

Modelización y optimización de sistemas de autoenfriamiento de envases alimentarios por adsorción a vacío

E. Hernández, A. López, A. Esnoz

Ingeniería del Frío y la seguridad Alimentaria (IFSA), departamento de Ingeniería de Alimentos y del Equipamiento Agrícola. Universidad Politécnica de Cartagena paseo Alfonso XII, 48, 30203, Cartagena (Murcia), España.
esther@telecablemurcia.com

RESUMEN

El objetivo general de este proyecto es desarrollar un sistema de autoenfriamiento de envases de alimentos líquidos optimizando la tecnología de enfriamiento por adsorción a vacío. Para ello se analizarán, seleccionarán y optimizarán las tecnologías existentes de autoenfriamiento de bebidas envasadas, desde el punto de vista técnico (facilidad de miniaturización y simplicidad, a la vez que efectividad) e higiénico, y de seguridad alimentaria. Se reproducirá el comportamiento termodinámico de cada una de las alternativas posibles, mediante prototipos, utilizando sistemas adecuados de medición, para poder desarrollar un modelo matemático del sistema que contemple por un lado el proceso exotérmico que tiene lugar en el adsorbedor, y por otro el proceso de evaporación. Se analizarán las ventajas e inconvenientes de cada una de las alternativas seleccionadas, para ser aplicadas en envases activos autoenfriantes en bebidas.

Palabras clave: adsorbedor; proceso exotérmico; evaporación; modelo matemático.

1. Introducción

Mientras que los envases convencionales simplemente actúan como una barrera de protección del alimento, los *envases activos* pueden hacer mucho más. Estos materiales de envasado interactúan con el producto para mejorarlo de alguna manera, o para darle al consumidor mejor información sobre el estado en el que está.

La última propuesta para hacer más activo el envase de cerveza es la lata autoenfriante (*self cooling can*) (Kleiner, 2004). En el sector de la cerveza también se han lanzado al mercado, desde 2000 los barriles metálicos autoenfriantes, (*self chilling keg*), con el sistema *Coolkeg*, cubriendo las capacidades de barriles desde 5 litros a 20 litros, (desarrollado y comercializado por la empresa Cool System Bev., GmbH, de Alemania, www.coolsystem.com).

Uno de los problemas de estos envases activos es que son caros, tanto en su desarrollo como en su fabricación. Esta es la razón de que tengan un crecimiento comercial relativamente lento. Pero, esto está cambiando porque las empresas alimentarias en general tratan de poner en el mercado productos más frescos, con mayor calidad gustativa y nutritiva, y con mayor comodidad en su consumo, aunque sean un poco

más caros. Estos alimentos, inicialmente llamados “convenience foods” (alimentos que requieren una mínima preparación para su consumo), vienen denominándose actualmente: “ready to eat foods” o “ready to drink beverages”, según sean alimentos sólidos o líquidos.

El proceso de adsorción de gases y vapores en sólidos adsorbentes como zeolita, sílica gel, carbón activo, etc., ha sido empleado en diferentes campos de la ingeniería de procesos, pero apenas existen aplicaciones en refrigeración debido al uso generalizado de los sistemas de producción de frío por compresión mecánica [1, 2]. Hoy día los sistemas de refrigeración por adsorción constituyen una alternativa real a los sistemas tradicionales de compresión mecánica, ya que utilizan refrigerantes ecológicos, como el agua, y, por otro lado, el ciclo de adsorción puede funcionar con un suministro de calor procedente de energía solar u otras fuentes de energía de bajo coste [2].

Actualmente, para el desarrollo del envase autocalentable o autoenfriante, se utilizan tecnologías basadas en procesos de tipo exotérmico (óxido de calcio con agua), y de tipo endotérmico (enfriamiento evaporativo, adsorbiendo el vapor de agua en un desecante a

vacío), respectivamente. Esta última tecnología se basa en la bien conocida tecnología de producción de frío por adsorción [3], utilizando agua como fluido frigorígeno y zeolita como adsorbente ubicada en un espacio a vacío, pero sin utilizar ningún sistema de regeneración de la zeolita (Guilleminot et al., 1981; Ziegler, 2002; López et al., 2003).

