الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي - تبسة

Mémoire

Présentée pour obtenir le diplôme de

Master

Spécialité : Energétique

Filière : Génie mécanique

Simulation Numérique de la convection naturelle dans un matériau à changement de phase

"المحاكاة العددية للحمل الحراري الطبيعي داخل مادة متغيرة الطور "

Présenté par :

BRAHMI Hadjer

Mémoire soutenue le 11 / 06 / 2025 devant le jury composé de

Président :	BOUZENNADA Tarek	MCB
Encadrant :	BELAZIZIA ABDENNACER	Professeur
Examinateur :	AMOR Abdellatif	MAB

Année universitaire :2024/2025

بسم الله الرحمان الرحيم

شكر وتقدير

أولاً وقبل كل شيء، أحمد الله العلي القدير الذي منحني القوة والإرادة لإنجاز هذا العمل وإتمامه بنجاح.

كما أتقدم بأسمى عبارات الشكر والتقدير والامتنان إلى الأستاذ عبد الناصر بلعزيزية والأستاذة فاطمة الزهراء شلّوّق، على إشرافهما الكريم على هذا العمل، وعلى دعمهما القيّم وتوجيهاتهما السديدة التي كان لها بالغ الأثر في إنجاز هذه المذكرة.

ولا يفوتني أن أتوجه بجزيل الشكر والعرفان إلى جميع أعضاء قسم الهندسة الميكانيكية، لما قدموه من دعم ومساندة.

كما أتقدّم بخالص الشكر والامتنان إلى جميع الأساتذة الذين كان لهم الفضل في تكويني العلمي، والذين تشرفت بالتعلّم على أيديهم طيلة سنوات دراستي.

الإهـداء

أهدي هذا العمل المتواضع:

إلى أعظم أب، وإلى أمي الغالية، مصدر فخري وسعادتي، اللذين لم يتوقفا يومًا عن دعمي ومساندتي بمحبة واهتمام لا يُقدّران بثمن، فكانا النور الذي أنار طريقي، والدافع الأكبر وراء كل خطوة نجاح. أسأل الله أن يحفظكما، وأن يرزقني التوفيق الدائم لأكون سببًا في سعادتكما وموضع فخرٍ لكما.

إلى عائلتي العزيزة، التي كانت دائمًا الحضن الدافئ والداعم في كل مراحل حياتي.

إلى جميع صديقاتي وأصدقائي الذين شاركوني هذه الرحلة بكل محبة وصدق.

وإلى كل من قدّم لي يد المساعدة أو كلمة تشجيع، وكان حاضرًا في حياتي سواء بقربه أو بدعمه عن بُعد، أقدّم لكم خالص الشكر والامتنان، فلولاكم لما اكتمل هذا المشوار.

واخص بالشكر رفيق الدرب.

الفهرس

شكر وتقدير
الإهداء
الفهرس
مقدمة عامة
الفصل الأول: مفاهيم عامة حول المواد متغيرة الطور وطرق انتقال الحرارة..... 1
I.1 المقدمة : 2
I.2 تخزين الطاقة الحرارية :..... 2
I.2.1 التخزين بواسطة الحرارة الحسّية :..... 2
I.2.2 التخزين بواسطة الحرارة الكامنة: 3
I.2.3 التخزين باستخدام المواد ذات التغير الطوري(MCP) : 5
I.3 مفاهيم حول انتقال الحرارة : 6
I.3.1 . التوصيل الحراري :..... 6
I.3.2 الحمل الحراري: 6
I.3.3 الإشعاع الحراري : 7
I.4 تعريف مواد تغيير الطورMCP:..... 8
I.5 مبدأ عمل مواد تغيير الطور(MCP):..... 9
I.6 تصنيف مواد تغيير الطور()MCP :.....10
I.6.1 مواد تغيير الطور غير العضوية(inorganiques) : 10
I.6.2 مواد تغيير الطور العضوية(organiques) :.....11
I.6.3 مواد تغير الطور سهلة الانصهار (MCP Eutectiques): 12
I.7 اختيار مواد تغيير الطور(MCP) 13
I.8 مقارنة بين الأنواع المختلفة منMCP : 14
I.9 طرق التغليف :.....15
I.9.1 التغليف الكلي Macro (encapsulation) : 15
I.9.2 التغليف الدقيق (Micro encapsulation) :.....17
I.10 تطبيقات مواد تغيير الطور: 18
I.10.1 الغذائية المنتجات نقل : 18
I.10.2 التطبيقات الطبية :.....18

I.10.3 صناعة النسيج : 18
I.10.4 مواد تغيير الطور في الثلاجات المنزلية :..... 19
I.10.5 مواد تغيير الطور في تبريد المكونات الإلكترونية: 20
I.10.6.1 طرق استخدام مواد تغيير الطور في المباني: 21
الفصل الثاني: الدراسات المكتبية 23
الفصل الثالث: النمذجة الرياضية 29
III .1 المقدمة :..... 30
III.2 وصف المشكلة: 30
III.3 النموذج الفيزيائي :..... 30
III.4 الفرضيات :..... 31
III.5 وصف تغير الحالة مع طريقة الانتالبي: 32
III.5 .1 طريقة الانتالبي : 32
III . 6 معادلات الحفظ :..... 32
III.6 .1 حفظ الكتلة :..... 32
III.5 .2 حفظ كمية الحركة في اتجاه x :..... 33
III.7 النموذج العددي(*CFD*) : 35
الفصل الرابع: النتائج والتعليقات..... 38
IV1 .1.المقدمة :..... 39
IV.2. أبعاد التجويف: 39
IV .3. الشروط الحدية: 39
IV .6.تطور الكسر السائل بدلالة الزمن : 43
IV.8.التغير الأفقي لدرجة الحرارة داخل سمك الجدار 49
IV.9. تطور السرعة بدلالة سُمك التجويف :..... 53
الخلاصة العامة 57
قائمة المراجع..... 59

الملخص

الهدف الرئيسي من هذا البحث هو دراسة ظاهرة تغير الطور من الحالة الصلبة إلى الحالة السائلة (الذوبان) لمادة متغيرة الطور داخل تجويف مستطيل الشكل. تم استخدام مادة واحدة متغيرة الطور كوسط لتخزين الحرارة الكامنة. تم الحفاظ على الجدار الأيمن عند درجة حرارة عالية (ساخن)، والجدار الأيسر عند درجة حرارة منخفضة (بارد)، في حين اعتُبرت الأسطح العلوية والسفلية معزولة حراريًا. يعتمد النموذج الرياضي ثنائي الأبعاد المستخدم في هذه الدراسة على معادلات الاستمرارية، معادلات كمية الحركة و معادلة الطاقة على الشكل الانتالبي. تم استخدام برنامج FLUENT(الاصدار 6.3.26) لتنفيذ المحاكاة العددية وحل المعادلات الرياضية.

تم تقديم النتائج على شكل: تغير الحد الفاصل بين الطورين, توزع درجات الحرارة وخطوط التيار مع مرور الزمن. تم اخذ بعين الاعتبار كذلك منحنيات تغير درجات الحرارة و السرعة في ثلاثة مواضع أفقية على طول التجويف.

أظهرت النتائج أن الحمل الطبيعي الناتج عن فروق درجات الحرارة والكثافة يؤثر بشكل كبير على انتقال الحرارة وسرعة الذوبان داخل المادة. مع مرور الزمن يتغلب الحمل الطبيعي على انتقال الحرارة بالتوصيل مما يسرع من عملية الذوبان انطلاقا من الجهة العلوية الى غاية الجهة السفلية للتجويف.

الكلمات المفتاحية

الميكانيك الحسابية للموائع ,الحمل الطبيعي , تجويف مستطيل الشكل, مواد متغيرة الطور (MCP)

Résumé

L’objectif principal de cette recherche est d’étudier le phénomène de changement de phase solide-liquide (fusion) d’un matériau à changement de phase à l’intérieur d’une cavité rectangulaire. Un seul matériau à changement de phase a été utilisé comme milieu de stockage de chaleur latente. La paroi droite a été maintenue à une température élevée (chaude) et la paroi gauche à une température basse (froide), tandis que les parois supérieure et inférieure ont été considérées comme thermiquement isolées.

Le modèle mathématique bidimensionnel utilisé dans cette étude repose sur les équations de continuité, de quantité de mouvement pour simuler la convection naturelle, ainsi que l’équation de l’énergie sous sa forme enthalpique.

Le logiciel FLUENT (version 6.3.26) a été utilisé pour effectuer la simulation numérique et résoudre les équations mathématiques. Les résultats obtenus concernent l’évolution dans le temps : du front de fusion et de la fraction du liquide, des lignes isothermes et des lignes de courant. Les profils de température et de vitesse en trois positions horizontales le long de la cavité ont été également pris en considération.

Les résultats ont montré que la convection naturelle, résultant des différences de température et de densité, influence significativement le transfert de chaleur et la vitesse de fusion à l'intérieur du matériau. Avec le temps, la convection naturelle prédomine sur le transfert de chaleur par conduction, accélérant ainsi le processus de fusion depuis la partie supérieure de la cavité jusqu'à la partie inférieure.

Mots-clés :

Mécanique des Fluides Numérique (CFD), Convection Naturelle laminaire, Cavité Rectangulaire, Matériaux à Changement de Phase (MCP).

Abstract

The main objective of this research is to study the solid-liquid phase change (melting) phenomenon of a Phase Change Material (PCM) inside a rectangular cavity. A single PCM was used as the latent heat storage medium. The right wall was maintained at a high (hot) temperature, and the left wall at a low (cold) temperature, while the top and bottom walls were considered thermally insulated.The two-dimensional mathematical model used in this study is based on the continuity and momentum equations to simulate natural convection, as well as the energy equation in its enthalpy formulation.

FLUENT software (version 6.3.26) was utilized to perform the numerical simulation and solve the mathematical equations. The obtained results concern the temporal evolution of the: melting front, liquid fraction, isothermal lines, and streamlines. Temperature and velocity profiles at three horizontal positions along the cavity were also considered.

The results showed that natural convection, resulting from temperature and density differences, significantly influences heat transfer and the melting rate inside the material. Over time, natural convection predominates over heat transfer by conduction, thus accelerating the melting process from the upper part of the cavity down to the lower part.

Keywords:

Computational Fluid Dynamics (CFD)**,** Laminar Natural Convection**,** Rectangular Cavity**,** Phase Change Materials (PCM)**.**

قائمة الرموز و الاختصارات :

C_p : السعة الحرارية [kJ/kg.K] .

H : الانتالبي الكلية [J/kg] .

e:السمك [m] .

h: الارتفاع [m].

L_f: الحرارة الكامنة للانصهار[kJ/kg] .

L : الطول [m]

m:الكتلة [kg]

Q:كمية الطاقة الحرارية [J]

T_h: درجة الحرارة الساخنة [K]

T_c : درجة الحرارة الباردة [K]

T: درجة الحرارة [K]

T_s : درجة حرارة الحالة الصلبة [K]

T_f : درجة حرارة الانصهار [K]

T_l :درجة حرارة الحالة السائلة [K]

A_m : الثابت للمنطقة اللزجة

f_l : الكسر السائل

g : تسارع الجاذبية [m/s^2]

h_m :السماكة المتوسطة للطبقة السائلة كدالة للزمن [m]

h_s :الانتالبي الحساسة [J/kg]

λ :الناقلية الحرارية [w/mk]

α :الانتشارية الحرارية [m^2/ s]

u : السرعة على المحور x [m/ s]

v: السرعة على المحورy [m/ s]

ρ :الكتلة الحجمية $[kg/m^3]$

β : معامل التمدد الحراري$[1 / K]$

Φ : متغير عام يعتمد على الزمن او الموقع

ΔT :فرق درجة الحرارة $[K]$

t : متغير الزمن $[s]$

∂t : زيادة زمنية غير بعدية

∂T : فرق درجة الحرارة غيرالبعدي

∂y : طول غير بعدي لحجم التحكم في الاتجاهy

∂x : طول غير بعدي لحجم التحكم في الاتجاه x

f :الانصهار

s :الطور الصلب

l :الطور السائل

F :المائع

C_{col} : السعة الحرارية النوعية الكتلية في الحالة الصلبة $[J/kg. k]$

C_{liq} : السعة الحرارية النوعية الكتلية في الحالة السائلة $[J/kg. k]$

$H_{sol}(T_F)$: الإنتالبية الكتلية للمادة في الحالة الصلبة عند درجة الحرارة المتوازنة T_F $[J/kg]$

$H_{liq}(T_F)$:الإنتالبية الكتلية للمادة في الحالة السائلة عند درجة الحرارة المتوازنة T_F $[J/kg]$

$L_F(T_F)$: التغير في الإنتالبية أثناء تغير الطور $[J/kg]$

MCP : مواد متغيرة الطور

CFD : الميكانيك الحسابية للموائع

قائـــمة الاشكـــــــال

العنوان	الصفحة
الفصل الأول	
الشكل .I.1. مخطط انتقال الحرارة بالتوصيل.	**6**
الشكل .I.2. الية الحمل الحراري.	**7**
الشكل.I.3. انتقال الحرارة عن طريق الإشعاع.	**8**
الشكل .I. 4. بعض مواد تغيير الطور : أكياس كريات انابيب.	**9**
الشكل .I. 5. مبدا عمل مواد تغيير الطور .	**10**
الشكل.I.6. البرافين الخام، المغلفة، على شكل مسحوق أو حبيبات.	**12**
الشكل.I.7. صور للتغليف الكلي لأشكال هندسية متنوعة .	**16**
الشكل.I.8..أنواع الكبسولات الدقيقة	17
الشكل.I.9.تطبيقات نقل المنتجات الغذائية	18
الشكل .I.10. حاويات تحتوي على الدم و الأعضاء التي تحتوي على المواد متغيرة الطور (MCP)	**18**
الشكل .I.11. فعالية مواد تغيير الطور في النسيج	**19**
الشكل .I . 12.ثلاجة منزلية تحتوي على مادة تغيير الطور.	**20**
الشكل. I.13.مثال لمعالج تم تبريده بواسطة مادة تغيير الطور	**21**
الشكل.I. 14.مثال لاستخدام مادة تغيير الطور في المباني	**22**
الفصل الثالث	
الشكل.III.1. هندسة المسألة الفيزيائية.	**30**
الفصل الرابع	
الشكل IV.1: الشبكة الهندسية.	**39**
الشكلIV .2 : تطور حدود الطور الصلب والسائل مع مرور الزمن.	**42**
الشكل IV.3 : تغير نسبة السائل مع مرور الزمن .	**43**
الشكل IV.4 : التطور الزمني لخطوط تساوي درجة الحرارة وخطوط الانسياب.	**48**
الشكل IV.5 : التغير الأفقي لدرجة الحرارة داخل سمك الجدار بدلالة الزمن.	**51**
الشكلIV.6 : تطور السرعة بدلالة سُمك التجويف.	**54**

قائـــمة الجـــــــداول

العنوان	الصفحة
الفصل الأول	
الجدول .1.I.مقارنة بين مزايا وعيوب التغيرات المختلفة في الحالة.	**9**
الجدول.I. 2.قائمة ببعض المواد ذات الانصهار المشترك	**13**
الجدول.3.I. مزايا وعيوب الفئات المختلفة من (MCP).	**15**
الفصل الرابع	
الجدول .**IV.** 1. الخصائص الفيزيائية لمواد تغير الطور المحتارة لهذه الدراسة	*38*

مقدمة عامة

على مدى السنوات الأخيرة، وبالنظر إلى التطور والنمو في النشاط الصناعي، فإن الطلب على الراحة في الحياة اليومية أدى إلى زيادة استخدام الطاقة بأشكالها المختلفة، مثل النفط، الفحم، والغاز الطبيعي.

حالياً، ونظراً لنفاد هذه المصادر التقليدية للطاقة وتأثيرها السلبي على الإنسان والبيئة، أصبح من الضروري اللجوء إلى مصادر طاقة أخرى تكون أقل تلوثاً ومجانية.

ومن بين هذه المصادر، يمكن الاعتماد على الطاقات المتجددة مثل الطاقة الشمسية، طاقة الرياح، والطاقة الجوفية...

إن تغير الطور من الحالة الصلبة إلى الحالة السائلة لمادة نقية يتميز بالتحول عند درجة حرارة ثابتة من الطور السائل إلى الطور الصلب أو العكس. هذا التفاعل العكسي يصاحبه امتصاص للطاقة (في حالة الانصهار) أو تحرير لها (في حالة التجمّد).

لذلك، فإن التخزين الحراري عن طريق الحرارة الكامنة في السوائل أو المواد الصلبة يُعد وسيلة جدّ فعالة، وذلك باستخدام مواد تُعرف بمواد تغيير الطور (MCP) ، كما أشارت إليه العديد من المنشورات والأبحاث العلمية.

يُقدم عملنا هذا دراسة متعلقة بانتقال الحرارة أثناء انصهار مادة من مواد تغيير الطور (MCP) وديناميكية هذا الانصهار.

يهدف هذا العمل إلى محاكاة الانتقال الحراري بالحمل في مادة MCP داخل تجويف مستطيل ثنائي الأبعاد وقد أُجريت المحاكاة باستخدام برنامج الحساب Ansys Fluent (الإصدار 6.3.26) المبني على طريقة الحجوم المنتهية . وتتمثل ميزة هذه "التجربة الرقمية" في أن جميع الكميات الفيزيائية المتعلقة بالجريان (مجال درجات الحرارة، مجال السرعة، نسبة السائل...) تكون متوفرة مباشرة.

ولتحقيق الأهداف المحددة في هذه الدراسة، قمنا بتقسيم العمل إلى أربعة فصول:

لفصل الأول: مفاهيم عامة حول مواد تغيير الطور وطرق انتقال الحرارة

- الفصل الثاني: الدراسات المكتبية
- الفصل الثالث: النمذجة الرياضية ثنائية الأبعاد للظاهرة الفيزيائية المصاحبة لتغيير الطور (الانصهار). وتتميز نمذجتنا بتجاوز العديد من الفرضيات المعتمدة عادة.
- الفصل الرابع: النتائج والتعليقات

ويُختتم عملنا بخاتمة نُجمل فيها أهم النتائج المتوصّل إليها.

الفصل الأول:
مفاهيم عامة حول المواد متغيرة الطور وطرق انتقال الحرارة

1.I المقدمة :

يُعتبر تخزين الطاقة الحرارية باستخدام المواد متغيرة الطور (MCP) وسيلة فعالة لتخزين وإطلاق كميات كبيرة من الطاقة. يعتمد هذا النظام على تغير الحالة الفيزيائية للمادة للاحتفاظ بالطاقة وإطلاقها. فعلى سبيل المثال، تتطلب عمليات مثل الانصهار، والتجمد، أو التبخر طاقة. يتم امتصاص أو تحرير الحرارة عندما تنتقل المادة من الحالة الصلبة إلى السائلة أو العكس. وبالتالي، فإن المواد متغيرة الطور تغيّر حالتها بسهولة وبشكل يمكن التنبؤ به عند تلقي كمية معينة من الطاقة، ثم تطلق هذه الطاقة لاحقًا[1]

2.I تخزين الطاقة الحرارية :

يُتيح تخزين الطاقة الحرارية إمكانية التقاط الطاقة عندما تكون متوفرة وبأسعار منخفضة، للاحتفاظ بها في مكان محدد. ويمكن استخدام هذه الطاقة المُخزنة لاحقًا عندما تصبح الموارد نادرة أو أكثر تكلفة. يُعد هذا النظام بالغ الأهمية خاصة بالنسبة لمصادر الطاقة المتجددة المتقطعة مثل الطاقة الشمسية أو طاقة الرياح، نظرًا لتفاوت إنتاجها بحسب الظروف المناخية والزمن.

