

Estudio de la producción de hielo líquido en intercambiadores de placas de superficie rascada rotativos

D. S. Martínez, J. P. Solano, F. Illán, A. Viedma.
 Dep. Ingeniería Térmica y de Fluidos, Universidad Politécnica de Cartagena
 Campus Muralla del Mar, 30202 Cartagena (Murcia)
 Teléfono: 968325994
 E-mail: davids.martinez@upct.es

Resumen: Durante los últimos años se han desarrollado distintas técnicas de generación de hielo líquido, siendo el rascado de superficies de intercambio de calor la más usada comercialmente. El presente trabajo, enfocado en el estudio de la transferencia de calor, aporta resultados experimentales sobre la producción de hielo líquido en intercambiadores de placas con superficie rascada mediante movimiento rotativo. El hielo líquido se produce a partir de disoluciones con distinta concentración de cloruro de sodio en agua. Coeficientes de transmisión de calor, tiempo de producción y características de los cristales de hielo son algunos de los resultados obtenidos.

1. Introducción

Una de las principales ventajas del hielo líquido comparado con el almacenamiento y uso del hielo común es la facilidad en el transporte, siendo posible su bombeo. Pero sin duda la gran ventaja que ofrece, es su empleo como refrigerante, debido a su alta capacidad de almacenamiento térmico y una temperatura de enfriamiento constante. La fabricación de hielo líquido mediante intercambiadores de superficie rascada está beneficiada por los altos coeficientes de transmisión del calor inducidos en el proceso. La acción de rascado interrumpe la formación de la capa límite y además mejora el intercambio de calor entre el centro y las proximidades de la pared [1]. Además, gracias al movimiento continuo de los rascadores se previene el crecimiento de los cristales en la superficie de intercambio hasta una proporción indeseada. La mayoría de los trabajos existentes son sobre generadores de tipo cilíndrico, con su superficie interior rascada por medio de una o varias cuchillas dotadas de movimiento rotativo. Qin *et al* [2] describieron las tres etapas en las que tiene lugar la transmisión de calor: enfriamiento, nucleación y cristalización. En general el hielo se obtiene a partir de soluciones electrolíticas con una temperatura de congelación menor a la del agua. El efecto de la concentración del electrolito y la frecuencia de rascado ha sido estudiada previamente por Vaessen *et al* [3]. Posteriormente diversas técnicas como el PIV y termometría de cristal líquido han sido aplicadas para el estudio del flujo y las temperaturas en este tipo de intercambiadores (Pascual *et al* [4]).

Con el objetivo de estudiar el mecanismo de transferencia de calor, este trabajo presenta resultados experimentales y numéricos de la producción de hielo líquido, a partir de distintas concentraciones de cloruro sódico en agua, en un novedoso

intercambiador de calor de placas de superficie rascada rotativo (ICPSRR).

2. Estudio del problema

El flujo másico requerido para alcanzar un cierto nivel de enfriamiento \dot{Q} en un sistema con una única fase líquida se puede calcular a partir de

$$\dot{Q} = \dot{m}c_p\Delta T = \dot{V}\rho c_p\Delta T \quad (1)$$

y en el caso de un sistema operando con hielo líquido resulta más apropiado expresar lo anterior en la forma

$$\dot{Q} = \dot{m}\Delta h = \dot{V}\rho\Delta h \quad (2)$$

En la diferencia de entalpía Δh están incluidos tanto el calor sensible como el calor latente de fusión. En estas expresiones \dot{m} se corresponde con el flujo másico, \dot{V} es el flujo volumétrico, ΔT es el cambio de temperatura entre la entrada y la salida del equipo enfriador, ρ es la densidad del fluido y c_p es el calor específico del mismo. La capacidad de transporte de calor del hielo líquido en equilibrio es por lo tanto proporcional al cambio de entalpía, Δh , que siempre será mucho más alta para el hielo líquido que para una disolución acuosa monofásica. La producción del hielo líquido puede ser descrita según,

$$\dot{Q} = V \left(c_h L_h + (1 - c_h) \rho c_p \right) \Big|_{t_1}^{t_2} \quad (3)$$

