



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة العربي التبسي - تبسة



كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم الهندسة الميكانيكية



مذكرة تخرج ضمن متطلبات نيل شهادة ماستر
تخصص طاقوية

دراسة محدية لانتقال الحرارة داخل مادة متغيرة الطور بطريقة الحجم المنتهية منط ضمنى

أمام لجنة المناقشة المكونة من

| اللقب والاسم | الرتبة العلمية | الصفة |
|-----------------------|-----------------|--------|
| بالعزايزية عبد الناصر | أستاذ محاضر "ب" | رئيسا |
| زايدي لطيفة | أستاذ مساعد "أ" | مناقشا |
| شلوق فاطمة الزهراء | أستاذ محاضر "أ" | مؤطرا |

إشراف الأستاذ (ة):
د. شلوق فاطمة الزهراء

إعداد الطالبة (ة):
زرروانة نوار

السنة الجامعية: 2021/2020

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



لى من جرح الكاس فارغا ليستقيني قطرة حب

(والدي الحبيب)، اظال الله في عمرك.

لى من ار ضعتني الحب والحنان

لى رمز المحبة و بلسم الشفاء

(امي الغالية)، طيب الله ثراكي

لى اخوتي رحيم شقيق فيصل صلاح محفوظ ويوسف:

ايكم يا من حصدم الشوك عن وبي لتحدوني طريق العلم

لى جميع اصدقائي الراضين: ممن لم يتوانوا في واعي وتحفيزي



pngtree.com



الفهرس

التشكرات

الإهداء

الفهرس.....أ

الملخص.....و

قائمة الأشكال.....ح

قائمة الرموز والاختصارات.....ي

المقدمة العامة.....1

الفصل الأول: مفاهيم عامة حول الانتقال الحراري والراحة الحرارية

1.1. المقدمة.....3

2.1. طرق انتقال الحرارة.....4

1.2.1. انتقال الحرارة بالتوصيل.....5

2.2.1. انتقال الحرارة بالنقل.....6

3.2.1. انتقال الحرارة بالإشعاع.....8

3.1. الارتياح الحراري أو الراحة الحرارية.....9

4.1. العوامل المؤثرة في الراحة الحرارية.....10

4.1. العوامل المرتبطة بالظروف المناخية.....10

1.4.1. درجة حرارة الهواء الداخلي والجدران (مشعة).....10

2.4.1. رطوبة الهواء.....11

3.4.1. الرياح.....11

4.3.1. الإشعاع الشمسي.....11

الفصل الثاني: استخدام مواد متغيرة الطور في المباني

| | |
|----|--|
| 12 | 1.II. مقدمة..... |
| 13 | 2.II. التطور التاريخي للمواد متغيرة الطور..... |
| 14 | 3.II. ماهي المواد متغيرة الطور..... |
| 16 | 4.II. تصنيف المواد متغيرة الطور..... |
| 16 | 1.4.II. المواد غير العضوية..... |
| 16 | 2. 4.II. المواد العضوية..... |
| 17 | 3.4.II. مواد سهلة الانصهار (Eutectiques)..... |
| 17 | 5.II. خصائص المواد متغيرة الطور MCP..... |
| 17 | 1.5.II. الخصائص الحرارية..... |
| 20 | 2.5.II. الخصائص الفيزيائية..... |
| 18 | 3.5.II. الخصائص الكيميائية..... |
| 18 | 4.5.II. الخصائص الاقتصادية..... |
| 18 | 6. II. تقنيات لتكييف مواد تغيير الطور MCP..... |
| 18 | 1. 6.II. التغليف الكلي (Macro encapsulation)..... |
| 19 | 2. 6.II. التغليف الصغير (Micro encapsulation)..... |
| 20 | 7.II. الاستخدام الذاتي لـ MCP في المباني [33]..... |
| 20 | 1. 7.II. دمج MCP في المباني..... |
| 22 | 1.1. 7.II. اللوح الجصي MCP..... |
| 21 | 1. 7.II. 2. الطلاء الحاوي لـ MCP..... |
| 21 | 1. 7.II. 3. جدران ترونوب (Trombes) على أساس MCP..... |
| 21 | 1. 7.II. 4. كتل خرسانية لـ MCP..... |
| 21 | 8.II. 8. الاستخدام الغير ذاتي لـ MCP في المباني..... |
| 22 | 9.II. 9. MCP القائم على البارافين [34]..... |

| | |
|---------|---|
| 23..... | 9.II .1.الاستخدامات |
| 24..... | 10.II.تصنيف تطبيقات مواد متغيرة الطور فالمباني. |
| 25..... | 11.II.الMCP سهل الانصهار (eutectiques) |
| 25..... | 12.II.الطلاء الحاوي لـ MCP |
| 26..... | 13.II.جدران ترونب (trombes) على أساس MCP |
| 26..... | 14.II.كتل خرسانية لـ MCP |

الفصل الثالث: الدراسات المكتبية

| | |
|---------|-------------------------|
| 28..... | 1.III. الدراسات السابقة |
| 28..... | - الدراسة الاولى |
| 28..... | - الدراسة الثانية |
| 28..... | - الدراسة الثالثة |
| 28..... | - الدراسة الرابعة |
| 29..... | - الدراسة الخامسة |
| 29..... | - الدراسة السادسة |
| 30..... | - الدراسة السابعة |
| 30..... | - الدراسة الثامنة |
| 30..... | - الدراسة التاسعة |
| 31..... | - الدراسة العاشرة |

الفصل الرابع: النمذجة الرياضية والحل العددي

| | |
|---------|--|
| 32..... | 1.IV. المقدمة |
| 32..... | 2.IV. وصف المشكلة |
| 32..... | 1.2.IV. النموذج الفيزيائي |
| 33..... | 2.2.IV. الفرضيات المختصرة |
| 33..... | 3.2.IV. الخواص الفيز وحرارية |
| 34..... | 3.IV. وصف تغير الحالة مع الطريقة الأنتالبي |
| 34..... | 1.3.IV. طريقة الأنتالبي |

- 34.....2.3.IV. النموذج الرياضي
- 37.....4.IV. الحل الرقمي للمعادلة التفاضلية
- 44.....5.IV. حل المشكلة بلغة الفورتران (Fortran)

الفصل الخامس: النتائج والتعليقات

- 45.....IIV..المقدمة
- 45.....1.IIV. توزيع الطاقة المحملة داخل جدار بدلالة الزمن
- 46.....2.IIV. توزيع درجة الحرارة داخل جدار بدلالة الزمن
- 47.....3.IIV. توزيع درجات الحرارة داخل جدار بدلالة الزمن في مواضع مختلفة
- 48.....4.IIV. توزيع الطاقة المحملة داخل جدار بدلالة الزمن في مواضع مختلفة
- 48.....5.IIV. تغيرات درجة الحرارة بدلالة الزمن مع $h=27W/(m^2 \cdot ^\circ C)$
- 52.....الخاتمة
- 53.....المراجع

الملخص

الأنظمة التي تستخدم مواد تغيير الطور (MCP) هي من بين أفضل التقنيات لتخزين الطاقة بسبب الحرارة الكامنة الهامة . يمكن استخدام هذه المواد في المبنى لضمان الراحة الحرارية وتقليل استهلاك كبير للكهرباء بسبب استخدام تكييف الهواء (ضغط البخار). الهدف من هذا الورقة هو دراسة عملية تصلب MCP (n-Octadecane) متكاملة داخل جدار محلي بناء. حسب النتائج المتحصل عليها بلغة الفورتران وبطريقة الحجم المنتهية (مخطط ضمني) قد داخل الجدران للمباني أدى إلى استقرار حراري لتحقيق MCP أظهرت أن استعمال الرفاهية الحرارية . نلاحظ أن سمك 10 سم لمواد متغيرة الطور لها معنى كبير لتحسين الطاقة الحرارية داخل المباني ذات الحجم الكبيرة.

كلمات مفتاحية

MCP مواد متغيرة الطور

الطاقات المتجددة

طريقة الحجم المنتهية

طريقة الانتالبية

Résumé

Les systèmes utilisant des matériaux à changement de phase (MCP) sont parmi les meilleures technologies pour le stockage d'énergie en raison de leur importante chaleur latente.

Ces matériaux peuvent être utilisés dans le bâtiment pour assurer le confort thermique et réduire significativement la consommation d'électricité grâce à l'utilisation de la climatisation (pression de vapeur).

L'objectif de cet article est d'étudier un processus de durcissement MCP (n-octadécane) intégré au sein d'un mur local constitué.

D'après les résultats obtenus dans le langage de Fortran et par la méthode des volumes finis (schéma implicite), il a été montré que l'utilisation de MCP à

l'intérieur des murs des bâtiments conduisait à une stabilité thermique pour atteindre le luxe thermique. On note que l'épaisseur de 10 cm de matériaux à changement de phase a une grande signification pour améliorer l'énergie thermique à l'intérieur des bâtiments de grande taille

Mots clés

MCP : Matériaux à changement de phase

Energie renouvelable

Volume finis

Méthode enthalpique

Summary

Systems that use phase change materials (MCP) are among the best technologies for energy storage due to their important latent heat.

These materials can be used in the building to ensure thermal comfort and to significantly reduce electricity consumption due to the use of air conditioning (steam pressure).

The aim of this paper is to study an integrated MCP (n-Octadecane) hardening process within a built-up local wall.

According to the results obtained in the language of Fortran and by the method of finite volumes (implicit scheme), it was shown that the use of MCP inside the walls of buildings led to thermal stability to achieve thermal luxury. We note that the thickness of 10 cm of phase-changing materials has a great meaning for improving thermal energy inside large-sized buildings

MCP : phase changing materials

Renewable energies , expired volumes, enthalpy method



الأشغال
و الجداول

قائمة الأشكال والجداول

الفصل الأول: مفاهيم عامة حول الانتقال الحراري والراحة الحرارية

- الشكل 1.I: طرق انتقال الحرارة [1].....4
- الشكل 2.I: انتقال الحرارة بالتوصيل [1].....5
- الشكل 3.I: انتقال الحرارة بالنقل [2].....7
- الشكل 4.I: انتقال الحرارة بالإشعاع [2].....10

الفصل الثاني: استخدام مواد متغيرة الطور في المباني

- الشكل 1.II: تغيرات درجة الحرارة متجانس مع تغير الحالة [16].....13
- الشكل 6.II: تكيف الـ MCP في عقيدات [32].....14
- الشكل II.6. 2: مختلف أنواع التغليف الصغير [17].....15
- الشكل 9.II: حاويات تحتوي على الدم والأعضاء مكونة من MCP.....18
- الشكل 10.II: . تصنيف تطبيقات مواد متغيرة الطور فالمباني.....20
- الجدول 11.II: خواص حرارية معينة لبعض الـ MCP.....21
- الشكل II. 12: تغيرات درجات الحرارة بدلالة الزمن في خلايا.....24
- الشكل II. 13: نموذج جدار ترونب يحتوي على MCP.....25
- الشكل II: 14: سعة تخزين الطاقة لكنتل الخرسانية MCP التي تم تطويرها.....26

الفصل الثالث: الدراسات المكتبية

- الشكل 1.III: حاوية الـ MCP (يمينا) والشروط الحدية لدراسة قام يونسي وناجي (يسارا).....28

الفصل الرابع: النمذجة الرياضية والحل العددي

- الشكل 1.IV: النموذج الفيزيائي.....32
- الجدول IV. 1: الخصائص الفيز وحرارية n-Octadecane.....32

الفصل الخامس: النتائج والتعليقات

- الشكل IIV.1: توزيع الطاقة المحملة داخل جدار بدلالة الزمن.....45
- الشكل IIV.2 : توزيع درجة الحرارة داخل الجدار بدلالة الزمن.....46
- الشكل IIV.3 : توزيع درجات الحرارة داخل جدار بدلالة الزمن في مواضع مختلفة.....47
- الشكل IIV.4 : توزيع الطاقة المحملة داخل جدار بدلالة الزمن في مواضع مختلفة.....48
- الشكل IIV.5 : توزيع الشكل تغيرات درجة الحرارة بدلالة الزمن مع $h=27W/(m^2 \cdot ^\circ C)$48



الرموز
و الاختصارات

قائمة الرموز والإختصارات

قائمة الرموز

- الرموز الكبيرة

B_i : عدد بيو

C_p : السعة الحرارية [kJ/kg.k]

f : الكسر السائل /الصلب

h_f : معامل التبادل الحراري [J/m²k]

H : الطاقة المحملة [J/kg]

L_f : الحرارة الكامنة للإصهار [kJ/kg]

ΔT : الفرق في درجة الحرارة

λ : الناقلية الحرارية [W/mk]

ρ : الكتلة الحجمية [kg/m³]

e : سمك جدار MCP

t : الزمن

S : سطح MCP

V : حجم MCP

α : الانتشارية الحرارية

T_f : درجة حرارة الإصهار

Δx : الخطوة

T : درجة الحرارة في مركز حجم المراقبة

-الرموز الصغيرة

P, E, W : مراكز حجوم المراقبة

e : السطح الأيمن لحجم المراقبة

w : السطح الأيسر لحجم المراقبة

l : سائل

s : صلب

قائمة الاختصارات

MCP: مواد متغيرة الطور

المقدمة

حاليًا ، يتزايد استهلاك الطاقة تدريجياً مع تطور التكنولوجيا ونمو سكان العالم.

تعتبر المباني بالتوازي مع المجال الصناعي الأكثر استهلاكاً للطاقة في العالم ، ويمثلون 28٪ من الاستهلاك العالمي للطاقة . يستهلك قطاع السكان والبناء 49٪ من إجمالي الطاقة وهم مسؤولون عن 19٪ من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون. عموماً معظم المباني لا تتوافق مع قوانين استهلاك الطاقة.

يعتبر تخزين الطاقة الطريقة الأسهل والأكثر اقتصاداً لإجراء تدقيق الطاقة في المباني والتأكد من ظروف الراحة.

يمكن لهيكل المبنى (الدران والأرضيات والسقف ...) تخزين الطاقة الحرارية بطريقة ما حساسة أو كامنة , تخزين الطاقة الحرارية في شكل كامن عن طريق استخدام مواد تغيير الطور (MCP). هذه مواد قادرة على تغيير الحالة المادية في نطاق درجة حرارة محدودة. في هذا الفاصل الزمني لدرجة الحرارة ، فإن تغيير الطور الأكثر شيوعاً هو الذوبان / التصلب. هذه المواد تمتاز بتخزين كمية كبيرة من الطاقة.

في السنوات الأخيرة ، كان تخزين الحرارة في أجهزة MCP موضوعاً للعديد من الدراسات والبحوث من منظور تطوير وتقييم النظم الجديدة من خلال النمذجة والمحاكاة العددية ، بدلاً من التجارب التي تسمح بذلك توفير الوقت والموارد المادية. لهذا ، تعتمد دراستنا على المحاكاة العددية لتصلب مادة مع تغيير المرحلة مضمن في جدار.

تم تقسيم العمل إلى خمسة فصول.

الفصل الأول هو مكرس لمفاهيم عامة حول الانتقال الحراري والارتياح الحراري

في الفصل الثاني ؛ قدمنا فيه كيفية استخدام MCP في المباني

بينما يجمع الفصل الثالث عرضاً للدراسات المكتبية

المقدمة العامة

الفصل الرابع مخصص للنمذجة الرياضية والحل العددي وذلك باستخدام لغة الفروترن وطريقة الحجوم المنتهية مخطط ضمني

اما الفصل الاخير نتحدث على النتائج والتعليقات

فماهي مواد متغيرة الطور وكيف يتم استخدامها فالمباني ؟

الفصل الأول

مفاهيم عامة حول الانتقال
الحراري والارتياح الحراري

1.1.I مقدمة

تعتبر الحرارة والقوانين المتعلقة بها من القواعد الأساسية في نظام الحياة في هذا الكون وأحد الركائز الهامة في معظم العلوم الفيزيائية الأخرى. وعلى الرغم من أننا قليلاً ما نلاحظ وجود الحرارة وتبدلاتها وطرق انتقالها، إلا أنها تحيط بنا وموجودة في معظم دقائق وتفصيل حياتنا اليومية. فما هي الحرارة بالضبط؟ وما هي طرق انتقالها؟ وما صلتها بعلم الترموديناميك؟ سنجيب في مقالنا هذا عن هذه التساؤلات ونستعرض أهم التفاصيل المتعلقة بمفهوم انتقال الحرارة في الأوساط المختلفة.

كما نعلم فإن الحرارة هي شكلٌ من أشكال الطاقة، وهي تتولد على مستوى جزيئات المادة، فعندما تكتسب المادة ما طاقةً بمقدارٍ معينٍ فإن جزيئاتها تبدأ بالاهتزاز في مكانها، سواءً أكانت هذه الجزيئات ثابتة (جسم ثابت) أم متحركة (جسم متحرك). هذه الجزيئات المهتزة تنقل بدورها الطاقة (الاهتزاز) إلى الجزيئات المجاورة لها مسببةً اهتزازها أيضاً.

وكما كانت الطاقة التي تُزود بها الجزيئات أكبر كلما كانت الحركة الاهتزازية أكثر شدةً. وعندما تبلغ طاقة هذه الجزيئات حدًا معينًا (كدرجة الذوبان أو الغليان مثلاً) فإنها تتحرر من الروابط والقوى الداخلية المقيدة لها وتُغيّر بذلك طورها أو حالتها الفيزيائية (كالانتقال من الحالة الصلبة إلى الحالة السائلة أو من الحالة السائلة إلى الغازية).

ويمكن للطاقة الحرارية أن تنتقل من مادةٍ لأخرى أو حتى ضمن المادة ذاتها عند وجود فروقٍ في درجات الحرارة. كما يمكن للحرارة أن تتولد ضمن المادة نفسها على حساب أشكال الطاقة الأخرى (كما في عملية تحويل الطاقة الحركية إلى حرارية على سبيل المثال). تقاس درجة الحرارة بالسيليزيوس أو بالكلفن واحد القياس الدولي للحرارة (تختلف عن وحدات درجة الحرارة التي ذكرناها سابقاً)، في حين أن واحد الحرارة في النظام المتري هي الكالوري حيث أن 1 كالوري = 4.186 جول.

