

تأثير استخدام المواد متغيرة الطور PCM على درجات الحرارة الداخلية لخلايا تجريبية. دراسة تجريبية ومحاكاة رقمية.

الدكتورة مها احمد*

(تاريخ الإيداع 16 / 2 / 2011. قُبِلَ للنشر في 4 / 5 / 2011)

□ ملخص □

تشكل الطاقة المستهلكة من أجل تكييف الهواء في البلدان الحارة بهدف تحقيق الشعور بالارتياح الحراري في الأبنية الحديثة جزءاً هاماً من الطاقة الكلية المستهلكة. نحاول في هذا البحث تعيين تأثير المواد متغيرة الطور على درجات الحرارة الداخلية من أجل التحكم بها، والحد من استخدام الطرق التقليدية مثل مكيفات الهواء لتحقيق الشعور بالارتياح الحراري. من أجل البحث قمنا بدراسة تجريبية ورياضية لخلية تجريبية مكونة من غرفتين متجاورتين يفصل بينهما جدار من البلوك الزجاجي الحاوي على مواد متغيرة الطور، ولقد قورنت درجات الحرارة الداخلية المقاسة مع درجات الحرارة الداخلية لخلية تجريبية أخرى مكونة أيضاً من غرفتين متجاورتين يفصل بينهما جدار زجاجي لا يحوي على المادة متغيرة الطور. المحاكاة الرقمية، أُنجزت بواسطة برنامج TRNSYS15 بعد أن تم وضع موديل رياضي خاص بالجدار الحاوي على المادة متغيرة الطور. وقد بينت مقارنة النتائج التجريبية مع نتائج المحاكاة الرقمية توافقاً مقبولاً.

الكلمات المفتاحية: الخلايا التجريبية، المواد متغيرة الطور (PCM)، محاكاة رقمية، TRNSYS، الحرارة الكامنة.

L'influence De L'utilisation Des Matériaux A Changement De Phase Sur La Température Intérieure Des Cellules Tests. Étude Expérimentale Et Simulation Numérique.

Dr. Maha Ahmad*

(Déposé le 16 / 2 / 2011 . Accepté 4 / 5 /2011)

□ Résumé □

L'énergie consommée pour conditionner l'air dans les bâtiments des pays chauds et pour réaliser le confort thermique; constitue une partie importante de l'énergie totale consommée.

Nous essayons dans cette recherche d'étudier l'influence des matériaux à changement de phase sur les températures intérieures afin de limiter l'utilisation des dispositifs de climatisation actifs. Ces matériaux peuvent être intégrés à une paroi pour constituer un système de stockage d'énergie et pour régler la température de cette paroi.

Pour cette recherche, nous avons réalisé une étude expérimentale sur une cellule test qui contient deux pièces côte à côte et séparées par une paroi constituée de 16 briques de verre contenant du MCP. Les températures intérieures mesurées ont été comparées avec celles d'une autre cellule testée qui contient deux pièces séparées par une paroi en brique de verre sans PCM.

La simulation numérique a été faite à l'aide du logiciel TRNSYS15 après avoir créé et intégré dans ce logiciel un modèle numérique d'une paroi à MCP. La comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques montre un bon accord.

Mots clés: cellules tests, matériau à changement de phase (MCP), simulation numérique, TRNSYS, chaleur latente.

*Enseignante Au Département De Force Mécanique, Faculté De Génie Électrique Et Mécanique, Université Tichrine, Lattaquié, Syrie.

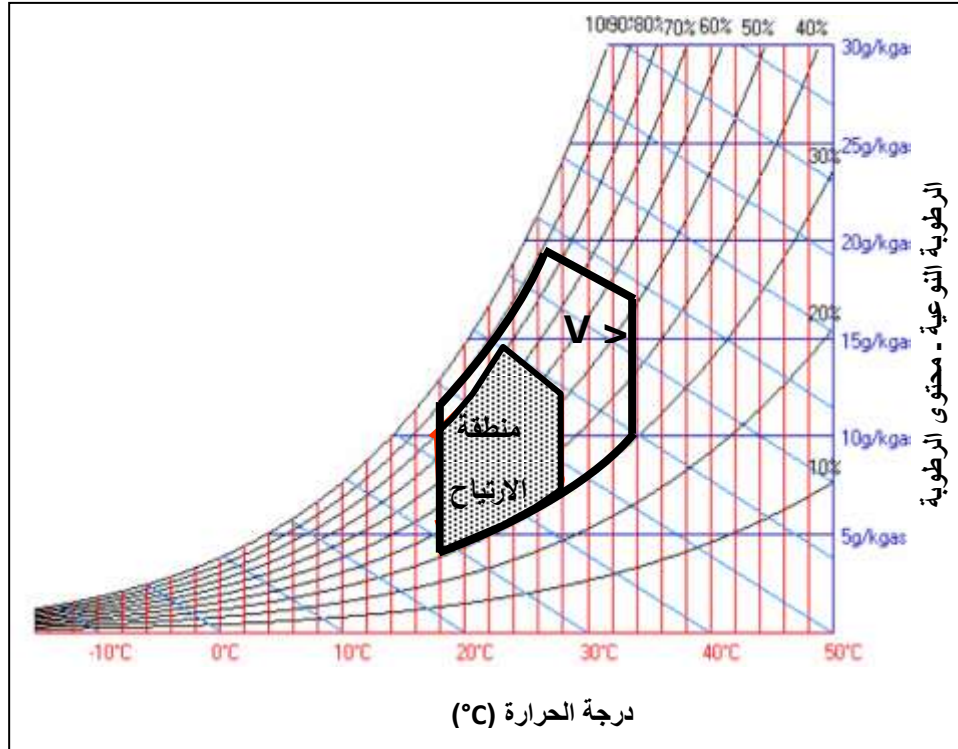
مقدمة:

لقد أصبح من الضروري، من أجل تخفيض غازات الاحتباس الحراري، تخفيض إنتاج الطاقة التي مصدرها الوقود الأحفوري من جهة، وإيجاد طرق فعالة تساهم في تقليل استهلاك الطاقة من جهة أخرى. من أجل تقليل استخدام الوقود الأحفوري فإنه يوجد إمكانيتان هما: اقتصادية الطاقة واستخدام الطاقات البديلة. حيث يُقدم تخزين الطاقة الحرارية حلاً مناسباً لنا للإمكانيتين. فيمكن تخزين الطاقة عند توافرها، وذلك عندما يكون الاستهلاك منخفضاً، ثم استخدامها عندما يكون الإنتاج غير كافٍ كما في أوقات الذروة، هذا بالنسبة للإمكانية الأولى. أما بالنسبة للإمكانية الثانية، فإن تخزين الطاقة الشمسية وطاقة الرياح؛ كونها عبارة عن طاقات غير مستمرة؛ يسمح بإمكانية استخدام الطاقة المخزنة خارج أوقات إنتاجها، مثلاً الاستخدام ليلاً للطاقة المنتجة نهاراً بواسطة منشأة شمسية.

