مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (38) العدد (4) 2016
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (38) No. (4) 2016

اختيار المواد متغيّرة الطور (PCM) من أجل تكييف هواء المنازل في فصل الصيف

الدكتورة مها احمد*

(تاريخ الإيداع 14 / 3 / 2016. قُبِل للنشر في 17/ 7 / 2016)

□ ملخّص □

المواد متغيرة الطور (PCM) عبارة عن مواد تمتص كمية كبيرة من الطاقة الحرارية عند تغير الطور صلب/سائل وتقوم بتحريرها عند التصلب. لذلك إحدى استخدامات المواد متغيرة الطور هي تخزين الطاقة الحرارية، حيث يمكن للمواد متغيرة الطور المدمجة مع مواد البناء أن تزيد من العطالة الحرارية للأبنية وأن تخفض الطاقة اللازمة للتدفئة والتكييف. يعتبر هذا مناسباً بشكل خاص للأبنية التجارية التي تكون عادة ذات هيكل خفيف. لكن الإيصالية الحرارية الضعيفة للمواد متغيرة الطور تُعتبر من أهم الخواص التي تحدّ من استخدامها. الهدف من هذه الدراسة هو اقتراح اختيار مواد ذات إيصالية كافية لأن تسمح بتحقيق التكييف خلال فصل الصيف لتحدّ بل لتلغي استخدام الطاقة (الكهربائية أو الوقود) باستخدام جدران حاوية على مواد متغيرة الطور. تتكون الدراسة من جزأين:

- الجزء الأول يستعرض مشاكل الدراسة، ويبيّن المجال الذي يمكن ضمنه استخدام المواد متغيرة الطور كنظام تكييف سلبي.
- الجزء الثاني وضع معايير الاختيار التي ستسمح مبدئيّاً باختيار مواد معينة.

الكلمات المفتاحية: المواد متغيّرة الطور (PCM)، خلية نحل، إيصالية، نفاذية حرارية، تطبيقات في الأبنية.

* أستاذ مساعد في قسم القوى الميكانيكية . كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية . جامعة تشرين . اللاذقية . سورية .

مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (38) العدد (4) 2016
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (38) No. (4) 2016

Selection of Phase Change Materials (PCMs) for residential air conditioning in summer

Dr. Maha AHMAD*

(Received 14 / 3 / 2016. Accepted 17 / 7 / 2016)

□ ABSTRACT □

The Phase Change Materials (PCM) are materials which absorb a great quantity of energy during the change of phase solid /liquid and relies it during solidification

An application of these materials is thermal energy storage. The PCM integrated into materials of the building can reinforce their inertia and reduce the power necessary for the heating and air conditioning. This is particularly true for the buildings of the tertiary sector whose envelope is light. Nevertheless, one of the characteristics which limits the use of the PCM is their low conductivity.

The objective of this article is to propose a selection of materials having a conductivity high enough to make it possible to ensure an air conditioning in summer while limiting, even while removing, the use of energy (electricity or fuel) thanks to walls containing these PCMs. This article consists of two parts:

- The first part exposes the problems of the study and specifies the context in which the use of a PCM as a passive air conditioning system fits.
- The second part fixes the selection criteria which will allow, in a first approach to choose certain materials

Keywords: Phase Change Material (PCM), honeycombs, conductivity diffusivity, building applications.

* **Assistant professeur, Departement of Mecanical power Engeneering, Faculty of Mechanical and Electrical Engeneering, Tishreen University, Lattakia, Syria.**

مقدمة

يوجد عدة معاني لمفهوم الشعور بالارتياح الحراري، وذلك لأنّه يجب أن يأخذ بعين الاعتبار ليس فقط الجانب الحراري ولكن أيضاً الجوانب الفيزيولوجية والنفسية، ويوجد العديد من الدراسات حول هذا الموضوع، نستطيع أن نذكر منها الدراسة التي قام بها Peeters et al [1]. يمكن وصف الارتياح الحراري الذي يشعر به شخص موجود ضمن غرفة من خلال عدة معايير أهمها: درجة حرارة الغرفة التي يجب أن تكون قريبة من 20°C، والرطوبة النسبية التي يجب أن تكون حوالي 50%، ودرجة حرارة الأسطح الداخلية للجدران التي يجب أن تكون قريبة من درجة حرارة الغرفة. في الواقع، عندما تكون درجة حرارة الجدران باردة، فإنّ جسم الشخص الموجود بالغرفة سيشع حرارة نحو الجدران، ممّا يعطي شعوراً بالبرد حتى ولو كانت درجة حرارة الغرفة تبلغ 20°C. إنّ الأبنية القديمة تمتاز بجدران سميكة ممّا يؤمن لها عطالة حراريّة كبيرة وهذا يجعل درجة حرارة الجدران قريبة من درجة حرارة الغرفة. لكن معظم الأبنيّة الحاليّة وخاصة الأبنيّة التجاريّة تتميّز بأنّها ذات جدران رقيقة. مشكلة هذه الأبنيّة أنّها سيئة العزل الحراري، حيث تكون حارة جداً في الصيف وباردة جداً في الشتاء.

أهمية البحث وأهدافه

الهدف من هذا البحث هو جعل الأبنية ذات الجدران الرقيقة تحقق الارتياح الحراري الذي تحققه الأبنية ذات الجدران السميكة عن طريق استخدام جدران ذات عطالة حرارية كبيرة لكن ذات سماكة محدودة (10cm أعظمياً). بما أنّ دمج المواد متغيرة الطور مع الجدران يساعد في زيادة العطالة الحرارية للجدران الرقيقة، كما يؤمن استخدام المواد متغيّرة الطور الحفاظ على درجة حرارة داخليّة ثابتة تقريباً ، سنهتم في هذه الدراسة باختيار مادة متغيرة الطور ملائمة ووضع المعايير التي تسمح باختيار اللوح الذي سيقوم باحتوائها بحيث نحصل على جدار يعمل على تحسين عملية التكييف.