1.1.I انتقال الحرارة بالمعنى البسيط

بشكلٍ عام فإن عملية انتقال الحرارة تصف تدفق الطاقة الحرارية بين الجزيئات المنفصلة بسبب تفاوت درجات الحرارة فيما بينها. وإن عملية الانتقال هذه لا تقتصر فقط على الطاقة، بوصفها طاقةً صرفاً فقط، فقد وجد العلماء أن الانتقال قد يحصل على مستويين آخرين هما الزخم (العمل) والكتلة، بمعنى آخر فإن انتقال الحرارة بين وسطين قد يترافق أيضاً بانتقال كتلة أو زخم أحدهما إلى الآخر. [2](#)

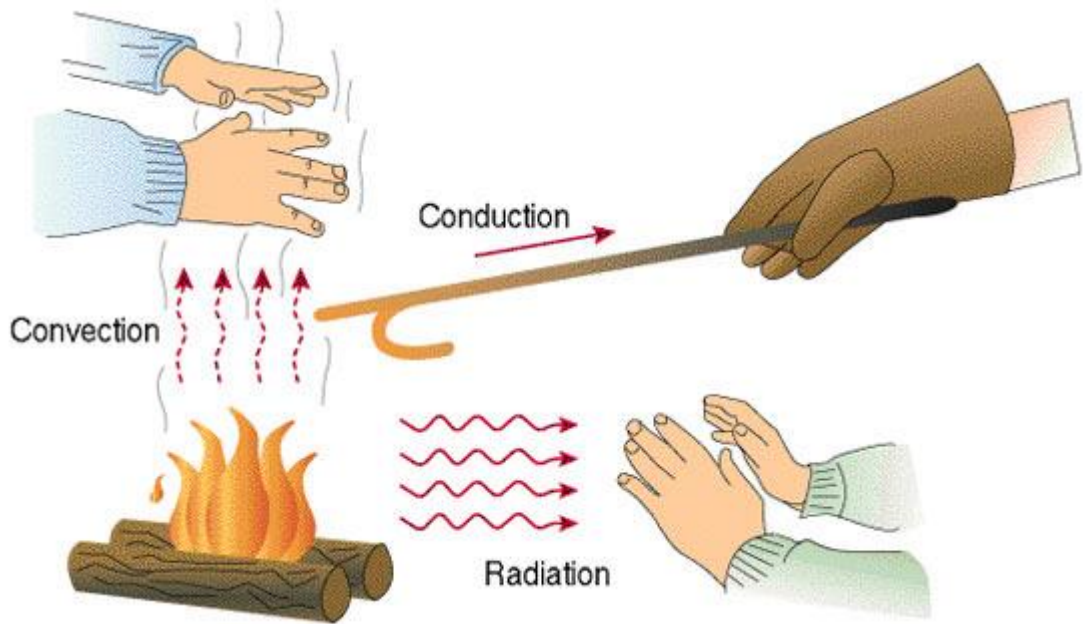
الفصل الأول: مفاهيم عامة حول الانتقال الحراري والارتياح الحراري

2.1.I القانون الثاني في الترموديناميك

ينص القانون الثاني للديناميكية الحرارية على أن الحرارة تنتقل في الحالة السوية الطبيعية باتجاه واحد، من الأجسام ذات الحرارة الأعلى إلى الأجسام ذات الحرارة الأدنى. ومن أجل عكس هذا القانون لأبد من مؤثر خارجي يطبق عملاً أو جهداً يفرض انتقال الحرارة من الجسم الأبرد إلى الجسم الأكثر حرارة. وتعتبر التلاجة مثلاً على هذا الانتقال العكسي المُجبر، حيث تقوم التلاجة (بواسطة الطاقة الكهربائية) بامتصاص الحرارة من غرفة التبريد بداخلها (وسط أقل حرارة) وإطلاقها إلى الوسط المحيط (وسط أكثر حرارة).³

2.I طرق انتقال الحرارة

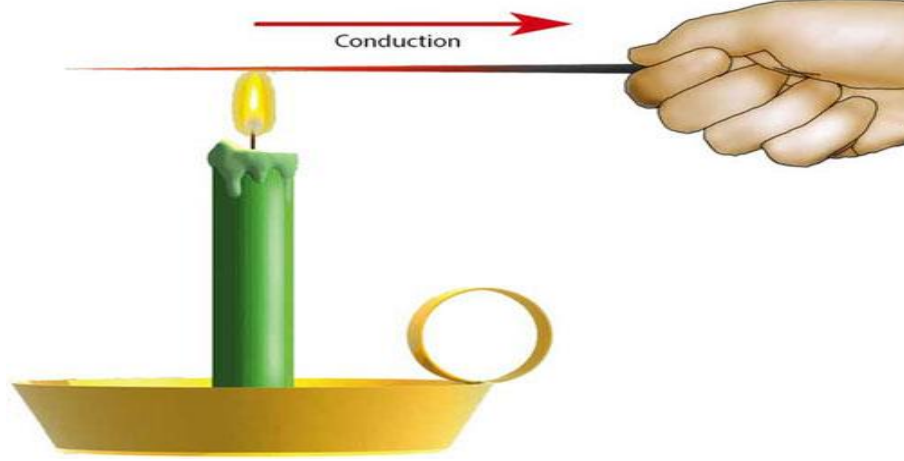
يمكن للحرارة أن تنتقل بثلاث طرقٍ رئيسيةٍ (الشكل 1.I) هي التوصيل والنقل والإشعاع يحتاج كلٍ من التوصيل والنقل إلى وجود وسطٍ ماديٍّ لكي تتم عملية النقل، على خلاف انتقال الحرارة بالإشعاع والذي لا يحتاج إلى وسطٍ ماديٍّ.



الفصل الأول: مفاهيم عامة حول الانتقال الحراري والارتياح الحراري

الشكل 1.I: طرق انتقال الحرارة

1.2.I انتقال الحرارة بالتوصيل



الشكل 2.I: انتقال الحرارة بالتوصيل

يحدث التوصيل عند تماس جسمين صلبين بدرجات حرارة مختلفة كما موضح في الشكل 2.I، حيث تنتقل الحرارة من الجسم الأبرد إلى الأدفئ حتى تتساوى درجات الحرارة فيما بينهما. ويمكن تعريف التوصيل بأنه انتقال الحرارة عبر ارتطام جزيئات مادتين مختلفتين حرارياً. حيث يحدث هذا الاصطدام بين جزيئات المادة الأولى والثانية في منطقة التماس، فتعطي جزيئات المادة الأدفئ، ذات الطاقة الحركية الكبيرة، بعضاً من طاقتها الحركية لجزيئات المادة الأخرى رافعةً من حرارتها، وهذه الأخيرة تصطدم مع جزيئات المادة نفسها ناقلةً الحرارة عبر أجزائها المختلفة.

في الواقع فإن خاصية التوصيل تختلف من جسم لآخر، فهناك مواد ذات موصليّة عالية للحرارة وأخرى ضئيلة. فالأجسام الصلبة مثلاً تتمتع بناقليّة عالية للحرارة تليها السوائل وأخيراً الغازات، والتي تُعتبر ذات ناقليّة ضعيفة للحرارة. وهذا في الواقع مرتبطٌ بكثافة جزيئاتها، فكما نعلم أن جزيئات المادة الصلبة تكون مترابطةً وكثيفةً بخلاف المادة الغازية التي تكون مبعثرةً ومتناثرةً، فيغدو احتمال ارتطام الجزيئات فيها أقل.

من الأمثلة الشائعة لانتقال الحرارة بالتوصيل هي شعورك بانتقال الحرارة إليك عند لمس الأجسام الدافئ.

الفصل الأول: مفاهيم عامة حول الانتقال الحراري والارتياح الحراري

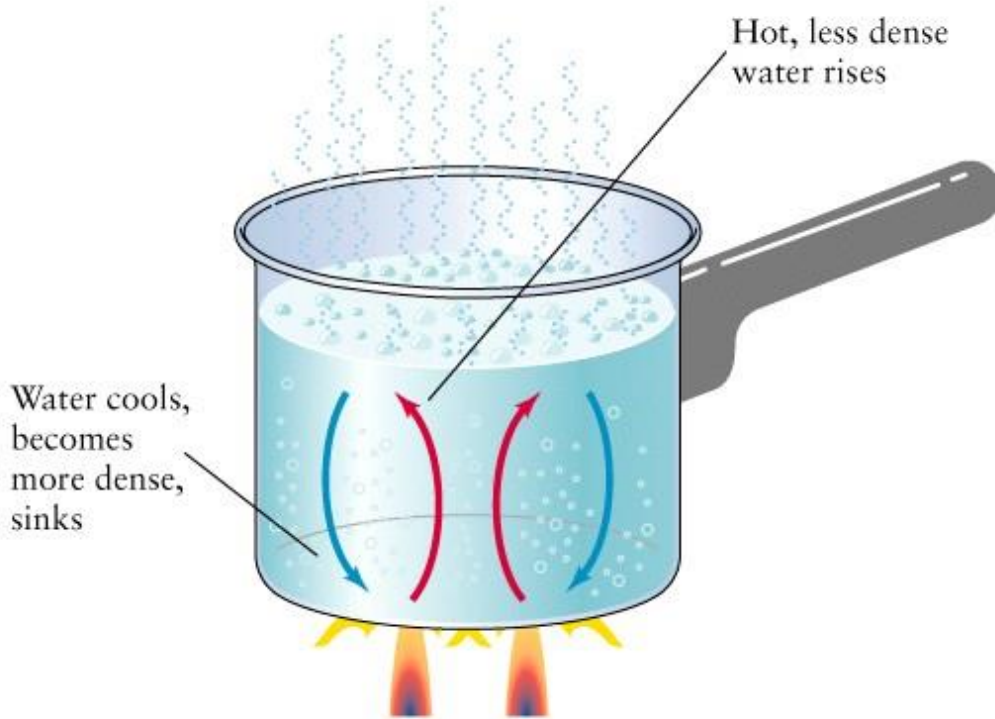
✓ قانون فورييه للانتقال الحراري (Loi de Fourier):

أثبتت التجارب أنه وبمجرد وجود فرق في درجات الحرارة بين سطحين فإن هناك انتقالات في الطاقة الحرارية بينهما وتنتقل هذه الطاقة من السطح الساخن إلى السطح البارد، وقد استنتج الفيزيائي فورييه أن معدل التدفق الحراري عبر سطح مادة ما يتناسب مع الفرق في درجة الحرارة ومع مساحة السطح القائم الذي يعبره، وقد سمي بقانون فورييه للتوصيل الحراري يمكن توضيحه بالمعادلة (1. I)[2].

$$q = -\lambda \cdot S \cdot dT/dx$$

2.2.I انتقال الحرارة بالنقل

يُعتبر النقل هو النظام السائد في انتقال الحرارة في السوائل والغازات، ويحدث عندما تنتقل الطبقات الأكثر حرارة في الغازات والسوائل إلى الطبقات الأبرد. وفي الوقت نفسه فإن الطبقات الأبرد تهبط لتأخذ مكان الفراغ التي تركه انتقال الطبقات الساخنة، وهذه الحركة المستمرة تشكل نموذجًا ثابتًا من صعود وهبوط الطبقات الدافئة والباردة باستمرار.



الشكل 3.I: انتقال الحرارة بالنقل

الفصل الأول: مفاهيم عامة حول الانتقال الحراري والارتياح الحراري

ومن أمثلة انتقال الحرارة بالنقل هو تسخين الماء كما هو موضح في الشكل 3.I ، فعندما تبلغ درجة حرارة الماء 100 درجة مئوية تبدأ الفقاعات الهوائية بالتشكل أسفل وعاء التسخين، وبإمكانك ملاحظة كيفية انتقال هذه الفقاعات إلى الطبقات العليا وهبوط الماء في السطح إلى الطبقات السفلى في الوقت نفسه.

✓ قانون نيوتن (Loi de Newton)

يعطى بالعلاقة

$$Q = h \cdot S(T_s - T_f)$$

حيث:

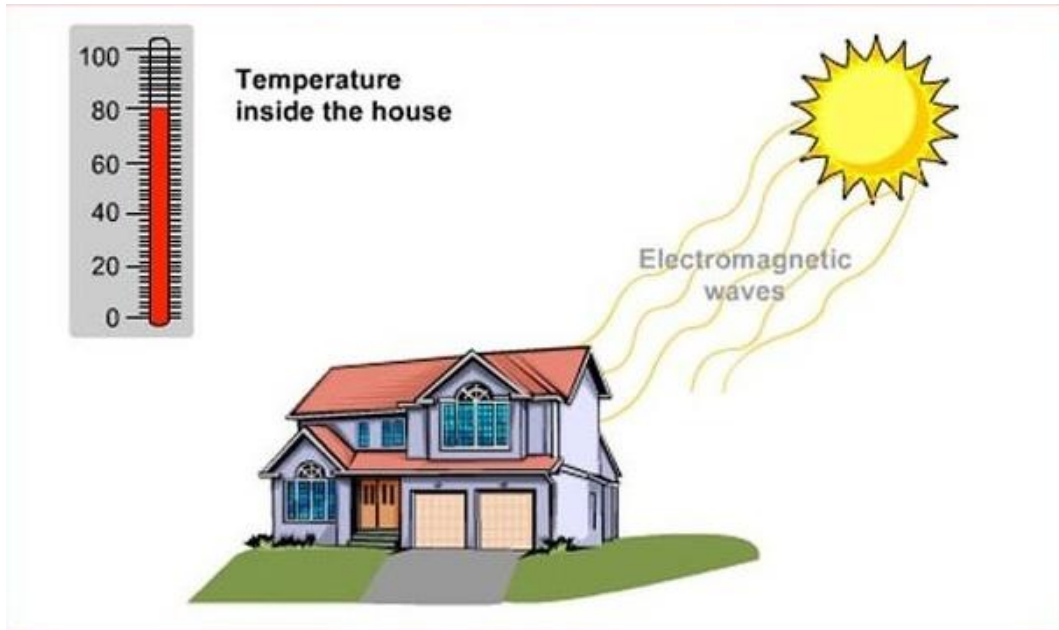
h : هو معامل انتقال الحرارة بالحمل ($w/m^2 \cdot k$)

S : مساحة سطح التبادل (m^2)

T_s : درجة حرارة السطح

T_f : درجة حرارة المائع

3.2.I انتقال الحرارة بالاشعاع



الشكل 4.I: انتقال الحرارة بالاشعاع

الفصل الأول: مفاهيم عامة حول الانتقال الحراري والارتياح الحراري

يحتاج كلا التوصيل والنقل إلى وجود وسطٍ ماديٍّ لتنتقل عبره الحرارة بين الأجسام (الشكل I.4). في حين أن النقل بالإشعاع لا يحتاج إلى وجود وسطٍ ماديٍّ ناقلٍ بين مصدر الحرارة والجسم المُتلقّي لها. فبإمكاننا مثلاً الاحساس بحرارة الشمس على الرغم من أننا بعيدين كل البعد عنها، وذلك لأن الحرارة بإمكانها الانتقال عبر الفراغ الفضائي بواسطة الإشعاع الحراري.

الإشعاع الحراري (يُعرف أيضاً بالأشعة تحت الحمراء) هو في الحقيقة شكلاً من أشكال الإشعاع الكهرومغناطيسي (أو بمعنى آخر الضوء). والإشعاع بالمعنى العام يصف انتقال الطاقة على هيئة أمواجٍ كهرومغناطيسيةٍ بسرعة الضوء، وهو لا يحتاج إلى وسطٍ ماديٍّ للانتقال ولا يتطلب حدوث تبادلٍ في كتل المواد

كما أن انتقال الحرارة بالإشعاع يمكن أن يتم بين جسمين منفصلين بواسطة درجة حرارة منخفضة جداً، والدليل على ذلك أن الإشعاع الحراري يصل من الشمس إلى سطح الأرض بعد أن يمر بطبقات باردة جداً من الهواء في طبقات الجو العليا، وللتعبير عن انتقال الحرارة بالإشعاع نعتمد على قانون ستيفان بولتزمان.

✓ قانون ستيفان بولتزمان (Loi de Stefan Boltzmann)

وجد ستيفان بولتزمان بالتجربة أن الطاقة المنبعثة من الجسم الأسود لكل متر مربع ولكل وحدة زمن تتناسب طردياً مع القوة لدرجة حرارة الجسم مقاسة بالكلفن ويعطى بالعلاقة (3.I) [2].

$$E(T) = \sigma T^4 \quad (3.I)$$

E: كمية الحرارة المنتقلة بالإشعاع (J/m².s)

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$$

3.I. الارتياح الحراري أو الراحة الحرارية

هي الحالة الذهنية (الشعورية) التي تعبر عن الرضى بالبيئة الحرارية وتُقدّر من خلال التقييم الموضوعي (معياري/آشري) (55) الموضوع من قبل «أنسي - إيه إن إس أي» وهو المعهد القومي الأمريكي للقياس و«آشري - إيه إس إتش آر إيه إي» [4] وهي الجمعية الأمريكية لمهندسي التبريد والتدفئة وتكييف الهواء. يمكن اعتبار جسم الإنسان محرّكاً حراريّاً إذ يشكل الأكل طاقة الدخل (الوقود).

الفصل الأول: مفاهيم عامة حول الانتقال الحراري والارتياح الحراري

سيولد جسم الإنسان طاقة فائضة تُطرح في البيئة المحيطة، ليستطيع الجسم الاستمرار في العمل. انتقال الحرارة متناسب طردياً مع الفرق في درجات الحرارة. في الأماكن الباردة، يطرح الجسم كمية حرارة أكبر إلى البيئة المحيطة وفي الأماكن الساخنة لا يطرح الجسم حرارة كافية. كلتا الحالتين (الساخنة والباردة) تؤديان إلى عدم تحقيق الارتياح الحراري. الحفاظ على هذا المعيار للراحة الحرارية لسكان المباني أو الأماكن المغلقة الأخرى هو أحد الأهداف المهمة لمهندسي تصميم التدفئة والتهوية وتكييف الهواء (إتش فاك). يشعر معظم الناس بالراحة عند درجة حرارة الغرفة، المتعارف عليها ضمن المجال 20 إلى 22 درجة مئوية (سيليسوس) أو (68 إلى 72 درجة فهرنهايت)، لكن هذا يختلف بشكل ملحوظ بين الأفراد وحسب عوامل أخرى كمستوى النشاط واللباس والرطوبة [6][5].

يحافظ على الاعتدال الحراري عندما يُسمح للحرارة الناتجة عن عمليات الاستقلاب البشرية بالتبدد، محافظةً على توازن حراري مع المحيط.

أهم العوامل المؤثرة على الراحة الحرارية هي تلك المحددة للريح (الكسب) والفقْد الحراريين، وهي معدل الاستقلاب وعزل اللباس ودرجة حرارة الهواء ودرجة حرارة الإشعاع الوسطية وسرعة الهواء والرطوبة النسبية. تؤثر كذلك العوامل النفسية كالتوقعات الشخصية على الراحة الحرارية. [7]

يتبوأ نموذج التصويت الوسطي المتوقع (بّي إم في) مكاناً بين أكثر نماذج الارتياح الحراري تقديراً. طُوّر باستخدام مبادئ الميزان الحراري ومعطيات تجريبية محصّلة في غرفة مناخ متحكم به تحت شروط الحالة المستقرة. من جهة أخرى، طُوّر النموذج المتكيف بناءً على مئات الدراسات الميدانية باعتبار أن السكان يتفاعلون بشكل ديناميكي (لحظي) مع البيئة المحيطة. يتحكم السكان ببيئتهم الحرارية من خلال وسائل كاللباس والنوافذ القابلة للفتح والمراوح وأجهزة التدفئة الشخصية (غير المركزية) والتحكم بدرجة التظليل الشمسي (الستائر والسواتر على سبيل المثال). [8][9]

يمكن تطبيق نموذج (بّي إم في) على المباني المكيفة، بينما يمكن تطبيق النموذج المتكيف بشكل عام حصرياً للأبنية الخالية من الأنظمة الميكانيكية المركبة. لا يوجد إجماع على نموذج الارتياح الحراري الذي يجب تطبيقه في الأبنية التي يكون تكييف الهواء فيها جزئياً (مقتصرًا على أماكن معينة أو أوقات معينة).

