

الحفاظ على درجة حرارة اللواقط الكهروضوئية عند درجة حرارة ثابتة باستخدام المواد متغيرة الطور (PCM)

الدكتورة مها احمد*

(تاريخ الإيداع 13 / 7 / 2009. قُبِلَ للنشر في 19 / 1 / 2010)

□ ملخص □

إن ارتفاع درجة حرارة اللاقط الكهروضوئي نتيجة تعرضه المستمر للأشعة الشمسية يلعب دوراً هاماً في خفض مردود عملية تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية. لذلك فإنّه من الهام القيام بالتحكم ويحصر عملية التسخين هذه.

يهدف هذا البحث إلى الاستفادة من خواص المواد متغيرة الطور بغيّة المساهمة في إيجاد حلول تسمح بتحقيق عملية تبريد اللاقط الكهروضوئي، أو المحافظة على درجة حرارته قريبة قدر الإمكان من درجة حرارة الوسط المحيط. لقد تم من أجل الدراسة إجراء محاكاة رقمية، للجملة المكونة من اللاقط الكهروضوئي مع المادة متغيرة الطور، باستخدام برنامج رقمي خاص بدراسة عملية التوصيل الحراري يُعرف بـ "Heating". وسنبيّن أنّ عملية المزوجة ما بين اللاقط و المادة متغيرة الطور فعالة إذا ماتم تحسين الإيصالية الحرارية المكافئة للمادة متغيرة الطور.

الكلمات المفتاحية: اللاقط الكهروضوئي، المواد متغيرة الطور (PCM)، محاكاة رقمية، Heating، الحرارة الكامنة.

*مدرسة - قسم القوى الميكانيكية - كلية الهندسة الميكانيكية و الكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

Thermalisation De Capteurs Photovoltaïques A L'aide D'un Matériau A Changement De Phase (MCP)

Dr. Maha Ahmad*

(Déposé le 13 / 7 / 2009 . Accepté 19/1/2010)

□ Résumé □

Lorsqu'un panneau photovoltaïque est soumis au flux radiatif solaire, une partie de l'énergie reçue est absorbée par le capteur et participe à son échauffement. Le rendement de conversion électrique diminue lorsque la température augmente, il est important de limiter cet échauffement.

Ce travail participe à un projet recherchant des solutions permettant de refroidir le panneau photovoltaïque ou de le maintenir à une température aussi proche que possible de la température ambiante.

Pour cette étude, nous avons réalisé une simulation numérique à l'aide du logiciel de conduction thermique « Heating » en couplant le capteur photovoltaïque avec un Matériau à Changement de Phase (MCP). On montre que ce dispositif est efficace si la conductivité thermique apparente du MCP est améliorée.

Mots clés: Capteur photovoltaïque ; Matériau à Changement de Phase (MCP) ; Simulation numérique ; Heating ; Chaleur latente.

*Enseignant, Département de mécanique, Faculté de génie mécanique et électrique, Université Tichrine, Lattaquié, Syrie. E-mail: ahm_maha@yahoo.fr

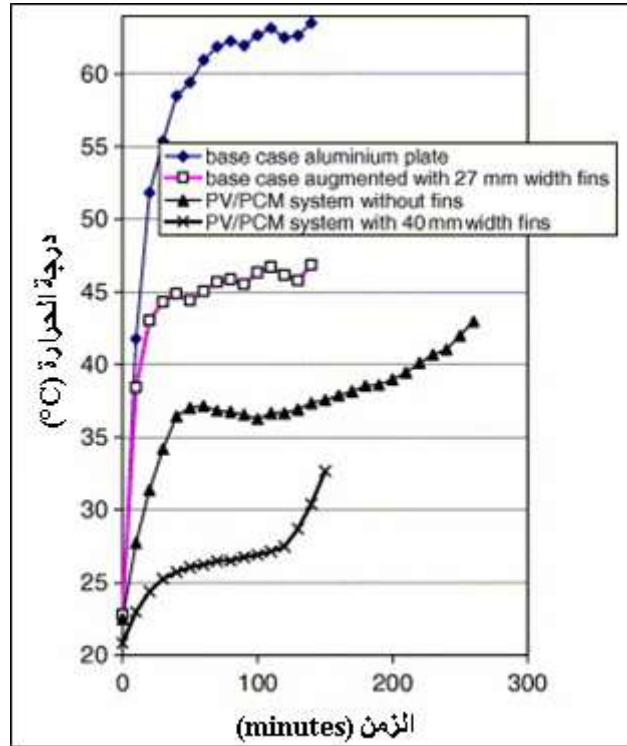
مقدمة:

عندما يتعرض اللاقط الكهروضوئي le panneau photovoltaïque إلى الأشعة الشمسية، فإنه يقوم بتحويل جزء من الطاقة التي يتلقاها إلى طاقة كهربائية، في حين أن الجزء المتبقي من الطاقة المتلقاة يتم إما عكسه عن سطح اللاقط و إما ينفذ إلى اللاقط و يساهم في تسخينه. لهذا التسخين أثر سلبي جداً على المردود في حالة اللاقط الكهروضوئي ذي الخلايا المكونة من سيليسيوم بولي كريستالين. حيث يُلاحظ انخفاضاً بالمردود قدره 5% من أجل زيادة في درجة الحرارة مقدارها 10°C [1] [2].

من جهة أخرى، ومع ازدياد الاهتمام بالطاقة الشمسية، فإنه يُعتبر من الهام في كل بلد أن يتم تطوير أو إحداث جهة صناعية مختصة بإنتاج اللواقط الكهروضوئية المدمجة مع البناء. في حالة اللاقط المدمج مع سطح البناء تكون كمية الحرارة المحررة عبر وجهه الخلفي قليلة جداً، وذلك ليس لكون هذا الوجه قليل التهوية فقط و لكن لكونه أيضاً ملاصقاً لسطح البناء الذي يكون في الواقع أدبياتياً بسبب أنه معزول جيداً. وبهذا قد تتجاوز درجة الحرارة عند مستوى الخلايا 90°C ، عند هكذا درجة حرارة، لا يتناقص فقط المردود، وإنما أيضاً تتأثر مدة حياة اللاقط (اهتراء متسارع لمواد التصنيع، الدورة الحرارية، تشوه متباين لعناصر اللاقط المختلفة، ...).

يمكن تصنيف الأعمال المتعلقة بهذا الموضوع و التي نجدها ضمن الدراسات المرجعية إلى فئتين:
- الفئة الأولى تعتمد على تحسين عملية تبريد اللواقط الكهروضوئية بواسطة الحمل الحراري الطبيعي. إلا أن معظم هذه الدراسات ترتبط بفهم الظواهر الفيزيائية و بتعيين الشروط الحقيقية لإنتاج الكهرباء. بالمقابل، يوجد عدد قليل من الأبحاث التي تهتم بالمحافظة على درجة حرارة ثابتة للواقط الكهروضوئية باستخدام أنظمة تخزين الطاقة. من بين هذه الدراسات نجد الأبحاث التي قام بها Huang et al وقد نُشرت حديثاً [3]، [4] والتي تبين أنه من الممكن أن نأمل بالمحافظة على درجة حرارة اللاقط الكهروضوئي عند الدرجة 30°C لمدة تزيد عن ثلاث ساعات عن طريق استخدام المواد متغيرة الطور، وذلك بوضعها على الوجه الخلفي للاقط. يعطي الشكل (1) تصوراً واضحاً عن أداء اللاقط، مع الأخذ بعين الاعتبار وجود زعانف أو عدم وجودها وكذلك مادة الصنع لصفحة اللاقط، من خلال مقارنة بين درجات حرارة سطح اللاقط من أجل أربعة نماذج مختلفة للواقط معرضة لتدفق حراري قدره 750 W.m^{-2} ، علماً أن درجة الحرارة المحيطة تساوي 23°C [3].

