

Estudio de los procesos de cambio de fase de PCM encapsulado para el almacenamiento de energía solar térmica en la producción de ACS

Cristina Bianqui, Alberto Egea*, Alberto García, Antonio Viedma, José Pérez-García

Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos. Universidad Politécnica de Cartagena, Campus Muralla del Mar, Calle Doctor Fleming, s/n, 30202 Cartagena, España.
e-mail: alberto.egea@upct.es

Resumen: *Este estudio tiene como objetivo examinar los procesos de fusión de PCM encapsulado en una cápsula de forma cilíndrica, fabricada en acero inoxidable. Los encapsulados se emplean para almacenamiento de energía térmica para generación de ACS. Tiene un diámetro de 60 mm y una altura de 20 mm. El PCM elegido es la parafina RT35HC, que tiene un punto de fusión alrededor de 35 °C. Se realizan experimentos en una cámara de ensayos térmicos, colocando la cápsula de forma vertical. La temperatura de dicha cámara se controla mediante un PID. Se lleva a cabo un análisis del campo de temperatura del PCM utilizando termopares. Se ha demostrado que los sensores son capaces de detectar la evolución gradual de la fase líquida del PCM y su acumulación en la parte superior de la cápsula debido a su menor densidad.*

Palabras clave: PCM, Almacenamiento de energía térmica, Agua caliente sanitaria, encapsulación

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas dos décadas, el mundo ha experimentado un notable aumento en el consumo de energía. En particular, el sector residencial representa aproximadamente un tercio del consumo total de energía, con cerca del 70% destinado a la calefacción de agua y de edificios [1]. El crecimiento de los sistemas solares de agua caliente sanitaria (ACS) con colectores solares ha sido especialmente significativo.

Sin embargo, a pesar de este avance, todavía hay desafíos por superar. La principal desventaja es la intermitencia inherente de la energía solar. Por lo tanto, el almacenamiento de energía es crucial para la integración de fuentes de energía renovable intermitentes. En los últimos años, se han utilizado los Materiales de Cambio de Fase (PCM, por sus siglas en inglés) como una solución alternativa a los métodos tradicionales de almacenamiento. No obstante, estos materiales presentan algunos inconvenientes, siendo uno de los más importantes su baja conductividad térmica, lo que afecta principalmente al proceso de liberación de energía.

Por este motivo, el empleo de sistemas de almacenamiento híbridos PCM/ACS, que combine el almacenamiento de energía sensible (agua) y latente (PCM) se presenta como una solución prometedora, por la facilidad de implementación en sistemas ya existentes, y una gran rapidez en la obtención de ACS por parte del usuario final.

En los últimos años, se ha realizado un esfuerzo significativo en la investigación [2–4]. La encapsulación se clasifica en tres tipos según el diámetro de la cápsula [5]: nanoencapsulación ($< 1 \mu\text{m}$), microencapsulación ($1 \mu\text{m} - 1 \text{mm}$) y macroencapsulación ($> 1 \text{mm}$). Para los sistemas solares de lecho fluido, el macroencapsulado es la opción más adecuada desde un punto de vista técnico-económico. En este campo, se han llevado a cabo numerosos estudios, siendo la geometría esférica la más común [6–8]. Sin embargo, como se menciona en [9,10], existen otras geometrías, como las cápsulas cilíndricas, que podrían optimizar los procesos de cambio de fase gracias a su relación área/volumen superior.

Solo unos pocos estudios han analizado experimentalmente y en detalle los procesos de fusión y solidificación dentro de las cápsulas, siendo casi todos estos estudios centrados en cápsulas esféricas. Rizan et al. [11] visualizaron y analizaron cualitativamente el proceso de fusión en una cápsula esférica, destacando la importancia de la convección natural. Observaron que maximizar la relación área de intercambio/volumen del PCM es crucial. Raul et al. [12] estudiaron con dos sensores de temperatura los efectos de la flotación del PCM dentro de la cápsula. Hasta la fecha, se ha caracterizado en cierta medida el proceso de fusión y, en menor grado, el de solidificación en cápsulas esféricas.