في الواقع، يُساهم التخزين في التغلّب على هذه التقلبات، ويضمن توفيرًا أكثر استقرارًا وموثوقية للطاقة. وتكمن الفائدة الأساسية من وحدات التخزين في تقليل استهلاك الطاقة.

وقد وثّقت الدراسات العلمية العديد من أنواع تخزين الحرارة، مثل: التخزين بالحرارة المحسوسة، التخزين بالحرارة الكامنة، التخزين الكيميائي، والتخزين الكيميائي الحراري، وغيرها[2].

1.2.I التخزين بواسطة الحرارة الحسّية :

يُعد التخزين بواسطة الحرارة الحسّية تقنية قديمة تُستخدم لتخزين الطاقة الحرارية لفترات زمنية متفاوتة. وتعتمد هذه الطريقة على استخدام مصدر حراري لرفع درجة حرارة مادة معينة دون أن تتغير حالتها الفيزيائية.

مبدأ العمل بسيط: توفير حرارة عالية لرفع درجة حرارة مادة "أحادية الطور" (صلبة أو سائلة)، مما يخزن الطاقة على شكل حرارة محسوسة. وعلى العكس، فإن استرجاع هذه الحرارة يؤدي إلى تقليل درجة حرارة المادة وإطلاق الطاقة المخزنة.

تخيل جسماً عالي الحرارة موضوعاً في نظام بدرجة حرارة منخفضة. عند الضغط الثابت، فإن الطاقة اللازمة لزيادة درجة حرارته من T_1 إلى T_2، مع العلم أن كتلته هي m وسعته الحرارية النوعية هي $C_{(T)}$ يتم تمثيلها بتغير الانتالبي [2]

$$H_2 - H_1 = \int_{T2}^{T1} mc(T)dT \qquad (\mathbf{1.I})$$

بافتراض أن السعة الحرارية لا تعتمد على درجة الحرارة (وهو ما ينطبق في نطاق ضيق من درجات الحرارة)، تصبح هذه العلاقة كالتالي:

$$H_1 - H_2 = mc(T_2 - T_1) \qquad (\mathbf{2.I})$$

2.2.I التخزين بواسطة الحرارة الكامنة:

يتمثل التخزين بواسطة الحرارة الكامنة في خزن الطاقة التي تؤدي لاحقًا إلى حدوث تغير في درجة الحرارة وتغيير في طور المادة. وعند استرجاع الطاقة، يُلاحظ حدوث ظاهرة التغير العكسي في الطور. تخضع كمية الحرارة Q، التي يتم امتصاصها أو تحريرها خلال عملية تغير الطور، للعلاقة التالية:

$$Q = mL_F \qquad (\mathbf{3.I})$$

في التطبيق العملي، قد تتداخل الحرارة المحسوسة والحرارة الكامنة بشكل متتابع في العمليات الحرارية.

فإذا اعتبرنا أن مادة التخزين تكون في البداية عند درجة حرارة T_1، وهي أقل من درجة حرارة الانصهار T_F، وأن T_Fأقل من درجة الحرارة النهائية T_2 $(T_1<T_F<T_2)$، فإن التخزين سيتم على شكل حرارة محسوسة وكذلك على شكل حرارة كامنة.

وعند ضغط ثابت، يتم تخزين الطاقة من خلال تغير المحتوى الحراري (الانتالبي).

$$H_2 - H_1 = \int_{T1}^{TF} mc_{sol}(T)dT + L_F(T_F) + \int_{TF}^{T2} mc_{liq}(T)dT \qquad (\mathbf{4.I})$$

حيث :

$\boldsymbol{C_{sol}}$:السعة الحرارية النوعية الكتلية في الحالة الصلبة [J/kg. k]

$\boldsymbol{C_{liq}}$:السعة الحرارية النوعية الكتلية في الحالة السائلة[J/kg. k]

L_Fالحرارة الكامنة لتغير الطور[J/kg.k]

وبافتراض أن السعات الحرارية النوعية الكتلية للمواد لا تعتمد على درجة الحرارة، تصبح المعادلة ***(4.I)***كما يلي:

$$H_2 - H_1 = mC_{sol}(T_F - T_1) + mL_F(T_F) + mC_{liq}(T_2 - T_F) \qquad (\mathbf{5.I})$$

$$L_F(T_F) = H_{liq}(T_F) - H_{sol}(T_F) > 0 \qquad (\mathbf{6.I})$$

$H_{sol}(T_F)$:الانتالبية الكتلية للمادة في الحالة الصلبة عند درجة الحرارة المتوازنة T_F[J/kg]

$H_{liq}(T_F)$:الانتالبية الكتلية للمادة في الحالة السائلة عند درجة الحرارة المتوازنة T_F[J/kg]

$L_F(T_F)$: التغير في الانتالبية أثناء تغير الطور [J/kg]

في المعادلة**(5.I)** ، يُعتبر الحد mL_F كبيرًا جدًا مقارنةً بباقي حدود المعادلة. ويعود ذلك إلى أن الطاقة المُخزنة بواسطة الحرارة الكامنة أكبر بكثير من تلك المُخزنة بواسطة الحرارة المحسوسة.

لذلك، يُعد التخزين بالحرارة الكامنة فعالًا جدًا لتخزين كميات كبيرة من الطاقة، عندما تكون الكتل وفروق درجات الحرارة صغيرة [3].

I.2.3 التخزين باستخدام المواد متغيرة الطور (MCP):

يعد تخزين الحرارة الكامنة تقنية تتيح الوصول إلى كثافات طاقة عالية باستخدام مواد تنصهر وتتجمد عند درجات حرارة محددة بدقة، تعرف بالمواد ذات التغير الطوري(MCP)

عند انصهارها، يمكن تخزين كميات كبيرة من الحرارة. وعند الحاجة لتحرير الحرارة المخزنة، تتجمد المواد مرة أخرى عند درجة حرارة محددة. من خلال هذه العملية، يمكن تخزين كميات كبيرة من الطاقة الحرارية ضمن نطاق ضيق من درجات الحرارة.

الميزة الأكبر لمواد متغيرة الطور هي قدرتها على تخزين نفس كمية الطاقة التي يخزنها خزان الماء، ولكن بحجم أصغر أربع مرات. وهذا يجعلها حلاً عمليًا حتى في الأماكن التي تكون المساحة فيها محدودة أو مفصولة.

استنادًا إلى الفهم بأن العالم يستهلك أكثر من ضعف كمية الحرارة مقارنة بالكهرباء، تساعد البطاريات الحرارية في حل العديد من المشاكل عن طريق تخزين الطاقة على شكل حرارة عندما تكون متوفرة، ثم إطلاقها عند الحاجة.

يتمثل الابتكار في استخدام مزيج خاص من مواد تخزين الطاقة الموجودة في بطارية حرارية فريدة، مملوكة وعالية الطاقة. تحتوي البطاريات الحرارية الشمسية على مواد غير عضوية وغير سامة قائمة على الأملاح لعملية التغير الطوري(MCP) ، والتي تمتص وتحرر الطاقة الحرارية خلال عملية الانصهار والتجمد.

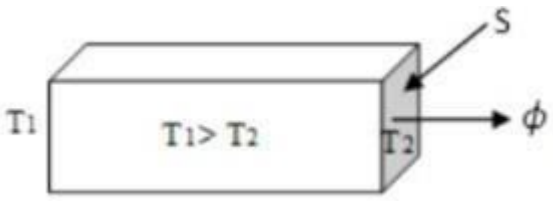
عند تجمد المواد ذات التغير الطوري، يتم إطلاق كمية هائلة من الطاقة على شكل حرارة كامنة عند درجة حرارة ثابتة يتم تحديدها مسبقًا[4].

I.3 مفاهيم حول انتقال الحرارة :

يعد انتقال الحرارة أحد الأساليب الأكثر شهرة لتبادل الطاقة. عندما يوجد فرق في درجة الحرارة بين نقطتين في نظام ما، ويتم وضع نقطتين بدرجات حرارة مختلفة على اتصال، يتم ملاحظة ميل لتساوي درجات الحرارة. هناك ثلاثة أنواع من انتقال الحرارة[4].

I.3.1 . التوصيل الحراري :

يعد انتقال الحرارة بالتوصيل هو الطريقة الوحيدة التي يمكن أن تحدث في المواد الصلبة. تنتقل الحرارة من ذرة إلى أخرى، خطوة بخطوة، عبر نقل طاقة الاهتزاز الحراري. في المواد الصلبة، تكون الذرات، التي تتواجد في مواقع ثابتة في الفضاء، هي المسؤولة عن نقل الحرارة دون حدوث أي حركة للمادة نفسها. تعتمد نظرية التوصيل على الفرضية ، التي تنص على أن تدفق الحرارة يتناسب مع تدرج الحرارة[4].



الشكل .I.1 . مخطط انتقال الحرارة بالتوصيل [4].

I.3.2 الحمل الحراري:

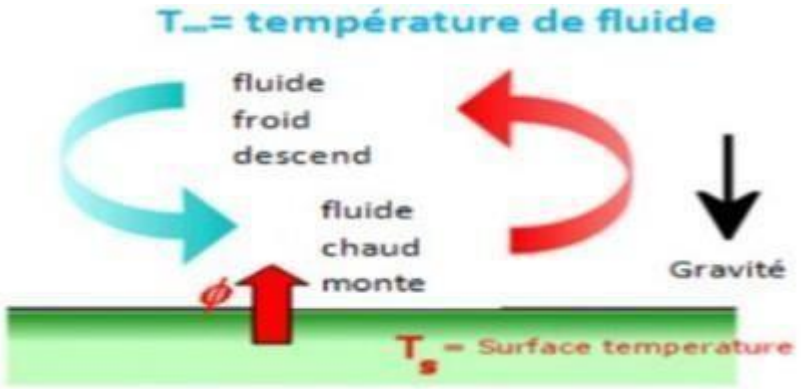
بشكل عام، هو انتقال الحرارة بين طورين مختلفين في الطبيعة. يحدث، على سبيل المثال، عند سطح الفصل بين جسم صلب وسوائل (سائلة أو غازية)، أو أيضًا عند السطح الحر بين سائل وغاز.

يتم انتقال الحرارة في مرحلتين:

•**المرحلة الأولى:** يتم تبادل الحرارة عن طريق التوصيل بين السطح الصلب وطبقة رقيقة من السائل (المعروفة باسم "الطبقة الرفيعة") قرب السطح.

•**المرحلة الثانية** : يتم تحريك السائل في الطبقة الرفيعة إلى داخل كتلة السائل؛ هذا التحرك للسائل يمكن أن يكون طبيعيًا (نتيجة لتغير الكثافة للطبقة الرفيعة الساخنة أو المبردة مقارنةً بالكثافة العامة للسائل) أو صناعيًا (عن طريق مضخة أو محرك). هنا نتحدث إما عن الحمل الحراري الطبيعي أو الحمل الحراري القسري.

لذا، يتم انتقال الحرارة عن طريق الحمل الحراري نتيجة لتحرك سائل ينقل معه الطاقة التي يحتوي عليها. بغض النظر عن نوع الحمل الحراري (طبيعي أو قسري) أو عن نمط تدفق السائل (طبقي أو مضطرب)، يتم تحديد تدفق الحرارة المنقول بواسطة علاقة تُعرف بقانون نيوتن [4].

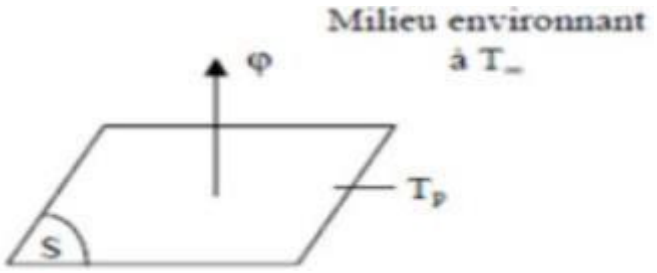


الشكل .I. 2 . الية الحمل الحراري[4].

I. 3. 3 الإشعاع الحراري :

الأجسام، بغض النظر عن حالتها: صلبة، سائلة أو غازية، والتي تكون بدرجة حرارة مطلقةT0k ، تقوم بإصدار موجات كهرومغناطيسية؛ ويقال إنها تصدر "إشعاعًا حراريًا". بالإضافة إلى ذلك، يترافق عملية إصدار الإشعاع الحراري مع عملية امتصاص الإشعاعات الكهرومغناطيسية القادمة من بيئة تلك الأجسام. وبالتالي، فإن حالتها الحرارية تخضع للتوازن بين عمليتي الإرسال والامتصاص.

الإشعاع الحراري يمثل انتقالًا للحرارة لا يتطلب أي وسط مادي، ولهذا السبب، يتم "تسخين" الأرض بواسطة الإشعاع الحراري من الشمس، الذي انتشر في الفراغ، من السطح الشمسي الذي أصدره إلى الأرض التي تمتصه. يتم تحديد تدفق الحرارة المتبادل بين السطح S والبيئة بواسطة قانون ستيفان-بولتزمان[4].



الشكل .I. 3 . انتقال الحرارة عن طريق الإشعاع [4].

I. 4 تعريف مواد تغيير الطورMCP:

تتميز مواد تغيير الطور بقدرتها على تخزين الطاقة على شكل حرارة كامنة. حيث يتم امتصاص الحرارة أو استرجاعها عند الانتقال من الحالة الصلبة إلى الحالة السائلة

تعتمد مواد تغيير الطور على تطبيق مبدأ فيزيائي بسيط

عند تجاوز درجة حرارة معينة خاصة بكل مادة، فإنها تذوب عن طريق امتصاص الحرارة من البيئة المحيطة وتعيد هذه الحرارة عندما تنخفض درجة الحرارة. ترتبط هذه الخاصية للمادة بطاقة الانصهار

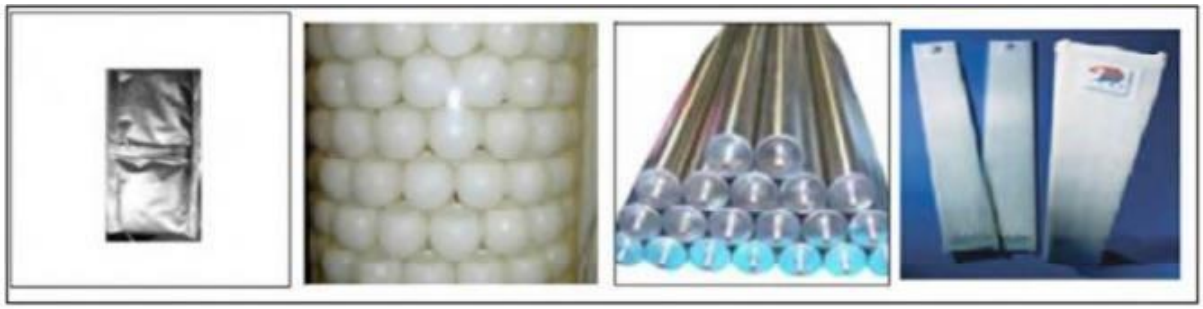
الكبيرة لكل وحدة حجم، وكلما كانت هذه الطاقة أكبر، كانت خصائص (تخزين/استرجاع) الحرارة أكثر فعالية [5].

الجدول التالي يلخص مزايا وعيوب أنواع التغيرات في الطور.

الجدول..I.1 مقارنة بين مزايا وعيوب التغيرات المختلفة في الحالة [6].

تغير الطور	المزايا	العيوب
سائل / صلب	قيمة عالية للحرارة الكامنة	تغيير كبير في الحجم
صلب / سائل	تغيير حجم منخفض	قيمة متوسطة للحرارة الكامنة
صلب / غاز	قيمة عالية للحرارة الكامنة	تغيير كبير في الحجم

لقد أصبح استخدام مواد تغيير الطور لتخزين الطاقة الحرارية شائعًا للغاية في السنوات الأخيرة. ويعود ذلك إلى أن مواد تغيير الطور تتمتع بكثافات تخزين عالية (أي كمية الطاقة المخزنة لكل وحدة كتلة). بالإضافة إلى ذلك، يمكن تطبيق هذه المواد في العديد من المجالات [7].

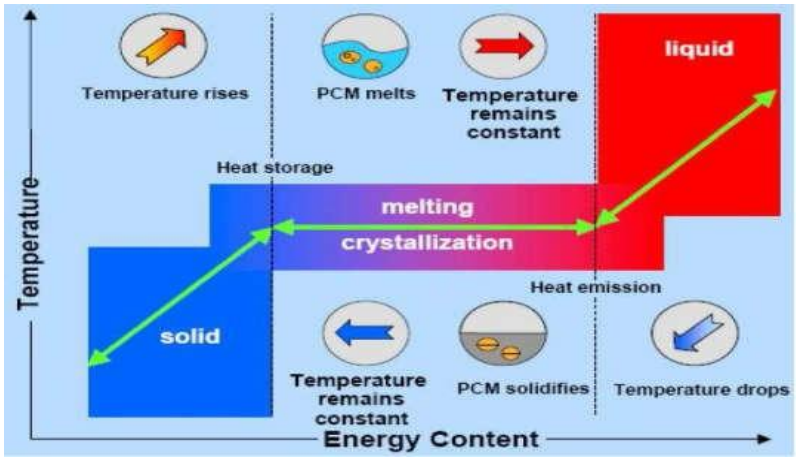


الشكل.I.4 . بعض مواد تغيير الطور : أكياس كرات انابيب [8] .

I.5 مبدأ عمل مواد تغيير الطور(MCP):

تستخدم مواد تغيير الطور الحرارة الكامنة الناتجة عن تغيير الطور للتحكم في درجة الحرارة ضمن نطاق محدد. عندما تتجاوز درجة الحرارة نقطة معينة، تبدأ الروابط الكيميائية في المادة بالانكسار وتمتص

المادة الحرارة في عملية ماصة للحرارة، حيث يتحول من الحالة الصلبة إلى الحالة السائلة وعندما تنخفض درجة الحرارة، تفرز المادة الطاقة ويعود إلى حالته الصلبة [6].



الشكل.I.5 .مبدا عمل مواد تغيير الطور [6] .

I.6 تصنيف مواد متغيرة الطور MCP :

نميز ثلاث عائلات رئيسية من مواد تغيير الطور (MCP) :المركبات العضوية، المركبات غير العضوية، والمواد سهلة الانصهار.

يمكن تقسيم كل من هذه العائلات إلى مجموعات فرعية، حيث أن السلوكيات الفيزيائية والكيميائية المختلفة تؤثر على تصميم نظام التخزين[6].

I.6.1 مواد تغيير الطور غير العضوية(inorganiques) :

تتمتع المواد غير العضوية بدرجة حرارة أو نطاق درجات حرارة انصهار يتراوح بين −100 درجة مئوية و 1000+ درجة مئوية. أكثر المواد استخدامًا هي: الماء، المحاليل المائية للأملاح، الأملاح المائية، خليط الأملاح، وخليط المعادن. لها عدة مزايا: فهي تتمتع بحرارة كامنة كبيرة وموصلية حرارية عالية. كما أنها غير قابلة للاشتعال وتتمتع بتكلفة استثمارية معقولة وهي عمومًا متوفرة بسهولة من المشاكل

الرئيسية التي تُواجه عند استخدامها هي التفرقة، التآكل، والتمدد الفائق (التجميد تحت درجة التجمد) . [6]

أملاح هيدراتية:

الأملاح الهيدراتية هي أملاح غير عضوية تحتوي على الماء وصيغتها العامة هي $AB.n.H_2O$ أثناء عملية الشحن، يحدث تجفيف للأملاح.

