



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة عمار ثليجي - الأغواط

كلية التكنولوجيا

قسم الهندسة الميكانيكية



أطروحة دكتوراه نظام ل.م.د.  
ميدان علوم وتكنولوجيا-تخصص هندسة ميكانيكية فرع-طاقويات-

## دراسة نظام التخزين الحراري الموسمي للإشعاع الشمسي على شكل حرارة كامنة

Etude d'un système de stockage thermique saisonnier du  
rayonnement solaire sous forme de chaleur latente

تقديم:  
نجام خولة

لجنة المناقشة:

رئيس اللجنة	جامعة عمار ثليجي	أ.د. احمد يوسف
مناقش	جامعة سكيكدة	أ.د. الحسن مزعاش
مناقش	جامعة جيجل	د. عبدالغني لعور
مناقش	جامعة عمار ثليجي	أ.د. احمد مجلد
مناقش	جامعة عمار ثليجي	أ.د. لحضر حشاني
المشرف	جامعة عمار ثليجي	أ.د. محمد تقار

جوان 2021

## كلمة شكر

أحمد الله السميع المجيب الذي أنعم علي بأن وفقني ويسر أمري حتى وقفت في مقامي هذا رغم الصعاب والمشقات التي واجهتني في إنجاز هذا البحث.  
اللهم علمنا ما ينفعنا، وانفعنا بما علمتنا وزدنا علماً وعملاً وفقهاً في الدين وتقبل منا إنك أنت السميع العليم.

لن أنسى في مقامي هذا أن أدعو لمن أوصاني الله بهما بقوله تعالى:

(وَقَضَىٰ رَبُّكَ أَلَّا تَعْبُدُوا إِلَّا إِيَّاهُ وَبِالْوَالِدَيْنِ إِحْسَانًا ۗ إِمَّا يَبُلُغَنَّ عِنْدَكَ الْكِبَرَ أَحَدُهُمَا أَوْ كِلَاهُمَا فَلَا تَقُلْ لَهُمَا أُفٍّ وَلَا تَنْهَرْهُمَا وَقُلْ لَهُمَا قَوْلًا كَرِيمًا \* وَخَفِضْ لَهُمَا جَنَاحَ الذُّلِّ مِنَ الرَّحْمَةِ وَقُلْ رَبِّ ارْحَمْهُمَا كَمَا رَبَّيْتَنِي صَغِيرًا)

بارك الله فيكما فمن دونكما ما دخلت هذا الصرح العظيم لأنكما زرعتما في حب العلم والعمل...

أمي الغالية التي أوصاني بها الرسول ثلاثاً، والجنة تحت أقدامها.

أبي الغالي فليتغمذك الله برحمته.

إلى من رسم طريقي و أناره .....وأمدني بالعلم و أفاضه.....

وكان بسعة اطلاعه وثقافته ومعرفته ...خير معلم وخير موجه وخير مرشد.....

إلى من قدم لي كل ما أطمح إليه ولم يبخل علي يوماً بثمرة تعبته وخالص خبرته...

إليك أيها المعلم الفاضل أفق احتراماً وتقديراً وتبجيلاً.....

ولا يسعني إلا أن أقدم لك خالص الشكر والامتنان.....

وبشكر خاص، أود أن أشكر مشرفي الأستاذ البروفيسور تقار محمد على توجيهاته التي لا تقدر بثمن وتشجيعه ودعمه طوال مدة هذا العمل.

شكر خاص وامتنان للدكتور حديبي طارق و الأستاذ البروفيسور حشاني لخضر.

كما أخص بالشكر كلا من الأستاذ الدكتور علي بالقاسم و الأستاذ الدكتور حمدي أحمد لما قدماه من تسهيلات لإنجاح هذا العمل.....

## الملخص

إن معظم مواد متغيرة الطور (PCMs) لها موصلية حرارية منخفضة مما يحد من تطبيقها في الأنظمة الحرارية. يمكن تحسين الموصلية الحرارية الفعالة عن طريق تضمين الزعانف المعدنية، الجسيمات النانوية، PCM المتعددة، الرغوات المعدنية، أنابيب الحرارة و التقنيات المشتركة. الهدف من هذه الدراسة هو التحقيق في تحسين الأداء الحراري لنظام تخزين حراري من نوع قشرة و أنبوب عن طريق تضمين صفائح نانوية من الجرافين (GNPs) المشتتة بكميات صغيرة في 1-تيترايديكانول ( $C_{14}H_{30}O$ ). يتم وضع PCM المحسن بالنانو (NPCM) في الفراغ الحلقي (قشرة). بالإضافة إلى ذلك، تم استخدام تقنية مشتركة الجسيمات النانوية/الرغوة المعدنية لتحسين الأداء الحراري لنظام القشرة و الأنبوب. تم إجراء عمليات المحاكاة العددية باستخدام نموذج رقمي يعتمد على Enthalpy-porosity. تم التحقق من صحة النموذج العددي من خلال المقارنة مع البيانات التجريبية السابقة ذات الصلة. أظهرت النتائج العددية أنه كلما زاد تركيز GNPs انخفضت الطاقة المخزنة. كلما زاد تركيز GNPs كلما قل وقت التفريغ. و لكن أثناء عملية الشحن، قل وقت الذوبان عند زيادة تركيز GNPs من 0 إلى 1%، بينما زاد وقت الذوبان بنسبة 10.5% عند زيادة تركيز GNPs من 1 إلى 3%. بالنسبة لتركيز GNPs الذي يبلغ 3%، كان تحسين معدل انتقال الحرارة محدودًا بسبب الزيادة الغير مرغوب فيها في اللزوجة و التي أدت إلى ضعف الحمل الطبيعي وبالتالي وقت أطول للشحن. وهكذا، أظهر تركيز GNPs الذي يبلغ 1% أداءً حراريًا أفضل من تركيز 3%. بالإضافة إلى ذلك، عند استخدام NPCM المسامي يتم قل وقت التصلب الكلي بنسبة تتراوح من 92% إلى 95%. بينما قل وقت الذوبان الكلي بنسبة تتراوح من 83% إلى 88%. تساهم هذه النتائج في تحسين أنظمة تخزين الحرارة.

**الكلمات الدلالية:** PCM، الجسيمات النانوية، الرغوة المعدنية، القشرة والأنبوب، تحسين انتقال الحرارة، ذوبان و تصلب، تخزين الطاقة الحرارية الكامنة (LHTES).

## Abstract

Phase change materials (PCMs) generally suffer from low thermal conductivity which limits their application in thermal storage systems. The effective thermal conductivity may be improved by immersing fins, nanoparticles, porous medium, multiple PCMs, heat pipes or some combined techniques. The objective of this study is to investigate the thermal performance of graphene nanoplatelets (GNPs) dispersed in small quantities in 1-tetradecanol ( $C_{14}H_{30}O$ ) as PCM. This nano-enhanced PCM (NPCM) is placed in the annular space of a shell and tube for solar thermal energy storage. A hybrid porous-foam/nanoparticles enhancement technique was used to improve the thermal performance of the shell and tube system. The numerical simulations performed using a numerical model based on the enthalpy-porosity and the control volume methods. The numerical model has been successfully validated by comparison with data available in the literature. The numerical results showed that the higher the GNPs concentration, the lower is the stored energy. The higher the GNPs concentration the shorter is the discharging time. But, during the charging process, though the reduction in the melting time by 9.5% for GNPs concentration increase from 0 to 1 wt%, the melting time increased in contrast by 10.5% for GNPs content increased from 1 to 3 wt%. For the GNPs concentration of 3 wt%, the heat transfer rate enhancement was limited by an undesirable increase in the dynamic viscosity of the melt which led to weak buoyancy driven convection and thus a longer charging time was obtained. The GNPs concentration of 1 wt% showed better thermal performance than that of 3 wt% concentration. Furthermore, when porous foam was used with NPCM, the melting and solidification time reduced up to 86% and 94%, respectively. These findings are can contribute to designing efficient thermal storage units.

**Keywords:** PCM, nanoparticles, metal foam, shell and tube, heat transfer enhancement, melting and solidification, latent heat, thermal energy storage.

## الفهرس

الصفحة	الموضوع
	كلمة شكر
	الملخص
	قائمة المحتويات
	قائمة الجداول
	قائمة الأشكال
	قائمة الاختصارات
	الدليل
1	المقدمة العامة
<b>الفصل الأول: الخلفية النظرية</b>	
7	1.1 المقدمة
7	2.1 مواد متغيرة الطور PCMs
9	3.1 تصنيف مواد متغيرة الطور PCMs
10	1.3.1 المواد العضوية
11	2.3.1 المواد غير العضوية
12	3.3.1 اليوتكتيك
13	4.1 ايجابيات وسلبيات كل فئة PCMs
13	5.1 الخاتمة

## الفصل الثاني: مراجعة الدراسات السابقة

15	1.2 المقدمة
15	2.2 أنظمة التخزين الحراري للعمود المحشو
20	3.2 أنظمة تخزين حاويات الأسطوانية PCM
20	1.3.2 نموذج الأنبوب
21	2.3.2 نموذج الاسطوانة
22	3.3.2 نموذج القشرة والأنبوب
25	4.2 الطرق المستخدمة لتحسين انتقال الحرارة
25	1.4.2 التحسين الحراري لـ PCM باستخدام السطح الممتد
31	2.4.2 التحسين الحراري لـ PCM باستخدام الأنابيب الحرارية
32	3.4.2 التحسين الحراري باستخدام PCM متعددة
34	4.4.2 التحسين الحراري لـ PCM باستخدام مواد ذات موصلية حرارية عالية
35	1.4.4.2 مواد الجرافيت
37	2.4.4.2 جسيمات النانوية
40	3.4.4.2 وسط مسامي
43	5.4.2 التحسين الحراري لـ PCM باستخدام التقنيات المشتركة
44	6.4.2 التحسين الحراري لـ PCM باستخدام الموائع النانوية
47	5.2 الخاتمة

## الفصل الثالث: أساسيات تقنية CFD

50	1.3 المقدمة
----	-------------

50	2.3 المعادلات التفاضلية الواصفة لتدفق الموائع وانتقال الحرارة
50	1.2.3 معادلة الاستمرارية
51	2.2.3 معادلة كمية الحركة
52	3.2.3 النماذج المضطربة
52	1.3.2.3 نموذج $k-\epsilon$
53	2.3.2.3 النموذج standard $k-\epsilon$
54	3.3.2.3 تأثيرات الطفو على الاضطراب في نموذج $k-\epsilon$
56	4.2.3 معادلة حفظ الطاقة
57	5.2.3 اختيار نموذج الاضطراب
58	6.2.3 نمذجة التصلب والذوبان
59	7.2.3 اختيار الحل

## الفصل الرابع: الدراسة العددية لأداء PCM المحسن في وحدة تخزين القشرة و الأنبوب

62	1.4 المقدمة
62	2.4 التحقق من نموذج CFD
62	1.2.4 دراسة الحالة التجريبية من قبل لاكروا، كيبيريا وآخرون و عطلال وآخرون
63	1.1.2.4 النموذج الفيزيائي
70	2.1.2.4 الإعداد التجريبي
72	3.1.2.4 التحقق من صحة نموذج FLUENT
77	2.4 دراسة عددية لأداء NPCM في وحدة تخزين القشرة والأنبوب

77	1.2.4 النموذج الفيزيائي
78	2.2.4 الفرضيات
78	3.2.4 الشروط الابتدائية والحدية
79	4.2.4 النتائج والمناقشة
79	1.4.2.4 توزيع درجات الحرارة
81	2.4.2.4 تطور تغير الطور
83	3.4.2.4 الطاقة المخزنة
85	3.4 دراسة عددية لأداء NPCM المسامي في وحدة تخزين القشرة و الأنبوب
85	1.3.4 المحاكاة العددية
86	2.3.4 النتائج و المناقشة
86	1.2.3.4 تطور تغير الطور مع مرور الوقت
91	4.4 الخاتمة
94	الخاتمة العامة
99	المراجع

## قائمة الجداول

الصفحة	عنوان الجدول	رقم الجدول
13	ايجابيات وسلبيات كل فئة PCMs	1.1
19	دراسات انتقال الحرارة في أنظمة تخزين العمود المحشو	1.2
24	دراسات انتقال الحرارة في أنظمة تخزين الحاويات الاسطوانية	2.2
29	دراسات تحسين انتقال الحرارة باستخدام الزعانف	3.2
31	دراسات تجريبية للتغليف الماكرو لأنظمة LHTES	4.2
34	دراسات PCMs متعددة في أنظمة LHTES	5.2
42	دراسات استخدام مواد ذات موصلية حرارية عالية في أنظمة PCM	6.2
44	دراسات استخدام التقنيات المشتركة في أنظمة LHTES	7.2
46	دراسات تحسين انتقال الحرارة باستخدام الموائع النانوية	8.2
63	الخصائص الحرارية الفيزيائية لـ n-Octadecane	1.4
65	الخصائص الحرارية الفيزيائية لشمع البارافين	2.4
66	الخصائص الحرارية الفيزيائية للماء	3.4
68	الخصائص الحرارية الفيزيائية لشمع البارافين و الألمنيوم	4.4
77	الخصائص الحرارية الفيزيائية للماء (HTF)	5.4
78	الخصائص الحرارية الفيزيائية لعينات NPCM (GNPs- C <sub>14</sub> H <sub>30</sub> O)	6.4



## قائمة الأشكال

الصفحة	عنوان الشكل	رقم الشكل
9	تصنيف مواد متغيرة الطور	1.1
10	تصنيف مواد متغيرة الطور بحسب أنتالبي الذوبان ودرجة حرارة الذوبان	2.1
16	تصميم نظام التخزين لعمود أسطوانية محشو	1.2
17	تصميم نظام LHTES للعمود محشو، (a) عمود محشو عشوائياً (b) عمود محشو بشكل خاص	2.2
18	هيكل التعبئة	3.2
20	حاويات الأسطوانية PCM	4.2
26	رسم تخطيطي للأنابيب ذات الزعانف الداخلية والخارجية	5.2
27	مجال المحاكاة ثنائي الأبعاد	6.2
28	رسم تخطيطي لنظام القشرة والأنبوب	7.2
31	انتقال الحرارة بين PCM وHTF باستخدام أنابيب الحرارية	8.2
32	تكوين PCM متعدد في أنظمة تخزين الطاقة الحرارية	9.2
35	اختبار الجرافيت	10.2
36	تغير درجة الحرارة أثناء عمليتي الذوبان والتصلب	11.2
39	رسم تخطيطي لوحدة التخزين التي تحتوي على جسيمات مشتتة	12.2

45	رسم تخطيطي لنظام الحاوية	13.2
60	نظرة عامة على طرق الحل القائم على الضغط	1.3
63	تمثيل تخطيطي لوحدة تخزين حراري	1.4
65	نموذج فيزيائي لوحدة تخزين حراري	2.4
68	نموذج فيزيائي للحساب العددي	3.4
70	وحدة الاختبار التجريبية	4.4
71	الرسم التخطيطي للإعداد التجريبي	5.4
72	الرسم التخطيطي للإعداد التجريبي	6.4
73	الشبكة المستخدمة	7.4
75	مقارنة بين النموذج الحالي والبيانات التجريبية في الموقعين T1 و T2 (: $\theta_{f,in} = 10Ka$ ، b: $\theta_{f,in} = 20K$ )	8.4
76	مقارنة درجة حرارة مخرج HTF العددية مع البيانات التجريبية أثناء عمليتي (a) الشحن و (b) التفريغ	9.4
76	مقارنة توزيع درجة الحرارة في PCM المسامي أثناء عمليتي الشحن والتفريغ مع الدراسة التجريبية	10.4
77	رسم تخطيطي للقشرة والأنبوب مملوءة بـ NPCM	11.4
80	تطور درجة الحرارة لعينات NPCM (0، 1 و 3%) بدلالة الزمن أثناء عملية الشحن	12.4
80	تطور درجة الحرارة لعينات NPCM (0، 1 و 3%) بدلالة الزمن أثناء عملية التفريغ	13.4
82	تباين النسب السائلة لعينات NPCM (0، 1 و 3%) بدلالة زمن أثناء دورة الشحن	14.4

82	15.4	وقت الذوبان الكلي لعينات NPCM
83	16.4	تباين النسب السائلة لعينات NPCM (0، 1 و 3%) بدلالة زمن أثناء دورة التفريغ
83	17.4	وقت التصلب الكلي لعينات NPCM
84	18.4	تباين الطاقة المخزنة بدلالة الزمن لعينات NPCM أثناء عملية الشحن
85	19.4	تباين الطاقة المخزنة بدلالة الزمن لعينات NPCM أثناء عملية التفريغ
85	20.4	النموذج الفيزيائي للنظام NPCM المسامي
89	21.4	تأثيرات المسامية على نسبة السائل من NPCM المسامي عند النسب الحجمية: (a) $\varphi = 0\%$ ، (b) $\varphi = 1\%$ و (c) $\varphi = 3\%$ أثناء الشحن
90	22.4	تأثيرات المسامية على نسبة السائل من NPCM المسامي عند النسب الحجمية: (a) $\varphi = 0\%$ ، (b) $\varphi = 1\%$ و (c) $\varphi = 3\%$ أثناء التفريغ

## قائمة الاختصارات

المعنى بالانجليزية	المعنى بالعربية	الاختصار
Computational Fluid Dynamics	ديناميكيات الموائع الحسابية	<b>CFD</b>
Encapsulated Phase Change Materials	مادة متغيرة الطور المغلفة	<b>EPCM</b>
Expanded Graphite	الجرافيت الموسع	<b>EG</b>
Graphene Nano Platelets	الصفائح النانوية للجرافين	<b>GNPs</b>
Heat Pipes	الأنابيب الحرارية	<b>HPs</b>
Heat Transfer Fluid	المائع الناقل للحرارة	<b>HTF</b>
Latent Heat Thermal Energy Storage	تخزين الطاقة الحرارية الكامنة	<b>LHTES</b>
Latent Heat Thermal Storage	تخزين الحرارة الكامنة	<b>LHTS</b>
Nano-enhanced Phase Change Materials	مادة متغيرة الطور المحسنة بالنانو	<b>NPCM</b>
Phase Change Material	مادة متغيرة الطور	<b>PCM</b>
Phase Change Materials	مواد متغيرة الطور	<b>PCMs</b>
Thermal Energy Storage	تخزين الطاقة الحرارية	<b>TES</b>
User Defined Function	استخدام تعريف الدالة	<b>UDF</b>

## قائمة الرموز

الرمز	المقدار الفيزيائي	الوحدة في النظام الدولي
$C_p$	السعة الحرارية	J/kg.K
$k$	الموصلية الحرارية	W/m <sup>2</sup> .K
$P$	الضغط	Pa
$g$	الجاذبية الأرضية	N/kg
$H$	أنتالبي الكلي	J
$h$	أنتالبي المحسوس	J
$\Delta H$	أنتالبي الكامن	J
$T$	درجة الحرارة	K
$L$	الحرارة الكامنة للانصهار	J/kg
$R_i$	نصف القطر الداخلي للأنبوب	m
$R_{sh}$	نصف قطر القشرة	m
$\rho$	الكثافة	kg/m <sup>3</sup>
$\mu$	اللزوجة الديناميكية	Pa.s
$\beta$	معامل التمدد الحراري	1/°K
$\varphi$	النسبة الحجمية للجسيمات	
$\delta$	مسامية رغوة	
$\gamma$	نسبة السائل	

## الدليل (الأحرف السفلية)

الرمز	المعنى
<i>l</i>	السائل
<i>s</i>	الصلب
<i>m</i>	الذوبان
<i>w</i>	الجدار
<i>sf</i>	رغوة المسامية
<i>e</i>	الفعالة
<i>ini</i>	الابتدائية
<i>in</i>	المدخل
<i>f</i>	المائع

# المقدمة العامة

إن الزيادة المستمرة في نسبة انبعاث غازات الاحتباس الحراري و ارتفاع أسعار الوقود من أهم القوى الدافعة وراء جهود المبذولة إلى استخدام مختلف مصادر الطاقة المتجددة على نحو أكثر فعالية، حيث يُعتبر الإشعاع الشمسي المباشر واحداً من أكثر مصادر الطاقة المستقبلية.

إن العلماء في مختلف أنحاء العالم يبحثون عن مصادر الطاقة الجديدة والمتجددة، ومن بين الخيارات المتاحة هو تطوير أجهزة تخزين الطاقة والتي لا تقل أهمية عن استغلال مصادر جديدة للطاقة. تتزايد أهمية تخزين الطاقة عندما يكون مصدر الطاقة منقطعاً مثل الطاقة الشمسية، لا يقلل تخزين الطاقة من عدم التوافق بين العرض و الطلب فحسب بل يعمل أيضاً على تحسين أداء الأنظمة الطاقوية و موثوقيتها، كما يلعب دوراً مهماً في حفظ الطاقة لاستغلالها لاحقاً [1]. عندما تتوفر الطاقة الشمسية في الصيف يمكن توفيرها في شتاء بفضل أنظمة تخزين، يطلق على هذا النوع من التخزين الموسمي. لهدف الاستغلال الأمثل للطاقة الشمسية على شكلها الحراري في مختلف الظروف، يسعى الباحثون لتطوير أنظمة و طرق جديدة تتسم بالكفاءة، الاقتصاد و الموثوقية.

خلال العقود القليلة الماضية، تم اقتراح وتنفيذ أنظمة تخزين الطاقة الحرارية (TES)، تسمح بتخزين الطاقة الحرارية إما على شكل تخزين محسوس أو كامن [2]. تخزن أنظمة TES المحسوسة الطاقة من خلال تغيير درجة حرارة وسط التخزين. تخزن أنظمة TES الكامنة الطاقة من خلال تغيير الطور. تعتبر الحرارة الكامنة طريقة فعالة لتخزين الحرارة الشمسية، لأنها توفر كثافة تخزين عالية للطاقة، أي يمكن تخزين الكثير من الطاقة في حجم صغير. كما تخزن الطاقة عند درجة حرارة ثابتة مما يوسع نطاق تطبيق نظام تخزين الحرارة الكامن. تم تسليط الضوء في عدد من الأعمال على أنظمة تخزين الطاقة الحرارية الكامنة التي تستخدم مادة متغيرة الطور (PCM) حيث اعتبرت التقنية الأكثر فعالية لتخزين الطاقة الحرارية، لأنها توفر حجم وحدة صغير و كثافة طاقة عالية جداً أثناء عمليتي الذوبان و التصلب مقارنةً بتخزين الطاقة الحرارية المحسوسة التقليدية [3,4]. من بين أنظمة تخزين الطاقة الحرارية الكامنة (LHTES) المختلفة حظي نظام

قشرة وأنبوب باهتمام كبير في مجال البحث بسبب تكوينه البسيط وتكلفته المنخفضة. يتكون نظام القشرة و الأنبوب عادةً من قشرة معزولة جيدًا و أنبوب متحد المركز. تملأ القشرة بمادة متغيرة الطور PCM، و يتم انتقال الحرارة من مائع ناقل للحرارة (HTF) الذي يتم تدويره عبر الأنبوب [5].

ومع ذلك فإن معظم PCMs لها موصلية حرارية منخفضة مما يؤدي إلى بطء معدلات الشحن و التفريغ، و بالتالي فإن تقنيات تحسين انتقال الحرارة ضرورية لمعظم تطبيقات LHTES. تم إجراء العديد من الدراسات حول تقنيات تحسين انتقال الحرارة في مثل هذه المواد عن طريق نشر الزعانف المعدنية، الجسيمات النانوية، طريقة PCM المتعددة، الرغوات المعدنية، أنبوب الحرارة و بعض التقنيات المشتركة [6-10].

يهدف التحقيق العددي الحالي إلى تقييم الأداء الحراري لمزيج من 1-تيترايديكانول مع نسب كتلية مختلفة (0، 1 و 3%) من الصفائح النانوية للجرافين (GNPs) في وحدة تخزين حراري للقشرة و أنبوب أفقية. يتم تحليل توزيع درجة الحرارة، أوقات الذوبان/التصلب و كذلك الطاقة المخزنة/المتحررة أثناء عمليتي الشحن/التفريغ. بالإضافة إلى ذلك، تمت دراسة تأثير تحسين الأداء الحراري للقشرة و الأنبوب باستخدام التقنية المشتركة بين الجسيمات النانوية و الرغوة المعدنية.

تهدف الأطروحة إلى اقتراح أكثر الطرق فعالية لتحسين انتقال الحرارة في أنظمة التخزين الحراري مع PCMs. تم إجراء هذه التحقيقات العددية للحصول على معلومات حول انتقال الحرارة و توزيع درجة الحرارة في PCMs وتحليل تأثير الجسيمات النانوية والرغوة المعدنية على تحسين انتقال الحرارة. ويمكن تلخيص الأهداف الرئيسية للدراسة على النحو التالي:

- تقديم نبذة تعريفية تساعد على فهم و تطوير تغير الطور.
- إجراء مراجعة شاملة للأدبيات المتعلقة بتقنيات تخزين الطاقة الحرارية باستخدام PCMs، وتصميم أنظمة التخزين الحراري و التكوينات و طرق تحسين انتقال الحرارة.

• تطوير نماذج CFD لأنظمة التخزين الحراري.

• دراسة تأثير الجسيمات النانوية والرغوة المعدنية على تحسين انتقال الحرارة في أنظمة تخزين PCM

تم استخدام نموذج CFD لمحاكاة عمليات انتقال الحرارة و الكتلة التي تحدث أثناء عمليتي الذوبان و التصلب في PCM عدديًا. تضمنت الدراسة تطبيق نموذج CFD ثنائي الأبعاد باستخدام برنامج ANSYS/FLUENT، حيث تم التحقق من صحة النتائج النظرية باستخدام بيانات تجريبية من الدراسات السابقة. في المراحل النهائية من التحقيقات تم استخدام النماذج العددية لدراسة السلوك العابر لوحداث تخزين الحرارة.

يشير تحليل الدراسات السابقة والحالية إلى أن التحقيقات حول انتقال الحرارة في أنظمة التخزين الحراري قد تركزت بشكل أساسي على أنظمة تخزين PCM من نوع القشرة و الأنبوب و طرق تحسين انتقال الحرارة لـ PCM. كما يكشف عن أهمية تطوير نماذج CFD دقيقة و مجدية.

في هذا العمل تم تطوير نماذج 2D CFD دقيقة لتقييم أداء أنظمة التخزين الحراري باستخدام خليط PCM مع الجسيمات النانوية و الرغوة المعدنية ذات مسامية مختلفة.

لقد تم ترتيب الأطروحة في مقدمة وأربعة فصول وخاتمة، ويرد وصف موجز لكل منها في ما يلي:

المقدمة: تم تسليط الضوء على نطاق البحث و الأهداف و المنهجية البحثية. كما يصف المساهمة

في المعرفة وترتيب الأطروحة.

الفصل الأول، الخلفية النظرية: فقد خصص للفئات المختلفة لمواد متغيرة الطور PCM و أهم

خصائصها، مزاياها و عيوبها.

الفصل الثاني، مراجعة الدراسات السابقة: يقدم هذا الفصل نتائج المراجعة الشاملة لأهم الدراسات

السابقة ذات الصلة بموضوع البحث الحالي. تركز المراجعة على التقنيات المطبقة لتحسين أداء أنظمة

التخزين الحراري و الطرق المستخدمة لتحليل مشاكل انتقال الحرارة في مواد متغيرة الطور. في الجزء الأخير من هذا الفصل تمت أيضًا مناقشة طرق المختلفة لزيادة الموصلية الحرارية ل PCM.

الفصل الثالث، أساسيات نمذجة CFD: في هذا الفصل يتم تقديم المعادلات التفاضلية الواسفة لتقنية نمذجة CFD التي تصف التدفق و انتقال الحرارة و نموذج تصلب/ ذوبان PCMs.

الفصل الرابع، الدراسة العددية لأداء PCM محسن في وحدة تخزين القشرة و الأنبوب: يقدم هذا الفصل نتائج نمذجة CFD ل PCM في وحدة التخزين الحراري للقشرة و الأنبوب. بعد ذلك تتم مقارنة النتائج العددية التي تم الحصول عليها بواسطة CFD مع البيانات التجريبية التي قام بها كل من لاكروا [11]، كيبيريا وآخرون [12] وعطال وآخرون [13]. أخيرًا تم إجراء دراسة مفصلة لانتقال الحرارة على عمليتي الذوبان والتصلب PCM مع جسيمات النانوية و مع جسيمات النانوية/الرغوة المعدنية و تمت مناقشة النتائج.

الخاتمة: تلخص نتائج الأطروحة، حيث يعرض جميع النماذج و الدراسات العددية لإثبات الأداء الحراري ل PCM مع الجسيمات النانوية و الوسط المسامي، كما يناقش اتجاه الدراسة المستقبلية بناءً على هذا البحث الحالي.