يمكن إجراء حسابات الارتياح الحراري بحرية حسب معيار أنسي/أشري 55 باستخدام أداة

الراحة الحرارية لأشري 55 التابعة لمركز البيئة المبنية (سي بي إي).

الفصل الأول: مفاهيم عامة حول الانتقال الحراري والارتياح الحراري

بشكل مشابه لمعيار آشري 55 هناك معايير ارتياح حراري مثل إي إن 15251 ومعيار إيزو

[12][11][10].7730

4.I العوامل المؤثرة في الراحة الحرارية

هناك العديد من العوامل المتغيرة التي تتدخل في مفهوم الراحة. توجد تلك المتعلقة بالفرد وغيرها المتعلقة بمناخ البيئة:

4.I العوامل المرتبطة بالظروف المناخية

1.4.I درجة حرارة الهواء الداخلي والجدران (المشعة)

هذه الكميات هما أول من يتحكم بشكل عام في مجال الراحة. تتراوح من 18 درجة مئوية إلى 26 درجة مئوية؛ هذه الحرارة تسمى درجة حرارة الهواء المحيط.

تساهم درجة حرارة الإشعاع أيضاً في التحكم المريح من خلال وجود جدا غالباً ما تكون درجة حرارته المنخفضة أقل من درجة حرارة الجفاف. هذا الاختلاف يمكن أن يولد الشعور بعدم الراحة. إن العطالة الحرارية والعزل الحراري، خاصة السعة الحرارية للمواد، هي أدوات للتحكم في درجة حرارة تحسين الراحة الحرارية. إندمج مواد متغيرة الطور (MCP) في المباني هي طريقة مثيرة للاهتمام للحد من استهلاك الطاقة أو لتحسين الراحة في الصيف داخل المباني.

2.4.I رطوبة الهواء

رطوبة الهواء ليس لها تأثير كبير على الشعور بالراحة الحرارية، إذا كانت درجات حرارة الهواء مريحة، ما لم تكن مرتفعة أو منخفضة للغاية. إن التغيرات في الرطوبة النسبية تكون بين 30 إلى 65 %.

يمكن التعبير عن رطوبة الهواء كضغط بخار الماء. إن رطوبة الهواء تؤثر داخل المباني على جسم الإنسان بشكل مباشر وغير مباشر (جفاف الشعب الهوائية والجهاز التنفسي)

3.4.I الريح

تؤثر سرعة الهواء على التبادلات بواسطة الحمل الحراري. في الواقع يكون التبادل الحراري بين السطح الخارجي للجدران والهواء الخارجي. إن معدل تجديد الهواء في الغرفة يعتمد أيضاً على سرعة الرياح وخاصة عندما تكون التهوية المتقاطعة (دورية) ممكنة

4.4.I الإشعاع الشمسي

الإشعاع الشمسي يؤثر على الراحة الحرارية عن طريق زيادة درجة حرارة الأسطح المشمسة في فصل الشتاء. وهذه الكمية من الإشعاع الشمسي الذي هو نتيجة ليتم تقدير الإشعاع المباشر والمنتشر والمنعكس، على عكس الأسطح الصيفية المشمسة التي تقدم مصدر للانعكاس بسبب الزيادة في درجات الحرارة المشعة للجدران والسقوف هذا يزيد بالتالي من درجة حرارة البيئة الداخلية ويجعلها تطاق

الفصل الثاني

استخدام مواد متغيرة الطور في
المباني

1.II مقدمة

نظراً لظهور أزمة الطاقة العالمية المرتبطة بالتغير المناخي، كان لزاماً الحد من استهلاك الطاقة وبالأخص تلك الطاقة المستهلكة بالمباني، حيث تستهلك المباني عالمياً ما يقارب 31% من الاستهلاك الكلي للطاقة وتنتج ما يعادل نفس النسبة تقريباً من الانبعاثات الكريهة [13]

لذا كان الهدف الأساسي من أبحاث الطاقة التي أجريت في السنوات السابقة هو الحد من إنتاج الطاقة على أساس الوقود الأحفوري من خلال تعزيز استخدام موارد الطاقة المستدامة. ويمكن تحقيق مفهوم الطاقة المستدامة من خلال معالجة كل من موارد الطاقة المتجددة وزيادة كفاءة استهلاك الطاقة. وكفاءة استهلاك الطاقة تعني الاستخدام الأمثل من خلال استهلاك الحد الأدنى المطلوب سنوياً من الطاقة لتلبية احتياجات التدفئة والتبريد والإضاءة وتوفير المياه الساخنة. وعادةً ما يتم تحسين كفاءة استخدام الطاقة عن طريق تقليل استهلاك الطاقة. وفي معظم الأحيان، يرتبط هذا الخفض بالحد من استخدام أجهزة التبريد والاعتماد على تطبيقات التبريد السلبي.

ويحاول الباحثون البحث باستمرار عن مصادر الطاقة الفعالة والاقتصادية في سياق الاستدامة، لذا فقد ازداد اهتمامهم بالتطبيقات الحرارية مثل تسخين وتبريد الفراغات والماء. وتعد أنظمة تخزين الطاقة الحرارية المعتمدة على المواد متغيرة الطور Phase Change Materials واحدة من التقنيات الرائدة لتطوير كفاءة استهلاك الطاقة في المباني. حيث تشير المواد متغيرة الطور إلى أن أي مادة قادرة على الخضوع لتحول يمكن عكسه من الحالة الصلبة إلى الحالة السائلة وتخزين/ إطلاق قيم كبيرة من الطاقة في نطاق درجات حرارة ضيقة. وبالتالي، فإن الملاحظة المثيرة للاهتمام والتي أدت إلى هذا البحث كانت ظهور الاتجاهات الحديثة في أنظمة تخزين الطاقة الحرارية المعتمدة على المواد متغيرة الطور لتحسين كفاءة استهلاك الطاقة في المباني. حيث تقوم أنظمة تخزين الطاقة الحرارية المعتمدة على المواد متغيرة الطور بسد الفجوة بين توفر الطاقة وضرورتها عن طريق تقليل الطاقة اللازمة لتبريد الفراغات أو التدفئة.

وعلى الرغم من مرور عقود من الثورة العلمية، إلا أنه لا يزال هناك الكثير من الغموض حول تطبيق المواد متغيرة الطور في الهندسة المعمارية والتصميم الداخلي [14]

2.II. التطور التاريخي للمواد متغيرة الطور

ظهرت تطبيقات المواد متغيرة الطور بالمباني منذ منتصف القرن العشرين، حيث تغيرت صناعة البناء من الطريقة التقليدية إلى تعزيز تقنيات الطاقة الشمسية السلبية. وبحلول نهاية الثمانينات من القرن الماضي، تم دمج المواد متغيرة الطور في معظم مواد البناء التقليدية بما في ذلك تلك الممزوجة بالخرسانة أو الجبس والبياض الأسمنتي.

وفي عام 1983 ، قام كلٌّ من Darby و Wright بتحسين أرضيات وسقف أحد المباني باستخدام مواد تجارية معتمدة على تطبيقات المواد متغيرة الطور ذات السعة التخزينية الحرارية الكبيرة والتي تصل الي حوالي 81.3 جول /جم، ودرجة حرارة تغير الطور تبلغ 22.8 درجة مئوية. وأسفرت نتائج اختباراتهم عن ظهور إمكانات كبيرة للتبريد الصيفي والتدفئة في فصل الشتاء. [15],[16]

وفي عام 1990 ، تم تطوير مواد متغيرة الطور أكثر فعالية من حيث التكلفة كما أنها مقبولة بيئيًا بواسطة كل من Salyer و Sircar ، وقد قاما بعمل عدة أبحاث حول أساليب دمج تلك المواد بألواح الحوائط الخرسانية والجبسية وذلك باستخدام طرق تشرب تلك الحوائط لهذه المواد. ومع ذلك، فقد لوحظ أن أساليب تشريب تلك المواد متغيرة الطور ينتج عنها كثير من التسريب [17] . وفي نفس العام قام Tomlinson و Heberle بإجراء دراسة ميدانية حرارية واقتصادية لدمج منتجات المواد متغيرة الطور بألواح الحوائط عن طريق تشريب تلك الألواح، وقد تم إجراء هذا الاختبار الميداني على منزلين متطابقين، أحدهما تم استخدام المواد متغيرة الطور به والأخر بدون استخدام هذه المواد، وأظهرت النتائج أن الحوائط التي تم تشريبها بالمواد متغيرة الطور قد احتفظت بالحرارة بما يصل إلى 200 مرة أكثر من الحوائط التقليدية [17]–[18] .

وبحلول عام 1991 ، تم فحص مجموعة كبيرة من ألواح الحوائط الجبسية المحسنة بواسطة كل من Hawes و Feldman ، وقد أوضح الباحثان أن غمر ألواح الحائط في سوائل من مواد متغيرة الطور تتسبب في زيادة سعة التخزين الحراري بمقدار 12 مرة أكثر من ألواح الحوائط التقليدية [18] . وفي عام 1998 تم إجراء أول دراسة تجريبية ومحاكاة للأداء الحراري لألواح الحوائط المدمجة بمواد متغيرة الطور. وأظهرت المحاكاة السنوية للتدفئة والتبريد في الفراغات الداخلية أن أحمال التبريد انخفضت بنسبة 16 % و 19 % و 30 % عند إضافة مواد متغيرة الطور إلى ألواح الحوائط المفرغة والحوائط الخرسانية والأسطح الفولاذية على التوالي. [19]–[20]

الفصل الثاني: استخدام MCP في المباني

وخلال العقد الأول من القرن الحادي والعشرين، تم إدخال العديد من مواد العزل الحراري مع المواد متغيرة الطور بواسطة مراكز بحثية مختلفة. وتم استخدام العزل في تجويف الحائط أو أرضية الغرفة لخفض أحمال التبريد المطلوبة [21]. كما قدم Schwarz "زجاج الطاقة" لأول مرة في عام 2002، عن طريق وضع طبقة من تلك المواد متغيرة الطور بين طبقات الزجاج المزوج.

وقد أوضحت الدراسة أن الزجاج المُحسّن يقوم بتخزين الحرارة بما يعادل ما يقوم به حائط من الطوب يصل سمكه الي 30 سم [22].

وقد تم تطوير الشكل الأول من الألواح المدمجة مع البارافين في عام 2005. كما قام Lin باختبار هذه الألواح على أرضية سكنية. وخلال ذلك تم تثبيت نظام التدفئة الكهربائية تحت الأرض خلال موسم التدفئة.

وأشارت النتائج إلى انخفاض كمية الكهرباء المطلوبة في تسخين الفراغات الداخلية بأكثر من النصف، حيث قامت هذه الألواح بتخزين الحرارة خلال فترات انقطاع التيار الكهربائي وإطلاقها خلال فترات ذروة الطلب، [23].

وفي عام 2006 أجرت Maha Ahmad وآخرون اختباراً تجريبياً ومحاكاة على ألواح من مواد متغيرة الطور مع ألواح بولي فينيل كلوريد PVC التي تحتوي على مواد متغيرة الطور أيضاً من البولي إيثيلين. وقد كانت درجة حرارة انصهار تلك المواد المختارة بين 21 درجة مئوية و 25 درجة مئوية. ولوحظ انخفاض درجة حرارة هواء غرفة الاختبار بمقدار 2 درجة مئوية خلال فترة الصيف بكل من الاختبار التجريبي والمحاكاة [24], [25].

3.II. ماهي المواد متغيرة الطور

المواد متغيرة الطور هي مواد قادرة على امتصاص وإطلاق كمية هائلة من الطاقة الحرارية الكامنة عن طريق تغيير حالتها من مرحلة إلى مرحلة (الصلبة - السائلة) ضمن نطاق درجات الحرارة الصغيرة في وحدة تخزين الحرارة المحسوسة، يتم تخزين الطاقة الحرارية بتعديل درجة حرارة وسط التخزين، والتي يمكن أن تكون سائلة أو صلبة (الشكل: 1.II).

إن كمية الطاقة المخزنة في الوحدة تتعلق بالسعة الحرارية للمائع وتغيرات درجة الحرارة وكمية مواد التخزين. وبالتالي من المستحسن أن يكون لوسط التخزين سعة حرارية عالية محددة،

الفصل الثاني: استخدام MCP في المباني

والاستقرار على المدى الطويل في ظل الدورة الحرارية، والتوافق مع الحاوية الخاصة به وبتكلفة منخفضة. يمكن تصنيف تخزين الحرارة المحسوسة على أساس الوسائط الخاصة بالتخزين؛ السائلة مثل الماء والسوائل القائمة على الزيت، الأملاح المنصهرة ... إلخ، أو الصلبة مثل الأحجار والمعادن وغيرها. حيث معادلة كمية الحرارة تعطى كالآتي:

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} m C_p dT = m C_p (T_f - T_i) \quad (1. II)$$

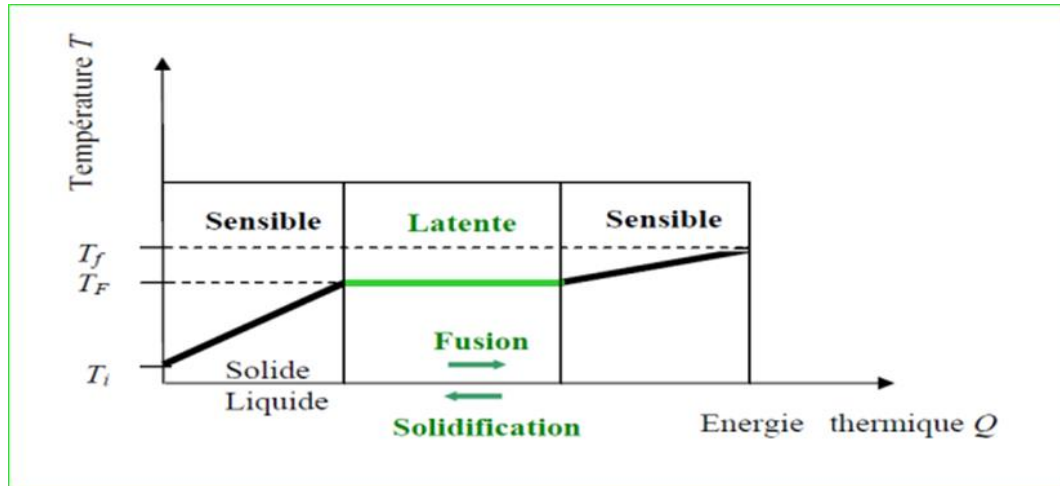
Q : كمية الحرارة المخزنة (J)

m : كتلة مادة التخزين (Kg)

T_i : درجة الحرارة الابتدائية

T_f : درجة الحرارة النهائية

C_p : السعة الحرارية (J/Kg.k)



الشكل:1.II.تغيرات درجة الحرارة متجانس مع تغير الحالة

وتمر هذه المواد بمجموعة من المراحل تتم فيها عدة تغيرات لحالاتها الفيزيائية ما بين الحالة الصلبة السائلة بسبب تقلبات درجة الحرارة، مما يؤدي الي تخزين كمية من الطاقة.

الفصل الثاني: استخدام MCP في المباني

وتُعرف هذه العملية باسم الطاقة الحرارية الكامنة، حيث يتم تخزين كمية كبيرة من الطاقة أو إطلاقها في نطاق درجات حرارة صغير. وتتراوح درجة انصهار المواد متغيرة الطور بين 19 إلى 28 درجة، ويمكن للمواد متغيرة الطور تخزين الطاقة الحرارية بأكثر من أربعة عشر ضعفاً لكل وحدة حجم [6]. [ويمكن أن يزداد تخزين الطاقة لمواد البناء التقليدية عن طريق الدمج المباشر للمواد متغيرة الطور في مواد البناء. حيث يمكن أن تتكامل هذه المواد مع مواد البناء المختلفة مثل؛ الطوب، الخرسانة، ألواح الجبس، البياض الأسمنتي، الزجاج، وغيرها

4.II. تصنيف المواد متغيرة الطور

يتم تصنيف المواد متغيرة الطور الي مواد عضوية وأخري غير عضوية، ويعتبر شمع البارافين أحد أهم تلك المواد العضوية حيث تتراوح درجة حرارة انصهاره بين 20 - 70 درجة مئوية. ويعتبر البارافين من المواد الآمنة، كما أن له موصلية حرارية منخفضة خاصةً في حالته الصلبة. أما الفئة الثانية فهي المواد غير العضوية مثل هيدرات الملح. وتتميز هذه المواد بارتفاع قيم سعة التخزين الحراري. وبشكل عام هناك العديد من المنتجات التجارية الخاصة بالمواد متغيرة الطور، وتتواجد هذه المنتجات علي عدة أشكال [26]

يمكن تصنيف مواد متغيرة الطور (MCP)) وفقاً لطبيعتها الكيميائية في ثلاث فئات رئيسية [31]:

4.II.1. المواد غير العضوية

المواد غير العضوية لها درجة حرارة أو مدى درجات حرارة الذوبان بين 100- درجة مئوية و1000+ درجة مئوية الأكثر استخداماً هي: الماء، المحاليل المائية للملح، الأملاح المائية، خليط الأملاح، خليط المعادن. لديهم العديد من المزايا: لديهم حرارة كامنة كبيرة وناقلية حرارية عالية. ولها نطاق انصهار ضيق. فهي غير قابلة للاشتعال ولها تكلفة الاستثمار بأسعار معقولة. المشاكل الرئيسية التي تواجهها أثناء استخدامها: التبلور والتآكل والتبريد الفائق، مما يتطلب استخدام مواد كيميائية أخرى حتى تكون موثوقة.

4.II.2. المواد العضوية

هي كل مادة لديها درجة حرارة أو مجال حراري بين 0 درجة مئوية و 150 درجة مئوية. الأكثر استخداماً تعتمد أساساً على البارافين و الأحماض الدهنية وكحول السكر. ولديهم بعض السلبيات، بالمقارنة مع مزايا MCP غير العضوية: لديهم ناقلية حرارية ضعيفة في الحالة الصلبة

الفصل الثاني: استخدام MCP في المباني

والسائلة، لديهم الحرارة الكامنة للانصهار ضعيفة، وقابلة للاشتعال. ومع ذلك لديهم مزايا كثيرة من بينها: تواجدها في مجموعة واسعة من درجات الحرارة ومتوافقة مع مواد البناء التقليدية ومستقرة كيميائياً. فهي غير متفاعلة في معظم الأوقات وقابلة لإعادة الاستعمال (الرسكلة).

