

EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EDIFICIOS MEDIANTE MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

LASHERAS ESTRELLA, Ana⁽¹⁾; ALCANIZ MARTÍNEZ, Jesús H.⁽¹⁾ ESTRELLA SEVILLA, Emilio⁽²⁾

alasheras@ucam.edu

⁽¹⁾UCAM (Universidad Católica de Murcia). Escuela Politécnica Superior

⁽²⁾UPCT (Universidad Politécnica de Cartagena). Departamento de Ingeniería Civil

RESUMEN

Desde hace siglos se ha aprovechado la inercia térmica de los materiales para disminuir el consumo energético [1]. Los materiales de cambio de fase son una de las formas más eficientes de almacenamiento térmico. Se conocen internacionalmente por su acrónimo en inglés PCM (PhaseChangeMaterials). Se han realizado investigaciones para incorporarlos a algunos elementos constructivos, con el fin de mejorar su inercia térmica [2].

En los últimos años el almacenamiento de energía térmica mediante el uso de PCM se ha convertido en un tema de notable interés para toda la comunidad científica y especialmente en campos como la Arquitectura y la Ingeniería. Existen muchas publicaciones y libros al respecto, pero la información existente en ocasiones puede resultar muy extensa y poco contextualizada. Mediante la presente comunicación se realiza una revisión sistemática de las publicaciones más recientes respecto al uso de PCM en edificación. Asimismo, se valora su potencial real de aplicación, a la vista de los resultados obtenidos en las investigaciones analizadas.

Palabras clave: PCM, Edificación, almacenamiento térmico.

1. Introducción

En la actualidad existen dos grandes problemas: la crisis energética y la contaminación ambiental [3]. El aumento de CO₂ se atribuye principalmente a la creciente población mundial y al crecimiento relacionado con la demanda energética, lo que se traduce en un gran consumo de combustibles fósiles. Por tanto la gestión de la energía se contempla, desde fechas recientes, como una línea estratégica de actuación en el marco internacional, mediante la aplicación de medidas de ahorro energético a nivel mundial para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

El escenario energético nacional actual nos revela que la energía primaria consumida en España proviene en su mayor parte de fuentes no renovables, energías contaminantes y recursos limitados, como el petróleo, el gas y el carbón. Particularmente, el consumo en edificios representa un porcentaje significativo de éste consumo [4].

Por ello toda medida de ahorro de energía en los edificios conlleva un beneficio medioambiental. En el plan nacional 2008-2012 publicado por el Ministerio de Educación y Ciencia se recalca la relación existente entre el cambio climático y la energía, y se señalan los importantes compromisos adquiridos para 2020 por la UE y sus estados miembros.

En el caso español, la necesidad de cumplir estos objetivos es incluso más acentuada que en el resto de Europa. Por una parte, la dependencia de las importaciones es sensiblemente más alta, alcanzando el 80%. Por otra, el incremento de su intensidad energética hasta el año 2004 y la participación en el consumo de combustibles fósiles han alejado a España de sus compromisos medioambientales. La UE ha identificado la política de I+D+i como una de las herramientas más eficaces para abordar los nuevos retos del sector de la energía y la lucha contra el cambio climático. En este sentido, el programa Marco Europeo de I+D+i ha destinado una parte importante de su presupuesto a los programas de energía y cambio climático [5].

Las principales normativas sobre eficiencia energética y energías renovables en España se pueden agrupar de la siguiente forma:

La normativa española sobre eficiencia energética tiene como precedente la NBE CT-79. Las Normas Básicas de la Edificación (NBE) fueron en su día fundamentales para el desarrollo normativo de las edificaciones e instalaciones en España.

El Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE) comenzó a perfilar en las instalaciones de ACS y climatización parámetros de eficiencia, que no tenía soporte normativo en la legislación española, para evitar el malgasto energético. La primera versión de la norma data de 1998 (Real Decreto 1751/1998), derogada por el Real Decreto 1027/2007 para ser finalmente incluido en el Código Técnico de la Edificación (CTE) como Sección HE-2 (rendimiento de las instalaciones térmicas) dentro de DB-HE.

La Ley de Ordenación de la Edificación (LOE) estableció unos criterios mínimos de seguridad, funcionalidad, seguridad y habitabilidad. Fue el primer paso para la unificación de las distintas normativas sobre la construcción de un edificio.