- الفئة الثانية تستند على تبريد اللواقط الكهروضوئية مع إيلاء الأهمية للحرارة المحررة. بالطبع المقصود هنا هو اللواقط Photovoltaïque/thermique (PV/T). وبالتالي نميز بين نظامي تبريد. يعتمد أحدهما على التبريد بواسطة الهواء، بينما يعتمد الآخر على التبريد بواسطة الماء. وفي كلتا الحالتين، تكون التجهيزات اللازمة معقدة وتتطلب أفنية، وأنظمة جريان، وأنظمة خاصة من أجل عملية التحكم بالمائع عند درجة حرارة منخفضة (مبادل، تهوية بالحمل الحراري، تدفئة بالأرضية، مضخة حرارية، ...).



الشكل (1): مقارنة بين درجات حرارة سطح اللاقط من أجل أربعة نماذج مختلفة من اللواقط الكهرضوئية المعرضة لتدفق حراري قدره 750 W.m^{-2} (درجة الحرارة المحيطة تساوي 23°C).

أهمية البحث وأهدافه:

ينتمي هذا البحث إلى الفئة الأولى من الدراسات المذكورة سابقاً، آمليين إيجاد حلول مبتكرة تحقق عملية تبريد اللاقط الكهرضوئي بل المحافظة أيضاً على درجة حرارته قريبة قدر الإمكان من درجة حرارة الوسط المحيط. وذلك باستخدام المواد متغيرة الطور مثلاً أو الزيوليت $z\acute{e}olithes$ والجمع بين هذه المواد و عملية التبريد بواسطة الحمل الحراري. علماً أنّ المخابر العلمية الأخرى التي تسعى لإيجاد حلول لهذه المشكلة تهتم بشكل خاص بالدراسة المعمّقة لأنظمة الحرارة المعقدة اللاخطية.

طرائق البحث ومواده:

تعتمد الدراسة على المقاربتين التاليتين:

- مقارنة علمية ترتكز على تعيين البارامترات الفيزيائية و التقنية التي تسمح بوضع تصوّر للجملة التجريبية وذلك من خلال استخدام الطرق الرقمية المتقدمة.
- المقاربة الثانية تتعلق بنمذجة الظواهر الديناميكية و الحرارية $thermoa\acute{e}rauliques$ ، وبشكل رئيسي بتطوير طرق لمزاوجة الظواهر التي يتغير فيها الزمن كثيراً: الظواهر الديناميكية $a\acute{e}rauliques$ التي تمتلك

* (الزيوليت عبارة عن مواد مسامية قادرة على ادمصاص بخار الماء بسهولة، كما يمكن أن تكون طبيعية أو صناعية، وهي مواد غير عضوية لها بنية كريستالية معقدة).

مقاييس زمنية مميزة للاضطراب (نموذجياً 100Hz)، والظواهر المرتبطة مع عملية التوصيل الحراري أو مع تغير الطور و التي يكون زمنها المميز من مرتبة 1 Hz بل 1/100 Hz. سيتم وبشكل بياني متقن بالنسبة للزمن تمثيل محاكاة سلوك هذه الظواهر من أجل عمليات التحريض شديدة اللاستقرارية (الشمس القصير أو مرور الغيوم حتى تعاقب النهار . الليل).

يجب أن تؤدي النظريات الناتجة عن هذا العمل إلى تقدم مهم في نمذجة الأنظمة الديناميكية الأيروديناميكية aérauliques المفتوحة (مائع محصور جزئياً)، كبيرة الأبعاد، وجود اضطراب، عتالة حرارية للألواح، انتقال الحرارة بالإشعاع. إن الهدف التقني الرئيسي هو تحسين مردود اللواقط الكهروضوئية. لذلك فإن النتائج الرقمية التي سوف نحصل عليها ستسمح بتعيين نظام تخزين الطاقة الملائم للحفاظ على درجة حرارة هذه اللواقط عند قيمة ثابتة. كما أن استخدام الحلول التي تسمح بتثبيت درجة حرارة اللواقط الكهروضوئية الموضوع على أسطح الأبنية عند درجة حرارة قريبة من درجة حرارة الوسط المحيط سوف يمنح أيضاً الفائدة بالوقاية من الأشعة الشمسية، وقد تمتلك بهذا أثراً حاسماً على الشعور بالارتياح الحراري خلال فصل الصيف. سنجري عملية نمذجة وأيضاً عملية محاكاة رقمية مما سيسمح بتقدير الأبعاد الضرورية للألواح. تقوم الدراسة الحالية بإجراء الخطوة الأولى من عملية النمذجة هذه.

المحاكاة الرقمية:

إن عملية إيجاد أفضل طريقة للمحافظة على درجة حرارة ثابتة للاقط، في حالة استخدام مادة متغيرة الطور (PCM)، يمكن أن تتم من خلال البارامترات التالية:

- درجة حرارة تغير الطور
- كمية ال PCM
- الحرارة الكامنة
- الإيصالية الحرارية
- عوامل انتقال الحرارة على كل من سطحي اللاقط.

لذلك سنقوم بإجراء محاكاة رقمية باستخدام برنامج رقمي software خاص بعملية التوصيل الحراري يُعرف بـ « Heating ». وهو قادر على معالجة المسائل ثلاثية الأبعاد في نظام ثابت أو نظام متغير [5]. ولقد تم استخدامه سابقاً من أجل نمذجة سلوك جدار بناء يحوي على مواد متغيرة الطور PCM [6]. بما أنه من الممكن اعتبار المسألة بأنها ثنائية البعد، فإننا، من أجل تقليل وقت الحساب، سنقتصر في الدراسة على هذا الاعتبار.

يمكن أن تكون الشروط الحدية من طبيعة مختلفة، ديريكليه، أو نيومان أو فورييه. ويمكن أيضاً الأخذ بعين الاعتبار وجود الإشعاع ضمن الشروط الحدية. ويمكن لهذه الشروط الحدية أن تكون متعلقة بالزمن أو تكون مستقلة عنه. في حالة الشروط الحدية تابعة للزمن، فإن البرنامج الرقمي « Heating » يقترح عدداً من التوابع الكلاسيكية التي يمكن الوصول إليها من خلال معادلة عامة من الشكل:

$$F(v) = A_1 + A_2 v + A_3 v^2 + A_4 \cos(A_5 v) + A_6 \exp(A_7 v) + A_8 \sin(A_9 v) + A_{10} \ln(A_{11} v) \quad (1)$$

يجب أن يتم تزويد التوابت A_i كمعطيات دخل. في حالتنا $A_2 = A_3 = A_6 = A_{10} = 0$ ، بالنسبة للتوابت الأخرى فقد تم حسابها ضمن فقرة "الدراسة التحليلية عند الأخذ بعين الاعتبار التغيرات اليومية للتدفق الحراري

و لدرجة الحرارة". (يسمح هذا البرنامج بوجود استطاعات حجمية $puissances\ volumiques$ في كامل الجملة المدروسة أو في جزء منها).