طرائق البحث ومواده

سنقوم من أجل إجراء الدراسة بعرض خواص المواد متغيرة الطور وأهم المعايير التي يجب أخذها بعين الاعتبار من أجل اختيار مادة مناسبة للهدف الذي نسعى إليه، بالإضافة إلى عرض بعض الحلول التي تمّت دراستها مسبقاً والتي تساعد في التغلّب على بعض مشاكل استخدام المواد متغيّرة الطور مثل الإيصالية الحرارية الضعيفة، وذلك من أجل التوصل إلى صنع لوح يحوي المادة متغيرة الطور ذو سماكة لاتتجاوز 10cm وعطالة حرارية كبيرة.

النتائج والمناقشة

1- المواد متغيرة الطور (PCM)

تمتص المادة متغيرة الطور كمية كبيرة من الطاقة أثناء تغيّر الطور سائل / صلب، ويمكن التعبير عن الطاقة الحرارية Q الممتصة أثناء تغيّر الطور على شكل حرارة كامنة كما يلي:

$$Q = m.L_m \qquad (1)$$

حيث: m: الكتلة التي تغيّر طورها، L_m: الحرارة الكامنة.

يجب أن تمتلك المواد متغيرة الطور قدر الإمكان المعايير التالية:

- معايير ترموديناميكية: تتمثل بدرجة حرارة تغيّر الطور التي يجب أن تكون مناسبة للتطبيقات المطلوبة، والحرارة الكامنة العالية، والحرارة المحسوسة الكبيرة من أجل أن تكون قادرة على تزويد تخزين حراري إضافي، كما يجب عدم وجود انصهار زائد عند التصلّب.

- إيصالية حرارية عالية من أجل تقليل تدرج درجة الحرارة أثناء التسخين و التبرد.

- معايير ميكانيكية: تغيّر ضئيل في الحجم عند تغيّر الطور.

- معايير كيميائية: استقرار كيميائي، وعدم قابلية التفاعل مع مواد البناء، وغير قابلة للاشتعال والانفجار، وغير سامة.

- معايير اقتصادية: متوفرة بكميات كبيرة، ورخيصة الثمن.

لكن من الصعب توفر جميع هذه المعايير معاً. بالنسبة للتطبيقات التي تهمنا، فإنّه يجب أن تكون درجة حرارة تغيّر الطور أعلى بشكل بسيط من درجة حرارة الارتياح الحراري، وهذا يحدّ من عدد المواد التي يمكن استخدامها، لذلك سنهتم في هذه الدراسة بثلاثة أنواع منها.

- البارافينات: وتتميّز برخص ثمنها، وأنّها مستقرة كيميائيّاً، وغير مذيبة للمواد، ويمكن بسهولة اختيار درجة حرارة تغيّر الطور تبعاً لطبيعة البارافين، لكن استطاعتها على التخزين الحراري ليست كبيرة (حوالي 200 kJ/kg أو 150 MJ/m^3) وإيصاليتها الحراريّة ضعيفة نسبيّاً (حوالي 0,2 W/(m.°C)).

- الأملاح المائية: وتتميّز بقدرة تخزين حراري كبيرة (حوالي 350 MJ/m^3) ، وإيصالية حرارية جيدة نسبيّاً (0,5 W/(m.°C)) وأنّها رخيصة. لكن مشكلة الأملاح المائية هو أنّ قدرتها على تخزين الحرارة تتناقص بشكل لاعكوس تبعاً للدورات الحراريّة بسبب إمكانيّة انفصال الأطوار، بالإضافة لإمكانية حدوث انصهار زائد، ممّا يجعل من الصعب استخدامها في التخزين الحراري. كما أنّها مذيبة لعدة مواد.

- الحموض الدسمة: يمكن استعمال بعضها، لكن سميّتها عندما تتسرب تحدّ من استخدامها.

إذاً، على الرّغم من أنّ البارافينات لاتمتلك أفضل المزايا الحرارية من أجل تخزين الطاقة، لكنها الأكثر سهولة في الاستخدام والأكثر موثوقية، لذلك ستكون المادة متغيرة الطور التي سنختارها في دراستنا من البارافينات.

العائق الأكبر في استخدام البارافينات هي إيصاليتها الحرارية الضعيفة، حيث أنّ جزء من المادة متغيرة الطور يمكن أن يخضع لتغيّر الطور ويخزن الطاقة على شكل حرارة كامنة. وبما أنّه لايمكن للحرارة أن تنتشر بسرعة، فإنّ الجزء الذي غيّر من طوره سترتفع درجة حرارته ويقوم بتخزين الحرارة فقط بشكلها المحسوس. ويكون هذا التخزين ذو فعالية أقلّ بكثير فيما لو تمّ انصهار كامل المادة متغيرة الطور. من أجل تحسين تخزين الحرارة على شكل حرارة كامنة، فإنّه يجب مجانسة درجة الحرارة ضمن كامل المادة متغيرة الطور بحيث تنصهر المادة بالكامل. لذلك يكون من الضروري زيادة الإيصالية الحرارية.