3.4.II. مواد سهلة الانصهار (Eutectiques)

هي مواد تتكون من عدة مواد متغيرة الطور (MCP) نقية. على العموم، عبارة عن خليط من MCP عضوية وغير عضوية (عضوية-عضوية؛ عضوية-غير عضوية؛ غير عضوية-غير عضوية) لديهم اثنتان من المزايا الرئيسية، لديه منقطة انصهار صافية مماثلة لمادة نقية وتكون درجات الحرارة الكامنة الحجمية أعلى قليلاً للمركبات العضوية النقية. ولديها سلبيتين رئيسيتين هي قلة المعطيات بالنسبة للخصائص الحرارية لهذه المواد وأنها تستخدم قليلاً في النظم الصناعية.

5.II. خصائص المواد متغيرة الطور MCP

ويجب تحديد خصائص المواد متغيرة الطور المستخدمة في مرحلة النمذجة والتصميم حتى يمكن الاستفادة من هذه المواد عند تنفيذ هذا النظام. وبالرغم من أنها مهمة معقدة نسبياً إلا أنه يجب أن يتم تحديد وأخذ مجموعة من معايير لاختيار تلك المواد في المراحل الأولى من التصميم، وتعتبر العوامل الاقتصادية والخصائص الحرارية والفيزيائية والكيميائية من أهم المعايير الواجب أخذها في الاعتبار [27].

5.1. الخصائص الحرارية

يجب أن تحتوي المواد المختارة على نطاق لدرجة حرارة تغيير الطور مناسب لنطاق التشغيل المطلوب (درجة حرارة الغرفة) لضمان تخزين وإطلاق الحرارة في نطاق حرارة ثابت. هذا النطاق عادة ما يكون ضيقاً جداً، حيث تتراوح درجة حرارة تغير المادة بين 5 درجات مئوية [28].

وكل مادة لديها نقطة انصهار محددة كما أن لها قيم فريدة للتوصيل الحراري في الحالات الصلبة والسائلة. وتعد المواد ذات الحرارة الكامنة العالية لكل كتلة وحدة، والحرارة العالية النوعية، والموصلية الحرارية العالية في المراحل الصلبة والسائلة هي الأكثر تفضيلاً لسرعة تغيير الطور ولتوفير تخزين حراري إضافي معقول يمكن أن يكون ذو قيمة كبيرة [29].

5.2. الخصائص الفيزيائية

تشتمل معايير الاختيار المثلى لهذه المواد على عدة خصائص فيزيائية كأن تكون ذات كثافة عالية، وأن تتمتع بالقليل من التبريد الفائق أثناء التجمد. وتعد ظاهرة التبريد الفائق واحدة من أخطر المشكلات فيما يتعلق بمواد تغيير الطور، حيث تتجلى في خفض درجة حرارة المواد إلى ما دون درجة حرارة تغير الطور المتوقعة قبل أن تبدأ المادة في التصلب وإطلاق الحرارة [30]

5.3. الخصائص الكيميائية

بالنظر في الخواص الكيميائية، يجب أن تكون المواد المختارة غير سامة وغير قابل للاشتعال كما يجب أن يكون متوافق مع المواد الأخرى وغير قابلة للتآكل بجانب ضرورة استقرار المادة الكيميائي. حيث أنه غالباً ما يضمن الاستقرار الكيميائي للمواد عمراً طويلاً [30]

5.4. الخصائص الاقتصادية

بجانب تلبية جميع الخصائص السابقة، يجب أن تكون جميع المواد المختارة من المنتجات التجارية واسعة النطاق منخفضة التكاليف كما يجب أن يكون متوفر على نطاق واسع بجانب وضوح الأداء البيئي العام الجيد لهذه المواد.

II. 6. تقنيات لتكييف مواد تغيير الطور MCP

تكيف MCP يقوم على عدة مبادئ للتوافق بين مادة الخزان (الحاوية) ومواد تغيير الطور (MCP)، فعندما تصبح الـ MCP سائلة وبسبب لزوجتها الضعيفة نسبة التسرب تزداد بقوة فنجد أشكال مع حاوية التخزين، وفي الأخير يمكن القول أن تغيير الطور يسبب تغير في الحجم ممكن أن يؤدي إلى كسر الحاوية إذا كانت هذه الأخيرة لا تستطيع استيعاب هذا التغير. يوجد عدة تقنيات لتكييف مواد تغيير الطور منها:

II.6.1. التغليف الكلي (Macro encapsulation)

هي آلية تكون فيها مادة تغيير الطور مغلقة على شكل (أنابيب- كريات - أكياس - أسطوانات - ألواح ...)، (الشكل II.6) هناك عمليات صناعية تستعمل عقيدات تأخذ ثلاث أقطار (98- mm

الفصل الثاني: استخدام MCP في المباني

77-78) تستعمل على حساب درجات حرارة تحول المادة الـ MCP ، يطرح هنا مشكل ضعف الناقلية الحرارية لمادة تغير الطور فيجد من التحويلات. إضافة إلى أنه يجب الانتباه لإمكانية الانفصال قد يقع بين الـ MCP وغلافها والذي يمكن أن يظهر بعد عدة دورات من الإنصهار والتصلب . وفي بعض الحالات التحول الحراري و التسربات تسبب مشكل [32] .



الشكل : II.6 تكيف الـ MCP في عقيدات [32]

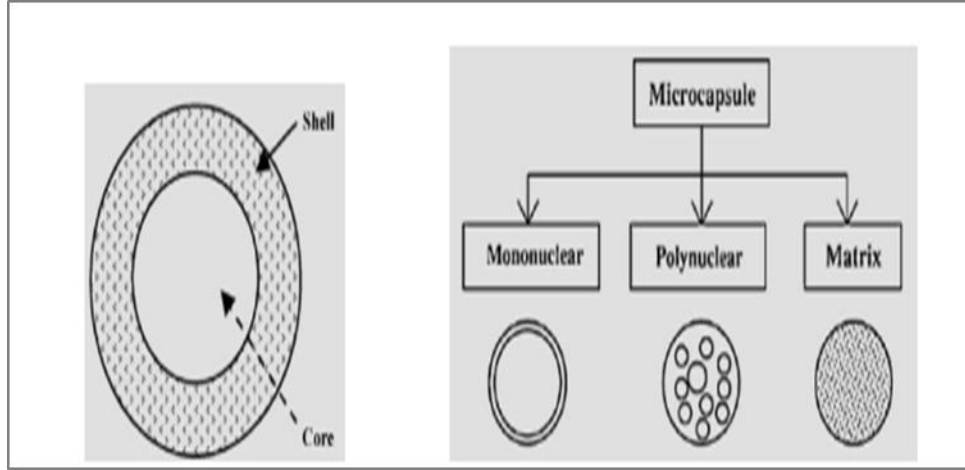
II.6.2. التغليف الصغير (Micro encapsulation)

هي مجموعة تقنيات تسمح بالحصول على جسيمات من أحجام مختلفة الأشكال مثل (كريات- أسطوانات صغيرة عمودية) تحتوي على مادة MCP في حويصلات مغلقة ويمكن إستخدامها بعد ذلك في نظام تخزين الطاقة الكامنة ليتم تخزينها وتطبيقها في مجموعات. حيث يتم تخزين الطاقة بتمرير المائع في الناقل (الهواء أو الماء) (الشكل II.6) خلال هذه الكتلة ، وميزة هذه الهندسة الداخلية في مجموعات من MCP المغلف هو أنه يوفر سطح التبادل كبير (مساحة كروية).

تقنية ميكرو كبسولي لـ MCP تتم عن طريق:

الفصل الثاني: استخدام MCP في المباني

- إضافة الغرافيت.
 - إضافة (SiC) سيليكون كاربيد.
- دهن كرية نحاس تحتوي على ال MCP بشريط من مادة النيكل.



الشكل II.6. 2: مختلف أنواع التغليف الصغير [17]

7.II. الاستخدام الذاتي لـ MCP في المباني [33]

هو استخدام مواد متغيرة الطور MCP من خلال دمجها في مختلفة المكونات للمبنى: السقوف والأرضيات والجدران والنجارة، الأثاث... الخ. تخزين الطاقة وتحريرها وفق التبادلات الحرارية مع الهواء داخل المبنى و محيط المبنى (الهواء الخارجي، الإشعاع الشمسي،... إلخ). هذه التبادلات سلبية لا يتم تفعيلها بواسطة نظام ميكانيكي.

7.II.1. دمج MCP في المباني

تستخدم مواد تغيير الطور (MCP) في المباني لتخزين الطاقة حسب احتياجات التدفئة و/ أو التبريد. هنا كأربعة أنواع من التحولات MCP : الغاز/السائل الغاز/الصلبة، الصلبة / الصلبة والصلبة / السائلة. في أنظمة تخزين الطاقة للمباني، وبصفة عامة يتم استخدام التحولات الصلبة / السائلة لأن لديهم أنتالي لتغير الحالة مرتفع .

7.II.1. دمج MCP في المباني

هذا النوع من الدمج هو الأكثر استخدامًا بين المستخدمين السلبيين لـ MCP في المبنى لأن مساحة التبادل الحراري كبيرة. فهي قادرة على الجمع بين وظائف التخزين الحراري وعنصر البناء.

الفصل الثاني: استخدام MCP في المباني

بشكل عام، يتم تثبيتها بشكل عام في المباني للمساعدة في تحسين تبريد المساكن. أكثر الهياكل المصنعة هي: ألواح الجبس، الجدران الحاوية على MCP، كتل خرسانية.

II.7.1.1 اللوح الجصي MCP

يتكون اللوح الجصي MCP بشكل عام من مواد بناء خفيفة الوزن وMCP.

II.7.1.2 الطلاء الحاوي لمCP

أفضل الأعمال المعروفة على الطلاء MCP هي مشروع RETERMAT". (المركز العلمي والتقني للبناء) في بلجيكا كجزء من المشروع بالتعاون مع ثلاثة مراكز بحثية أخرى (CRM ، CERTECH،CENTEXBEL) طورت طلاء يحتوي على 30 ٪ بواسطة كتلة من MCP. (الملحق II.2)

II.7.1.3 جدران ترونب (Trombes) على أساس MCP

تتكون جدران ترونب التي تعتمد على MCP من جدار حجري عادي يحتوي على MCP متباعدة حوالي 20 سم من طبقة من الزجاج أو الزجاج البلاستيك. (ملحق II.3)

II.7.1.4 كتل خرسانية لمCP

طور مركز دراسات البناء في مونتريال (كندا) كتل خرسانية قائمة على مواد متغيرة الطور MCP. واستخدم مواد متغيرة الطور MCP مختلفة: البارافين (PAR) ، بوتيلستير (BS) ، دوديكانول (DD) والبولي إيثيلين (PEG). (الملحق II.4)

II.8. الاستخدام الغير ذاتي لمCP في المباني

الأنظمة النشطة هي الأنظمة التي يكون فيها جريان السائل في المكونات بواسطة نظام ميكانيكي (مروحة، مضخة،... إلخ). تتيح هذه الطبيعة النشطة لإستخدام سعة تخزين الطاقة و/أو تحريرها حسب الطلب وهذا يعني بطريقة غير مبررة. تتكون الأنظمة النشطة عموماً من ثلاثة عناصر:

1- مبادل تخزين الطاقة الحرارية الكامنة: LTHES (تخزين الطاقة الحرارية الكامنة) التي تحتوي على MCP؛ هذا هو العنصر المركزي لجهاز التخزين.

الفصل الثاني: استخدام MCP في المباني

2- دائرة دوران سائل التبريد (غالبًا الهواء و أحيانًا الماء).

3- مروحة أو مضخة تحدد تدفق السائل في LTHES.

تعمل أنظمة التبادلات الحرارية النشطة على تحسين راحة المباني عن طريق تعميم الهواء النقي (التبريد) أو الهواء الساخن (التدفئة) في المباني حسب الطلب. وهم يعملون على النحو التالي:

1-المساعدة في تبريد المباني

خلال اليوم، يتم تعميم الهواء الساخن من المبنى في نظام نشط. هذا الأخير يحتوي على MCP صلب يتعرض لدرجة حرارة أكبر من درجة حرارة الإنصهار حيث يذوب عن طريق امتصاص الحرارة من الهواء. ثم نعيد حقن هذا الهواء النقي في المبنى لتصلب MCP.

2-المساعدة في تدفئة المباني

المبدأ هو نفسه ولكن يتم عكس العملية خلال اليوم، نقوم بتدوير الهواء الساخن للمبنى (أو من نظام التدفئة مع مصدر الطاقة الشمسية أو الكهربائية على سبيل المثال) الذي يخزن الحرارة. يتم تسخين المبنى من قبل تعميم الهواء النقي من الأخير في هذه التبادلات عندما يكون ذلك ضروريا أثناء الليل (عموما).

9.II MCP القائم على البارافين [34]

و هو ناتج عن التقطير، تم الحصول عليها أثناء عملية تكرير البترول، ومن هنا جاءت تسميته "الدهون المعدنية" أو "الدهون الاوزيتريت". ويمكن أيضا أن تستخرج من اللجنيت، والصخر الزيتي والجفت. بسبب الطلب العالمي المتزايد، الباحثين والصناعيين يحاولون تطوير البارافين من أصل نباتي، على أساس الدهون. البارافينات، كما توجد عدة أنواع، هي الألكانات وهي جزيئات خطية من الهيدروكربونات المشبعة ذات السلسلة المستقيمة، الصيغة الأولية لها هي $(C_n H_{(2n+2)})$ ، حيث قيمة n تتراوح بين 18 و 32 ، وقيمة الكتلة المولية بين 275 و 600 غرام / مول.

الفصل الثاني: استخدام MCP في المباني

9.II.1. الاستخدامات

بالنظر إلى العديد من الصفات، فإن البارافين لديه مجال من التطبيقات واسع ومتنوع للغاية:

1. في الصناعة

مع الكلور، يستخدم البارافين لتزبييت الجلد.

- يستخدم البارافين الصلب في صناعة الورق المضاد للماء.

- البارافين الصلب يستخدم في صناعة الشموع؛ لأنه يذوب في حوالي 50-60 درجة مئوية.

- يستخدم زيت البارافين كمبرد كما يستخدم في زيوت التشحيم.

2- في الطب

- في الاستخدام الداخلي، يستخدم البارافين السائل منذ القرن التاسع عشر كمسهل في الاستخدام الخارجي، يتم استخدامه في العديد من المستحضرات الجلدية و التجميلية.

- ممزوج بالطين، يستخدم لأغراض طبية / علاجية.



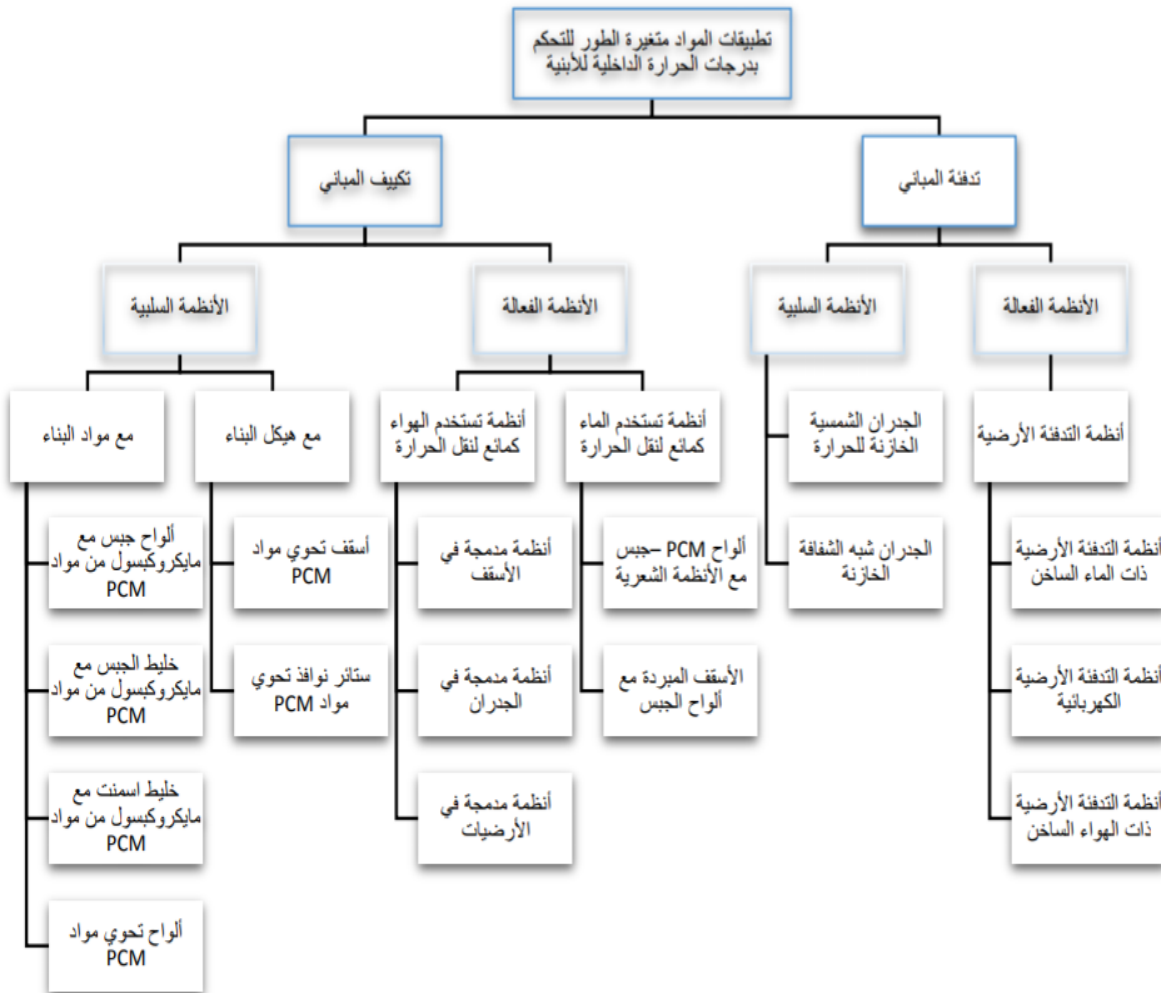
الشكل 9.II: حاويات تحتوي على الدم والأعضاء مكونة من MCP

3 - في الفن

- لوحات وأقلام ملونة وشمع تلوين.
- استخدام لأغراض التصوير الفوتوغرافي .