donde \dot{Q} es el calor cedido entre los instantes t_1 y t_2 , c_h es la proporción de hielo y L_h es el calor latente de fusión. Las propiedades de la salmuera (ρ , c_p) se evalúan a la temperatura media de la misma, T_f . El calor es absorbido a través de la superficie de congelación, continuamente rascada por las placas. Dada una concentración inicial de sal, para cada aumento de la cantidad de hielo (que solo contiene agua) se producirá un aumento de la concentración de sal en el fluido restante, bajando continuamente el

punto de congelación. Si la superficie es enfriada a su vez por un fluido refrigerador, se deberá cumplir que

$$\dot{Q} = \dot{m}_r c_{p,r} \Delta T_r \quad (4)$$

donde ahora \dot{m}_r es el gasto másico del fluido enfriador así como $c_{p,r}$ es su calor específico y ΔT_r es el salto de temperaturas entre la entrada y la salida de la unidad de producción. El flujo de calor convectivo entre fluido y pared puede ser cuantitativamente caracterizado mediante el coeficiente de transmisión de calor h , definido de la siguiente manera,

$$h = \frac{\dot{Q}}{A(T_f - T_p)} \quad (5)$$

donde A es el área de intercambio y T_p es la temperatura de la pared donde cristaliza el hielo. En el proceso de formación de hielo líquido, así como en cualquier otro proceso de transferencia de calor, el valor de h es de gran importancia. Para un flujo de calor fijo, valores de h altos implican diferencias de temperatura pequeñas entre fluido y pared, lo que implica un buen mezclado promovido por el movimiento de las palas.

3. Instalación experimental

El banco de ensayos de producción de hielo líquido mediante ICPSRR (Fig. 1) consta de una unidad de producción de hielo líquido (ICPSRR) un circuito de enfriamiento intermedio y un circuito de refrigeración (ver Fig. 5).

El intercambiador de calor consiste en un depósito de 28 litros hecho de acero inoxidable, con 600mm de diámetro y 100mm de altura. La superficie de transferencia de calor se encuentra en el fondo, siendo continuamente raspada por cuatro palas rascadoras accionadas por un eje central, acoplado a un motor eléctrico. Dicha superficie de congelación es enfriada inferiormente por un flujo continuo de cloruro de calcio disuelto en agua y acumulada en un tanque de amortiguamiento. Este fluido intermedio es a su vez enfriado por la expansión de un flujo de refrigerante R507 en un evaporador compacto.

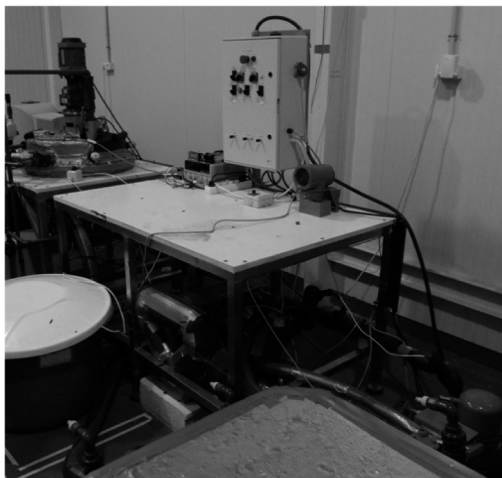


Fig. 1: Banco de ensayos de producción de hielo líquido mediante ICPSRR.

La temperatura de la salmuera es determinada mediante cuatro sondas PT100 inmersas, mientras que la temperatura de pared viene proporcionada por 26 termopares directamente soldados a la placa de intercambio y regularmente distribuidos. El calor absorbido por el fluido enfriador se obtiene mediante la medida de las temperaturas de entrada y salida (sondas PT100) y la medida del gasto másico mediante un caudalímetro Coriolis (Eq. (4)). La velocidad de rascado, la temperatura del fluido enfriador así como la concentración de NaCl en la salmuera son los parámetros que determinan cada ensayo. Las concentraciones de sal empleadas van desde 3% a 10% obteniéndose un máximo de 20% de hielo en cada ensayo.