الأملاح:

الأملاح هي مركبات أيونية متعادلة تتكون من كاتيونات وأنيونات عادة ما تكون للأملاح النقية والمخاليط غير الإيوتكتية من الأملاح نطاق واسع من درجات الحرارة المنصهرة وحرارة كامنة تختلف حسب نوعها. على سبيل المثال، فإن الفلوريدات والكلوريدات تتمتع بحرارة كامنة أعلى من النترات أو الكبريتات[6] .

أشهر الأملاح هي النترات مثل:

NaNO3 ($T_{fusion} = 307$ °C)

KNO3 ($T_{fusion} = 333$° C)

LiNO3 ($T_{fusion} = 250$ ° C)

المعادن :

يمكننا أن نذكر على وجه الخصوص البوتاسيوم (درجة انصهاره = 63.2 درجة مئوية)، سبيكة البيزموت 58% والقصدير 42% (Bi58Sn42) (درجة انصهارها = 138 درجة مئوية)، أو الليثيوم (درجة انصهاره = 186 درجة مئوية) [6].

I.2.6 مواد تغيير الطور العضوية(organiques) :

تتمتع المواد العضوية بدرجة حرارة أو نطاق درجة حرارة يتراوح بين 0درجة مئوية و150 درجة مئوية، أكثر المواد استخدامًا تعتمد بشكل أساسي على البارا فين، الأحماض الدهنية، وكحول السكر. هذه المواد تحتوي على بعض العيوب مقارنة بمزايا المواد العضوية غير المعدنية:فهي تتمتع بموصلية حرارية أقل في الحالة الصلبة والسائلة، ولديها حرارة كامنة للانصهار أقل، كما أنها قابلة للاشتعال. من ناحية أخرى، فإن لها مزايا كبيرة؛ فهي متوفرة في نطاق واسع من درجات الحرارة ومتوافقة مع المواد التقليدية للبناء، وهي مستقرة كيميائيًا. كما أنها غير تفاعلية في أغلب الأحيان وقابلة لإعادة التدوير [9]

البرافينات :هي مواد عضوية تتكون من خليط من الهيدروكربونات المشبعة التي هي بدورها ألكانات ذات صيغة عامة C_nH_{2n+2} [9] .



الشكل.I.6 .البرافين الخام، المغلفة، على شكل مسحوق أو حبيبات [10] .

الأحماض الدهنية:الأحماض الدهنية هي مواد ذات أصل نباتي أو حيواني. وتتمتع بالصيغة الكيميائية العامة التالية : CH3 (CH2) 2n COOH[9].

I.6.3 مواد تغير الطور سهلة الانصهار (MCP Eutectiques):

هي عادة خليط من المواد متغيرة الطور في الحالة العضوية وغير العضوية. تتكون من عدة مواد صلبة نقية. تتمتع هذه المواد بميزتين رئيسيتين: أولاً، لديها نقطة انصهار واضحة تشبه المادة النقية، وثانيًا، درجات حرارة كامنة للحجم أعلى قليلاً من تلك الموجودة في المركبات العضوية النقية. ومع ذلك، هناك

عيبين رئيسيين: أولاً، توجد بيانات قليلة متوفرة حول الخصائص الحرارية لهذه المواد، وثانيًا، هي نادراً ما تستخدم في الأنظمة الصناعية [6].

الجدول.I.2 .قائمة ببعض المواد ذات الانصهار المشترك [11].

المواد ذات الانصهار المشترك الغير عضوية :	نقطة الانصهار]C° [	الحرارة الكامنة للانصهار [kJ/kg]
49.3%Mg Cl.6H2O+50.7%Mg(NO3).6H2O	58	132.3
61.5%Mg(NO3)6H2O+38.5%NH4 NO3	51	131.1
58.3%Mg(NO3)6H2O+41.7%Mg Cl. 6H2O	58	106
CaCl2.6H2O+CaBr2.H2O	14	140
المواد ذات الانصهار المشترك العضوية :		
حمض الكابريك–اللوريك	18	120
حمض البالميتيك – اللوريك	33	145
حمض الستيريك–اللوريك	34	150

I.7 اختيار مواد تغيير الطور(MCP) :

بناءً على ذلك، سيتم وضع معايير لتسهيل اختيار MCP لتطبيق معين:

الخصائص الحرارية :

- درجة حرارة تغير الطور التي تعتمد على التطبيق .
- قيمة الحرارة الكامنة للانصهار (130 KJ/Kg <) لتكون تنافسية.
- موصلية حرارية عالية لتحقيق سرعة أكبر في شحن وتفريغ الطاقة .
- ضغط بخار منخفض لتقليل المشاكل المتعلقة بمقاومة الضغط في نظام التخزين.

الخصائص الفيزيائية:

- تغير صغير في الحجم أثناء تغير الحالة من أجل تحديد حجم التخزين ومقاومة الضغط
- كثافة عالية لكي يتمكن MCP من تحقيق تخزين كافٍ في أصغر حجم ممكن .
- انصهار متزامن عند استخدام مادة مركبة.

الخصائص الحركية:

حركتا الشحن والتفريغ سريعة.

عدم حدوث تبريد فائق، مما يقلل من الحركية ويمنع التفريغ.

الخصائص المتعلقة بالاستقرار والتوافق مع المواد الأخرى:

استقرار المادة أثناء الدورات الحرارية.

تحمل المواد في خزان التخزين لكل مرحلة لتجنب أي مخاطر للتآكل أو التفاعل الكيميائي

الخصائص الكيميائية:

الاستقرار الكيميائي للمادة على المدى الطويل وفقًا للزمن ودرجة الحرارة.

معدل بلورة مرتفع، غير قابل للاشتعال وغير سام.

الخصائص الاقتصادية:

تكلفة مقبولة وإمكانية وصول جيدة [12].

I.8 مقارنة بين الأنواع المختلفة منMCP :

قدم العديد من المؤلفين [13، 14،15] مقارنة بين مزايا وعيوب المواد العضوية، وغير العضوية، وسهلة الانصهار (الجدول **I.3**)

الجدول.I.3 . مزايا وعيوب الفئات المختلفة من (MCP).

مادة متغيرة الطور *(MCP)*	المزايا	العيوب
المواد العضوية	متوفرة في نطاق واسع من درجات الحرارة لا يوجد فرط تبريد مستقرة كيميائيا طاقة اندماج عالية غير مسببة للتآكل سهلة الاستخدام	موصلية حرارية منخفضة حرارة كامنة منخفضة قد تكون قابلة للاشتعال حرارة نوعية كتلية منخفضة تكلفة عالية كثافة منخفضة
المواد الغير عضوية	حرارة كامنة عالية تكلفة منخفضة نقطة انصهار محددة غير قابلة للاشتعال موصلية حرارية عالية نوعية كتلية عالية	ظاهرة فرط التبريد الحاجة الى عامل نووي خارجي تسبب التآكل لمعظم المعادن التدهور السريع
المواد سهلة الانصهار	نقطة انصهار محددة مشابهة للمادة النقية حرارة كامنة اعلى قليلا من تلك الموجودة في المركبات العضوية النقية	بيانات محدودة عن خصائص هذه المواد نادرا ما تستخدم في التطبيقات الصناعية

I.9 طرق التغليف :

من أجل منع التسربات عندما يكون MCP في المرحلة السائلة وأيضًا لزيادة مساحة التبادل، فإن التغليف ضروري. يمكن أن يكون للتغليف وظائف أخرى، مثل حماية MCP من بيئته، وزيادة الخصائص الحرارية للمجموعة، واستخدامه كحاجز مقاوم للحريق، أو تعديل الخصائص الإشعاعية. يتم شرح تقنيات التغليف، مثل التغليف الكلي والتغليف الجزئي، في الفقرات التالية.

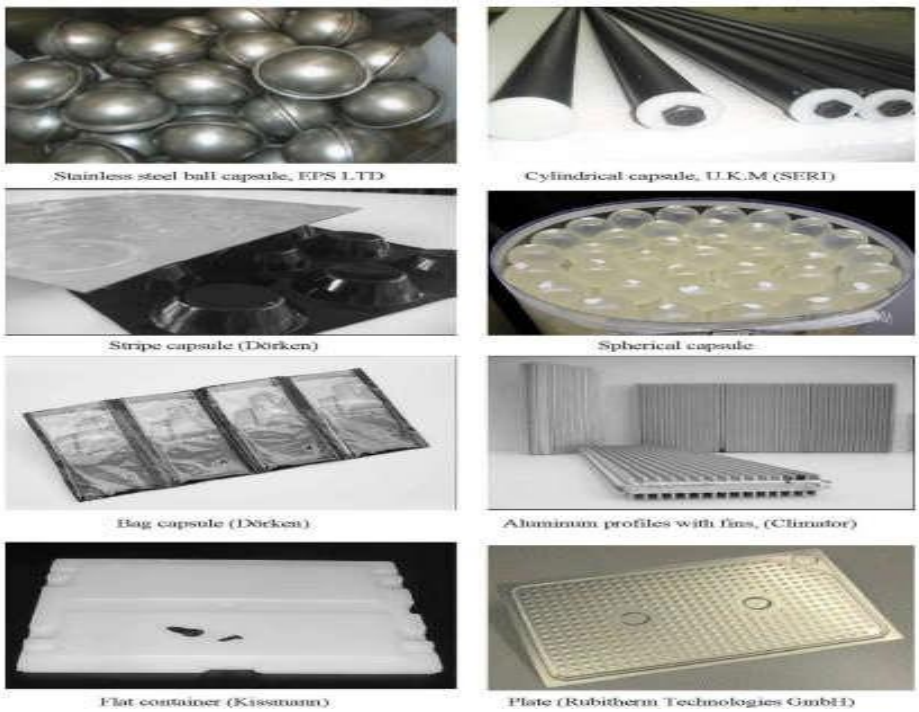
I.9.1 التغليف الكلي Macro (encapsulation) :

التغليف الكلي يتضمن حبس كمية كبيرة من MCP داخل كبسولات بأشكال هندسية مختلفة مثل الأنابيب، والمستطيلات، والأكياس، والكرات. في الغالب، يتم تفضيل استخدام المواد البلاستيكية بسبب تكلفتها المنخفضة وسهولة تنفيذها.

يزداد وقت تحول الطور بشكل متناسب مع مربع نصف قطر الكبسولة، ولهذا يُفضل التغليف الكلي في أكياس رقيقة أو كرات ذات أقطار صغيرة.

في الواقع، يمكن تغليف المادة ذات تغير الطور بغشاء بلاستيكي أو معدني للحصول على كيس رقيق يوفر مساحة سطح كبيرة. تعتبر هذه التقنية اقتصادية جدًا، حيث إنها مستخدمة بشكل كبير في صناعة المواد الغذائية والصحة.

يجب أخذ الحذر في الاعتبار أن المادة ذات تغير الطور تتوسع حجمًا عند الانتقال من الحالة الصلبة إلى السائلة، مما قد يسبب مشكلة مع التغطية تحت الفراغ. مع التغليف الكلي، قد تظهر مشاكل تآكل، خاصة عند ملامسة بعض المعادن. على سبيل المثال، المزيجات الإيوتكتية من الأحماض الدهنية تتسبب في تآكل النحاس، بينما يمكن للأملاح المائية أن تتسبب في تآكل الألومنيوم [16]

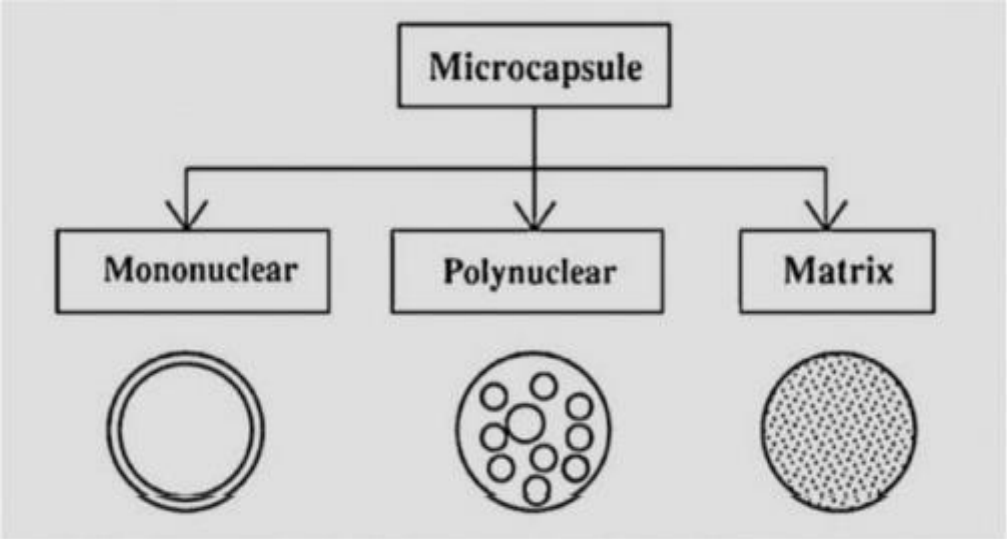


الشكل.I.7 . صور للتغليف الكلي لأشكال هندسية متنوعة [6].

I.9.2 التغليف الدقيق (Micro encapsulation) :

في حالة التغليف الدقيق يتم احتواء المواد متغيرة الطور داخل ميكرو كبسولات أو كرات دقيقة يكون قطرها في حدود الميكرو متر، والتي تحمي المركب من خلال تغليفه. وفقًا لتركيبها الداخلي، يمكن تعريف الميكرو كبسولات بأنها أحادية النواة أو متعددة النوى أو شبكية.

في مجال الـMCP ، توفر هذه التقنية العديد من المزايا. فهي تسمح بأن يتم انصهار الـ MCP داخل الميكرو كبسولة، مما يسمح له بتغيير حجم طفيف أثناء الانتقال بين الأطوار. كما أن الميكرو كبسولة التي من بيئته. يمكن إضافة هذه الميكرو كبسولات إلى مادة ما نريد تشكيلها دون خطر التسرب. يمكن أيضًا إضافتها مباشرة إلى عازل تقليدي مثل السليلوز. من جهة أخرى، يسمح التغليف الدقيق بالحصول على جزيئات صغيرة، مما يعزز التبادل الحراري. يعتبر التغليف الدقيق تقنية فعالة لكنها مكلفة. بالإضافة إلى ذلك، يصعب تطبيقها مع الأملاح المائية بسبب خصائصها المحبة للماء. كما أنها معقدة في التنفيذ عند التعامل مع المزيجات الإيوتكتية لأنها خليط من الأنواع الكيميائية، كما هو موضح في (الشكل**I.8**).



الشكل.I.8 .أنواع الكبسولات الدقيقة [16] .

I.10 تطبيقات مواد تغيير الطور:

I.10.1 الغذائية المنتجات نقل :

تستخدم مواد تغيير الطور في صناعة الأغذية، الأدوية الطبية للحد من التغيرات القصوى في درجات الحرارة التي يتعرض لها الطعام، الأدوية أو المكونات الحساسة مثل حالة نقل الدم. وعادةً ما تكون هذه المواد في شكل "أكياس صغيرة" بلاستيكية تحتوي على المادة المختارة وتوضع بالقرب من المنتج المراد حفظه [17].



الشكل.I.9 .تطبيقات نقل المنتجات الغذائية [10].

I.10.2 التطبيقات الطبية :

في القطاع الطبي، واحدة من التطبيقات الرئيسية هي نقل الدم (الشكل**I.10**) والأعضاء. ويمكن أن تشمل التطبيقات الطبية الأخرى وسادات دافئة أو باردة لمعالجة الألم الموضعي في الجسم [18].



الشكل .**I.10** . حاويات تحتوي على الدم و الأعضاء التي تحتوي على المواد متغيرة الطور (MCP) [19]

I.10.3 صناعة النسيج :

يمكن استخدام مواد تغيير الطور في العديد من مجالات صناعة النسيج التي تهدف إلى تحسين الراحة الحرارية والفسيولوجية للملابس، وأغطية المراتب، وأكياس النوم. يصبح من المهم بشكل خاص العثور على مواد تكون درجات انصهارها وتبلورها قريبة جدًا من درجة حرارة سطح الجسم البشري.

المواد المستخدمة في هذا النوع من التطبيقات عادةً ما تكون البارا فينات التي تتراوح درجة حرارتها المتوسطة بين 30–34 درجة مئوية، مما يجعلها مريحة جدًا للجسم البشري [20]



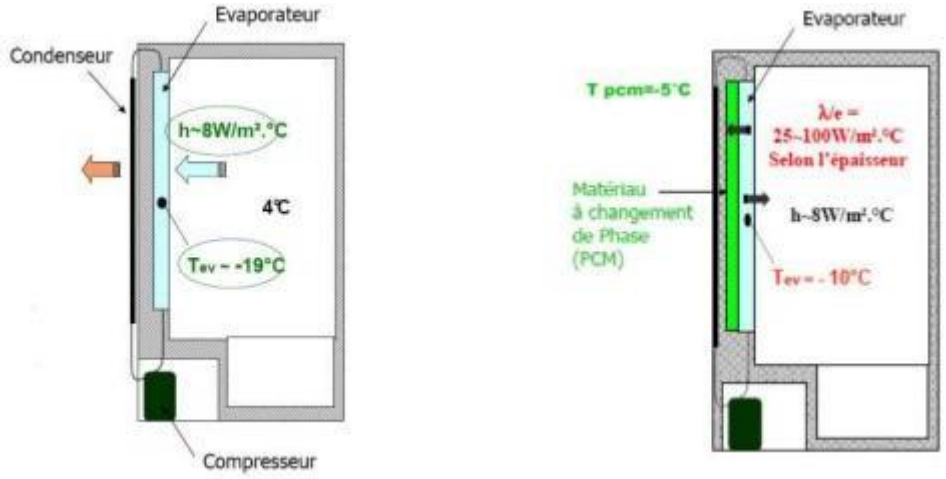
الشكل .I.11 . فعالية مواد تغيير الطور في النسيج [10].

I.10.4 مواد تغيير الطور في الثلاجات المنزلية :

تعد الثلاجات التي تعمل بشكل دائم ذات أداء طاقي ضعيف. حيث تستهلك هذه الأجهزة 18 مليار كيلوواط ساعة، وهو ما يعادل 20% من استهلاك الكهرباء السكني، مما يساهم في ظاهرة الاحتباس الحراري بحجم 2.25 مليار طن من ثاني أكسيد الكربون سنويًا. إن دمج مواد تغيير الطور في الثلاجات المنزلية يُعد حلاً تكنولوجيًا مبتكرًا واقتصاديًا لتقليل استهلاك الطاقة هذا وتخفيف ذروات استهلاك الكهرباء.

إن تأثير زيادة الخمول الحراري الذي توفره هذه المواد سيؤدي أيضًا إلى تقليل عدد مرات التشغيل

والإيقاف، مما يتيح تفضيل ساعات معينة من التشغيل خلال اليوم ويعمل على استقرار درجة الحرارة لضمان أفضل حفظ للأطعمة [21]. الشكل **12.I** . يوضح مثالاً على ثلاجة منزلية تحتوي على مادة تغيير الطور



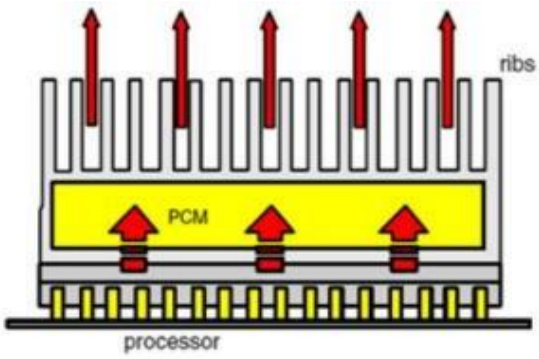
الشكل 12.I .ثلاجة منزلية تحتوي على مادة تغيير الطور.