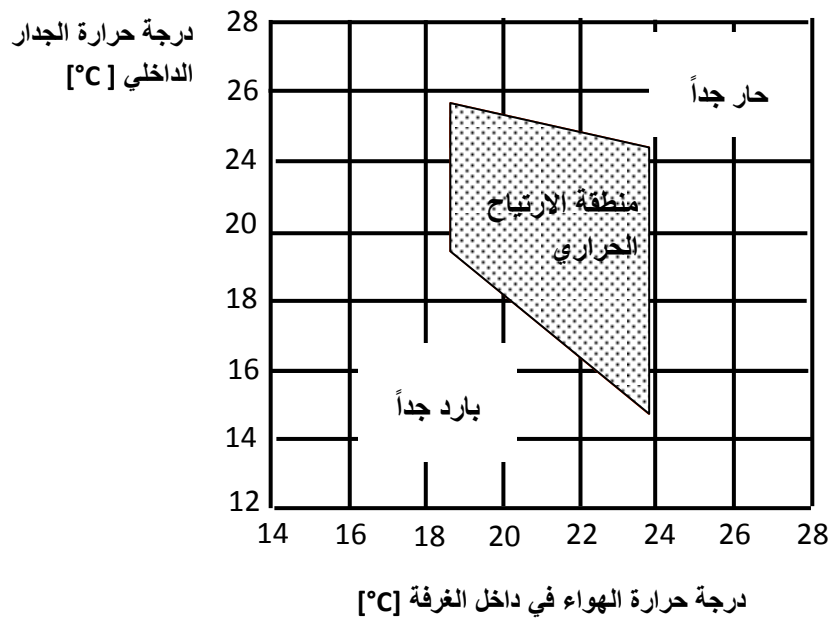
لكن يمكن لتخفيض استهلاك الطاقة أن يؤثر على الشعور بالارتياح الحراري داخل البناء. لذلك من المهم أن يبقى الهواء المحيط عند درجة حرارة ورطوبة واقعتين ضمن مجال الارتياح الحراري. وهذا ما يتطلب إما تدفئة أو تبريد الهواء المحيط تبعاً لدرجة حرارة الهواء الخارجي، وأيضاً الحفاظ على رطوبة مقبولة للهواء. بالإضافة إلى أن مفهوم الارتياح الحراري يرتبط بطبيعة جسم الإنسان، لذلك يُعتبر من الهام أن تكون درجات حرارة جدران الغرفة مناسبة بحيث يسمح بضبط عملية الإشعاع من الجدران أو من الأجسام.

يوجد مقاربات علمية مختلفة لمفهوم الارتياح الحراري، فمثلاً بعضها يبيّن أن شروط الارتياح الحراري تقع ضمن منطقة تُعرّف باسم منطقة الارتياح والتي تكون معيّنة من خلال فقط درجة الحرارة ورطوبة الهواء النسبية أو النوعية (الشكل 1)، في هذه الحالة يكون هواء الغرفة ساكناً ولا يتبادل مع جسم الإنسان سوى الحرارة والكتلة (بخار الماء). لكن عند وجود حركة للهواء فإن هذه التبادلات تشتد، وتتوسع منطقة الارتياح نحو درجات الحرارة الأعلى ونحو معدلات الرطوبة الأكبر.

إن تبادل الحرارة يحدث أيضاً بواسطة الإشعاع الحراري مع جدران الغرفة، ومن ثم فإن الشعور بالارتياح الحراري سيختلف تبعاً لموقع الشخص في الغرفة وذلك إذا كانت درجة حرارة جدرانها مختلفة كثيراً عن بعضها بعضاً [1]. لذا نعين منطقة ارتياح حراري تأخذ بالحسبان درجة حرارة الجدران (الشكل 2). ولهذا يكون من الضروري القدرة على التحكم بدرجة حرارتها.



الشكل (1): مناطق الارتياح الحراري. المنطقة المهيمنة من أجل الهواء الساكن. المنطقة المحيطة من أجل الحالة التي يتحرك بها الهواء.



الشكل (2): منطقة الارتياح الحراري لدرجة الحرارة الداخلية ودرجة حرارة الجدار [2].

أهمية البحث وأهدافه:

الحصول على ارتياح حراري مقبول يؤدي غالباً إلى استهلاك زائد للطاقة، لكن يمكن للأنظمة السلبية (system passive) أن تقدم حلاً من ناحية الارتياح الحراري ومن ناحية اقتصادية الطاقة. فهي تسمح بتخزين الطاقة

عندما تكون متوافرة أو رخيصة ثم استخدامها فيما بعد. إذا استخدمنا مادة متغيرة الطور ضمن الجدران من أجل تخزين الطاقة فإنه يمكن أيضاً التحكم بدرجة حرارة الجدران وذلك من خلال الاختيار الصحيح لدرجة حرارة تغير الطور. نحاول في هذا البحث تعيين تأثير استخدام المواد متغيرة الطور على درجات الحرارة الداخلية من أجل التحكم بها، وللحد من استخدام الطرق التقليدية في تحقيق عملية الارتياح الحراري مثل مكيفات الهواء.

طرائق البحث ومواده:

لقد أظهرت دراسة مبكرة تعود إلى عام 1980، قامت بدمج جدران إيزوترمية في بناء حقيقي، بأن استبدال مواد البناء التقليدية بالكورث (وهو عبارة عن مادة متغيرة الطور PCM مكونة من مزيج من هيكساهدرات كلوريد الكالسيوم مع نوع من الحجارة المسامية) يؤدي إلى ربح حقيقي في الطاقة [3]. كما أدى دمج المواد متغيرة الطور هذه مع جدار الترومب (Trombe) إلى تحقيق وفر في الطاقة بمقدار أكثر من 10% [4].

ويوجد الكثير من الباحثين الذين قاموا بدمج المواد متغيرة الطور مع جدران من الجص أو مع الجدران البيتونية [5]، [6]، [7]، [8]، [9]، [10] وذلك من أجل تخزين/ تحرير الطاقة القادمة من الشمس أو من داخل المبنى.

درس Lai et al تأثير إضافة PCM ضمن فراغات عازل حراري هو الأجر المستخدم في سطح مستو على الخواص الحرارية، وتم تعريف نموذجين متماثلين أحدهما معالج بمادة متغيرة الطور والآخر لا يحتوي PCM إلى الإشعاع الشمسي بنفس الوقت، فتبين أن الأجر المعالج بالمادة متغيرة الطور يمتلك خاصية عزل حراري أفضل خلال النهار، حيث كانت درجة الحرارة العظمى للسطح الداخلي للأجر المعالج بالمادة متغيرة الطور تساوي $31,7^{\circ}\text{C}$ وهي أقل بـ $4,9^{\circ}\text{C}$ منها بالنسبة للأجر غير المعالج بالمادة متغيرة الطور. بالإضافة إلى أنه قد تم حفظ الحرارة الداخلية ليلاً ولكن لم تعط الدراسة أية معلومات حول درجة الحرارة الداخلية [11].

أما Cabeza فقد استخدم في تجربته المكونة من غرفتين تجريبتين كبسولات حاوية على مواد متغيرة الطور ضمن الجدران البيتونية، حيث إن درجة حرارة انصهار المادة متغيرة الطور هي 26°C وحرارتها الكامنة 110 kJ/kg ، أظهرت النتائج أن كلاً من درجة الحرارة الداخلية ودرجة حرارة الجدار قد انخفضت، كما بين الباحث أن عملية الدمج لم تؤثر في الخواص الميكانيكية للبيتون [12].