El Código Técnico de la Edificación (Real Decreto 314/2006) supuso un intento de unificar las normativas sobre la edificación consecuencia de la aplicación de la LOE. Provocó la derogación de las NBE y ha introducido numerosos aspectos para el ahorro y la eficiencia en la edificación. Consta de distintos documentos básicos o DB, siendo los más representativos para la eficiencia energética:

- DB HE: Documento Básico de Ahorro de Energía.
- DB HS: Documento Básico de Salubridad.

Debido a la necesidad de ahorro energético y sostenibilidad en edificación surge asimismo la necesidad de buscar materiales con formas de almacenamiento de calor pasivo, que puedan proporcionar a la edificación mayor capacidad de almacenamiento térmico. La necesidad de buscar formas de acondicionamiento pasivo, en que el ahorro energético tenga una componente importante, es fundamental, porque no sólo permite reducir gastos, sino también limitar el uso de combustibles

tradicionales [6]. En los últimos años los sistemas de almacenamiento de energía térmica (SAE) están suscitando un gran interés ya que nos permite adaptar los periodos de suministro a los de demanda energética, por lo que constituyen un gran potencial para mejorar de la eficiencia energética [4]. En definitiva debemos desarrollar nuevas tecnologías, que nos permitan reducir la demanda energética, impulsar el abastecimiento de energías renovables (eólica, geotérmica, hidroeléctrica, solar, etc.) y usar de forma eficiente la energía disponible.

2. Estado de la cuestión

Desde hace siglos se ha aprovechado la inercia térmica de los materiales para disminuir el consumo energético. El uso del almacenamiento térmico tiene las siguientes ventajas [1]:

- Puede conservar la energía derivada de muchas fuentes de energía: energía solar, calor residual de los equipos, calor proporcionado por la infiltración de aire caliente y el calor producido por los ocupantes.
- Disminuye el consumo de energía. Como resultado, la inversión y los costes de operación de las instalaciones para la producción de frío y/o calor, su transmisión y distribución se pueden reducir y el consumo mejorar.

Los Materiales de cambio de Fase constituyen una de las formas más eficientes de almacenamiento térmico. Se conocen internacionalmente por su acrónimo en inglés PCM (PhaseChangeMaterials). Desde el primer tercio del siglo pasado se han diseñado y fabricado numerosos materiales de cambio de fase con diferentes propiedades físicas, químicas, cinéticas y térmicas, para responder a las diferentes necesidades, usos y aplicaciones que se les requerían [7]. Entre las ventajas de los PCM se encuentra la posibilidad de selección de la temperatura de trabajo (proceso de carga y descarga energética del material) según las necesidades. La cantidad de calor necesario para aumentar un grado la temperatura de un material (calor sensible) es muy inferior a la que hace falta suministrar en el caso del calor latente. Los cambios producidos en los diferentes materiales debidos al calor latente se dan a una temperatura determinada, que es característica de cada material.

Un cambio de fase es aquel que experimenta un cambio de estado (sólido ↔ líquido ↔ gaseoso) a una temperatura determinada. El hielo es el elemento más utilizado para explicar el proceso del cambio de fase. La mayor parte del calor es necesario para pasar de la fase líquida a la gaseosa. En este cambio de fase es necesario romper los enlaces entre las moléculas de agua, lo cual requiere mucha más energía que un simple aumento de la agitación térmica. Por tanto de entre los posibles cambios de fase, el más interesante es el de sólido a líquido, ya que aunque la cantidad de energía almacenada es inferior que entre otros cambios de estado, la variación de volumen es menor.

El interés de los PCM es que, durante el cambio de fase la temperatura se mantiene constante mientras que el material absorbe energía. Otro aspecto muy positivo es la menor temperatura a la cual se almacena energía, consiguiendo por tanto unas pérdidas menores. Por este motivo se ha considerado su uso en edificación.

Aunque la investigación sobre los materiales de cambio de fase se inició a finales de los años setenta, en los últimos ocho años se ha producido un incremento significativo a nivel mundial de la producción científica relacionada con este campo. Por lo tanto, se trata de una tecnología incipiente y donde todavía queda mucho por investigar.

El objetivo principal del presente trabajo será realizar una revisión bibliográfica de los materiales de cambio de fase. Asimismo se pretende estudiar de la viabilidad de los PCM, valorando su potencial real de aplicación en edificación.