(a) : ثلاجة مع مادة تغيير الطور (MCP) (b) : ثلاجة عادية[22]

5.10.I مواد تغيير الطور في تبريد المكونات الإلكترونية:

أكثر أنظمة التبريد شيوعًا حاليًا هو التوصيل الحراري (الطبيعي أو القسري) للهواء المحيط. يمكن لمواد تغيير الطور امتصاص كمية كبيرة من الحرارة عن طريق الانصهار، مما يجعلها بديلاً مثيرًا للاهتمام لتفريغ الطاقة الناتجة عن المكونات الإلكترونية. نظرًا لأن ظاهرة الانصهار تحدث ضمن نطاق ضيق من درجات الحرارة، فإنه يمكن التحكم في درجة حرارة هذه المكونات. يكفي حينها وضع حجرة من مادة تغيير الطور بجانب هذه المكونات لتفريغ الطاقة الناتجة عن مصادر الحرارة لمدة زمنية معينة. يتناسب هذا النظام بشكل خاص مع الاستخدام الدوري للأجهزة الإلكترونية. يمكن لمواد تغيير الطور أن تعطى

الحرارة (من خلال إعادة التصلب) خلال فترة الخمول. يوضح (الشكل**I.13**) مثالاً لجهاز إلكتروني يتم تبريده باستخدام مادة تغيير الطور [21]



الشكل.I.13 .مثال لمعالج تم تبريده بواسطة مادة تغيير الطور[22]

I.10.6 التطبيقات في المباني :

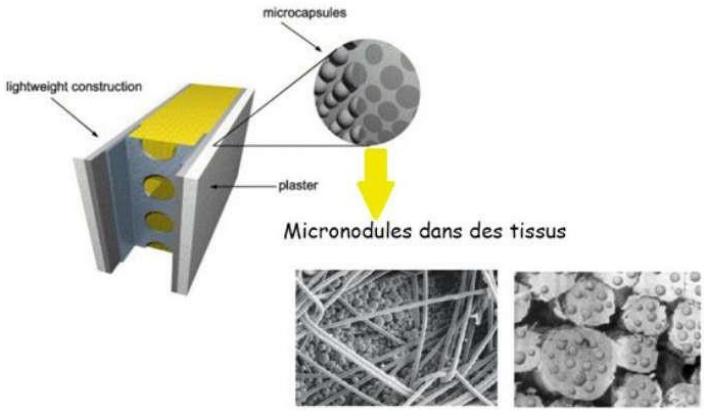
يُعد استخدام مواد تغيير الطور (MCP) لتخزين الحرارة في المباني من بين أولى التطبيقات لهذه المواد [23]. حاليًا، تتوجه معظم الدراسات حول مواد تغيير الطور (MCP) نحو:

- استخدامها، عند دمجها في غلاف المبنى، لتطبيقات التدفئة.
- دمجها في غلاف المباني ذات الخمول الحراري المنخفض بهدف تحسين راحة الصيف.

I.10.6.1 طرق استخدام مواد تغيير الطور في المباني:

التكامل المباشر: يتم خلط مواد تغيير الطور مع مواد البناء (الخرسانة) أثناء التصنيع.

التغليف قبل التكامل: تكون مواد تغيير الطور إما في شكل تغليف كبير أو تغليف دقيق ويتم دمج هذه المواد إما في مواد البناء أو في مبادلات الحرارة [10]



الشكل.I.14 . مثال لاستخدام مادة تغيير الطور في المباني [23].

الفصل الثاني:
الدراسات المكتبية

أجرى Meriam دراسة محاكاة عددية لعملية انتقال الحرارة المرتبطة بالانصهار داخل خزان ثنائي الأبعاد يحتوي على مادة متغيرة الطور، باستخدام برنامج ANSYS Fluent مع تفعيل نموذج المحتوى الحراري–المسامية .(Enthalpy–Porosity Model) يتيح هذا النموذج تمثيلًا دقيقًا لتأثير الحمل الطبيعي وتغير الطور عبر اعتماد صيغة تدريجية لنسبة الحجم للطور السائل ومعامل مقاومة لحركة المائع في المناطق غير المنصهرة. أظهرت النتائج أن الحمل الطبيعي الناتج عن تدرج الكثافة يساهم بشكل فعال في تسريع عملية الانصهار وتحسين توزيع الحرارة داخل المادة. كما بيّنت المحاكاة أن تطور جبهة الانصهار يتم بشكل غير متماثل، حيث تبدأ العملية من الجدار المسخن وتمتد تدريجيًا نحو الجهة المقابلة، مع تسجيل معدلات انصهار أعلى في المناطق العلوية نتيجة لصعود المائع الساخن. تؤكد هذه النتائج كفاءة نموذج المحتوى الحراري–المسامية في محاكاة ظواهر تغير الطور المقترن بالحمل الطبيعي، مما يجعله أداة فعالة في تصميم وتحسين أنظمة التخزين الحراري المعتمدة على مواد متغيرة الطور[6].

أجرى الباحث Hocine دراسة عددية تناولت موضوع تخزين الطاقة الحرارية باستخدام الحرارة الكامنة، وذلك من خلال محاكاة عددية ثنائية الأبعاد باستخدام برنامج .COMSOL Multiphysics تمثلت التجربة في نموذج مكوّن من أسطوانة مزدوجة الجدار، حيث يحتوي الجزء الداخلي منها على الماء، بينما يحتوي الجزء الخارجي على مادة متغيرة الطور، وهي البرافين، نظراً لخواصه الحرارية المناسبة لهذا النوع من التطبيقات. تم تسخين الماء بواسطة مصدر حراري خارجي، مما أدى إلى انتقال الحرارة نحو مادة البرافين المحيطة، التي بدأت بدورها بامتصاص هذه الطاقة وتخزينها على شكل حرارة كامنة أثناء تحولها من الحالة الصلبة إلى الحالة السائلة. وقد مكّنت هذه المحاكاة الباحث من تتبّع تطور درجة حرارة البرافين وتحليل أدائه الحراري على مدى زمني محدد. أظهرت النتائج أن البرافين يتمتع بقدرة عالية على امتصاص وتخزين الطاقة الحرارية خلال فترة زمنية قصيرة، مما يجعله مادة واعدة في أنظمة

تخزين الطاقة الحرارية، خاصة في التطبيقات المرتبطة بالطاقة المتجددة مثل أنظمة الطاقة الشمسية الحرارية[24].

قام Mohammed بدراسة عددية ثنائية الأبعاد لعملية الانصهار والتجمد لمادة متغيرة الطور (MCP) موضوعة داخل حجرة مستطيلة الشكل، حيث تم تسخين الواجهة الأمامية للحجرة بطريقة متساوية الحرارة مع عزل باقي الجدران. في بداية الانصهار، اعتُبر التوصيل الحراري هو نمط انتقال الحرارة المسيطر، يليه تدريجياً انتقال إلى نمط الحمل الطبيعي الذي يصبح هو الغالب في الطور السائل. تم استخدام النموذج العددي القائم على طريقة الحجم المنتهي ونموذج الانتالبي–المسامية باستخدام برنامج ANSYS Fluent، وقد تم التحقق من دقته من خلال مقارنته بنتائج عددية وتجريبية متوفرة في المراجع العلمية. وقد أبرزت النتائج أهمية الحمل الطبيعي في تسريع عملية الانصهار مقارنة بالتوصيل فقط، كما تم تحليل تأثير عدة عوامل مثل درجة حرارة الجدار الساخن، أبعاد الحجرة، ميلانها، وجود الزعانف، بالإضافة إلى دراسة دورات الانصهار والتجمد المتكررة. وأظهرت هذه الدراسة أن تحسين التصميم الحراري يمكن أن يساهم بشكل فعال في رفع أداء أنظمة تخزين الطاقة الحرارية الكامنة باستخدام المواد متغيرة الطور[25].

أجرى المؤلف نوار دراسة عددية أحادية البُعد لانتقال الحرارة في مادة ذات تغير في الطور باستخدام طريقة الحجوم المنتهية (النموذج الضمني). تم اختيار n–octadécane كمادة تغيير الطور (MCP) ، وقد تم دمجها داخل الجدار بسمك 10 سم لتحسين كفاءة الطاقة في المبنى. تم استخراج النتائج باستخدام لغة فورتران وطريقة الحجوم المنتهية .(V.F) أظهرت المحاكاة العددية أن عملية التصلب للألواح ذات مادة تغيير الطور تحدث بعد مرور فترة زمنية معينة[26].

أجرت صباح دراسة للتبادل الحراري أحادي البُعد باستخدام طريقة الحجوم المنتهية. تم اختيار كبريتات الصوديوم كمادة تغيير الطور (MCP) وتم دمجها داخل الجدران. أظهرت النتائج المستخلصة باستخدام برنامج فورتران وطريقة الحجوم المنتهية أن استخدام هذه المادة في جدران المباني ساعد في تحقيق الاستقرار الحراري وتوفير الراحة الحرارية. تم تحديد سمك مادة تغيير الطور بـ 10 سم، مما يعزز من دورها في توزيع وتخزين الطاقة الحرارية داخل المباني [27].

أجرى Houcine دراسة عددية ثنائية البعد لظاهرة الحمل الطبيعي في مادة متغيرة الطور داخل حاوية مربعة، وذلك باستخدام نموذج السعة الحرارية (Enthalpy–Porosity Model) لمحاكاة عملية الانصهار. تم بناء النموذج العددي باستخدام برنامج ANSYS Fluent، مع تطبيق شرط حراري ثابت على أحد جدران الحاوية، بينما اعتُبرت الجدران الأخرى معزولة حرارياً. أظهرت النتائج أن انتقال الحرارة يبدأ بالتوصيل في المراحل الأولى من الانصهار، ثم يتعزز بفعل الحمل الطبيعي مع تطور الطبقة السائلة، حيث تتشكل تيارات دورانية داخل المادة المنصهرة. كما بينت الدراسة أن موقع الواجهة بين الطور الصلب والسائل يتغير بشكل غير منتظم مع الزمن نتيجة التفاعل المعقد بين الحمل والتوصيل. وتؤكد هذه النتائج أن النموذج العددي المستخدم قادر على تمثيل السلوك الحراري بدقة، كما يبرز أهمية تضمين تأثيرات الحمل الطبيعي في نمذجة وتصميم أنظمة تخزين الطاقة الحرارية المعتمدة على المواد متغيرة الطور[28].

أجرى Tarek دراسة عددية لتحليل انتقال الحرارة بالحمل الطبيعي داخل تجويف ثنائي الأبعاد يحتوي على مادة متغيرة الطور من نوعRT27 ، باستخدام نموذج الانتالبي–المسامية. تم تصميم النموذج الهندسي وإعداد الشبكة العددية بدقة بواسطة برنامج Gambit، مع تضمين الخصائص الفيزيائية والحرارية الواقعية للمادة قيد الدراسة. هدفت الدراسة إلى فهم سلوك المادة أثناء عملية الانصهار الناجم

عن التدرجات الحرارية المطبقة بين جدران التجويف. أظهرت نتائج المحاكاة أن الحمل الحراري الطبيعي الناشئ عن هذه التدرجات يلعب دورًا حيويًا في تسريع عملية الانصهار من خلال توليد تيارات داخلية تعزز كفاءة انتقال الحرارة، مما يؤدي إلى تطور غير متماثل لحدود التحول الطوري وتوزيع غير متساوٍ لدرجات الحرارة داخل التجويف المدروس. كما أظهرت النتائج أن المادة المنصهرة تزداد تدريجيًا مع مرور الوقت، وأن مقاومة الجريان في المنطقة الانتقالية بين الطورين الصلب والسائل لها تأثير كبير على سرعة تقدم واجهة الطور، بالإضافة إلى تأثيرها المباشر على استقرار الحلول العددية خلال المحاكاة. تسلط هذه النتائج الضوء على كفاءة نموذج الانتالبي–المسامية في محاكاة التحولات الطورية تحت تأثير الحمل الطبيعي، مما يعزز من موثوقيته كأداة عددية فعّالة لدراسة سلوك المواد المتغيرة الطور في التطبيقات الحرارية وتقنيات تخزين الطاقة ضمن ANSYS Fluent .[29]

درس Abdelhak انتقال الحرارة ثنائي الأبعاد باستخدام مواد متغيرة الطور (MCP) ، حيث ارتكزت الدراسة على عدة معايير، من بينها الخصائص الحرارية والسلامة. وقد أظهرت نتائج التحليل العددي باستخدام CFD أن درجة انصهار المواد تختلف باختلاف نوع الـMCP، حيث تم التوصل إلى أن المادة RT55تتطلب درجة انصهار أعلى من غيرها، مما يشير إلى جودتها العالية وأفضلية استخدامها في التطبيقات الحرارية. ومن جهة أخرى، أجرى أحد الباحثين دراسة عددية لسلوك الانصهار داخل تجويف يحتوي على مادة متغيرة الطور، تحت تأثير الحمل الحراري الطبيعي، باستخدام نموذج الانتالبي–المسامية ضمن ANSYS Fluent، مع اعتماد خصائص فيزيائية حرارية واقعية. وقد تم بناء النموذج الهندسي والشبكة العددية بدقة باستخدام برنامج .Gambit وأظهرت المحاكاة أن الحمل الحراري الطبيعي الناتج عن التدرجات الحرارية يسهم في تسريع عملية الانصهار، ويؤدي إلى تشكل خلايا حمل معقدة

تؤثر بشكل كبير على توزيع درجة الحرارة وتطور واجهة الطور. كما أظهرت النتائج وجود انصهار غير متماثل نتيجة لتأثير الجريان الداخلي وخصائص المادة، مما يبرز فعالية النموذج العددي المستخدم في تمثيل سلوكيات تغير الطور في مثل هذه الحالات [30].

الفصل الثالث: النمذجة الرياضية

III .1 المقدمة :

يتناول هذا الفصل دراسة نمذجة عملية انصهار مادة ذات تغيير طوري، موضوعة داخل تجويف مستطيل الشكل وعمودي الاتجاه. تتم العملية في ظل وجود التوصيل الحراري في الجزء الصلب، والحمل الطبيعي في الجزء السائل، باستخدام نموذج عددي شامل يعتمد على تقنيات CFD (الميكانيك الحسابية للموائع).

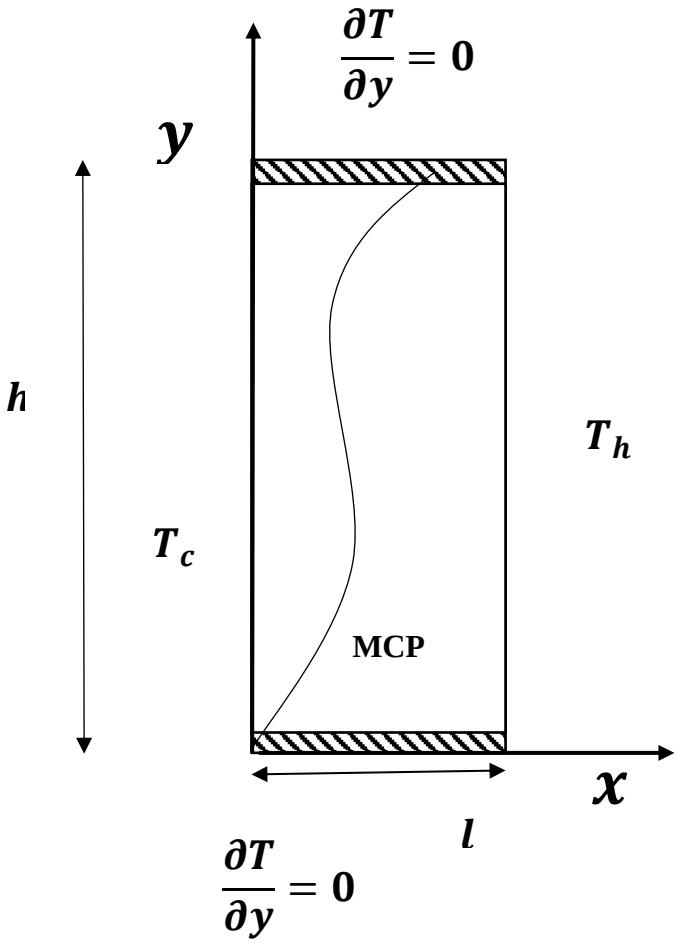
نبدأ أولًا بتحديد النموذج الفيزيائي للنظام المدروس، ثم نعرض النموذج الرياضي والمعطيات الأساسية المستخدمة في الحسابات العددية لحل المعادلات. تهدف هذه الدراسة إلى فهم آلية الانصهار بشكل أدق [25].

III.2 وصف المشكلة:

في مجال البناء، يُشكّل دمج مواد تغيير الطور (MCP) في الغلاف الخارجي للمبنى بمثابة مُخزّن حراري يتم فيه التخزين عن طريق الحرارة الكامنة.

III.3 النموذج الفيزيائي :

النموذج المدروس هو عبارة عن وعاء مستطيل ثنائي البعد يحتوي على مادة متغيرة الطور شكل. **3.III**. الجدران الأفقية معزولة حراريا , بينما الجدران العمودية مخضوعة لدرجات حرارة ثابتة و مختلفة T_h و T_c . بانتقال الحرارة من الجدار الساخن الى الجدار البارد و بداية عملية التغيرفي الطور, تنقسم المادة داخل الوعاء إلى جزئين : جزء سائل و جزء صلب تفصل بينهما منطقة تسمى الواجهة الصلبة السائلة.



الشكل.1.III .هندسة المسألة الفيزيائية.

4.III الفرضيات :

من الضروري اعتماد مجموعة من الفرضيات من أجل وضع المعادلات التي تصف الظواهر الفيزيائية للمسألة المدروسة:

- مواد تغيير الطور (MCP) تُعتبر نقية تمامًا.
- لا توجد فقاعات هواء محبوسة داخل المادة متغيرة الطور.

- مواد تغيير الطور تُفترض متجانسة ومتناظرة الخواص (متساوية الخواص في جميع الاتجاهات).
- يُهمل تأثير الانكماش في مواد تغيير الطور.
- لا يتم أخذ الصعوبات المتعلقة بالفرط في التبريد والنوى البلورية بعين الاعتبار

5.III وصف تغير الحالة مع طريقة الانتالبي:

5.III .1 طريقة الانتالبي :

في هذه الطريقة وخلال عملية تحول الطور تعامل المادة ضمن ثلاث 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.

وتعامل المعادلة الرياضية في حالة الانتالبي كمتغير وقيمتها هي نفسها لكلا الطورين ، ويتم استبدال السطح الفاصل و يعامل كمنطقة مختلطة بين الطورين . إن المنطقة المختلطة و معدل التغير في الحجم و السماكة تابع لعملية (امتصاص/تحرير) الطاقة الكامنة .

III . 6 معادلات الحفظ :

مع أخذ الفرضيات المطروحة سابقًا بعين الاعتبار، يمكننا كتابة نظام المعادلات التالي[31]

6.III .1 حفظ الكتلة :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \qquad (1.\text{III})$$

تمثل u و v مركبتي مجال السرعة V(u,v) (في اتجاهي x و y على التوالي.