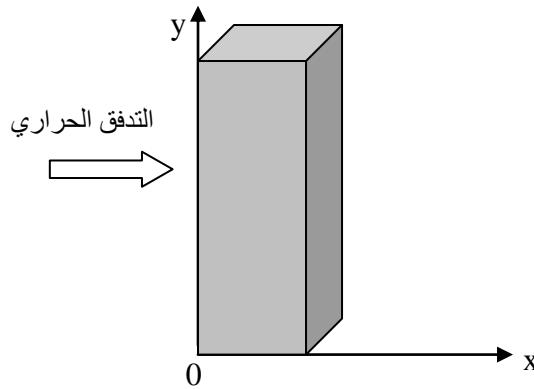
النتائج والمناقشة:

سنقوم بإنجاز الدراسة على مراحل. حيث، في المرحلة الأولى، سنفرض أنّ لكمية المادة متغيرة الطور (PCM) قيمة ثابتة، وموافقة لسماكة قدرها 2 cm من المادة. و سيتم وبشكل عشوائي تعيين المادة متغيرة الطور (PCM) التي يكون لخواصها الفيزيائية قيماً قريبة من القيم الاعتيادية. ثمّ سنقوم بتغيير قيم هذه الخواص حول قيمها الأساسية. ستكون الدراسة بطريقة تدريجية بحيث تسمح بتعيين تأثير مختلف البارامترات بشكل جيد. في البداية سنستخدم طريقة يكون فيها سلوك الـ PCM مثالياً و ذات درجة حرارة انصهار و تجمد محددة بشكل دقيق نوعاً ما، ثمّ سنقوم بأخذ قيم حقيقية مقاسة.

المقاربة الأولى. دراسة تحليلية لجدار ما:

من أجل توضيح الأمثلة التالية قمنا باختيار مادة افتراضية لها الخواص الفيزيائية التالية: سعة حرارية كتلية (C_p) تساوي إلى $2100\text{ J.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ، وكتلة حجمية (ρ) تساوي إلى 760 kg.m^{-3} ، و حرارتها الكامنة (L) عبارة عن 160 kJ.kg^{-1} ، و درجة حرارة تغير الطور هي $32\text{ }^\circ\text{C}$.

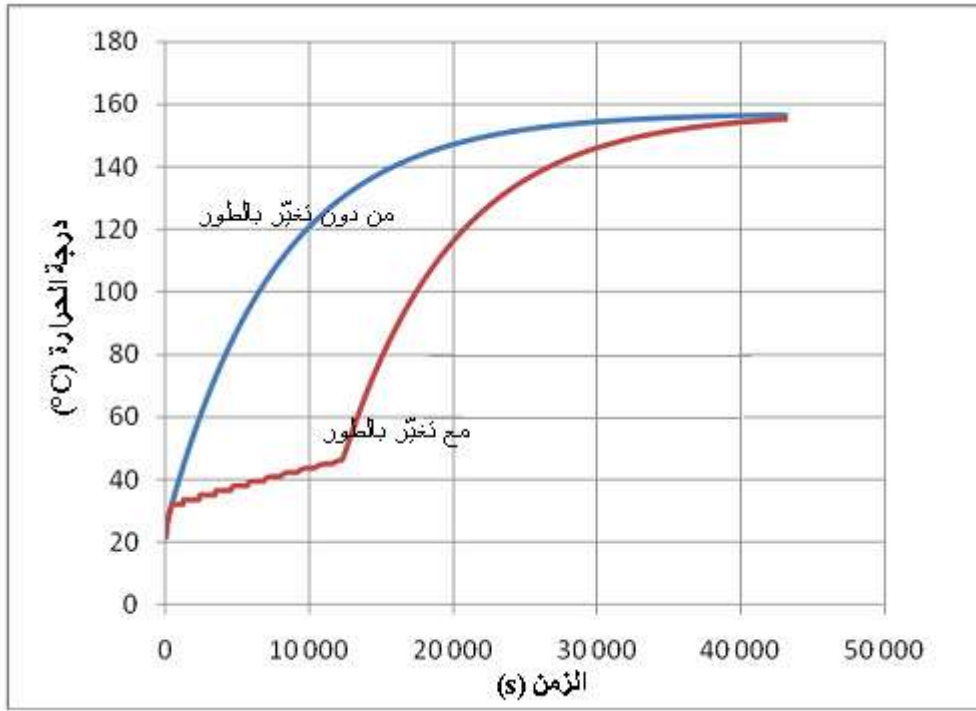
وحتى نتمكن من شرح المنحنيات بسهولة، فقد اعتبرنا أنّ للمثال الأول المقترح عامل إيصالية حرارية يساوي إلى $1\text{ W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$ (حيث سنحاول التوصل إلى قيمة مناسبة للإيصالية الحرارية لنوجد فيما بعد جملة حقيقية تعطينا نفس هذه الإيصالية). وبفرض أنّ للجسم الصلب المدروس شكلاً متوازي مستطيلات، تتكون بنيته فقط من هذه المادة. يخضع أحد وجهيه (سندعوه بالوجه الأمامي) إلى كثافة تدفق شمسي مقداره 800 W.m^{-2} ويتبادل الحرارة مع الهواء المحيط من خلال وجهين من أوجهه وعامل انتقال الحرارة بالحمل ثابت و يساوي إلى $3\text{ W.m}^{-2}\text{.K}^{-1}$ ، الشكل (2). سنقتصر في الدراسة على مسألة ذات بعدين، (x, y).



الشكل (2): الجسم الصلب المدروس (الجدار)

من أجل إجراء المحاكاة الرقمية لهذا الجدار، فإننا نمثله بمجموعة من العقد التي تشكل شبكة لها شكل متوازي المستطيلات، حيث فرضنا أنه يوجد 12 عقدة في الاتجاه oy بينما في الاتجاه ox قمنا باختبار أطوال مختلفة و

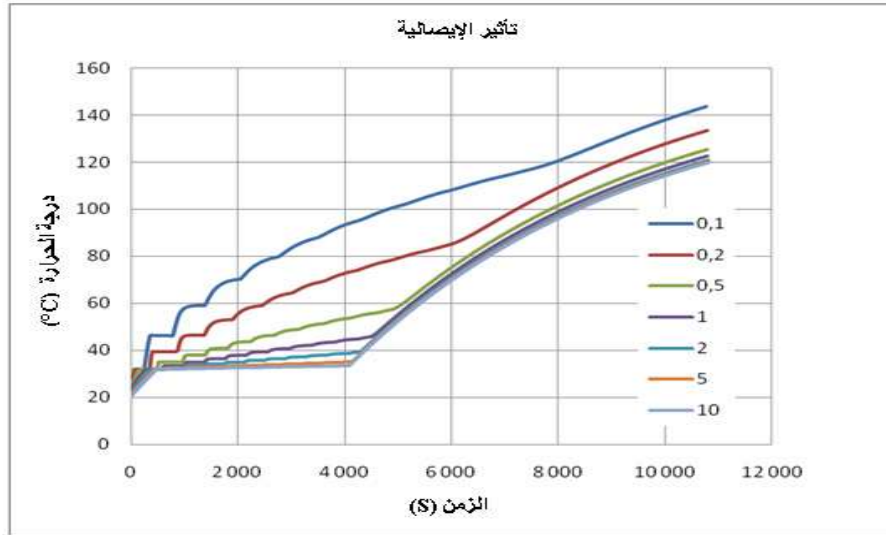
بالتالي، أعداد مختلفة من العقد. لقد اتضح أنه من الكافي في أغلب الحالات المدروسة اختيار 10 عقد. مع العلم بأن البرنامج « Heating » يقوم بتزويدنا بقيمة درجة حرارة المادة في كل عقدة. إذا أخذنا درجة الحرارة تابعة للزمن من أجل عقدة متوضعة في مركز سطح الجدار ، فإننا سنحصل على المنحني المبين على الشكل (3). نبيّن أيضاً على هذا الشكل منحنى تسخين نفس المادة في الحالة التي لا يحصل بها تغيير في الطور. نلاحظ أنّ درجة حرارة السطح تزداد بشكل فجائي عندما ينتهي تغيير الطور، وهذا يؤدي إلى تغيير مفاجئ في الميل. هذا التغيير في الميل سيساعدنا على رسم منحنى درجة حرارة السطح T_s كتابع لعامل الإيصالية الحرارية للمادة بفرض أنّ الخواص الفيزيائية الأخرى تبقى ثابتة.