3. Los PCM en Edificación

En el campo de la construcción se están realizando investigaciones para incorporar los PCM a algunos elementos constructivos, con el fin de mejorar su inercia térmica [6]. Ya en 1975 Telkes [8] y Lane en 1986 [9] publicaron sobre el uso de PCM en la edificación y en 1975 Barkmann y Wessling [10] investigaron sobre el uso de componentes estructurales para el almacenamiento térmico.

Las características requeridas para el empleo de los materiales de cambio de fase en la edificación son:

- La temperatura de cambio de fase estará entre 20°C y 27°C.
- Deberá poseer una alta estabilidad a los ciclos de cambio de fase, debido a la larga vida útil de los edificios.
- Los PCM no deberán ser corrosivos, para evitar daños en la estructura del edificio.

Las principales aplicaciones de los PCM en construcción son como:

- Sistema de ahorro energético en refrigeración, ya que durante las horas diurnas, la temperatura del ambiente supera la temperatura de fusión, provocando así que el material absorba calor del ambiente. Este sistema puede incrementar su efectividad si durante la noche existe ventilación que favorezca la cesión de calor acumulado durante el día por el PCM.
- Sistema de ahorro energético en calefacción, ya que durante las horas nocturnas, el PCM cederá el calor que absorbió cuando la temperatura ambiente era superior a la de su cambio de fase.

3.1. Tipos de PCM

Según su estructura química los PCM pueden clasificarse en:

- PCM orgánicos. Los PCM orgánicos a su vez se clasifican en parafínicos y no parafínicos. Las principales características son: fusión congruente, autonucleación y por lo general no corroen los materiales que lo contienen. La cera de parafina es altamente estable a los ciclos de congelación y fusión, tiene baja reactividad, baja histéresis y está clasificada como no tóxica. Además, puede ajustarse a un amplio rango de temperaturas de cambio de fase.
- PCM inorgánicos. Los PCM inorgánicos se clasifican en sales hidratadas y metálicas. Tienen un elevado calor latente por unidad de masa, son más baratos que los orgánicos y no son inflamables. Mantienen la temperatura constante durante todo el proceso de cambio de fase, pero tienen desventajas como el sub-enfriamiento y la segregación que pueden hacer cambiar sus propiedades y tienen una elevada histéresis.

Existe un gran número de sectores y empresas interesados en el almacenamiento térmico de energía mediante cambio de fase. Algunas compañías importantes, como: Mitsubishi Chemical Corporation (Japón), Rubitherm GMBH (Alemania), TeapEnergy (Australia), Cristopia (Francia), EPS Ltd. (Reino Unido), PCM Thermal Solutions (Estados Unidos), Basf (Alemania), Cepsa-Petresa (España) o Climator (Suecia), ya comercializan PCM.

3.2. Métodos de integración del PCM

El éxito de la integración de los PCM en la envolvente de los edificios, requiere un método fiable para la encapsulación del PCM, para evitar fugas y garantizar la estabilidad estructural. El área y el coeficiente de transferencia de calor son también claves para la carga y descarga del PCM. Los métodos de integración existentes son:

Integración directa. Consiste en añadir PCM líquido o en polvo a los materiales de construcción durante su elaboración. Se trata de un método económico. En el laboratorio se ha producido yeso mediante la incorporación directa del 21-22% de butil estearato de calidad comercial [11].

Encapsulado. Es un proceso mediante el cual se encierran pequeñas partículas esféricas en una fina película de polímeros de alto peso molecular. En la actualidad, el número de métodos de microencapsulado patentados asciende a varios centenares y es previsible que este número siga creciendo en la medida en que vayan apareciendo nuevos materiales de microencapsulado y surjan nuevos principios activos que requieran procesamientos específicos para sumicroencapsulado.

Inmersión. Consiste en sumergir un material de construcción poroso en una disolución que contiene PCM, así el material lo absorbe por la acción capilar. También se utiliza el empapado sobre el enlucido ya terminado y la adición del producto durante la etapa de fabricación del yeso. Hawes y Feldman [12] establecieron las constantes de absorción del PCM en el hormigón.

Forma estabilizada. En los últimos años se ha estudiado un compuesto llamado “PCM en forma estabilizada”. Es más económico que los métodos anteriormente citados. Se compone de parafina y de

un material que actúa de soporte, como el polietileno de alta densidad. La energía que se almacena mediante este sistema es comparable a los métodos tradicionales, ya que el porcentaje de parafina puede ser de hasta el 80% aproximadamente.

4. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

Con objetivo de analizar diferentes aplicaciones de los PCM en edificación, se estudian distintos artículos de interés y de reciente publicación (tabla 1). Para ello se han seleccionado varios trabajos que analizan la incorporación de los PCM en diferentes elementos, como son: suelos, muros y cubiertas, para así obtener temperaturas de confort constantes en el interior de la vivienda.

Tabla 1: Relación de los artículos analizados. (Fuente: Elaboración propia).

Situación	Refs.	Título
Suelos	[13]	Radiant floors integrated with PCM for indoor temperature control
	[14]	Thermal energy storage and release of a new component with PCM for integration in floors for thermal management of buildings
Muros	[15]	Energetic efficiency of room wall containing PCM wallboard: A full-scale experiment investigation
Cubiertas	[16]	Field thermal performance of naturally ventilated solar roof with PCM heat sink
	[17]	A new design of metal-sheet cool roof using PCM
	[18]	Concrete roof with cylindrical holes containing PCM to reduce the heat gain

4.1. En Suelos

En el estudio realizado por Ansuini et al., se investigó una aplicación de suelo radiante preparado con materiales de cambio de fase. Para ello se desarrolló un prototipo compuesto por: dos planchas refrigeradas y en medio una lámina de PCM y se analizaron las condiciones de temperatura y flujo de aire en el interior de una habitación. Los resultados obtenidos fueron satisfactorios [13]. Como resumen del anterior trabajo, para el estudio de un sistema de suelo radiante que contiene una capa de PCM, el modelo ha sido optimizado mediante la inclusión de una matriz de acero, que actúa como difusor térmico, lo que condujo a una reducción en el comportamiento de fusión estratificada del material PCM granulado. El modelo realizado en 2D, permitió analizar las condiciones termodinámicas del fluido a través de los tubos, tanto en la dirección perpendicular, como en la paralela a la superficie del suelo radiante. Los autores han estudiado a su vez el comportamiento del suelo radiante y su impacto sobre las condiciones ambientales en el interior de la habitación, en condiciones reales.

En el artículo realizado por Royon et al., se analizó la influencia de la incorporación de PCM en suelos, para la mejora del almacenamiento térmico en edificios. Para ello se realizó la inclusión de un nuevo compuesto polimérico de un PCM, que contiene un 85% de parafinas y cuyo punto de fusión se encuentra a 27° C aproximadamente, en un panel de hormigón ahuecado. Los resultados mostraron

claramente la influencia de la incorporación de los PCM, pues se consiguió una disminución de la amplitud térmica, en la superficie de la pared y un aumento del almacenamiento térmico [14].

4.2. En Muros

En el trabajo realizado por Kúznik et al., se llevó a cabo un ensayo a gran escala, donde se realizó un estudio comparativo, bajo las mismas condiciones externas, entre el comportamiento de muros que contienen PCM, frente a otros que no. A la vista de los resultados el PCM permite reducir las fluctuaciones interiores de aire, en particular cuando se produce un sobrecalentamiento.

Con el objeto de estudiar la envolvente del edificio, se llevó a cabo una investigación experimental con una pared que contiene PCM. Este estudio permite un análisis diferencial de paredes con y sin PCM y ha sido realizado con unas condiciones térmicas controladas. Los ensayos se refieren a las condiciones térmicas en un día de verano [15]. Tal y como mostraron los resultados la temperatura medida en la superficie de las paredes fue menor cuando se usó PCM. Por otra parte, el PCM refuerza la convección natural, evitando así estratificaciones térmicas incómodas, producidas por la variación de la densidad del aire con la temperatura, donde el calor tiende a subir y se mantiene la parte superior caliente y la inferior fría, provocando una sensación térmica poco confortable.

4.3. En Cubiertas

En el trabajo realizado por Košny et al., se evaluó el comportamiento térmico de una nueva tecnología basada en la incorporación de paneles fotovoltaicos en la cubierta de un edificio. Con objeto de reducir el puente térmico que se produce entre la unión de la cubierta y la fachada, se incorporaron materiales de cambio de fase (PCM). Los resultados obtenidos mostraron una disminución del 30% de la energía empleada para calefactar y del 50% de la empleada para enfriar. Se realizó un estudio comparativo entre una cubierta con PCM y una sin PCM, estudiando el rendimiento térmico de ambas. Los resultados del trabajo demostraron que, durante el invierno, la cubierta con PCM tuvo una reducción del 30% de los gastos generados en calefactar, en comparación con los obtenidos en la cubierta convencional. En verano, en la cubierta con PCM se consiguió un consumo un 55% más bajo que en la cubierta sin PCM. Se comprobó que alrededor de dos terceras partes del número total de días estudiados, el PCM pasó por el proceso de cambio de fase [16].