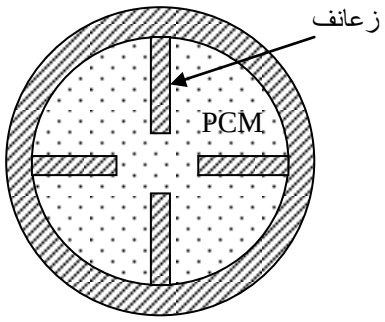
من المساوئ الأخرى على الرّغم من قلّة أهميتها ولكن يجب أخذها بعين الاعتبار هو تغيّر الحجم الذي يكون من مرتبة 10% عندما تغيّر البارافينات من طورها. ممّا يتطلب ترك مكان كاف للمادة متغيرة الطور بحيث تتمكن من الانصهار من دون أن تسبب ضغطاً كبيراً على مادة اللوح الذي يحتويها.

2- الحلول الممكنة

يوجد عدة حلول ممكنة من أجل زيادة الإيصالية الحرارية للمواد متغيّرة الطور، سنذكر فيما يلي بعضها ومن ثمّ سنختار إحداها من أجل دراستنا.

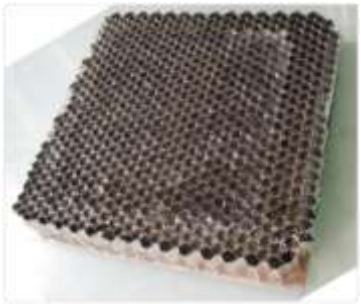
a- استخدام الزعنفة:

بما أنّه سيتمّ احتواء المادة متغيرة الطور ضمن لوح تقوم أسطحه بنقل الحرارة، لذلك سيكون من المفيد زيادة هذا السطح داخل المادة متغيرة الطور عن طريق الزعنفة (الشكل 1). تمّت دراسة هذا الحلّ بشكل خاص في حالة الأنابيب أو مبرّدات المصادر الحراريّة [2] [3].



الشكل 1: مقطع في أنبوب مملوء بالمادة متغيرة الطور ومزوّد بزعانف طولية.

حلّ آخر خاص هو حقن المادة متغيرة الطور ضمن لوح على شكل خليّة نحل (الشكل 2). يوجد مجال مهم للاختيار ضمن هذا النوع من الخلايا تبعاً لارتفاع الخلايا والذي يتراوح بين mm (3-20). إنّ هذا الحلّ هامّ ولكن لم يتم حتى الآن استخدامه في التطبيقات الصناعية [4] [5].



الشكل 2: لوح على شكل خليّة نحل مملوء بالبارافين.

b - إضافة جزيئات من مادة موصلة للحرارة.

إنّ إضافة ألياف معدنيّة أو إضافة ألياف من الكربون يؤدي إلى تحسين الإيصالية الحرارية لخليط ألياف/PCM. لكن في هذه الحالة عندما تكون الـ PCM في الطور السائل فإنّ الألياف ستقوم بالترسب تحت تأثير الجاذبية الأرضية. يمكن حلّ هذه المشكلة باستخدام جزيئات خفيفة جداً أبعادها من مرتبة النانومتر. يمكن أن نذكر من الجزيئات المستخدمة [6] [7]:

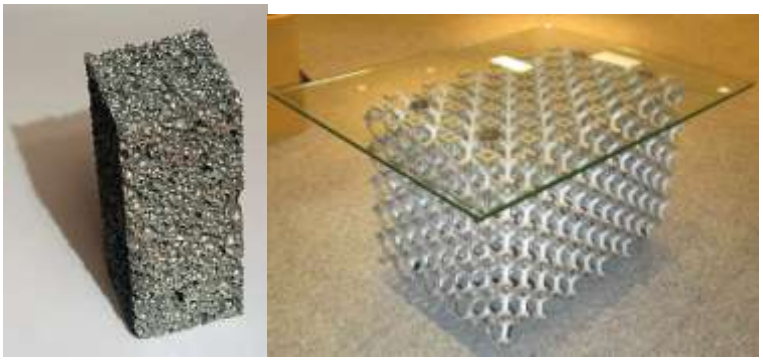
جزيئات معدنية، أو ألياف نانومترية من الكربون، أو الغرافيت، أو عمل مُركّب PCM/ مادة موصلة

يمكن إضافة مادة على شكل ألياف ضمن PCM بالطور السائل، حيث عند التصلّب تشكل الألياف شبكة متماسكة بما يكفي لأن تكون مستقرة مع مرور الزمن. يتعلق هذا الحلّ على نوعية الزوج ألياف /PCM ، فهو مثلاً أعطى من أجل ألياف بوليميرية نتائج هامة لكن كانت الإيصالية الحرارية ضعيفة [8].

c- استخدام مواد بناء معمارية (قوالب مسامية، رغوة معدنية (metal foam)، ....)

تقدم المواد المسامية التي تسمح مساماتها باحتواء المادة متغيّرة الطور مثل الرغوة المعدنية [9] حلاً أخراً، ويمكن أن نضمّ الهيكل الذي على شكل خلية نحل إلى هذا التصنيف. تمتاز هذه الهياكل بأنّها ذات سطح نوعي كبير يسمح بزيادة التبادل الحراري بين المادة متغيرة الطور والمعدن أي بمجانسة درجة الحرارة. كما يمكن تشكيل هذه المواد بأشكال هندسية مختلفة.