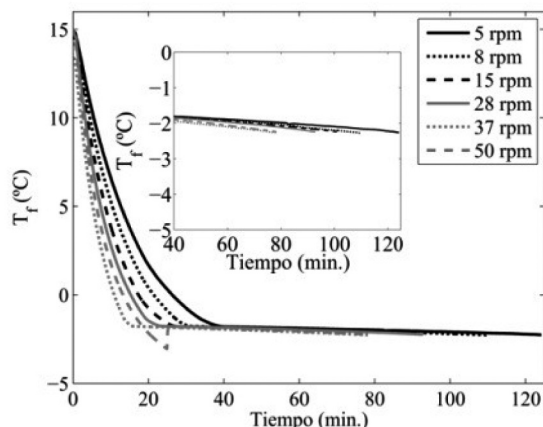


Fig. 2: Evolución de la temperatura de la salmuera (3% NaCl) durante el proceso de producción de 20% de hielo líquido para varios velocidades de rascado.

5. Resultados

La Fig. 2 muestra la evolución de las temperaturas de salmuera con el tiempo para distintas velocidades de giro de las palas y una concentración de sal inicial de 3%. La duración de cada ensayo vino determinada por el tiempo necesario hasta alcanzar una proporción de hielo del 20%, estimada a partir de la temperatura T_f mediante correlaciones. La temperatura de congelación a la que comienza la formación de hielo se puede apreciar en la estabilización de las curvas, correspondiéndose a $-1,8$ °C. Como se puede observar, una mayor velocidad de giro de las palas

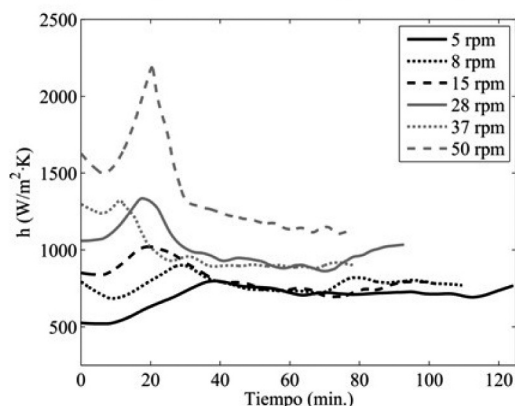


Fig. 3: Evolución del coeficiente de transmisión de calor durante el proceso de producción de hielo líquido (3% NaCl-20% hielo) para varias velocidades de rascado.

implica un enfriamiento más rápido y como consecuencia un adelanto del tiempo de inicio de la congelación. Sin embargo para 50 rpm existe un cambio en el comportamiento, con una velocidad de enfriamiento inicial inferior al caso de 37 rpm. En este caso se puede observar además el fenómeno de subenfriamiento, por el cual el líquido alcanza temperaturas inferiores a la de congelación, para luego establecerse bruscamente en la temperatura de congelación una vez comenzada la nucleación. La Fig. 3 muestra los valores para el coeficiente de transmisión de calor h , calculados según la Eq. (5) y donde T_p corresponde al promediado de la medida de los termopares. En general mayores velocidades de rotación implican coeficientes de transmisión de calor más altos. En todos los casos se observa un pico inicial debido a la acumulación de calor sensible que luego se transforma en calor latente.

6. Simulación numérica

Los resultados experimentales pueden ser extendidos mediante simulaciones numéricas. El método de los volúmenes finitos, aplicada a través el software OpenFOAM permite realizar simulaciones del flujo y la transmisión del calor en el interior del intercambiador. A modo ilustrativo, la Fig. 4 muestra los isocontornos de velocidad tangencial para un

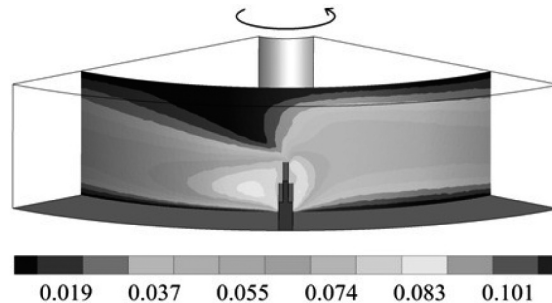


Fig. 4: Isocontornos de velocidad tangencial (m/s) en un plano $r/R=0.5$.

plano con $r/R=0,5$, donde la pala rascadora se encuentra perpendicular al papel.