# الفصل الأول

## الخلفية النظرية

### 1.1 مقدمة

لتحقيق الأهداف المحددة لهذا العمل نحن بحاجة إلى فهم كامل للظواهر المرتبطة بتغير الطور و أنظمة مواد متغيرة الطور (PCMs)، هذا الفهم لا يسمح لنا فقط بالحصول على المعرفة الصحيحة التي تمهد الطريق لمزيد من التجارب و النماذج، و لكنه يعمل أيضًا كأساس لتصميم أنظمة مواد متغيرة الطور. عموماً، نهدف من خلال هذا الفصل إلى تقديم نبذة تعريفية تساعد على فهم وتطوير تغير الطور.

### 2.1 مواد متغيرة الطور PCMs

مادة متغيرة الطور (PCM) هي مادة ذات حرارة انصهار عالية. هذه المادة قادرة على تخزين الحرارة أثناء الذوبان و تحريرها أثناء التصلب. عندما تخضع المادة لتغير الطور تحدث عملية امتصاص أو تحرير الحرارة مما يؤدي إلى تخزين أو تحرير كمية كبيرة من الطاقة في شكل حرارة، و التي تحدث بشكل عام عند درجة حرارة ثابتة أو ضمن مجال لدرجات الحرارة، يُعرف هذا النوع من الطاقة بالطاقة الحرارية الكامنة. يركز هذا البحث على نظام الانتقال الصلب-السائل حيث أن انتقال الطور الغاز-السائل أو الغاز-الصلب محدود في أنظمة تخزين الطاقة الحرارية (TES) بسبب التغيرات الكبيرة في الحجم عند تغير الطور [14]. تكمن جاذبيتها في أنها تستطيع تخزين كمية كبيرة من الطاقة في أحجام صغيرة عند درجة حرارة ثابتة تقريباً، وتمثل هذه الجاذبية الميزة الرئيسية لهذه المواد كوسيط تخزين مقارنة بالتخزين الحراري بواسطة الحرارة المحسوسة، حيث نحتاج إلى اختلاف كبير في درجة الحرارة أو أحجام كبيرة لتحقيق قدر كبير من تخزين الطاقة الحرارية.

من أجل اختيار أفضل PCM كمادة مناسبة لتطبيقات LHTES، علينا النظر في ما إذا كان PCM يفي بالمعايير الحرارية، الفيزيائية، التحريكية، الكيميائية والاقتصادية ليطم اختيارها كمادة مناسبة لتخزين الطاقة الحرارية. وقد تم جمع بعض هذه المعايير من طرف شارما وآخرون [1] وترد فيما يلي:

## الفصل الأول: الخلفية النظرية

### المعايير الحرارية

- يجب أن تكون درجة حرارة تغير الطور مناسبة للتطبيقات المطلوبة.
- يجب أن تكون الحرارة الكامنة للانصهار عالية لكل وحدة حجم لتخزين المزيد من الطاقة في حجم معين.
- موصلية حرارية عالية من أجل تخزين وتحرير الحرارة الكامنة في وقت قصير أثناء عمليتي الشحن والتفريغ.

### المعايير الفيزيائية

- كثافة عالية لتقليل حجم حاوية التخزين.
- تغير ضئيل في الحجم عند تغير الطور لتقليل مشكلة الاحتواء.
- ضغط بخار منخفض لتقليل مشكلة الاحتواء.

### المعايير التحريكية

- يجب أن تظهر المادة القليل من التبريد الفائق أو عدمه أثناء التجمد.

### المعايير الكيميائية

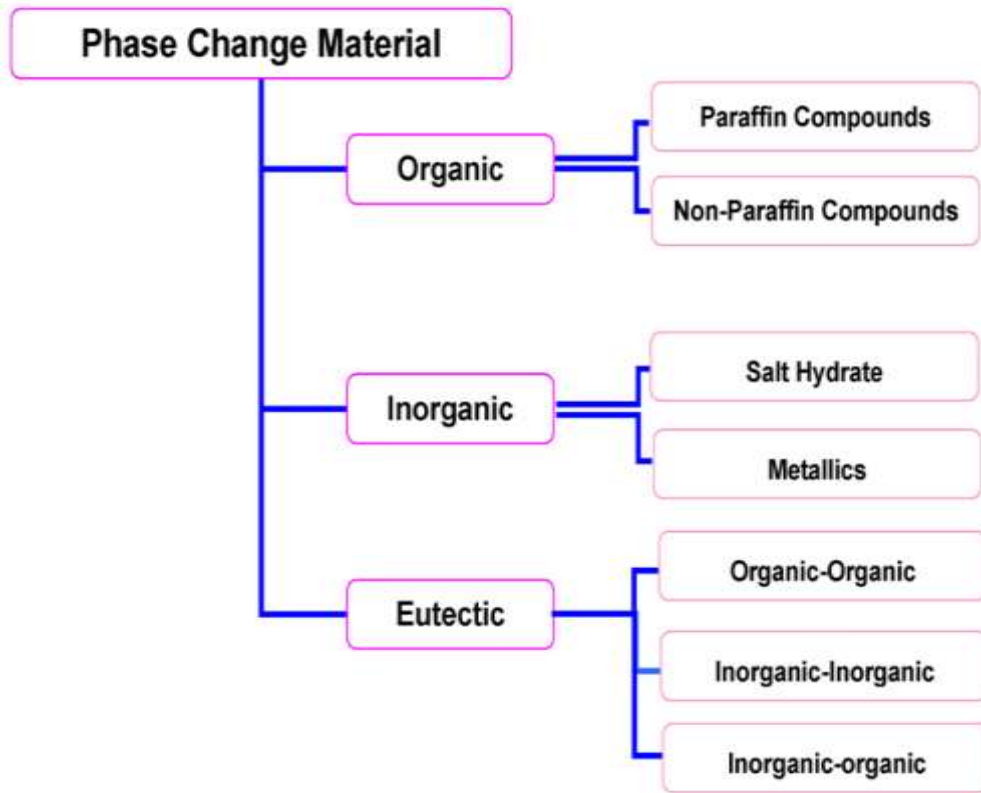
- استقرار كيميائي لتجنب التدهور بعد عدد كبير من الدورات.
- عدم قابلية التفاعل مع مواد أخرى لتجنب مشاكل التآكل في الحاوية.
- غير قابلة للاشتعال والانفجار و غير سامة.

### المعايير الاقتصادية

- متوفرة بكميات كبيرة.
- منخفضة التكاليف.

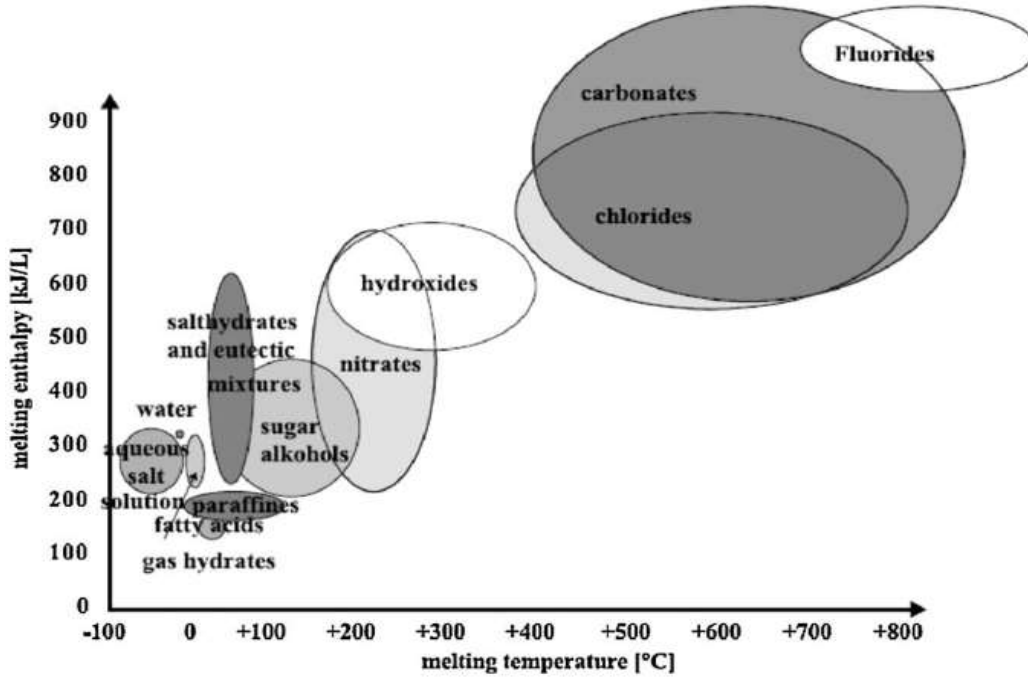
### 3.1 تصنيف مواد متغيرة الطور PCMs

يتم تصنيف مواد متغيرة الطور (PCMs) إلى ثلاث فئات: مواد عضوية، غير عضوية و اليوتكتيك، مع فئات فرعية في كل منها، كما هو موضح في الشكل (1-1). في هذا الجزء نقدم وصفا موجزا للفئات المذكورة.



الشكل 1.1: تصنيف مواد متغيرة الطور [1]

يبين الشكل (2.1) أنواع المواد المتغيرة الطور بدلالة درجة حرارة الانصهار بالدرجة سليزيوس والكثافة الطاقية لها بالكيلوجول لكل وحدة حجم [15].



الشكل 2.1: تصنيف المواد المتغيرة الطور بحسب درجة حرارة انصهار المادة وحرارة الانصهار [15]

### 1.3.1 المواد العضوية

يتم تصنيف المواد المتغيرة الطور (PCMs) العضوية على أنها البرافينات وغير البرافينية. تتميز PCMs العضوية بقدرتها على الذوبان و التصلب بشكل متكرر دون فصل طوري وانخفاض الحرارة الكامنة للانصهار. بالإضافة إلى ذلك، فإنها تتبلور مع القليل من التبريد الفائق أو بدونها، وهي عادة مواد غير قابلة للتآكل. تنقسم PCMs العضوية إلى الفئات التالية:

**البرافينات:** البرافينات العادية من النوع  $C_nH_{2n+2}$  هي عائلة من الهيدروكربونات المشبعة ذات خصائص مشابهة جداً. نظراً لتوافر البرافين في نطاق واسع من درجات حرارة الانصهار كما هو موضح في الشكل (2.2)، مما يجعلها أفضل الخيارات للعديد من التطبيقات الحرارية. كما أنها تتميز بتكلفتها المنخفضة، سلوكها يمكن التنبؤ به، موثوقية، غير قابلة للتآكل و مستقرة كيميائياً. إن الاستخدام التجاري للبرافين يأتي من

تقطير النفط الخام. على الرغم من أن استخدامها كمادة تخزين حراري أمر فعال، إلا أنها تتميز ببعض العيوب مثل الموصلية الحرارية المنخفضة و قابلية الاشتعال و في بعض الحالات لا تتوافق مع الحاويات البلاستيكية، على الرغم من أنه يمكن تصحيح هذه العيوب ببعض التغييرات في شمع البارافين ووحدة التخزين [16,1].

غير البارافينية: تتضمن هذه الفئة مواد مثل الاسترات، الأحماض الدهنية، الكحولات والجليكول. وتعد هذه الفئة هي الأكثر عددا من المواد متغيرة الطور ذات الخصائص المتنوعة للغاية، وتمثل أكبر فئة من المواد المرشحة لتخزين الحرارة الكامنة. من بين خصائصها: حرارة الانصهار العالية، وموصلية حرارية منخفضة، متفاوتة في السمية، قابلة للاشتعال وعدم الاستقرار عند درجة حرارة عالية. ومن هذه الفئة، تعتبر الأحماض الدهنية جذابة لتخزين الطاقة الحرارية بسبب ارتفاع حرارة الانصهار لديها مقارنة بالبارافين. كما تُظهر PCMs سلوكيات قابلة للتكرار أثناء الذوبان والتصلب و بدون تبريد فائق. ومع ذلك فإن تكلفتها تبلغ حوالي 2-2.5 أضعاف تكلفة البارافين [16,1].

### 2.3.1 المواد غير العضوية

يتم تصنيف المواد المتغيرة الطور غير العضوية على أنها أملاح الهيدرات و هيدرات معدنية. تحتوي المركبات الغير العضوية على حرارة كامنة عالية لكل وحدة كتلة وحجم ، فهي فعالة من حيث التكلفة وغير مكلفة وغير قابلة للاشتعال مقارنة بالمركبات العضوية. ومع ذلك، فإن هذه المواد لها مشكلات مثل التبريد الفائق والفصل (والتي تؤثر على خصائص تغير الطور).

أملاح الهيدرات: تعتبر أملاح الهيدرات من أقدم PCMs المستعملة في تخزين الطاقة الحرارية وأكثرها دراسة، وهي تتكون من ملح وماء يتحدان في مصفوفة بلورية عندما تتصلب المادة ولها الصيغة العامة  $AB \cdot nH_2O$ . هناك العديد من أملاح الهيدرات المختلفة التي تتراوح درجة حرارة انصهارها من  $7^\circ C$  إلى  $117^\circ C$ . أملاح الهيدرات هي أهم مجموعة من PCM التي تمت دراستها على نطاق واسع لاستخدامها في

أنظمة تخزين الطاقة الحرارية الكامنة. الخصائص الأكثر جاذبية لأملح الهيدرات هي: الحرارة الكامنة للانصهار عالية لكل وحدة حجم، الموصلية الحرارية عالية نسبيًا (تقريبًا ضعف البارافين)، التغيرات الصغيرة في الحجم عند الذوبان. فهي ليست شديدة التآكل، تتوافق مع البلاستيك و سامة قليلًا. الكثير من أملاح هيدرات غير مكلفة بما فيه الكفاية للاستخدامها في التخزين [17,1].

الهيدرات المعدنية: تشمل الهيدرات المعدنية على المعادن ذات نقطة انصهار منخفضة و معادن اليوتكتيك. و لكن استخدامها محدود للغاية لأنظمة تخزين الطاقة الحرارية PCM بسبب وزنها الثقيل. وتتمثل المزايا الرئيسية في: الحرارة الكامنة العالية لكل وحدة حجم، و الموصلية الحرارية عالية وضغط البخار المنخفض، بينما تتمثل العيوب في الوزن و الحرارة النوعية المنخفضة [16,1].

### 3.3.1 اليوتكتيك

اليوتكتيك هو خليط من عنصرين أو أكثر، و التي تتصلب في وقت واحد عند أدنى نقطة تجمد و تسمى أيضًا نقطة اليوتكتيك، يذوب كل منهما و يتجمد بشكل متطابق مشكلا خليطًا من البلورات المكونة أثناء عملية التبلور. اليوتكتيك يذوب و يتجمد دائمًا تقريبًا دون فصل لأنه يتجمد إلى مزيج حميم من البلورات، مما يترك فرصة ضئيلة لفصل المكونات. عند ذوبان كلا المكونين يتم تسيلهما في وقت واحد مرة أخرى مع استبعاد الفصل [1].

## 4.1 ايجابيات وسلبيات كل فئة PCMs

يلخص الجدول (1.1) نظرة عامة حول ايجابيات وسلبيات كل فئة PCMs.

اليوتكتيك	المواد غير العضوية	المواد العضوية
- نقاط الذوبان حادة	-السعة الحجمية لتخزين الحرارة الكامنة عالية	- لا لتبريد الفائق
- يمكن أن تتطابق الخصائص مع متطلبات محددة	- الموصلية الحرارية أعلى من PCM العضوية	- لا لفصل الطوري
	- منخفضة التكلفة	- نطاق درجات حرارة كبيرة
	- غير قابل للاشتعال	-متوافق مع مواد البناء التقليدية
		- مستقرة كيميائيًا
		- قابلة لإعادة التدوير
		- حرارة الكامنة عالية
- بيانات ومعلومات محدودة	- تأكل المعادن	- قابلة للاشتعال
- عالية التكلفة	- فصل الطوري	- الموصلية الحرارية المنخفضة
	- التبريد الفائق	- السعة الحجمية لتخزين الحرارة الكامنة منخفضة
	- تغير كبيرة في الحجم	

جدول 1.1: ايجابيات وسلبيات كل فئة PCMs[18]

## 5.1 الخاتمة

تجذب مادة متغيرة الطور (PCM) الكثير من الاهتمام بين الباحثين كنظام تخزين الطاقة الحرارية الكامنة لقدرتها على تخزين كمية هائلة من الحرارة في حجم محدود و ميزتها في انتقال الحرارة عن طريق تغير الطور الذي يحدث عند درجة حرارة ثابتة تقريبا. لذلك في هذا الفصل، هدفنا إلى تغطية المفاهيم العامة المتعلقة بتغير الطور.

# الفصل الثاني

## مراجعة الدراسات

### السابقة

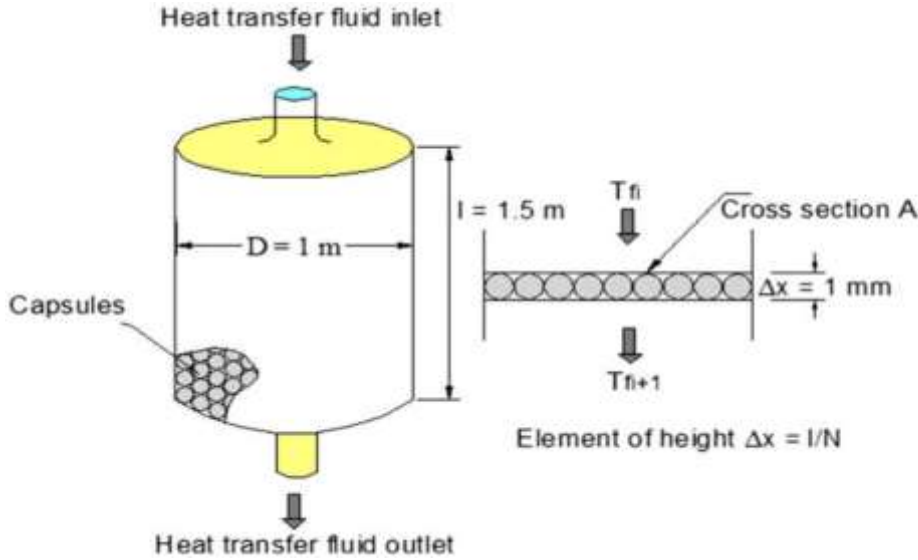
### 1.2 المقدمة

يقدم هذا الفصل نتائج الدراسات السابقة حول تقنيات تخزين الطاقة الحرارية بالإضافة إلى تخزين الطاقة الحرارية الكامنة (LHTES) باستخدام مادة متغيرة الطور (PCM). يناقش الفصل نتائج الدراسات السابقة حول تصميم و تكوين أنظمة التخزين الحراري و طرق تحسين انتقال الحرارة.

### 2.2 أنظمة التخزين الحراري للعمود المحشو

تتكون أنظمة العمود المحشو عادة من خزان اسطواني مملوء بكبسولات كروية PCM، و يتدفق مائع الناقل للحرارة عبر الفراغات الموجودة في العمود. تتميز هذه الأنظمة بكثافة تخزين عالية و كفاءة عالية، و هناك عدد كبير من الأوراق المنشورة تصف تحليلات الأداء ذات الصلة. في هذه الأعمال تم التحقيق في الجوانب التالية: تصميمات أنظمة التخزين و تكويناتها، مواد PCM المستخدمة، طرق تحسين انتقال الحرارة وعمليات التدفق و انتقال الحرارة أثناء عمليتي الشحن و التفريغ. تم تلخيص عدد من المقالات المنشورة، و التي تصف انتقال الحرارة في أنظمة التخزين الحراري باستخدام كبسولات PCM من قبل ريجين [14].

طور ريجين وآخرون [19] نموذجًا عدديًا لتحليل والتنبؤ بالأداء الحراري لنظام التخزين الحراري الكامنة (LHTS) لعمود أسطواني محشو. ويتكون العمود المحشو من كبسولات كروية مملوءة بشمع البارافين. حيث يتدفق مائع انتقال الحرارة (HTF) داخل العمود محشو. يعرض الشكل (1.2) تصميم هذا النظام.



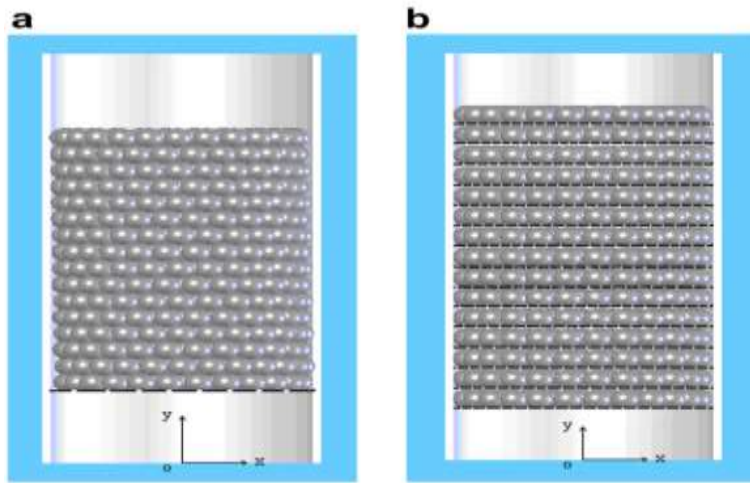
الشكل 1.2: تصميم نظام التخزين لعمود أسطواني محشو [19]

ناقش المؤلف درجة حرارة مدخل مائع ناقل للحرارة، نطاق درجة حرارة تغير الطور وأحجام الكبسولات. أظهرت نتائج الدراسة أن وقت التصلب كان أطول من مدة عملية الذوبان، كان هذا بسبب القيمة المنخفضة جدًا لمعامل انتقال الحرارة أثناء عملية التصلب بسبب المقاومة الحرارية العالية للطبقة المتصلبة التي تشكلت على الجدار الداخلي للكبسولة. مع الزيادة في درجة حرارة مدخل مائع ناقل للحرارة تم تقليل الوقت اللازم للوصول إلى نقطة الذوبان و وقت الشحن. وبالمثل، إن المدة الزمنية اللازمة للشحن الكامل كانت أقصر بالنسبة لمعدلات تدفق الكتلي الأعلى لمائع ناقل للحرارة. النتيجة الرئيسية الثانية هي أن حجم الكبسولة كان له تأثير كبير على عمليتي الشحن و التفريغ. حيث أن الكبسولات الأصغر حجماً توفر معدلات تخزين أعلى مما أدى إلى الوصول إلى نقطة الذوبان في وقت أقصر. كانت هذه النتائج متطابقة مع تلك التي توصلت إليها زينب وآخرون [20] الذين قاموا بالتحقيق عددياً في الأداء الحراري لوحدة تخزين الحراري للعمود أسطواني محشو المملوءة بـ PCM في كبسولات كروية. قام هاو وآخرون [21] بتحليل عددي لسلوك نظام تخزين الطاقة الحرارية الكامنة (LHTES) في عمود محشو. يتكون العمود المحشو من كبسولات كروية مملوءة بـ PCM و تم استخدام الملح المنصهر كمائع ناقل للحرارة (HTF). تم تحقيق من تأثيرات قطر

## الفصل الثاني: مراجعة الدراسات السابقة

كبسولة PCM، سرعة مدخل المائع و ارتفاع خزان التخزين على توزيع درجة الحرارة لعمود محشو. أظهرت النتائج أن تقليل حجم كبسولة PCM أو زيادة سرعة مدخل المائع يؤدي إلى زيادة كفاءة الشحن. و كانت النتيجة الرئيسية الثانية هي أن زيادة ارتفاع خزان التخزين كان لها تأثير كبير على عملية الشحن. يعد خزان التخزين الحراري الأعلى مفيدًا لزيادة كفاءة الشحن.

طور شيا وآخرون [22] نموذجًا عدديًا لنموذج عمود محشو، والذي يختلف عن النماذج السابقة. هذا النموذج يسمى "نموذج العمود المحشو الفعال" يتكون نظام LHTEs للعمود محشو من خزان أسطواني يحتوي على كرات مملوءة ب-PCM ويتدفق المائع عبر الفراغات بين كرات PCM. يوضح الشكل (2.2) رسم تخطيطي لنظام LHTEs للعمود محشو. تم تحقيق من تأثير ترتيب كرات PCM و تغليف PCM على أداء انتقال الحرارة لعمود LHTEs. أشارت النتائج العددية لنموذج العمود المحشو الفعال ما يلي: أن التعبئة العشوائية هي أكثر ملائمة لتخزين الحرارة و استرجاعها مقارنة بالتعبئة الخاصة. فكل من مادة و سمك التغليف لهما تأثيرات واضحة على أداء انتقال الحرارة لعمود LHTEs. سيكون نموذج العمود محشو الفعال أحد أكثر النماذج المفضلة لتحسين تصميم و تشغيل أنظمة LHTEs ذات العمود محشو.

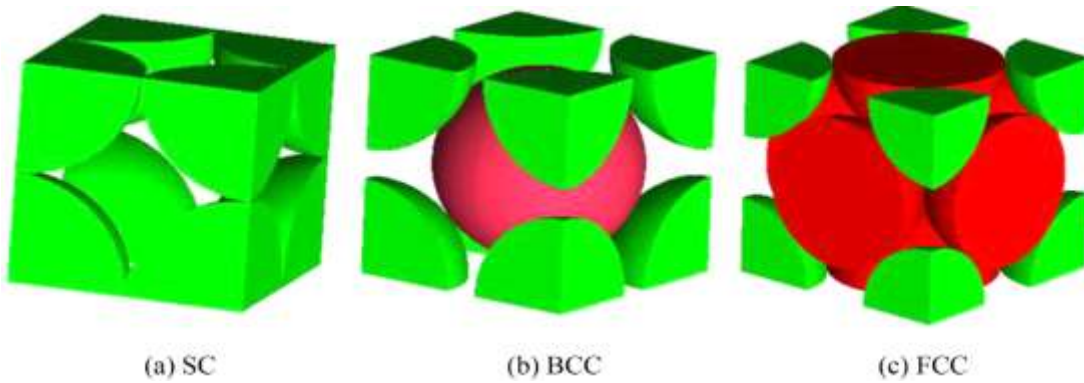


الشكل 2.2: تصميم نظام LHTEs للعمود محشو، (a) عمود محشو عشوائيًا (b) عمود محشو بشكل

خاص. عند توضيح الاختلاف في التعبئة، تكون كمية الكرات هي نفسها في كلا الخزانين [22]

قام كارثيكيان وآخرون [23] بالتحقيق عددياً في أداء وحدة تخزين عمود محشو مملوءة بمادة متغيرة الطور (PCM) مغلقة بحاويات كروية، مناسبة لتطبيقات تسخين الهواء بالطاقة الشمسية ذات درجات الحرارة المنخفضة. و توصلوا إلى أن العوامل الثلاثة، زيادة مساحة سطح انتقال الحرارة باستخدام كرات صغيرة الحجم، فرق درجة حرارة الأعلى بين مدخل HTF و درجة حرارة تغير الطور ل PCM و زيادة معدل تدفق الكتلي ل HTF، هي عوامل مفيدة أثناء عملية الشحن. بالإضافة إلى ذلك، لن يؤدي تأثير زيادة الموصلية الحرارية إلى ما بعد  $1 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$  ل PCM المستخدم في هذا التحليل إلى تحسين كبير لانتقال الحرارة بسبب الدور الرئيسي الذي تلعبه مقاومة الحمل السطحية العالية التي يوفرها الهواء (HTF).

قامت زينيا وآخرون [24] بالدراسة العددية لنماذج TES ذات العمود المحشو بثلاثة أنواع مختلفة من أشكال التعبئة (SC، BCC و FCC) كما هو موضح في شكل (3.2) وتمت مقارنة الأداء الحراري لهذه الهياكل. علاوة على ذلك، تم تحليل تأثير العديد من العوامل بما في ذلك Re ودرجة حرارة المدخل و Pr ل HTF على خصائص تكوينات TES ذات العمود المحشو المنظم خلال فترة التفريغ. أظهرت نتائج العددية أن خلال عملية الشحن تم ترتيب طاقة تخزين الحرارة الكلية من الأعلى إلى الأقل كما يلي: SC، BCC و FCC. وخلال عملية تفريغ تتميز FCC و BCC بمتوسط معدل استرداد حرارة أعلى من SC. يلخص الجدول 2.2 بعض الدراسات التجريبية التي أجريت لأنظمة تخزين العمود المحشو.