يمكن للرغوة المعدنية أن تتواجد على شكلين إما بمسامات مفتوحة أو مسامات مغلقة أو مسامات شبه ـ مفتوحة (الشكل 3). حيث تكون الرغوة المعدنية ذات المسامات المفتوحة أفضل منها ذات المسامات المغلقة، علماً أنّه يمكن فتح المسامات المغلقة بكسر جدران الخلايا عن طريق ترقيقها بشكل خفيف. تتواجد الخلايا بأبعاد مختلفة تتراوح بين (0,1-5) mm للرغوة مفتوحة المسام و (0,5-30) mm للرغوة مغلقة المسام. بالإضافة إلى أنّ بعض المنتِجين مثل CYMAT، INCO ALVEOTEC، ALPORAS يقومون بإنتاج هذه المواد بطريقة صناعية. يمكن للرغوة مفتوحة المسام أن تحتوي %(85-98) من المادة متغيرة الطور أما ذات المسام المغلقة فيمكن أن تحتوي %(30-90) وخلايا النحل فيمكن أن تحتوي 90%.



الشكل 3: أمثلة عن رغوة معدنية ذات مسامات مفتوحة، ورغوة ذات مسامات مغلقة.

d- استخدام مواد شبكية الشكل، يمكن ربط هذا الحل مع الحل السابق لكن في هذه الحالة نقوم باحتواء المادة ضمن المادة متغيرة الطور وليس العكس. من الأمثلة على هذه المواد ماهو مذكور ضمن المرجع [10]، يمكن تجميع هذه المواد الشبكية مع بعضها بحيث تشكل رغوة معدنية.

3- الحلول المعتبّرة في الدراسة

سنعتبر في دراستنا أنّ المادة التي سنقوم بدراستها عبارة عن خليط متجانس من المادة متغيرة الطور ومادة ذات إيصالية حرارية مرتفعة. تناسب هذه الفرضية رغوة معدنية أو خلية نحل ذات أبعاد صغيرة مملوءة بالمادة متغيرة الطور. يجب أن تسمح قيم الإيصالية الحرارية التي يجب بلوغها بتسريع انصهار المادة متغيرة الطور من دون أن تسبب لها تسخيناً زائداً عندما تكون في الطور السائل. كما يجب أن يسمح الحل المعتبَر بصنع لوح يحوي المادة متغيرة الطور. ويجب لهذا اللوح أن يحقق ما يلي:

- سماكة محدودة (لاتتجاوز 10cm)
- خفة الوزن: يجب أن تكون الألواح خفيفة بحيث تضمن عملية نقلها بسهولة.
- رخص الثمن.
- تخزين الطاقة الحرارية خلال مدة ثماني ساعات.
- سهولة ملئها بالمادة متغيرة الطور.
- عدم تسريب للمادة متغيرة الطور.

4- مقاربة تحليلية

من أجل مقارنة زمن انصهار خلائط مختلفة (PCM + مادة تزيد الإيصالية الحرارية) سنستخدم الخواص الفيزيائية المكافئة لحساب الإيصالية الحرارية، والسعة الحرارية الكتلية، والنفاذية الحرارية.

يجب أن تكون النفاذية الحرارية؛ بشكل خاص؛ مرتفعة وذلك من أجل السماح بانتقال سريع للحرارة إلى كامل المادة متغيرة الطور بحيث تجانس الانصهار (أو التصلب).

a- خواص الخلائط (المركّبات) التي أساسها المادة متغيرة الطور. التبسيط المُعتَبر في الدراسة

- الإيصالية الحرارية

سنعتبر أنّ الجملة المدروسة عبارة عن خليط معدن/ PCM مع نسبة حجمية للمعدن تتعلق بالبنية المختارة (رغوة معدنية، خلية نحل).

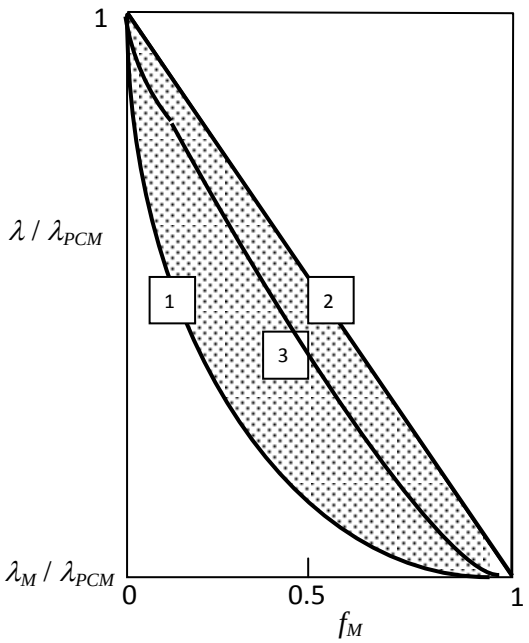
يوجد علاقات عديدة تمّ اقتراحها من أجل ربط الإيصالية الحرارية للمادة المركبة مع الإيصالية الحرارية والنسب الحجمية لمكوناتها [11]. يَفترض النموذج الأكثر بساطة توزيع بسيط للمكونات بالنسبة لتدفق الحرارة، فعندما تتوضع المكونات بشكل متوازي فإنّ ذلك يؤدي إلى مقاومة حرارية أصغريّة وإيصالية حرارية فعلية أعظمية تُحسب بالعلاقة:

$$\lambda = f_M\lambda_M + (1 - f_M)\lambda_{PCM} \qquad (2)$$

حيث f_M هي النسبة الحجمية للمعدن ذو الإيصالية الحرارية λ_M، و λ_{PCM} هي الإيصالية الحرارية للمادة متغيرة الطور.

أمّا عندما تتوضع المكونات على التسلسل فإنّ ذلك يؤدي إلى إيصالية حرارية أصغرية يمكن حسابها من العلاقة:

$$\lambda = \frac{\lambda_{PCM}\lambda_M}{\lambda_M\lambda_{PCM} + (1 - f_M)\lambda_M} \qquad (3)$$



الشكل 4: نسبة الإيصالية الحرارية كتابع للنسبة الحجمية للمعدن.