10.II. تصنيف تطبيقات مواد متغيرة الطور فالمباني

تصنف تطبيقات المواد متغيرة الطور لمتحكم بدرجة الحرارة الداخلية للمباني كما هو موضح في الشكل 1



الشكل 10.II . تصنيف تطبيقات مواد متغيرة الطور فالمباني

الفصل الثاني: استخدام MCP في المباني

11.II الـ MCP سهل الانصهار (eutectiques)

| Matériaux | Température de fusion (°C) | Enthalpie de fusion (kJ/kg) | Chaleur spécifique solide/liquide kJ/(kg.°C) | Masse volumique solide/liquide (kg/m ³) |
|---|----------------------------|-----------------------------|--|---|
| Eau | 0 | 333.6 | 2.05 / 4.18 | 999 / 1000 |
| PCMs Organiques | | | | |
| Acide dodécanoïque | 41 - 43 | 211.6 | 1.76 / 2.27 | 1007 / 862 |
| Triméthyléthane (63 wt%) + eau (37 wt%) | 29.8 | 218.0 | 2.75 / 3.58 | 1120 / 1090 |
| PCMs Inorganiques | | | | |
| Mn(NO ₃) ₂ · H ₂ O + MnCl ₂ · H ₂ O (4 wt%) | 15 - 25 | 125.9 | 2.34 / 2.78 | 1795 / 1728 |
| Na ₂ S ₂ O ₃ · 5H ₂ O | 48 | 267.0 | 3.83 / 4.57 | 1450 / 1280 |
| PCMs Eutectiques | | | | |
| Capric acid (65 mol%) + Lauric acid (35 mol%) | 18 - 19.5 | 140.8 | 1.97 / 2.24 | - / - |

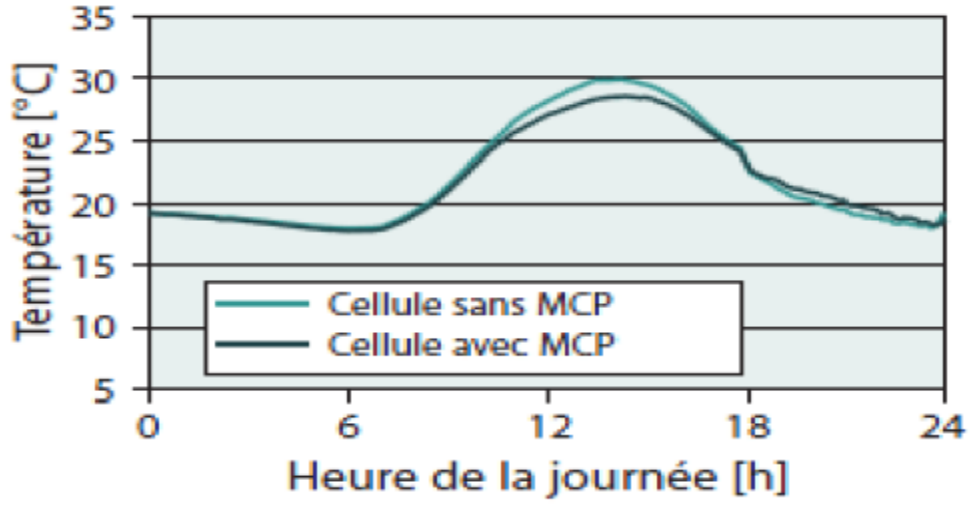
الجدول 11.II: خواص حرارية معينة لبعض الـ MCP

12.II. الطلاء الحاوي لـ MCP

على المستوى التجريبي ، تم إجراء العديد من القياسات على خليتين بمساحة أرضية 9 متر مربع لكل منهما. كل منها يحتوي على مساحة 3 متر مربع من الزجاج المواجه للجنوب. تم طلاء أحدهما بجبس MCP والآخر بطبقة تقليدية بسماكة 1.5 سم. يمكن إجراء قياسات درجة الحرارة لفترات مختلفة من أشعة الشمس. أظهرت النتائج الأولى أن الفرق في درجات الحرارة تتراوح ما بين 3 درجة مئوية بين الخليتين فيما يتعلق بالجانب الداخلي لغللاف الخلية.

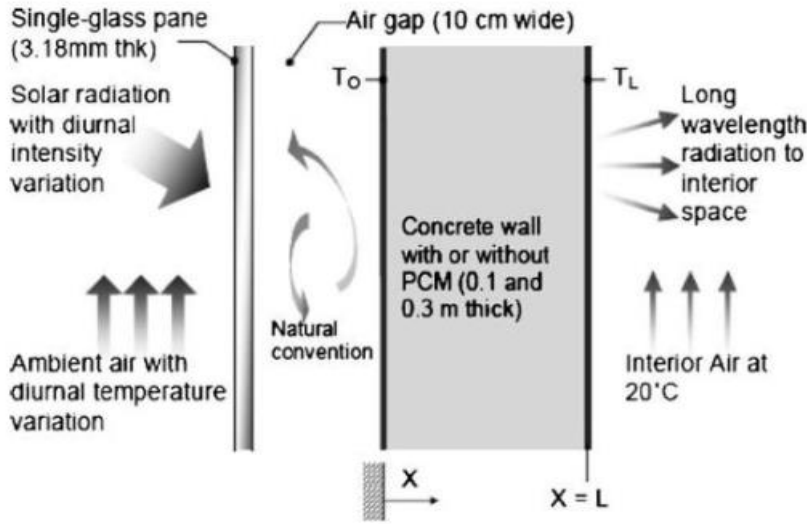
على مستوى المناخ الداخلي للخلايا ، تم قياس فرق درجة الحرارة من 1 درجة مئوية إلى 1.5 درجة مئوية بين الخليتين لأقصى درجة حرارة يومية تم الوصول إليها خلال فترات الصيف الحارة و / أو المشمس (12.II).

الفصل الثاني: استخدام MCP في المباني



الشكل II.12: تغيرات درجات الحرارة بدلالة الزمن في خلايا

13.II. جدران ترونوب (trombes) على أساس MCP

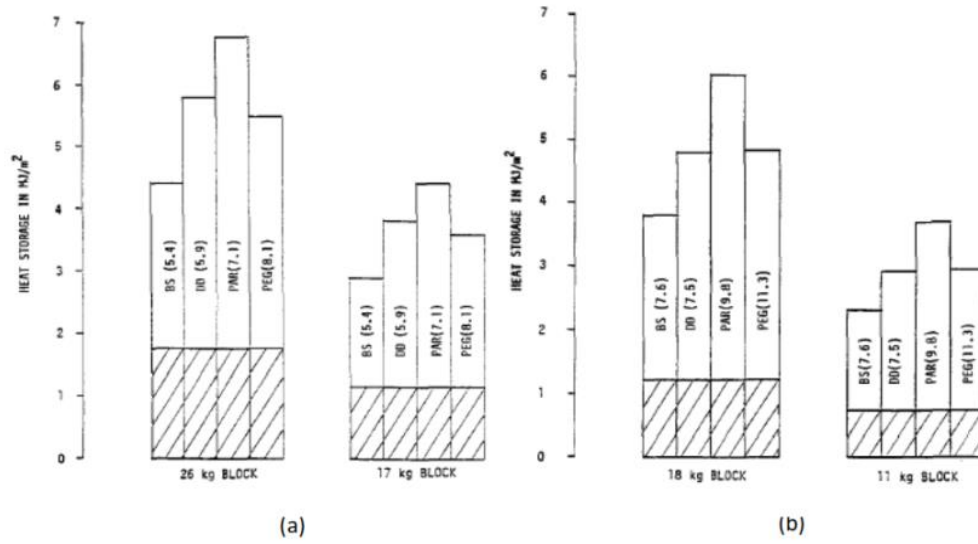


(الشكل II.13) نموذج جدار ترونوب يحتوي على MCP

14.II. كتل خرسانية لـ MCP

يوضح الشكل 4a و 4b سعة تخزين الطاقة بالإضافة إلى الحرارة الكامنة والمحسوسة لبعض نماذج كتل MCP الخرسانية المصنعة بطريقة عادية أو في جهاز التعقيم. خلال الإختبارات المختلفة على الكفاءة الحرارية لكتل MCP الخرسانية، يوضح أن كتل MCP الخرسانية القائمة على البارافين لديها سعة تخزين الطاقة (لكل متر مربع) أكثر أهمية من MCP الأخرى التي تمت تجربتها.

الفصل الثاني: استخدام MCP في المباني



الشكل II.14: سعة تخزين الطاقة لكتل الخرسانية MCP التي تم تطويرها

الفصل الثالث

الدراسات المكتبية

1.III الدراسات السابقة

الدراسة الأولى

درس الباحث Neeper السلوك الحراري لألواح من الجيبسوم بورد المشرب بالأحماض الدسمة وبشمع البارافين كجدار خارجي أو داخلي وهو خاضع للتغير اليومي في درجة الحرارة الداخلية والخارجية. وقد ركز البحث على تأثير كل من درجة حرارة الانصهار لمادة متغيرة الطور ومجال درجة حرارة التحول الطوري والحرارة الكامنة لمادة متغيرة الطور. وإقترح مادة متغيرة الطور ذات درجة حرارة انصهار مساوية لمتوسط درجة حرارة الغرفة وذات مجال انصهار لا يختلف عنها بأكثر من $\pm 2^{\circ}\text{C}$ [38].

الدراسة الثانية

قام Arici وآخرون بدراسة عددية أحادية البعد للتقصي أثر استعمال مادة متغيرة الطور (MCP) ومادة مستقرة الطور (MSP) مع تغيير سمك وموقع هاتين المادتين في بناء على التوزيع الحراري داخله الذي قد ينشأ في ثلاثة مقاطعات مختلفة المناخ في تركيا. المؤلفون استنتجوا أن استعمال مواد متغيرة الطور (MCP) أنجع من استعمال مواد مستقرة الطور (MSP). كذلك السمك الأفضل يكون بين 1 و20 مم واختلاف درجة انصهاره من 6 إلى 34 درجة مئوية خلال فترات مختلفة من السنة [36].

الدراسة الثالثة

لقد قام كل من Farid و Chen بالبحث في دمج طبقة المواد متغيرة الطور كطبقة فعالة في نظام تدفئة أرضية كهربائية لمنزل. واقترحوا مجموعة من البارامترات التصميمية لطبقة المواد متغيرة الطور لتخزين الطاقة الحرارية بشكل فعال وكانت المادة متغيرة الطور هي شمع البارافين ذو درجة حرارة تحول طوري 40°C . وقد استنتجوا أنه بتخزين الطاقة الحرارية في شمع البارافين يمكن نقل حوالي $7.2\text{MJ}/\text{m}^2\text{day}$ من الكهرباء اللازمة لنظام التدفئة هذا إلى الفترة خارج أوقات الذروة [37].

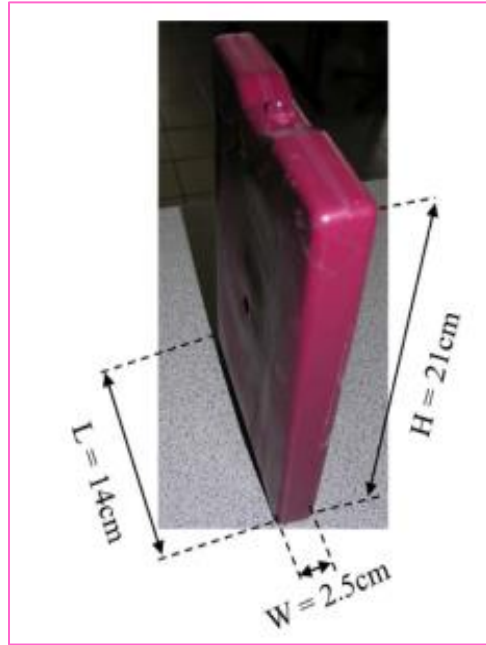
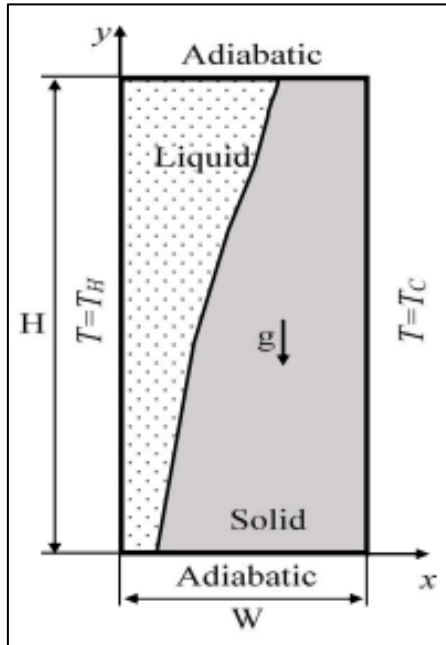
الفصل الثالث: الدراسات المكتبية

الدراسة الرابعة

صممت الباحثة Ahmed وآخرون تجربة لتقييم الاستجابة الحرارية لألواح المواد متغيرة الطور عند تعرضها لإجهاد حراري. والعمل التجريبي تم على ثلاثة نماذج من الألواح تحوي مباشرة المواد متغيرة الطور هي ألواح من البولي كربونات مملوءة بحبيبات البارافين، ألواح من البولي كربونات مملوءة بمادة البولي إيثيلين غليكول (PEG) وألواح من PVC مملوءة بمادة PEG. وقد توصلت في هذا البحث إلى أن أعلى سعة تخزين يمكن تأمينها باستخدام ألواح ذات سماكة أقل من 5 cm [39].

الدراسة الخامسة

قام يونسى (Younsi) وناجي (Naji) بدراسة عددية مستعملا طريقة الأنتالبي لدراسة أثر أبعاد حاوية مملوءة بمادة MCP. المحاكاة العددية قد تم مقارنتها مع نتائج تجريبية سابقة. أظهرت النتائج العددية أن أحسن توزيع حراري داخل MCP يكون مع النسبة البعدية 0.19 (الارتفاع $H=21$ cm والعرض $W=4$ cm). بتعبير آخر هذه النسبة البعدية وافقت أكبر قيمة لعدد رايلى Ra (شدة الحمل الطبيعي) [35].



الشكل III.1. حاوية الـ MCP (يمينا) والشروط الحدية لدراسة قام بها يونسى وناجي (يسارا). [35]

الدراسة السادسة

كما قامت الباحثة Ahmed بإجراء دراسة ثانية أجرت فيها مزاججة بين طبقة من المواد متغيرة الطور PEG مع ألواح فائقة العزل و تم وضعها كجدران في خلية تجريبية مكعبة. ولتقييم السماكة المثلى لطبقة المادة متغيرة الطور تم استخدام برنامج ترانسييس. وقد توصلت إلى نتيجة مفادها أن زيادة سماكة طبقة المادة متغيرة الطور أكثر من 20 mm يؤثر على درجة حرارة الخلية التجريبية. وهذه السماكة تتعلق فقط بالمادة التي تم إجراء الاختبار عليها ولا تشمل المواد متغيرة الطور الأخرى المتوفرة في السوق المحلية [39].

الدراسة السابعة

قام بوزنادة وآخرون باقتراح دالة جيبية (sin) لتغيرات التدفق الحراري (ثنائي البعد) خلال اليوم. قد تمكن المؤلفون من مقارنة نتائج درجة حرارة في MCP وفق الدالة الجيبية مع نتائج توزيع درجات الحرارة عند تطبيق تدفق حراري ثابت يكون موجب في فترة معينة و بعدها يصبح سالب. أين أخذ بعين

الإعتبار الحمل الحراري (تقريب Boussinesq). قد قام المؤلفون بإستعمال برنامج Comsol Multiphysics.

الدراسة الثامنة

قام Zivkovic و Fuji بمقارنة عددية أحادية البعد لإظهار توزيع الحرارة داخل MCP معتمدا على نموذج الأنتالبي ومعادلة الطاقة فقط. التحليل العددي أجريا في حاويتين مختلفتي الشكل (حاوية مستطيلة و أخرى أسطوانية) بحيث قارنا توزيع الحرارة في هذين الشكلين. تم مراقبة النموذج النظري مع التجربة المنجزة للتأكد من فرضياته ،أين وجد توافق بين التجربة ومعطيات الحساب. حيث إستنتج خلال التوصيل الحراري في MCP في إتجاه الجريان المائع الحراري بأن المقاومة الحرارية لجدار الحاوية وتأثير الحمل الحراري الطبيعي في الكتلة الذائبة قد أهمل. النتائج تبين أن الحاوية المستطيلة تتطلب ما يقارب من نصف وقت الإنصهار كما للحاوية الأسطوانية من نفس الحجم ونفس مساحة الإنتقال الحراري.

الفصل الثالث: الدراسات المكتبية

الدراسة التاسعة

قام الباحث Zhou وآخرون بإجراء مقارنة بين طبقة من مادة متغيرة الطور MCP Shaped stabilized مع ألواح من الجيبسوم بورد المشرب بالمواد متغير الطور. و قد تم تركيب هذه الطبقة على كامل جدران غرفة باستثناء السقف. وكانت الطبقة بسماكة 30mm. و قد وجد أن درجة الحرارة المثلى هي درجة الحرارة الوسطية الداخلية للغرفة، (و التي كانت خلال العمل التجريبي مساوية ل 21°C) ووجدوا أيضاً أن المادة متغيرة الطور ذات مجال التحول الطوري الضيق في الأكثر كفاءة لناحية تقليل تقلبات درجة الحرارة الداخلية. وقد أثر وجود كل من ألواح الجيبسوم بورد المشرب بالمواد متغيرة الطور و ألواح المواد shaped stabilized على درجة الحرارة العظمى بنسبة 46% و 56% على الترتيب [40].

الدراسة العاشرة

قام Ekrem وآخرون بدراسة عددية ثنائية البعد لمعرفة التوزيع الحراري داخل المبنى في منطقة مرمرة بتركيا . وذلك بإستعمال أجر مملوء بمادة متغيرة الطور MCP . نتائج هذه الدراسة إقترحت أن دمج MCP ذو درجة الحرارة المثلى لذوبان داخل أجر تتغير من موسم إلى آخر في مجال (18°C ، 26°C). أثر كبير للحرارة الكامنة قد لوحظ في موسم الصيف مسببا طلب كبير لطاقة التبريد. بعد ذلك أجريت دراسة تحليلية لتحديد درجة الذوبان المثلى التي كانت 18°C مع دمج MCP في أجر. الحمل الحراري السنوي انخفض بنسبة 13.2 و 17.6 بسبب إستعمال الحرارة الكامنة من MCP. النتائج المتحصل عليها إقترحت أن إستعمال مواد متغيرة الطور داخل أجر يمكنه تقليل بشكل كبير إحتياجات (المصاريف) التبريد والتسخين للمبنى في كل فصل خلال السنة وتوفير الراحة الحرارية .