الشكل 3.2: هيكل التعبئة

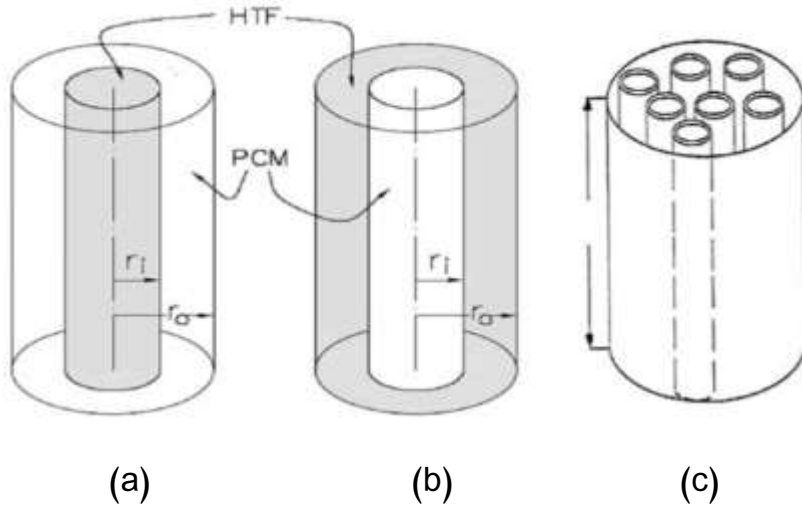
## الفصل الثاني: مراجعة الدراسات السابقة

مرجع	هندسة	الطريقة	PCM	HTF	العملية	الملاحظات
[25]	خزان اسطواني/ كبسولات كروية	تجريبية/ عددية	Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> - K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> - Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	هواء	شحن/ تفريغ	يؤدي تحسين درجة حرارة مدخل ومعدل التدفق الكتلتي إلى زيادة كفاءة الشحن والتفريغ. بالإضافة إلى ذلك فإن قطر الكبسولات الأصغر هو الأمثل لتقليل الوقت الكلي للشحن والتفريغ.
[26]	خزان مستطيلي/ كبسولات متوازي مستطيلات	عددية	NaLiCO <sub>3</sub>	هواء	شحن/ تفريغ	تؤدي الزيادة في نسبة مواد تحسين التوصيلية الحرارية من 0% إلى 30% على التوالي إلى تقليل عمليتي الشحن والتفريغ بحوالي 30.3% و 29.2%.
[27]	خزان أسطواني/ كبسولات كروية	تجريبية/ عددية	NaNO <sub>2</sub>	الملح المنصهر/ الزيت الحراري	شحن/ تفريغ	زيادة وقت شحن النظام المملوء بـ PCM بشكل كبير لتحسين تخزين الطاقة الكلية مقارنةً بالنظام الذي لا يحتوي على PCM.
[28]	خزان أسطواني/ كبسولات كروية	عددية	NaCO <sub>3</sub> - Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> MgCl <sub>2</sub> - NaCl KOH	الهواء	شحن/ تفريغ	عندما تتخفض المسامية من 0.6 إلى 0.1 تزداد نسبة سعة التخزين من 86.07% إلى 86.65% ينتج عن هذا زيادة في إجمالي طاقة التخزين من 5.2×10 <sup>12</sup> Wh إلى 1.3×10 <sup>13</sup> Wh وبالمثل عندما ينخفض قطر الكبسولات من 0.6 إلى 0.1 ، تزداد نسبة سعة التخزين من 85.8% إلى 87.3%.

الجدول 1.2: دراسات انتقال الحرارة في أنظمة تخزين العمود المحشو

### 3.2 أنظمة تخزين الحاويات الأسطوانية PCM

تم تصنيف الحاويات الأسطوانية PCM في ثلاثة أنواع [29]، النوع الأول يسمى نموذج الأنبوب، حيث يتم يملأ القشرة PCM و يتدفق HTF عبر أنبوب واحد (الشكل 2.4a). النوع الثاني يسمى نموذج الأسطوانة، يملأ PCM الأنبوب و يتدفق HTF بالتوازي مع الأنبوب الشكل (2.4b). النوع الثالث يسمى نموذج القشرة و الأنبوب (الشكل 2.4c). يحتوي هذا النموذج على عدة أنابيب متوازية، و يتدفق HTF عبر الأنابيب بينما يملأ PCM المساحة المحيطة بهم.



الشكل 4.2: الحاويات الأسطوانية PCM [29]

### 1.3.2 نموذج الأنبوب

طور جيان وآخرون [30] نموذجًا عدديًا للتنبؤ بالسلوك الحراري العابر أثناء عمليتي الشحن و التفريغ لوحدة تخزين حرارية كامنة تتضمن أنبوبًا ثلاثي المركز متحد المركز مع ملء PCM للقناة الوسطى. ثم تمت مقارنة نتائج النموذج العددي مع النتائج التجريبية و أعطت تطابق جيد.

درس اديمانو و واتانابي [31] عمليتي الشحن و التفريغ لنظام تخزين الحرارة الكامن بمزيج من حمض الكابريك و حمض اللوريك بدرجة انصهار  $18^{\circ}\text{C} - 19.5^{\circ}\text{C}$ . تم استخدام وحدة تخزين أسطوانية رأسية تشتمل

على أنبوب نحاسي مملوء بـ PCM في الدراسة. تم قياس توزيع درجة الحرارة في كلا الاتجاهين الشعاعي و المحوري بشكل تجريبي، وكذلك الحرارة المخزنة أثناء الشحن و التي تم تحريرها أثناء عملية التفريغ. قاما ساري وكايغوسوز [32] بشكل تجريبي بتقييم السلوك الحراري لخليط اليوتكتيك من حمض اللوريك و حمض دهني في النظام مع اثنين من الأنابيب متحدة المركز الرأسية. كانت العوامل التجريبية الرئيسية هي أرقام رينولدز وستيفان. و قد تم إثبات أن هذه المقاييس كان لها تأثير أكبر على وقت ذوبان PCM الكلي مقارنة بوقت التصلب الكلي بسبب ظاهرة الحمل التي تحدث أثناء عملية الذوبان و التي أدت إلى تحسين معدل الذوبان، في حين أن المقاومة الحرارية أثناء عملية التصلب قللت من معدل التصلب. من ناحية أخرى كان لرقم رينولدز تأثير أكبر على معامل انتقال الحرارة أثناء عملية الذوبان بدلاً من التصلب، في حين أن رقم ستيفان كان له تأثير أكبر على التصلب من الذوبان.

و قد أجرى شيونغ وآخرون [5] دراسات عديدة لتخزين الطاقة الحرارية في نظام أنبوب على شكل U و مقارنة مع نظام أحادي الأنبوب. وتم استخدام بارافين RT35 والماء كـ PCM و HTF على التوالي. أظهرت النتائج أن نظام الأنبوب على شكل U لديه أداء أفضل لنقل الحرارة من نظام أحادي الأنبوب الذي له نفس مساحة انتقال الحرارة والشروط الابتدائية والحدية، مما يقلل من وقت الشحن الكلي بنسبة 25%.

### 2.3.2 نموذج الاسطوانة

قاما بير و ريجر [33] بفحص تأثير التدفق الحمل الطبيعي على انتقال الحرارة أثناء عملية ذوبان الجليد داخل أسطوانة أفقية متساوية درجة الحرارة. تم عددياً حساب معاملات انتقال الحرارة الكلية والمحلية، مجالات درجة الحرارة، مواضع الواجهة و نمط التدفق. وتم مقارنة نتائجهم العددية بالبيانات التجريبية، و توصلوا إلى أن انتقال الحرارة قد تم تحسينه في الجزء السفلي من الجسم الجليدي عند درجات حرارة أقل من  $8^{\circ}\text{C}$  بسبب تأثير الكثافة، بينما بالنسبة لدرجة حرارة الجدار التي تتجاوز  $8^{\circ}\text{C}$  يتحرك الجسم الجليدي لأسفل.

تم تطبيق نفس الإجراءات من قبل ريجر وآخرون [34] لتحقيق في انتقال الحرارة أثناء ذوبان-n Octadecane كمادة متغيرة الطور PCM داخل أنبوب أفقي.

درس ايسن وآخرون [35] النموذجين (نموذج الأنبوب و نموذج الاسطوانة) نظريًا من خلال مقارنة تأثيرات العوامل الحرارية و الهندسية المختلفة، نصف قطر الأسطوانة، حجم PCM الكلي، معدلات التدفق الكتلي و درجات حرارة مدخل لـ HTF في وقت التخزين. أوصوا بنموذج الأنبوب لأنه سجل وقت ذوبان أقصر. و يرجع ذلك إلى انه كلما كانت كتلة PCM أكثر سمكًا، كلما زاد وقت ذوبان PCM. ميزة إضافية لنموذج الأنبوب غير مذكور هي حقيقة أن نموذج الأنبوب لديه معدل فقد حرارة أقل للبيئة لأن معظم الحرارة التي يتم توفيرها من المركز تؤدي إلى تسخين PCM.

### 3.3.2 نموذج القشرة و الأنبوب

قد حظي نظام القشرة و الأنبوب بقدر كبير من الاهتمام في مجال البحث بسبب تكوينه البسيط وتكلفته المنخفضة. درس لاكروا [11] عددًا تأثيرات العوامل الحرارية و الهندسية المختلفة على عملية انتقال الحرارة و على سلوك النظام. تتبأ النموذج بالسلوك العابر لوحدة تخزين القشرة و الأنبوب مع تدوير HTF داخل الأنبوب و مادة متغيرة الطور PCM. تم التحقق من صحة النموذج بالمقارنة مع البيانات التجريبية و وجد أنه يجب اختيار نصف قطر القشرة، معدل التدفق الكتلي و درجة حرارة المدخل بعناية من اجل تحسين أداء وحدة التخزين.

قام كيبيريا وآخرون [12] بدراسة نظام تخزين الطاقة الحرارية للقشرة و الأنبوب عددًا و كذلك تجريبيًا باستخدام شمع البارافين (درجة حرارة الانصهار: 61 درجة مئوية) و الماء كـ PCM و HTF على التوالي. من أجل تقييم وقت عمليتي التصلب و الذوبان من حيث درجة حرارة مخرج HTF، تم إجراء دراسة تأثير بعض العوامل حرارية و هندسية مختلفة. أظهرت النتائج أن درجة حرارة مدخل HTF و القطر الداخلي للأنبوب

## الفصل الثاني: مراجعة الدراسات السابقة

لهما تأثير كبير على عمليتي تصلب و ذوبان PCM مقارنة بتأثير معدل تدفق الكتلي HTF و سمك الأنبوب.

قام صديق وآخرون [36] بالتحقيق عددياً في السلوك الحراري لنظام تخزين الطاقة في نظام القشرة و الأنبوب العمودي و الأفقي. أظهرت النتائج أن نظام تخزين الطاقة الأفقي يتميز بأداء أفضل في انتقال الحرارة أثناء عملية الشحن. في عملية التفريغ، لا يظهر السلوك الحراري أي اختلاف كبير في وحدات تخزين الطاقة الأفقية و العمودية. كما أظهرت النتائج أيضاً أن زيادة درجة حرارة مدخل مائع ناقل للحرارة (HTF) يقلل بشكل كبير من وقت الشحن الكلي لكلا الاتجاهين. ومع ذلك، فإن زيادة معدل التدفق لا يؤثر بشكل كبير على عمليتي الشحن و التفريغ.

درس كوشا وآخرون [37] تجريبياً تأثير زاوية الميلان لنظام القشرة و الأنبوب على عمليتي الذوبان و تصلب. أظهرت النتائج أن اختلاف الزاوية يؤثر على عملية الذوبان أكثر من عملية التصلب و الذي يرجع إلى هيمنة انتقال الحرارة بالحمل في عملية الذوبان. يرد في الجدول (2.2) ملخص لبعض الدراسات.

مرجع	الهندسة	الطريقة	PCM	HTF	العملية	الملاحظات
[38]	نموذج الأنبوب	عددية	اوكتادكين	ماء	شحن	كان معدل الذوبان أقل في الجزء السفلي مقارنة بالجزء العلوي بسبب قوة الطفو التي تعمل أثناء ذوبان PCM.
[39,40]	نموذج اسطواني	تجريبية/ عددية	ملح هيدرات	مائع نانوية	شحن/تفريغ	يمكن الاستنتاج من النتائج أن نموذج CFD يمكن أن يتنبأ بشكل دقيق بأداء نظام التخزين الحراري، ويمكن استخدامه أيضاً لتحسين تصميمه.

## الفصل الثاني: مراجعة الدراسات السابقة

[41]	القشرة والأنبوب	عددية	-	ماء	شحن	إن استخدام PCM المتعدد في وحدة القشرة والأنبوب يقلل من وقت الشحن بنسبة 21.5% مقارنة باستخدام PCM واحد.
[42]	القشرة والأنبوب	عددية	RT-55	-	شحن / تفريغ	تم تحسين عملية شحن/تفريغ الطاقة في نظام TES للقشرة والأنبوب بشكل كبير من خلال استخدام رغوة الألمنيوم متعددة القطع مع زيادة المسامية في اتجاه تدفق الحرارة.
[43]	القشرة والأنبوب	عددية	RT-55 RT-60 RT-65	-	تفريغ	على الرغم من أن وقت التصلب يتناقص مع زيادة عدد قطع الرغوة و/أو PCM المتعددة، يوصى باختيار عدد صغير مناسب من PCM المتعددة وقطع الرغوية.
[44]	القشرة و الأنبوب	تجريبية	A153	زيت السيليكون	شحن / تفريغ	أشارت البيانات التجريبية إلى أن رغوة النحاس ذات المسامية المتدرجة يمكن أن تحسن قدرة انتقال الحرارة بشكل كبير. علاوة على ذلك تم تقليل وقت الذوبان الكلي بنسبة 37.6%.
[45]	القشرة و الأنبوب	عددية	RT35	الماء	شحن	يوصى بإجراء تحسين على تدرج في المسامية يتراوح بين 0.89 - 0.95 لتقليل وقت الانصهار الكامل بنسبة 21.1%.

الجدول 2.2: دراسات انتقال الحرارة في أنظمة تخزين الحاويات الاسطوانية

### 4.2 الطرق المستخدمة لتحسين انتقال الحرارة

كما ذكرنا سابقًا تتمتع معظم PCMs باستثناء المعادن أو السبائك المعدنية بموصلية حرارية منخفضة ونتيجة لذلك، قد تؤدي إلى بطء معدلات الشحن والتفريغ. أدت القيم المنخفضة للموصلية الحرارية في PCMs إلى إجراء العديد من الدراسات حول تحسين انتقال الحرارة أثناء تصلب وذوبان PCM. من أجل زيادة الموصلية الحرارية لـ PCM، تمت دراسة العديد من تقنيات تحسين انتقال الحرارة [6-10]. يقدم هذا القسم مراجعة لهذه الطرق.

#### 1.4.2 التحسين الحراري لـ PCM باستخدام السطح الممتد

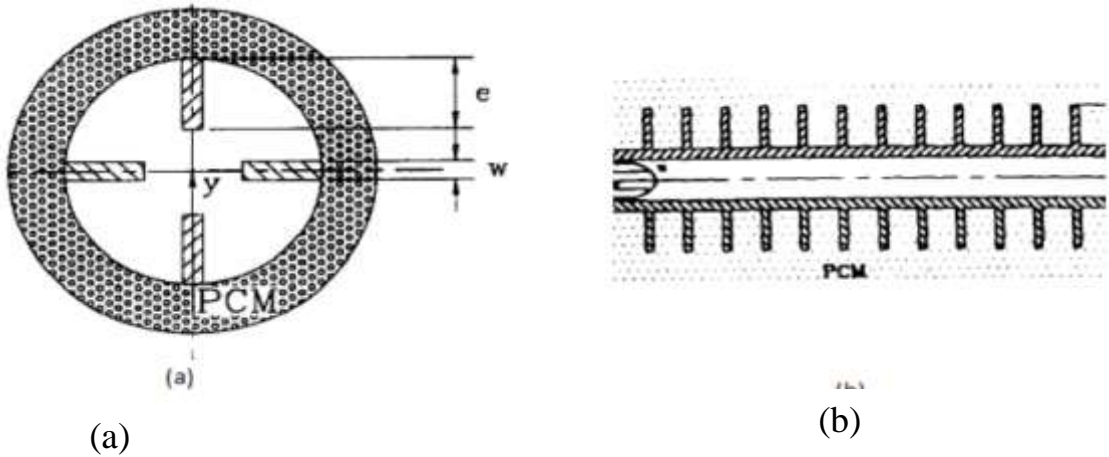
تشمل امتدادات سطح انتقال الحرارة استخدام الزعانف أو الكبسولات لتقليل مسافة نقل الحرارة داخل PCM وبالتالي تحسين انتقال الحرارة. نظرًا للبساطة، التكلفة المنخفضة وسهولة التصنيع، تم اعتماد معظم تقنيات تحسين الحرارة على الزعانف. تُستخدم الزعانف عادةً لزيادة مساحة انتقال الحرارة الفعالة بين HTF و PCM وبالتالي تحسين الأداء الحراري لنظام TES.

عادة ما تكون الموصلية الحرارية، إمكانية التآكل مع HTF/PCM، التكلفة والكثافة من العوامل الحاسمة عندما يتعلق الأمر باختيار مواد الزعنفة [7]. يتم اختيار المواد مثل الألمنيوم، النحاس و رقائق الجرافيت بشكل أساسي بسبب الموصلية الحرارية العالي (أعلى من  $100 \text{ W/m.K}$ )، و يتم اختيار المواد مثل الفولاذ الكربوني بسبب تكلفتها المنخفضة. كما يستخدم الفولاذ المقاوم للصدأ كمادة زعنفة بسبب مقاومته للتآكل [7].

طور زانغ و فاغري [47,46] الطرق النظرية لدراسة تحسين انتقال الحرارة في وحدة تخزين الطاقة الحرارية الكامنة (LHTES) باستخدام أنابيب ذات زعانف طولية داخلية (الشكل 2.5a) و أنابيب ذات زعانف شعاعية خارجية (الشكل 2.5b). و كانت أكثر نتائج إثارة للاهتمام هو أن استخدام الزعانف الداخلية يوفر تأثيرًا أقوى لتحسين انتقال الحرارة الذوبان لانتقال الموائع بأرقام رينولدز المنخفضة، و من النتائج المهمة

## الفصل الثاني: مراجعة الدراسات السابقة

الأخرى للحالة ذات الزعانف الخارجية أن درجة حرارة جدار الأنبوب و رقم نسلت زادت بشكل كبير عندما زاد سمك الجدار، لكن الأخير لم يكن له تأثير كبير على حجم السائل المنصهر. و من ناحية أخرى أثر ارتفاع زعنفة بشكل كبير على نسبة الحجم المنصهر.

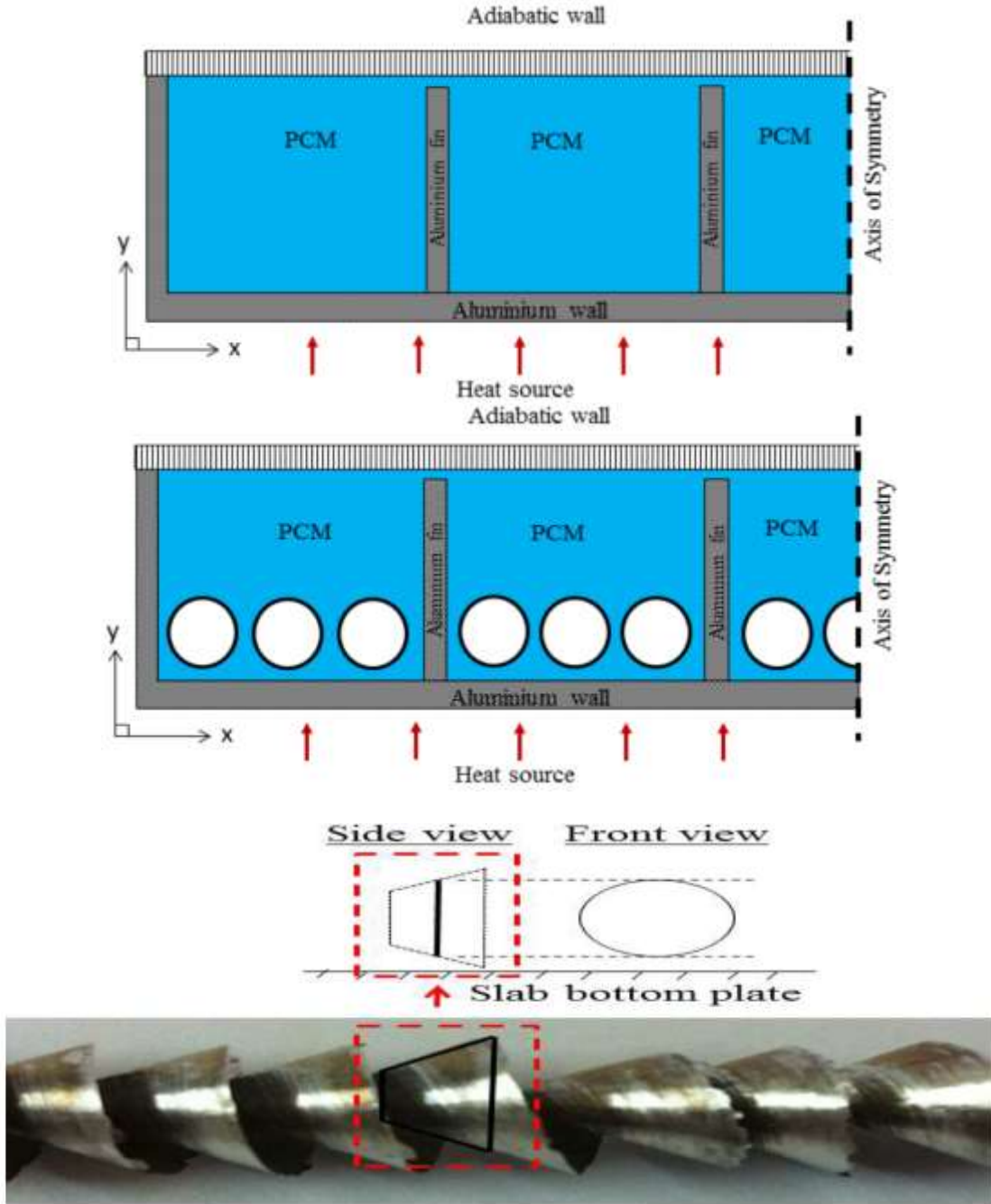


الشكل 5.2: رسم تخطيطي للأنابيب ذات الزعانف الداخلية والخارجية التي تم نشرها في [47،46]

درس أجينيم وآخرون [48] الجوانب المختلفة لتحسين انتقال الحرارة في نظام تخزين حراري متوسط درجة الحرارة باستخدام زعانف دائرية و طولية. وأظهرت النتائج بأن الزعانف الطولية حققت تحسناً كافياً لانتقال الحرارة و أن متوسط درجة الحرارة كان أعلى مما هو عليه في أنظمة التحكم و الزعانف الدائرية. لم توفر الزعانف الدائرية تحسناً ملحوظاً في انتقال الحرارة أثناء امتصاص الحرارة المحسوسة على الرغم من أنها زادت من مساحة انتقال الحرارة.

درس تان وآخرون [49] على حد سواء تجريبياً و عددياً تأثير تكوين حشو الألمنيوم اللولبي على أداء ذوبان PCM في نظام تخزين الحرارة الكامنة (LHTS) من النوع الزعانف. تم تصميم مجال محاكاة ثنائي الأبعاد باستخدام برنامج Fluent 6.3 لكل من نوع الزعانف و لوح الحشو اللولبي الدقيق في الشكل (6.2). تم التحقق من صحة النتائج العددية من خلال البيانات التجريبية، ولوحظ توافق جيد بين النتائج. وقد وجد

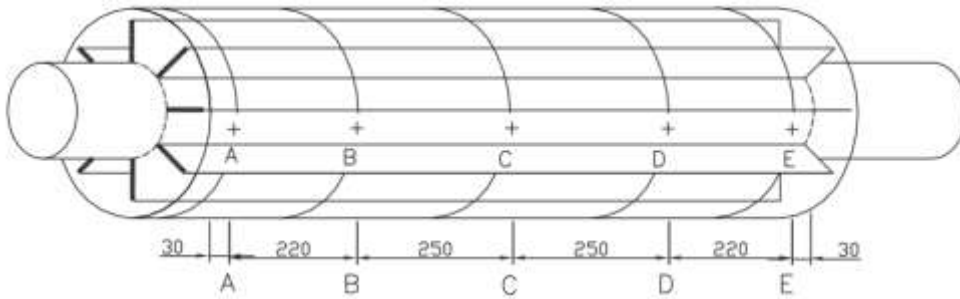
أيضًا أن حشوات الألمنيوم اللولبية لها تأثير قوي على سلوك ذوبان PCM. ازداد التوصيل الحراري بسبب ارتفاع مساحة الحث نتيجة إضافة الحشوات اللولبية بينما انخفض الحمل الطبيعي.



الشكل 6.2: مجال المحاكاة ثنائي الأبعاد [49]

## الفصل الثاني: مراجعة الدراسات السابقة

درس أجينيم وآخرون [50] تجريبياً عمليتي الذوبان و التصلب في تصميم قشرة و أنبوب مع زعانف طولية تستخدم لتشغيل نظام تبريد امتصاص  $\text{LiBr}/\text{H}_2\text{O}$  الشكل (7.2). أجريت التجارب لقيم مختلفة لمعدل تدفق كتلة الشحن و درجات حرارة مدخل HTF. تم تسجيل تدرجات درجة الحرارة في الاتجاهات المحورية، الشعاعية و الزاوية أثناء الشحن. أظهرت النتائج أن العوامل المثلى لشحن نظام امتصاص  $\text{LiBr}/\text{H}_2\text{O}$  كانت كما يلي: معدل تدفق الكتلي البالغ  $30 \text{ kg/min}$  و درجة حرارة المدخل  $140^\circ\text{C}$ . يرد في الجدول (3.2) بعض الدراسات حول استخدام الزعانف في أنظمة LHTES.



الشكل 7.2: رسم تخطيطي لنظام القشرة و الأنبوب [50]

مرجع	هندسة الزعنفة	هندسة النظام	مادة الزعنفة	ملاحظات
[51]	مستطيل	القشرة والأنبوب	نحاس	يوفر طول الزعنفة معدل شحن أعلى لـ PCM
[52]	-	مبادل حراري	الألمنيوم	تتأثر عملية التصلب بشكل أكبر باستخدام الزعانف مقارنة بوقت الذوبان.
[53]	مستطيل	مبادل حراري	الفولاذ المقاوم للصدأ	أدى استخدام زعانف $35 \text{ mm}$ في طبقة PCM ( $70 \text{ mm}$ ) إلى الحصول على أفضل مقايضة للتطبيق و إن درجة حرارة مدخل غاز العادم لها تأثيراً قوياً على الأداء الحراري لـ PCM .

## الفصل الثاني: مراجعة الدراسات السابقة

54	مستطيل	حاوية مستطيلة	نحاس	أن دمج الزعانف يحسن انتقال الحرارة للذوبان والتصلب بنسبة 50% و 5.56% على التوالي مقارنة بـ PCM النقي.
55	مستطيل	القشرة و الأنبوب	نحاس	بمقارنة ذوبان PCM النقي، قلل استخدام عدد الزعانف المحسن أكثر من 60% من وقت الذوبان.
56	مستطيل	حاوية مربعة	-	أن استخدام الزعنفة يحسن معدل الذوبان بنسبة تصل إلى 52% حسب اتجاه الجدار الساخن.
57	أربعة أشكال مختلفة	خزان تخزين الحرارة	-	يؤدي دمج الزعنفة 1 إلى تقليل وقت الذوبان بنسبة 63%.
58	الزعانف اللولبية	القشرة و الأنبوب	ألومنيوم	يؤدي تركيب الزعانف الحلزونية إلى تقليل وقت الشحن والتفريغ بنسبة 41.48% و 22.16% على التوالي.

### الجدول 3.2: دراسات تحسين انتقال الحرارة باستخدام الزعانف

يمكن أن يتغلب التغليف على الموصلية الحرارية المنخفضة لـ PCM عن طريق تقليل طول المسار وزيادة مساحة سطح انتقال الحرارة. يتم عادة التغليف عن طريق تغطية PCM بطبقة مناسبة أو مادة غلاف [59]. يتمتع استخدام التغليف المناسب بالمزايا التالية [61,60]:

- تحسين معدل انتقال الحرارة من خلال زيادة مساحة السطح الفعالة
- عزل PCM من HTF ووعاء الحاوية.
- تحسين الاستقرار الحراري والميكانيكي للنظام.
- تقليل تكلفة الصهرج.

مواد متغيرة الطور المغلفة EPCM عبارة عن كبسولات صغيرة بداخلها [62]PCM . تم اعتماد أشكال وأحجام مختلفة من EPCM لتطبيقات مختلفة. بناءً على الحجم، يمكن تصنيف PCMs المغلفة إلى ما يلي :

- التغليف النانو (0-1000 nm).
- التغليف المايكرو (1-1000  $\mu\text{m}$ ).
- التغليف الماكرو (أكثر من 1 mm).

قام شوان وآخرون [63] بتحقيق تجريبياً على تأثير مكونات PCM المغلفة على السعة الحرارية النوعية والموصلية الحرارية لمعلق المايكرو EPCM. يتكون قلب المايكرو EPCM من البارافين بينما يتكون الغلاف من يوريا الميلايين التي تتكون من راتنج الألدريد وجزيئات الحديد. لقد وجد من خلال النتائج التجريبية أن الحرارة النوعية لـ المايكرو EPCM تعتمد على درجة الحرارة داخل المايكرو EPCM و النسبة الحجمية لجزيئات المايكرو EPCM. من ناحية أخرى، زادت الموصلية الحرارية خطياً مع النسبة الحجمية لـ المايكرو EPCM و زادت أيضاً مع زيادة جزيئات الحديد النانوية داخل المايكرو EPCM.

