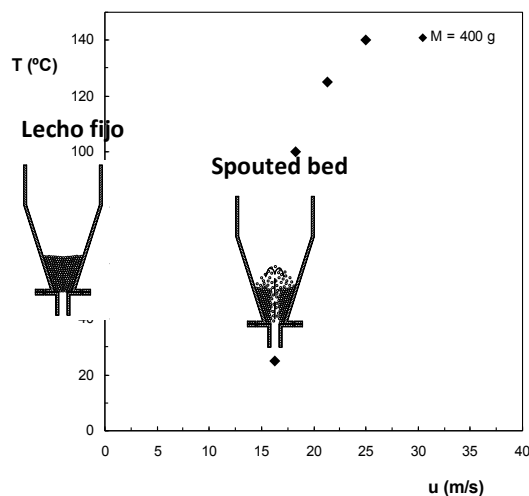


Figura 4. Efecto de la temperatura del flujo del aire en el régimen de spouted bed para lechos de lodo digerido. Sistema experimental:  $\gamma = 36^\circ$ ,  $D_o = 0.03$  m,  $M = 400$  g;  $d_s = 4.62$  mm, contenido inicial de humedad de 100 % (base seca).

Se ha llevado a cabo la evolución del proceso de secado a partir de la medida de la humedad de muestras de lodo digerido con el tiempo. Se ha analizado el efecto de la masa del lecho, de la temperatura del aire de secado y de la velocidad del aire a la entrada respecto a la velocidad para alcanzar el régimen de spouting.

Un aumento de la temperatura da lugar a una importante disminución del tiempo de secado, así de 105°C a 140°C daría lugar a una disminución del tiempo superior al 80%, y un aumento del caudal de aire da lugar a una disminución del tiempo de secado, del valor de la velocidad mínima del régimen de spouting hasta 1.2 veces ese valor, la velocidad del aire se reduce un 70%.

En la Figura 4 se ha representado la variación del contenido de humedad del lodo digerido con el tiempo durante el secado de lodo a 105 °C a la velocidad correspondiente al mínimo para obtener el régimen de spouting, desde un 100% de humedad (base seca) hasta el contenido de humedad en el equilibrio.

El contenido de humedad del sólido disminuye con el tiempo y se pueden distinguir tres períodos. En la primera etapa la disminución de la humedad es lenta debido al calentamiento de las partículas de sólido.

Como se aprecia, la disminución del contenido de humedad es más pronunciada en el segundo período, controlado por la evaporación de la humedad libre, mientras que en el tercer período, o período de velocidad decreciente, controlado por la difusión de humedad en el interior de los sólidos, la curva del contenido de humedad del sólido es prácticamente asintótica hasta alcanzar el valor de la humedad de equilibrio.

Una disminución de la masa del lecho desde 400 a 200 g, da lugar a una disminución del 50% del tiempo de secado y una disminución de 200 a 100 g disminuye un 40% el tiempo de secado.

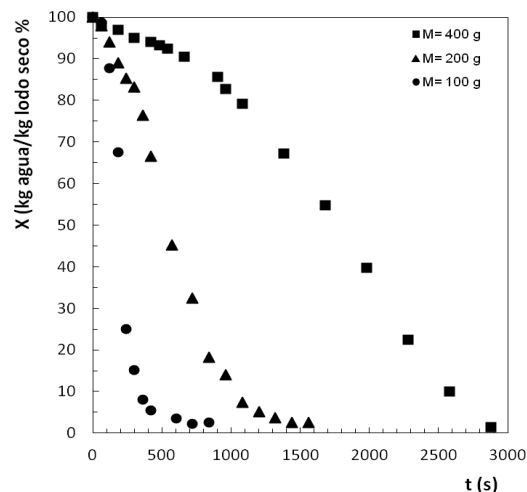


Figura 4. Evolución del contenido de humedad del lodo digerido con el tiempo.  $\gamma = 36^\circ$ ,  $D_o = 0.03$  m,  $M = 100, 200$  y  $400$  g;  $d_s = 4.62$  mm, contenido inicial de humedad 100 wt % (base seca),  $u = 1.02$   $u_{ms}$ ,  $T = 105$  °C.

## Conclusiones

Se ha probado la aplicabilidad de una instalación de spouted bed cónico para la valorización térmica por secado del digestato, obtenido en la digestión anaerobia de lodo de destintado de la industria papelera a temperaturas del aire a la entrada entre la temperatura ambiente y 140 °C.

Se han delimitado los rangos de los regímenes de operación del digestato en diferentes condiciones experimentales. Un aumento de la temperatura del lecho requiere una mayor velocidad mínima de spouting para alcanzar el régimen de spouted bed.

El contenido de humedad del digestato de lodo de destintado disminuye con el tiempo desde la humedad inicial la humedad de equilibrio del lodo, apreciándose tres etapas, en la segunda etapa disminuye proporcionalmente y posteriormente, en una tercera etapa, disminuye asintóticamente hasta alcanzar la humedad de equilibrio.

El efecto más importante en la disminución del tiempo de secado es el de la temperatura, seguido de la velocidad del aire y de la masa del lecho.

Agradecimientos al Ministerio de Economía y Competitividad por la financiación y a la Unión Europea por la cofinanciación con fondos FEDER de los Proyectos CTQ2014-59312-P y CTQ2017-89199-P.

## Referencias

1. Monte, M.C.; Fuente, E.; Blanco, A.; Negro, C., 2009. *Waste Management*, 29, 293-308.
2. Lou, R.; Wu, S.; Lv, G.; Yang, Q., 2012. *Applied Energy*, 90, 46-50.
3. San José, M.J., Alvarez, S., Ortiz de Salazar, A., Morales, A., Bilbao, J. 2010. *Chem. Eng. Transac.* 21 145-150.
4. San José, M.J., Alvarez, S., López, L.B., Olazar, M., Bilbao, J., 2010b. In *Drying Vol B*, Mujumdar, A.S., Series, Barleben-Magdeburg: Docupoint GmbH, 1242-1248.
5. San José, M.J., Alvarez, S., Peñas, F.J., García, I., 2013. *Chem. Eng. Sci.* 100, 413-420.
6. San José, M.J., Alvarez, S., López, L.B., García, I. 2011. *Drying of mixtures of agricultural wastes in a conical spouted bed contactor.* *Chem. Eng. Trans.*, 24, 673-678.
7. San José, M.J., Alvarez, S., López, R., 2017. *Comput. Aided Chem. Eng.*, 40, 517-522.
8. San José, M.J., Alvarez, S., 2015, *Chem. Eng. Technol.*, 38(4) 709-714.