En el estudio realizado por Huann-Ming et al., se desarrolla un nuevo sistema de cubierta de chapa metálica que incorpora PCM, para absorber una parte del flujo de la energía térmica producida por la radiación solar incidente y posteriormente, liberar dicha energía en el interior de la vivienda. Tanto el análisis experimental como el numérico, han sido enfocados a comparar el rendimiento térmico obtenido en el sistema desarrollado con el de una cubierta de chapa convencional sin PCM, confeccionada con idénticos materiales y color que la primera. Los resultados indicaron que se consiguió reducir la transmisión térmica entre la cubierta y el interior de la vivienda y, por tanto, se redujo a su vez el consumo energético necesario para refrigerar y calefactar [17].

En la investigación realizada por Alqallaf et al., se desarrolla el análisis térmico de un edificio cuya cubierta de hormigón presenta huecos cilíndricos verticales, rellenos con un material de cambio de fase. El modelo tiene como objetivo aumentar la capacidad de almacenamiento térmico de la cubierta. Se ha llevado a cabo un estudio paramétrico para determinar el diámetro de los huecos. Los resultados indican que la transmisión de calor al interior de la vivienda se puede reducir significativamente con los huecos de los diámetros más grandes estudiados. La efectividad térmica de la cubierta estudiada, que contiene PCM, se evaluó comparando los resultados obtenidos con los que se alcanzaron en una cubierta de hormigón maciza. Los resultados indicaron que mediante los huecos de mayor diámetro se obtuvieron mejores resultados de aislamiento térmico. Los autores afirman que para optimizar el rendimiento de la cubierta se debe seleccionar el PCM adecuado, en función de la temperatura de fusión y del período estacional estudiado. A la vista de este estudio los autores concluyen indicando que se podría mejorar aún más el rendimiento térmico de la cubierta diseñada en futuras investigaciones [18].

5. Conclusiones

Para finalizar este trabajo de investigación en base a la recopilación bibliográfica existente, los autores están en disposición de concluir que:

- Los PCM constituyen una alternativa prometedora y complementaria con otras acciones encaminadas a la eficiencia energética.
- Existe una gran diversidad de PCM, lo que aumenta las posibilidades de que estos materiales sean competitivos y eficaces. Sin embargo, se trata de una línea de actuación muy reciente cuya eficacia y viabilidad son todavía difíciles de valorar.
- El uso de estos materiales requiere el desarrollo de métodos, técnicas y sistemas sencillos de ejecutar en obra. De hecho, en algunos casos se podrían usar en forma de materiales o sistemas prefabricados.
- Los PCM basan su funcionamiento en sucesivos ciclos de fusión y solidificación. Durante la fusión el material absorbe calor del ambiente reduciendo el aumento de temperatura que se produciría durante el día en verano. Análogamente, en la solidificación el material libera este calor por la noche. La suma de ambos procesos, repetidos de forma cíclica, mejora la confortabilidad de la vivienda.
- Por su forma de actuación se consigue reducir la dependencia de los sistemas de climatización y calefacción convencionales, produciéndose así un ahorro energético. Por ejemplo en viviendas para reducir las oscilaciones de temperatura en torno a la temperatura confort (22 °C).
- Por los trabajos analizados, la eficacia de los PCM está condicionada al diseño seleccionado con lo que no resulta sencillo extraer conclusiones claras sobre su eficacia.
- Par implementar en edificación sistemas basados en PCM, sería preciso el desarrollo previo de prototipos o modelos que arrojen datos objetivos. A lo anterior, se une también el hecho de que las soluciones planteadas para suelos, muros y cubiertas serían diferentes, e incluso, se podrían obtener resultados distintos aplicando los mismos sistemas.
- Casi todos los trabajos consultados se refieren a viviendas unifamiliares, donde la relación entre la superficie expuesta (cubierta, suelo, paredes) y el volumen interno de la vivienda es alta. Esto quiere decir que la eficacia del sistema está limitada por la relación entre ambos parámetros.