تم دراسة الأداء الحراري، الاستقرار وقابلية التصنيع لـ المايكرو EPCM والنانو EPCM لتطبيقات درجات الحرارة المنخفضة [64-67]. و كانت معظم الدراسات حول تطبيقات درجات الحرارة المرتفعة تعتمد على التغليف الماكرو. يوضح الجدول (4.2) بعض الدراسات التجريبية للتغليف الماكرو لأنظمة LHTES في نطاق تشغيل درجة حرارة  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  أو أعلى.

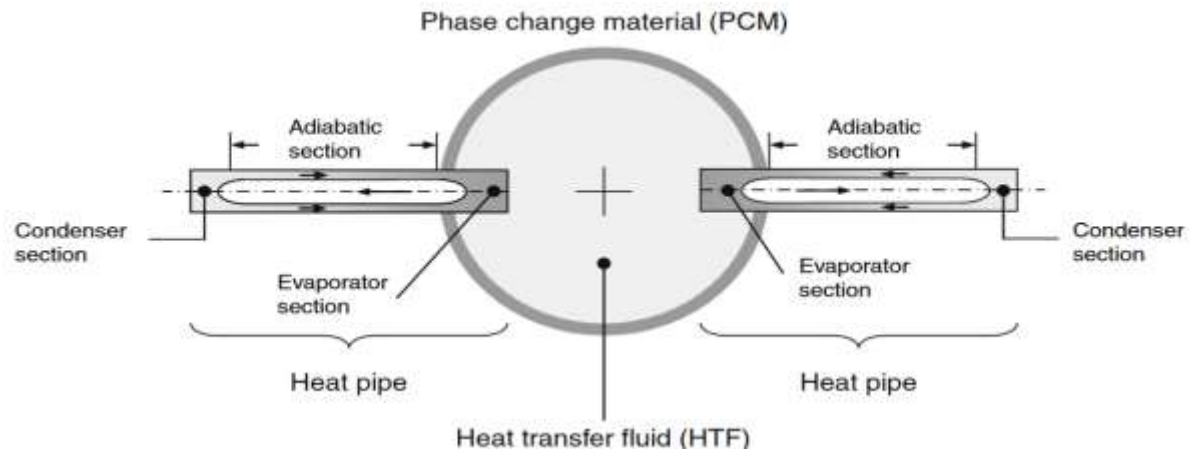
ملاحظات	نطاق التشغيل	PCM	التغليف		مرجع
			مادة	شكل	
تم اختبار الكبسولات لأكثر من 1000 دورة دون تدهور أو فقدان الوزن.	$200^{\circ}\text{C} - 330^{\circ}\text{C}$	$\text{NaNO}_3$ , $\text{KNO}_3$ - $\text{NaNO}_3$	البوليمرات	كروية	[69,68]

[70]	كروية	الكروم والنيكل	نحاس	1050°C-1150°C	نجحت الكبسولات في البقاء لمدة 1000 دورة حرارية.
[71]	أسطوانية	الالومينا	ألومنيوم - 25% سيلكون	400°C-650°C	نجحت الكبسولات في البقاء لمدة 100 دورة حرارية.

الجدول 4.2: دراسات تجريبية للتغليف الماكرو لأنظمة LHTES

### 2.4.2 التحسين الحراري لـ PCM باستخدام الأنابيب الحرارية

تم دمج الأنابيب الحرارية في نظام PCM-TES من أجل توفير قناة ذات موصلية حرارية عالية بين HTF و PCM. الشكل (8.2). تتقل أنابيب الحرارة بين HTF و PCM مع التبخر والتكثيف لمائع عمل أنبوب الحرارة الذي يحدث في نهايات الأنابيب الحرارية. درس شابغارد وآخرون [72] تأثير عدد الأنابيب الحرارية و اتجاهها بالنسبة لاتجاه تدفق HTF و متجه الجاذبية في تكوينين متميزين للنظام.



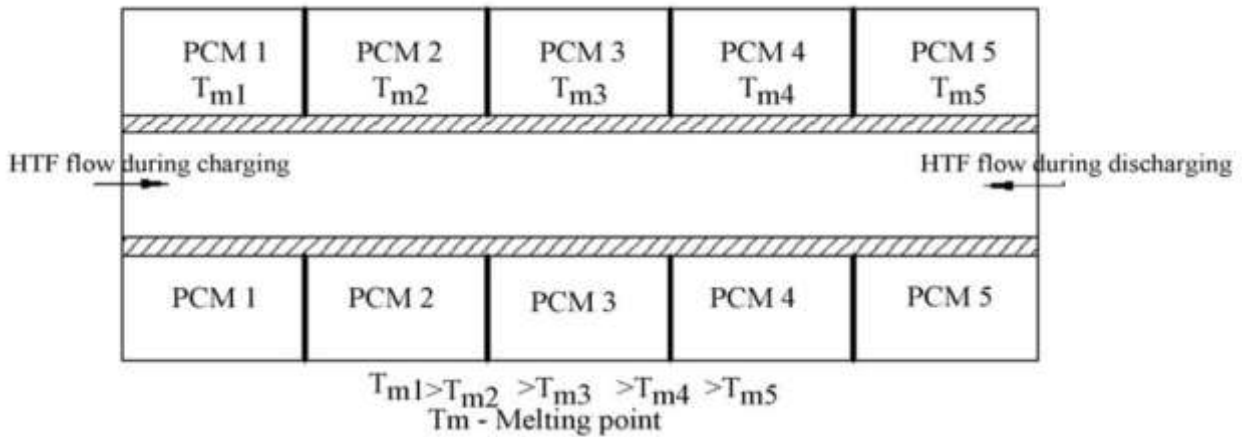
شكل 8.2: انتقال الحرارة بين PCM و HTF باستخدام أنابيب الحرارية [72]

قام روباك وآخرون [73] بمقارنة تجريبية بين تأثير HP و الزعانف في نظام LHTES. و وجد أن متوسط معدلات الذوبان الكلية لأنظمة الأنابيب الحرارية كانت أكبر بنسبة 70% من الأنظمة التي لا تحتوي على HP و أكبر بنسبة 50% من الأنظمة المزودة بالزعانف. تم إجراء عدد كبير من الدراسات العددية

على تحليل تأثير تكوين HP، توجهها و عدد الأنابيب الحرارية HPs على الأداء الحراري لأنظمة LHTEs لكن الدراسات التجريبية كانت محدودة [72,74-76].

### 3.4.2 التحسين الحراري باستخدام PCM متعددة

في هذا النظام المسمى أيضًا المتتالي أو متعدد المراحل، يتم توصيل عدد قليل من الوحدات التي تحتوي على PCM مختلف ذات درجات حرارة انصهار مختلفة مع بعضها البعض. يتم الحصول على التكوين متعدد المراحل عن طريق وضع PCM's في ترتيب متناقص لدرجات حرارة انتقالها وفقًا لاتجاه التدفق أثناء عملية الشحن، بينما بترتيب متزايد لدرجات حرارة انتقالها وفقًا لاتجاه التدفق أثناء عملية التفريغ كما هو موضح في الشكل (9.2). يعتمد معدل انتقال الحرارة في أنظمة التخزين بشكل أساسي على اختلاف درجة الحرارة بين HTF و PCM. عند استخدام تكوين PCM واحد ينخفض فرق درجة الحرارة في اتجاه تدفق HTF، و بالتالي ينخفض أيضًا معدل انتقال الحرارة. و عند استخدام تكوين PCM متعدد يمكن الحفاظ على فرق درجة الحرارة ثابتًا تقريبًا لأن كل من درجة حرارة HTF و نقطة ذوبان PCM تتناقص في اتجاه تدفق HTF أثناء عملية الشحن، و أثناء التفريغ يزيد كلاهما في اتجاه تدفق HTF. و بالتالي، فإن تدفق الحرارة من PCM إلى HTF يكون ثابتًا خلال العملية بأكملها.



الشكل 9.2: تكوين PCM متعدد في أنظمة تخزين الطاقة الحرارية [6]

الدراسات التجريبية لـ PCM المتعددة في أنظمة LHTEs محدودة في الأدبيات. أنشأ فريد وآخرون [77] إعدادًا تجريبيًا لاختبار ثلاثة أنواع مختلفة من الشمع PCM (درجات حرارة الذوبان  $44^{\circ}\text{C}$ ,  $53^{\circ}\text{C}$  و  $64^{\circ}\text{C}$ ). أبلغوا عن تحسن بنسبة 15% مع تكوين PCM المتعدد خلال فترة الحرارة الكامنة.

قاما فريد و كانزاوا [78] بدراسة تحليلية لأداء وحدة تخزين الحرارة المكونة من عدد من الكبسولات الاسطوانية العمودية المملوءة بمواد متغيرة الطور، مع تدفق الهواء عبرها من أجل تبادل الحرارة. أظهرت دراسة المحاكاة تحسناً كبيراً في معدل انتقال الحرارة أثناء الشحن و التفريغ الحراري عند استخدام مواد متغيرة الطور بدرجات حرارة انصهار مختلفة.

طور واتانابي وآخرون [79] وحدة تخزين الحرارة الكامنة بمعدلات شحن و تفريغ سريعة. تتكون وحدة تخزين الحرارة من كبسولات أسطوانية أفقية مملوءة بثلاثة أنواع من PCM بدرجات حرارة انصهار مختلفة. تم استخدام الماء كمائع ناقل للحرارة. أظهرت كل من النتائج التجريبية و العددية بعض التحسينات في معدلات الشحن و التفريغ باستخدام PCM من "نوع الثلاثي".

قام يانغ وآخرون [80] بدراسة عددية لنظام تخزين حرارة لعمود محشو باستخدام كبسولات كروية مملوءة بثلاثة أنواع من مواد متغيرة الطور (PCM). يتم تعبئة الكبسولات في عمود محشو متصل بمجمع شمسي مسطح ويتم وضع الكبسولات على التوالي استناداً إلى درجة حرارة انصهار PCM. يستخدم الماء كمائع ناقل للحرارة (HTF) و يتم تسخينه في المجمع الشمسي. لقد وجد من خلال النتائج العددية أن العمود المحشو الذي يحتوي على PCM متعددة الأنواع يذوب في وقت أبكر بكثير من النظام أحادي النوع.

طور لي وآخرون [81] نموذجاً رياضياً لوحدة تخزين الطاقة الحرارية الكامنة (LHTEs) للقشرة و الأنابيب ثنائية الأبعاد لمواد متغيرة الطور (PCMs) المسماة PCM1، PCM2 و PCM3 ذات درجات حرارة انصهار عالية مختلفة (  $983\text{K}$ ،  $823\text{K}$  و  $670\text{K}$  على التوالي) و يستخدم الهواء كمائع ناقل للحرارة (HTF). أظهرت النتائج أن معدلات ذوبان PCM3 هي الأسرع و أن معدلات ذوبان PCM1 هي أبطأ

## الفصل الثاني: مراجعة الدراسات السابقة

في كلا الاتجاهين  $x$  و  $r$ . كما وجد أن أوقات ذوبان PCM1، PCM2 و PCM3 تنخفض مع زيادة درجات حرارة مدخل الهواء. كما بينت النتائج أن الأطوال المثلي هي  $L1 = 250\text{mm}$ ،  $L2 = 400\text{mm}$  و  $L3 = 550\text{mm}$  ( $L = 1200\text{mm}$ ) والتي تتوافق مع نفس أوقات الذوبان لـ PCM1، PCM2 و PCM3 هي حوالي 3230 ثانية و درجة حرارة مدخل الهواء حوالي 1200K. يلخص الجدول التالي بعض دراسات PCM's متعددة.

مرجع	الهندسة	الطريقة	عدد PCM's	ملاحظات
[82]	القشرة و الأنبوب	تجريبية	2	إن تكوين المتعدد قدم تحسينا فعلا بنسبة 19.36% مقارنة PCM واحد.
[83]	كبسولة أسطوانية	تجريبية	3	تم الحصول على تقليل وقت الذوبان بنسبة 37-42% مقارنة بنظام PCM LHTES واحد.
[84]	-	عددية	3	أنه يمكن تحسين انتقال الحرارة بشكل كبير و تقليل وقت الذوبان و التصلب بشكل كبير، باستخدام PCM متعددة مقارنة باستخدام PCM واحد.
[85]	مبادل حراري	عددية	3	تم تحقيق انخفاض بنسبة 15.5% في وقت الذوبان الكامل في PCM المتعددة (m-PCM) مقارنة PCM واحد.

### الجدول 5.2: دراسات PCM's متعددة في أنظمة LHTES

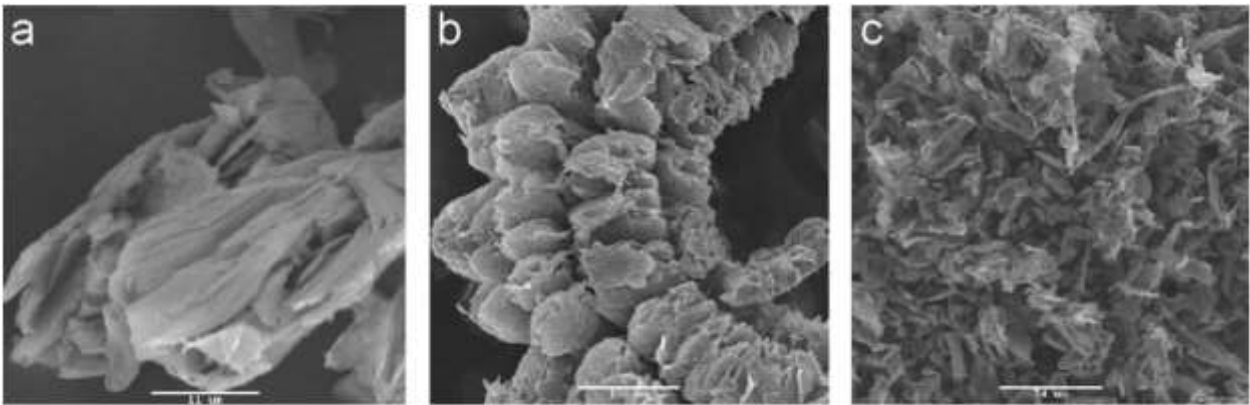
#### 4.4.2 التحسين الحراري لـ PCM باستخدام مواد ذات موصلية حرارية عالية

يمكن تحسين انتقال الحرارة داخل نظام تخزين PCM عن طريق تركيب مادة ذات موصلية حرارية عالية في PCM، عادةً ما تشمل هذه التقنية على مواد مثل مواد الجرافيت، الجسيمات النانوية و الوسط المسامي (الرغوات المعدنية و مواد المصفوفة).

### 1.4.4.2 مواد الجرافيت

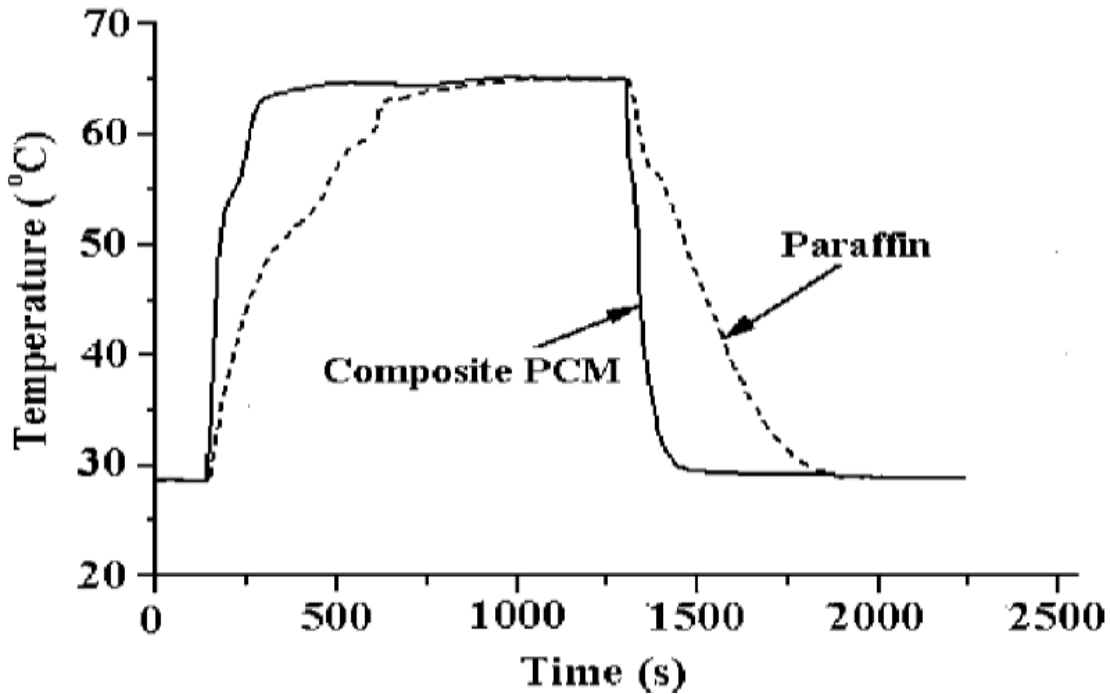
تمت دراسة الجرافيت على نطاق واسع كمحسّن لانتقال الحرارة في أنظمة تخزين PCM بسبب الموصلية الحرارية العالية، الكثافة المنخفضة والمقاومة الكيميائية [86]. يمكن الحصول على متراكبة من الجرافيت PCM عن طريق ترشح/تثريب PCM داخل هيكل مسامي من الجرافيت، أو تشتت الجرافيت ميكانيكياً داخل PCM أو ضغط الجرافيت الممزوج مسبقاً و PCM [87]. هناك العديد من الأنواع التجارية المتاحة من الجرافيت، مثل رقائق الجرافيت الطبيعية، الجرافيت الطبيعي الموسع و الجرافيت الطبيعي الموسع الأرضي.

درس بينسيمين وآخرون [88] رقائق الجرافيت مع الأملاح أو اليوتكتيك كـ PCM عند درجات حرارة ذوبان 200-300 درجة مئوية. تمت إضافة الجرافيت لتحسين الموصلية الحرارية لـ PCM و سعة التخزين. تم استخدام ثلاثة أنواع مختلفة من الجرافيت: رقائق الجرافيت الطبيعية (الشكل 2.10a)، الجرافيت الطبيعي الموسع (الشكل 2.10b) و الجرافيت الطبيعي الموسع الأرضي (الشكل 2.10c). تم التوصل على تحسين كبير في الموصلية الحرارية. بينما لم يتم الحصول على تغييرات كبيرة في درجة حرارة تغيير الطور، و لكن لوحظ انخفاض في اختلاف درجة حرارة تغير الطور.



الشكل 10.2: اختبار الجرافيت [88]

درسا زانغوفانغ [89] سلوك المتراكبة من البارافين/الجرافيت موسع. وقد تمت مقارنة الأداء الحراري للمتراكبة مع أداء البارافين، و أظهرت النتائج أن درجة حرارة تغير الطور و الحرارة الكامنة ظلت كما هي بالنسبة لهاتين المادتين. من ناحية أخرى، انخفض الوقت اللازم للوصول إلى درجة الحرارة المطلوبة أثناء عملية الذوبان بنسبة 27.4% للمتراكبة مقارنة بالبارافين. كما يمكن أيضا ملاحظة في الشكل (11.2) أن وقت التصلب الكلي لمتراكبة انخفض بنسبة 56.4% مقارنة بالبارافين. كان معدل انتقال الحرارة في المتراكبة أعلى من معدل البارافين بسبب تحسين الموصلية الحرارية.



الشكل 11.2: تغير درجة الحرارة أثناء عمليتي الذوبان والتصلب [89]

وقد اعتمد شياو وآخرون [90] نفس طريقة لتحسين الموصلية الحرارية للبارافين باستخدام متراكبة من بولي مطاط حراري. تمت مقارنة أداء التخزين الحراري لمتراكبة مع أداء البارافين، و وجد بان معدل انتقال الحرارة في المتراكبة زاد بشكل كبيرة مع ارتفاع كتلة الجرافيت الموسع أثناء عملية التصلب و يرجع ذلك إلى زيادة الموصلية الحرارية للمتراكبة. في حالة الذوبان، ينخفض معدل انتقال الحرارة بسبب ضعف الحمل الطبيعي و

الذي يلعب دورًا مهمًا أثناء الذوبان. و كانت النتيجة الأكثر إثارة للاهتمام هي أن PCM المتراكبة الذي يحتوى على البارافين بنسبة 80% كان له نفس انتقال الطور الذي كان يتمتع به البارافين النقي.

حصل سار و كرايكللي [91] على نتائج مماثلة من الدراسة التجريبية لعملية الذوبان في PCM المتراكبة المصنوع من البارافين (n-docosane) مع الجرافيت الموسع (EG). تم دراسة تأثير النسبة الكتلية لـ EG على خصائص التخزين الحراري. أشارت النتائج إلى وجود علاقة قوية بين النسبة الكتلية لـ EG و موصلية الحرارة، وأدى الإدخال المستمر لـ EG إلى زيادة الموصلية الحرارية و بالتالي تقليل وقت الكلي لذوبان. من ناحية أخرى، بالنسبة لجميع النسب الكتلية لـ EG كانت السعات الحرارية الكامنة متماثلة تقريبًا و قريبة جدًا من تلك التي بالبارافين. تمت التوصية باستخدام PCM المركب المصنوع من 10% EG و 90% من البارافين لتطبيقات LHTES نظرًا لخصائصه المستقرة.

درس ازاو و وو [93,92] تجريبًا تحسين انتقال الحرارة في نظام تخزين حراري عالي الحرارة باستخدام رغوة معدنية و الجرافيت الموسع لتحسين قدرة انتقال الحرارة لـ  $\text{NaNO}_3$ . وجد أن استخدام كل من الرغوات المعدنية و الجرافيت الموسع قد حسن انتقال الحرارة بشكل كبير أثناء عمليتي الشحن و التفريغ، وتم تقليل الوقت الكامل لذوبان و التصلب، كان تأثير الرغوة المعدنية أكبر من تأثير الجرافيت الموسع. ومن النتائج الأخرى المثيرة للاهتمام أن انتقال الحرارة قد تم تحسينه بشكل كبير في المناطق الصلبة بسبب زيادة توصيل الحرارة عند استخدام الرغوات المعدنية والجرافيت الموسع، لكن هذه المواد أعاقَت تأثير الحمل الطبيعي في المنطقة السائلة.

### 2.4.4.2 جسيمات النانوية

تشتمل الجسيمات النانوية في PCM هي أحد أبسط الطرق و أكثرها فعالية في تحسين الموصلية الحرارية لها [93]. تم تلخيص عدد من المقالات المنشورة، و التي تصف تأثير الجسيمات النانوية على أداء أنظمة التخزين الحراري باستخدام كبسولات PCM من قبل شيوخوليسلامي وآخرون [94].

قام وو وآخرون [95] بعمل على البارافين المشبع بالجسيمات النانوية. تم استخدام جسيمات النانوية Cu، Al و C/Cu لتحسين معدل انتقال الحرارة أثناء عمليتي التصلب و الذوبان. أظهرت النتائج أن البارافين مع جسيمات النانوية أدى إلى تحسين معدل انتقال حرارة بشكل كبير مقارنةً بالبارافين النقي. و قد أشار التحليل الذي تم إجراؤه إلى أن جسيمات النحاس النانوية قدمت أقوى تحسين مقارنةً بالجسيمات النانوية Al و C/Cu.

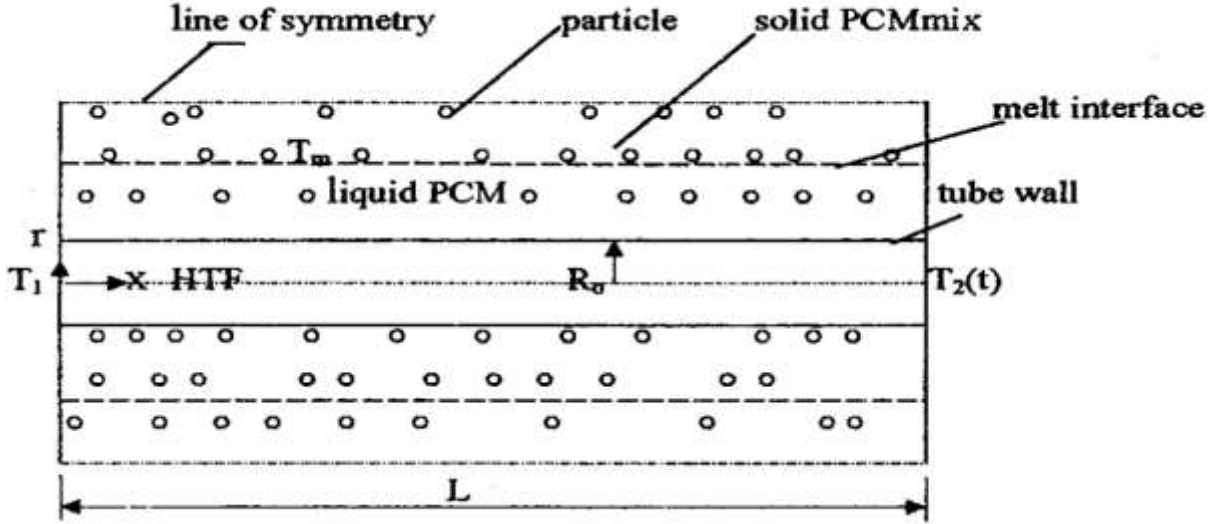
تم إجراء محاكاة عددية باستخدام برنامج FLUENT من قبل أراسو وآخرون [96] لفحص تأثير الجسيمات النانوية  $Al_2O_3$  على شمع البارافين في مبادل حراري مزدوج الأنبوب متحدة المركز. تمت مقارنة الخواص الحرارية الفيزيائية المحسوبة للبارافين المشبع بجسيمات النانوية  $Al_2O_3$  مع قياس اتهو و غاو في [97] و لوحظ اتفاق جيد بين هاتين المجموعتين من البيانات. أظهرت النتائج أن جسيمات النانوية  $Al_2O_3$  في شمع البارافين لها تأثير كبير على معدلات شحن و تفريغ للطاقة الحرارية مقارنة بالحالة التي تحتوي على البارافين النقي.

في المرجع [98] ركز المؤلفون على التحقيق في ذوبان شمع البارافين المشبع بثلاثة أكاسيد معدنية مختلفة  $Al_2O_3$ ، CuO و ZnO و التي يتم تسخينها من جانب واحد من حاوية مستطيلة بأبعاد  $25mm \times 75mm$ . بينت النتائج بأن الجسيمات النانوية المشتتة ذات النسب الحجمية الأصغر تظهر ارتفاعاً في معدل انتقال الحرارة. كما بينت النتائج أن الأداء الحراري يكون أكبر قليلاً باستخدام الجسيمات النانوية  $Al_2O_3$ .

اقترح سينراج وآخرون [99] التعبير النظري لتخزين الطاقة و تدفق الحرارة للحالات التي تحتوي على جسيمات مشتتة و بدونها في PCM و تحديد النسبة الأمثل للجسيمات المشتتة لزيادة تخزين الطاقة و تدفق الحرارة إلى أقصى حد. يوضح الشكل (12.2) الرسم التخطيطي المستخدم في هذه الدراسة. و لقد وجد من خلال النتائج أن سعة تخزين الطاقة انخفضت مع زيادة نسبة الجسيمات، و ذلك بسبب الجسيمات التي تقلل

## الفصل الثاني: مراجعة الدراسات السابقة

الحجم الذي يشغله PCM. و مع ذلك، أدت إضافة الجسيمات إلى زيادة التدفق الآني للحرارة السطحية وبالتالي تسريع عملية تخزين الطاقة. كما أظهرت النتائج أيضًا أن النسبة الأمثل للجسيمات المشتتة لزيادة الطاقة المخزنة إلى أقصى حد يعتمد على الموصلية الحرارية للنسبة المشتت.



الشكل 12.2: رسم تخطيطي لوحدة التخزين التي تحتوي على جسيمات مشتتة [99]

درس هو وآخرون [100] بشكل تجريبي تأثيرات الصفائح الجرافين النانوية في 1-تيترايديكانول بتركيزات مختلفة على معدلات الذوبان و تخزين الحرارة على لوح أفقي مسخن. أظهرت النتائج التجريبية أن ارتفاع معدل ذوبان NPCM لا يؤدي بالضرورة إلى ارتفاع معدل تخزين الحرارة.

درس كانط وآخرون [101] تأثير إدخال جسيمات الجرافين النانوية (GNP) بتركيزات مختلفة في العديد من PCMs (n-octadecane و CaCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O Capric Acid). وقاموا بالتحقيق عدديًا في ذوبان جسيمات الجرافين النانوية المشتتة PCM المملوءة في تجويف مربع من الألومنيوم مسخن من جانب واحد. أظهرت النتائج أن إضافة جسيمات الجرافين النانوية تزيد من معدل الذوبان، و لكنها قد تعيق أيضًا انتقال الحرارة بالحمل داخل التجاويف الكبيرة.