الفصل الرابع

النمذجة الرياضية والحل العددي

1.IV. المقدمة

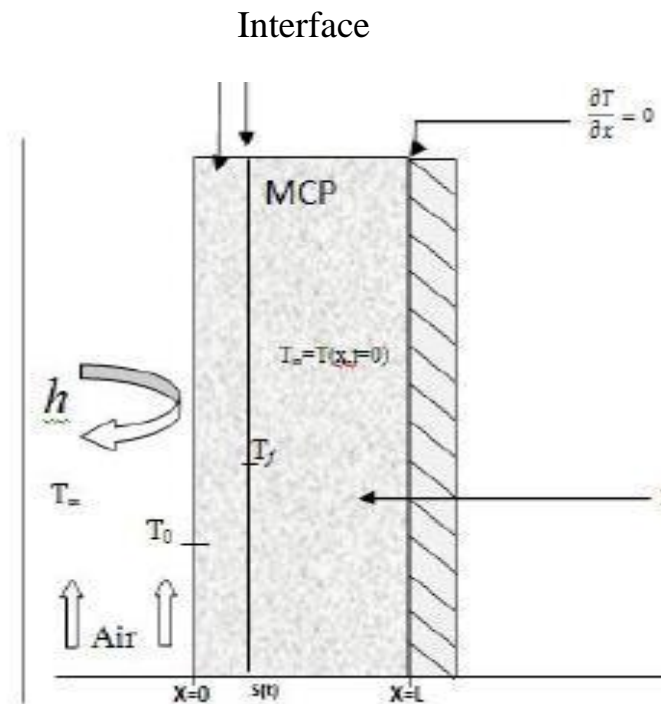
يتم في هذا البحث إجراء دراسة رياضية تحليلية لألواح المواد متغيرة الطور (MCP) بالإعتماد على محاكاة السلوك الحراري، لها حيث تم تحديد المعادلات الناظمة لعملية انتقال الحرارة ضمن الألواح عند تغير حالتها الطورية (سائل- صلب). تم تشكيل النموذج الرياضي اللازم، بإستخدام برنامج الفورتران (Fortran) بطريقة الحجم المنتهية (مخطط ضمني).

2.IV. وصف المشكلة

1.2.IV. النموذج الفيزيائي

تعتمد دراستنا على الهندسة المدروسة التالية وهي عبارة عن جدار يتكون من طبقتين خراسانيتين حيث يتم وضع MCP المختارة بين الطبقتين (الوجه الداخلي). في هذه الهندسة، نضع في الإعتبار ظاهرة الحمل الحراري على الطرف الخارجي، والكظيمي على الطرف الداخلي والناقل الذي يمر عبر الجدار.

يتم عرض الأبعاد الهندسية للمشكلة المطروحة في الشكل (1.IV).



الشكل: 1.IV النموذج الفيزيائي

2.2.IV. الفرضيات المختصرة

لمحاكاة السلوك الحراري للوح المادة متغيرة الطور تم اعتماد الفرضيات التالية:

- ☞ عملية انتقال الحرارة أحادية البعد يتم انتقال الحرارة ضمن طبقة المادة متغيرة الطور بالتوصيل الحراري و يهمل الحمل الحراري في منطقة الطور السائل.
- ☞ سعة حرارية ثابتة و متساوية لمادة متغيرة الطور في منطقة الطور الصلب و في منطقة الطور السائل وتابعة لدرجة الحرارة في منطقة التحول الطوري
- ☞ كثافة ثابتة لمادة متغيرة الطور.
- ☞ إهمال انتقال الحرارة بالإشعاع.

3.2.IV. الخواص الفيز وحرارية

إن MCP المستخدم هو n-Octadecane الذي يتم عرض خصائصه الفيزيائية في الجدول الآتي (1.IV).

الجدول 1.IV : الخصائص الفيز وحرارية n-Octadecane

| | | | |
|-------|-------------|-----------------------|---------------------------|
| 0.358 | λ_s | (w/m k) | الناقلية الحرارية الصلبة |
| 0.148 | λ_l | (w/m k) | الناقلية الحرارية السائلة |
| 302 | T_{int} | (k) | درجة الحرارة الابتدائية |
| 300 | T_f | (k) | درجة حرارة الانصهار |
| 297 | T_{ex} | (k) | درجة حرارة الخارجية |
| 243.5 | L_f | (kj/kg) | الحرارة الكامنة للانصهار |
| 25 | h_{ex} | (m ² w/.c) | معامل التبادل الحراري |
| 865 | ρ | (kg/m ³) | الكتلة الحجمية |
| 2 | C_p | (kj/kg. k) | السعة الحرارية |

3.IV. وصف تغير الحالة مع طريقة الأنتالبي

1.3.IV. طريقة الأنتالبي

في هذه الطريقة و خلال عملية التحول الطوري تعامل المادة ضمن ثلاثة مناطق منفصلة هي منطقة الطور الصلب، منطقة الطور السائل، المنطقة المختلطة (mushy zone). إن المنطقة المختلطة في منطقة انتقالية بين الطورين الصلب والسائل فيها يتواجد كلا الطورين بنفس الوقت. و تعامل المعادلة الرياضية في حالة الأنتالبي كمتغير وقيمتها هي نفسها لكلا الطورين ، و يتم إستبدال السطح الفاصل المفرد و يعامل كمجموعة مختلطة بين الطورين. إن المنطقة المختلطة ومعدل التغير في الحجم و السماكة تابع لعملية (امتصاص/تحرير) الطاقة الكامنة . و تكون معادلة توازن الطاقة:

$$\frac{\partial H(T)}{\partial t} = \bar{V}(\lambda \bar{\nabla} T)$$

2.3.IV. النموذج الرياضي

تنتهي عملية تغيير الطور إلى فئة ما يسمى بمشكلة الحدود المنقولة، ويتكون الحل المطلوب من تحديد بمرور وقت مجال درجة الحرارة في المرحلتين الصلبة والسائلة، بالإضافة إلى موقع السطح البيني.

حسب هذه الفرضيات المعطاة سابقاً، نستطيع أن نقول بأن المشكلة هي مشكلة توصيل حراري بحت، إذن معادلة الانتقال الحراري أحادية البعد تكتب كالتالي:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho C_p} \text{ حيث}$$

❖ الطاقة المحملة (الأنتالبي) تكتب على الشكل :

✓ حالة بدون تغير الطور

$$H = \int_{T_{ref}}^T \rho C_p dT$$

الفصل الرابع: النمذجة الرياضية والحل العددي

$$H = \rho C_p (T - T_{ref}) \quad \text{بعد التكامل تصبح}$$

إن العلاقة بين الطاقة المحملة (الأنثالي) (H) ودرجة الحرارة (T):

$$T = \frac{H}{\rho C_p} + T_f \quad (2)$$

حيث:

T_{ref} : درجة الحرارة المرجعية التي تأخذ كالدرجة ذوبان ρC_p

بعد اشتقاق المعادلة (2):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\rho C_p} \frac{\partial H}{\partial t} \quad (3)$$

بالتعويض المعادلة (3) في المعادلة (1) نجد:

$$\frac{1}{\rho C_p} \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

إن:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (4)$$

✓ حالة تغير الطور

$$H = \int_{T_f}^T \rho C_p dT + \rho L_f \quad (5)$$

بمكاملة المعادلة (5):

$$H = \rho C_p (T - T_f) + \rho L_f \quad (6)$$

الفصل الرابع: النمذجة الرياضية والحل العددي

إذن العلاقة بين درجة الحرارة (T) والطاقة المحملة (الأنتالبي) (H):

$$T = T_f + \frac{H - \rho L_f}{\rho C_p} \quad (7)$$

إذن يمكن كتابة درجة حرارة MCP ل (T)

$$T = \begin{cases} T_f + \frac{H}{\rho C_{ps}} & H \leq 0 \text{ (phase solide)} \\ T_f & 0 < H < \rho L_f \text{ (Interface)} \\ T_f + \frac{H - \rho L_f}{\rho C_{pl}} & H \geq \rho L_f \text{ (phase liquide)} \end{cases}$$

❖ من اجل تفادي ظهور معاملات درجات الحرارة فالمعادلات نضع:

$$T = H + H' \quad (8)$$

حيث يمكن كتابة درجة حرارة MCP ل (T) في هاته الحالة على الشكل

$$T = \begin{cases} H & H \leq 0 \text{ (phase solide)} \\ 0 & 0 < H < 1 \text{ (Interface)} \\ H - 1 & H \geq 1 \text{ (phase liquide)} \end{cases}$$

من جهة أخرى المقاومة الحرارية المكافئة:

$$R_{eq} = R_l + R_s$$

$$\frac{e}{\lambda_s} = \frac{e_l}{\lambda_l s} + \frac{e_s}{\lambda_s s} \quad (9) \quad \text{إذن :}$$

بضرب المعادلة (8) في $\frac{s}{e}$

$$\frac{es}{\lambda_s} = \frac{e_l s}{\lambda_l s e} + \frac{e_s s}{\lambda_s s e}$$

حيث :

الفصل الرابع: النمذجة الرياضية والحل العددي

$$e \times s = V = V_l + V_s$$

$$V_s = e_s \times s \quad ; \quad V_l = e_l \times s \quad \text{و}$$

$$\frac{V_l}{V} = f_l (\text{الكسر السائل}) \quad / \quad f_s = 1 - f_l$$

إذن نكتب المعادلة (9)

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{f_l}{\lambda_l} + \frac{1 - f_l}{\lambda_s}$$

$$\lambda = \frac{\lambda_s \lambda_l}{\lambda_s f_l + \lambda_l (1 - f_l)} \quad (10) \quad \text{إذن :}$$

توضح لنا هذه المعادلة الناقلية الحرارية حسب هيكل السطح البيني (الكسر السائل f)

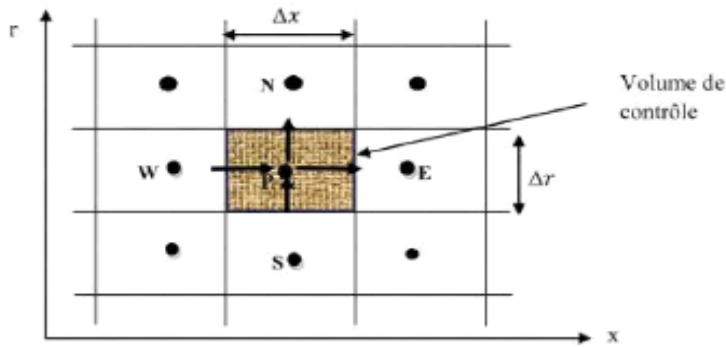
$$f = \begin{cases} 0 & H \leq 0 \quad (\text{solide}) \\ \frac{H}{\rho L_f} & 0 < H < \rho L_f \quad (\text{Interface}) \\ 1 & H \geq \rho L_f \quad (\text{liquide}) \end{cases}$$

4.IV. الحل الرقمي للمعادلة التفاضلية

لحل هذه المعادلة التفاضلية اخترنا طريقة عددية للحجوم المنتهية ، بإستعمال مخطط ضمني.

يمكن تلخيص مراحل حل المعادلة التفاضلية في الهيكل التنظيمي الآتي :

- تقطيع المجال
 - تقطيع المعادلة التفاضلية
 - تقطيع الشروط الحدية
 - الحل العددي
- ✓ المعادلة التفاضلية للظاهرة



$$\int_w^e \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial H}{\partial t} dt A \rho dx = \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) A \rho dx dt \quad (11)$$

$$\int_w^e \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial H}{\partial t} dt A \rho dx = \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial(H + H')}{\partial x} \right) A \rho dx dt \quad (11)$$

$$= \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \rho \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) A dx dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial H'}{\partial x} \right) A \rho dx dt$$

مكاملة الحد الأول (I)

$$\int_w^e \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial H}{\partial t} dt A \rho dx = (H_p - H_{p^0}) A C \rho \Delta x$$

مكاملة الحد الثاني (II)

$$II = \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) A dx dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial H'}{\partial x} \right) A dx dt$$

$$\begin{aligned} &= \int_t^{t+\Delta t} \frac{\lambda_e A_e}{\delta x_e} H_E dt + \int_t^{t+\Delta t} \frac{\lambda_w A_w}{\delta x_w} H_W dt - \int_t^{t+\Delta t} \left(\frac{\lambda_e A_e}{\delta x_e} H_E + \frac{\lambda_w A_w}{\delta x_w} H_W \right) H_p dt \\ &\quad + \int_t^{t+\Delta t} \frac{\lambda_e A_e}{\delta x_e} H'_E dt + \int_t^{t+\Delta t} \frac{\lambda_w A_w}{\delta x_w} H'_W dt - \int_t^{t+\Delta t} \left(\frac{\lambda_e A_e}{\delta x_e} H'_E \right. \\ &\quad \left. + \frac{\lambda_w A_w}{\delta x_w} H'_W \right) H'_p dt \end{aligned}$$

الفصل الرابع: النمذجة الرياضية والحل العددي

باستعمال المخطط الضمني (F=1)

لدينا:

$$\int_t^{t+\Delta t} H_p dt = ((1 - F)H_{p^0} + FH_p)\Delta t$$

إذن تصبح المعادلة كالآتي :

$$\begin{aligned} \Pi = \Delta t \left(\frac{\lambda_e A_e}{\delta x_e} H_E + \frac{\lambda_w A_w}{\delta x_w} H_W - \left(\frac{\lambda_e A_e}{\delta x_e} + \frac{\lambda_w A_w}{\delta x_w} \right) H_p \right) \\ + \Delta t \left(\frac{\lambda_e A_e}{\delta x_e} H'_E + \frac{\lambda_w A_w}{\delta x_w} H'_W - \left(\frac{\lambda_e A_e}{\delta x_e} + \frac{\lambda_w A_w}{\delta x_w} \right) H'_p \right) \end{aligned}$$

حيث $A = A_w = A_e$

بمساواة المعادلتين نجد:

$$\left(\frac{C\rho\Delta x}{\Delta t} + \frac{\lambda_e}{\delta x_e} + \frac{\lambda_w}{\delta x_w} \right) H_p = \frac{\lambda_e}{\delta x_e} H_E + \frac{\lambda_w}{\delta x_w} H_W + \frac{\lambda_e}{\delta x_e} H'_E + \frac{\lambda_w}{\delta x_w} H'_W - \frac{2\lambda}{\Delta x} H'_p + \frac{C\rho\Delta x}{\Delta t} H_{p^0} \quad (12)$$

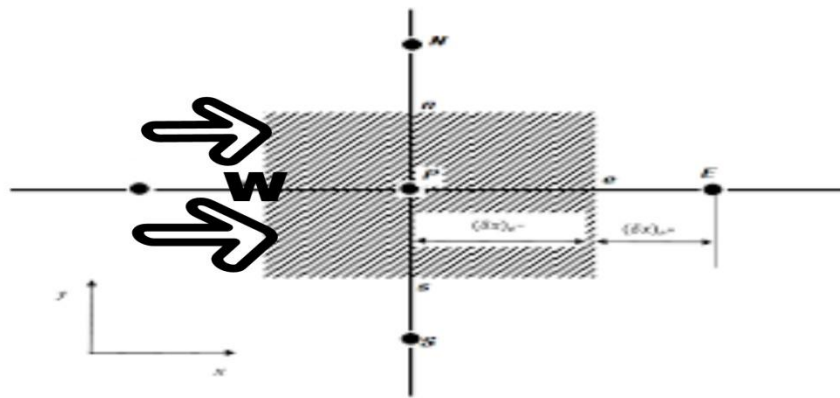
• جدول الحجم الداخلي

| a_E | a_W | a_{E^0} | a_{W^0} | a_{p^0} | a_p | S_p |
|--------------------------------|--------------------------------|-----------|-----------|----------------------------------|-----------------------------|-------|
| $\frac{\lambda_e}{\delta x_e}$ | $\frac{\lambda_w}{\delta x_w}$ | 0 | 0 | $\frac{C\rho\Delta x}{\Delta t}$ | $a_{p^0} + a_E + a_W - S_p$ | 0 |

| S_C | S_C' | S_C^0 |
|-------------------------|---|---------|
| $a_{p^0}H_{p^0} + S_C'$ | $a_E H'_E + a_W H'_W - ((a_E + a_W)/2)H'_p + S_C^0$ | 0 |

✓ الشروط الحدية
 • الحد الأيسر (حد كظيمي)

لدينا : $-\lambda \left(\frac{dT}{dx} \right)_{x=0} = 0$



مكاملة الحد الأول

$$\int_P^E \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial H}{\partial t} dt A dx = (H_p - H_{p^0}) C_p A \Delta x / 2$$

مكاملة الحد الثاني

$$\Pi = \int_t^{t+\Delta t} \int_P^E \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) A dx dt$$

الفصل الرابع: النمذجة الرياضية والحل العددي

$$\Pi = \int_t^{t+\Delta t} \int_P^e \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial(H + H')}{\partial x} \right) A dx dt$$

$$\Pi = \int_t^{t+\Delta t} \int_p^e \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) A dx dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_p^e \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial H'}{\partial x} \right) A dx dt$$

$$= \int_t^{t+\Delta t} A \frac{\lambda_e}{\delta x_e} H_E dt - \int_t^{t+\Delta t} A \frac{\lambda_e}{\delta x_e} H_P dt - \int_t^{t+\Delta t} A \frac{\lambda_e}{\delta x_e} H_P dt + \int_t^{t+\Delta t} A \frac{\lambda_e}{\delta x_e} H_e dt +$$

$$\int_t^{t+\Delta t} A \frac{\lambda_e}{\delta x_e} H'_E dt - \int_t^{t+\Delta t} A \frac{\lambda_e}{\delta x_e} H'_P dt - \int_t^{t+\Delta t} A \frac{\lambda_e}{\delta x_e} H'_P dt + \int_t^{t+\Delta t} A \frac{\lambda_e}{\delta x_e} H'_e dt \quad (*)$$

$$-\lambda \left(\frac{dT}{dx} \right)_{x=0} = 0 \quad \text{لدينا :}$$

$$-\frac{\lambda}{C} \left(\frac{d(H + H')}{dx} \right)_{x=0} = 0$$

$$H_e + H'_e = H_P + H'_P \quad (**) \quad \text{نجد}$$

باستعمال المخطط الضمني (F=1) وبتعويض (***) في (*) نجد:

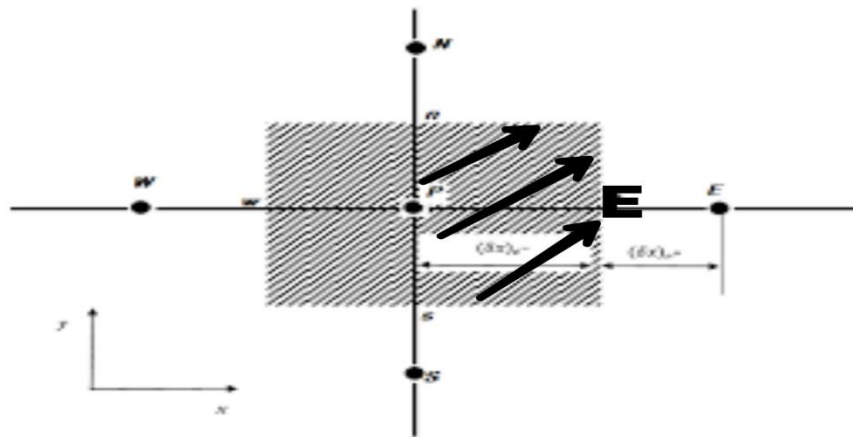
$$\left(\frac{C\rho\Delta x}{2\Delta t} + \frac{\lambda_e}{\delta x_e} \right) H_P = \frac{\lambda_e}{\delta x_e} H_E + \frac{\lambda_e}{\delta x_e} H'_E - \frac{\lambda_e}{\delta x_e} H'_P + \frac{C\rho\Delta x}{2\Delta t} H_{P0} \quad (13)$$