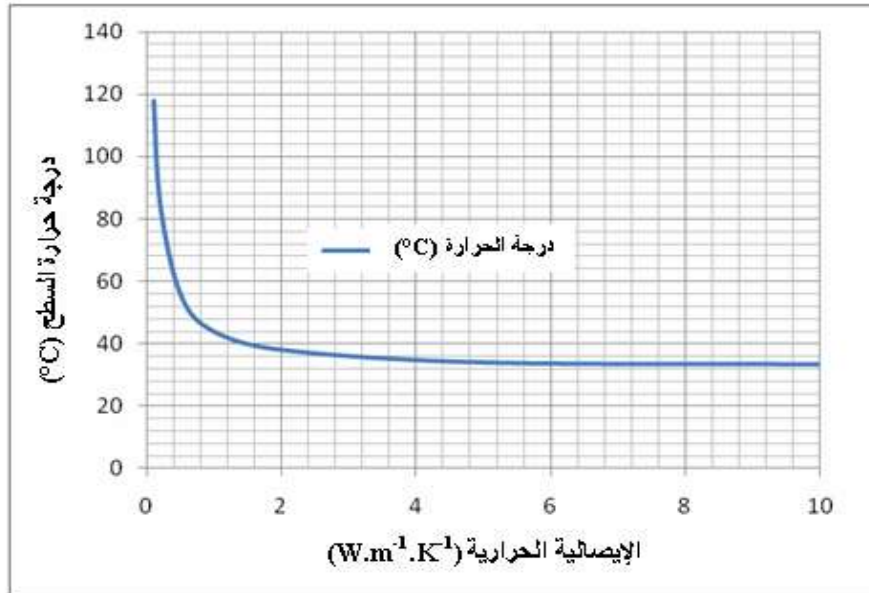
الشكل (3): مقارنة بين درجة حرارة السطح لمادة متغيرة الطور مع أخرى لا تتغير من طورها.

على الرغم من أنّ الخاصية الفيزيائية المميزة للمادة في النظام غير الثابت هي النفوذية الحرارية، إلا أننا في الواقع سوف نستطيع تغيير قيمة عامل الإيصالية الحرارية بسهولة أكثر. لذلك قمنا بتغيير قيمة عامل الإيصالية الحرارية للمادة من أجل جسم صلب سماكته 2 cm مع إبقاء الخواص الفيزيائية الأخرى ثابتة. و يخضع هذا الجسم لنفس كثافة التدفق الحراري المساوي إلى 800 W.m^{-2} ، ويتبادل الحرارة مع الوسط الخارجي عبر سطحه الداخلي و الخارجي، وعامل انتقال الحرارة بالحمل يساوي إلى $3 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. نبيّن على الشكل (4) منحنى تغيير درجة الحرارة T_s كتابع للزمن من أجل قيم مختلفة لعامل الإيصالية الحرارية. في حين نبيّن على الشكل (5) قيم درجة الحرارة T_s كتابعة لعامل الإيصالية الحرارية. نلاحظ من أجل هذا الجسم أنه حتى تبقى درجة الحرارة T_s أقل من 50°C فإنّه من المفروض أن تكون قيمة عامل الإيصالية الحرارية للمادة أكبر من $1 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. و نلاحظ أيضاً أنّ تغيير الميل عند نهاية تغيير الطور يكون واضحاً أكثر كلما كان عامل الإيصالية الحرارية أكبر. حتى نفس هذا السلوك فإننا رسمنا منحنيات درجة الحرارة كتابعة للسماكة x وذلك من أجل أزمنة مختلفة،

ومن أجل قيمتين مختلفتين لعامل الإيصالية الحرارية، القيمة الأولى تساوي إلى $0,2 \text{ W/m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ والثانية تساوي $2 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ (الشكلين 6 و 7). من الواضح أنّ منحنى درجة الحرارة، من أجل قيمة صغيرة لعامل الإيصالية الحرارية ومن أجل زمن قصير جداً، هو منحنى درجة حرارة الجسم الصلب الذي يسخن. و من أجل زمن أكبر (264 s) تصل درجة حرارة السطح إلى درجة حرارة الانصهار 32°C .

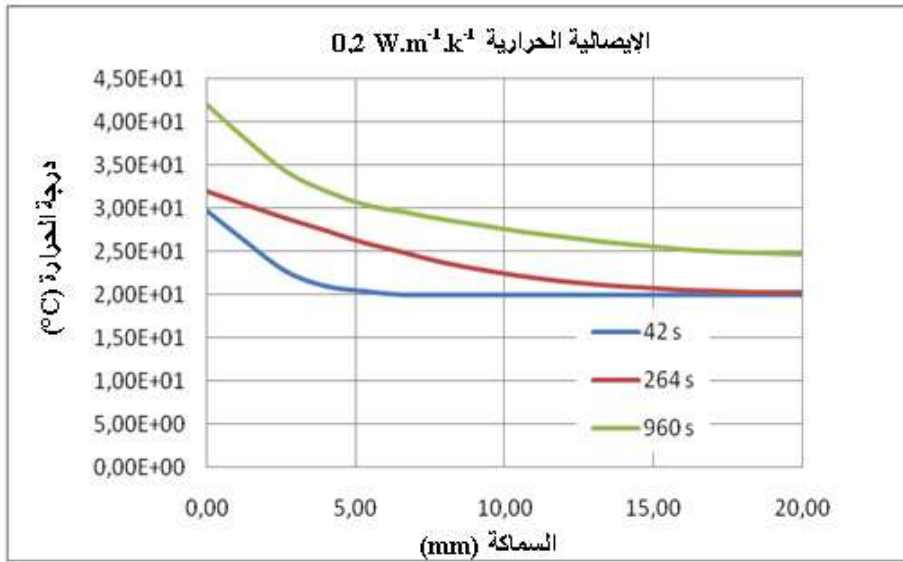


الشكل (4): تغيّر درجة حرارة السطح كتابع للزمن من أجل قيم مختلفة للإيصالية الحرارية المكافئة (مقدرة بـ $\text{W/m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

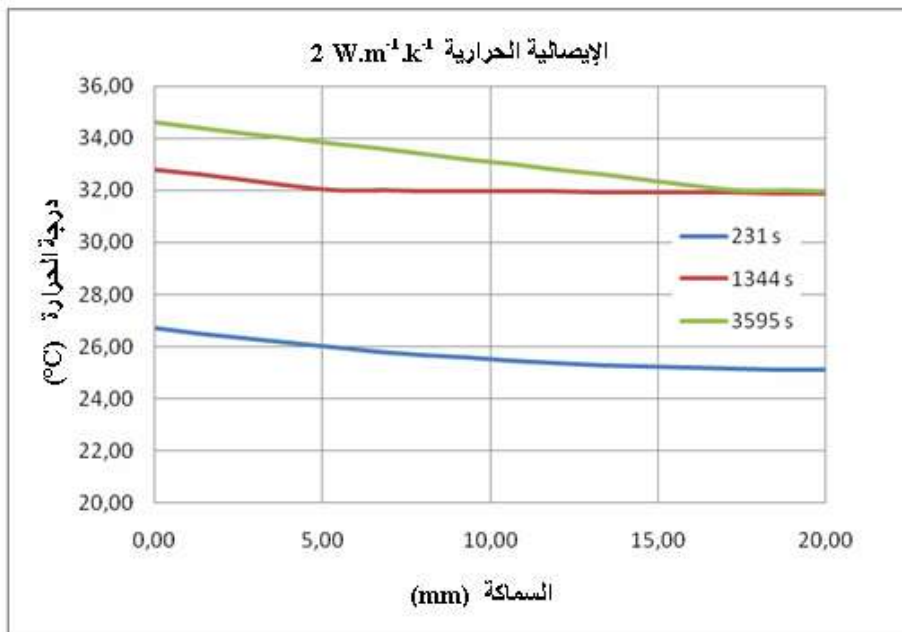


الشكل (5): تغيّر درجة حرارة السطح عند نهاية تغيّر الطور كتابع لعامل الإيصالية الحرارية.