درس Ahmad et al العطالة الحرارية لخليتين تجريبتين حجم كلّ خلية 1m^3 ، حيث قاموا بتحديد مواصفات العطالة الحرارية بإضافة مواد متغيرة الطور على الطبقة الداخلية للجدران الرقيقة لإحدى الخليتين وتمت المقارنة مع الخلية الأخرى التي لا تحتوي PCM، وقد جربوا عدة مواد متغيرة الطور مثل البارافين، والحموض الدهنية (fatty acid)، والإيونكتيك وأملاح الهيدرات (salt hydrat)، كما تم اختبار نماذج مختلفة من الجدران بهدف تطوير نوع من الجدران الخفيفة، ولقد وقع الاختيار على نوع من الألواح البلاستيكية التجارية المصنوعة من البولي كربونات [13]، [14]، [15].

عموماً، من أجل زيادة السعة الحرارية المكافئة فإنه يمكن دمج المواد متغيرة الطور ليس فقط في هيكل البناء وإنما أيضاً في الجدران الداخلية.

يعتمد بحثنا على دراسة تجريبية وأخرى رياضية. حيث تمت الدراسة التجريبية من خلال بناء خلية تجريبية مكونة من غرفتين موصولتين عن بعضهما بوساطة جدار مصنوع من بلوك زجاجي مملوء بمادة متغيرة الطور، تمنع هذه البنية للجدار المادة متغيرة الطور من السيلان أو التسرب من الجدار عندما تكون في الطور السائل. وقد تم اختبار

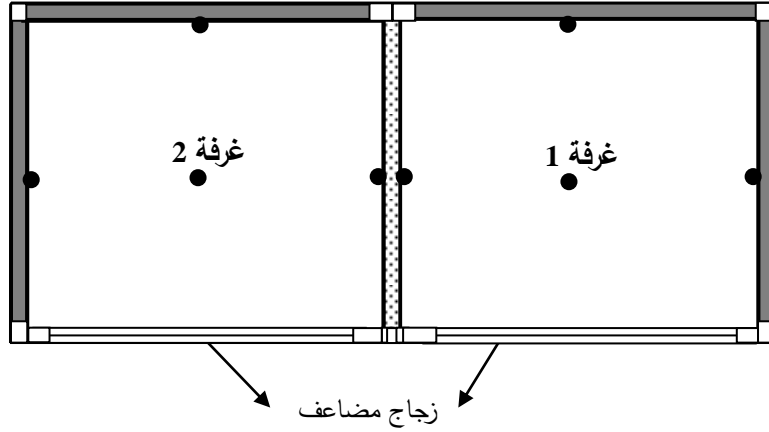
ثلاثة أنواع مختلفة من المواد متغيرة الطور هي البارافين، والحموض الدهنية، وأملاح الهيدرات. كما تمّ قياس درجات الحرارة الداخلية والخارجية وكذلك التدفقات الحرارية. وقمنا بمقارنة القيم المقاسة مع درجات الحرارة الداخلية لخلية تجريبية أخرى مكونة أيضاً من غرفتين متجاورتين ومفصولتين عن بعضهما بواسطة جدار من البلوك الزجاجي غير مملوء بمادة متغيرة الطور. ومن ثمّ تمت مقارنة النتائج التجريبية مع النتائج الرياضية التي تمّ الحصول عليها من خلال الموديل الرياضي الذي تمّ وضعه ودمجه مع البرنامج TRNSYS15.

المنشأة التجريبية:

قمنا بإنشاء خليتين تجريبيتين، تحوي كلّ خلية على نافذة تتجه نحو الجنوب من أجل تلقي أكبر كمية ممكنة من الإشعاع الشمسي، وخاصة في فصل الشتاء. تتكون كلّ خلية من غرفتين متجاورتين ومفصولتين عن بعضهما بواسطة جدار مصنوع من عدد من بلوكات زجاجية إما مملوءة أو غير مملوءة بالمادة متغيرة الطور. (الشكلين 3 و 4).



الشكل (3) : الخلية التجريبية.



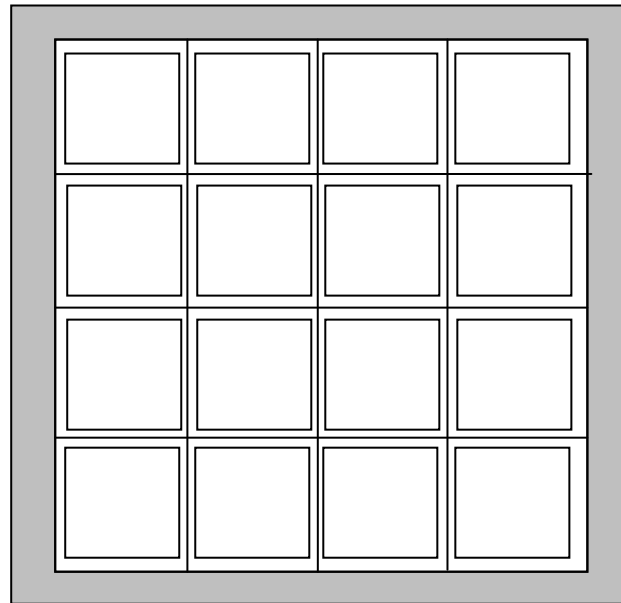
الشكل (4) : مسقط أفقي للخلية التجريبية.

● : تدل على مكان توضع مقاييس التدفق الحراري ودرجات الحرارة

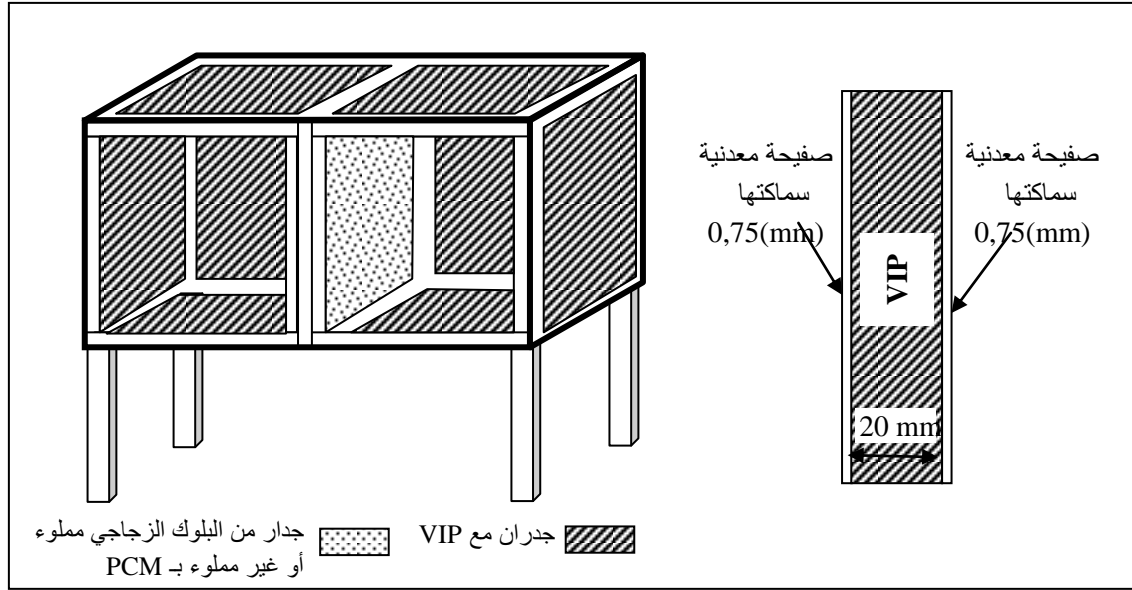
الجدار الفاصل بين الغرفتين يتكون من 16 مكعباً زجاجياً مجوّفاً، ومحمولاً بواسطة إطار من الألمنيوم (الشكل 5).