1- التوضع على التسلسل، 2- التوضع على التوازي، 3- توضع حقيقي.

تطبَق العلاقتان السابقتان من أجل البنى المثالية. لكن بنية الجسم الحقيقي توافق توضعات متوازية وعلى التسلسل. يوضح الشكل 4 كيفيّة تغيّر الإيصالية الحرارية المكافئة تبعاً للنسبة الحجمية f_M.

حيث يوافق المنحني 1 (الشكل 4) الصيغة التي تُعبّر عن الحالة التي تتوضع بها المكونات على التسلسل، ويوافق المنحني 2 الصيغة التي تُعبّر عن الحالة التي تتوضع بها المكونات على التوازي، أمّا المنحني 3 فيوافق التوضع الحقيقي للمكونات الذي لانعرفه لكن نعرف أنّه يقع بين الحالتين الأولى والثانية.

قمنا في دراستنا من أجل حساب الإيصالية الحرارية المكافئة باختيار التوضع على التوازي وذلك من أجل تبسيط الحسابات.

- الكتلة الحجمية

يمكن حساب الكتلة الحجمية المكافئة (ρ) من العلاقة:

$$\rho = \rho_M f_M + \rho_{PCM}(1 - f_M) \qquad (4)$$

- السعة الحرارية الكتلية

تُعطى السعة الحرارية الكتلية المكافئة بالعلاقة:

$$C_p = C_{pM} f'_M + C_{pPCM}(1 - f'_M) \qquad (5)$$

حيث f'_M هو التركيز الكتلي للمعدن ويساوي:

$$f'_M = \frac{\rho_M f_M}{\rho_M f_M + \rho_{PCM}(1 - f_M)} \qquad (6)$$

- النفاذية الحرارية

تساوي النفاذية الحرارية المكافئة (D) مايلي:

$$D = \frac{\lambda}{\rho . C_p} \qquad (7)$$

بالأخذ بعين الاعتبار العلاقات السابقة كتابع للنسب الحجمية، تصبح النفاذيّة الحرارية المكافئة:

$$D = \frac{\lambda_M . f_M + \lambda_{PCM} . (1 - f_M)}{\rho_M . C_{pM} . f_M + \rho_{PCM} . C_{pPCM} . (1 - f_M)} \qquad (8)$$

لقد تمّ إنجاز هذا البحث بالتعاون مع المركز العلمي والتقني للأبنية (CSTB) في فرنسا، والذي تمّ من خلاله التعاون مع بعض الشركات المهتمة بالموضوع المنتجة لمواد البناء والتي قامت بتزويدنا بالمعطيات الموضحة على الجدول 1، نجد أنّ نسبة المعدن تتراوح بين (1-7)% من أجل خلايا النحل وبين (3-37)% من أجل الرغوات الكثيفة. إذاً من أجل حساب النفاذية الحرارية، سنختار النسب الحجمية 1% و 5% و 10% و 15% والتي توافق البنى المثالية القابلة للاستعمال في الألواح.

الجدول 1: خواص بعض الهياكل المعدنية (وفق معطيات المصنعين).

الشركة المصنعة	المعدن	شكل اللوح	الكثافة الأصغرية [$g.cm^3$]	الكثافة الأعظمية [$g.cm^3$]	النسبة الحجمية الأصغرية	النسبة الحجمية الأعظمية
Aerweb	ألمنيوم	خلية نحل	0,029	0,160	1,07%	5,93%
Duracore	ألمنيوم	خلية نحل	0,013	0,192	0,48%	7,11%
Duocel	ألمنيوم	رغوة مفتوحة	0,190	0,198	7,04%	7,33%
Alporas	ألمنيوم	رغوة مغلقة	0,210	0,245	7,78%	9,07%
Alulight	ألمنيوم	رغوة مغلقة	0,300	1,00	11,11%	37,04%
Cymat	ألمنيوم	رغوة مغلقة	0,071	0,546	2,63%	6,13%
Inco	نيكل	رغوة مفتوحة	0,265	0,285	2,97%	3,20%
Fine	فولاذ	صوف	0,119	.	1,51%	.
Medium	فولاذ	صوف	0,108	.	1,38%	.
Coarse	فولاذ	صوف	0,098	.	1,25%	.

بالإضافة للمواد المعروضة في الجدول 1، سنقوم؛ من أجل المقارنة؛ بحساب النفاذية الحرارية للجص وللبيتون، حيث سنستخدم قيم وسطية لمختلف خواصهما. والمادة متغيرة الطور ستكون دائماً البارافين (الجدول 2).

الجدول 2: خواص المواد المستخدمة.