2. 5.III حفظ كمية الحركة في اتجاه x :

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t}+u\ \frac{\partial u}{\partial x}+v\ \frac{\partial u}{\partial y}\right)=\ -\frac{\partial p}{\partial x}+\mu\ \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)+\ \frac{(1-f_l)^2}{(f_l^3-\varepsilon)}\ .A_m.u \qquad (2.\mathbf{III})$$

3. 5.III حفظ كمية الحركة في اتجاه y:

$$\rho\left(\frac{\partial v}{\partial t}+u\ \frac{\partial v}{\partial x}+v\ \frac{\partial v}{\partial y}\right)$$

$$=\ -\frac{\partial p}{\partial x}+\mu\ \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right)-\rho g\beta(T-\ T_c)$$

$$+\frac{(1-f_l)^2}{(f_l^3-\boldsymbol{\varepsilon})}\ .A_m.v \qquad (3.\mathbf{III})$$

4. 5.III حفظ الطاقة :

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t}+u\ \frac{\partial(\rho h)}{\partial x}+v\ \frac{\partial(\rho h)}{\partial y}=K\ \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) \qquad (4.\mathbf{III})$$

تُستخدم الحدود الأخيرة في المعادلتين (**2. III**) و (**3. III**) لتقليل مركبات السرعة ضمن إطار منهجية "الانتالبي–المسامية(Enthalpy–Porosity Method) "، التي تم اعتمادها لمحاكاة عملية تغير الطور[31]. يُمثّل معامل المنطقة المسامية A_m مقاومة الحركة في المنطقة التي يحدث فيها تغير الطور. وكلما زادت قيمة هذا المعامل، كلما زادت السرعة في المنطقة التي تمر بمرحلة الانصهار أو التصلب في التلاشي نحو الصفر.

تتراوح قيمة A_m _بحسب الحالة المدروسة ما بين 10^4و 10^7. تم اعتماد القيمة $A_m = 1.6 * 10^4$ في هذه الدراسة .

من الجدير بالذكر أن استخدام قيم مرتفعة جدًا ل A_m قد يؤدي إلى تذبذبات عددية ويؤخّر تقارب الحلول. وعلى الرغم من أن تأثير هذا المعامل يُعد محدودًا نسبيًا، إلا أن اختيار قيم منخفضة للغاية له قد يؤدي إلى تسريع غير واقعي لمعدل الانصهار أو التصلب.

أما بالنسبة للمعامل ζ، فهو عدد حقيقي صغير القيمة (10^4) يُستخدم لتجنّب القسمة على الصفر، مما يسمح بضمان استقرار الحلول وتطور الحد الأخير في المعادلتين(**2.III**) و(**3.III**) ضمن مجال عددي محدود. سنستخدم طريقة 'الانتالبي–المسامية' لدراسة تغير الطور لمادة تغيير الطور . (MCP)ولهذا، سنعرّف الانتالبي الكلية hعلى أنها مجموع الانتالبية الحسية h_sوالحرارة الكامنة L_f .[25]

$$h = h_s + L_f = C_p T + L_f \qquad (\mathbf{5.III})$$

حيث :

$$L_f = \lambda f_l \qquad (\mathbf{6.III})$$

تمثل fl نسبة الطور السائل الموضعية، وهي تُعبر عن كمية الحرارة الكامنة المكتسبة في نفس الموضع(λ):

مع:

$$f_l \begin{cases} 0 & (T < T_s) \\ \dfrac{T - T_s}{T_l - T_s} & (T_s \le T \le T_l) \\ 1 & (T > T_l) \end{cases} \qquad (\mathbf{7.III})$$

نستخدم المعادلتين (**5.III**) و(**6.III**) لإعادة كتابة المعادلة(**4.III**)

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u\,\frac{\partial T}{\partial x} + v\,\frac{\partial T}{\partial y}\right) = k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) - \lambda\rho\left(\frac{\partial f_l}{\partial t} + u\,\frac{\partial f_l}{\partial x} + v\,\frac{\partial f_l}{\partial y}\right) \qquad (8.III)$$

وهكذا نكون قد وصفنا النموذج الرياضي الكامل، وننتقل الآن إلى عرض النموذج العددي الكامل (CFD)المستخدم في حل المشكلة [25] .

7.III النموذج العددي *(CFD)* :

سوف نستخدم برنامج **FLUENT** (الإصدار6.3.26) لإنشاء قاعدة بيانات تتيح لنا لاحقًا مقارنة نتائجنا العددية بالنتائج العددية والتجريبية المتوفرة.

يعتمد هذا البرنامج التجاري على طريقة الحجوم المنتهية، التي تقوم على تقسيم مجال الجريان (أي إنشاء شبكة حسابية). ويتم ذلك من خلال تقسيم مجال الدراسة إلى شبكات طولية وعرضية، حيث تمثل نقاط تقاطعها العقد، وتُحدد عندها المتغير **Φ** ومركبتي السرعة **u** و**v**، اللتين تقعان في منتصف القطع التي تربط بين عقدتين متجاورتين

ويتم الحصول على هذا التقسيم من خلال شبكة مكونة من مجموعة من النقاط (العقد). وبهذا، يتم تحديد حجم تحكم حول كل عقدة.

يتم تخزين الكميات القياسية مثل الضغط ودرجة الحرارة في العقد الخاصة بالشبكة، بينما يتم تخزين الكميات المتجهة **u** و**v** في منتصف القطع التي تربط بين العقد. تُدمج المعادلة العامة للنقل على حجم

التحكم المرتبط بالمتغيرات القياسية، كما تُدمج معادلات كمية الحركة على حجم التحكم المرتبط بمركبات السرعة [32] .

بعد إجراء حسابات الكتلة، وكمية الحركة، والطاقة على كل حجم تحكم، يتم تقديم النتائج في شكل مجموعة من المعادلات الجبرية بصورة مصفوفة، يتم حلها بطريقة تكرارية.

بعد إجراء التقسيم العددي، يمكن كتابة معادلة المتغير Φ للخلية P على الشكل التالي [31] .

$$a_p \Phi_p = \sum_{nb} a_{nb} \Phi_{nb} + b \qquad (9.III)$$

حيث:

a_p :هو *معامل المتغير <Φ>في مركز الخلية.*

a_{nb} :هي معاملات المتغيرات Φ في مراكز الخلايا المجاورة.

هو حد مصدر (مصطلح يمثل الإضافة أو الإزالة للكمية المدروسة ضمن الخلية)

انطلاقًا من المخططات المستخدمة في العمل [25] سنقوم بضبط نموذجنا العددي .*ويُستخدم* خوارزمية **SIMPLE** أثناء الحل التكراري للأنظمة المصفوفية الناتجة عن التقسيم العددي، يتم استخدام **معيار للتقارب(convergence)**، لأنه بعد عدد معين من التكرارات، لا تعود الخوارزمية تُحدث تغييرات ملحوظة في القيم بين كل تكرار وآخر. يُستخدم هذا المعيار لإيقاف الحسابات التي قد تستمر إلى ما لا نهاية دون أن تضيف دقة أكبر. ويُعرَّف **المتبقي(résidu)** لعملية حسابية على أنه مجموع الأخطاء الناتجة في جميع الخلايا عند تطبيق المعادلة المُفككة (**9.III**) عندما تُعاد إدخال القيم المحسوبة في المعادلة المفككة، يتم فرض قيمة دنيا للمتبقي، وبمجرد بلوغها، يتم إيقاف الحساب.

ويُكتب المتبقي المُوَحَّد (أو المُنظَّم) للكمية Φ كما يلي [31] *:*

$$R^{\Phi} = \frac{\sum_{pcellules} \left| \sum nb\ a_{nb} \Phi_{nb} + b - a_p \Phi_p \right|}{\sum_{pcellules} \left| a_p \Phi_p \right|} \qquad (\mathbf{10.III})$$

بالاعتماد على الدراسة [25] سنعتمد القيم التالية:

تُثبَّت المتبقيات الخاصة بالسرعة في الاتجاهين **x** و**y** عند 10^{-3}

بينما يُثبَّت متبقي موازنة الطاقة عند $\mathbf{10^{-6}}$

وأخيرًا، يُضبط الفرق المحلي في الكتلة بنسبة 10^{-3}مقارنةً بالكتلة الكلية للتجويف.

الفصل الرابع: النتائج والتعليقات

IV1 .1.المقدمة :

تم اعتماد شبكة منتظمة لتفكيك المعادلات الجبرية التي تم عرضها مسبقا [25] حيث تم استخدام

الشكلIV.1.. (20*80)بحجم شبكة

IV.2. أبعاد التجويف:

الارتفاع h=0.21m

السُمك e=0.025m

IV .3. الشروط الحدية:

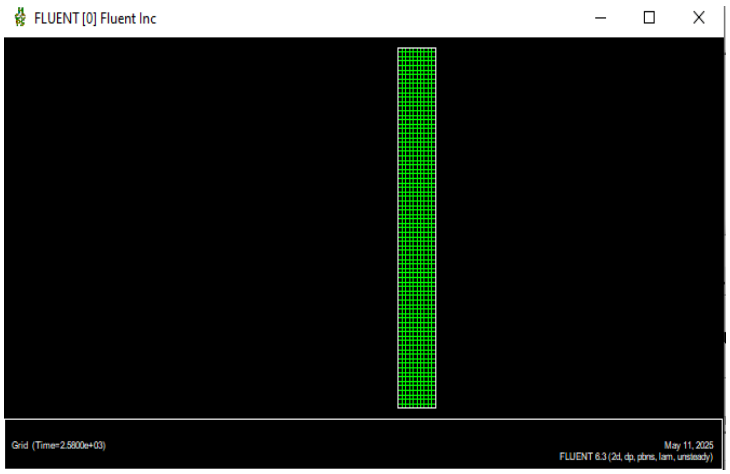
x=0	T= $T_c < T_f$	$u = v = 0$
x=e	T= $T_h > T_f$	$u = v = 0$
y=h	$\frac{\partial T}{\partial y} = 0$	$u = v = 0$
y=0	$\frac{\partial T}{\partial y} = 0$	$u = v = 0$

IV .*4*. خصائص المواد المتغيرة الطور :

المادة متغيرة الطور المستعملة في دراستنا هي: n-octadécane (T_f=28°C).

الجدول.**IV** .*1*. الخصائص الفيزيائية لمواد تغير الطور المحتارة لهذه الدراسة [25].

الخاصية	الوحدات	القيمة
ρ: الكتلة الحجمية	kg/m^3	*773*
C_p: السعة الحرارية النوعية	*J/kg-K*	*2240*
λ: الناقلية الحرارية	*W/m-K*	*0.15*
μ: اللزوجة الديناميكية	*kg/m-s*	*0.0036*
β: معامل التمدد الحراري	*1/K*	*0.00091*



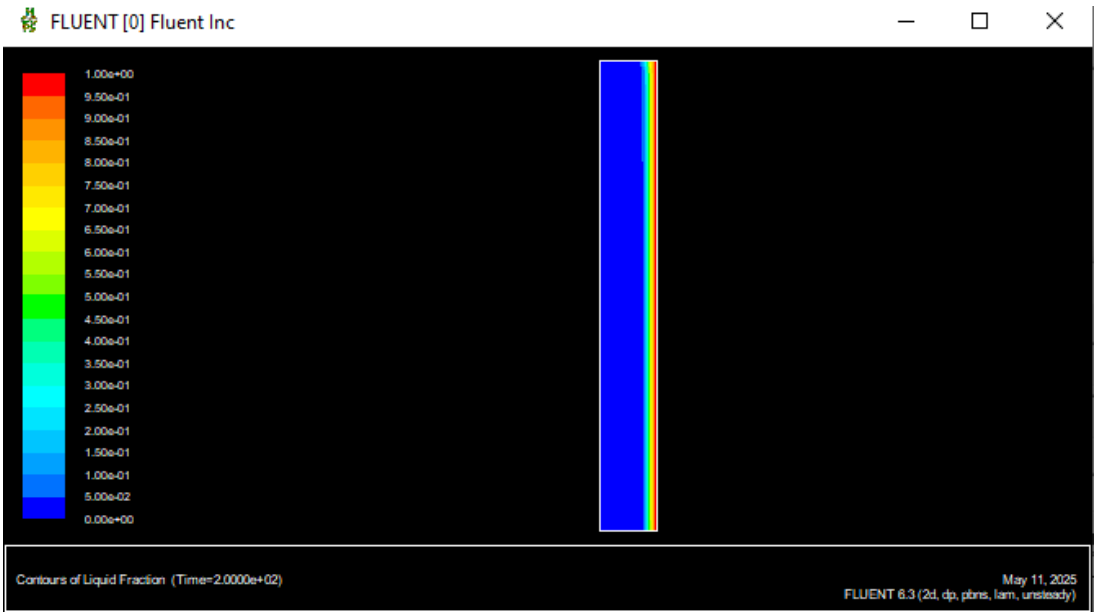
الشكل.**1.IV. الشبكة الحسابية .**

تم الحصول على النتائج لدراستنا باستخدام برنامج الحساب Fluent تُعرض هذه النتائج الرقمية في شكل توزيع نسب السائل وخطوط تساوي درجة الحرارة (isotherms) وخطوط التيار (streamlines).

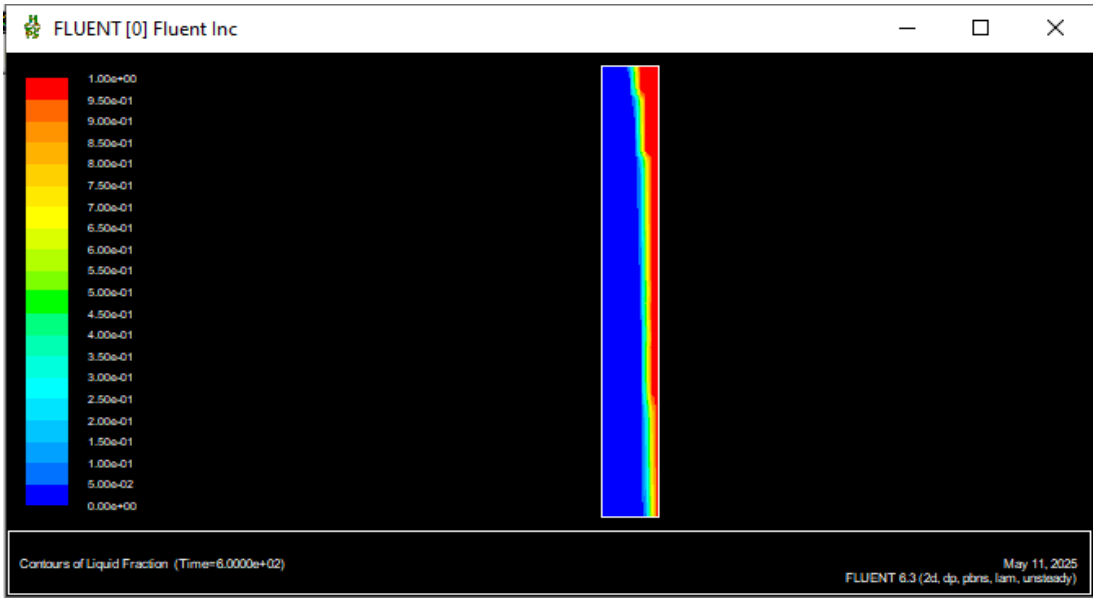
IV .5. تطور حدود الطور الصلب والسائل مع مرور الوقت:

يظهر (الشكل IV.2) تطور الحد الفاصل بين الطورين الصلب و السائل مع مرور الوقت و المراحل المختلفة لعملية الانصهار. يمثل اللون الاحمر الحالة التي تكون فيها المادة متغيرة الطور سائلة و اللون الازرق الحالة الصلبة. اللون الواضح و الذي يفصل بين الطورين يمثل جبهة الانصهار. يفسر ميلان خط الانصهار نحو اليسار في الجهة العلوية الى انتقال جزيئات المادة المنصهرة نحو الاعلى محملة بالحرارة مما يسرع من عملية الذوبان في هذه المنطقة.

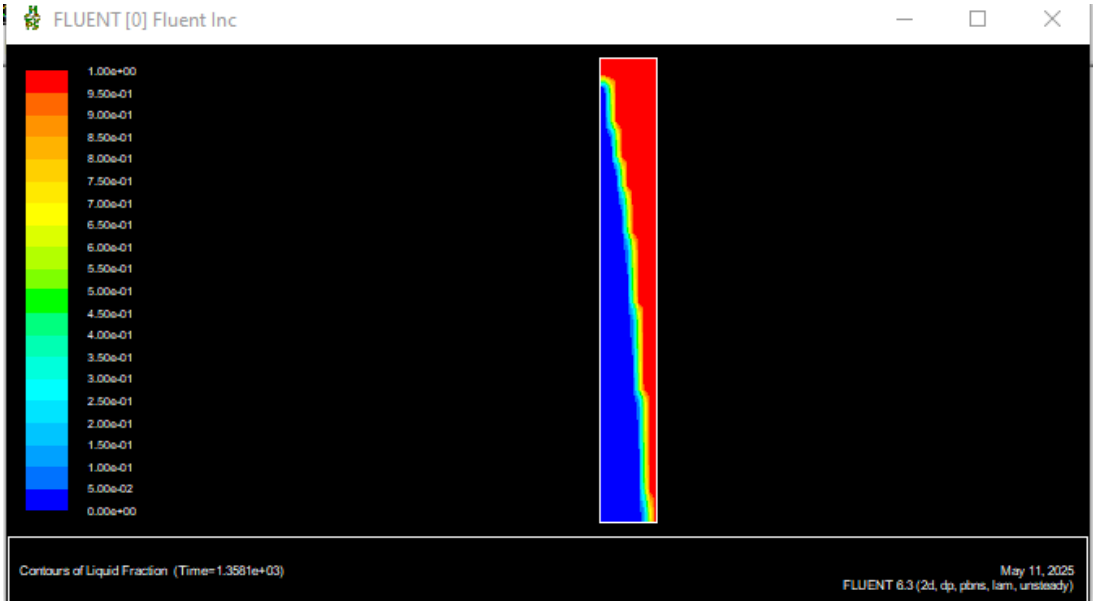
t=3min


FLUENT [0] Fluent Inc
1.00e+00
9.50e-01
9.00e-01
8.50e-01
8.00e-01
7.50e-01
7.00e-01
6.50e-01
6.00e-01
5.50e-01
5.00e-01
4.50e-01
4.00e-01
3.50e-01
3.00e-01
2.50e-01
2.00e-01
1.50e-01
1.00e-01
5.00e-02
0.00e+00
Contours of Liquid Fraction (Time=2.0000e+02)
May 11, 2025
FLUENT 6.3 (2d, dp, pbns, lam, unsteady)