En general, a la vista de los datos proporcionados por los artículos analizados, la introducción de PCM, tanto en prefabricados como en sistemas a ejecutar in situ, la contribución de los mismos es insuficiente como para pensar en su uso inmediato.

6. Referencias

- [1] HAWES, D.W. FELDMAN, D. BANU, D. *Latent heat storage in building materials*. Energy and Buildings, 1993, vol. 20, pp. 77-86.
- [2] HUNGER, M. ENTROP, A. MANDILARAS, I. BROUWERS H. FOUNTI M. *The behavior of self-compacting concrete containing micro-encapsulated Phase Change Materials*. Cement & Concrete Composites, 2009, vol. 31, pp. 731-743.
- [3] PSOMOPOULOS, C.S. SKOULA, I. KARRAS, C. CHATZIMPIROS, A. CHIONIDIS, M. *Electricity savings and CO2 emissions reduction in building sector: How important the network losses are in the calculation?* Energy, 2010, vol. 35, pp. 485-490.
- [4] OLIVER RAMÍREZ, A. *Integración de materiales de cambio de fase en placas de yeso reforzadas con fibras de polipropileno. Aplicación a sistemas de refrigeración y calefacción pasivos para almacenamiento de calor latente en edificios*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. 2009.

- [5] DOLADO BIELSA, P. *Almacenamiento térmico de energía mediante cambio de fase. Diseño y modelización de equipos de almacenamiento para intercambio de calor con aire*. Zaragoza. Tesis Doctoral. 2011.
- [6] ABHAT, A. *Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials*. Solar Energy, 1983, vol. 30, pp. 313-332.
- [7] OLIVER, A. NEILA, F. J. GARCÍA-SANTOS, A. *Clasificación y selección de materiales de cambio de fase según sus características para su aplicación en sistemas de almacenamiento de energía térmica*. Materiales de Construcción, 2010, vol. 62, pp. 131-140.
- [8] TELKES, M. *Thermal storage for solar heating and cooling*. In: *Proceedings of the workshop on solar energy storage subsystems for the heating and cooling of buildings*. Charlottesville, VA, USA, 1975.
- [9] LANE, G.A. *Solar heat storage: latent heat material*. Technology, 1986, Florida: CRC Press.
- [10] BARKMANN, H.G. WESSLING, F.C. *Use of buildings structural components for thermal storage, proceedings of the Workshop on Solar Energy Storage Subsystems for the Heating and Cooling of Buildings*. 1975, Charlottesville (Virginia, USA).
- [11] FELDMAN, D. BANU, D. HAWES, D. GHANBARI, E. *Obtaining an energy storing building material by direct incorporation of an organic phase material in gypsum wallboard*. Solar Energy Materials, 1991, vol. 22, pp. 231-242.
- [12] HAWES, D.W. FELDMAN, D. *Absorption of phase change materials in concrete*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 1992, vol. 27, pp. 91-101.
- [13] ANSUINI, R. LARGHETTI, R. GIRETTI, A. LEMMA, M. *Radiant floors integrated with PCM for indoor temperature control*. Energy and Buildings, 2011, vol. 43, pp. 3019-3026.
- [14] ROYON, L. KARIM, L. BONTEMPS, A. *Thermal energy storage and release of a new component with PCM for integration in floors for thermal management of buildings*. Energy and Buildings, 2013, vol. 63, pp. 29-35.
- [15] KÚZNIK, F. VIRGONE, J. ROUX, J. *Energetic efficiency of room wall containing PCM wallboard: A full-scale experiment investigation*. Energy and Buildings, 2008, vol. 40, pp. 148-156.
- [16] KOŚNY, J. BISWAS, K. MILLER, W. KRINER, S. *Field thermal performance of naturally ventilated solar roof with PCM heat sink*. Solar Energy, 2012, vol. 86, pp. 2504-2514.
- [17] HUANN-MING, C. CHANG-REN, C. VU-LAN, N. *A new design of metal-sheet cool roof using PCM*. Energy and Buildings, 2013, vol. 57, pp. 42-50.
- [18] ALQALLAF, H. ALAWADHI, E. *Concrete roof with cylindrical holes containing PCM to reduce the heat gain*. Energy and Buildings, 2013, vol. 61, pp. 73-80.