### 3.4.4.2 وسط مسامي

تم إجراء العديد من الدراسات حول تحسينات الموصلية الحرارية بطريق تشريب PCMs في مواد مسامية، إن وجود مادة مسامية ذات موصلية حرارية عالية يجعل الموصلية الحرارية الكلية لمادة المسامية PCM أعلى من PCM النقي [102]. تستخدم رغوة النحاس، الألومنيوم و الجرافيت الموسع (EG) على نطاق واسع كمواد مسامية لزيادة الموصلية الحرارية لـ PCMs. و يعود التحسن بشكل أساسي إلى الموصلية الحرارية العالية و الكثافة المنخفضة نسبيًا أو المتوسطة [42]. تم إجراء دراسة تفصيلية حول تحسين انتقال الحرارة لـ PCMs باستخدام المواد المسامية. تمت مراجعة المركبات المختلفة من الرغاوي المعدنية (النحاس والنيكل والألومنيوم) والكربون (الكربون والجرافيت والجرافيت الموسع). باستخدام PCM / الرغوة يتم تحسين معدلات الشحن والتفريغ، ولكن تنخفض كل من الحرارة الكامنة والحرارة النوعية [103].

قام مصالحي وآخرون [104] بتحقيق عدديًا في تأثير المصفوفة المسامية بقيم مختلفة للموصلية الحرارية و المسامية المملوءة بـ PCM في أسطوانتين متحدتين المركز. تم استخدام طريقة العناصر المحددة، و من أجل التحقق من صحة النموذج العددي، تم فحص الحمل الحر أثناء عملية الذوبان لـ PCM النقي. من خلال هذه الدراسة وجد أن وجود المصفوفة المسامية له تأثير كبير على انتقال الحرارة ومعدل الانصهار لتخزين طاقة PCM، حيث يؤدي تقليل مسامية المصفوفة إلى زيادة معدل الانصهار، ولكنه يحد أيضًا من حركة الحمل الحراري. وجد أيضًا أن أفضل تقنية لتحسين استجابة تخزين PCM هي استخدام مصفوفة صلبة ذات مسامية عالية وموصلية حرارية عالية.

قاما فانيكومار و ماهاجان [105] بإجراء تحليل تجريبي و عددي للحمل الحراري الطبيعي داخل الرغوات المعدنية عالية المسامية التي يتم تسخينها من الأسفل. تم فحص تأثير العديد من الرغوات المعدنية (الألومنيوم، الكربون و النيكل) على تحسين انتقال الحرارة، و وجد أن استخدام الرغوات المعدنية أدى إلى

تحسين كبير في انتقال الحرارة. من ناحية أخرى، تم الإبلاغ أيضًا عن تأثير أرقام دارسي ورايلي على انتقال الحرارة، و تم إثبات أن التأثيرات الحرارية المحلية غير المتوازنة أصبحت كبيرة عند أرقام دارسي و رايلي المرتفعة.

درس بونومو وآخرون [106] تأثير استخدام رغوة الألمنيوم عددًا على السلوك الحراري لـ RT58. و قد أشارت النتائج أن استخدام الوسط المسامي يؤدي إلى زيادة انتقال الحرارة الكلية بمقدار ضعفين مقارنة بالحالة التي لا تحتوي على وسط مسامي.

في دراسة تجريبية قام يانغ وآخرون [107] بتحليل تأثيرات رغوة النحاس ذات الخلية المفتوحة المشبعة بشمع البارافين على الأداء الحراري لوحدة القشرة و الأنبوب أثناء عملية الشحن. أظهرت النتائج أن تضمين رغوة النحاس قلل من وقت الشحن بنسبة 60.6% و كان توزيع درجة الحرارة أكثر انتظامًا.

تمت دراسة تأثيرات استخدام رغوة النحاس في تحسين انتقال الحرارة في نظام LHTEs عددًا من قبل يانغ وآخرون [108] و قد تبين أن تضمين رغوة النحاس يقلل من وقت الشحن بنسبة 88.548%. بالإضافة إلى ذلك، يمكن أن يؤدي تضمين الرغوة المعدنية في مواد متغيرة الطور إلى تحسين توحيد درجة حرارة مواد متغيرة الطور.

قام عطل وآخرون [13] بتحقيق تجريبي و عددي في عملية تغيير الطور لشمع البارافين المشبع برغوة الألمنيوم بمساميتين مختلفتين (95% و 77%) أثناء الشحن و التفريغ. و وجد أن استخدام مصفوفة التوصيل مع مادة PCM أدى إلى تقليل دورة الشحن/التفريغ بشكل كبير، و أن الرغوة المعدنية ذات المسامية الأقل تقصر الدورة بشكل أكبر بسبب ارتفاع الموصلية الحرارية الكلية.

مرجع	مواد ذات موصلية حرارية عالية	PCM	الملاحظات
[109]	جسيمات نانوية	شمع البارفين	عند إضافة نسب كتلية 2% و 4% من $Al_2O_3$ يتم تقليل وقت الشحن الكامل لأجهزة LHTES المدمجة بمقدار 57 min و 106 min على التوالي.
[110]	جسيمات نانوية	RT35	تحسن إضافة الجسيمات النانوية التوصيل الحراري و تضعف مساهمة الحمل الحراري.
[111]	جسيمات نانوية	RT48	إن النسبة الكتلية 2% من EG قدمت وقت ذوبان أقصر
[112]	رغوة نحاسية	RT35	أن استخدام مركب الرغوة يسرع كل من عمليتي الذوبان و التصلب بشكل كبير مقارنة باستخدام PCM النقي.
[113]	رغوة نحاسية	البارفين	أن وقت ذوبان مركب الرغوة النحاسية/البارفين كان أقل بنسبة 20.5% من PCM النقي.
[114]	رغوة نحاسية	RT35	أن إضافة رغوة النحاس تحسن معدلات الذوبان و التصلب بشكل كبير.بالإضافة إلى ذلك، بإدخال رغوة معدنية ذات مسامات $\epsilon = 0.9$ و $\epsilon = 0.7$ ينخفض وقت الذوبان بنسبة 14% و 55% على التوالي.
[115]	رغوة نحاسية	RT 35	أن وقت ذوبان مركب الرغوة النحاسية/البارفين كان أقل بنسبة 85% من PCM النقي.
[116]	رغوة نحاسية	RT82	تم تقليل وقت الذوبان بنسبة 5.9% للرغوة المعدنية.
[54]	رغوة نحاسية	حمض الستياريك	تم تحسين معدلات للذوبان والتصلب بنسبة 16.67% و 33.33% على التوالي مقارنة بـ PCM النقي.

الجدول 6.2: دراسات استخدام مواد ذات موصلية حرارية عالية في أنظمة PCM

#### 5.4.2 التحسين الحراري لـ PCM باستخدام التقنيات المشتركة

أصبح نهج الجمع بين تقنيتين أو أكثر من تقنيات انتقال الحرارة أكثر شيوعاً في الماضي القريب و هذا راجع لتحقيق المزيد من التحسين في الأداء الحراري الكلي.

قاما مهدي و نصوفر [117] بالتحقق عددياً من التأثيرات المركبة لإضافة جسيمات الألومينا النانوية و إدخال رغوة نحاسية بمساميتين مختلفتين (98% و 95%) على ذوبان PCM داخل مبادل حراري ثلاثي. و أظهرت النتائج أن وقت الذوبان يمكن أن ينخفض حتى 90% باستخدام جسيمات نانوية مشتتة في وجود الرغوة المعدنية.

قام الجثله وآخرون [118] بتحقيق تجريبياً في ذوبان زيت جوز الهند المحسن بالنانو داخل رغوة الالمنيوم مفتوحة الخلية. أظهرت النتائج أن إضافة الجسيمات النانوية و رغوة الألومنيوم سرعت من ذوبان زيت جوز الهند بشكل كبير. و مع ذلك، كان تأثير رغوة الألومنيوم على ذوبان PCM أقوى من تأثير الجسيمات النانوية. النتيجة الرئيسية الثانية هي أن إجمالي الطاقة المخزنة قد انخفضت في وجود الجسيمات النانوية و الرغوة المعدنية. يوضح الجدول (7.2) بعض الدراسات لتقنية انتقال الحرارة المشتركة المستخدمة في أنظمة .LHTES

مرجع	التقنيات المشتركة	هندسة النظام	الملاحظات
[119]	زعانف & الأنابيب الحرارية	أنبوب حراري	تم زيادة معدل استرجاع الطاقة بنسبة 86 % وزادت فعالية الأنابيب الحرارية بنسبة 24%.
[120]	تغليف الماكرو & رغوة, تغليف الماكرو & إسفنجة	كبسولات اسطوانية	كان التحسن الفعال في الموصلية الحرارية مع الرغوة 15% والإسفنجة 32%.
[121]	زعانف & الأنابيب الحرارية	مبادل حراري	تمت زيادة كمية الطاقة المستخرجة بنسبة 140% في تكوين HP-12 مقارنة بالحالة الأساسية.

## الفصل الثاني: مراجعة الدراسات السابقة

[122]	الجسيمات النانوية & رغوة المعدنية	متوازي مستطيلات	أن إضافة كل من الجرافيت والرغوة الكربونية لشمع البرافين يحسن الخواص الحرارية ويمنع تسرب البارافين الذائب مما يحافظ على أدائه الحراري المستقر.
[123]	الرغوة المعدنية & الأنابيب الحرارية ذات زعانف	حاوية مربعة	كل من الرغوة المعدنية و الأنابيب الحرارية تؤثر بشكل كبير في عمليتي الشحن والتفريغ. كما تبين أن مسامية الرغوة المعدنية تلعب دورا رئيسيا في سلوك الحراري للنظام أثناء عمليتي الشحن والتفريغ.
[124]	زعانف & الرغوة المعدنية	القشرة و الأنبوب	انخفاض وقت الذوبان / التصلب الكامل بنسبة 85.83% و 95.83%
[125]	جسيمات نانوية & الرغوة المعدنية	مبادل حراري ثلاثي	عند استخدام جسيمات نانوية/رغوة معدنية يقل وقت الذوبان/التصلب بنسبة 84.2 % 88.8 مقارنة بنظام PCM النقي.
[56]	جسيمات نانوية & زعانف	تجويف مربع	يكون التحسين الناتج عن الجسيمات النانوية مرتفعًا بشكل ملحوظ في تجويف الزعنفة الأصغر ، ومع ذلك ، فإنه يبدأ في الانخفاض مع زيادة طول الزعنفة.

الجدول 7.2: دراسات استخدام التقنيات المشتركة في أنظمة LHTES

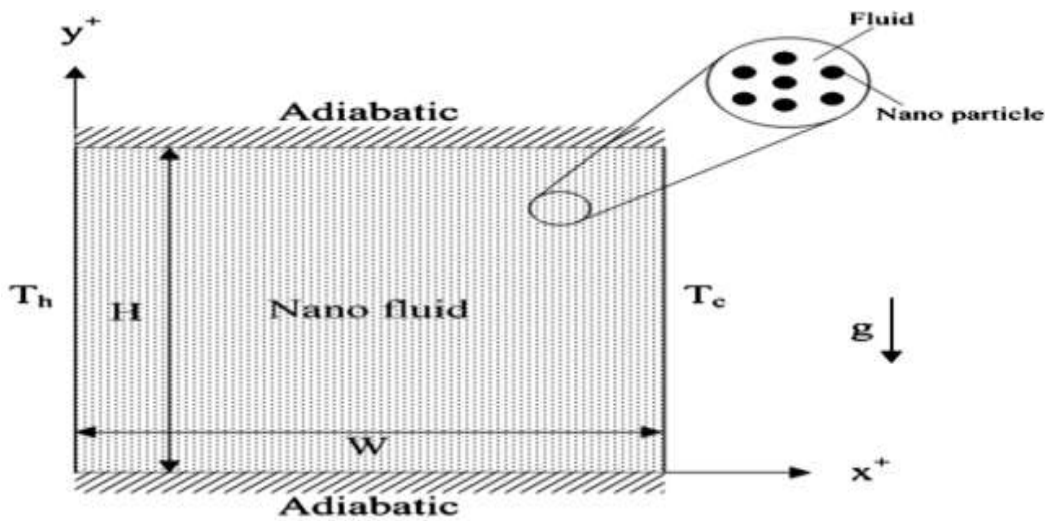
### 6.4.2 التحسين الحراري لـ PCM باستخدام الموائع النانوية

حظي مجال الموائع النانوية باهتمام كبير في الآونة الاخيرة. الموائع النانوية عبارة عن معلقات سائلة مخففة للجسيمات النانوية الصلبة أو الألياف النانوية بأحجام من 1-100 نانومتر في مائع اساسي مثل جلايكول الإيثيلين أو الماء أو الزيت [127,126] أدت التطورات الأخيرة في مجال انتقال الحرارة إلى تجديد الاهتمام بالموائع النانوية، و يرجع هذا الاهتمام المتزايد بالموائع النانوية بالدرجة الأولى إلى تحسين خصائصها الفيزيائية الحرارية و قوتها على اندماج في مجموعة واسعة من التطبيقات الحرارية. و في دراسة مكثفة لخص المؤلفون [129,128] نتائج الدراسات التجريبية و النظرية حول تحسين انتقال الحرارة باستخدام

## الفصل الثاني: مراجعة الدراسات السابقة

الموائع النانوية، خصائص الفيزيائية الحرارية، الحركة البراونية و الحمل الحر في انتقال الحرارة. و تم تقديم أيضا توصيات حول تحضير الموائع النانوية.

فحص هو وآخرون [130] عدديا نماذج مختلفة لتأثير اللزوجة الديناميكية و الموصلية الحرارية للموائع النانوية في انتقال الحرارة بالحمل الطبيعي. تم تنفيذ النمذجة الرقمية ثنائية الأبعاد لحاوية كما هو مبين في الشكل (13.2)، باستخدام خليط من الماء و الألومينا  $Al_2O_3$  كمائع نانوية. أشارت النتائج إلى تحسن انتقال الحرارة عبر الحاوية.



الشكل 13.2: رسم تخطيطي لنظام الحاوية [130]

قام جافطاش وآخرون [131] بدراسة عددية للمائع النانوية في أنبوب حراري أسطواني. تم إنشاء نموذج ثنائي الأبعاد لأنبوب الحراري باستخدام برنامج FLUENT. و وجدوا أن المائع النانوية حسن معدل انتقال الحرارة في أنبوب الحراري و قلل من مقاومته الحرارية.

قام صيام سوندار وآخرون [132] بالتحقيق عدديا في خصائص التدفق الصفحي و انتقال الحرارة لثلاثة موائع نانوية مختلفة و هي  $Al_2O_3$ ،  $CuO$  و  $TiO_2$ ، في أنبوب دائري باستخدام برنامج FLUENT. تراوحت تراكيزات الجسيمات من 0.3 إلى 2%، أظهرت النتائج أن معامل انتقال الحرارة يزداد مع زيادة تركيز

## الفصل الثاني: مراجعة الدراسات السابقة

الجسيمات. بالإضافة إلى ذلك، تم توفير أعلى معامل انتقال حرارة بواسطة جسيمات النانوية  $Al_2O_3$ ، تليها  $CuO$  وأخيراً  $TiO_2$ .

درس ساسميتو وآخرون [133] أيضاً مشكلة انتقال الحرارة بالتدفق الصفحي في أنابيب ذات مقطع عرضي مربع تحتوى على الموائع النانوية المختلفة و هما  $Al_2O_3$  و  $CuO$  في الماء. تم تحسين انتقال الحرارة باستخدام الموائع النانوية و قدم  $Al_2O_3$  أداء أفضل من  $CuO$ .

مرجع	مائع	جسيمات نانوية	الطريقة	الملاحظات
[134]	الملح المنصهر	$Al_2O_3$	عددية	أداء انتقال الحرارة يزداد مع تركيز الجسيمات النانوية عند رقم رايلى المرتفع و لكنه ينخفض عند انخفاض عدد رايلى.
[135]	ماء	$Al_2O_3$ / $TiO_2$	تجريبية	الموائع النانوية $Al_2O_3$ /ماء و $TiO_2$ /ماء يمكن أن تقلل من درجة حرارة لـ CPU بنسبة 23.2% و 14.9% مقارنة بالماء على التوالي.
[136]	ماء	فضة	تجريبية	يمكن للموائع النانوية التي تحتوي على 0.1% تحسن معامل انتقال الحرارة بنسبة 47%.
[137]	ماء	$TiO_2$	تجريبية	الموائع النانوية ذات النسبة الكتلية 0.3% و 0.4% تظهر أفضل أداء تبريد، كما تظهر الموائع النانوية ذات النسبة الكتلية المنخفض 0.1% أعلى كفاءة للطاقة.
[138]	ماء	الجرافين	عددية	تم تحسين معامل انتقال الحرارة بنسبة 29% في وحدة القشرة والأنبوب باستخدام 0.2% من الجرافين/ الماء مقارنة بالماء كمائع أساسي.

الجدول 8.2: دراسات تحسين انتقال الحرارة باستخدام الموائع النانوية

### 5.2 الخاتمة

يقدم هذا الفصل مراجعة شاملة للدراسات الهامة ذات الصلة بموضوع بحث الدكتوراه هذا. لتطوير أنظمة PCM نحتاج إلى فهم جيد للظواهر الفيزيائية التي تنطوي عليها هذه الأنظمة، لتحقيق ذلك نعتمد على الجانب النظري، التجارب و نمذجة لهذه الأنظمة. لذلك في هذا الفصل، هدفتنا إلى تغطية المفاهيم المتعلقة بتطبيقاته الحرارية مع التركيز بشكل خاص على تحليل التقنيات المستخدمة لتحسين أداء الطاقة لأنظمة التخزين الحراري و الطرق المستخدمة لتحسين انتقال الحرارة في مواد متغيرة الطور.

من خلال المراجعة، يمكن ملاحظة أن تقنيات العمود المحشو و حاويات الأسطوانية PCM قد تم فحصها جيدًا بشكل تحليلي و تجريبي في عدد كبير من الأوراق المنشورة. تم النظر بالتفصيل في تصميمات أنظمة التخزين و تكويناتها، مواد PCM المستخدمة، طرق تحسين انتقال الحرارة و العوامل التي تؤثر على أداء النظام.

يتمثل التحدي الرئيسي لـ PCM كنظام فعال لتخزين الطاقة الحرارية الكامنة في الموصلية الحرارية المنخفضة. يعتمد الاستخدام الناجح لـ PCM على تحسينه الحراري، يتم بذل جهود مختلفة لتحسين أداء انتقال الحرارة لـ PCM من خلال تحسين الموصلية الحرارية، و تم تركيز على تقنيات التحسين الحراري على معالجة معدل الشحن/التفريغ (الذوبان/التصلب) و كمية الطاقة المخزنة أثناء تغير الطور. تمت دراسة الأشكال الهندسية و التكوينات المختلفة للأسطح الممتدة، مواد الجرافيت، الجسيمات النانوية، الوسائط المسامية، PCM متعدد، الأنابيب الحرارية و التقنيات المشتركة على نطاق واسع لتحسين عملية انتقال الحرارة في أنظمة التخزين الحراري عن طريق زيادة الموصلية الحرارية الفعالة في خليط مواد متغيرة الطور و المكونات المضافة. العيب الرئيسي في الطرق المذكورة أعلاه هو أنه من الضروري زيادة حجم النظام من أجل توفير نفس كمية الطاقة المخزنة. كما تم إجراء دراسات عديدة للتحقيق في تأثير الموائع النانوية على الأداء الحراري لـ LHTES.

نتيجة لمراجعة الدراسات السابقة تمت صياغة الهدف الرئيسي لهذه الدراسة و هذا من اجل اختيار أكثر الوسائل فعالية لتحسين انتقال الحرارة في أنظمة التخزين الحراري باستخدام PCM و تهدف هذه الدراسة إلى إجراء تحقيقات بحثية نظرية لفهم خصائص انتقال الحرارة في الجسيمات النانوية و الوسط المسامي مع PCM. و إن التقنية المشتركة بين الجسيمات النانوية و الرغوة المعدنية خيارا جذابا لتحسين معدل الذوبان/التصلب للحصول على أداء حراري أفضل.

# الفصل الثالث

## أساسيات تقنية

### CFD

### 1.3 مقدمة

حسابية ديناميكيات الموائع (CFD) هي منهجية عددية لحل معادلات الواسفة لتدفق الموائع. المعادلات الواسفة هي معادلات تفاضلية جزئية وعندما يتم تحديدها على شبكة تتحول إلى معادلات جبرية يتم حلها في حالة FLUENT باستخدام طريقة الحجوم المنتهية. في هذا الفصل يتم وصف المعادلات الواسفة لنمذجة CFD، بما في ذلك تلك المستخدمة لوصف تصلب/ذوبان PCMs.

### 2.3 المعادلات التفاضلية الواسفة لتدفق الموائع وانتقال الحرارة

في CFD المعادلات الأساسية الواسفة لتدفق الموائع وهي المعادلات الانحفاظ الثلاث [139]:

- حفظ الكتلة

- حفظ كمية الحركة

- حفظ الطاقة

يقدم هذا القسم المعادلات الأساسية الواسفة لتدفق الموائع وانتقال الحرارة، وهي معادلات الاستمرارية، كمية الحركة والطاقة.

### 1.2.3 معادلة الاستمرارية

FLUENT يحل معادلات حفظ الكتلة لجميع التدفقات. تتم كتابة معادلة حفظ الكتلة أو معادلة

الاستمرارية في المجال الحسابي على النحو التالي [139]:

$$(1.3) \quad \frac{d\rho}{dt} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = S_m$$

تدرج  $\nabla$  هو تعبير عن نظام الإحداثيات الديكارتية ثلاثية الأبعاد، أي إحداثيات x-y-z.

المعادلة (1.3) هي الشكل العام الرئيسي لمعادلة حفظ الكتلة التي يمكن تطبيقها على كل من التدفقات القابلة للضغط وغير القابلة للضغط. المصدر  $S_m$  هو الكتلة المضافة إلى المرحلة المستمرة من المرحلة الثانية المشتتة (على سبيل المثال، بسبب تبخر قطرات السائل) ولإضافة المصادر يجب استخدام تعريف الدالة UDF، وفي هذه الحالة تكون قيمتها صفرًا. ومنه يمكن إعادة صياغة المعادلة كما في (2.3).

$$(2.3) \quad \frac{d\rho}{dt} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0$$

### 2.2.3 معادلة كمية الحركة

تمت صياغة معادلة حفظ كمية الحركة من المبدأ الفيزيائي الأساسي (قانون نيوتن الثاني) وهي كالتالي:

$$(3.3) \quad \vec{F} = m\vec{a}$$

بينما في الإطار المرجعي غير المتسارع يمكن حساب حفظ كمية الحركة من خلال المعادلة (4.3)[139]:

$$(4.3) \quad \frac{d(\rho \vec{v})}{dt} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F}$$

حيث  $p$  هو الضغط الثابت،  $\bar{\tau}$  موتر الإجهاد،  $\rho \vec{g}$  هي قوة الجاذبية و قوة الخارجية على التوالي. تشمل  $\vec{F}$  أيضًا مصطلحات مصدر أخرى تعتمد على النموذج، مثل مصادر الوسائط المسامية التي يحددها المستخدم.

يتم الكشف عن معادلة حفظ كمية الحركة مباشرة من المبدأ الفيزيائي الأساسي المطبق على عنصر مائع

متناهي الصغر. المعادلة (4.3) في شكل عدم حفظ بسبب عناصر الموائع التي تؤثر على حركة التدفق و

يطلق عليها معادلة نافيرستوكس. تكون صيغة معادلة نافيرستوكس كما يلي:

$$(5.3) \quad \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \vec{V}) = -\frac{dp}{dx} + \frac{d\tau_{xx}}{dx} + \frac{d\tau_{yx}}{dy} + \frac{d\tau_{zx}}{dz} + \rho f_x$$

$$(6.3) \quad \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \vec{V}) = -\frac{dp}{dy} + \frac{d\tau_{xy}}{dx} + \frac{d\tau_{yy}}{dy} + \frac{d\tau_{zy}}{dz} + \rho f_y$$

$$(7.3) \quad \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w \vec{V}) = -\frac{dp}{dz} + \frac{d\tau_{xz}}{dx} + \frac{d\tau_{yz}}{dy} + \frac{d\tau_{zz}}{dz} + \rho f_z$$

حيث  $u, v, w$  هي مركبات السرعة (m/s) للمحاور  $x, y, z$  على التوالي،  $\tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{zz}$  هي مكونات الإجهاد لكل اتجاه، و  $\tau_{ij}$  هي مكونات الإجهاد القصي التي تعمل في كل اتجاه.

يتم التعبير عن موتر الإجهاد  $\tau$  بالعلاقة التالية [139]:

$$(8.3) \quad \bar{\tau} = \mu [(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I]$$

حيث  $I$  موتر الوحدة.

### 3.2.3 النماذج المضطربة

تعد مجالات السرعة المتذبذبة إحدى خصائص التدفقات المضطربة، حيث تحتوي التذبذبات على مزيج من الكميات المنقولة مثل كمية الحركة، الطاقة وتركيز الأنواع مما يؤدي إلى تذبذب الكميات المنقولة. تتميز هذه التذبذبات بمقاييس صغيرة ذات ترددات عالية، مما يجعلها مكلفة حسابياً لئتم محاكاتها في حسابات هندسية عملية. ومن ناحية أخرى، فإن المعادلة الواصفة هي متوسط زمني ويمكن أن تلغي الحسابات صغيرة النطاق. وبالتالي، هناك زيادة في المتغيرات غير المعروفة في المعادلات المعدلة والتي تتطلب نماذج الاضطراب لتحديد هذه المتغيرات من حيث الكميات المعروفة [139]. في هذه الدراسة، في النموذج الحسابي تم افتراض أن تدفق PCM المنصهر كان صفحياً، بينما التدفق HTF في الأنبوب كان مضطرباً، و توجد خيارات أخرى للنماذج المضطربة متاحة في ANSYS FLUENT [139].

### 1.3.2.3 نموذج $k-\varepsilon$

يعد نموذج  $k-\varepsilon$  أحد أكثر نماذج الاضطراب شيوعًا. إنه نموذج ذو المعادلتين ( $k-\varepsilon$ )، مما يعني أنه يتضمن معادلتين إضافيتين للنقل لتمثيل الخصائص المضطربة للتدفق. يسمح هذا النموذج ذو المعادلتين بتفسير تأثيرات الحمل وانتشار الطاقة المضطربة.

المتغير الأول هو الطاقة الحركية المضطربة  $k$  والمتغير الثاني في هذه الحالة هو تشتت المضطرب  $\varepsilon$ ، المتغير  $\varepsilon$  هو الذي يحدد مقياس الاضطراب، في حين أن المتغير  $k$  يحدد الطاقة في الاضطراب. وهناك ثلاثة نماذج  $k-\varepsilon$  متاحة في الإصدار الخامس عشر من ANSYS FLUENT:  $k-\varepsilon$ : standard RNG،  $k-\varepsilon$ : Realizable. جميع النماذج الثلاثة لها صيغة مماثلة، مع معادلات النقل لـ  $k$  و  $\varepsilon$ . الاختلافات الرئيسية بين النماذج هي كما يلي [139].

- طريقة حساب اللزوجة المضطربة
- عدد براندل  $Pr$  المضطرب لـ  $k$  و  $\varepsilon$
- مصطلحا التوليد والتدمير في المعادلة  $\varepsilon$

### 2.3.2.3 النموذج $k-\varepsilon$ standard

النموذج  $k-\varepsilon$  standard هو نموذج شبه تجريبي يعتمد على معادلات النقل النموذجية للطاقة الحركية المضطربة  $k$  ومعدل تبديدها  $\varepsilon$ . صالح فقط للتدفقات المضطربة تمامًا وتأثير اللزوجة الجزيئية مهملة. ترد معادلات النقل للنموذج  $k-\varepsilon$  standard أدناه [139]:

$$(3.9) \quad \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{u_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k$$

$$(3.10) \quad \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{u_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon$$

حيث  $G_k$  توليد الطاقة الحركية المضطربة بسبب تدرجات السرعة،  $G_b$  هو توليد الطاقة الحركية بسبب الطفو، يمثل  $Y_M$  مساهمة الامتداد المتذبذب في الاضطراب القابل للانضغاط لمعدل التشتت الكلي،  $C_{1\varepsilon}$ ،  $C_{2\varepsilon}$  و  $C_{3\varepsilon}$  ثوابت،  $\sigma_k$  و  $\sigma_\varepsilon$  هما عددا براندل المضطرب  $\varepsilon$  و  $k$ ،  $S_\varepsilon$  و  $S_k$  هما مصطلحان مصدران يعرفهما المستخدم. للزوج المضطربة  $\mu_t$  يتم حسابها كما يلي [139]:

$$(3.11) \quad \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

ثوابت النموذج  $C_{1\varepsilon}$ ،  $C_{2\varepsilon}$ ،  $C_\mu$ ،  $\sigma_k$  و  $\sigma_\varepsilon$  لها القيم الافتراضية التالية في FLUENT [139]:

$$\sigma_\varepsilon = 1.3 \text{ و } \sigma_k = 1, C_\mu = 0.09, C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92$$

### 3.3.2.3 تأثيرات الطفو على الاضطراب في نموذج $k-\varepsilon$

في ANSYS FLUENT باستخدام نماذج  $k-\varepsilon$  حيث يتواجد حقل الجاذبية غير الصفري وتدرج درجة الحرارة، كلاهما سيشكل توليد  $k$  بسبب الطفو ( $G_b$  في معادلة (3.9))، وبالتالي يساهم في حساب  $\varepsilon$  في المعادلة [139] (3.10).