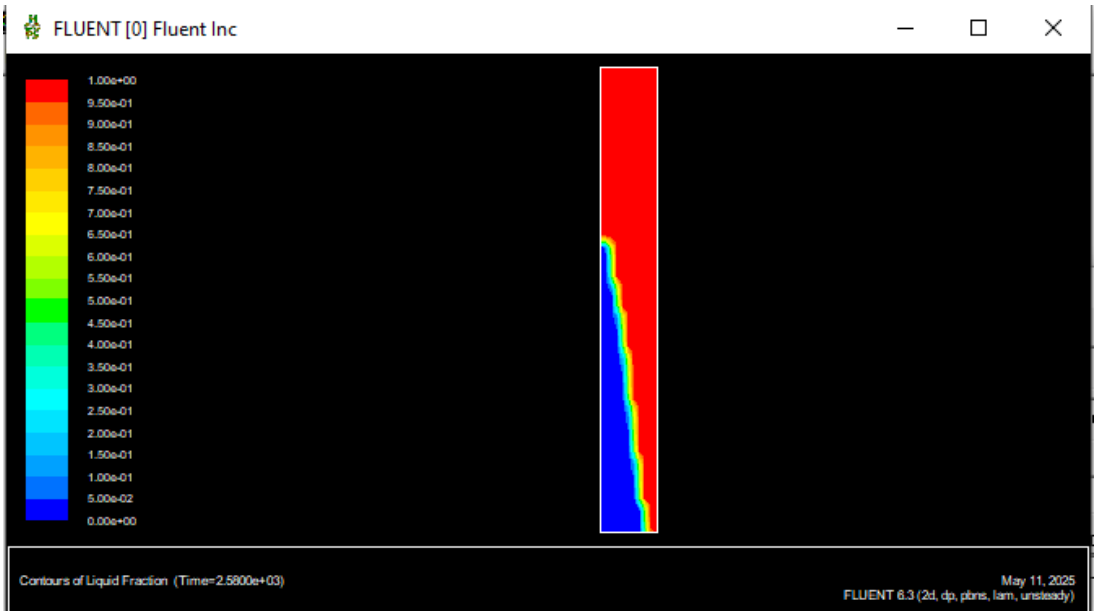
t=10min


FLUENT [0] Fluent Inc
1.00e+00
9.50e-01
9.00e-01
8.50e-01
8.00e-01
7.50e-01
7.00e-01
6.50e-01
6.00e-01
5.50e-01
5.00e-01
4.50e-01
4.00e-01
3.50e-01
3.00e-01
2.50e-01
2.00e-01
1.50e-01
1.00e-01
5.00e-02
0.00e+00
Contours of Liquid Fraction (Time=6.0000e+02)
May 11, 2025
FLUENT 6.3 (2d, dp, pbns, lam, unsteady)

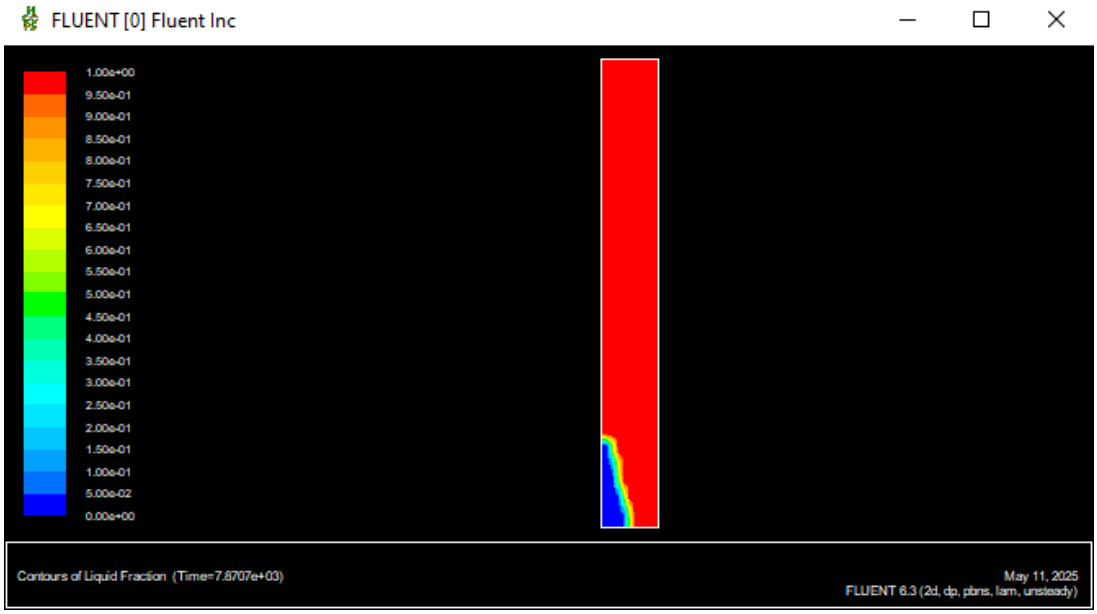
t=22min



t=43min



t=2h19min



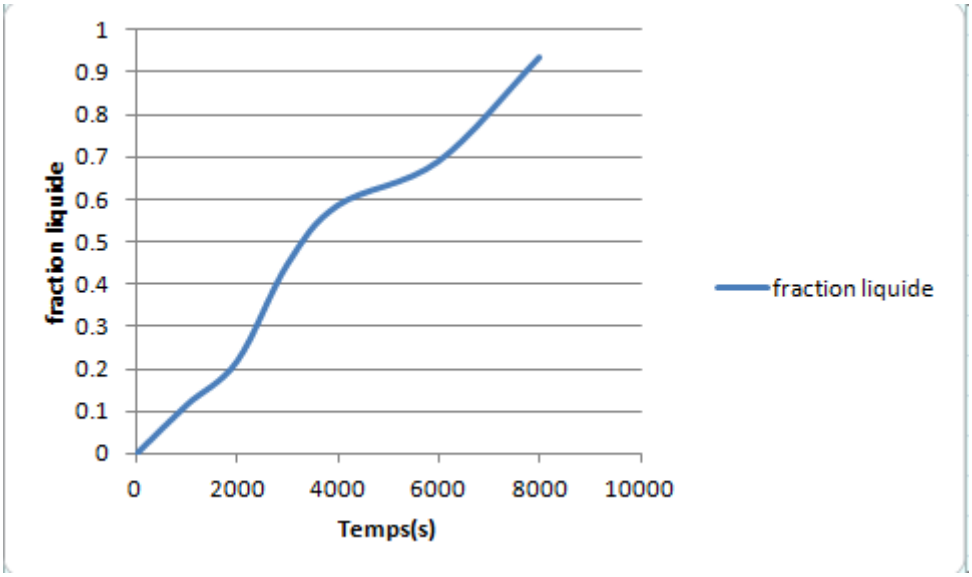
الشكلIV .2. تطور حدود الطور الصلب والسائل مع مرور الوقت.

IV .6.تطور الكسر السائل بدلالة الزمن :

الكسر السائل هو النسبة بين حجم المادة الصلبة المنصهرة في اللحظة **t** والحجم الكلي لمادة تغيير الطور (MCP) في حالتها الصلبة [25] .

ولحساب الكسر السائل، يجب تحديد حجم الجزء المنصهر مقارنة بالحجم الكلي.

الشكل **IV** .4 يمثل تغير كسر السائل مع الزمن خلال عملية الانصهار. في اللحظة الابتدائية تكون كمية المادة المنصهرة معدومة ثم تبدء في التزايد مع مرور الوقت الى ان تصل الى 1 والذي يعبر على الذوبان الكلي للمادة[25].



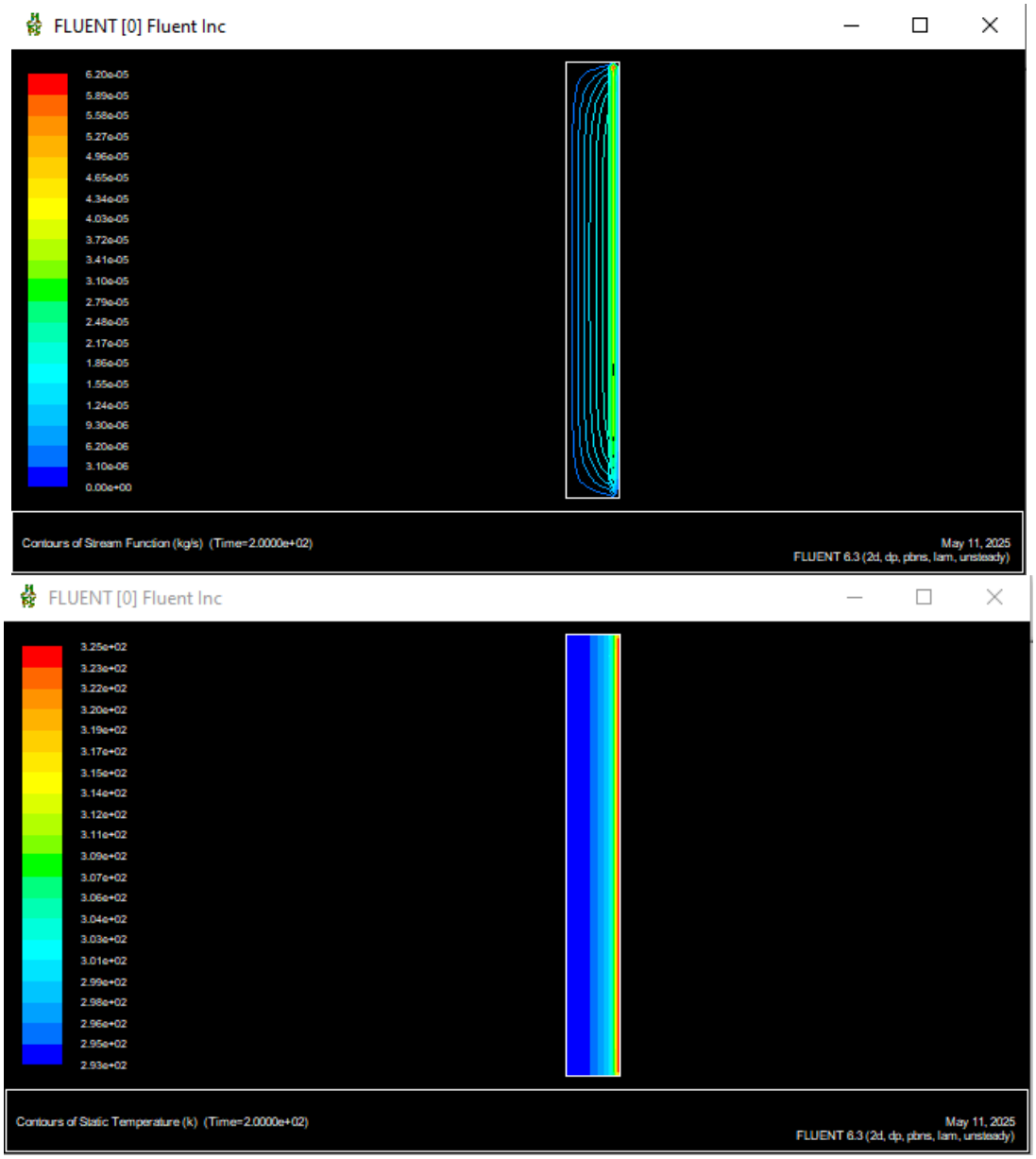
الشكل 3.IV. تغير نسبة السائل مع مرور الزمن .

7.IV.التطور الزمني لخطوط تساوي درجة الحرارة وخطوط التيار :

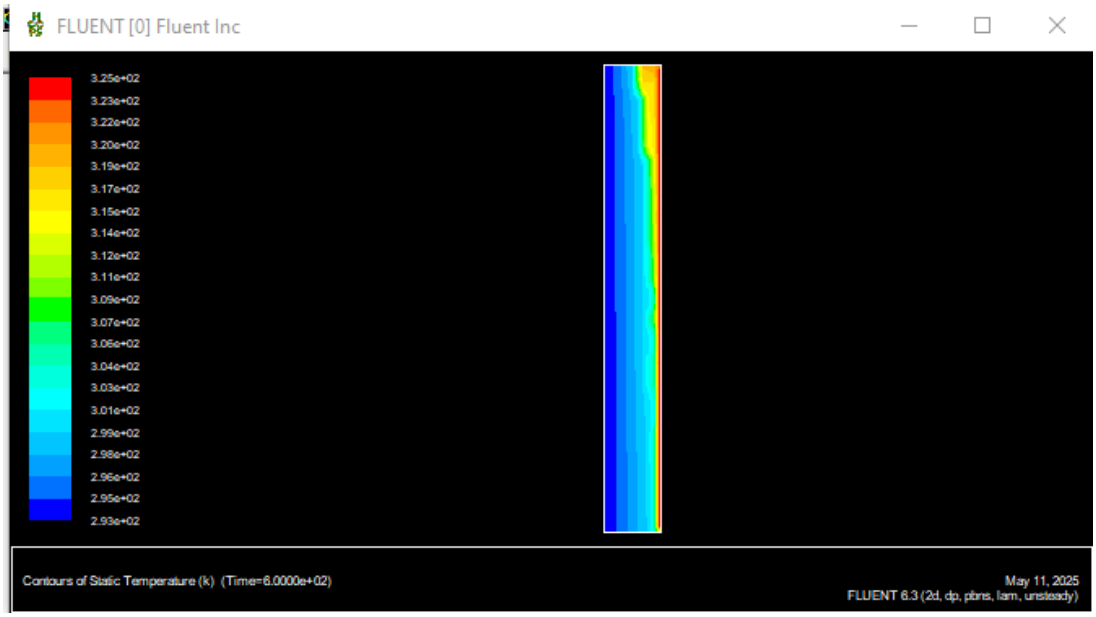
تُظهر الأشكال **5.IV**. أدناه التطور الزمني لخطوط تساوي درجة الحرارة وخطوط الانسياب دالة التيار عند أزمنة انصهار مختلفة. نلاحظ أن قيم منحنيات درجة الحرارة تُحسب بناءً على الفرق بين درجة حرارة الانصهار ودرجة حرارة المادة. نظرًا للحفاظ على درجة حرارة الجدار الساخن فوق درجة حرارة انصهار المادة، تبدأ المادة في الانصهار عند الجدار الأيمن. في بداية عملية الانصهار، تكون خطوط تساوي درجة الحرارة متوازية بالقرب من الجدار الساخن، وذلك بفضل هيمنة انتقال الحرارة بالتوصيل. يرجع ذلك إلى الحركة المحدودة بسبب المقاومة التي تفرضها قوى اللزوجة داخل التجويف، يصبح نمط انتقال الحرارة محكومًا بشكل متزايد بالحمل الحراري مع زيادة الكسر السائل للمادة متغيرة الطور ويصبح الحمل الحراري لاحقًا هو النمط الوحيد لانتقال الحرارة داخل المادة متغيرة الطور السائلة. يحدث الانصهار بشكل أسرع في المنطقة العلوية من التجويف مقارنةً بالجزء السفلي بسبب درجات الحرارة المرتفعة في الجزء العلوي، وهذا ما يفسر شكل جبهة الانصهار.

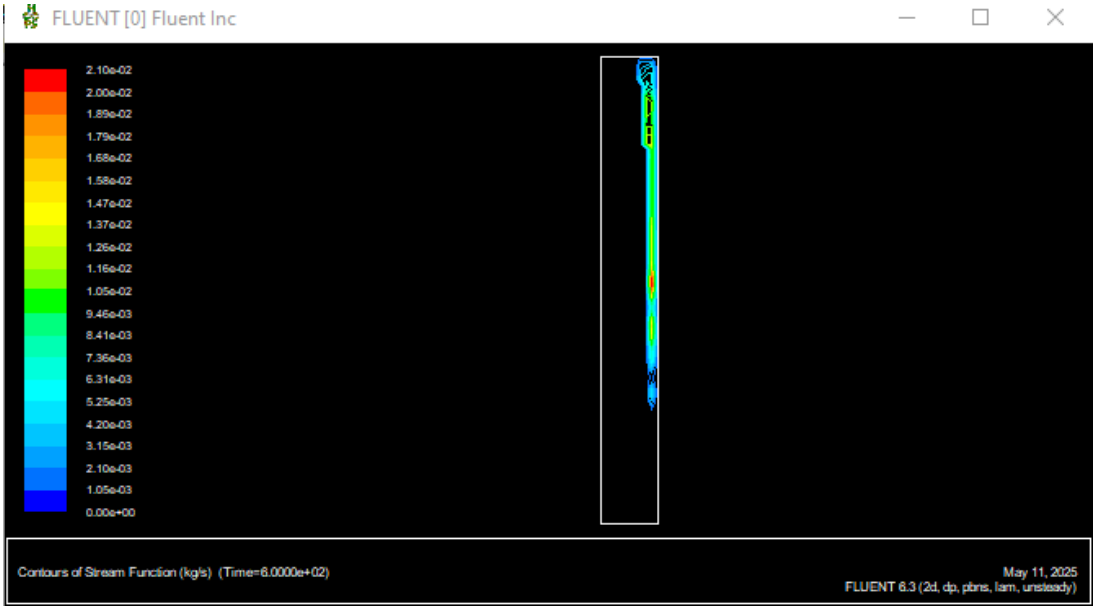
تتراكم الحرارة تدريجيًا في المادة متغيرة الطور المنصهرة أثناء صعودها على طول الجدار الساخن، لتصل إلى الأعلى بكمية كبيرة من الطاقة الحرارية. تؤدي الحرارة المتراكمة في المادة متغيرة الطور إلى تسريع الانصهار في الجزء العلوي، ثم تهبط على طول السطح البيني بين الصلب والسائل مطلقةً حرارتها. تصل إلى قاع التجويف بأقل كمية من الطاقة الحرارية، مما يفسر ضعف الانصهار في هذه المنطقة من التجويف.

t=3min

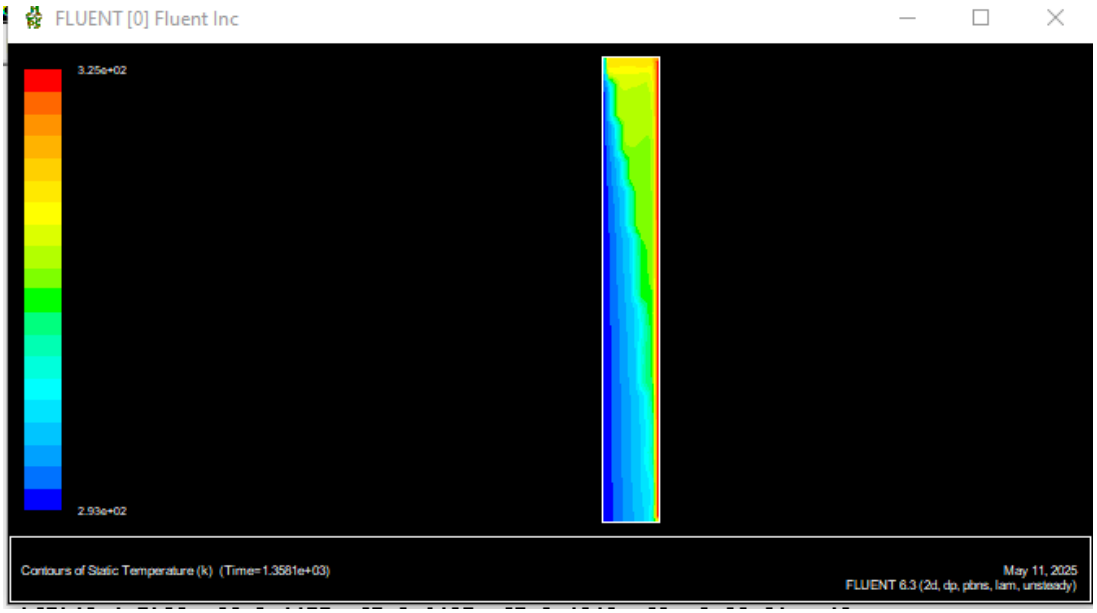


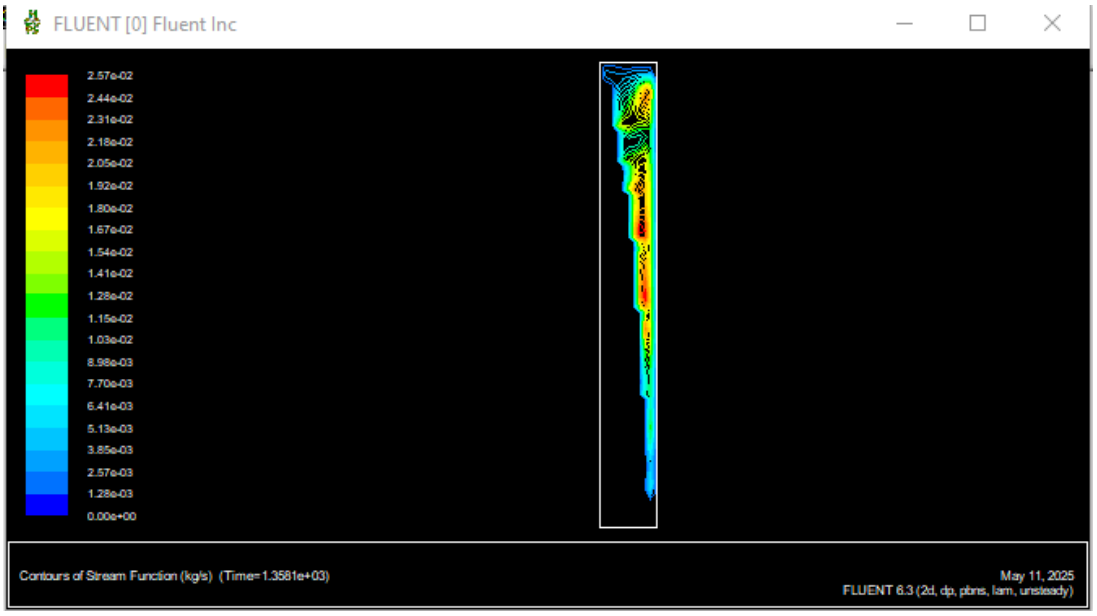
t=10min


FLUENT [0] Fluent Inc
3.25e+02
3.23e+02
3.22e+02
3.20e+02
3.19e+02
3.17e+02
3.15e+02
3.14e+02
3.12e+02
3.11e+02
3.09e+02
3.07e+02
3.06e+02
3.04e+02
3.03e+02
3.01e+02
2.99e+02
2.98e+02
2.96e+02
2.95e+02
2.93e+02
Contours of Static Temperature (k) (Time=6.0000e+02)
May 11, 2025
FLUENT 6.3 (2d, dp, pbns, lam, unsteady)