من أجل زمن أكبر من 264 s تكون منطقة تغيّر الطور محدودة و تكون أبعادها من مرتبة المليمتر. في الواقع، إنّ الحرارة تتقدم ببطء شديد، والسائل المتشكل سابقاً يملك الوقت الكافي ليصبح زائد التسخين، و جبهة الانصهار تتقدم هي الأخرى ببطء شديد، و يبقى قسم كبير من المادة في الحالة الصلبة.



الشكل (6): تغيّر درجة الحرارة كتابع للسماكة وذلك من أجل أزمنة مختلفة ضمن جسم صلب عامل إيصاليته الحرارية $0.2 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

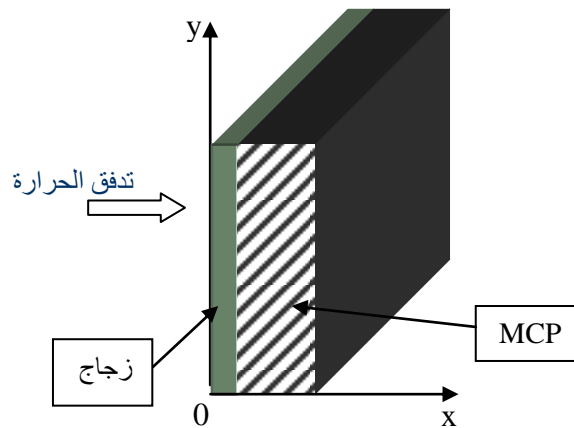


الشكل (7): تغيّر درجة الحرارة كتابع للسماكة من أجل جسم صلب عامل إيصاليته الحرارية $2 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

نلاحظ من مختلف المنحنيات السابقة أنه من أجل عامل الإيصالية الحرارية ذي القيمة الأكبر بعشر مرات من القيمة المأخوذة ($2 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)، تكون المنحنيات ذات أشكال مختلفة جداً. حيث تتقدم الحرارة في هذه الحالة ضمن الجسم بشكل سريع، وتكون منطقة تغير الطور قادرة على إشغال جزء كبير من المادة. في حين تزداد درجة الحرارة على السطح ببطء أكثر من أجل عامل إيصاليه حرارية أصغر.

دراسة تحليلية لجملة مكونة من لوح من الزجاج و من مادة متغيرة الطور (PCM)

الجملة المدروسة في هذا المثال عبارة عن لوح من الزجاج سماكته تساوي إلى 3 mm يغطي طبقة من MCP ذات شكل متوازي مستطيلات مطابق للحالة السابقة، الشكل (8). يخضع الوجه الأمامي (حيث يوجد الزجاج) إلى كثافة تدفق حراري مقداره 800 W.m^{-2} .



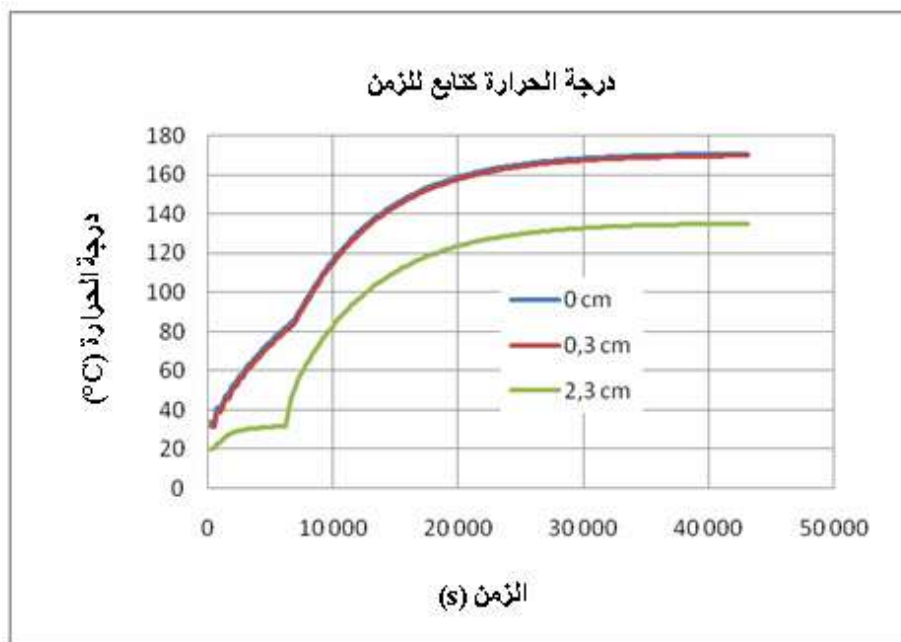
الشكل (8): جملة مكونة من لوح زجاجي ومن مادة قادرة على تغيير طورها.

تتوضع الخلايا الكهرصوتية المصنوعة من السيليسيوم بين الزجاج و الـ PCM، و بما أن الإيصالية الحرارية للسيليسيوم كبيرة جداً بالمقارنة مع الإيصالية الحرارية للزجاج فإن مقاومته الحرارية ستهمل. نبيّن على الشكل (9) تغير درجات الحرارة على كل من السطح الخارجي للزجاج ($x = 0 \text{ cm}$)، وعلى السطح الفاصل زجاج - PCM ($x = 0,3 \text{ cm}$)، وعلى السطح الداخلي للجملة ($x = 2,3 \text{ cm}$). نلاحظ أولاً أن تدرج الحرارة ضمن الزجاج يكون ضعيفاً (من مرتبة 1°C).

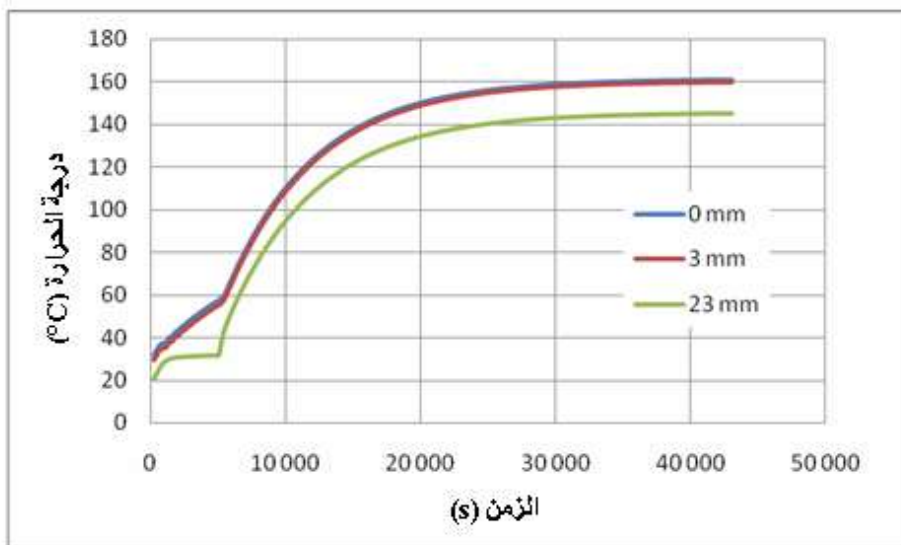
إن الـ PCM تلعب دور العازل بالنسبة للزجاج و طالما لا يوجد تغير في الطور فإن تدرج الحرارة يكون فيه مهماً (20°C إلى 25°C). كما نلاحظ أيضاً أن المنحنيات في نهاية فترة تغير الطور تُظهر انكساراً في الميل، وهذا شبيه بما كنا قد لاحظناه في المثال التمهيدي الأول (عند الدراسة التحليلية لجدار ما). لقد لوحظ نفس هذا السلوك من أجل عامل إيصالية حرارية أكبر، وتدرج الحرارة ضمن الزجاج أعلى بشكل طفيف، وينحصر بين $1,5^\circ \text{C}$ إلى 5°C الشكل (10).