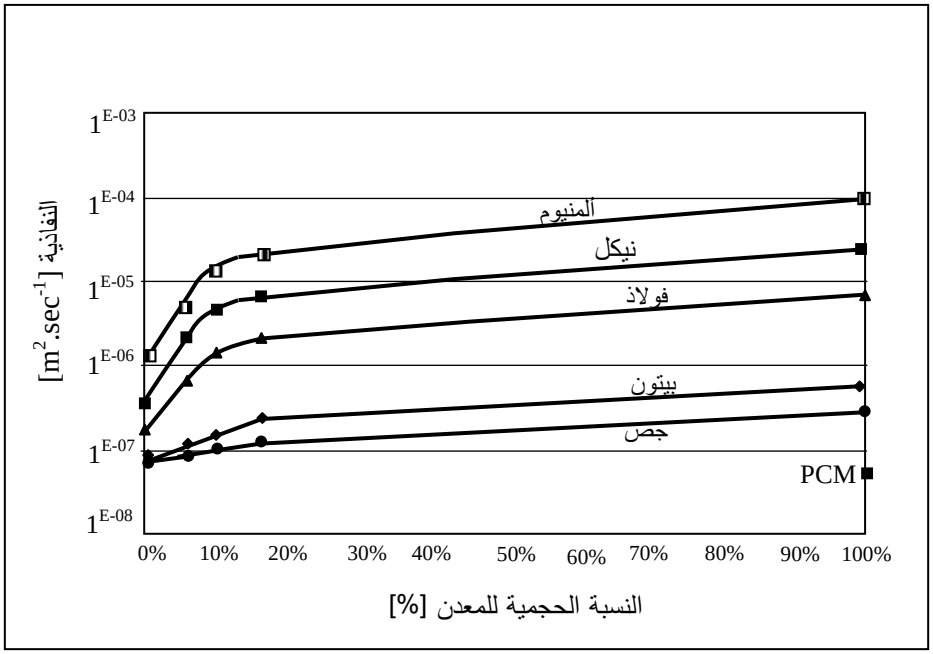
	ρ [$kg.m^{-3}$]	Cp [$J.kg^{-}1.K^{-1}$]	λ [$W.m^{-1}.K^{-1}$]
ألمنيوم	2700	900	237
نيكل	8908	440	90,7
فولاذ	7850	440	26
جص	1700	1000	0,6
بيتون	2400	1050	1,75

PCM(البارافين)	789	2490	0,16
هواء (20°C)	1204	1004	0,024

يمكن تلخيص نتائج حساب النفاذية الحرارية في الجدول 3 والشكل 5.

الجدول 3: نفاذية المركبات من أجل نسب حجمية مختلفة للمعدن. (نعطي نفاذية الجص، والبيتون، والـ PCM من أجل المقارنة).

	عامل النفاذية [$m^2.s^{-1}$]				
النسبة الحجميّة للمادة f_{metal}	كامل الكتلة	1%	5%	10%	15%
ألمنيوم	$9,75^{E}-05$	$1,28^{E}-06$	$6,04^{E}-06$	$1,19^{E}-06$	$1,75^{E}-05$
نيكل	$2,31^{E}-05$	$5,37^{E}-07$	$2,27^{E}-06$	$4,27^{E}-06$	$6,09^{E}-06$
فولاذ	$7,53^{E}-06$	$2,11^{E}-07$	$7,12^{E}-07$	$1,30^{E}-06$	$1,84^{E}-06$
جص	$3,53^{E}-07$	$8,38^{E}-08$	$9,33^{E}-08$	$1,05^{E}-07$	$1,17^{E}-07$
بيتون	$6,94^{E}-07$	$8,93^{E}-08$	$1,20^{E}-07$	$1,58^{E}-07$	$1,95^{E}-07$
PCM	$8,14^{E}-08$	–	–	–	–



الشكل 5: منحنيات النفاذية لبنى مختلفة من معدن/ PCM كتابع للنسبة الحجمية للمعدن وللمادة متغيرة الطور.

نستطيع أن نلاحظ من الشكل 5 بأنّه يمكن تصنيف المواد في ثلاث مجموعات وذلك وفقاً لنفاذيتها الحراريّة: المعادن، البيتون والجص، المادة متغيرة الطور. إنّ النفاذية الحرارية للبنى المعدنية أعلى منها للمادة متغيرة الطور (بمقدار ضعفين لثلاثة أضعاف) وأعلى منها للبيتون والجص (حوالي الضعف). يبيّن هذا الاختلاف أهميّة الجمع

مابين استخدام المعدن والـ PCM (أي استخدام مركّب PCM/ معدن) من أجل تحسين النفاذية الحرارية للمادة متغيرة الطور، وهذا يسمح بمجانسة أفضل لدرجة حرارة المادة متغيرة الطور وامتصاص أفضل للطاقة الحرارية. إنّ هذا الاختلاف بالنفاذية الحرارية سيساعدنا بوضع معيار من أجل اختيار نوع الهيكل وطبيعة المعدن اللذان يجب استخدامهما.

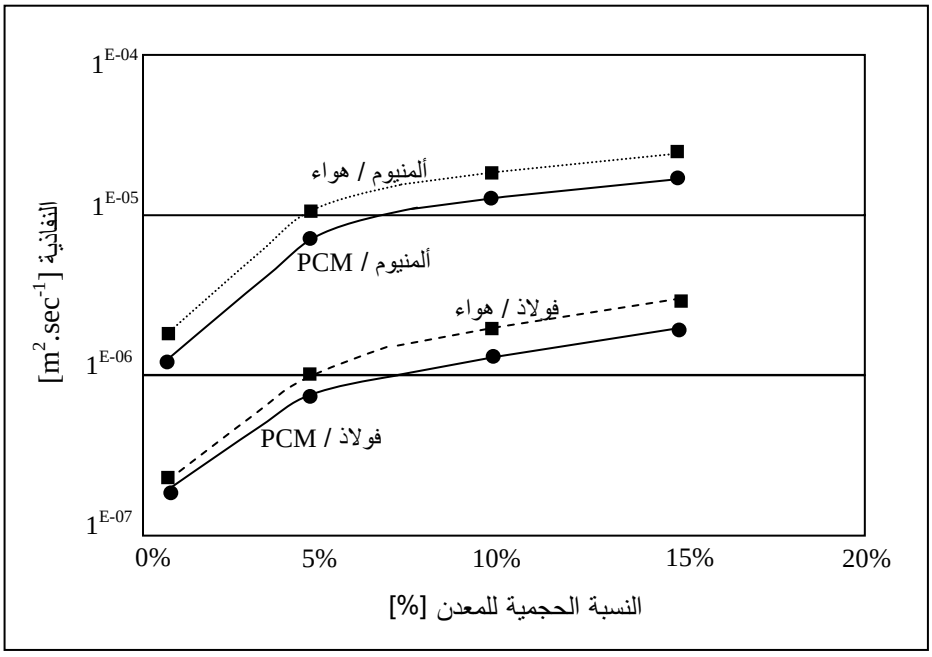
إذاً، من أجل الحصول على نفاذية كافية، فإنّه من الهام استخدام مركّب PCM/ معدن. النفاذية الحرارية للمادة متغيرة الطور لوحدها تساوي $8{,}14\ 10^{-8}\ m^2/s$، وتكون النفاذية الحرارية لبنية تحوي الفولاذ نسبته الحجمية 10% أعلى (حوالي $1{,}3\ 10^{-6}\ m^2/s$). لكن هذه النسبة الحجمية للفولاذ مرتفعة، لذلك سنختار بشكل عشوائي قيمة حدية دنيا للفولاذ تقع بين $8{,}14\ 10^{-8}\ m^2/s$ و $1{,}3\ 10^{-7}\ m^2/s$ ولتكن $3\ 10^{-7}\ m^2/s$ والتي توافق مركّب يحوي الفولاذ بنسبة حجمية 1%.