في كلّ غرفة يوجد نافذة مصنوعة من زجاج مضاعف وموجهة نحو الجنوب، وتحوي أربعة جدران مصنوعة من ألواح من مواد فائقة العزل (Vacuum Insulation Panels) VIP سماكتها 20 mm ومتوضعة بين صفيحتين معدنيتين مصقولتين سماكة كلّ صفيحة 0,75 mm (الشكل 6).

كما أنه قد تمّ استخدام ثلاثة أنواع من المواد متغيرة الطور: حموض دهنية fatty acid وبارافين وأملاح الهيدرات salt hydrat، درجات حرارة انصهار هذه المواد هي على الترتيب 21°C و 25°C و 27°C .



الشكل (5): الجدار الفاصل مكون من 16 بلوكية زجاجية مملوءة بالمادة متغيرة الطور.



الشكل (6): بنية الجدران الخارجية للخلايا التجريبية. حيث VIP عبارة عن مادة فائقة العزل الحراري.

التجهيزات وأدوات القياس:

لقد استخدم من أجل القياس عشرة مقاييس للتدفق الحراري fluxmeters، التي وُضعت، بعد أن تمّت معايرتها، في مركز السطح الداخلي لكلّ جدار خارجي وعلى كلّ من السطحين الداخلي والخارجي للجدار الزجاجي الفاصل بين الغرفتين (الشكل 4).

يترافق مع كلّ مقياس للتدفق الحراري مزدوجة حرارية Thermocouple. بالإضافة إلى وجود مزدوجة حرارية في مركز كلّ غرفة من أجل قياس درجة الحرارة الداخلية.

إنّ الخليتين التجريبتين موجودتان في الوسط الخارجي، لذلك تكونان معرضتين للتغيرات المناخية الحقيقية التي ستمثل الشروط المحيطية من أجل المحاكاة الرقمية.

وقد تمّ قياس بارامترات المناخ بواسطة محطة للأرصاد الجوية مجاورة للخلايا التجريبية.

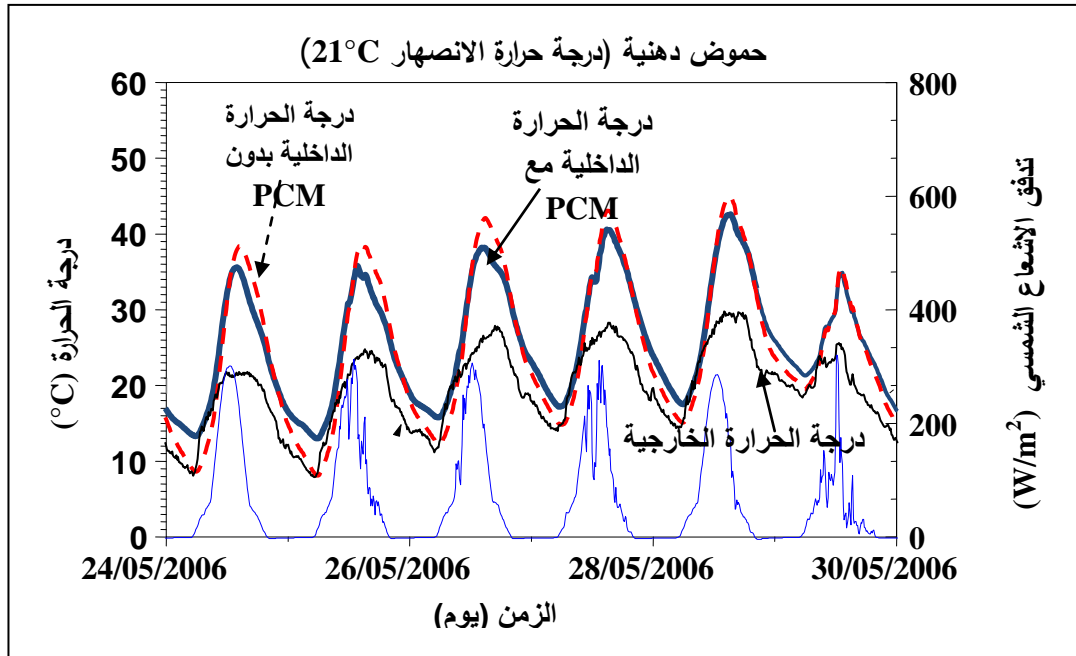
كما تمّ استخدام مسجل بيانات مستقل وضعناه ضمن صندوق مقاوم للماء يسجل خرج مقاييس التدفق ويحولها إلى قيم رقمية ويخزنها.

ولقد قمنا بجمع المعطيات مباشرة بفضل الربط بين مسجل البيانات وجهاز كمبيوتر مزود ببرنامج اتصالات نوعي (PC 208W Datalogger support software).

النتائج والمناقشة:

قمنا بإجراء الكثير من القياسات في أوقات مختلفة من السنة، ونعرض فيما يلي بعض النتائج التي تمّ الحصول عليها خلال فصلي الربيع والصيف من عام 2006. الأشكال (7 و 8 و 9) توضح تغيّرات درجة الحرارة كتابع للزمن بالإضافة إلى تدفق الإشعاع الشمسي من خلال النافذة ذات الزجاج المضاعف من أجل الأنواع الثلاثة للمادة متغيرة الطور وهي حموض دهنية fatty acid وبارافين وأملاح الهيدرات salt hydrat على الترتيب، كما نبين على كلّ شكل

درجة الحرارة الداخلية للخلية مع أو دونها مادة متغيرة الطور PCM. كما نبيّن أيضاً درجة حرارة سطح الجدار الزجاجي الفاصل بين الغرفتين.