إذا ما قارنا الشكلين (9) و (10) عند الزمن الموافق لتغير الميل أي عند الزمن 7200 ثانية من أجل عامل إيصاليه حرارية مقداره $0,2 \text{ W.m}^{-1}.\text{k}^{-1}$ ، و عند الزمن 5040 ثانية من أجل عامل الإيصالية الحرارية المساوي لـ $0,5 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. نلاحظ أن درجة الحرارة عند السطح الفاصل زجاج - PCM تساوي إلى 87°C في الحالة

الأولى و تساوي إلى $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ في الحالة الثانية. عند زمن مماثل مقداره 5040 ثانية تكون درجة حرارة السطح الفاصل
تساوي إلى $76\text{ }^{\circ}\text{C}$ من أجل $0,2\text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ و $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ من أجل $0,5\text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$.



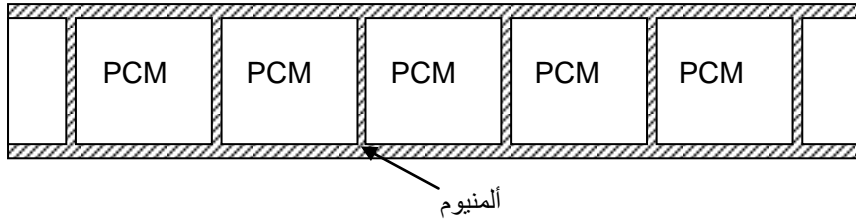
الشكل (9): تغير درجات الحرارة من أجل $x = 0$ (على السطح)، و $x = 0,3\text{ cm}$ (السطح الفاصل زجاج . PCM)،
و $x = 2,3\text{ cm}$ (الوجه الخلفي)، من أجل عامل إيصاليه حرارية لـ PCM يساوي إلى $0,2\text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$.



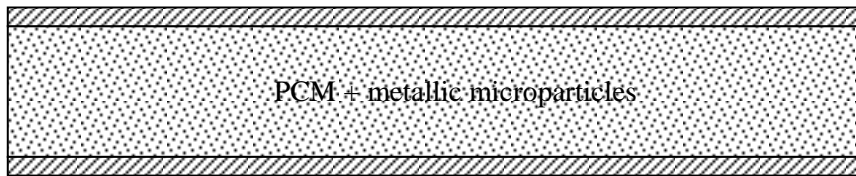
الشكل (10): تغير درجات الحرارة من أجل $x = 0$ (على السطح)، و $x = 0,3\text{ cm}$ (السطح الفاصل زجاج . PCM)، و $x = 2,3\text{ cm}$
(الوجه الخلفي) من أجل عامل إيصاليه حرارية لـ PCM يساوي إلى $0,5\text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

إذاً يتبين من كلّ ماسبق أنه من الضروري إيجاد مادة متغيرة الطور (PCM) أو جملة مكافئة لها لإصاليه حرارية كافية. وهذا مايمكن تحقيقه بعدة أساليب.

الحل الأول يتكون من وضع ال PCM ضمن لوح ذي زعانف (الشكل 11). في حالة لوح مصنوع من الألمنيوم سماكته تساوي إلى 0,5 mm، و زعانف سماكتها 0,1 mm تبعد عن بعضها البعض بمقدار 5 mm، تكون الإصالية الحرارية المكافئة $conductivité\ thermique\ apparente$ من مرتبة $5\ W.m^{-1}.K^{-1}$.



الشكل (11): مثال عن احتواء ال PCM ضمن لوح مزعنف من الألمنيوم



الشكل (12): خليط من PCM و حبيبات ميكروية معدنية من أجل زيادة الإصالية الحرارية المكافئة

حل آخر يتمثل في بعثرة حبيبات ميكروية معدنية ضمن ال PCM (الشكل 12). يمكن في هذه الحالة تقدير الإصالية الحرارية المكافئة للخليط المكون من حبيبات ميكروية و PCM بمساعدة علاقة نظرية ماكسويل Maxwell للوسط الحقيقي [7]:

$$(2) \quad \lambda = \lambda_{PCM} \frac{\lambda_s + 2 \lambda_{PCM} - 2 (\lambda_{PCM} - \lambda_s) \varphi}{\lambda_s + 2 \lambda_{PCM} + (\lambda_{PCM} - \lambda_s) \varphi}$$

حيث \square عبارة عن الإصالية الحرارية المكافئة، \square_s الإصالية الحرارية للحبيبات الميكروية الصلبة، \square_{PCM} الإصالية الحرارية للمادة متغيرة الطور PCM، φ التركيز الحجمي للحبيبات الميكروية. أحد مشاكل هذا النوع من الخلائط هي استقراره حيث نستطيع أن نشاهد تكتلاً في الحبيبات المعدنية و انعدام توزيعها. فإذا أخذنا تركيزاً ليس عالياً كثيراً (20%)، بحيث تكون كمية ال PCM كافية، فإننا نحصل على إصالية حرارية قيمتها تساوي إلى $0,35\ W.m^{-1}.K^{-1}$.

من الواضح أنّ استخدام لوح مزعنف هو الحل الأكثر فعالية، كما أنّه يخلصنا من مشكلة استقرار الخليط. بالنسبة لنا الحل سيكون بوضع الـ PCM ضمن ألواح مزعفة تشكل الزعانف فيما بينها فراغات سداسية الشكل (أي اللوح نخروبي الشكل)، وهذا يساعد أيضاً على تسهيل احتواء الـ PCM ضمن الألواح. بالإضافة إلى أنّ هذا الحل يبدو من وجهة نظر تكنولوجية واقعياً، كما أنّه من المفروض أن يجيب على المسألة المطروحة.

دراسة تحليلية عند الأخذ بعين الاعتبار امتصاص الأشعة الشمسية:

لقد اعتبرنا في كلّ من المثالين السابقين بأنّه يتم امتصاص كامل التدفق الحراري المفروض على السطح بواسطة سطح المادة الأولى أي الزجاج. بينما في الواقع، يتم امتصاصه من قبل المادة المتوضعة خلف الزجاج. و يمكن صياغة كثافة التدفق الحراري الممتص كتاباً للمساكة x بالعلاقة (3) [8]:

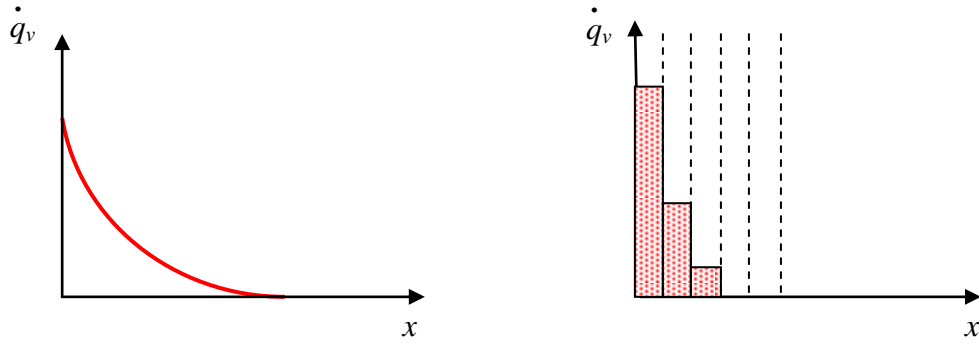
$$\dot{q} = \dot{q}_0 \alpha \beta e^{-\beta x} \quad (3)$$