Todas estas tecnologías implican el uso de unos dispositivos relativamente complejos lo que hace que repercutan en el envase un coste excesivamente elevado. Además, los sistemas desarrollados hasta el momento provocan ciertos recelos técnicos y de seguridad alimentaria tanto en las propias industrias de envasado de bebidas y cervezas, como en los propios consumidores.

Por todo lo anterior, en este Proyecto se plantean los siguientes objetivos:

1. Estudiar el sistema actualmente comercializado de enfriamiento por adsorción a vacío, para tratar de disminuir el volumen ocupado por el sistema, y ver las posibilidades de adaptación a nuevos envases tanto metálicos como de plástico.
2. Estudiar las posibilidades de uso de otro sistema de autoenfriamiento rápido del envase, que signifique una alternativa real al sistema anterior por adsorción, para envases hasta de 10 l, tanto metálicos como de plástico.
3. Obtener el diseño óptimo y modelo matemático del sistema de autoenfriamiento más adecuado para envases metálicos, y plásticos de aplicación en refrescos y cerveza.

2. Materiales y Métodos

1) Estudio de los sistemas actualmente comercializados de autoenfriamiento de bebidas envasadas, que utilizan el sistema de enfriamiento evaporativo y adsorción.

- Revisión bibliográfica con análisis de todas las bases de datos disponibles, incluyendo FSTA, Internet, Bases de patentes, y todas las bases de revistas electrónicas referentes a sistemas de enfriamiento y envasado de alimentos y bebidas.
- Adquisición y análisis en laboratorio de todos los sistemas presentes en el mercado.
- Estudio físico-químico de los componentes del sistema:

a) evaporador: fluidos refrigerantes, materiales de retención de líquido y materiales que forman la pared en el evaporador.

b) adsorbedor: zeolitas y otros materiales desecantes.

Se han realizado análisis con DSC para la identificación de los materiales utilizados en la

fabricación de fibras. Para la determinación de la adsorción y desorción de distintas zeolitas se utilizó un analizador termogravimétrico Shimadzu TGA-50 que mide la variación de masa en un compuesto en función de la temperatura. Para la caracterización dimensional de las fibras se ha utilizado un microscopio de barrido electrónico Hitachi S-3500N.

- Estudio termodinámico de cada uno de los dispositivos de autoenfriamiento de bebidas envasadas.
- Estudio de la seguridad alimentaria y del diseño higiénico según las recomendaciones de la EHEDG y la FDA de todos los componentes de los dispositivos de autoenfriamiento de bebidas envasadas presentes en el mercado.
- Estudio de las posibilidades de mejora técnica e higiénica de los sistemas comercializados actualmente.

2) Análisis y selección de tecnologías alternativas de autoenfriamiento de bebidas envasadas.

- Estudio y selección de las tecnologías identificadas de producción de frío, en envases activos autoenfriantes para bebidas, en envases metálicos y de plástico, con capacidades de 1, 2, 3, 4, 5 y 10 L. Análisis de las ventajas e inconvenientes de cada una de las alternativas seleccionadas, para ser aplicadas en envases activos autoenfriantes para bebidas, y hasta un volumen de 10 L.

3) Estudio de la viabilidad técnica y económica de las tecnologías de producción de frío y elección del sistema más interesante desde el punto de vista técnico y económico.

4) Desarrollo del prototipo funcional del sistema de autoenfriamiento de bebidas envasadas, de aplicación a cada uno de los tipos de envase: metálicos (lata y barril de 10 L), y de plástico (de 1/3 y 1, 2, 3, 4, 5 y 10 L).

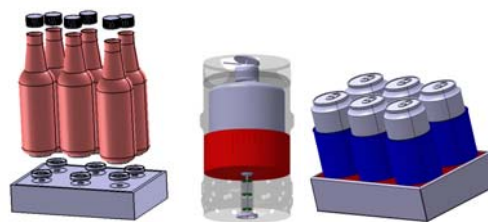


Figura 1. Prototipos autoenfriante para botellas de PET, barril y latas.

3. Resultados y Discusión

Se han realizado ensayos experimentales en los diferentes prototipos de latas, botellas y barriles. A continuación se muestra un ensayo experimental llevado a cabo en un sistema

formado por un único lecho en el que se encuentra el evaporador que contiene como refrigerante agua absorbida en un soporte de fibra. El adsorbente es de geometría cilíndrica, de 9 cm de diámetro y 7 cm de altura, encerrado en un envase de acero inoxidable con una pared de 1 mm de espesor. El material adsorbente utilizado es zeolita granulada de 2-3 mm de diámetro. La zeolita utilizada es artificial de la marca Zeo-tech, y tiene una capacidad de adsorción de aproximadamente el 30% de su masa.