بمقارنة نفاذية مركّب معدن/ PCM مع نفاذية مركّب معدن/ هواء (الجدول 4 والشكل 6)، نجد التأثير الواضح للمعدن على الخواص الحرارية الإجمالية.

على الرّغم من الاختلاف بين الإيصالية الحراريّة للهواء وتلك للمادة متغيّرة الطور، تبقى قيم النفاذية الحرارية لهما متقاربة.

الجدول 4: مقارنة بين النفاذية الحرارية لكلّ من معدن/ PCM و معدن/ هواء.

عامل النفاذية $[m^2.s^{-1}]$				f_{metal}	
15%	10%	5%	1%		
$1{,}84^{E}$-06	$1{,}30^{E}$-06	$7{,}12^{E}$-07	$2{,}11^{E}$-07	PCM	فولاذ
$2{,}54^{E}$-06	$1{,}38^{E}$-06	$1{,}00^{E}$-06	$2{,}30^{E}$-07	هواء	
$1{,}75^{E}$-05	$1{,}19^{E}$-05	$6{,}04^{E}$-06	$1{,}28^{E}$-06	PCM	ألمنيوم
$2{,}56^{E}$-05	$1{,}78^{E}$-05	$9{,}35^{E}$-06	$1{,}96^{E}$-06	هواء	



الشكل 6: مقارنة بين النفاذية الحراريّة لبنيّة معدن/ PCM و معدن /هواء.

إذاً تتعلق النفاذيّة الحراريّة المكافئة للوح مكوّن من معدن/ PCM على نفاذيّة المعدن وعلى نسبته الحجميّة. نرغب بإيجاد معيار أكثر بساطة يُمكّننا من حساب حدود المجال الذي تقع به النفاذيّة الحراريّة للمواد المكونة للوح. من الجدول 3 نختار هذا الحدّ 100 مرّة نفاذيّة الـ PCM، وهذا يصلح فقط عندما تكون النسبة الحجميّة تساوي أو أكبر من 5%. بالنسبة للنسب الحجميّة أقلّ من 5% فإنّه يتوجب حساب النفاذيّة الحراريّة للمركّب، مثلاً للفولاذ (حوالي 100 مرة نفاذية PCM) تعطي النسب الحجميّة الصغيرة جداً (أقلّ من 3%) نفاذيّة إجمالية غير كافية.

5- معايير اقتصادية

يوجد معايير أخرى يجب أن تؤخذ بعين الاعتبار عند اختيار بنية الألواح، وخاصة السعر والوزن.

الأبعاد القياسية للوح (رغوة معدنية أو خلية نحل) هي 122 cm x 244 cm. يمكن أن نحدد السعر والوزن للوح نموذجي سماكته 5mm لبعض المواد وفقاً لمعطيات المنتِجين (الجدول 5). يبيّن الجدول 5 الحدّ الأدنى والحدّ الأعلى لوزن اللوح عندما يكون فارغاً تماماً أو 90% منه مملوءاً بالمادة متغيرة الطور.

نلاحظ من الجدول 5 ، أنّ وزن الألواح يتعلق بشكل رئيسي بوزن المادة متغيرة الطور. يجب أن يتمكن شخص واحد من نقل اللوح المملوء بالمادة متغيّرة الطور، لذلك يمكن اعتبار الحدّ الأقصى المقبول لوزن اللوح المعبأ هو 20kg، عموماً جميع البنى المذكورة تحقق هذا الشرط، لكن الألواح المصنوعة من الألمنيوم على شكل رغوة معدنية أوخلية نحل تلبي طلبنا من ناحية النفاذية الحرارية والوزن والتكلفة المادية المعقولة.

الجدول 5: وزن بنى مختلفة من الألواح.