حيث \dot{q}_0 هي كثافة التدفق الحراري الساقط، α هو معامل الامتصاص و β عبارة عن عامل انخفاض قيمة التدفق الحراري أثناء عبوره للمادة le coefficient d'atténuation. إحدى الطرق التي تسمح بالأخذ بعين الاعتبار كثافة التدفق الممتصة هي اعتبار أنّ الامتصاص مكافئ لتوليد استطاعة حجمية بالقرب من سطح المادة. و يمكن حساب هذه الاستطاعة بالعلاقة:

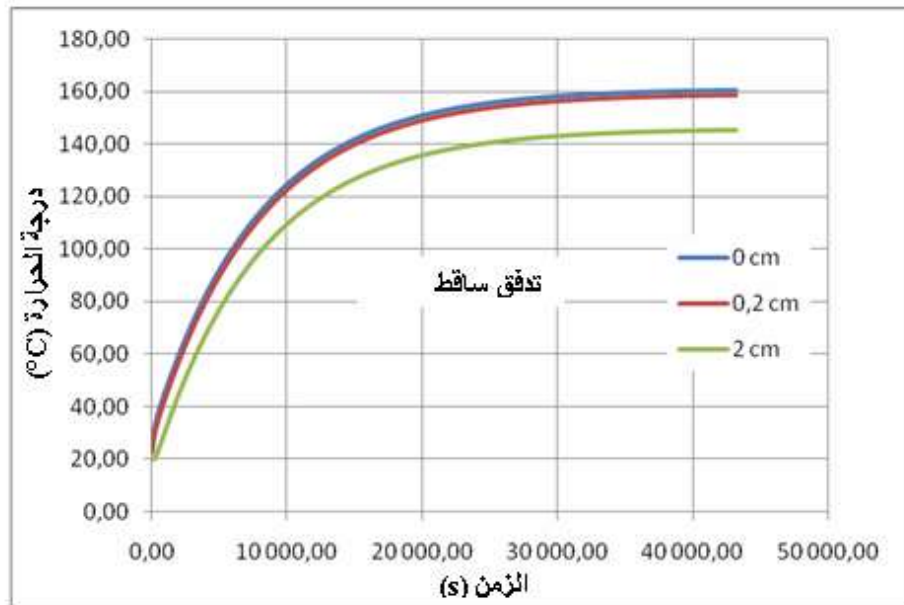
$$\dot{q}_v = d\dot{q} / dx \quad (4)$$

$$\dot{q}_v = d\dot{q} \alpha \beta e^{-\beta x} \quad (5)$$

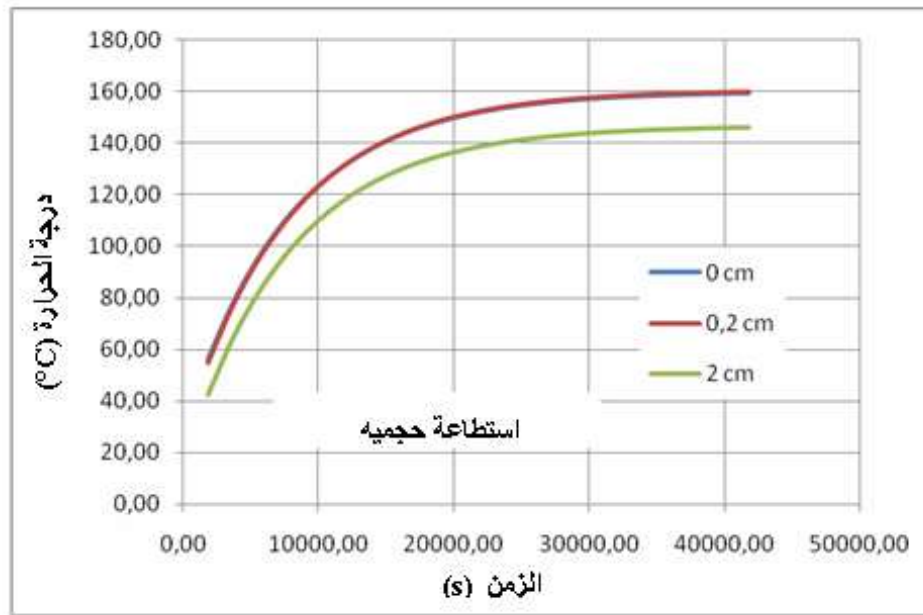
نبيّن تخطيطياً على الشكل (13) شكل الاستطاعة الممتصة كتابع للمساكة، وكذلك كيفية أخذها بعين الاعتبار ضمن الشبكة العقدية التي تمثل الجسم الصلب. من أجل اختبار صحة هذه الطريقة، قمنا بتطبيقها آخذين شكلها الأكثر بساطة. حيث يتوضع كامل منبع الاستطاعة الحجمية بين العقدتين الأوليتين. يبين الشكل (14) تغيرات درجة الحرارة على سطح الجسم الصلب، وعند سماكات مختلفة، وذلك عندما يكون هذا الجسم خاضعاً لكثافة تدفق حراري مقدارها 800 W.m^{-2} . نوضح على الشكل (13) تغيرات درجة الحرارة عندما تتولد استطاعة حجمية مكافئة في الشريحة الأولى من الشبكة العقدية.



الشكل (13): رسم تخطيطي للتدفق الحراري الساقط و الممتص من قبل مادة ما و كيفية تمثيله ضمن الموديل الرياضي.



الشكل (14): تغير درجات الحرارة على السطح، وعند سماكة 0,2 cm، و على الوجه الخلفي من أجل تدفق حراري ثابت ومطبق على السطح.



الشكل (15): تغيّر درجات الحرارة على السطح، وعند سماكة 0,2 cm، و على الوجه الخلفي من أجل استطاعة حجميه متولدة في الشريحة الأولى من الشبكة العقدية.

نلاحظ التناظر الجيد لتغيرات درجة الحرارة مع وجود اختلاف بسيط قرب السطح، و بتدقيق قيم درجات الحرارة للعقدتين الأوليتين، نلاحظ أنه حالما نطبق تدفق حراري على السطح فإنّ تدرج الحرارة يكون سالباً، في حين أنه مع وجود منبع استطاعة حجمية فإنّ التدرج الحراري يكون سالباً ضمن النظام الانتقالي و يصبح بشكل واضح معدوماً عندما يصبح النظام مستمراً. في الواقع، عندما يكون منبع الحرارة متوضّعاً في الفراغ المحصور بين عقدتين فإنّ الحرارة تنحصر نحو كلتا الجهتين بشكل متناظر.

يبين الجدول (1) قيم درجات الحرارة على كلّ من السطح و السطح الفاصل عند أزمنة مختلفة بفرض وجود إما منبع استطاعة حجمية أو تدفق حراري على السطح (القيم مأخوذة من الشكلين 14 و 15).

الجدول (1): درجات الحرارة على السطح و السطح الفاصل عند وجود إما منبع استطاعة حجمية أو تدفق حراري على السطح.

تدفق حراري			منبع استطاعة حجمية		
الزمن	درجة الحرارة على السطح	درجة الحرارة على السطح الفاصل	الزمن	درجة الحرارة على السطح	درجة الحرارة على السطح الفاصل
(s)	(°C)	(°C)	(s)	(°C)	(°C)
1817	57,3	54,7	1817	56	54,9
3635	78,8	76,4	3635	77,6	76,8
14540	140,5	138,8	14540	139,7	139,5
41 800	160,3	158,7	41 800	159,5	159,6

دراسة تحليلية عند الأخذ بعين الاعتبار التغيرات اليومية للتدفق الحراري و لدرجة الحرارة

من أجل إمكانية تفسير النتائج التجريبية التي سيتم الحصول عليها مستقبلاً عند إجراء التجارب، نعرض فيما يلي كيفية الأخذ بعين الاعتبار التغيرات اليومية للتدفق الحراري و لدرجة الحرارة في الموديل الرياضي. حيث سنأخذ، من أجل تبسيط المسألة، التدفق الشمسي المطبق مساوياً لتابع جيبى من الشكل:

$$\dot{q}_o = \phi \sin \omega t \quad (6)$$

حيث ϕ هي السعة التي اخترناها مساوية لـ 800 W.m^{-2} .