يكتب حد التوليد الناتج عن الطفو كالتالي [139]:

$$(12.3) \quad G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i}$$

حيث  $Pr_t$  هو رقم براندل المضطرب للطاقة و  $g_i$  هو مكون متجه الجاذبية في الاتجاه  $i$ . بالنسبة لنموذجين SKE و RKE فان القيمة الافتراضية لـ  $Pr_t$  هي 0.85، و في حالة نموذج  $k-\varepsilon$  RNG فان قيمة  $Pr_t=1/\alpha$  حيث تعطى  $\alpha$  كالتالي [139]:

$$(13.3) \quad \left| \frac{\alpha - 1.3929}{\alpha_0 - 1.3929} \right|^{0.6321} \left| \frac{\alpha + 2.3929}{\alpha_0 + 2.3929} \right|^{0.3679} = \frac{\mu_{mol}}{\mu_{eff}}$$

حيث  $\alpha_0 = 1/Pr = k/\mu c_p$ . في الحد الأقصى لعدد رينولدز ( $\alpha_k = \alpha_\varepsilon = 1.393$ ) ( $\frac{\mu_{mol}}{\mu_{eff}} \ll 1$ ). يتم التعبير عن معامل التمدد الحراري  $\beta$  على النحو التالي:

$$(14.3) \quad \beta = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p$$

وبالنسبة للغازات المثالية:

$$(15.3) \quad G_b = -g_i \frac{\mu_t}{\rho Pr_t} \frac{\partial p}{\partial x_i}$$

في ANSYS FLUENT، إذا كان كل من حقل الجاذبية غير الصفري وتدرج درجة الحرارة غير الصفري (أو الكثافة) متواجدين، فيجب تضمين تأثيرات الطفو على توليد  $k$ . يتم إهمال تأثيرات الطفو عن طريق ضبط  $G_b$  على الصفر في معادلة النقل المعادلة (10.3)، و إذا تم تضمين تأثيرات الطفو فإن قيمة  $G_b$  المحددة بواسطة المعادلة (15.3) يجب استخدامها في معادلة النقل لع المعادلة (10.3).  
درجة تأثر  $\varepsilon$  بالطفو تُحسب بـ [139]:

$$(16.3) \quad C_{3\varepsilon} = \tanh \left| \frac{v}{u} \right|$$

حيث  $v$  مركبة سرعة التدفق الموازي لمتجه الجاذبية و  $u$  مركبة سرعة التدفق المتعامد مع متجه الجاذبية. بهذه الطريقة  $C_{3\varepsilon}$  سيصبح 1 لطبقات القص الطافية التي يكون اتجاه التدفق موازي مع اتجاه الجاذبية، وبالنسبة لطبقات القص الطافية المتعامدة مع متجه الجاذبية سيصبح صفرًا [139]  $C_{3\varepsilon}$ .

### 4.2.3 معادلة حفظ الطاقة

للتبؤ بنقل الحرارة بالتوصيل والحمل الحراري، يستخدم FLUENT المصطلح التالي لحفظ الطاقة [139]:

$$(17.3) \quad \frac{\delta}{\delta t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{u}(\rho E + p)) = -\nabla \cdot \left( k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\bar{\tau}_{eff} \cdot \vec{u}) \right) + S_h$$

حيث  $k_{eff}$  الموصلية الحرارية الفعالة والتي تشمل الموصلية الحرارية المضطربة التي يحددها النموذج المضطرب المختار،  $\vec{J}_j$  هو تدفق انتشار  $j$  و  $S_h$  الحرارة المتضمنة في التفاعل وأي مصادر حرارية حجمية أخرى يحددها المستخدم. تمثل المصطلحات الثلاثة الأولى على الجانب الأيمن حرارة التوصيل، انتشار الأنواع والتبديد اللزج على التوالي.

$$(18.3) \quad E = h - \frac{p}{\rho} - \frac{u^2}{2}$$

حيث يتم تعريف أنتالبي المحسوس للغازات المثالية كما يلي:

$$(19.3) \quad h = \sum_j Y_j h_j$$

وللتدفق غير القابل للضغط على النحو التالي:

$$(20.3) \quad h = \sum_j Y_j h_j + \frac{p}{\rho}$$

في المعادلتين (19.3) و (20.3)،  $Y_j$  النسبة الكتلية من الأنواع  $j$ :

$$(21.3) \quad h_j = \int_{T_{ref}}^T C_{p,j} dT$$

حيث  $T_{ref}$  تساوي 298.15K.

يمكن نمذجة الحمل الطبيعي باستخدام طريقتين في FLUENT. النموذجين هما نموذج Prewsise ونموذج Boussinesq. بالنسبة لنموذج Prewsise يقوم المستخدم بإدخال التغير في الكثافة الذي يحدث

في السائل كدالة لدرجة الحرارة، سواء كانت كثيرة الحدود أو مجموعة من نقاط البيانات التي تصف التباين في الكثافة. يتعامل نموذج Boussinesq مع الكثافة كقيمة ثابتة في جميع معادلات الحل باستثناء مصطلح الطفو في معادلة كمية الحركة [139]:

$$(22.3) \quad (\rho - \rho_0)g \approx -\rho_0\beta(T - T_0)g$$

حيث  $\rho_0$  كثافة التدفق (ثابتة)،  $T_0$  درجة حرارة التشغيل، و  $\beta$  معامل التمدد الحراري. يتم الحصول على المعادلة (22.3) باستخدام تقريب Boussinesq ( $\rho = \rho_0(1 - \beta(T - T_0))$ ) لإزالة  $\rho$  من مصطلح الطفو. هذا التقريب دقيق ما دامت التغيرات في الكثافة الفعلية صغيرة وعلى وجه التحديد يكون تقريب Boussinesq صالحًا عندما  $\beta(T - T_0) \ll 1$ .

### 5.2.3 اختيار نموذج الاضطراب

لا يوجد نموذج مضطرب واحد مقبول عالميًا باعتباره متفوقًا لجميع فئات المشاكل، ويعتمد اختيار نموذج الاضطراب على اعتبارات مثل الفيزياء المتضمنة في التدفق، الممارسة المتبعة لفئة محددة من المشاكل، مستوى الدقة المطلوبة، إعادة المصادر الحسابية المتاحة ومقدار الوقت المتاح للمحاكاة. لكي نختار أنسب نموذج لتطبيقك، نحتاج إلى فهم قدرات ومحدودية الخيارات المختلفة. في حين أنه من المستحيل تحديد النموذج الأفضل لتطبيق معين بشكل قاطع، يتم تقديم إرشادات عامة لمساعدتك على اختيار نموذج الاضطراب المناسب للتدفق الذي تريده [139].

نموذج  $k-\epsilon$  standard (SKE) هو نموذج الاضطراب الأكثر استخدامًا للتطبيقات الصناعية.

- تتم معايرة معاملات النموذج باستخدام بيانات مستمدة من عدد من التجارب المرجعية مثل تدفق الأنابيب واللوح المسطح... الخ.

- قوية ودقيقة إلى حد معقول لمجموعة واسعة من التطبيقات.

- يحتوي على نماذج فرعية للانضغاط، الطفو والاحتراق... الخ.

القيود المعروفة لنموذج SKE:

- أداء ضعيف للتدفقات ذات التغير الأكبر للضغط، الانفصال القوي، مكون الدوران العالي والانحناء الانسيابي الكبير.

- إنتاج  $k$  مفرط في المناطق ذات معدل الانفعال الكبير (على سبيل المثال: بالقرب من نقطة الانفصال) مما يؤدي إلى تنبؤات نموذجية غير دقيقة للغاية [140].

### 6.2.3 نمذجة التصلب والذوبان

يتم استخدام طريقة enthalpy-porosity لنمذجة عملية التصلب/الذوبان [139]. تتم كتابة معادلة حفظ الطاقة لهذه الحالة على النحو التالي:

$$(23.3) \quad \frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} H) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S$$

حيث  $H$ ،  $\rho$ ،  $u$ ،  $k$  و  $S$  الانتالبي الكلي، الكثافة، سرعة، الموصلية الحرارية و مصطلح مصدر طاقة على التوالي.

$H$  الانتالبي الكلي وهو مجموع الانتالبي المحسوس والانتالبي الكامن.

$$(24.3) \quad H = h + \Delta H$$

يمكن كتابة الانتالبي المحسوس  $h$  كما يلي:

$$(25.3) \quad h = h_{\text{ref}} + \int_{T_{\text{ref}}}^T C_p dT$$

حيث  $h_{\text{ref}}$  هو الانتالبي المرجعي، و  $C_p$  الحرارة النوعية.

ويمكن كتابة الانتالبي الكامن  $\Delta H$  كما يلي

$$(26.3) \quad \Delta H = \gamma L$$

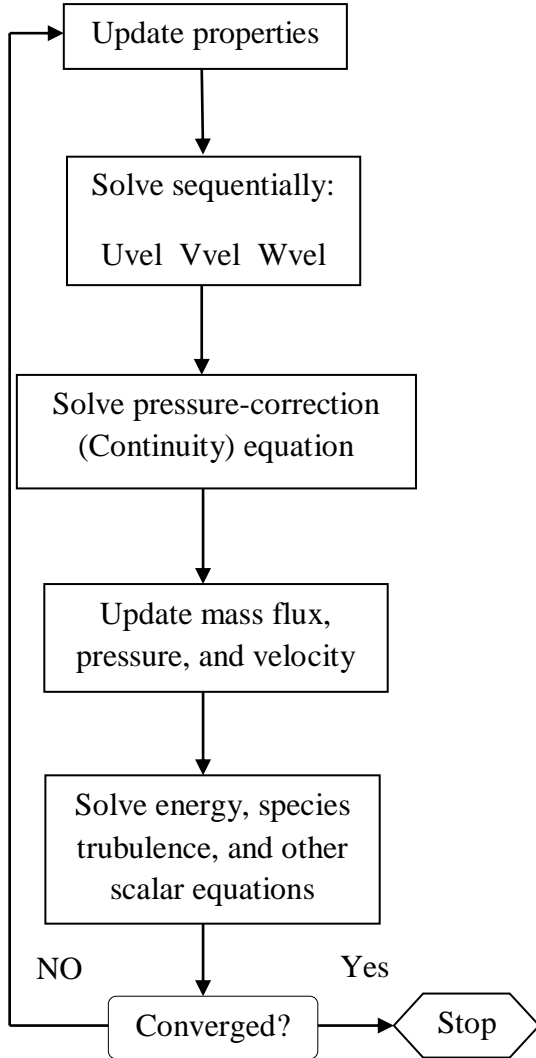
حيث  $L$  هي الحرارة الكامنة،  $\gamma$  نسبة السائل ويمكن التعبير عنه على النحو التالي

$$(27.3) \quad \gamma = \begin{cases} 0 & \text{if } T \leq T_s \\ \frac{T-T_s}{T_l-T_s} & \text{if } T_s < T < T_l \\ 1 & \text{if } T \geq T_l \end{cases}$$

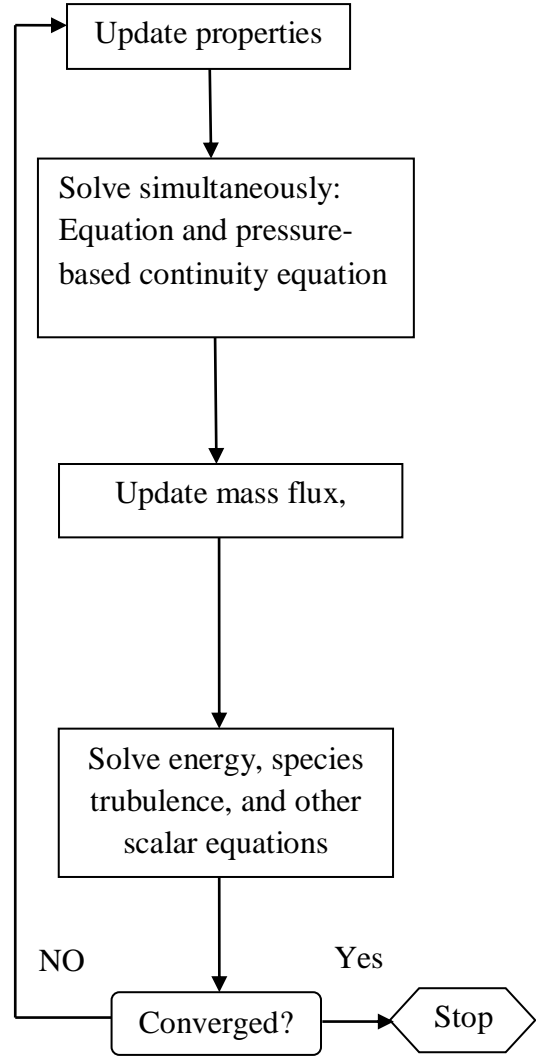
### 7.2.3 اختيار الحل

يوجد في Fluent نوعان من الحلول الرئيسية: الحل القائم على الكثافة والحل القائم على الضغط. تم تطوير النهج القائم على الضغط للتدفقات غير القابلة للضغط منخفضة السرعة، بينما تم استخدام النهج القائم على الكثافة للتدفقات القابلة للضغط عالية السرعة. لا يمكن حل مشكلة نموذج التصلب/الذوبان PCM إلا من خلال الحل القائم على الضغط، لا يتوفر مع الحل القائم على الكثافة. يوفر Fluent خوارزميتين لحل الضغط، خوارزمية منفصلة وخوارزمية مقترنة، انظر الشكل (1.3) [139]. باستخدام المحاكاة يتم تحليل التدفق داخل الأنبوب باستخدام اضطراب k-epsilon وتم تمكين نموذج التصلب/الذوبان لدراسة ظاهرة تغير الطور في PCM.

Pressure-Based Segregated Algorithm



Pressure-Based Coupled Algorithm



الشكل 3.1: نظرة عامة على طرق الحل القائم على الضغط [139]

# الفصل الرابع

الدراسة العددية لأداء PCM محسن في  
وحدة تخزين القشرة و الأنبوب

### 1.4 المقدمة

ينقسم هذا الفصل إلى قسمين. يقدم الجزء الأول التحقق من قدرة تقنية نمذجة CFD على وصف العمليات بدقة في نظام التخزين الحراري باستخدام PCM. تم إجراء محاكاة لتجارب التي وصفها لاکروا [11]، كيبيريا وآخرون [12] و عطال وآخرون [13] وتمت مقارنة النتائج العددية التي تم الحصول عليها في هذه الدراسة مع نتائجهم التجريبية لغرض التحقق من صحة نموذج CFD. أجريت المقارنة بين النتائج التجريبية والعددية من حيث توزيعات درجات الحرارة. يقدم الجزء الأخير التحقيق العددي للأداء الحراري لمزيج من 1-تيترايديكانول مع نسب كتلية مختلفة (0، 1 و 3%) من الصفائح النانوية للجرافين (GNPs) في قشرة و أنبوب أفقية تستخدم للتخزين الحراري الشمسي بينما تم استخدام الماء كمائع ناقل للحرارة (HTF). وقد أجريت عمليات المحاكاة العددية باستخدام برنامج ANSYS/FLUENT 15.0. يتم تحليل توزيع درجة الحرارة، أوقات الذوبان/التصلب وكذلك الطاقة المخزنة/المتحررة أثناء عمليتي الشحن/التفريغ. بالإضافة إلى ذلك، تمت دراسة تأثير تحسين الأداء الحراري للقشرة والأنبوب باستخدام التقنية المشتركة بين الجسيمات النانوية والرغوة المعدنية .

### 2.4 التحقق من نموذج CFD

#### 1.2.4 دراسة الحالة التجريبية من قبل لاکروا، كيبيريا وآخرون و عطال وآخرون

درس كل من لاکروا [11]، كيبيريا وآخرون [12] و عطال وآخرون [13] تجريبياً سلوك وحدة تخزين الحراري للقشرة والأنبوب باستخدام PCM، بينما يتدفق HTF داخل الأنبوب. بالإضافة إلى ذلك، أجرى لاکروا [11] سلسلة من التجارب لدراسة تأثير العوامل الهندسية والحرارية المختلفة على عملية انتقال الحرارة وعلى سلوك النظام أثناء عملية شحن. أجرى كيبيريا وآخرون [12] سلسلة من التجارب لدراسة تأثير مختلف العوامل الحرارية و الهندسية لعملية انتقال الحرارة في كل من دورات الشحن و التفريغ. كما قام عطال

## الفصل الرابع: الدراسة العددية لأداء PCM محسن في وحدة تخزين القشرة و الأنبوب

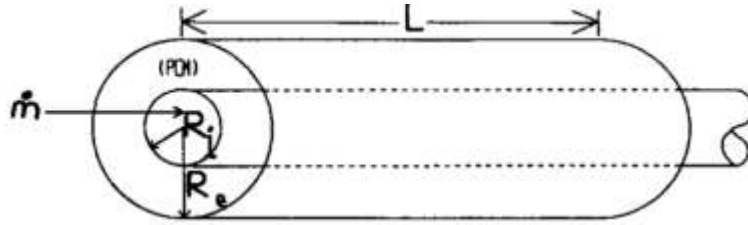
وآخرون [13] بتحقيق تجريبياً وعددياً في عملية تغير الطور لشمع البارافين المشبع برغوة الألمنيوم بمسامية مختلفة (95% و 77%) أثناء عمليتي الشحن و التفريغ.

### 1.1.2.4 النموذج الفيزيائي

لـ لاكروا

يعرض الشكل (1.4) النموذج الفيزيائي للنظام. يملأ PCM القشرة، حيث يتدفق HTF داخل أنبوب

نصف قطر  $R_i$ . الخصائص الفيزيائية الحرارية لـ n-Octadecane موضحة في الجدول (1.4).



الشكل 1.4: تمثيل تخطيطي لوحدة تخزين حراري

الخصائص (الوحدة)	القيمة
الكثافة/سائل $\rho_l$ ( $\text{kg/m}^3$ )	814
الكثافة/الصلب $\rho_s$ ( $\text{kg/m}^3$ )	814
السعة الحرارية للسائل $C_{p,l}$ ( $\text{J/kg K}$ )	2200
السعة الحرارية للصلب $C_{p,s}$ ( $\text{J/kg K}$ )	1900
الموصلية الحرارية للسائل $k_l$ ( $\text{W/m K}$ )	0.148
الموصلية الحرارية للصلب $k_s$ ( $\text{W/m K}$ )	0.358
اللزوجة $\mu$ ( $\text{mPa s}$ )	3.878
الحرارة الكامنة $L$ ( $\text{kJ/kg}$ )	243.5
معامل التمدد الحراري $\beta$ ( $1/\text{K}$ )	0.00091
درجة حرارة الذوبان $T_m$ ( $^\circ\text{K}$ )	300.7

الجدول 1.4: الخصائص الحرارية الفيزيائية لـ n-Octadecane [141]

## الفصل الرابع: الدراسة العددية لأداء PCM محسن في وحدة تخزين القشرة و الأنبوب

أثناء تطوير النموذج الرياضي لانتقال الحرارة، تم اعتماد على الفرضيات التالية:

1. الخصائص الفيزيائية الحرارية لـ PCM و HTF مستقلة عن درجة الحرارة

2. إن PCM متجانس و موحد خواص.

3. يكون التوصيل الحراري متناظر المحور حول الأنبوب الداخلي.

4. المقاومة الحرارية عبر سطح الأنبوب الداخلي لا تذكر.

5. قد يختلف معامل نقل الحمل الحراري المحلي للمائع على طول الأنبوب.

مع ذلك، يتم تضمين تأثير الحمل الطبيعي في النوبان في معادلة التوصيل من خلال استخدام الموصلية

الحرارية الفعالة  $K_e$  للسائل باستخدام العلاقة التجريبية التالية:

$$(1.4) \quad \frac{K_e}{K_l} = C_l Ra^n$$

$$(2.4) \quad Ra = \frac{g\beta C_l (T_w - T_m)L^3}{\mu K_l}$$

حيث قيمتي الثابت  $C_l$  و  $n$  في المعادلة (1.4) مقدرتين تجريبيا ب 0.099 و 0.25 على التوالي [11].

معادلات الحفظ المستخدمة لـ PCM:

$$(3.4) \quad \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \alpha r \frac{\partial h}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \alpha \frac{\partial h}{\partial z} \right) - \rho \Delta h_f \frac{\partial f}{\partial t}$$

لـ HTF:

$$(4.4) \quad \rho_c C_c \pi R_i^2 \frac{\partial T_c}{\partial t} = 2\pi R_i^2 U (T - T_c) - \dot{m} C_c \frac{\partial T_c}{\partial z}$$

وبالتالي يتم حساب الانتالبي الكلي باستخدام المعادلة التالية:

$$(5.4) \quad H(T) = h(T) + \rho_s \gamma \Delta h_f$$

حيث

$$(6.4) \quad h(T) = \int_{T_m}^T \rho_k C_k dT$$

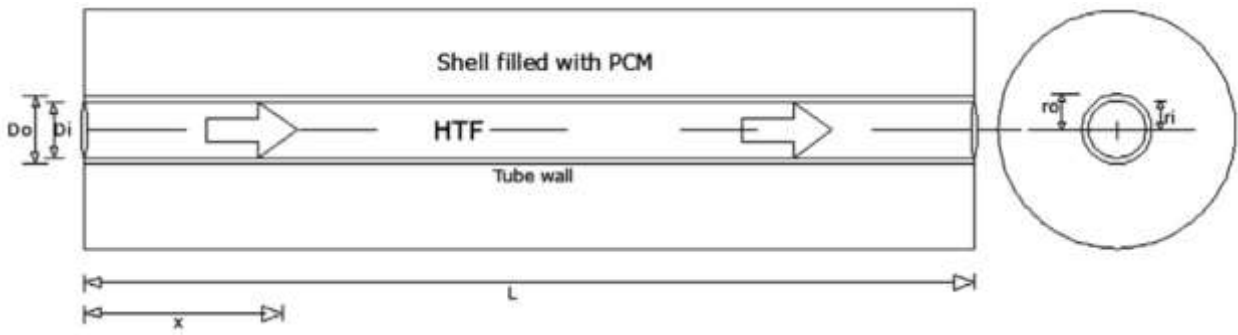
حيث  $\rho_k$  هي كثافة الطور،  $C_k$  الحرارة النوعية للطور،  $T_m$  درجة حرارة تغيير الطور،  $\gamma$  هو نسبة السائل.

- لكيبريا وآخرون

يتم عرض النموذج الفيزيائي للنظام في الشكل (2.4). يتم ملأ القشرة بمادة متغيرة الطور PCM، حيث

يتدفق HTF من خلال أنبوب قطره  $D_i$ . كما هو موضح في شكل. ويتم عرض الخصائص الفيزيائية

الحرارية لشمع البارافين والخصائص الفيزيائية الحرارية للماء في الجدولين 2.4 و 3.4 على التوالي.



الشكل 2.4: نموذج فيزيائي لوحدة تخزين حراري

الخصائص (الوحدة)	القيمة
الكثافة/سائل $\rho_l$ ( $\text{kg/m}^3$ )	790
الكثافة/الصلب $\rho_s$ ( $\text{kg/m}^3$ )	910
السعة الحرارية للسائل $C_{p,l}$ ( $\text{J/kg K}$ )	2150
السعة الحرارية للصلب $C_{p,s}$ ( $\text{J/kg K}$ )	2000
الموصلية الحرارية للسائل $k_l$ ( $\text{W/m K}$ )	0.22
الموصلية الحرارية للصلب $k_s$ ( $\text{W/m K}$ )	0.24
اللزوجة $\mu$ ( $\text{mPa s}$ )	4.108
الحرارة الكامنة $L$ ( $\text{kJ/kg}$ )	190
درجة حرارة الذوبان $T_m$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	61

الجدول 2.4: الخصائص الحرارية الفيزيائية لشمع البارافين

## الفصل الرابع: الدراسة العددية لأداء PCM محسن في وحدة تخزين القشرة و الأنبوب

الماء عند 25°C	
997	الكثافة/سائل (kg/m <sup>3</sup> )
4179	السعة الحرارية (J/kg K)
0.613	الموصلية الحرارية (W/m K)
0.855	اللزوجة μ (mPa s)
الماء عند 88°C	
967.1	الكثافة/سائل (kg/m <sup>3</sup> )
4203	السعة الحرارية (J/kg K)
0.674	الموصلية الحرارية (W/m K)
0.324	اللزوجة μ (mPa s)

الجدول 3.4: الخصائص الحرارية الفيزيائية للماء

تم وضع الفرضيات التالية:

1. الخصائص الفيزيائية الحرارية لكل من HTF و PCM ثابتة لا تتعلق بدرجة الحرارة.
2. يتم إهمال التوصيل الحراري في الاتجاه المحوري لكل من PCM و HTF.
3. لم يتم اعتبار الحمل الطبيعي داخل PCM.
4. درجة الحرارة الأولية للتخزين موحدة و هي درجة حرارة الذوبان.
5. تم افتراض جدار ادياباتي.
6. تدفق HTF صفائحي.

يمكن وصف معادلات انتقال الحرارة أثناء دورات الشحن و التفريغ بين HTF و PCM بالمعادلات التالية:

أثناء التفريغ

$$(7.4) \quad h_f \pi D_i [T_w(x, t) - T_f(x, t)] = C p_f m_f \frac{\partial T_f(x, t)}{\partial x}$$

$$(8.4) \quad h_f \pi D_i [T_w(x, t) - T_f(x, t)] = 2\pi \rho_s H r_s(x, t) \frac{\partial r_s(x, t)}{\partial t}$$

$$(9.4) \quad \frac{T_w(x, t) - T_f(x, t)}{T_m - T_f(x, t)} = \frac{R_f}{R_f + R_w + R_s(x, t)}$$

أثناء شحن

$$(10.4) \quad h_f \pi D_i [T_f(x, t) - T_w(x, t)] = C p_f m_f \frac{\partial T_f(x, t)}{\partial x}$$

$$(11.4) \quad h_f \pi D_i [T_f(x, t) - T_w(x, t)] = 2\pi \rho_l H r_l(x, t) \frac{\partial r_l(x, t)}{\partial t}$$

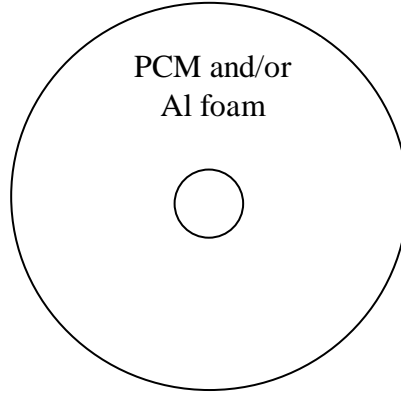
$$(12.4) \quad \frac{T_f(x, t) - T_w(x, t)}{T_f(x, t) - T_m} = \frac{R_f}{R_f + R_w + R_l(x, t)}$$

حيث تمثل  $T_w$  و  $T_f$  درجة الحرارة المحلية للجدار الداخلي للأنبوب ودرجة حرارة المائع وكلاهما دالة بدلالة  $x$  و  $t$  و تمثل  $R_f$ ،  $R_w$  و  $R_s/R_l$  المقاومة الحرارية للحمل الحراري، المقاومة الحرارية بسبب جدار الأنبوب والمقاومة الحرارية بسبب التصلب أو نصف قطر السائل. يمكن تحديد قيم  $R_f$ ،  $R_w$  و  $R_s/R_l$  من العلاقة (13.4).

$$(13.4) \quad R_f = \frac{1}{\pi h_f D_i}, R_w = \frac{1}{2\pi k_w} \ln\left(\frac{D_0}{D_i}\right), R_s = \frac{1}{2\pi k_s} \ln\left(\frac{D_s(x, t)}{D_0}\right), R_l = \frac{1}{2\pi k_l} \ln\left(\frac{D_l(x, t)}{D_0}\right)$$

- ل عطال وآخرون

يتم عرض النموذج الفيزيائي للنظام في الشكل (3.4). يتم ملأ القشرة بشمع البارافين المشبع برغوة الألمنيوم بمسامية مختلفة (95% و 77%). و يتم عرض الخصائص الفيزيائية الحرارية لشمع البارافين و الألمنيوم في الجدول (4.4).