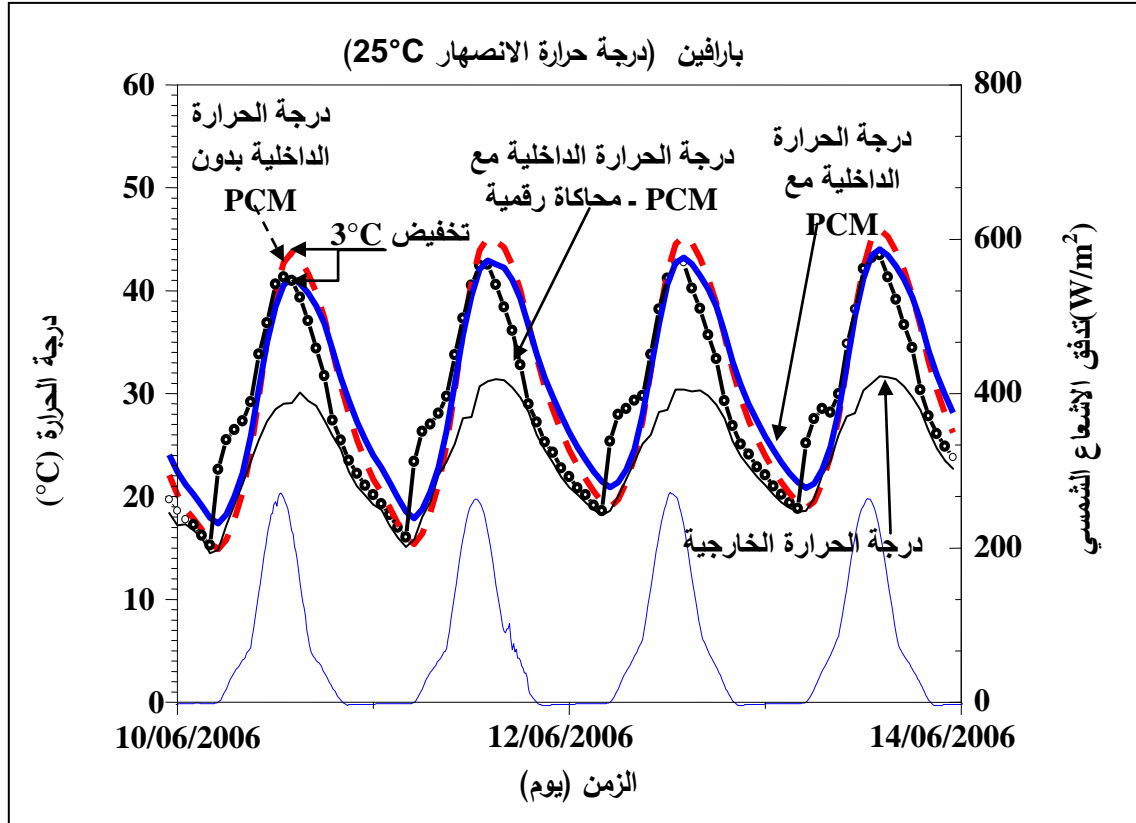
الشكل (7): تغيرات درجة الحرارة خلال عدة أيام من أجل الخلية التجريبية الحاوية على fatty acid كمادة متغيرة الطور.

لقد لوحظ، من أجل كلّ فترة قياس؛ وذلك بالنسبة لأنواع الثلاثة المختلفة للمادة متغيرة الطور المستخدمة في ملء الجدار الزجاجي الفاصل؛ أنّ درجة الحرارة الداخلية للخلية التجريبية مع PCM تصل إلى قيمة أعظمية أقلّ منها بالنسبة للخلية التجريبية التي لا تحوي PCM. حيث إنّ مقدار تخفيض درجة الحرارة يتراوح بين $3,5^{\circ}\text{C}$ إلى 4°C في حالة الحموض الدهنية (fatty acid)، و 2°C إلى 3°C في حالة البارافين. و $3,5^{\circ}\text{C}$ إلى 5°C في حالة أملاح الهيدرات (salt hydrat). ومن همّ يمكن أن نعطي الملاحظات التالية:

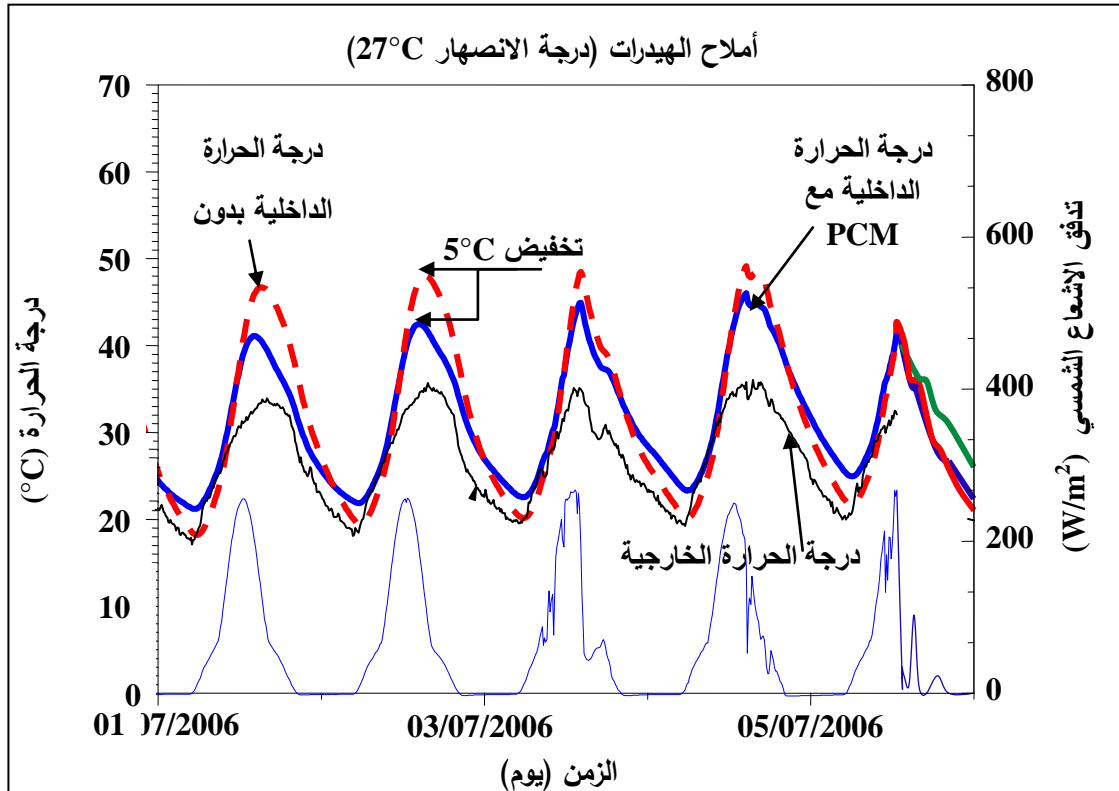
. يتناقص التدفق الإشعاعي الشمسي الأعظمي المار من خلال النافذة ابتداء من شهر أيار (الشكل 7) حتى شهر تموز (الشكل 9) وذلك بسبب زاوية سقوط الإشعاع الشمسي.

. ترتفع درجة الحرارة الداخلية إلى قيمة أعلى من درجة حرارة انصهار المادة متغيرة الطور. وذلك بسبب وجود كمية مهمة من الطاقة الشمسية التي قد خزّنت على شكل حرارة محسوسة.

. يبدو أنّ مقدار تخفيف شدة تغيرات درجة الحرارة يكون أكبر من أجل أملاح الهيدرات وهو بحدود 5°C ، وعلى الرّغم من أنّ الفروقات صغيرة إلاّ أنّها تميل إلى الازدياد.



الشكل (8): تغيرات درجة الحرارة خلال عدة أيام بالنسبة للخلايا التجريبية ذات الجدار الفاصل الحاوي على البارافين.