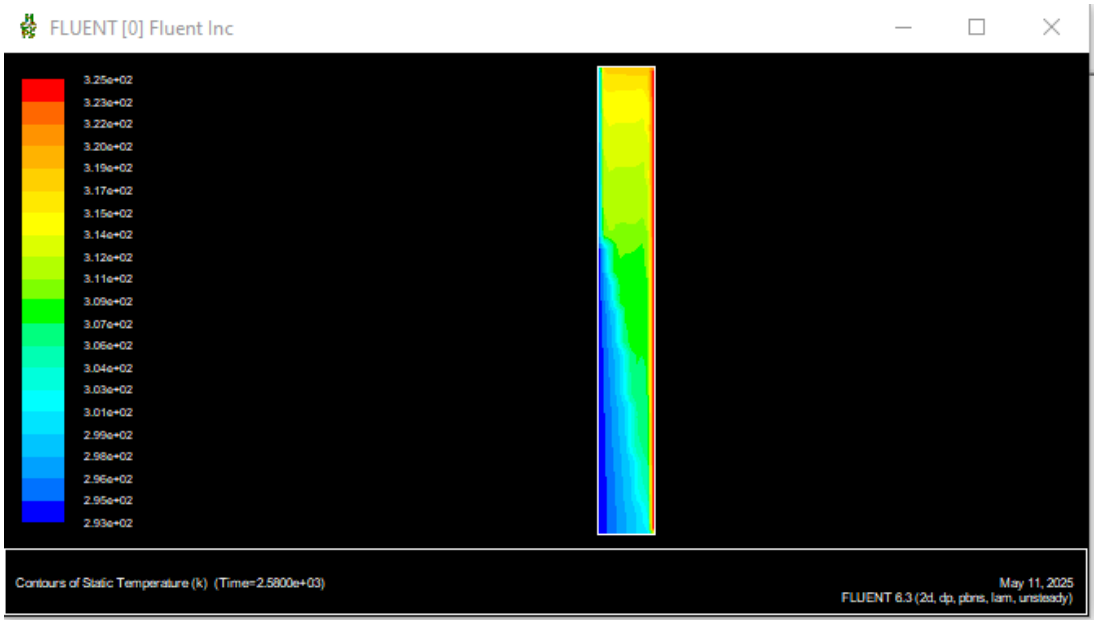

FLUENT [0] Fluent Inc
2.10e-02
2.00e-02
1.89e-02
1.79e-02
1.68e-02
1.58e-02
1.47e-02
1.37e-02
1.26e-02
1.16e-02
1.05e-02
9.46e-03
8.41e-03
7.36e-03
6.31e-03
5.25e-03
4.20e-03
3.15e-03
2.10e-03
1.05e-03
0.00e+00
Contours of Stream Function (kg/s) (Time=6.0000e+02)
May 11, 2025
FLUENT 6.3 (2d, dp, pbns, lam, unsteady)

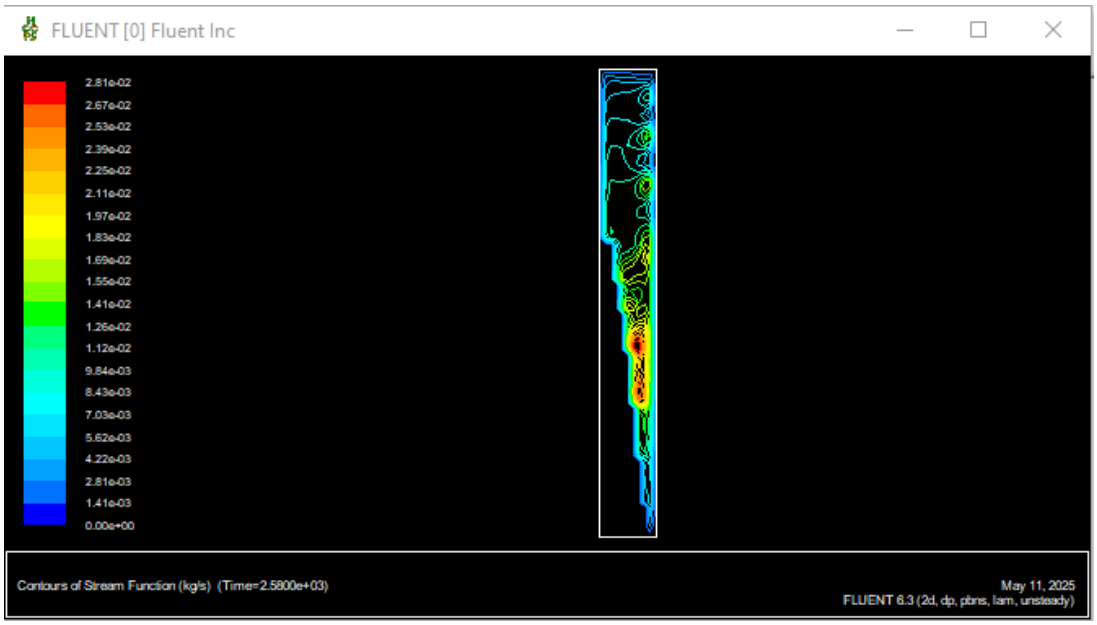
t=22min


FLUENT [0] Fluent Inc
3.25e+02
2.93e+02
Contours of Static Temperature (k) (Time=1.3581e+03)
May 11, 2025
FLUENT 6.3 (2d, dp, pbns, lam, unsteady)

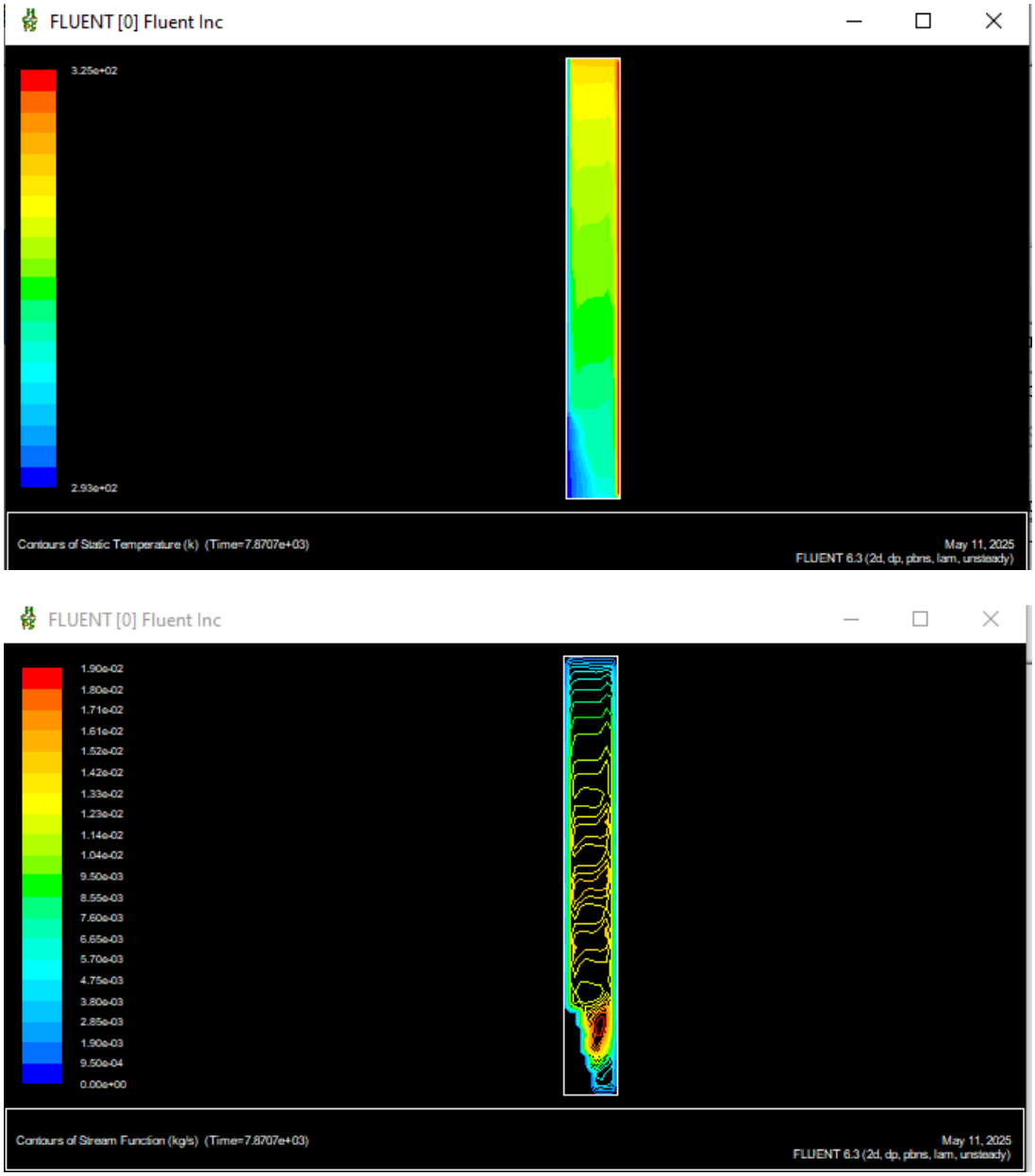

FLUENT [0] Fluent Inc
2.57e-02
2.44e-02
2.31e-02
2.18e-02
2.05e-02
1.92e-02
1.80e-02
1.67e-02
1.54e-02
1.41e-02
1.28e-02
1.15e-02
1.03e-02
8.98e-03
7.70e-03
6.41e-03
5.13e-03
3.85e-03
2.57e-03
1.28e-03
0.00e+00
Contours of Stream Function (kg/s) (Time=1.3581e+03)
May 11, 2025
FLUENT 6.3 (2d, dp, pbns, lam, unsteady)

t=43mn


FLUENT [0] Fluent Inc
3.25e+02
3.23e+02
3.22e+02
3.20e+02
3.19e+02
3.17e+02
3.15e+02
3.14e+02
3.12e+02
3.11e+02
3.09e+02
3.07e+02
3.06e+02
3.04e+02
3.03e+02
3.01e+02
2.99e+02
2.98e+02
2.96e+02
2.95e+02
2.93e+02
Contours of Static Temperature (k) (Time=2.5800e+03)
May 11, 2025
FLUENT 6.3 (2d, dp, pbns, lam, unsteady)


FLUENT [0] Fluent Inc
2.81e-02
2.67e-02
2.53e-02
2.39e-02
2.25e-02
2.11e-02
1.97e-02
1.83e-02
1.69e-02
1.55e-02
1.41e-02
1.26e-02
1.12e-02
9.84e-03
8.43e-03
7.03e-03
5.62e-03
4.22e-03
2.81e-03
1.41e-03
0.00e+00
Contours of Stream Function (kg/s) (Time=2.5800e+03)
May 11, 2025
FLUENT 6.3 (2d, dp, pbns, lam, unsteady)

t=2h19mn



الشكل.**4.IV.التطور الزمني لخطوط تساوي درجة الحرارة و خطوط التيار .**

8.IV.التغير الأفقي لدرجة الحرارة داخل سمك الجدار

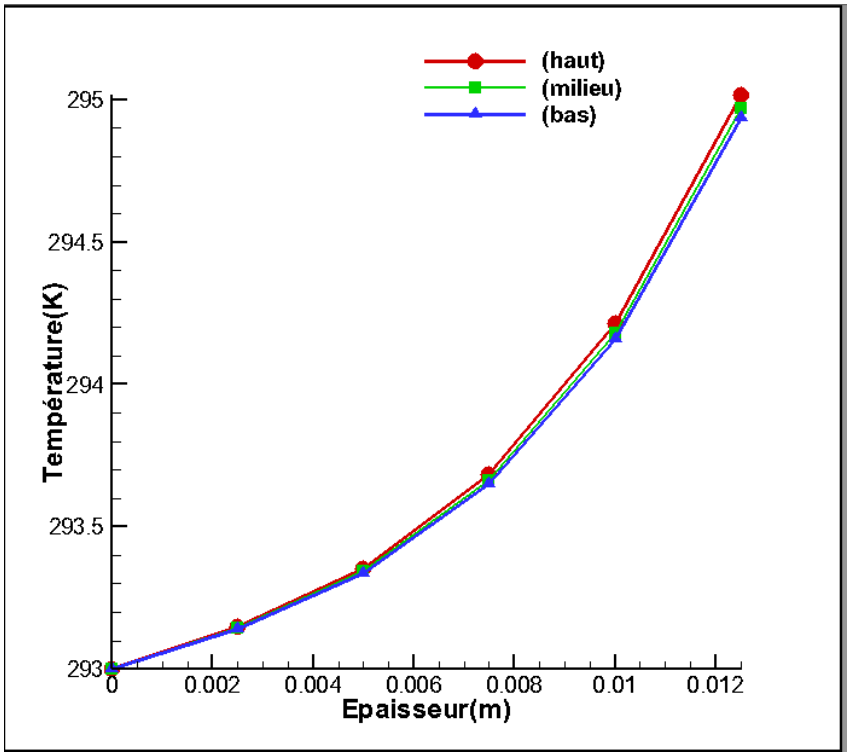
يبين الشكل **5.IV**. تغير درجة الحرارة الأفقية داخل سمك الجدار في عدة أزمنة متتالية و في ثلاث مواضع مختلفة على طول الجدار : H,M,L (y=0.16 , y=0.105 , y=0.01)

في بداية الانصهار، تبقى درجة الحرارة كما هي في المواضع الثلاث. هذا يرجع إلى التوصيل، الذي يُعدّ النمط الوحيد لانتقال الحرارة في هذه المرحلة من الانصهار. كلما ابتعدنا عن الجدار الساخن،

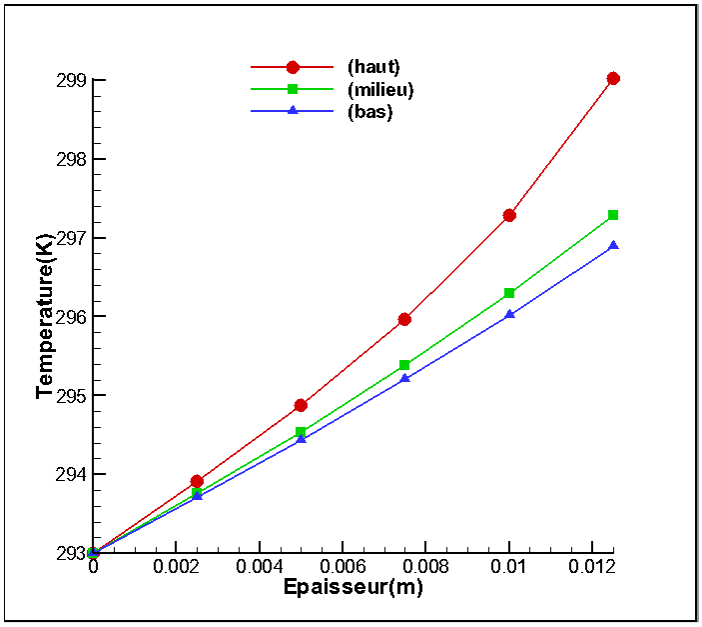
انخفضت درجة الحرارة. مع مرور الوقت يصبح الحمل الحراري عندئذٍ هو نمط انتقال الحرارة السائد ويلاحظ تباين في توزع درجات الحرارة في المناطق الثلاث. المنطقة العلوية هي الأكثر حرارة، تليها المنطقة الوسطية ثم المنطقة السفلية . هذا يفسر بداية الانصهار من الأعلى إلى الأسفل داخل المادة متغيرة الطور.

مع مرور الوقت أكثر فأكثر يحدث استقرار في درجات الحرارة في الطور السائل في المناطق الثلاث ليتقارب في الأخير إلى درجة حرارة الجدار الساخن.