و سنختار أيضاً التغيرات اليومية لدرجة الحرارة على أنها جيبية من الشكل:

$$T_\infty = T_m + A \sin(\omega t - \varphi) \quad (7)$$

حيث T_∞ عبارة عن درجة الحرارة المحيطية بعيداً عن الجدار، T_m هي درجة الحرارة الوسطية للتذبذبات و سنعتبرها مساوية لـ 20°C ، A هي سعة تذبذبات درجة الحرارة و سنأخذها تساوي إلى 12°C . ونعبر عن النبض ω بالعلاقة:

$$\omega = \frac{2\pi}{\tau} \quad (8)$$

حيث τ عبارة عن الفترة الزمنية و سنعتبرها 24 ساعة. و الزاوية φ هي انزياح الطور بين التدفق الشمسي و درجة الحرارة المحيطية و سنأخذها مساوية لـ $\pi/8$ أي موافقة لانزياح مقداره 3 ساعات.

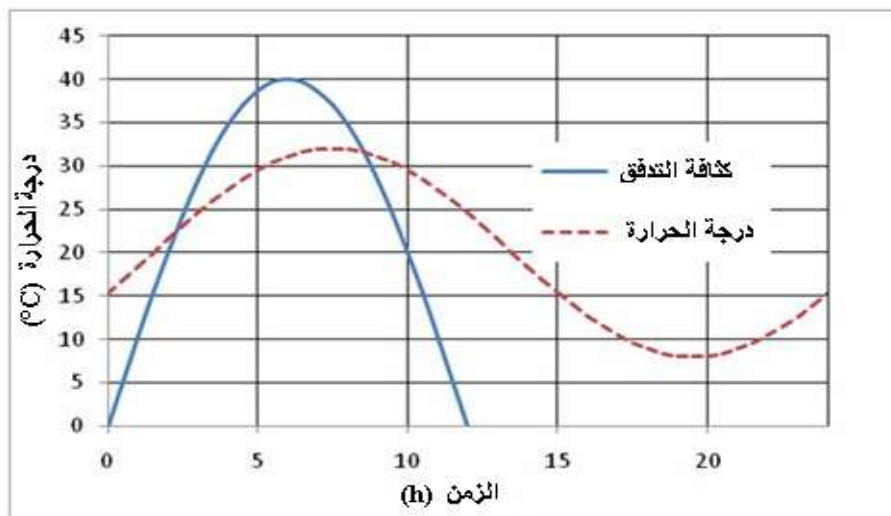
حتى نستطيع استخدام المعادلة العامة (1) المقترحة من قبل البرنامج « Heating », نكتب أن:

$$\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{8}\right) = \cos\left(\frac{\pi}{8}\right) \sin(\omega t) - \sin\left(\frac{\pi}{8}\right) \cos(\omega t) \quad (9)$$

وبهذا تكون ثوابت المعادلة (1):

$$A_5 = A_9 = \omega \text{ و } A_8 = \cos\left(\frac{\pi}{8}\right), A_4 = -\sin\left(\frac{\pi}{8}\right) A_1 = T_m$$

لقد تم على الشكل (16) توضيح المحاكاة الرقمية لتغيرات درجة الحرارة المحيطية و كثافة التدفق الشمسي كتابعين للزمن من أجل فترة زمنية قدرها نهار واحد.



الشكل (16): تغير درجة الحرارة و كثافة التدفق الحراري المقترحين.

الاستنتاجات والتوصيات:

- 1- إن استخدام المواد متغيرة الطور من أجل المحافظة على درجة حرارة ثابتة للواقط الكهروضوئية يمكن أن يحقق حلاً جيداً بالاهتمام. لقد قمنا في هذه الدراسة بتحديد الأسس التي تسمح لنا بإجراء محاكاة رقمية من أجل وضع تصور لنوع و لكمية المادة متغيرة الطور (PCM) التي يجب استخدامها.
- 2- إن البارامتر الذي يتحكم بانتشار الحرارة في النظام المتغير هو عامل النفوذ الحرارية للمادة، إلا أن لتغيرات عامل الإيصالية الحرارية في حالتنا المدروسة التأثير الأكبر. بالإضافة إلى أنه يعتبر البارامتر الأكثر سهولة للتغيير بقيمه.
- 3- من أجل الحصول على إيصالية حرارية مكافئة كافية سوف نستخدم لوحاً من الألمنيوم مع زعانف تشكل فيما بينها فراغات سداسية الشكل (أي أن اللوح يكون نخروي الشكل)، وسنقوم بملئه بالبارافين، حيث سيتم اختبار نوعين من البارافين، النوع الأول درجة حرارة انصهاره 27°C (Octadécane $\text{C}_{18}\text{H}_{38}$) + كمية قليلة من النوع الثاني درجة انصهاره تساوي إلى 44°C (Heptadécane $\text{C}_{17}\text{H}_{36}$)، أي أنه من الممكن تحقيق جملة لها إيصالية حرارية مكافئة قد تسمح بقيمتها بالحصول على النتائج المرجوة.
- 4- سوف تستمر الدراسة وسيتم اختبار مواد جديدة يتم تحديدها بالتعاون مع بعض الخبراء في مركز الطاقة النووية CEA و المركز العلمي و التقني للأبنية في مدينة غرونوبل .فرنسا حيث قمنا بإجراء الجزء الأكبر من الدراسة وذلك ابتداء من شهر تموز 2008 م.
5. بما أنه من النادر أن تكون المواد متغيرة الطور المستخدمة أجساماً نقية، وإنما تكون عادة عبارة عن خلطات، حيث لا يحدث الانصهار و/ أو التجمد عند درجة حرارة محددة تماماً و إنما يحدثان على الغالب عند مجال معين من درجات الحرارة، لذلك سنقوم أيضاً في الدراسة القادمة بقياس الأنتالبي النوعي كتابع لدرجة الحرارة، وذلك من أجل مختلف المواد متغيرة الطور المستخدمة. و سيتم استخدام هذه القيم المقاسة في المحاكاة الرقمية.

المراجع:

- 1– EVANS, D.L.; FLORSCHUETZ, L.W. *Cost studies on terrestrial photovoltaic power systems with sunlight concentration*. Solar energy Netherland. Vol. 19, 1977, 255 – 262.
- 2– SKOPLAKI, E.; PALYVOS, J.A. *On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations*. Solar energy Netherland. Vol. 83, 2009, 614 – 624.
- 3– HUANG, M.J.; EAMES, P.C.; NORTON, B. *Thermal regulation of building-integrated photovoltaics using phase change materials*. International Journal of Heat and Mass Transfer U.S.A. Vol. 47, 2004, 2715-2733.
- 4– HUANG, M.J.; EAMES, P.C.; NORTON, B. *Phase change materials for limiting temperature rise in building integrated photovoltaics*. Solar Energy Netherland. Vol. 80, 2006, 1121-1130
- 5– *Heating: Multidimensional, Finite difference Heat Conduction Analysis Code System*, NEA, 1998, 197.
- 6– AHMAD, M.; BONTEMPS, A.; SALLEE, H.; QUENARD, D. *Experimental investigation and computer simulation of thermal behaviour of wallboards containing a Phase Change Material (PCM) for the light envelope of buildings*, Energy and Buildings U.S.A. Vol. 38, N° .4, 2006, 357-366.
- 7 – MAXWELL, J.C. *A treatise on electricity and magnetism*. 3nd.ed., Clarendon press, Oxford. Vol. 1, 1954, 525.
- 8– CARSLAW , H.S.; JAEGER, J.C. *Conduction of heat in solids*. 2nd ed., Clarendon press, Oxford, 1959, 510.