الشركة المصنعة	المعدن	شكل اللوح	وزن اللوح الفارغ [kg]		وزن اللوح مملوء 90% منه [kg]	
Aerweb	ألمنيوم	خلية نحل	0,43	2,38	10,87	12,32
Duracore	ألمنيوم	خلية نحل	0,19	2,86	10,71	12,68
Duocel	ألمنيوم	رغوة مفتوحة	2,83	2,95	12,65	12,74
Alporas	ألمنيوم	رغوة مغلقة	3,13	3,65	12,87	13,26
Alulight	ألمنيوم	رغوة مغلقة	4,47	14,88	13,86	21,53
Cymat	ألمنيوم	رغوة مغلقة	1,06	8,13	11,35	18,05
Inco	نيكل	رغوة مفتوحة	3,94	4,24	14,19	14,47

الاستنتاجات والتوصيات:

حاولنا في هذا البحث وضع معيار يساعدنا على اختيار المادة متغيّرة الطور ونوع وطبيعة الهيكل الذي سيتمّ احتواؤها به من أجل تحقيق جدار ذو عطالة حرارية كبيرة وسماكة محدودة لاتتجاوز 10 cm قادر على تحقيق انصهار وتجمد كامل للمادة متغيرة الطور خلال زمن واقعي، بحيث يحافظ على درجة حرارة داخلية ثابتة تقريباً بما يؤمّن الشعور بالارتياح الحراري.

يجب أن يتوفر مجموعة من الشروط مثل كمية المادة متغيرة الطور، والنفاذية الحرارية المكافئة، بالإضافة إلى بعض الشروط العملية مثل وزن اللوح وثمنه.

يتوفر العديد من المواد متغيرة الطور ذات الخصائص الحرارية المختلفة كما يتوفر طرق مختلفة لاحتوائها. لقد قمنا باختيار البارافين كمادة متغيرة الطور نظراً لما يمتاز به من خواص مختلفة تميّزه عن المواد الأخرى.

من أجل التغلّب على الإيصالية الحرارية الضعيفة للبارافين، قمنا باقتراح هيكل مصنوع من مادة معدنية، أي أنّ الجدار سيكون عبارة عن مزاوجة بين المادة متغيرة الطور ومادة ذات إيصالية حرارية مرتفعة، وهذا ماينا سبه رغوة معدنية أو خلية نحل ذات أبعاد صغيرة مملوءة بالمادة متغيرة الطور؛ بحيث تسمح قيم الإيصالية الحرارية المرتفعة للمعدن بمجانسة درجات الحرارة أثناء تغيّر الطور.

تُعتبر النفاذية الحرارية من المعايير الهامة في عملية اختيار بنية الجدار، فيجب أن تكون مرتفعة بحيث تسمح بانتقال سريع للحرارة ضمن المادة متغيرة الطور، لذلك يجب أن تكون أعلى من 3.10^{-7} m^2/s.

تؤثر النسبة الحجمية للمعدن على النفاذية الحرارية المكافئة للجدار معدن/ PCM، حيث قمنا بتحديد الحدّ الأدنى لها بـ 100 مرّة نفاذيّة الـ PCM وهذا يوافق نسبة حجمية للمعدن تساوي 5% على الأقلّ.

بالإضافة إلى النفاذية الحرارية الجيدة يجب أن يكون ثمن الجدار مقبولاً وأن تكون كتلته الحجمية أقلّ من $1400\ kg/m^3$ وهذا يوافق معدن الألمنيوم.

في الخطوة التالية، يجب تعيين أبعاد اللوح التي تسمح بانصهار كامل المادة متغيرة الطور، وهذا لايمكن إلاّ من خلال إجراء المحاكاة الرقمية من أجل أشكال هندسية مختلفة للمعدن الذي يحوي الـ PCM.

المراجع

[1] PEETERS, L.F.R., DEAR, R. DE, Hensen, J.L.M. & D'HAESSELEER, W. *Thermal comfort in residential buildings: Comfort values and scales for building energy simulation*. Applied Energy, 86 (5), 2009, 772-780.

[2] AGYENIM, F., *The use of enhanced heat transfer phase change materials (PCM) to improve the coefficient of performance (COP) of solar powered LiBr/H2O absorption cooling systems*. Renewable Energy, 87, 2016, 229-239.

[3] BABY, R., BALAJI, C., Thermal optimization of PCM based pin fin heat sinks: An experimental study, Applied Thermal Engineering, 54, 2013, 65-77.

[4] C. HASSE, M. GRENET, A. BONTEMPS, R. DENDIEVEL, H. SALLEE, *Realisation, test and modelling of honeycomb wallboards containing a Phase Change Material*, Energy & Buildings, Vol. 43, 1, 2011, 232-238.

[5] BIAO XIE, WEN-LONG CHENG, ZHI-MING XU, *Studies on the effect of shape-stabilized PCM filled aluminum honeycomb composite material on thermal control*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 91, 2015, 135–143.

[6] KIBRIA, M.A., ANISUR, M.R., MAHFUZ, M.H., SAIDUR, R., METSELAAR, I.H.S.C., *A review on thermophysical properties of nanoparticle dispersed phase change materials*, Energy Conversion and Management, 95, 2015, 69–89

[7] WARZOHA, R.J. WEIGAND, R.M., AMY S. FLEISCHERr, A.S., *Temperature-dependent thermal properties of a paraffin phase change material embedded with herringbone style graphite nanofibers*, Applied Energy, 137, 2015, 716-725.

[8] CHEN, K., YU, X., TIAN, C., JIANHUA WANG, J. *Preparation and characterization of form-stable paraffin/polyurethane composites as phase change materials for thermal energy storage*, Energy Conversion and Management, 77, 2014, 13–21.

[9] CHEN, J., YANG, D., JIANG, J., MA, A., SONG D., *Research progress of phase change materials (PCMs) embedded with metal foam (a review)*, Energy Conversion and Management, 77, 2014, 13–21.

[10] MUSTAFFAR, A., HARVEY, A., REAY, D., *Melting of phase change material assisted by expanded metal mesh*, Applied Thermal Engineering, 90, 2015, 1052-1060.

[11] Z., ALBERTO FINA, A., *Thermal conductivity of carbon nanotubes and their polymer nanocomposites: A review*, Progress in Polymer Science, 36, 2011, 914–944.