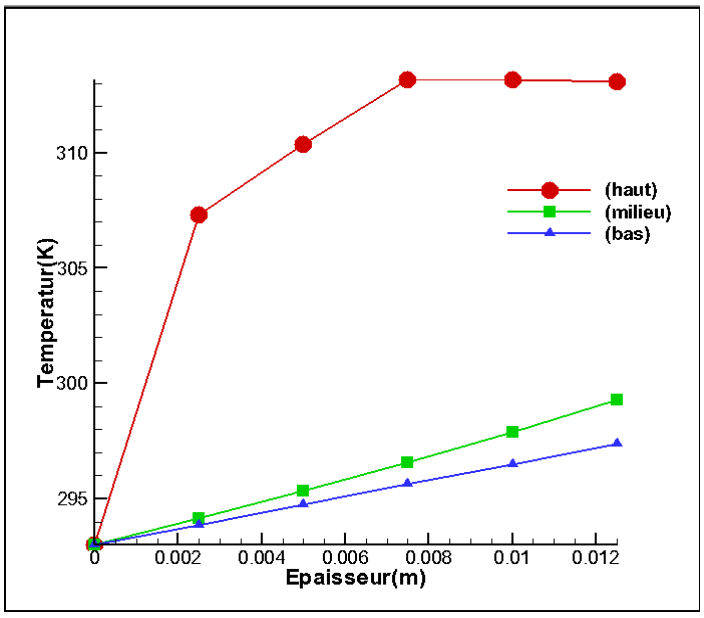
t=3 min



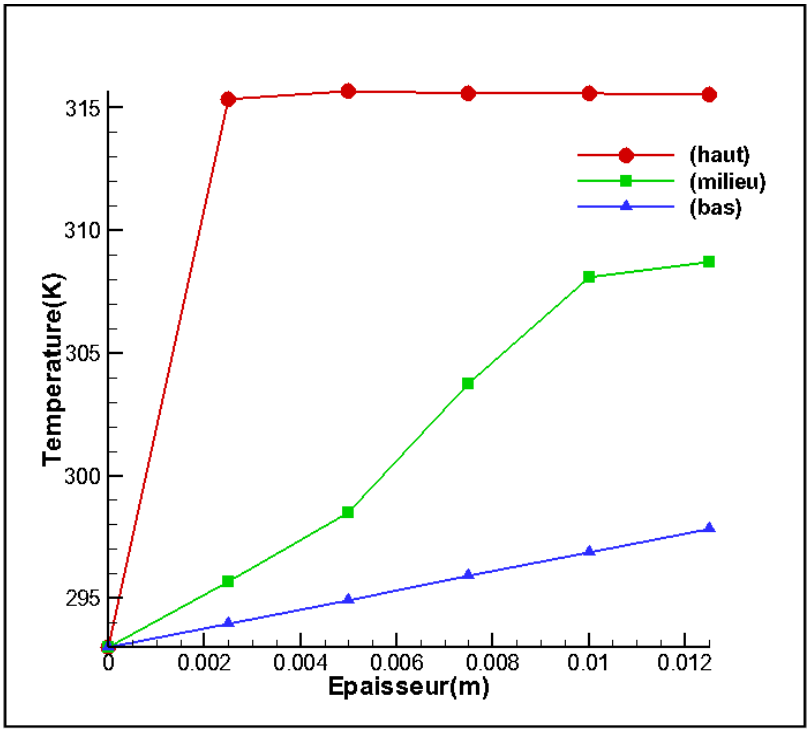
t=10min



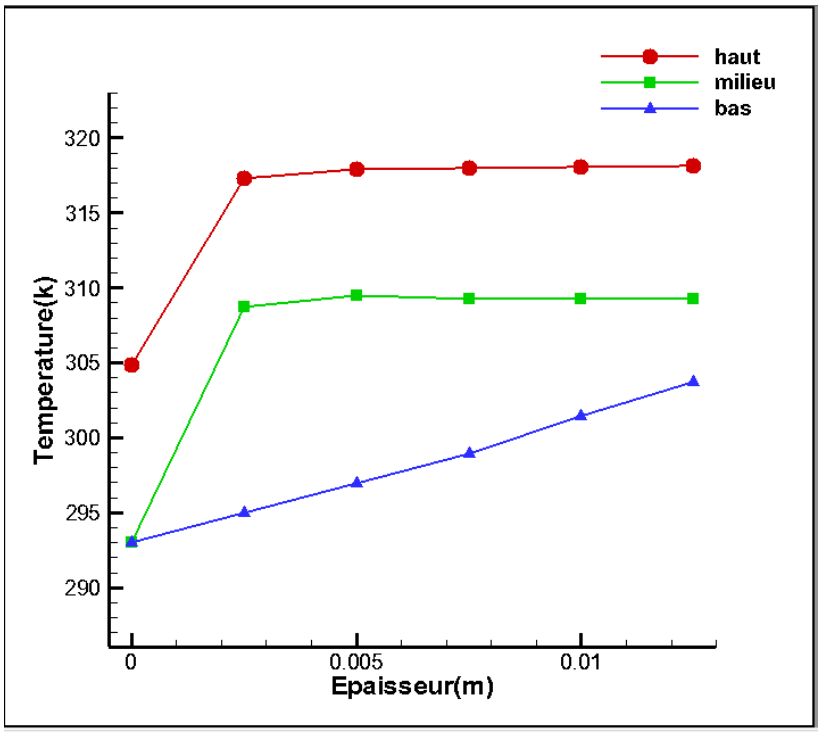
t=22min



t=43 min



t=2h19min



الشكل .5.IV.التغير الافقي لدرجة الحرارة داخل سمك الجدار بدلالة الزمن .

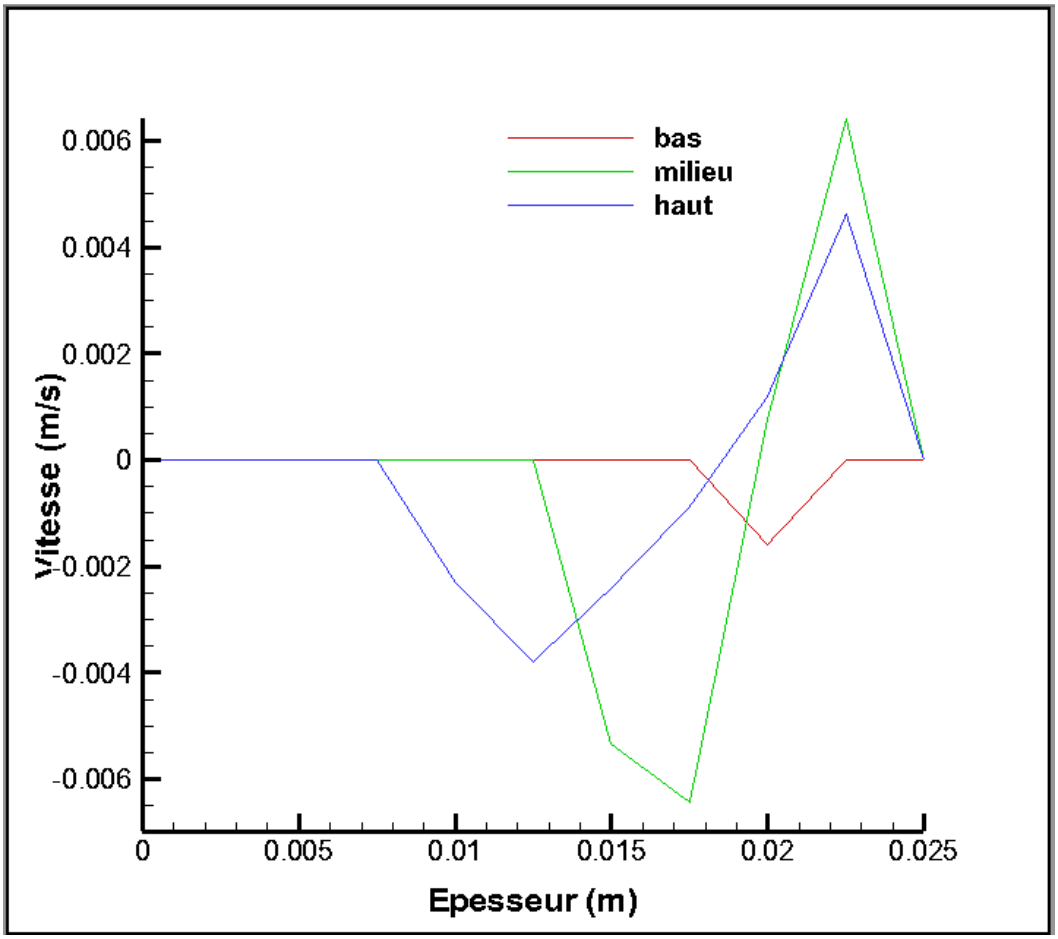
9.IV. تطور السرعة بدلالة سُمك التجويف :

يبين الشكل **IV.**7.تغير السرعة الأفقية داخل سمك التجويف في ثلاثة مواضع و أزمنة مختلفة.

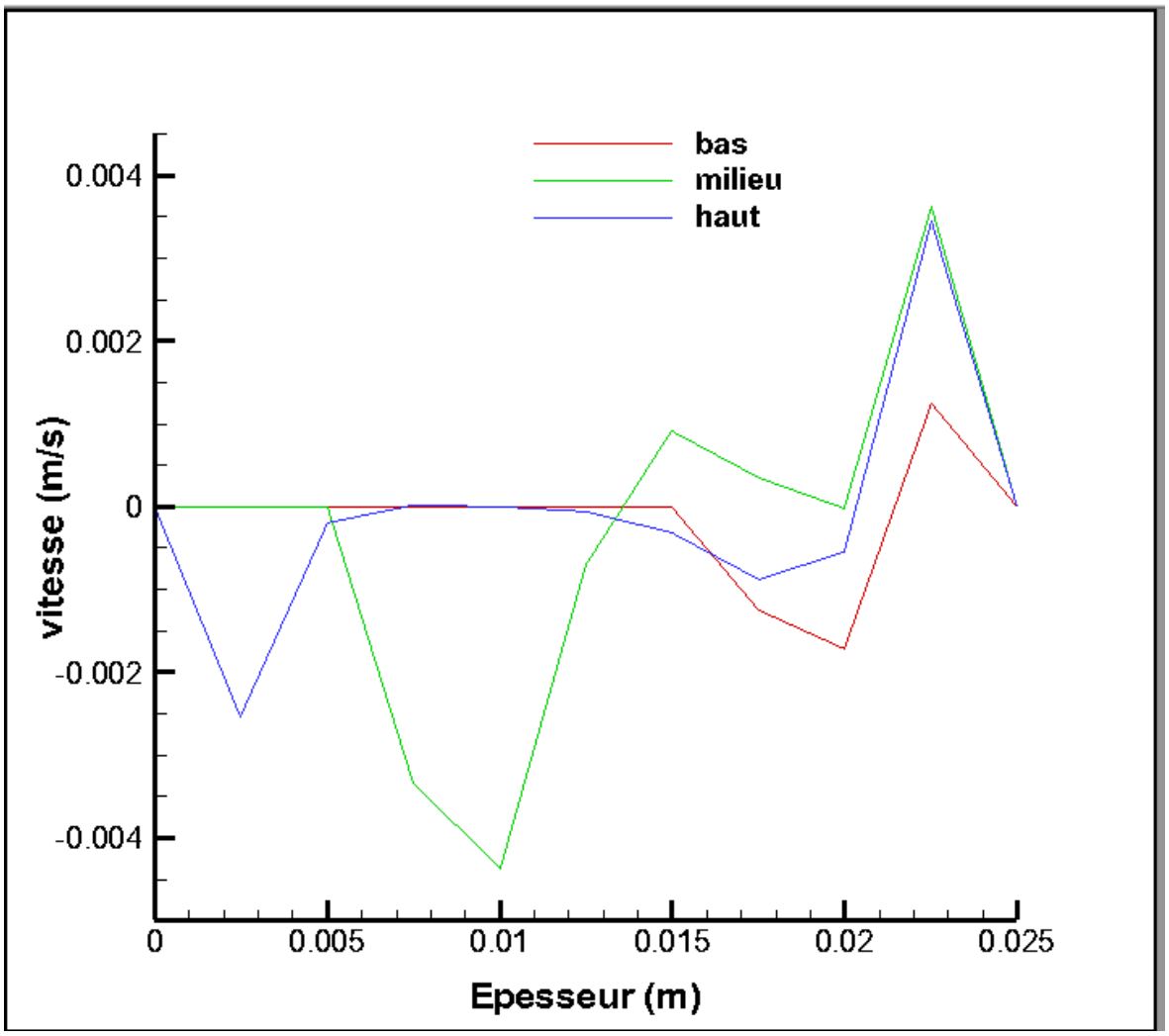
نلاحظ من المنحنيات أدناه اتجاه التدفق وشدته. تكون السرعة صفرية في الطور الصلب، وعند السطح البيني بين الصلب والسائل، وعند الجدار الساخن .بشكل عام، في المواضع الثلاثة ضمن الطور السائل، تكون السرعة تصاعدية بالقرب من الجدار الساخن وتنازلية بالقرب من السطح البيني. وبناءً على ذلك، تأخذ السرعة قيمًا قصوى في الاتجاهين الموجب والسالب على التوالي، مما يشير إلى حركة الجزيئات عكس اتجاه عقارب الساعة.

يحدث التدفق في الجزء العلوي والأوسط من الحيز، على عكس قاع التجويف (الجزء السفلي (حيث تكون مشاركة السائل قليلة وتشكل منطقة ميتة (سرعة صفرية). بدءًا من الزمن t=22min دقيقة وحتى t=43 min دقيقة، تنخفض قيم السرعات بسبب زيادة الكسر السائل.

t=22min


bas
milieu
haut
0.006
0.004
0.002
0
-0.002
-0.004
-0.006
Vitesse (m/s)
0
0.005
0.01
0.015
0.02
0.025
Epesseur (m)

t=43min



الشكل **IV.6**.تغير السرعة الأفقية داخل سمك التجويف.

الخلاصة العامة

الخلاصة العامة

لقد أتاحت لنا الدراسة الرقمية لانصهار مادة متغيرة الطور (MCP) داخل تجويف مستطيل الشكل استخلاص الاستنتاجات التالية:

- المواد متغيرة الطور (MCP) هي مواد تُستخدم في مجالات متعددة. وهي تُمكّن تخزين الطاقة الحرارية عن طريق الحرارة الكامنة.
- النموذج الرياضي الذي يحاكي انصهار المادة متغيرة الطور يشمل كلاً من الطورين الصلب والسائل.
- برنامج Fluent هو أداة محاكاة رقمية قوية وسريعة.
- في بداية عملية الانصهار، يكون انتقال الحرارة في المادة متغيرة الطور (MCP) توصيليًا بحتًا.
- مع مرور الوقت، يصبح الحمل الطبيعي هو النمط الأكثر هيمنة في عملية الانصهار، وبالتالي يؤثر على سرعة وطريقة انصهار المادة متغيرة الطور.(MCP)
- جبهة الانصهار ليست خطًا مستقيمًا رأسيًا، بل هي خط ذو شكل عشوائي يميل في اتجاه التدفق الحملي. يكون انصهار المادة متغيرة الطور (MCP) في النصف العلوي من التجويف أسرع منه في الجزء السفلي.

قائمة المراجع

قائمة المراجع

[1]Boutaoui.M“Simulation Numérique Du Stockage Thermique Par Chaleur Latente Dans Une Capsule Elliptique”. MA thesis. Universite´ M’hamedBougara - Boumerdes,2016.

[2]SOUAD.K “elaboration de nouveaux composites pour l’amelioration de l’inertie thermique des materiaux de construction”. In: ().

[3]**hait.H**"Transfer thermique avec Changement de Phase dans une géométrie cartésienne**"**mémoire de masterTébeessa , (2024).

[4]Larichi .A ,Bachou .O,«Etude numérique de la charge de chaleur d’un matériau de changement de phase mousse métallique dans une unité de stockage thermique».» mémoire de fin d'etudesMaster (202/2024) Université ibn khaldoun de tiaret.

[5] M. Telkes Thermal Storage for Solar Healing and cooling. Proceedings of the workshop on Solar energy Storage subsystems for the Healing and cooling of buildings. Charlottesville, Virginia, USA. (1975)

[6] Deffass. M « Intégration a des matériaux a changement de phase (MCPs) comme système de stockage de la chaleur » mémoire Master (2021) Universite Mohamed Seddik Den Yahia -JiJel

[7]**Lane,** Solar Heat Storage: Latent Heat Matériel, Volume 1 : Background and Scientific Principales. USA : CRC **(**1983**).**

[8]**Raj, V, Anthony Raoul et R. Velraj,** «Review on free cooling of buildings using phase changematerials».RenewableandSustainableEnergyReviews,vol.14,p.2819-2829, (2010).

[9]**A.Guezei**, Etude numérique des transferts de chaleur et de masse lors de la fusion d’un matériau à changement de phase, mémoire de master : Installations énergétiques et turbomachines, Université Mohamed Larbi Ben M’hidi, Oum El bouaghi, (2018).

[10]**S.Berreksi,S.Latarsa,**Simulationnumériquedustockagethermiqueparchaleurlatente dans une capsule sphérique, mémoire de master : systèmes Thermique et Combustion, Université M’Hamed Bougara, Boumerdes, (2016).

[11]**M.Benbrika,** Etude Thermique des Performances d'un Echangeur de Chaleur à Section EllipticquepourleStockageThermiqueparChaleurLatente,thèsededoctorat,UniversitéAmar Telidji – Laghouat, (2020).

[12]**D. Feldman, D. Banu, D. Hawes, A. Athienitis and C. Liu**, Energy storage building materialswithorganicPCM's,28thIntersocietyEnergyConversionEngineeringConf,Georgia,

Alta, Vol. 2, pp. 143-148, August 8-13, (1993).

[13]**A. Sharma**, Review on thermal energy storage with phase change material and applications, Renewable and sustainable energy reviews 13 (2009).

[14]**A.abhat,S.Aboul-Enein,**N. Malatidis«Heatoffusionstoragesystemforsolarheating applications ». C. Den Quden, (1981).

[15]**H.Saib,** Etude de simulation des phénomènes de transfert thermique lors de la solidification d'alliages, mémoire de master (2009).

[16]**A.abhat,S. Aboul-Enein**,N. Malatidis«Heatoffusionstoragesystemforsolarheating applications ». C. Den Quden, (1981).

[17]**A. GONTARD, K. GRYSKA, L. LALLEMAND** « Amélioration de la conductivité thermiquedematériauàchangementdephase»,UniversitédePaudespaysdel'Adour(2012).

[18]**E.Oró Prim** « Thermal energy storage (TES) using phase change materials (PCM) for cold applications », University de Lleida, (2013).

[19]**A.Guezei**, Etude numérique des transferts de chaleur et de masse lors de la fusion d'un matériau à changement de phase, mémoire de master : Installations énergétiques et turbomachines, Université Mohamed Larbi Ben M'hidi, Oum El bouaghi, (2018).

[20]**A. GONTARD, K. GRYSKA, L. LALLEMAND** « Amélioration de la conductivité thermiquedematériauàchangementdephase»,UniversitédePaudespaysdel'Adour (2012).

[21]**D.Guerraiche**,Contributionàl'étudedesTransfertsThermiqueslorsdelaSolidification d'un Liquide dans un Capteur Solaire, thèse de doctorat : Energétique, Université Batna 2 – Mostefa Ben Boulaïd, (2020).

[22]**K.Azzouz**, modélisation dynamique d'un système frigorifique domestiquer couple à un matériau a changement de phase ,(2007).

[23]**B.Binet** «Etudede lafusiondansdesenceintesmuniesdesourcesdechaleurdiscrètes ». Sherbrooke (Québec), CANADA (Novembre 1998).

[24]Hocine, H **.** Etude numérique de la fusion d'un matériau à changement de phase contenue dans une cuve de stockage, Université SAAD DAHL BLIDAI, mémoire de master, (2016/2017).

[25]Mr. SERRADJ Mohammed "CONTRIBUTION A L'ETUDE DU PHENOMENE DE LA FUSION DES MATERIUX A CHANGEMENT DE PHASE " mémoire de magistère (2012/2013) . Université Des Sciences Et De La Technologie Mohamed Boudiaf D'Oran.

[26] زروانة نوار دراسة عددية لانتقال الحرارة داخل مادة متغيرة الطور بطريقة الحجوم المنتهية مخطط ضمني تبسة مذكرة تحرج ماستر تخصص طاقوية (2021/2020)

سعدون صباح، دراسة عددية لانتقال الحرارة داخل مادة متغيرة الطور بطريقة الحجوم المنتهية تبسة مذكرة تحرج ماستر تخصص[27] طاقوية(2021/2020)

[28] Benammar houcine " etude numerique de la performance thermique des murs avec l'integration d'un materiau a changement de phase (mcp) " memoire de master academique (12/07/2021) universite abdel hamid ben badis – Mostaganem

[29]Messai.T, "Simulation du transfert de chaleur lors du changement de phase Solide-Liquide" mémoire de magistere . Université Mohamed KHIDER – Biskra

[30] Sofiane et Abdelhak, étude numérique de stockage thermique par les matériaux à chargement de phase utilisées dans les échangeurs de chaleur, université IBN KHALDOUN de –TIARET-, mémoire de master (énergétique), (01/07/2021).

[31]Guillaume Vidalain*Modélisation des phénomènes convectifs lors du* changement de phase solide-liquide par utilisation de l'équation de diffusion de la chaleur et d'une forme modifiée de la conductivité, 2007.

[32] Guestal Mabrouk, Modélisation de la Convection Naturelle Laminaire dans Une Enceinte Avec Une Paroi Chauffée Partiellement, Mémoire Présenté Pour l'Obtention du Diplôme de Magistère, 2010.