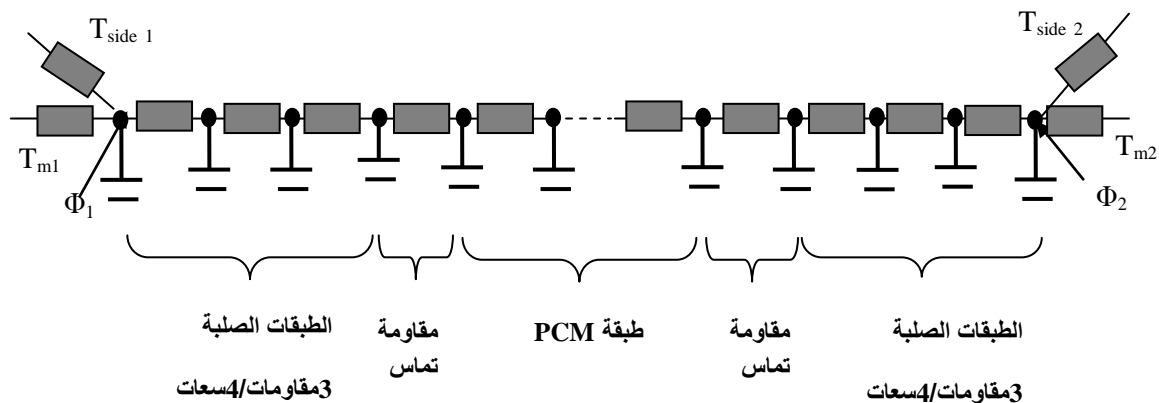
الشكل (9): تغيرات درجة الحرارة خلال عدة أيام بالنسبة للخلايا التجريبية ذات الجدار الفاصل الحاوي على أملاح الهيدرات.

عموماً، إنَّ تعيين تأثير المادة متغيرة الطور على تغيرات درجة الحرارة الداخلية ليس بالأمر السهل وذلك لأنَّ الشروط المحيطية متغيرة. ويجب ملاحظة أنه نتيجة لدخول الأشعة الشمسية فإنَّ درجة الحرارة الداخلية تكون أعلى. لذلك سيكون من الهام، في البناء الحقيقي، تخفيض مقدار الأشعة الشمسية الداخلة وضمان التهوية خلال الليل. من أجل تحديد دقيق لصفات سلوك الخلية التجريبية، فإنَّه من الضروري تحقيق شروط محيطية متماثلة للخلايا التجريبية التي تحوي على مواد متغيرة الطور مختلفة، وهذا مايمكن تحقيقه من خلال المحاكاة الرقمية. لهذا تمَّ تطوير موديل أحادي البعد بواسطة البرنامج الرياضي TRNSYS15. وقد تمَّت مقارنة نتائج النمذجة الرياضية مع النتائج التجريبية.

المحاكاة الرقمية:

وصف الموديل:

يوجد دراسات سابقة قام بها Ahmad et al [13] على خلية تجريبية مكونة من غرفة واحدة حيث تمَّت النمذجة باستخدام موديل ثلاثي البعد وضع من قبل Jokisaco et al [16]، وتمَّ دمجها في برنامج TRNSYS15 من قبل Ahmad et al، وقد كانت النتائج تحاكي الواقع بشكل جيّد [13]. ولكن بما أنَّ المدة اللازمة لإنجاز الحساب بواسطة هذا الموديل طويلة (ساعتان إلى ثلاث ساعات لمحاكاة شهر أو شهرين) فقد تمَّ تطوير موديل رياضي أحادي البعد Faure et al وذلك بمساعدة برنامج TRNSYS15 قادر على إجراء الحساب خلال زمن أقصر [17]. في النموذج المقترح تمَّ اعتبار أنَّ الجدار مكون من سبع طبقات هي: طبقة المادة متغيرة الطور PCM، ويوجد على كلِّ جانب لها ثلاث طبقات أخرى. المقارنة التي اعتمدت لنمذجة هذا الجدار متعدد الطبقات هي: جملة (مقاومات . ساعات حرارية). (الشكل 10).



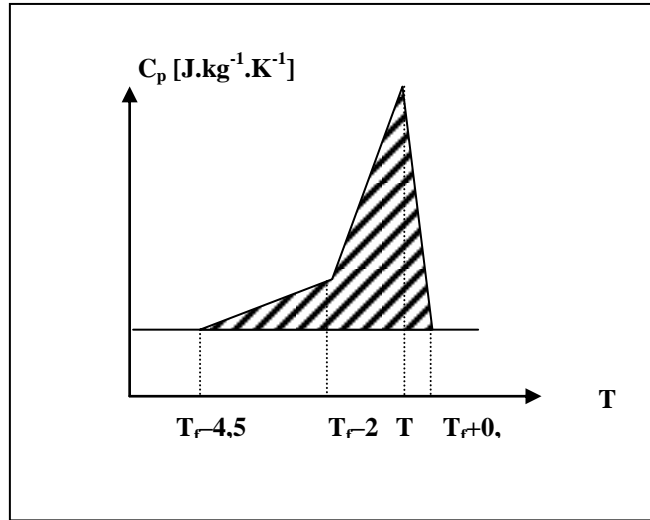
الشكل (10): موديل مقاومة . ساعة للجدار متعدد الطبقات. T_m : متوسط درجة الحرارة المحيطية على كلِّ جانب من الجدار.

لقد تمَّت نمذجة الطبقات الثلاثة المكوّنة من المواد الصلبة الموجودة على كلِّ جانب لطبقة الـ PCM بواسطة ثلاث مقاومات/ أربع ساعات حرارية. كما تمَّ إضافة مقاومة تماس بين كلِّ مادتين مختلفتين ومتجاورتين. الشروط الحدية؛ شروط من نوع فوربييه؛ هي عبارة عن متوسط درجة الحرارة المحيطية على كلِّ جانب من الجدار. ويمكن أيضاً إضافة التدفق الساقط على كلِّ جانب.

من أجل نمذجة تغيّر الطور، فإنّه يوجد إمكانيات مختلفة منها: موديل Kondo الذي يركز على تمثيل السعة الحرارية التقريبية C_p بواسطة منحنيات ذات أشكال مختلفة [18] ، أو بأخذ المنحني الحقيقي للسعة الحرارية والذي يمكن قياسه كتابع لدرجة الحرارة بواسطة كالوري متر (differential scanning spectroscopy).

لقد تمّ وضع موديل Kondo بمساعدة دراسة تمّ فيها دمج المادة متغيرة الطور في جدران من الجبس. حيث قام الباحث بقياس الإيصالية الحرارية والسعة الحرارية النوعية للمواد المستخدمة في التجارب وخاصة بالنسبة للألواح الحاوية على المواد متغيرة الطور، وقد أجرى ثلاثة قياسات: في الطور الصلب، وفي أثناء تغيّر الطور، وفي الطور السائل، وذلك من أجل تعيين الحرارة المحسوسة والحرارة الكامنة. ومن خلال هذه القياسات تمّ استنتاج الموديل المستخدم في المحاكاة الرقمية، حيث C_p عبارة عن تابع لدرجة الحرارة. وقد تمّ حساب السعة الحرارية الكتلية بمساعدة ثلاثة مستقيمات تمّ تعيينها مع الأخذ بالحسبان أنّه يمكن للانصهار أن يحدث على مجال معيّن من درجات الحرارة المجاورة لدرجة حرارة الانصهار والذي يمكن تحديده كما يلي:

[درجة حرارة الانصهار - 4,5°C] ، [درجة حرارة الانصهار - 2°C] ، [درجة حرارة الانصهار] ، [درجة حرارة الانصهار + 0,5°C] كما هو موضح على الشكل (11). ولقد أثبت Alisetie and Roy أنّ لشكل المنحني الممثل للسعة الحرارية C_p تأثيراً ضعيفاً على نتائج حساب انتقال الحرارة خلال الجدار. كما تمّ تأكيد هذا الموديل من قبل عدة باحثين آخرين [19]. فقد حصل Faure et al باستخدام هذا الموديل لدراسة السلوك الحراري لغرفة حجمها 40m³ وتحوي جدرانها على مواد متغيرة الطور على نتائج واقعية [20].