• الجدول الموافق للمعادلة التفاضلية المتقطعة

| a_E | a_W | a_{E0} | a_{W0} | a_{P0} | a_P | S_P |
|--------------------------------|-------|----------|----------|-----------------------------------|----------------------------|-------|
| $\frac{\lambda_e}{\delta x_e}$ | 0 | 0 | 0 | $\frac{C\rho\Delta x}{2\Delta t}$ | $a_{P0} + a_E + a_W - S_P$ | 0 |

| S_C | $S_{C'}$ | S_{C^0} |
|--------------------------|--|-----------|
| $a^0 p H_{p^0} + S_{C'}$ | $a_E H'_E + a_w H'_W - ((a_E + a_w)/2) H'_p + S_{C^0}$ | 0 |

• الشرط الحدي الأيمن (فوريي)



بالنسبة للحد الأول

$$\int_w^e \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial H}{\partial t} dt Adx = (H_p - H_{p^0}) AC \rho \Delta x / 2$$

بالنسبة للحد الثاني

$$\Pi = \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) Adx dt$$

$$\Pi = \int_t^{t+\Delta t} \int_P^e \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial (H + H')}{\partial x} \right) Adx dt$$

الفصل الرابع: النمذجة الرياضية والحل العددي

$$\Pi = \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) A dx dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial H'}{\partial x} \right) A dx dt$$

$$= \frac{2\lambda_p A_p}{\Delta x} H_p - \frac{2\lambda_p A_p}{\Delta x} H_w - \frac{\lambda_w A_w}{\delta x_w} H_p + \frac{\lambda_w A_w}{\delta x_w} H_w + \frac{2\lambda_p A_p}{\Delta x} H'_p - \frac{2\lambda_p A_p}{\Delta x} H'_w - \frac{\lambda_w A_w}{\delta x_w} H'_p + \frac{\lambda_w A_w}{\delta x_w} H'_w$$

$$(H_p - H_{p^0}) A C \rho \Delta x / 2$$

$$= \frac{2\lambda_p A_p}{\Delta x} H_p - \frac{2\lambda_p A_p}{\Delta x} H_w - \frac{\lambda_w A_w}{\delta x_w} H_p + \frac{\lambda_w A_w}{\delta x_w} H_w + \frac{2\lambda_p A_p}{\Delta x} H'_p - \frac{2\lambda_p A_p}{\Delta x} H'_w - \frac{\lambda_w A_w}{\delta x_w} H'_p + \frac{\lambda_w A_w}{\delta x_w} H'_w \quad (14)$$

نقسم المعادلة (14) على h_f

$$(H_p - H_{p^0}) \frac{A C \rho \Delta x}{2 h_f} = \frac{2\lambda_p A_p}{\Delta x h_f} H_p - \frac{2\lambda_p A_p}{\Delta x h_f} H_w - \frac{\lambda_w A_w}{\delta x_w h_f} H_p + \frac{\lambda_w A_w}{\delta x_w h_f} H_w + \frac{2\lambda_p A_p}{\Delta x h_f} H'_p - \frac{2\lambda_p A_p}{\Delta x h_f} H'_w - \frac{\lambda_w A_w}{\delta x_w h_f} H'_p + \frac{\lambda_w A_w}{\delta x_w h_f} H'_w \quad (14)$$

$$B_i = \frac{\delta x_i h_f}{\lambda_i} \text{ نضع:}$$

$$(H_p - H_{p^0}) \frac{A C \rho \Delta x}{2 h_f} = \frac{2A_p}{B_i} H_p - \frac{2A_p}{B_i} H_w - \frac{A_p}{B_i} H_p + \frac{A_p}{B_i} H_w + \frac{2A_p}{B_i} H'_p - \frac{2A_p}{B_i} H'_w - \frac{A_p}{B_i} H'_p + \frac{A_p}{B_i} H'_w \quad (14)$$

$$\frac{C \rho \Delta x}{2 h_f} H_p - \frac{1}{B_i} H_p = -\frac{2}{B_i} H_w + \frac{1}{B_i} H_w + \frac{1}{B_i} H'_p - \frac{2}{B_i} H'_w + \frac{1}{B_i} H'_w + \frac{C \rho \Delta x}{2 h_f} H_{p^0}$$

لدينا :

الفصل الرابع: النمذجة الرياضية والحل العددي

$$-\lambda_p \left(\frac{dT}{dx} \right)_p = h_f (T_p - T_f)$$

$$-\frac{\lambda}{C} \left(\frac{dH}{dx} \right)_p - \frac{\lambda}{C} \left(\frac{dH'}{dx} \right)_p = h_f \left(\frac{(H_p + H'_p)}{C} - T_f \right)$$

$$-\frac{\lambda}{C} \left(\frac{H_p - H_w}{\Delta x/2} \right) - \frac{\lambda}{C} \left(\frac{H'_p - H'_w}{\Delta x/2} \right) = h_f \left(\frac{(H_p + H'_p)}{C} - T_f \right)$$

نقسم على h_f

$$-\frac{2}{B_i} H_p + \frac{2}{B_i} H_w - \frac{2}{B_i} H'_p + \frac{2}{B_i} H'_w = ((H_p + H'_p) - C T_f)$$

$$-\frac{2}{B_i} H_w - \frac{2}{B_i} H'_w = \left(\frac{-2}{B_i} - 1 \right) H_p + \left(\frac{-2}{B_i} - 1 \right) H'_p + C T_f \quad (*)$$

نعوض (*) في المعادلة (14)

$$\begin{aligned} \frac{C\rho\Delta x}{2h_f} H_p - \frac{1}{B_i} H_p \\ = \frac{1}{B_i} H_w + \frac{1}{B_i} H'_p + \frac{1}{B_i} H'_w + \frac{C\rho\Delta x}{2h_f} H_{p^0} + \left(\frac{-2}{B_i} - 1 \right) H_p \\ + \left(\frac{-2}{B_i} - 1 \right) H'_p + C T_f \end{aligned}$$

$$\left(\frac{C\rho\Delta x}{2h_f} + \frac{1}{B_i} + 1 \right) H_p = \frac{1}{B_i} H_w + \frac{1}{B_i} H'_w + \frac{C\rho\Delta x}{2h_f} H_{p^0} - \left(\frac{1}{B_i} + 1 \right) H'_p + C T_f$$

باستعمال المخطط الضمني ($F=1$) نجد:

$$\left(\frac{C\rho\Delta x}{2h_f\Delta t} + \frac{1}{B_i} + 1 \right) H_p = \frac{1}{B_i} H_w + \frac{1}{B_i} H'_w - \left(\frac{1}{B_i} + 1 \right) H'_p + C T_f + \frac{C\rho\Delta x}{2h_f\Delta t} H_{p^0} \quad (15)$$

• الجدول الموافق للمعادلة التفاضلية المتقطعة

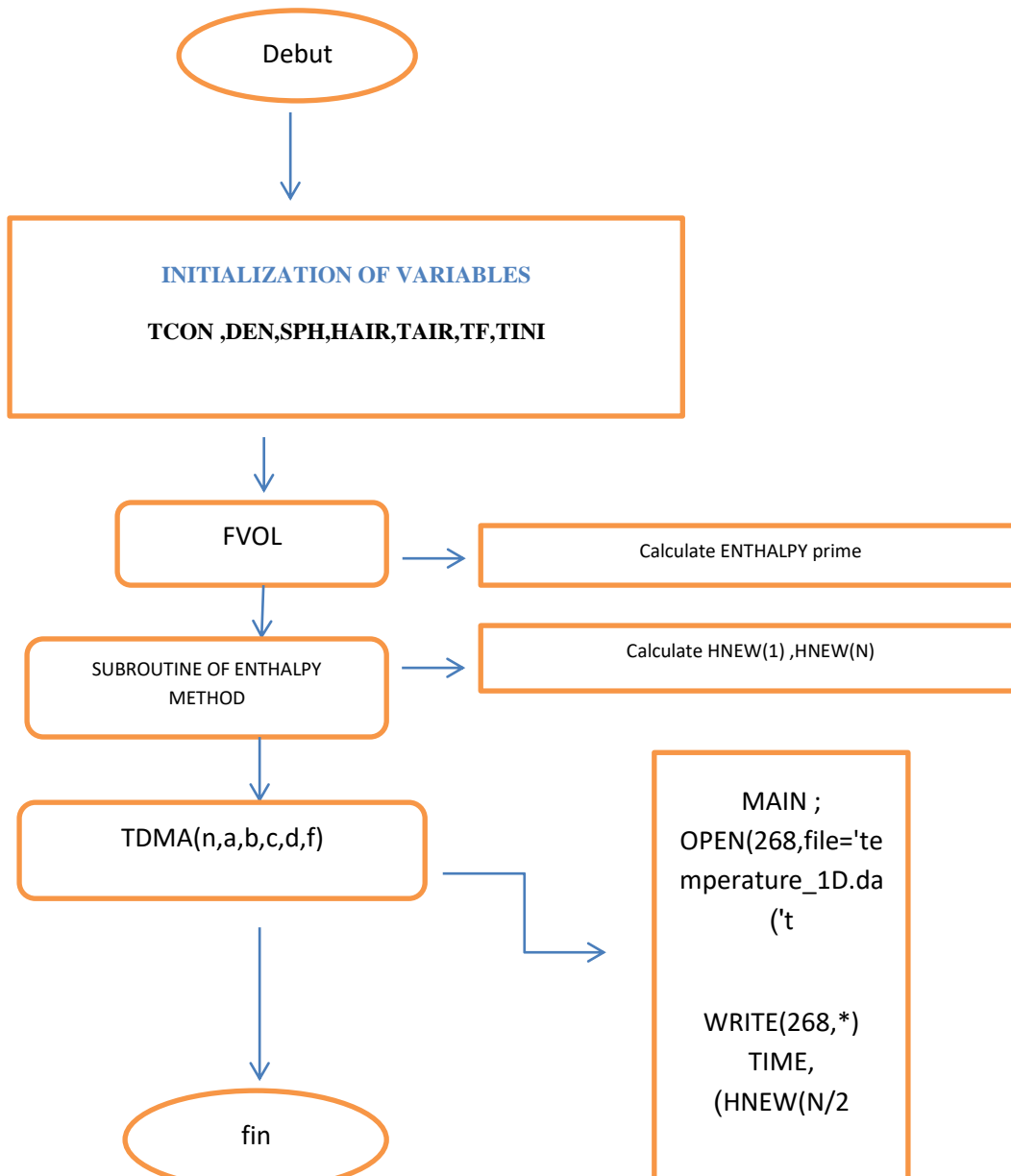
| a_E | a_W | a_{E^0} | a_{W^0} | a_{p^0} | a_p | S_p |
|-------|-----------------|-----------|-----------|--------------------------------------|-----------------------------|-------|
| 0 | $\frac{1}{B_i}$ | 0 | 0 | $\frac{C\rho\Delta x}{2h_f\Delta t}$ | $a_{p^0} + a_E + a_W - S_p$ | -1 |

| S_C | $S_{C'}$ | S_{C^0} |
|-------------------------|--|---------------|
| $a^0 p H_{p0} + S_{C'}$ | $a_E H'_E + a_W H'_W - ((a_E + a_W)/2) H'_p + S_{C^0}$ | $CT_f - H'_p$ |

5.IV. حل المشكلة بلغة الفورتران (Fortran)

لإجراء المحاكاة بهذه اللغة وبطريقة الحجوم المنتهية (مخطط ضمني)

ORGANIGRAMME DE PROGRAMME FORTRAN



الفصل الخامس

النتائج و التطبيقات

الفصل الخامس: النتائج والتعليقات

IIIV المقدمة

أصبح قطاع البناء مستهلك للطاقة بشكل كبير ، الكثير من هذا الاستهلاك يأتي من أنظمة التدفئة وتكييف الهواء.

يبدأ العمل في البحث عن تقنيات المساهمة للتنمية المستدامة. تحقيقا لهذه الغاية ، وبعض الدراسات ركزت على المواد التي تعمل على تنظيم أفضل لانتقال الحرارة في حجرات المبنى المختلفة: هذا هو الحال مواد تغيير الطور MCPs وهي مواد ذكية تعتمد على التطبيق لمبدأ فيزيائي بسيط ، يجب أن تتوافق درجة حرارة الراحة مع درجة حرارة انصهار MCP.

في هذه الدراسة العديدة نضع الافتراضات و الشروط التالية على حد علمنا:

- درجة الحرارة الأولية لـ $T = 29$ MCP درجة مئوية.

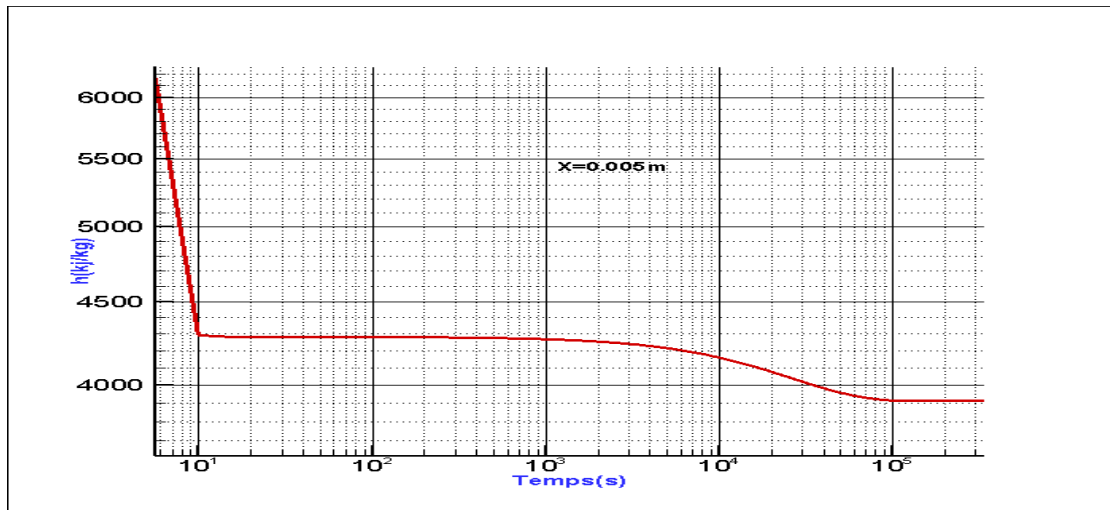
- درجة حرارة الهواء النقي: $T_{\infty} = 24$ درجة مئوية.

- معامل التبادل الحراري الخارجي المتوسط $h = 25 \text{ W / (m}^2 \text{ }^{\circ} \text{C)}$ MCP بناءً على

استخدام هذه الشروط ، وجدنا النتائج التالية.

يمثل الشكل 1.IIV توزيع الطاقة المحملة داخل الجدار بدلالة الزمن ومن أجل درجة حرارة ابتدائية $T_{INT}=313\text{K}$ وفي حالة سائلة لل MCP نلاحظ أن الطاقة الكامنة تنخفض بسرعة . حيث ان هذه الطريقة سمحت لنا بمتابعة تطور الطاقة المحملة عند تغيير الطور .

لكن خلال مرحلة التغيير في الطور نرى بأن درجة الحرارة تبقى ثابتة

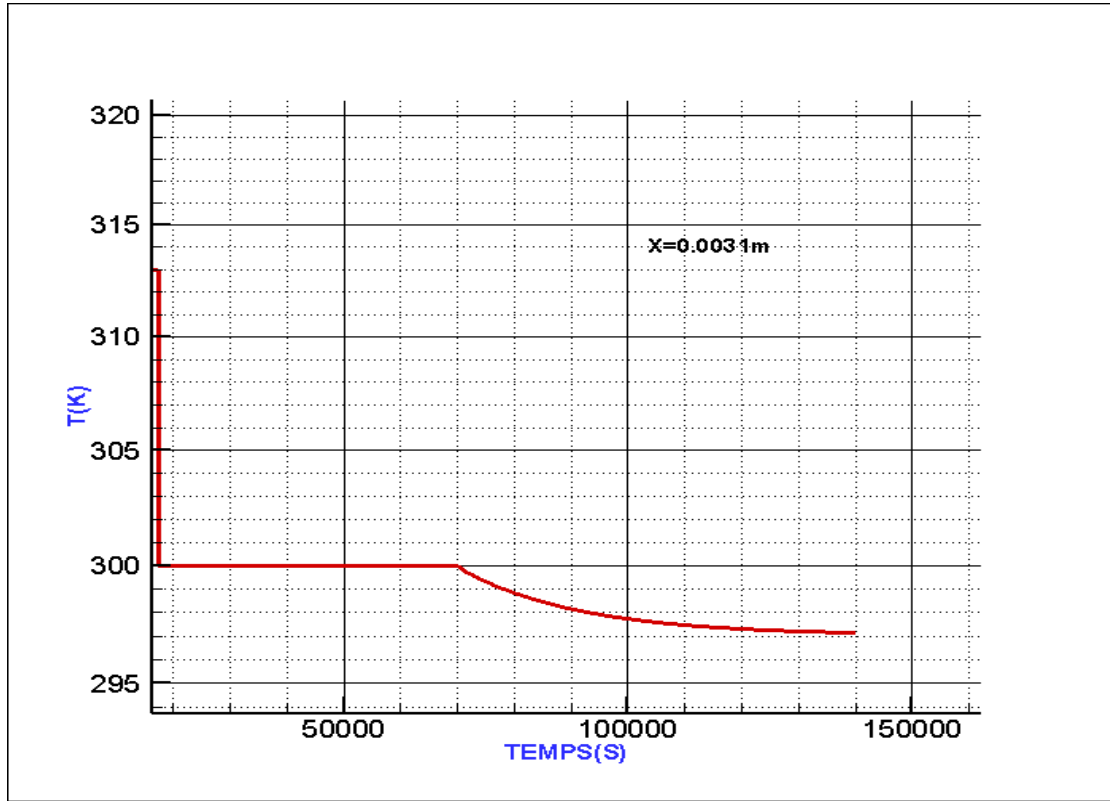


الشكل 1.IIV: توزيع الطاقة المحملة داخل الجدار بدلالة الزمن $x=0.005\text{m}$

الفصل الخامس: النتائج والتعليقات

ان تغيير درجة الحرارة بدلالة الزمن في الموضع $x=0.0031\text{ m}$ في كل لحظة نلاحظ منطقتين حراريتين . بحيث تكون الاولى أعلى من درجة التصلب او الذوبان ..اين يكون على شكل سائل , بينما في المنطقة الحرارية الثانية نلاحظ الطور الصلب لل MCP بحيث تكون درجة حرارته أقل من درجة التصلب لهذا ال MCP وهي $T=300\text{K}$