الشكل 3.4: نموذج فيزيائي للحساب العددي

الخصائص (الوحدة)	شمعالبارفين	الألمنيوم
الكثافة/سائل (kg/m <sup>3</sup> )	790–730	140.4
السعة الحرارية (J/kg K)	2510	896
الموصلية الحرارية (W/m K)	0.25	167
الحرارة الكامنة L(kJ/kg)	117	–
درجة حرارة الذوبان T <sub>m</sub> (°C)	60–50	–

الجدول 4.4: الخصائص الحرارية الفيزيائية لشمع البارفين و الألمنيوم

يمكن وصف معادلات انتقال الحرارة أثناء دورات الشحن و التفريغ بين HTF و PCM بالمعادلات التالية:

معادلة الاستمرارية

$$(14.4) \quad \frac{d\rho}{dt} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0$$

معادلة حفظ كمية الحركة

$$(15.4) \quad \rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \nabla (\rho \vec{v} \vec{v}) = - \nabla p + \nabla [\mu (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] + \rho \vec{g} + \vec{F} + S_m$$

معادلة حفظ الطاقة

$$(16.4) \quad \frac{\partial}{\partial t} (\rho H) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} H) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S_e$$

$$(17.4) \quad \gamma = \frac{T - T_{solidus}}{T_{liquidus} - T_{solidus}} \quad \text{if } T_{solidus} < T < T_{liquidus}$$

مصطلح مصدر كمية الحركة

$$(18.4) \quad S_m = A_{mush} \vec{v} \frac{(1 - \gamma)^2}{\gamma^3 + \sigma}$$

حيث  $A_{mush}, S_m, \gamma, S_e, k, \rho, H$  و  $\vec{v}$  وتشير الى الانتالبي، الكثافة، الموصلية الحرارية، مصطلح مصدر لمعادلة الطاقة، نسبة حجم السائل، مصطلح المصدر لمعادلة كمية الحركة، ثابت منطقة مختلطة و سرعة المائع على التوالي. يشير  $\sigma$  إلى رقم صغير لمنع قسمة على صفر.

حالة PCM-foam:

بالنسبة لتكوين PCM ورغوة الألومنيوم، تمت محاكاة عملية ذوبان/تصلب للشمع بنفس الطريقة كما في حالة PCM فقط، مع استخدام الموصلية الحرارية الفعالة للرغوة المعدنية المشبعة بشمع البارافين. ويفترض أن تكون الرغوة المعدنية متجانسة وموحدة الخواص. تم اعتماد المعادلة المقترحة من قبل [8] لحساب الموصلية الحرارية الفعالة.

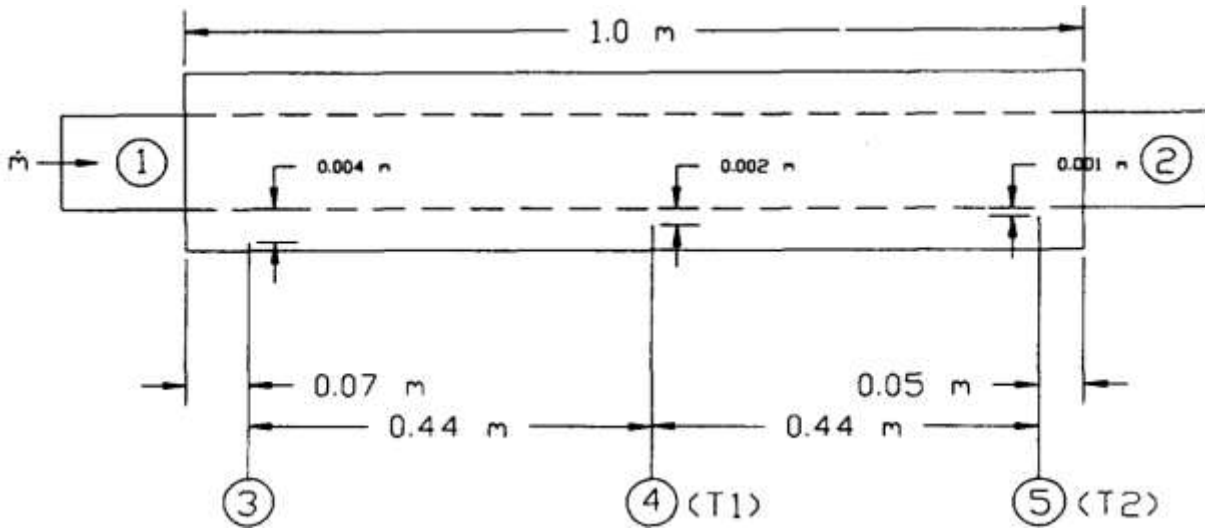
$$(19.4) \quad k_{eff} = \frac{\left[ k_{PCM} + \pi \left( \sqrt{\frac{1-\delta}{3\pi}} - \frac{1-\delta}{3\pi} \right) (k_{sf} - k_{PCM}) \right] \left[ k_{sf} + \frac{1-\delta}{3} (k_{sf} - k_{PCM}) \right]}{k_{sf} + \left[ \frac{4}{3} \sqrt{\frac{1-\delta}{3\pi}} (1 - \delta) + \pi \sqrt{\frac{1-\delta}{3\pi}} - (1 - \delta) \right] (k_{sf} - k_{PCM})}$$

ويمكن الاطلاع على المزيد من التفاصيل المتعلقة بالنموذج العددي للاكروا، كيبيريا وآخرون وعطال وآخرون الموجودة في [11-13].

2.1.2.4 الإعداد التجريبي

- ل لاكروا [11]

يوضح الشكل (4.4) مخطط وحدة الاختبار التجريبي. يتكون الإعداد التجريبي بشكل أساسي من أنبوبين متحدي المركز. الأنبوب الداخلي (Do = 0.0158 m، Di = 0.0127 m) وطوله 1.0 m) مصنوع من النحاس، والأنبوب الخارجي (Di = 0.0258 m) وطوله 1.0 m). كان الأنبوب الخارجي معزولاً جيداً. تم ملء الفراغ بين الأنبوبين بـ n-octadecane PCM، بينما تم استخدام الماء كـ HTF. كانت درجة حرارة المدخل أعلى من درجة حرارة الذوبان (300.7 كلفن) لـ n-octadecane من  $\theta_{f, in}$  إلى 5K إلى 20K وكان معدل التدفق الكتلي 0.0315 kg/s تم ضبط درجة الحرارة الأولية لـ PCM عند 282.5K (18K أقل من درجة حرارة الذوبان PCM).



الشكل 4.4: وحدة الاختبار التجريبية [11]

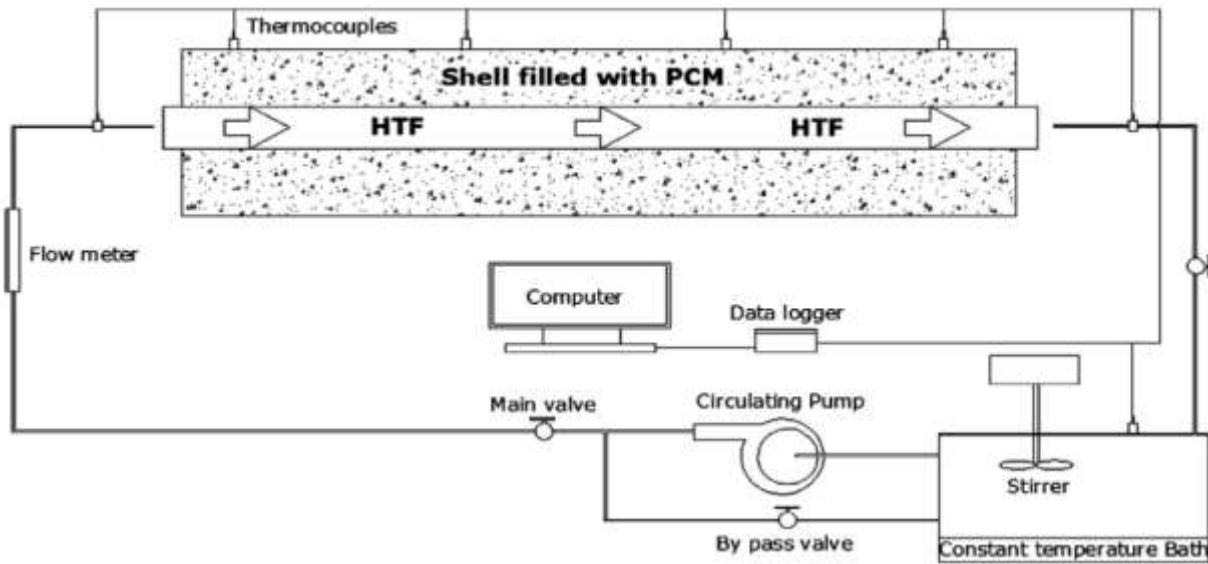
- ل كيبيريا وآخرون [12]

يظهر الرسم التخطيطي للإعداد التجريبي في الشكل (5.4). يتكون الإعداد التجريبي من أنبوبين متحدي المركز. كان طول الأنبوب النحاسي 1m و القطر الداخلي والخارجي للأنبوب 10.8 mm و 12 mm على

## الفصل الرابع: الدراسة العددية لأداء PCM محسن في وحدة تخزين القشرة و الأنبوب

التوالي. كان القطر الداخلي للقشرة 36 mm. تم ملء الفراغ بين الأنبوبين بشمع البارافين، الأنبوب الخارجي معزول جيد. تم استخدام الماء ك-HTF.

في دورة التصلب، تم تسخين PCM بدرجة أعلى قليلاً من درجة حرارة الذوبان عن طريق تدوير HTF بدرجة حرارة 70°C. بعد ذلك، بدأت تجربة التصلب. كانت درجة حرارة مدخل HTF (25°C) وتم ضبط معدل تدفق الكتلي 0.007 kg/min. و بمجرد انتهاء تجربة التصلب بدأت تجربة الذوبان على الفور كانت درجة حرارة مدخل HTF (88°C)، بينما كان معدل التدفق الكتلي 0.0072 kg/min.



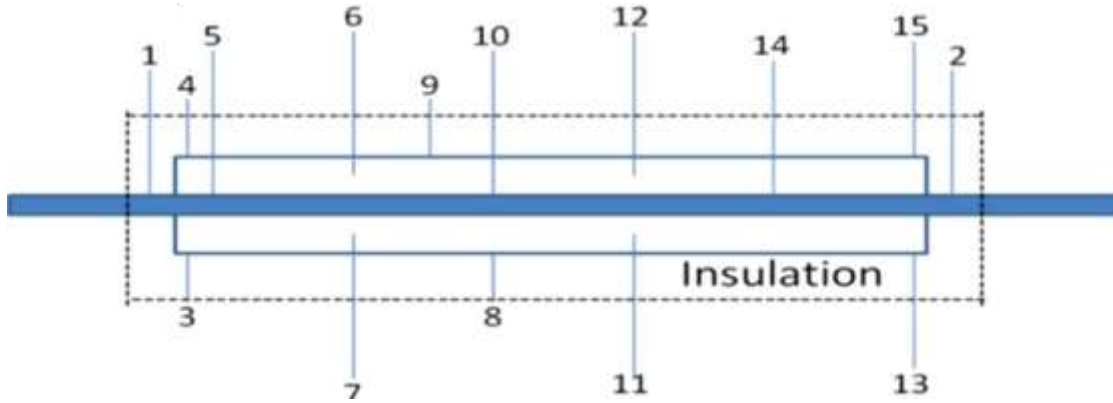
الشكل 5.4: الرسم التخطيطي للإعداد التجريبي [12]

- ل عطال وآخرون [13]

يظهر الرسم التخطيطي للإعداد التجريبي في الشكل (6.4). صُنِعَ نظام القشرة والأنبوب من الألمنيوم وهو معزول جيداً. يبلغ طول الأنبوب الخارجي 12 in وقطره الخارجي 2 in وسمكه 0.05 in، بينما يبلغ طول الأنبوب الداخلي 30 in وقطره الخارجي 0.5 in وسمكه 0.065 in. تم اختبار معدلات تدفق الهواء المختلفة بما يتوافق مع أرقام رينولدز المختلفة التي تم دراستها (Re = 5000، 10,000، 15,000). مادة

## الفصل الرابع: الدراسة العددية لأداء PCM محسن في وحدة تخزين القشرة و الأنبوب

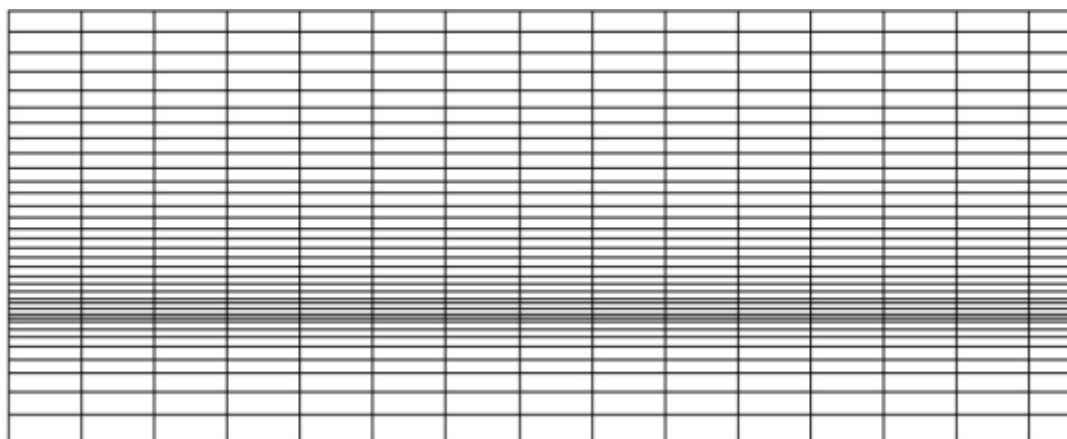
تخزين الحرارة ( PCM نقي أو PCM مع رغوة الألمنيوم المعدنية بمسامتين مختلفتين (95% و 77%)) بين الأنبوب الداخلي والخارجي. يستخدم الهواء كمائع ناقل للحرارة. بالنسبة لدورة الشحن، كان PCM في حالة صلبة في البداية (25°C) وكانت درجة حرارة مدخل HTF (70°C) أما بالنسبة لدورة التفريغ، كان PCM في الحالة السائلة في البداية (70°C) وكانت درجة حرارة مدخل HTF (25°C).



الشكل 6.4: الرسم التخطيطي للإعداد التجريبي [13]

### 3.1.2.4 التحقق من صحة نموذج FLUENT

تم إعادة إنشاء تجارب لأكروا [11]، كيبيريا وآخرون [12]، عطال وآخرون [13] عددًا باستخدام برنامج ANSYS FLUENT 15.0 تم فحص أحجام الشبكات المختلفة بعناية في عمليات المحاكاة الأولية للحصول على تقارب الشبكة الحسابية وتم استخدام شبكة أكثر دقة بالقرب من جدار بسبب التدرجات الكبيرة جدًا للسرعة كما هو موضح في شكل (7.4). وقد وجد أن 15000 خلية كانت أفضل حل وسط بين وقت الحساب والدقة. كما أجريت اختبارات مماثلة لتقييم الخطوة الزمنية المثلى و وجد أن الخطوة الزمنية هي 0.1s. تم تطبيق طريقة ربط خواص الضغط بخواص السرعة للجريان من نوع (SIMPLE). و تم اختيار طريقة الحل للضغط، الطاقة و كمية الحركة على التوالي PRESTO، second-order upwind و second-order upwind. تم التحقق من تقارب الحل في كل خطوة زمنية مع معيار التقارب  $10^{-6}$  للطاقة و  $10^{-3}$  لجميع المتغيرات الأخرى.



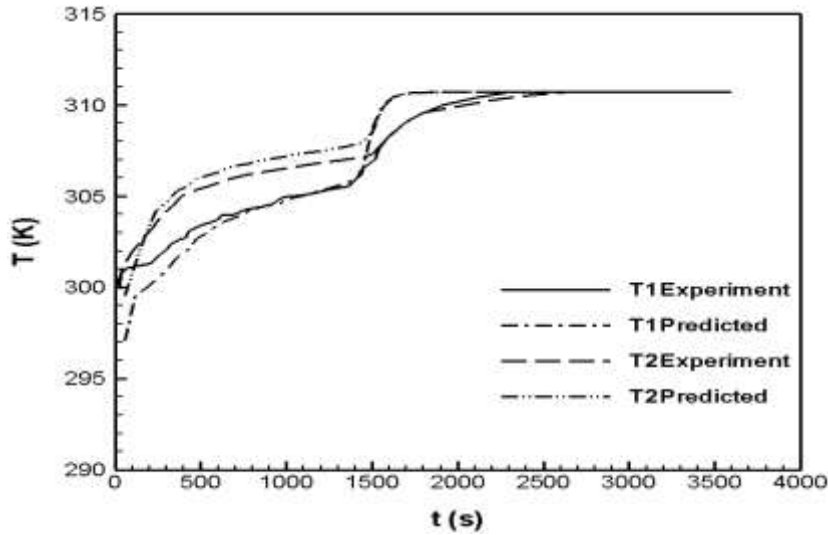
الشكل 7.4: الشبكة المستخدمة

تم التحقق من صحة النموذج العددي الذي تم تطويره في هذا العمل مقابل ثلاث دراسات تجريبية. و قد تم اعتماد على نفس الهندسة و الشروط الابتدائية والحدية و الخصائص الفيزيائية الحرارية في الدراسات التجريبية في الدراسة الحالية للتحقق من صحة النتائج. أولاً، تم مقارنة النتائج العددية مع البيانات التجريبية التي حصل عليها لأكروا [11]. تتم دراسة ذوبان PCM بشكل عددي لدرجتين مختلفتين من درجات حرارة مدخل HTF أعلى من درجة حرارة ذوبان n-Octadecane بمقدار 10K و 20K. يعرض الشكل (7.4) التطور الزمني لدرجة الحرارة في نقطتين  $T1 (x=0.51m, y=0.0099m)$  و  $T2 (x=0.95m, y=0.0089m)$  في PCM. تم الحصول على توافق جيد بين الدراسة التجريبية والدراسة الحالية كما يتضح من الشكل (8.4). و مع ذلك، يمكن أن يُعزى الاختلاف الطفيف (أقل من 3%) بين القيم العددية و التجريبية لدرجة الحرارة في  $T2$  إلى افتراض الخصائص الفيزيائية الحرارية المستقلة عن درجة الحرارة لكل مرحلة من مراحل PCM، أي السائل و الصلب. كما تم التحقق من صحة النتائج العددية لعمليتي الشحن و التفريغ مقابل نتائج التجريبية لكبيريا وآخرون [12]. يوضح الشكل (9.4) مقارنة بين درجة حرارة مخرج HTF العددية أثناء عمليتي الشحن و التفريغ مع النتائج التجريبية لكبيريا وآخرون [12]. يتكون الإعداد التجريبي من أنبوبين متحدي المركز. كما ذكر سابقاً، أثناء دورة الشحن كان PCM في البداية في الحالة

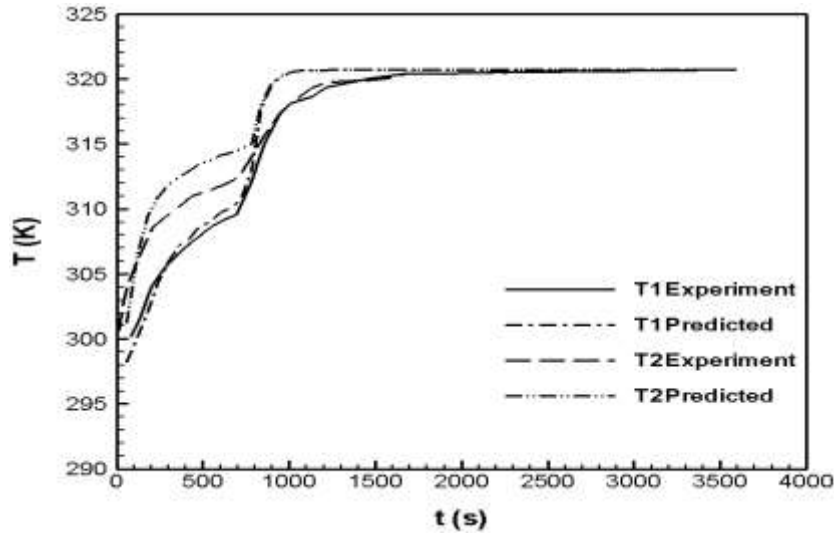
## الفصل الرابع: الدراسة العددية لأداء PCM محسن في وحدة تخزين القشرة و الأنبوب

الصلبة عند درجة حرارة  $T_{ini}= 60^{\circ}\text{C}$ . وكانت درجة حرارة مدخل HTF  $88^{\circ}\text{C}$ ، بينما كان معدل التدفق الكتلي  $0.0072\text{kg}/\text{min}$ . أثناء دورة التفريغ كان PCM في البداية في الحالة السائلة عند  $T_{ini}= 62^{\circ}\text{C}$  كانت درجة حرارة مدخل HTF  $25^{\circ}\text{C}$ ، و تم ضبط معدل التدفق الكتلي  $0.007\text{ kg}/\text{min}$ . قورنت نتائج الدراسة الحالية مع النتائج التجريبية لكبيريا وآخرون [12] و أعطت تطابق جيد كما هو موضح في شكل (9.4). تم استخدام عمل عطال وآخرون [13] على ذوبان و تصلب البارافين (PCM 58P) المضمّن في رغوة ألومنيوم ذات مسامية 0.95 داخل القشرة و الأنبوب للتحقق أيضًا من صحة هذه الدراسة العددية الحالية. تم استخدام نفس الهندسة لمحاكاة عمليتي ذوبان و تصلب البارافين تحت نفس الشروط الابتدائية و الحدية لعطال وآخرون [13] وكما هو موضح في الشكل (10.4) تم الحصول على توافق جيد.

(a)



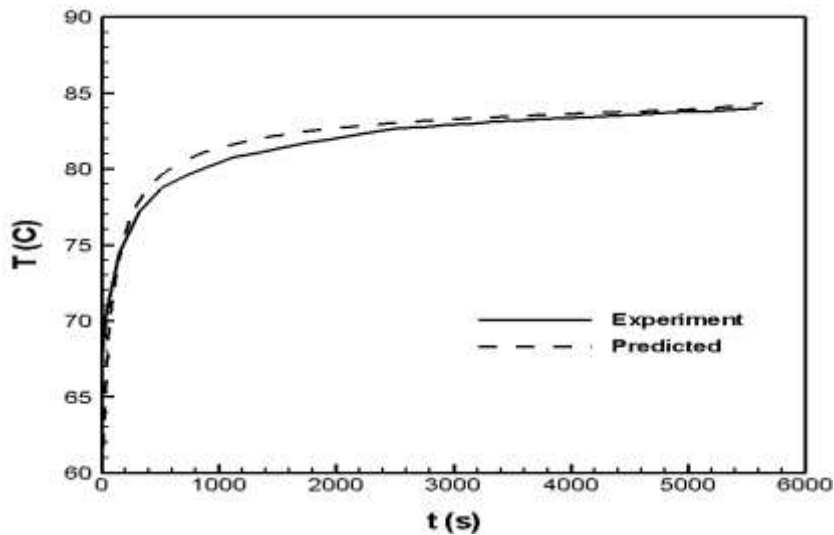
(b)



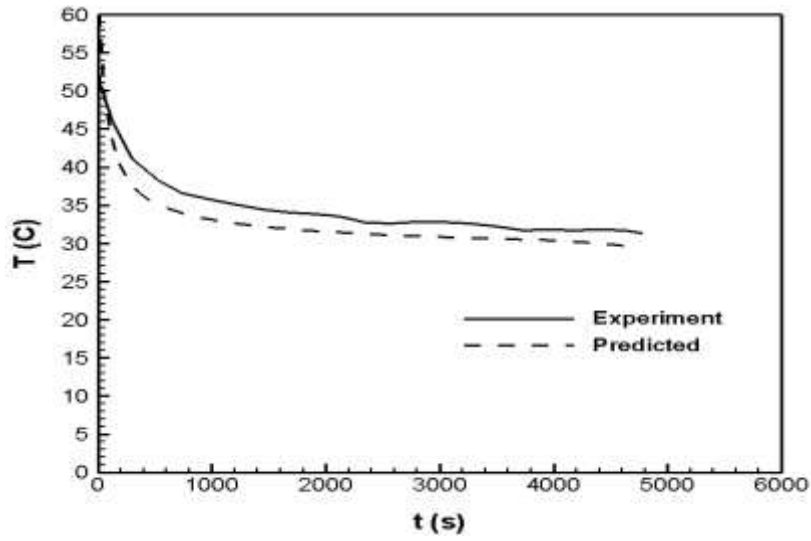
الشكل 8.4: مقارنة بين النموذج الحالي والبيانات التجريبية [11] في الموقعين T1 و T2

( a:  $\theta_{f,in} = 10K$  ، b:  $\theta_{f,in} = 20K$  )

(a) الشحن

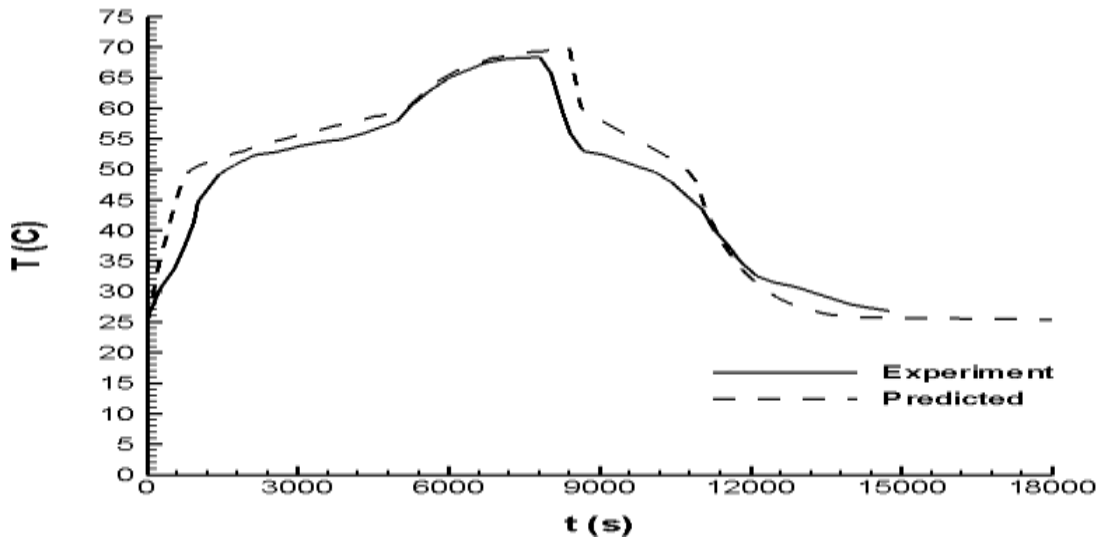


(b) التفريغ



الشكل 9.4: مقارنة درجة حرارة مخرج HTF العددية مع البيانات التجريبية أثناء عمليتي (a) الشحن و

(b) التفريغ



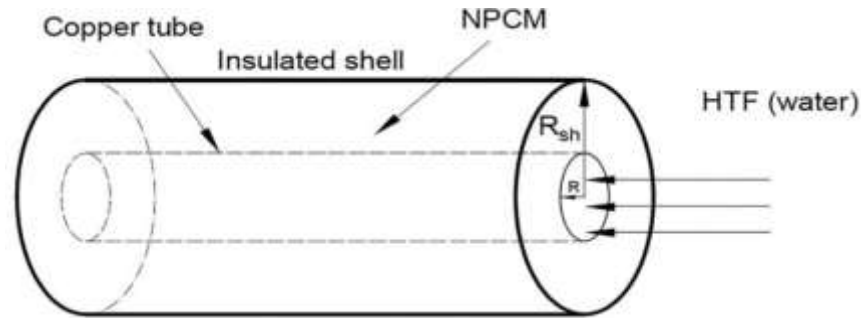
الشكل 10.4: مقارنة توزيع درجة الحرارة في PCM المسامي أثناء عمليتي الشحن والتفريغ مع الدراسة

التجريبية

## 2.4 دراسة عددية لأداء NPCM في وحدة تخزين القشرة والأنبوب

### 1.2.4 النموذج الفيزيائي

تم فحص نموذج القشرة والأنبوب كما هو مبين في الشكل (11.4). طول الأنبوب والقشرة 1 m، يبلغ القطر الداخلي والخارجي لأنبوب النحاس 10.8 mm و 12 mm على التوالي والقطر الداخلي للقشرة 36 mm، يتدفق الماء HTF داخل الأنبوب الداخلي. يقدم الجدول (5.4) الخصائص الفيزيائية الحرارية للماء [142] تملأ القشرة بـ GNPs المشتتة في 1-تيترايدكانول ( $C_{14}H_{30}O$ ) بتركيزات مختلفة تصل إلى 3wt% . يتم عرض الخصائص الفيزيائية الحرارية لـ NPCM في الجدول (6.4) [144,143].