الشكل (11): موديل Kondo. السعة الحرارية النوعية كتابع لدرجة الحرارة. المساحة المهيشرة تمثل الحرارة الكامنة. T_f هي درجة حرارة انصهار المادة متغيرة الطور.

بالنسبة لبحثنا؛ حيث توجد المادة متغيرة الطور ضمن جدار زجاجي، فقد استخدمنا موديل Kondo من أجل نمذجة تغيّر الطور، كما أننا قمنا بقياس قيم السعة الحرارية المكافئة كتابع لدرجة الحرارة بواسطة كالوري متر DSC. ويمكن كتابة مجمل جملة المعادلات المعيرة عن النظام كما يلي:

$$C \cdot \dot{T}(t) = M \cdot T(t) + A \cdot S(t) \quad (1)$$

حيث،

C: المصفوفة القطرية للسعات الحرارية.

M : مصفوفة البارامترات التي تصف السلوك الديناميكي للنظام.

$T(t)$: مصفوفة الحالة (مصفوفة عمود تمثل درجة الحرارة في كل عقدة T_1, T_2, T_3, \dots).

$\dot{T}(t)$: المشتق بالنسبة للزمن.

A : عبارة عن المصفوفة التي توضح كيفية دخول إشارات الدخل إلى النظام.

$S(t)$: المصفوفة المعبرة عن مقادير الدخل (درجة حرارة الهواء الخارجي، الإشعاع الشمسي، الريح، ...) وهي

مصفوفة عمود.

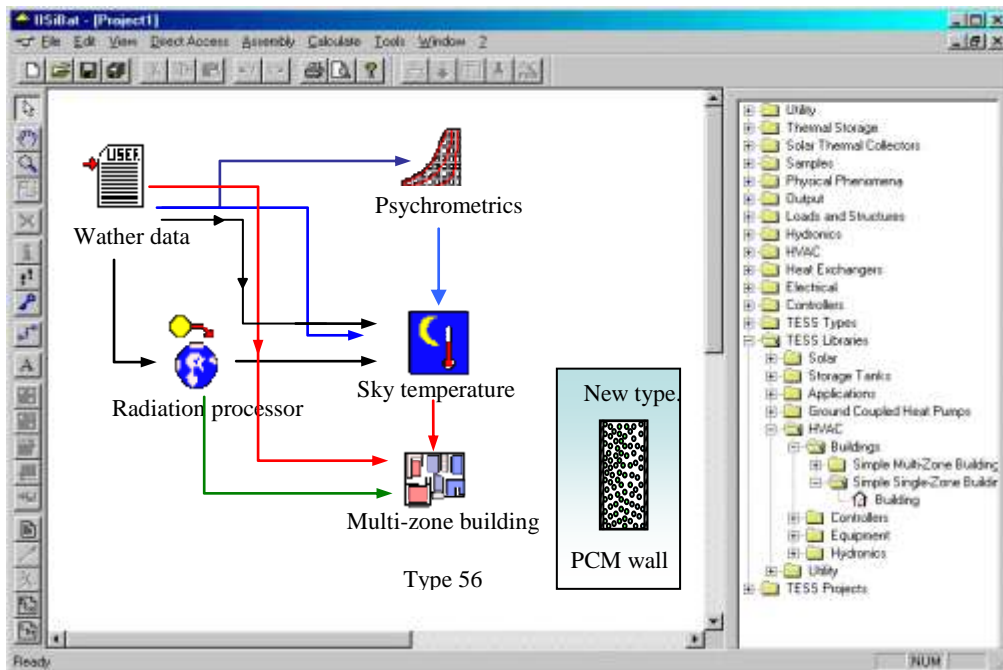
إنّ المخطط الرقمي هو بالكامل ضمني (implicite). وبإجراء عملية تكرار متتالية نستطيع حساب عوامل المصفوفة M عند درجات الحرارة النهائية الموافقة لخطوة الزمن المعتمدة.

مقارنة بين النتائج التجريبية و نتائج المحاكاة ارقمية:

أظهرت دراسة سابقة؛ قمنا فيها بدمج الموديل الرياضي الذي وضعناه للجدار الفاصل مع برنامج TRNSYS15 من خلال Type56 (الشكل 12)؛ من أجل محاكاة الخلية التجريبية المكونة من غرفتين والجدار الفاصل بينهما لا يحوي على مادة متغيرة الطور، إنّ الموديل الرياضي قد استطاع أن يصف بشكل دقيق السلوك الحراري للخلية التجريبية التي لا تحوي PCM.

أما عند ملء البلوك الزجاجي بالمادة متغيرة الطور؛ مثلاً بالبارافين؛ فإننا نحصل على النتائج الموضحة على الشكل (8). حيث الشروط الحدية المستخدمة في المحاكاة الرقمية هي عبارة عن المعطيات المناخية المحلية الموافقة لمكان إجراء التجربة، وهي عبارة عن درجة الحرارة الخارجية T_{ext} والإشعاع الشمسي الكلي الأفقي (الشكل 8).

من الجدير بالملاحظة أنّ منحنى درجة الحرارة الداخلية التي تمت محاكاتها (والتي أسميناها $T_{PCM \text{ sim}}$) يتبع بتغيراته نفس تغيرات منحنى درجة الحرارة المقاسة ($T_{PCM \text{ exp}}$). ويمكن للفارق البسيط في الطور بين المنحنيين أن يكون نتيجة للعطالة الحرارية ولنمذجة ظاهرة تغير الطور.



الشكل (12): نافذة للبرنامج المستخدم في المحاكاة الرقمية. IISiBat هو عبارة عن الواجهة البيانية لبرنامج TRNSYS.

ونذكر أننا قمنا بنمذجة الموديل الرياضي بمساعدة موديل Kondo، حيث لم تكن قيم السعة الحرارية المكافئة متوافرة. وقد استخدمنا قيم درجة حرارة الانصهار والحرارة الكامنة المزودة من قبل الشركة الصانعة. ومع ذلك فقد أجرينا قياساً للسعة الحرارية المكافئة بوساطة كالوري متر DSC الذي معدل مسحه (scan rate) تساوي $3^{\circ}\text{C}/\text{mn}$. ويتعلق المنحني الناتج عن الكالوري متر بأبعاد العينة المقاسة، وبمعدل المسح (scan rate). علماً أنّ معدل تغير درجة الحرارة في الخلية التجريبية هو من مرتبة $0,3^{\circ}\text{C}/\text{mn}$ كما أنّ القيم المزودة من الشركة الصانعة لاتناسب تماماً ظروف تجربتنا.

يمكن أيضاً إرجاع الاختلاف بين نتائج المحاكاة الرقمية والنتائج التجريبية إلى الانصهار غير المتجانس للمادة متغيرة الطور، حيث تمّ في المحاكاة الرقمية اعتبار أنّ السطح الفاصل بين الطور الصلب والطور السائل عبارة عن سطح مستو.