7. Conclusiones

Se ha estudiado el efecto de la velocidad de giro en las palas rascadoras a una determinada concentración de sal (3% NaCl) y una determinada diferencia de temperaturas entre fluido enfriador y salmuera ($\Delta T=6^{\circ}C$). Los mecanismos de transmisión de calor involucrados en el problema se han caracterizado a través del coeficiente de transmisión de calor, relacionándolos con el tiempo de producción de hielo (20%) y velocidad de giro (5-50 rpm).

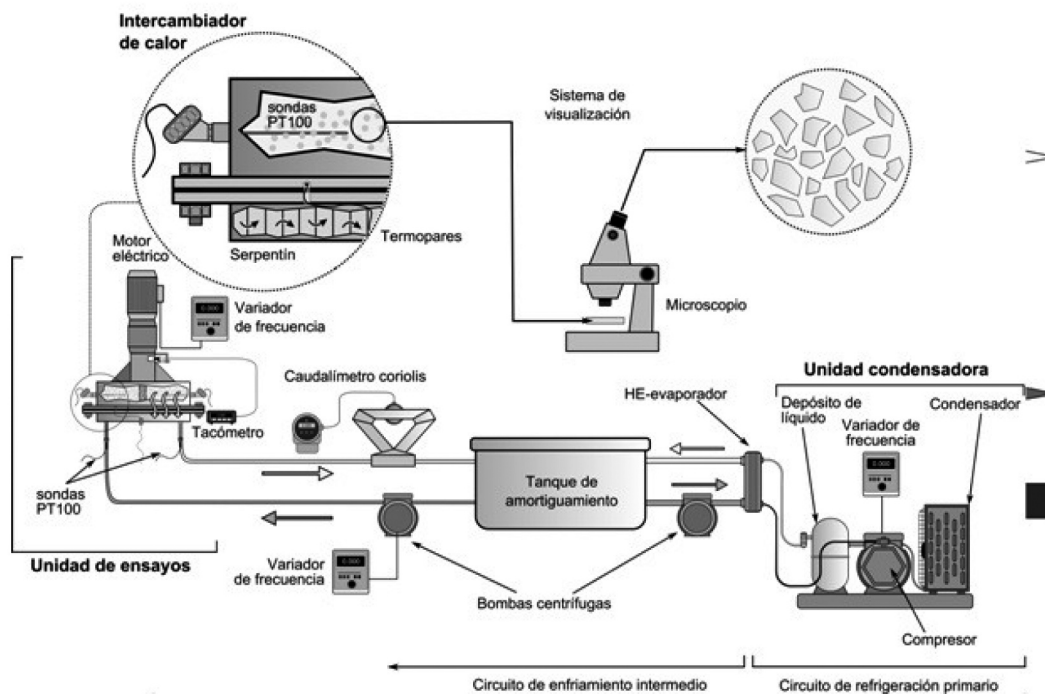


Fig. 5: Esquema de la instalación de producción de hielo líquido.

Referencias

[1] Rao, Chetan S., Hartel, and Richard W. (2006) Critical Reviews in Food Science and Nutrition. Vol. 46, 207–219.

[2] Qin, F.G.F., Chen, X.D., and Russell, A.B. (2003a) AIChE Journal, Vol. 49, 1947– 1955.

[3] Vaessen, R.J.C., Seckler, M.M., and Witkamp, G.J. (2003) Heat Mass Transfer, Vol. 47, 717–728.

[4] Pascual, M. Ravelet, F. Delfos, R.Derksen, J.J. Witkamp, G.J. (2009) Chemical Engineering Science, Vol. 64, 2127-2135.