Existen muchos más estudios analíticos y numéricos que empíricos sobre los procesos de cambio de fase en encapsulados. Veerappan et al. [13] analizaron numéricamente el efecto del tamaño de las cápsulas esféricas, observando que a mayor diámetro, mayores son los tiempos de fusión y solidificación. Liao et al. [40] compararon diversos modelos analíticos disponibles para estudiar los procesos de fusión en encapsulados esféricos de distintos tamaños, encontrando amplias discrepancias en los resultados, con diferencias en las predicciones de los tiempos de fusión de hasta 10 veces. El problema radica en que diferentes autores suelen utilizar un término de conductividad efectiva para modelar la transmisión de calor con cambio de fase, que implica un mecanismo mixto de conducción/convección natural. La falta de datos experimentales limita el uso de estas correlaciones de conductividad efectiva, ya que a menudo se obtienen de la literatura que no considera el cambio de fase dentro de las cápsulas.

Dado los datos experimentales limitados sobre el comportamiento del PCM encapsulado, en este estudio se llevan a cabo pruebas de fusión en una cápsula cilíndrica de acero inoxidable, destinada al almacenamiento y recuperación de energía en sistemas de agua caliente sanitaria (ACS). El PCM elegido es la parafina RT35HC de Rubitherm. Para analizar los procesos de cambio de fase del PCM, se colocan termopares en el interior del encapsulado.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El PCM empleado en este estudio es RT35HC de Rubitherm cuyas propiedades pueden verse en la Tabla 1. Estas propiedades han sido medidas por los autores de este estudio.

Tabla 1. Márgenes de página para manuscritos.

Propiedades	Valores
Temperatura de fusión [°C]	32-38
Temperatura de solidificación [°C]	34-27
Entalpía de cambio de fase [kJ/kg]	235
Calor específico [kJ/(kg·K)]	1.9
Densidad a 25°C [kg/l]	0.88
Densidad a 45 °C [kg/l]	0.79

Por otro lado, el encapsulado estudiado tienen un diámetro de 60 mm y una altura de 20 mm y el material empleado ha sido acero inoxidable. Su interior ha sido instrumentado por termopares tipo T, previamente calibrados en un baño termostático. La disposición de los termopares puede verse en la Figura 1.

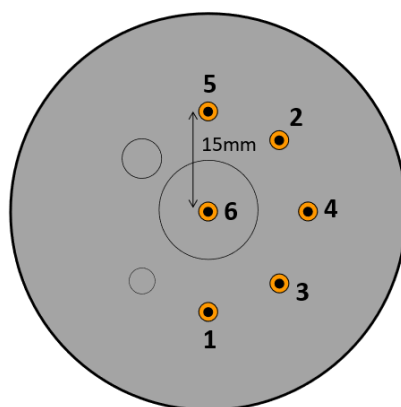


Figura 1. Disposición de los termopares

Los ensayos, se realizan en una cámara de ensayos térmicos cuya temperatura se encuentra controlada por un PID. Asimismo, se han colocado termopares en distintos puntos de la cámara de ensayos térmicos para confirmar la homogeneidad de la temperatura en el interior de esta. En la Figura 2 puede verse la disposición de los termopares y del encapsulado en el interior de la cámara.