نلاحظ على الشكل (13) أنّ المادة متغيرة الطور سائلة، وبشكل خاص في مركز البلوكة الزجاجية، وهذا ما يدحض اعتماد فرضية أنّ السطح الفاصل بين الطورين السائل والصلب عبارة عن سطح مستو. كما أنّ انتقال المادة متغيرة الطور أثناء الطور الصلب نحو الجزء السفلي للبلوكة الزجاجية يؤدي إلى ظهور تأثير للحمل الطبيعي، والذي يؤدي إلى زيادة عملية انتقال الحرارة عبر الجدار الزجاجي. بسبب هذا التأثير وجمعه إلى زيادة التبريد (subcooling) فإنّ منحنيات درجة الحرارة التجريبية لا تحوي على جزء منبسط يدلّ على تغير الطور، وذلك على خلاف منحنيات المحاكاة الرقمية التي يبدو فيها هذا الانبساط واضحاً عند درجة حرارة تغير الطور (الشكل 8).



الشكل (13): شكل المكعبات الزجاجية بعد عملية انصهار جزئي للمادة متغيرة الطور. اللون الأبيض هو للطور الصلب.

الاستنتاجات والتوصيات:

لقد حاولنا في هذا البحث التركيز على تأثير استخدام المواد متغيرة الطور على التحكم بدرجة الحرارة الداخلية وذلك من أجل الحدّ من استخدام أنظمة تكييف الهواء الفعّالة.

تُظهر النتائج التي تمّ الحصول عليها على أنّ درجة الحرارة الداخلية للخلية التجريبية تبقى مرتفعة؛ على الرغم من انخفاضها في حال استخدام المواد متغيرة الطور PCMs مقارنة مع الحالة التي لا يُستخدم بها PCMs؛ لذلك من الضروري فهم الأنظمة التي تجمع بين استخدام المواد متغيرة الطور PCMs مع تهوية ليلية فعّالة وأيضاً الحدّ من الدخول الزائد للأشعة الشمسية.

لقد تمّ، من أجل المحاكاة الرقمية، وضع موديل رياضي أحادي البعد، حيث أظهرت النتائج الحسابية توافقاً مع النتائج التجريبية. وسنقوم بتحسين هذا الموديل بأخذ التبريد الزائد بالحسبان. أمّا بالنسبة لقيم السعة الحرارية النوعية المستخدمة في الموديل الرياضي فإنّه سوف يتم قياسها في مرحلة قادمة من إجراء التجارب بواسطة كالوري متر ذي معدّل مسح أبطأ حتى تكون معبّرة عن تغيرات درجة الحرارة اليومية. في الحالة الخاصة للبلوك الزجاجي، فقد تمت ملاحظة وجود حمل حراري طبيعي وهذا ما يجب أخذه بالحسبان في الموديل الرياضي مستقبلاً.

بالنسبة للجدران العادية، فإنّ هذا الموديل الرياضي سيسمح لنا بتحديد خصائص مواد متغيرة الطور متعددة وكذلك الآلية التي تبيّن كيفية احتوائها ضمن الجدران، وهذا العمل في قيد الإنجاز.

نذكر أنّه قد تمّ إنجاز الخلايا التجريبية في المركز العلمي والتقني للأبنية في مدينة غرونويل . فرنسا وقد تمّ تمويل جزء من هذه الدراسة من قبل الوكالة الفرنسية للبيئة وإدارة الطاقة، علماً أنّ الدراسة لا تزال مستمرة.

المراجع:

- [1] LAVIGNE, P. *Architecture bioclimatique*. Edisud, Aix-en-Provence, France, 1994.
- [2] RUBITHERM. Gmbh–Paraffine in thermal energy storage applications, 2003. <http://www.rubitherm.com/>
- [3] HENRY, J.G., BERGER, X . *La maison solaire de Grimaud*. Reuve Phys. Vol. 15, 1980, 569-572.
- [4] BOURDEAU, L. *Utilisation d'un matériau à changement de phase dans un mur Trombe sans thermocirculation*. Revue Phys. Vol. 17, 1982, 633-642.
- [5] SALYER, I.O., SIRCAR. CHARTOFF, R.P., MILLER, D.E. *Advanced phase change materials for passive solar storage applications*. in Proceedings of the 20 th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. Warrendale. Pa, USA, 1985, 699 – 709.
- [6] SHAPIO, M. FELDMAN, D. , HAWES, D., BANU, D. *PCM thermal storage in drywall using organic phase change material*. Passive Solar Journal, Vol. 4, 1987, 419 – 438.
- [7] BABICH, M.W., BENRASHID, R., MOUNTS, R.D. *DSC studies of energy storage materials. Part 3: Thermal and flammability studies*. Thermchimica acta, Vol. 243, 1994, 193 – 200.
- [8] BANU, D., FELDMAN, D., HAGHIGHAT, F., PARIS, J., HAWES, D. *Energy storing wallboards: flammability tests*. Journal of Materials and Civil Engineering, Vol. 10, 1998, 98 – 105.
- [9] TYAGI, V.V., BUDDHI, D. *PCM thermal storage in building: A state of art*. Renewable & Sustainable Energy Reviews, Vol. 11, 2007, 1146 – 1166.

- [10] XU, X., ZHANG, Y., LIN, K., DI, H., YANG, R. *Modeling and simulation on the thermal performance of shape – stabilized phase change material floor used in passive solar buildings*. Energy and Buildings, Vol. 37, N°10, 2008, 1084 – 1091.
- [11] LAI, C., CHIANG, C. *How phase change materials affect thermal performance: hollow bricks*. Building Research & Information, Vol. 34, N°2, 2006, 118 – 130.
- [12] CABEZA, L.F. CASTELLON, C., NOUGUES, M., MEDRANO, M., LEPPERS, R., ZUBILLAGA, O. *Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings*. Energy and Buildings, Vol. 39, N°2, 2007, 113 – 119.
- [13] AHMAD, M. *Nouveau composants actifs pour la gestion Energétique de l’enveloppe légère des bâtiments. Couplage matériaux à changement de phase, super – isolant, apports soalire*. Ph. D. Thesis, Université Goseph Fourier Grenoble, 2004, 235P.
- [14] AHMAD, M., BONTEMPS, A., SALLEE, H., QUENARD, D. *Experimental investigation and computer simulation of thermal behavior of wallboards containing a phase change material*. Energy and buildings, Vol. 38, N°4, 2006. 357 – 366.
- [15] AHMAD, M., BONTEMPS, A., SALLEE, H., QUENARD, D. *Experimental investigation and numerical simulation of a prototype cell using light wallboards coupling vacuum isolation panels and phase change materials*. Energy and buildings, Vol. 38, N°6, 2006, 673–681.
- [16] JOKISALO, J. *Thermal simulation of PCM structures with TRNSYS*. Helsinki University of Technology. HVAC – Laboratory, Internal report.
- [17] FAURE, X., JOHANNES, K., SALLEE, H., QUENARD, D. PREBAT. IMCPBAT project, midterm report, 2006, 58p.
- [18] KONDO, T., IBAMOTO, T., TSUBOTO, Y. *Research on the thermal storage of PCM wallboard*. Workshop for International Energy Agency, Annex 10, Japan, 2000.
- [19] ALISETTI, E.L., ROY, K. *Forced convection heat transfer to phase change material slurries in circular ducts*. Journal of thermophysics and heat transfer, Vol. 14, 2000, 115 – 118.
- [20] FAURE, X., JOHANNES, K., SALLEE, H., QUENARD, D. *RC network approach for hybrid envelops in positive energy buildings*. Proceedings of EPIC 2006 HIVC, France, 2006, 473 – 478.