Los ensayos experimentales se han realizado trabajando con niveles de vacío en el evaporador/adsorbente comprendidos entre 0.2 y 10 mbar utilizando una bomba de vacío de marca Vacuubrand modelo GZ-6 con un nivel de vacío máximo de 10^{-4} mbar.

En este trabajo se analiza el modelo matemático del proceso de adsorción de vapor de agua, obteniendo las curvas o perfiles de distribución de temperatura en el interior de la masa de zeolita y en la pared metálica del adsorbente, en función de distintos niveles de vacío.

El modelo matemático asume las siguientes hipótesis:

- La temperatura en la cámara del adsorbente se considera uniforme en todos sus puntos.
- La presión se considera uniforme en todo el sistema (evaporador y adsorbente).
- El refrigerante es adsorbido uniformemente en el adsorbente.
- La temperatura de evaporación es la misma que la temperatura del líquido refrigerante en el evaporador.
- La resistencia a la transferencia de calor y de masa en el adsorbente es despreciable.

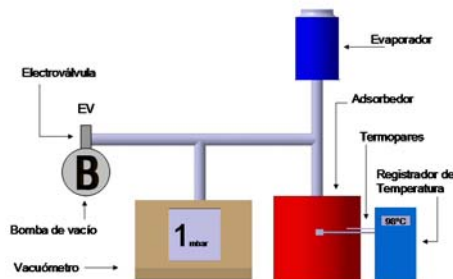


Figura 2. Esquema del equipo utilizado para la realización de los ensayos.

a) Ecuaciones de adsorción y de equilibrio

Para calcular el agua adsorbida en el proceso se ha asumido un modelo del tipo LDF (*linear driving*

force) ampliamente utilizado en la bibliografía [5].

$$\frac{dx}{dt} = k_1 \cdot (x_{eq} - x) \quad (1)$$

Donde:

- x = Cantidad de agua adsorbida, kg/kg adsorbente.
- x_{eq} = Cantidad de agua adsorbida en el equilibrio, kg/kg adsorbente.
- T_z = Temperatura de la zeolita, K.
- T_s = Temperatura de saturación, K.
- k_1 = Constante de cinética de adsorción.

La cantidad de agua adsorbida en el equilibrio se ha calculado a través de la ecuación propuesta por Gorbach *et al*, 2004 [6].

Se ha determinado la constante de cinética de adsorción k_1 utilizando las curvas obtenidas de evolución de la cantidad de agua adsorbida con respecto al tiempo para cada nivel de presión (Fig.3).

b) *Balances de energía en el adsorbente y en la pared del adsorbente.*

- Balance de energía en el material adsorbente:

$$\begin{aligned} [(m_z + x) \cdot (C_z + x \cdot C_a)] \cdot \frac{dT_z}{dt} = -(kF) (T_z - T_m) + \\ \Delta H m_z \cdot \frac{dx}{dt} - ((m_z + x) \cdot T_z \cdot C_a + T_z \cdot (C_z + x \cdot C_a)) \frac{dx}{dt} \end{aligned} \quad (2)$$

Donde:

- C_z = Calor específico zeolita, J/kg K.
- C_a = Calor específico agua, J/kg K.
- T_m = Temperatura pared metálica, K.
- m_z = Masa de zeolita, kg.
- kF = Coeficiente global de transferencia de calor, W/K.
- ΔH = Entalpía de adsorción del vapor de agua, J/kg.

- Balance de energía en la pared del material adsorbente:

$$m_m C_m \cdot \frac{dT_m}{dt} = (kF) (T_z - T_m) - h_{ext} \cdot (T_m - T_{air}) \quad (3)$$

Donde:

- C_m = Calor específico del metal, J/kg K.
- m_m = Masa del metal, kg.
- T_{air} = Temperatura del aire, K.
- h_{ext} = Coeficiente de transmisión de calor entre zeolita y la pared, W/K.