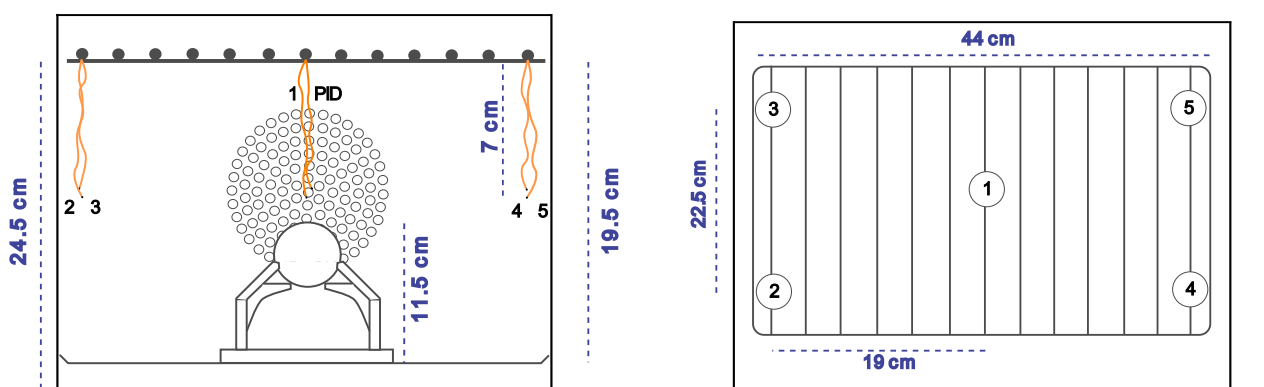


Figura 2. Disposición de termopares en el interior de la cámara de ensayos térmicos.

Una sonda ubicada en la posición “1” es la empleada para regular la temperatura con el PID.

3. RESULTADOS

Se han realizado ensayos a distintas temperaturas. En la Figura 3 puede verse un ensayo de fusión. En el ensayo, la temperatura del encapsulado fue acondicionada a 25 °C en un baño termostático. Posteriormente, se introdujo en la cámara de ensayos, que se encontraba a una temperatura de 50 °C.

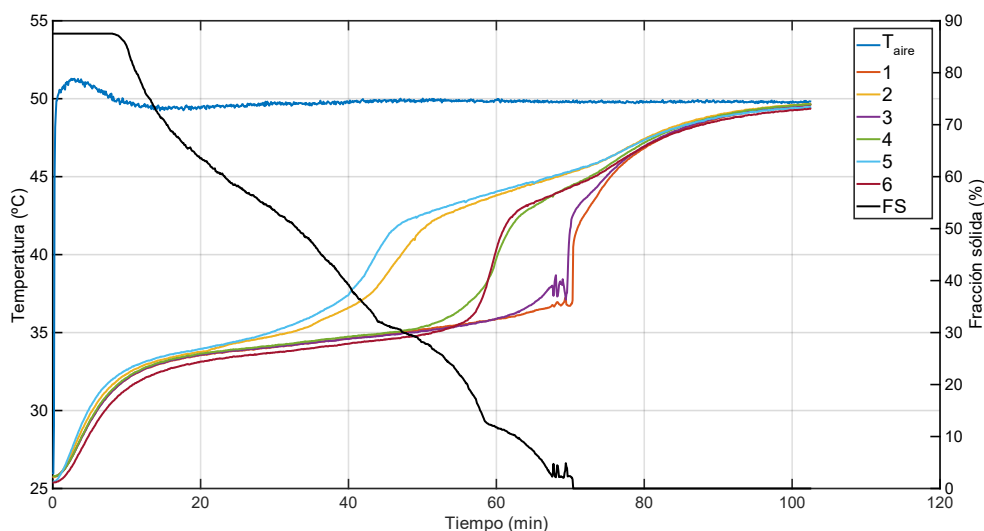


Figura 3. Ensayo de fusión

La temperatura identificada como “ T_{aire} ” corresponde con la temperatura media de las sondas dispuestas en la cámara de ensayos (Figura 2) y las sondas identificadas por los números 1-6 son los termopares del encapsulado (Figura 1). Como puede verse en la Figura 3 la temperatura en el interior de la cámara de ensayos permanece constante a la temperatura de consigna (50 °C), y sólo presenta una ligera perturbación (alrededor de 5 min) en el momento de introducir el encapsulado en el interior.

Por su parte, se observa cómo el PCM dentro de la cápsula se derrite desde los puntos en la zona superior hacia los de la zona inferior. Por lo tanto, el PCM alrededor de los termopares situados en las posiciones superiores (5 y 2) alcanzan antes el cambio de fase que el resto. Posteriormente, lo hace el material situado en la parte central (zona de los termopares 4 y 6). Por último, alcanza el cambio de fase el PCM situado en la parte inferior del encapsulado (zona de los termopares 1 y 3). Esto se debe a la menor densidad del PCM en su estado líquido, que se acumula en la parte superior de la cápsula. El tiempo total de fusión es de aproximadamente 70 minutos, identificado por la curva “FS”, la fracción de PCM sólida que es calculada según el procedimiento descrito por Egea et al. [14].

4. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este estudio, se han realizado pruebas de fusión y solidificación del PCM encapsulado en un cilindro de acero inoxidable. Se han colocado termopares en su interior para estudiar el campo de temperatura del PCM. Posteriormente, los valores de temperatura a lo largo del tiempo se han representado gráficamente. En las pruebas de fusión, se observa que el PCM se derrite de arriba hacia abajo de la encapsulación debido a las diferencias de densidad entre los estados sólido y líquido.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue parcialmente financiado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional, el Ministerio de Ciencia e Innovación - Agencia Estatal de Investigación y la Unión Europea NextGenerationEU/PRTR. Sistema solar mejorado para almacenamiento híbrido de energía térmica (PID2022-141649OB-C21) y Built4Energy (CPP2021-008721).

REFERENCIAS

- [1] IEA, Energy end-uses and efficiency indicators data explorer, (2023). <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-end-uses-and-efficiency-indicators-data-explorer>.
- [2] P.K.S. Rathore, S.K. Shukla, Potential of macroencapsulated PCM for thermal energy storage in buildings: A comprehensive review, Constr Build Mater 225 (2019) 723–744.

- <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.221>.
- [3] X. Huang, C. Zhu, Y. Lin, G. Fang, Thermal properties and applications of microencapsulated PCM for thermal energy storage: A review, *Appl Therm Eng* 147 (2019) 841–855. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.11.007>.
- [4] E. Alehosseini, S.M. Jafari, Nanoencapsulation of phase change materials (PCMs) and their applications in various fields for energy storage and management, *Adv Colloid Interface Sci* 283 (2020) 102226. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102226>.
- [5] P.B. Salunkhe, P.S. Shembekar, A review on effect of phase change material encapsulation on the thermal performance of a system, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2012) 5603–5616. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.05.037>.
- [6] M.A. Fazilati, A.A. Alemrajabi, Phase change material for enhancing solar water heater, an experimental approach, *Energy Convers Manag* 71 (2013) 138–145. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.03.034>.
- [7] N. Nallusamy, S. Sampath, R. Velraj, Experimental investigation on a combined sensible and latent heat storage system integrated with constant/varying (solar) heat sources, *Renew Energy* 32 (2007) 1206–1227. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.04.015>.
- [8] R.M. Reddy, N. Nallusamy, K. Reddy, Experimental Studies on Phase Change Material-Based Thermal Energy Storage System for Solar Water Heating Applications, *Journal of Fundamentals of Renewable Energy and Applications* 2 (2012) 1–6. <https://doi.org/10.4303/jfrea/R120314>.
- [9] A. Kumar, S.K. Saha, Performance analysis of a packed bed latent heat thermal energy storage with cylindrical-shaped encapsulation, *Int J Energy Res* 45 (2021) 13130–13148. <https://doi.org/10.1002/er.6639>.
- [10] A. Kumar, S.K. Saha, Thermal and structural characterizations of packed bed thermal energy storage with cylindrical micro-encapsulated phase change materials, *J Energy Storage* 48 (2022) 103948. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103948>.
- [11] M.Z.M. Rizan, F.L. Tan, C.P. Tso, An experimental study of n-octadecane melting inside a sphere subjected to constant heat rate at surface, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 39 (2012) 1624–1630. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2012.08.003>.
- [12] A. Raul, M. Jain, S. Gaikwad, S.K. Saha, Modelling and experimental study of latent heat thermal energy storage with encapsulated PCMs for solar thermal applications, *Appl Therm Eng* 143 (2018) 415–428. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.07.123>.
- [13] M. Veerappan, S. Kalaiselvam, S. Iniyan, R. Goic, Phase change characteristic study of spherical PCMs in solar energy storage, *Solar Energy* 83 (2009) 1245–1252. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.02.006>.
- [14] A. Egea, J.P. Solano, J. Pérez-García, A. García, Solar-driven melting dynamics in a shell and tube thermal energy store: An experimental analysis, *Renew Energy* 154 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.03.078>.