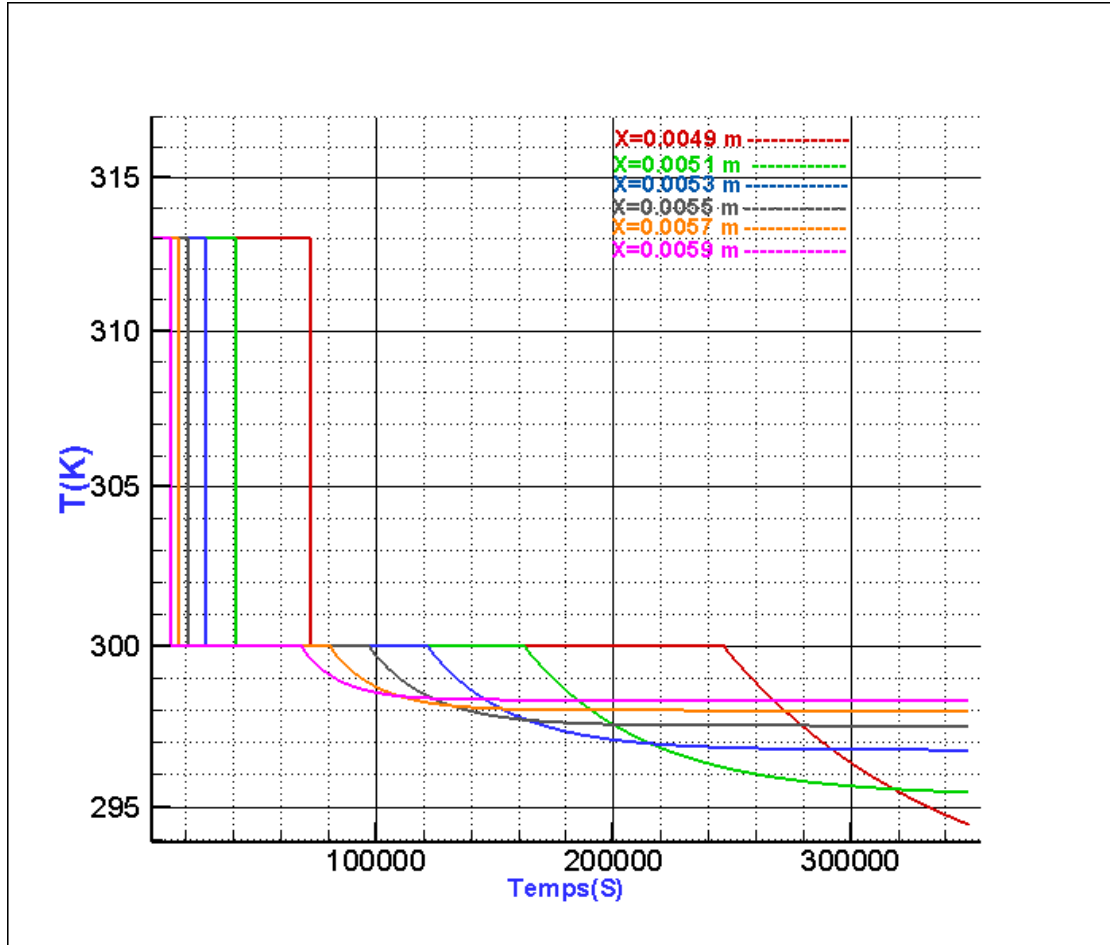
في ما يخص تغير الحرارة MCP عند الموضع $X=0.0031\text{m}$ نلاحظ بأن درجة الحرارة لل MCP تنخفض بسرعة حتى تصل الى درجة التصلب, بعد مدة زمنية استغرقت أقل من نصف يوم نلاحظ عملية التصلب الكلي



الشكل 2.IV: توزيع درجة الحرارة داخل الجدار بدلالة الزمن $x=0.0031\text{ m}$

الفصل الخامس: النتائج والتعليقات

قمنا بتمثيل توزيع درجات الحرارة لمواد متغيرة الطور (MCP) على عدة مواضع مختلفة من أجل درجة حرارة خارجية ابتدائية $T_{INT}=313K$ حيث يكون MCP في حالة سائلة، نلاحظ بأن درجة حرارة MCP تنخفض بسرعة حتى تصل إلى نقطة التجمد وهذا بعد فترة من الزمن أي نلاحظ تصلب كلي لمCP.



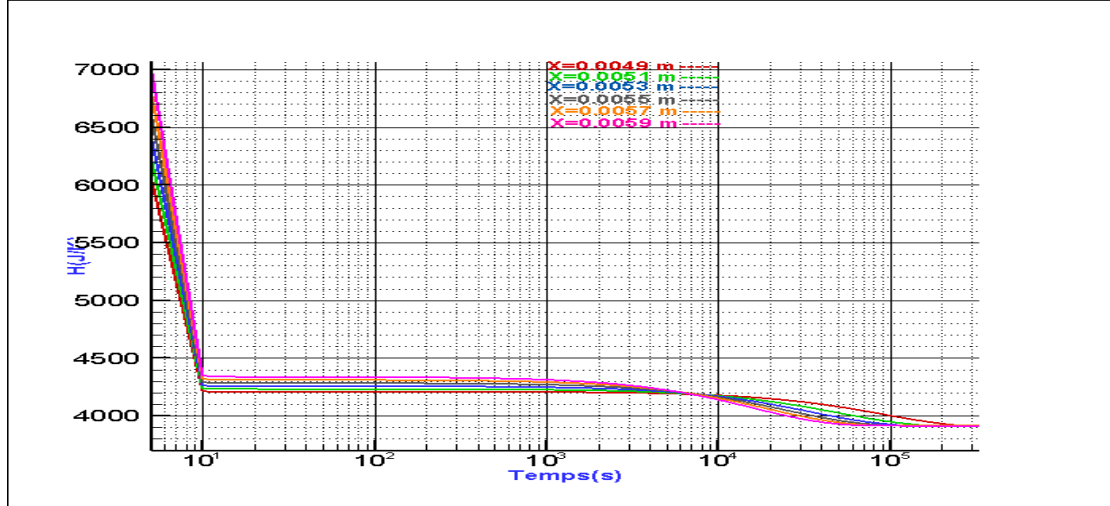
الشكل 3.IV: توزيع درجات الحرارة داخل جدار بدلالة الزمن في مواضع مختلفة

الفصل الخامس: النتائج والتعليقات

يمثل الشكل 4.IV التوزيع الغير الدائم للطاقة المحملة في عدة مواضع ومن أجل درجة حرارة ابتدائية $T_{INT}=313K$ نلاحظ أن الطاقة الكامنة تنخفض بسرعة

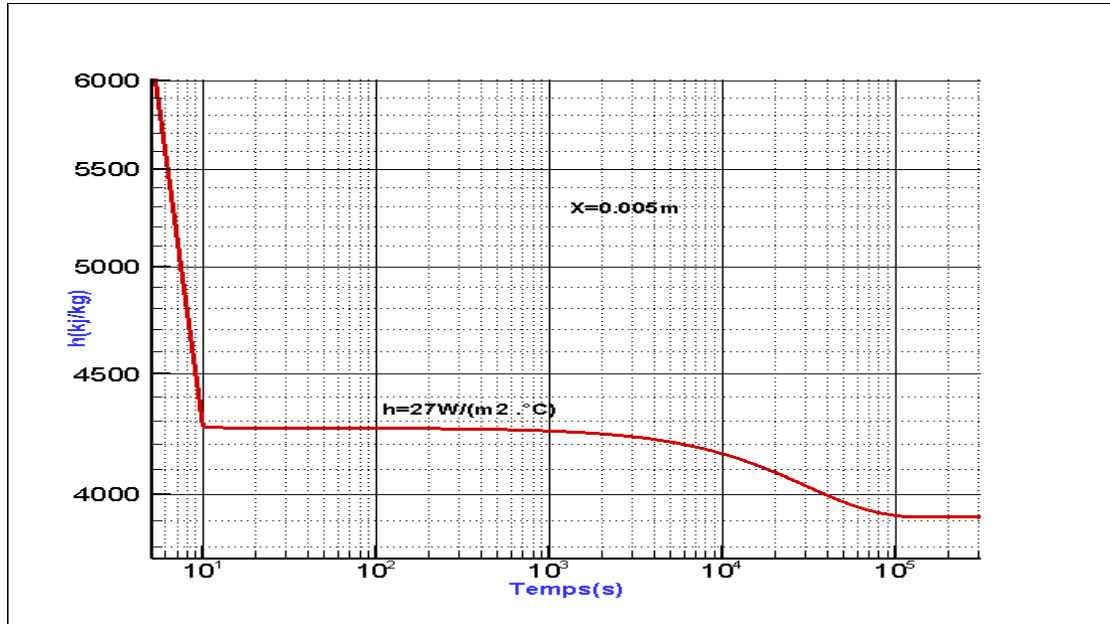
إن مواد متغيرة الطور تقوم بتحرير حرارة محسوسة (حالة سائلة)، ثم تقوم بتخزين طاقة كامنة (تغير في الحالة) بطريقة سريعة بالنسبة للحالة السائلة.

إن MCP يحرر الطاقة الكامنة إلى غاية التجمد الكلي .



الشكل 4.IV: توزيع الطاقة المحملة داخل جدار بدلالة الزمن في مواضع مختلفة

من خلال هذا الشكل 5.IV نلاحظ ان زيادة المعامل h تقلل من مدة عملية التصلب



5.IV الشكل تغيرات درجة الحرارة بدلالة الزمن مع $h=27W/(m^2 . °C)$

الفصل الخامس: النتائج والتعليقات

الاستنتاج

يمكن لهيكل المبنى (الجدران، الأسقف، الأرضيات، النوافذ) أن يخزن الطاقة الحرارية بشكل محسوس أو بشكل كامن . ويتم تخزين الطاقة الحرارية بشكل كامن باستخدام مواد متغيرة ذات درجة حرارة تحول طوري منخفضة تسمى مواد متغيرة الطور (MCP) من بين هذه المواد قمنا بنمذجة تصلب n-Octadecane حيث يعتمد النموذج الرياضي على طريقة المحتوى الحراري ويتم حلها بواسطة طريقة الحجم المنتهية مخطط ضمني.

للتحقق من صحة هذا العمل عن طريق المقارنة بين الحل الرقمي للنتائج الواردة في المؤلفات و بالأخص مؤلفة الطالب MOHAMMED TEGAR التي تحمل اسم Etude Numérique du Processus du Déstockage Thermique d'un Matériau à Changement de Phase (MCP) Intégré dans un

تظهر النتائج أن مدة التصلب لوحة MCP يتم تقييمها خلال ساعات قليلة وذلك إذا تم استخدام المصدر البارد الطبيعي (هواء الليل).

الختمة

الخاتمة

المواد متغيرة الطور MCP هي عبارة عن مواد تمتص كمية كبيرة من الطاقة الحرارية عند تغير الطور صلب/سائل وتقوم بتحريرها عند عملية التصلب.

لذلك 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 الناقلية الحرارية ضعيفة للمواد متغيرة الطور تعتبر من أهم الخواص التي تحد من استخدامها .

الهدف من هذه الدراسة هو إقتراح إختيار مواد ذات ناقلية كافية لكي تسمح بتحقيق التكييف خلال فصل الصيف والشتاء ولتُلغى استخدام الطاقة (الكهربائية أو الوقود) بإستخدام جدران حاوية على مواد متغيرة الطور.

المصادر

- 1 www.toppr.com بتاريخ 2019-11-8 من موقع: *Heat Transfer*
- 2 www.simscale.com بتاريخ 2019-11-8 من موقع: *What is Heat Transfer?*
- 3 www.brighthubengineering.com بتاريخ 2019-11-8 من موقع: *What is Heat Transfer? What is Conduction Heat transfer? What is Convection Heat Transfer? What is Radiation Heat Transfer?*
- 4 ANSI/ASHRAE Standard 55-2017, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy
- 5 [^] Çengel, Yunus A.; Boles, Michael A. (2015). *Thermodynamics: An Engineering Approach 8 (الطبعة 8)th*. New York, NY: McGraw-Hill Education. ISBN 978-0-07-339817-4.
- 6 [^] [AHDict قالب:](#)
- 7 [^] de Dear, Richard; Brager, Gail (1998). *"Developing an adaptive model of thermal comfort and preference"*. ASHRAE Transactions. 104 مؤرشف من الأصل في 10 يوليو 2018. (1): 67–145.
- 8 [^] Fanger, P Ole (1970). *Thermal Comfort: Analysis and applications in environmental engineering*. McGraw-Hill. [بحاجة لرقم الصفحة]
- 9 [^] Nicol, Fergus; Humphreys, Michael (2002). *"Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings"* (PDF). *Energy and Buildings*. 34 (6): 563–572. doi:10.1016/S0378-7788(02)00006-3. [وصلة مكسورة]

10^ EN 15251 Standard 2007, Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics

11^ Parsons, K C. "[Introduction to thermal comfort standards](#)" (PDF) .
في 17 أبريل 2018. اطلع عليه بتاريخ 01 ديسمبر 2013 (PDF) مؤرشف من الأصل

12^ Olesen, B; Parsons, K C (2002). "Introduction to thermal comfort standards and to the proposed new version of EN ISO 7730". *Energy and Buildings*. **34** (6): 537–548. doi:[10.1016/S0378-7788\(02\)00004-X](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00004-X).

[13] M. Frigione, M. Lettieri, and A. Sarcinella, 'Phase Change Materials for Energy Efficiency in Buildings and Their Use in Mortars', *Materials* (Basel)., vol. 12, no. 8, p. 1260, Apr. 2019.

[14] S. B. Sadineni, S. Madala, and R. F. Boehm, 'Passive building energy savings: A review of building envelope components', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*., vol. 15, no. 8, pp. 3617–3631, Oct. 2011.

[15] A. de Gracia and L. F. Cabeza, 'Phase change materials and thermal energy storage for buildings', *Energy and Buildings*., vol. 103, pp. 414–419, Sep. 2015.

[16] B. T. Office, 'Energy Savings Potential and Research, Development, & Demonstration Opportunities for Residential Building Heating, Ventilation, and Air Conditioning Systems', Technical Report, Navigant Consulting, Inc., Burlington, MA (United States), 2012.

[17] K. O. Lee, M. A. Medina, E. Raith, and X. Sun, 'Assessing the integration of a thin phase change material (PCM) layer in a residential building wall for heat transfer reduction and management', *Ap*

- [18] X. Kong, C. Yao, P. Jie, Y. Liu, C. Qi, and X. Rong, ‘Development and thermal performance of an expanded perlite-based phase change material wallboard for passive cooling in building’, *Energy and Buildings.*, vol. 152, pp. 547–557, Oct. 2017. *Applied Energy*, vol. 137, pp. 699–706, Jan. 2015.
- [19] T. K. Aldoss, ‘Maximizing the Usage of PCM Materials in Buildings’, in *ASME 2011 5th International Conference on Energy Sustainability, Parts A, B, and C*, 2011, pp. 7–11.
- [20] S. N. Al-Saadi and Z. (John) Zhai, ‘A new validated TRNSYS module for simulating latent heat storage walls’, *Energy and Buildings.*, vol. 109, pp. 274–290, Dec. 2015.
- [21] R. Fikry, ‘Application of phase change materials in residential buildings inner envelope’, M.Sc thesis, Cairo University, 2016.
- [22] S. Vazquez, S. M. Lukic, E. Galvan, L. G. Franquelo, and J. M. Carrasco, ‘Energy Storage Systems for Transport and Grid Applications’, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 12, pp. 3881–3895, Dec. 2010.
- [23] K. Pielichowska and K. Pielichowski, ‘Phase change materials for thermal energy storage’, *Progress in Materials Science.*, vol. 65, pp. 67–123, Aug. 2014.
- [24] Y. Sang, J. R. Zhao, J. Sun, B. Chen, and S. Liu, ‘Experimental investigation and EnergyPlus-based model prediction of thermal behavior of building containing phase change material’, *Journal of Building Engineering.*, vol. 12, pp. 259–266, Jul. 2017.
- [25] S. A. Memon, ‘Phase change materials integrated in building walls: A state of the art review’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews.*, vol. 31, pp. 870–906, Mar. 2014.

[26] 'Phase Change Energy Solutions: Leader in Efficient Building Materials'. [Online]. Available: <https://phasechange.com/>. [Accessed: 15-Aug-2019].

[27] R. D. Beltrán and J. Martínez-Gómez, 'Analysis of phase change materials (PCM) for building wallboards based on the effect of environment', *Journal of Building Engineering.*, vol. 24, p. 100726, Jul. 2019.

[28] A. Sari, C. Alkan, and C. Bilgin, 'Micro/nano encapsulation of some paraffin eutectic mixtures with poly(methyl methacrylate) shell: Preparation, characterization and latent heat thermal energy storage properties', *Applied Energy.*, vol. 136, pp. 217–227, Dec. 2014.

[29] L. F. Cabeza, A. Castell, C. Barreneche, A. de Gracia, and A. I. Fernández, 'Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews.*, vol. 15, no. 3, pp. 1675–1695, Apr. 2011.

[30] P. B. Salunkhe and J. K. D., 'Investigations on latent heat storage materials for solar water and space heating applications', *Journal of Energy Storage.*, vol. 12, pp. 243–260, Aug. 2017.

[31] Serge Blaise EKOMY ANGO. Contribution au stockage d'énergie thermique en bâtiment: développement d'un système actif à matériaux à changement de phase – A l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers – Bordeaux, 2011.

[32] Mahfoudi Nadjiba, " Stockage de la chaleur dans un milieu granuleux solide," , Thèse Pour l'obtention du diplôme de Doctorat, 2016. [21] Ghedamsi Rébha, " Elaboration d'un matériau de construction en vue de l'isolation thermique des bâtiments," , Mémoire Pour l'obtention du diplôme de Magister, 2013.

[33] CHAMBRE REGIONAL DE COMMERCE ET D'INDUSTRIE, DOSSIER DEDIGE PAR SALVATRICE BUFALINO BUFALINO@RHONE-ALPES.CCI.FR, 2008.

[34] [HTTP://IT.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/PARAFFINA](http://it.wikipedia.org/wiki/Paraffina) consulté le 21-05-2015.

- [35] A. Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen, D. Buddhi, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, *Renew. Sust. Energ. Rev.* 13 (2) (2009) 318–345.
- [36] J. Schröder, K. Gawron, Latent heat storage, *Int. J. Energy Res.* 5 (2) (1981) 103–109, <https://doi.org/10.1002/er.4440050202>.
- [37] Farid M.M., Chen X.D. (2010) Domestic electrical space heating with heat storage. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy* 213(A2):83-92.
- [38] Neeper D.A. (2009) Thermal dynamics of wallboard with latent heat storage. *Solar Energy* 68:393-403.
- [39] Ahmad M., Bontemps A., Sallée H., Quenard D. (2006) Experimental investigation and computer simulation of thermal behavior of wallboards containing a phase change material. *Energy and Buildings* 38:357-366.
- [40] Zhou G., Zhang Y., Wang X., Lin K., Xiao W. (2007) An assessment of mixed type PCM-gypsum and shape-stabilized PCM plates in a building for passive solar heating. *Solar Energy* 81:1351-1360.