Las curvas experimentales obtenidas (Fig.4) muestran que la temperatura máxima alcanzada por el material adsorbente aumenta conforme disminuye la presión, alcanzando a la presión de

1 mbar la temperatura máxima obtenida de 106°C. A la presión de 5 mbar la temperatura máxima alcanzada es de 80°C, y a 8 mbar apenas se alcanzan los 55°C. Estas temperaturas máximas obtenidas en el adsorbedor están directamente relacionadas con la rapidez con la que se evapora el agua en el evaporador y se adsorbe en el adsorbedor. Así, la mayor temperatura alcanzada se corresponde con el nivel de presión menor, y con la menor temperatura de evaporación en el evaporador, y con una mayor cantidad de agua evaporada y adsorbida, si se compara con las demás temperaturas alcanzadas a presiones superiores (Fig.5). Se observa que, en una misma cantidad de tiempo, a 1 mbar se adsorbe casi el doble de agua que a 5 mbar, y a 5 mbar se adsorbe también prácticamente el doble que a 8 mbar.

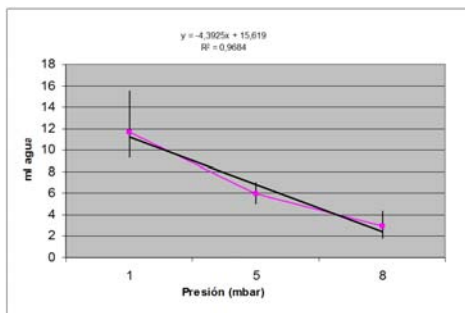


Figura 3. Influencia de la presión sobre la cantidad de vapor de agua adsorbida en la zeolita.

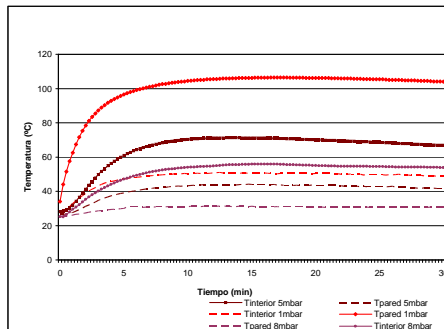


Figura 4. Evolución de la temperatura interior de la zeolita y de la pared del adsorbedor.

4. Conclusiones

Los sistemas de refrigeración por adsorción constituidos por un solo lecho, pueden ser aplicados a pequeños sistemas de enfriamiento por adsorción en ciclo abierto que no utilizan sistemas forzados de evacuación del calor en el adsorbedor. El modelo matemático que se presenta permite predecir adecuadamente los fenómenos de transferencia de calor que en éste tienen lugar. Se ha establecido un modelo matemático que permite optimizar el diseño de

adsorbedores en función de la presión y de la cantidad de líquido refrigerante adsorbido.

5. Agradecimientos

Son muchas las personas a las que quiero agradecer que me hayan apoyado durante la realización de este trabajo:

Antonio López Gómez y Arturo Esnoz Nicuesa, directores de este trabajo por el apoyo, el ánimo y los consejos brindados.

A mis compañeros del Departamento de Ingeniería de los Alimentos y del Equipamiento Agrícola, Yulisa, Antonio, Mari Ángeles, Fayiny, y May.

A la empresa Damm, S.A. por su financiación y colaboración en la realización de este trabajo.

6. Referencias bibliográficas

- [1] A. Gorbach, M. Stegmairer and G. Eigenberger. Measurement and Modelling of Water Vapor Adsorption on Zeolite 4A-equilibria and Kinetics. *Adsorption* 10, 29-46, 2004.
- [2] D.C. Wang, Z.Z. Xia, J.Y. Wu. Design and performance prediction of a novel zeolite-water adsorption air conditioner. *Energy Conversion and Management* 47, 590-610, 2006.
- [3] G. Maggio, A. Freni, G. Restuccia. A dynamic model of heat and mass transfer in a double-bed adsorption machine with internal heat recovery. *International Journal of Refrigeration* 29, 589-600, 2006.
- [4] Lu YZ. *Adsorption air-conditioning system with zeolite-water working pair powered by waste heat of fuel gas exhausted from Diesel locomotive*. PhD dissertation. Submitted to Shanghai Jiaotong University 2002.
- [5] Sakada A, Suzuki M. Fundamental study on solar powered adsorption cooling system. *J Chem Eng Jpn* 17, 52-57, 1984.
- [6] Sircar, S. and J.R. Hufton, "Why does The Linear Driving Force Model for Adsorption Kinetics Work". *Adsorption*, 6, 137-147 (2000).