الشكل 11.4: رسم تخطيطي للقشرة و الأنبوب مملوءة بـ NPCM

$\theta_{f,in} \geq 20 \text{ K}$	$10 \text{ K} < \theta_{f,in} < 20 \text{ K}$	الخصائص
989	993	الكثافة ( $\text{kg/m}^3$ )
4180	4178	السعة الحرارية ( $\text{J/kg K}$ )
0.640	0.628	الموصلية الحرارية ( $\text{W/m K}$ )
0.577	0.695	اللزوجة ( $\text{mPa s}$ )

الجدول 5.4: الخصائص الحرارية الفيزيائية للماء (HTF) [142]

## الفصل الرابع: الدراسة العددية لأداء PCM محسن في وحدة تخزين القشرة و الأنبوب

3 wt%	1 wt%	0 wt%	الخصائص (الوحدة)
837.6	826.9	821.6	الكثافة/سائل $\rho_l$ (kg/m <sup>3</sup> )
907.9	896.9	891.4	الكثافة/الصلب $\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )
2190	2300	2360	السعة الحرارية للسائل $C_{p,l}$ (J/kg K)
1910	1990	2040	السعة الحرارية للصلب $C_{p,s}$ (J/kg K)
0.320	0.260	0.159	الموصلية الحرارية للسائل $k_l$ (W/m K)
0.540	0.451	0.252	الموصلية الحرارية للصلب $k_s$ (W/m K)
194.01	59.50	13.23	اللزوجة $\mu$ (mPa s)
183.5	212.2	227.8	الحرارة الكامنة $L$ (kJ/kg)
0.000987	0.001008	0.0010018	معامل التمدد الحراري $\beta$ (1/K)
37	37	37	درجة حرارة الذوبان $T_m$ (°C)

الجدول 6.4: الخصائص الحرارية الفيزيائية لعينات NPCM (GNPs- C<sub>14</sub>H<sub>30</sub>O) [144,143]

### 2.2.4 الفرضيات

من أجل تبسيط المحاكاة العددية تم اعتماد الفرضيات الآتية:

1. إن NPCM متجانسة وموحد خواص.
2. تطبيق تقريب Boussinesq في ذوبان NPCM.
3. درجة الحرارة الأولية لوحدة التخزين موحدة وثابتة.
4. يعتبر HTF غير قابل للضغط ويعتبر سائل نيوتوني.
5. تدفق مائع HTF في الأنبوب الداخلي مضطرب ( $Re > 4000$ ) مع ثبات درجة حرارة المدخل وسرعة المدخل.

### 3.2.4 الشروط الابتدائية و الحدية

الشروط الابتدائية لـ HTF و النظام بأكمله على التوالي:

$$t = 0, \quad 0 \leq r \leq R_i, \quad 0 \leq x \leq l: \quad u_x = u_r = 0$$

$$0 \leq r \leq R_{sh}, \quad 0 \leq x \leq l: \quad T_f = T_p = T_{ini}$$

الشروط الحدية

$t > 0$

عند مدخل الأنبوب

$$x = 0, \quad 0 \leq r \leq R_i : \quad u_x = u_{in}, \quad u_r = 0, \quad T = T_{in}$$

عند مخرج الأنبوب

$$x = l, \quad 0 \leq r \leq R_i : \quad \frac{\partial T_f}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial u_x}{\partial x} = 0$$

الأنبوب الداخلي

$$r = 0, \quad 0 \leq x \leq l : \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial u_x}{\partial r} = 0$$

الأنبوب الخارجي

$$r = R_{sh}, \quad 0 \leq x \leq l : \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad u_x = 0$$

#### 4.2.4 النتائج و المناقشة

##### 1.4.2.4 توزيع درجات الحرارة

يوضح الشكل (12.4) توزيع درجة الحرارة العابرة لنقطة معينة في NPCM ( $x=0.5m, r=0.017m$ )

أثناء عملية الشحن، درجة حرارة مدخل HTF و سرعة مدخل HTF هما  $80^\circ C$  و  $0.3 \text{ m/s}$  على التوالي.

كما يتضح تزداد درجة الحرارة مع زيادة درجة حرارة المدخل، تزداد درجة الحرارة بسرعة لـ NPCMs مقارنةً

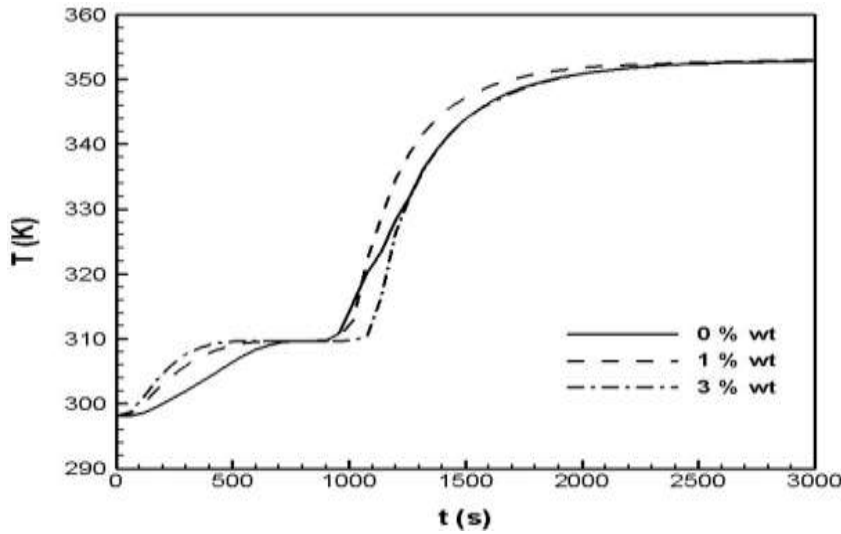
بدرجة حرارة PCM الأساسية. ومع ذلك، لوحظ اختلاف طفيف في درجات الحرارة المحسوسة لعينات

NPCM بتركيزات 1 و 3%. تعد الانتشارية الحرارية معلمة رئيسية أثناء تبادل الحرارة المحسوسة. في وقت

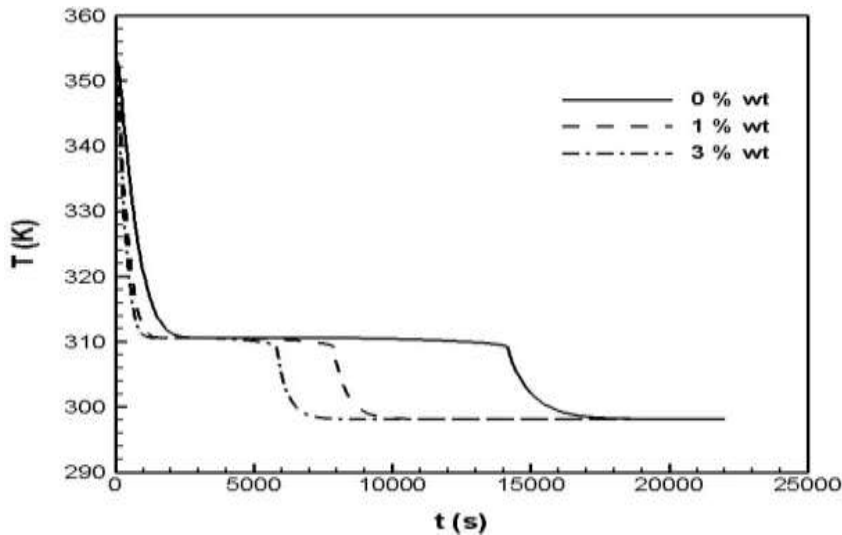
## الفصل الرابع: الدراسة العددية لأداء PCM محسن في وحدة تخزين القشرة و الأنبوب

لاحق، أثناء تغير الطور تظل درجة الحرارة ثابتة للعينات الثلاث، عندما تكون NPCM سائلة تمامًا ترتفع درجة حرارة السائل حتى تصل إلى درجة حرارة المدخل (درجة حرارة HTF  $T = 80^{\circ}\text{C}$ ).

يعرض الشكل (13.4) تطور درجة حرارة NPCM مع مرور الوقت للعينات الثلاث (0، 1 و 3%) أثناء عملية التفريغ. خلال هذه العملية يتم تحرير الحرارة الممتصة. عندما تكون NPCM صلبة تمامًا، تنخفض درجة الحرارة مرة أخرى.



الشكل 12.4: تطور درجة الحرارة لعينات NPCM (0، 1 و 3%) بدلالة الزمن أثناء عملية الشحن



الشكل 13.4: تطور درجة الحرارة لعينات NPCM (0، 1 و 3%) بدلالة الزمن أثناء عملية التفريغ

### 2.4.2.4 تطور تغير الطور

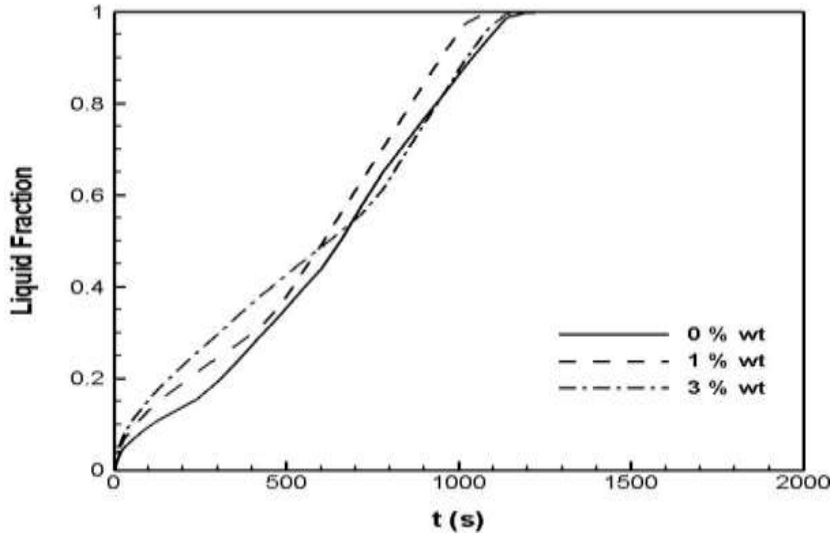
يعرض الشكل (14.4) تباين النسب السائلة لعينات NPCM (0، 1 و 3%) بدلالة زمن أثناء دورة الشحن. تبدأ عملية الذوبان على السطح الخارجي للأنبوب الداخلي حيث يتدفق HTF الساخن خلال المرحلة المبكرة من عملية الذوبان، يكون تأثير الانتشارية الحرارية للجسيمات النانوية مهمًا لأن التوصيل الحراري يهيمن على انتقال الحرارة. في وقت لاحق، مع زيادة نسبة الذوبان يصبح الحمل الحراري الطبيعي أقوى ويهيمن على انتقال الحرارة داخل NPCM. يؤدي التركيز العالي للجسيمات النانوية إلى انخفاض معدل تغير الطور بسبب اللزوجة العالية الناتجة عن ارتفاع نسبة الجسيمات النانوية. ومنه يصبح الحمل الحراري الطبيعي ضعيفًا، وبالتالي تصبح حركة الذوبان أبطأ.

تم رسم وقت الذوبان الكلي للعينات (0، 1 و 3%) في الشكل (15.4). وقت ذوبان أقل لتركيز بنسبة 1% من الجسيمات النانوية (1140 s). هو وآخرون [100] حصلوا أيضًا على نتائج مماثلة في عملهم على ذوبان GNPs-C<sub>14</sub>H<sub>30</sub>O على لوح أفقي، كان معدل ذوبان لـ 1% أعلى من معدل 3%. بالإضافة إلى ذلك، أظهر أريسي وآخرون [145] في دراسة عن ذوبان CuO-paraffin في تجويف مربع أن إدخال 1% من جسيمات نانوية CuO في شمع البارافين كان له تحسين حراري أعلى من 3%. يقل وقت الذوبان بنسبة 9.5% عند زيادة تركيز GNPs من 0 إلى 1%، بينما يُظهر تركيز GNPs بنسبة 3% نفس وقت الذوبان لـ PCM النقي 1260s. و بالتالي يزيد وقت الذوبان الكلي بنسبة 10.5% لزيادة التركيز من 1 إلى 3%. و مع ذلك، فإن تحسين انتقال الحرارة للجسيمات النانوية يتم توازنه من خلال اللزوجة العالية لذوبان NPCM بسبب إدخال الجسيمات الصلبة.

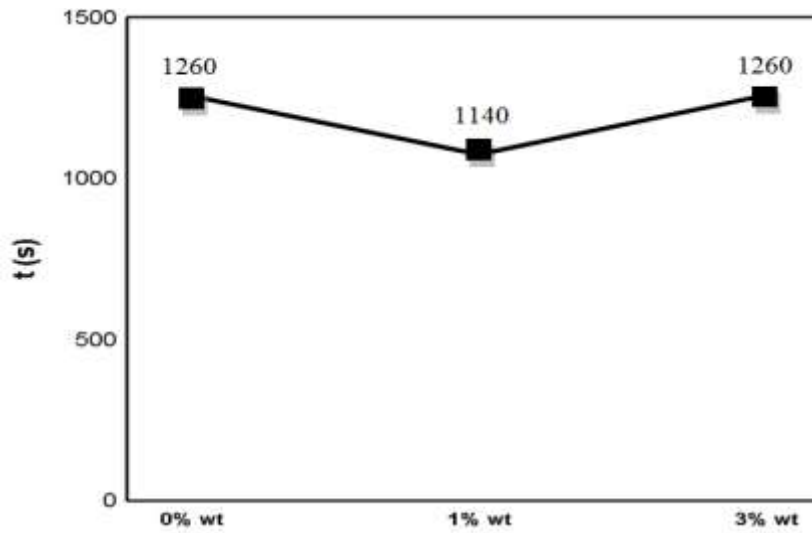
يعرض الشكل (16.4) تباين النسب السائلة لعينات NPCM (0، 1 و 3%) بدلالة زمن أثناء دورة التفريغ. يُلاحظ أن وقت التصلب الكامل أطول بكثير مقارنة بوقت الذوبان لجميع تراكيزات GNPs بسبب الاختلاف الصغير بين درجة حرارة الماء البارد للمدخل و درجة حرارة ذوبان NPCM. يبلغ وقت التصلب

## الفصل الرابع: الدراسة العددية لأداء PCM محسن في وحدة تخزين القشرة و الأنبوب

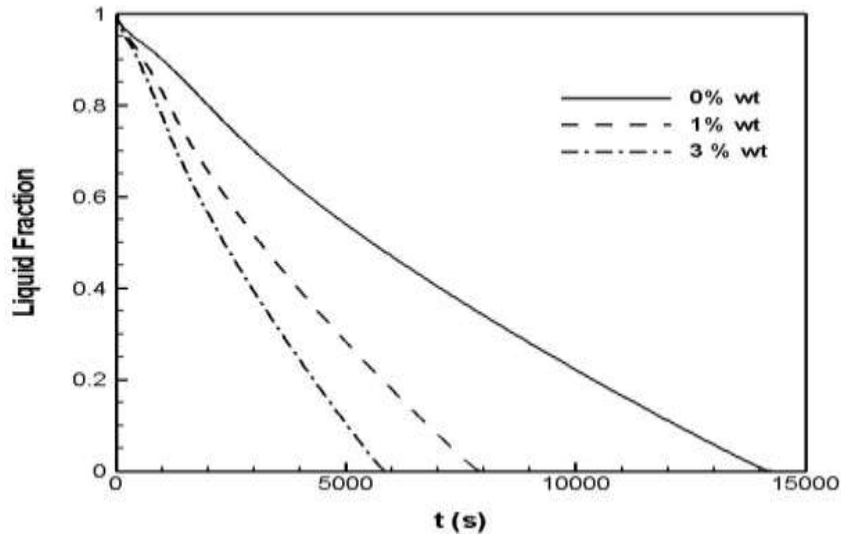
الكلي في الشكل (17.4) لعينة 0% في نظام التخزين 14340 s، بالنسبة للعينة 1% يقل وقت التصلب إلى 8040 s، و لعينة 3% يكون وقت التصلب 5940 s فقط. وبالتالي يقل وقت التصلب الكلي بنسبة 44% عندما يزداد محتوى GNPs من 0 إلى 1% و بنسبة 26.1% عند زيادة محتوى GNPs من 1 إلى 3%.



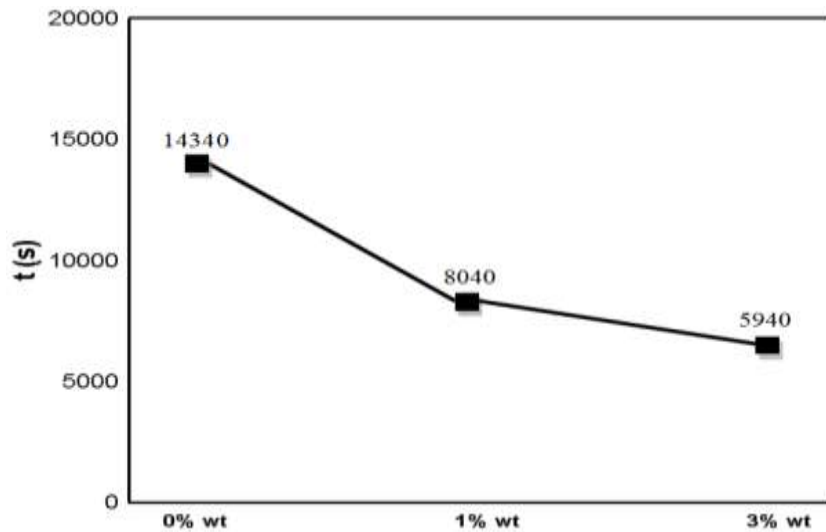
الشكل 14.4: تباين النسب السائلة لعينات NPCM (0، 1 و 3%) بدلالة زمن أثناء دورة الشحن



الشكل 15.4: وقت الذوبان الكلي لعينات NPCM



الشكل 16.4: تباين النسب السائلة لعينات NPCM (0، 1 و 3%) بدلالة زمن أثناء دورة التفريغ



الشكل 17.4: وقت التصلب الكلي لعينات NPCM

#### 3.4.2.4 الطاقة المخزنة

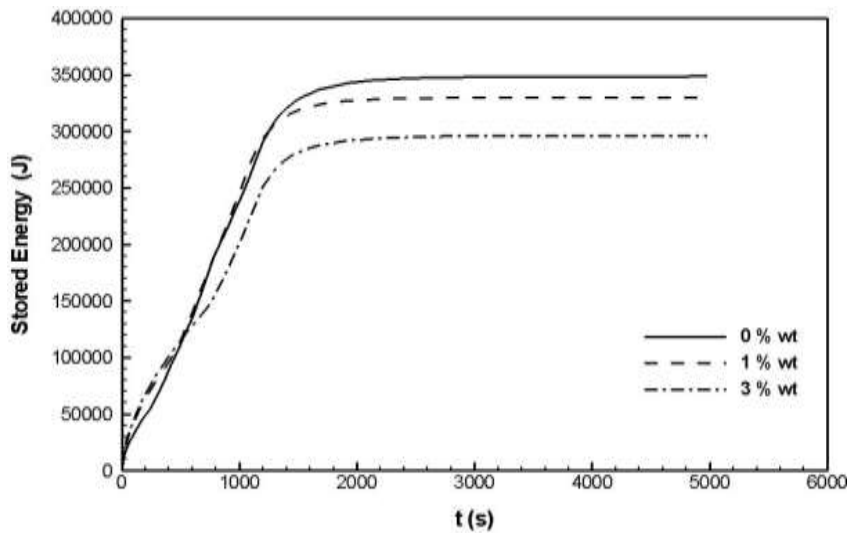
يظهر تباين الطاقة المخزنة مع مرور الوقت لعينات NPCM أثناء عملية الشحن في الشكل (18.4). توضح التحليلات أنه يتم الحصول على الشحن الحراري السريع لتركيز GNPs الأعلى. في وقت لاحق، تستقر الطاقة المخزنة للعينات الثلاث في نفس الوقت تقريبًا. تتناقص كمية الطاقة التي يمكن تخزينها

## الفصل الرابع: الدراسة العددية لأداء PCM محسن في وحدة تخزين القشرة و الأنبوب

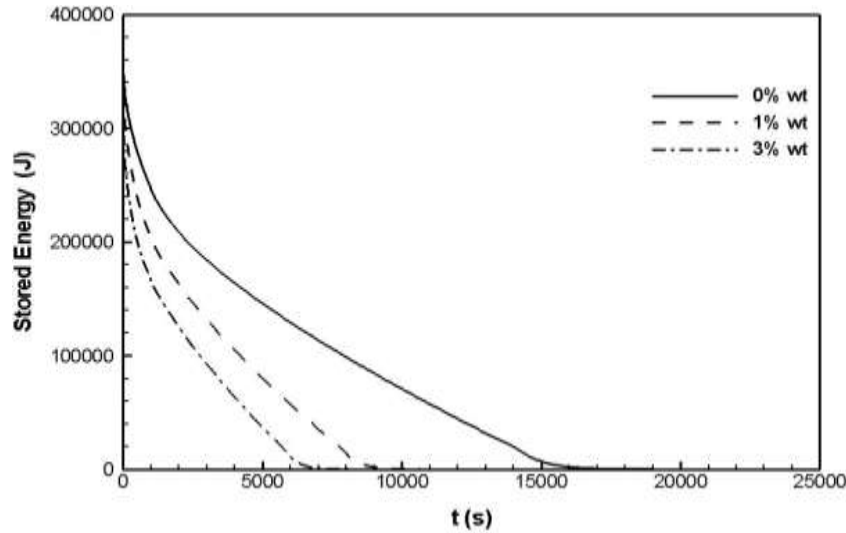
باستخدام NPCM مع زيادة تركيز الجسيمات النانوية. أشارت الأعمال المماثلة المتوفرة في دراسات السابقة [146,99] إلى نفس الاتجاهات. و هناك نقطة أخرى مهمة هي أن إضافة الجسيمات النانوية يحسن معدل انتقال الحرارة و لكنه يضعف سعة التخزين لأنه يقلل من كتلة PCM. و بالتالي يتم تقليل كمية الحرارة المخزنة.

تبلغ الطاقة المخزنة 348.7 kJ في نهاية عملية الشحن لـ PCM النقي، بينما تبلغ 330.1 kJ لـ 1% NPCM و 296.2 kJ لـ 3% NPCM. لذلك، تقل الطاقة المخزنة بنسبة 5.3% عند زيادة التركيز من 0% إلى 1% و بنسبة 10.3% عند زيادتها من 1% إلى 3%.

يوضح الشكل (19.4) عملية تفريغ الطاقة المخزنة لدرجة حرارة مدخل ماء بارد التي تبلغ  $25^{\circ}\text{C}$ . كما هو متوقع، نظرًا للاختلاف الصغير في درجة الحرارة بين الماء البارد و NPCM مقارنة بدورة الشحن، يتم الحصول على أوقات أطول للتفريغ الحراري الكامل، و لكن تركيزات GNP الأعلى تؤدي دائمًا إلى معدل تفريغ أعلى. نتائج هذه الدراسة تم نشرها في مجلة محكمة نجام وآخرون [147].



الشكل 18.4: تباين الطاقة المخزنة بدلالة الزمن لعينات NPCM أثناء عملية الشحن



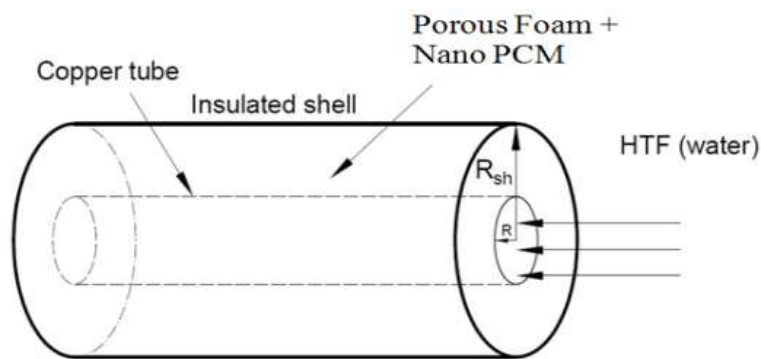
الشكل 19.4: تباين الطاقة المخزنة بدلالة الزمن لعينات NPCM أثناء عملية التفريغ

### 3.4 دراسة عددية لأداء NPCM المسامي في وحدة تخزين القشرة و الأنبوب

#### 1.3.4 المحاكاة العددية

يعرض الشكل (20.4) النموذج الفيزيائي لوحدة تخزين القشرة و الأنبوب المشبعة بـ NPCM المسامي.

ويتم استخدام نفس الهندسة و تحت نفس الشروط الابتدائية و الحدية السابقة لعمليتي الشحن و التفريغ.



الشكل 20.4: رسم تخطيطي لوحدة تخزين القشرة و الأنبوب المشبعة بـ NPCM المسامي

### 2.3.4 النتائج و المناقشة

#### 1.2.3.4 تطور تغير الطور مع مرور الوقت

تظهر تأثيرات رغوة المواد المسامية و النسبة الحجمية للجسيمات النانوية على تقدم ذوبان وتصلب PCM في المنحنيات الموضحة في الشكلين (21.4،22.4) والمعلومات الواردة في الجدول (7.4). يلخص الجدول (7.4) الوقت الكلي للذوبان و التصلب الكامل لـ NPCM المسامي مقارنةً بـ PCM النقي و غير المسامي. وتجدر الإشارة إلى أن تقليل وقت عمليتي الذوبان و التصلب هو أحد الركائز الأساسية لهذه الدراسة. أظهرت النتائج أن ذوبان NPCM في وجود الرغوة المسامية يؤدي إلى تحسن كبير في الوقت مقارنة بالذوبان في وجود PCM غير مسامي و نقي. و مع ذلك، فإن التركيز العالي للجسيمات النانوية يؤدي إلى انخفاض في معدل تغير الطور بسبب اللزوجة العالية الناتجة عن المحتوى العالي للجسيمات النانوية و منه يصبح الحمل الحراري الطبيعي ضعيفاً. و بالتالي، تصبح حركة الذوبان أبطأ. من ناحية أخرى، تثبط المسامية المنخفضة تطور الحمل الطبيعي في NPCM المسامي بسبب زيادة المقاومة الهيدروليكية للتدفق فتصبح الحرارة تنتقل بشكل أساسي من خلال التوصيل الحراري. و مع ذلك، يتم تقليل وقت الذوبان باستخدام NPCM المسامي حوالي 83% إلى 88%.

كما أظهرت النتائج أن تصلب NPCM في وجود الرغوة المسامية يؤدي إلى تحسن كبير في الوقت مقارنة بالتصلب في وجود PCM غير مسامي و نقي. على سبيل المثال، يستغرق PCM النقي 14340s حتى يتصلب تمامًا، بينما يكون وقت عملية التصلب الكامل لـ NPCM المسامي أقصر بكثير مما يؤدي إلى توفير الوقت الكلي حيث يتراوح حوالي 92% إلى 95%. في الختام تم تحسين عمليتي ذوبان و تصلب PCM في نظام القشرة و الأنبوب بشكل كبير مع تطبيق الرغوة المسامية. تم تحسينه بشكل أكبر من خلال استخدام رغوة منخفضة المسامية مع نسبة الحجمية العالية للجسيمات.

يوضح الشكل (21.4) النسب السائل لـ NPCM كدالة زمنية للحالات المختلفة: غير مسامية ، مسامية

## الفصل الرابع: الدراسة العددية لأداء PCM محسن في وحدة تخزين القشرة و الأنبوب

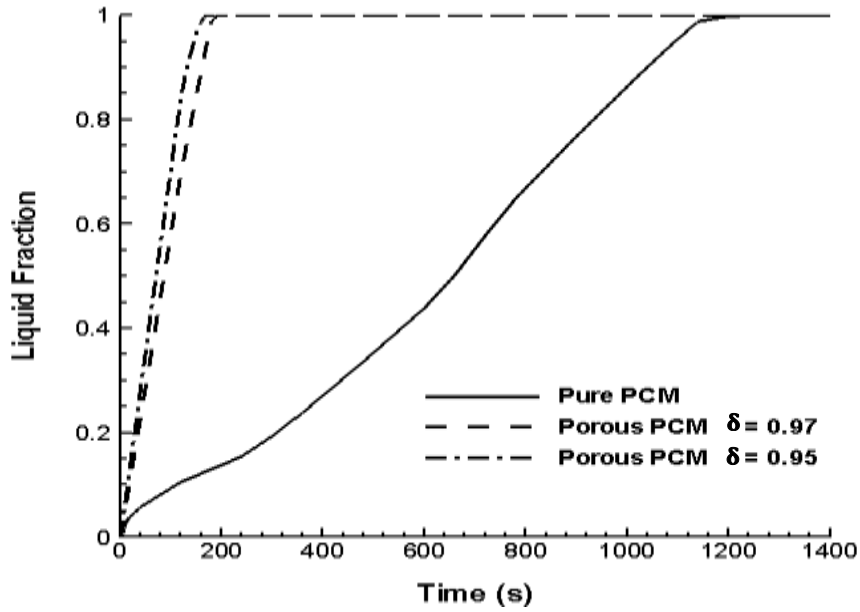
$\delta = 0.95$  و مسامية  $\delta = 0.90$  ثلاثه نسب حجمية مختلفة: 0% (PCM نقي)، 1% و 3% (NPCM) أثناء عملية الشحن. يمكن ملاحظة أن نسبة السائل للمسامية  $\delta = 0.95$  يتطور عمومًا بشكل أسرع لجميع النسب الحجمية مقارنةً بالمسامية  $\delta = 0.97$  و غير المسامية.

يوضح الشكل (22.4) نسبة السائل من NPCM كدالة زمنية للحالات المختلفة: غير مسامية، مسامية  $\delta = 0.97$  و مسامية  $\delta = 0.95$  ثلاثه نسب حجمية مختلفة: 0%، 1% و 3% أثناء عملية التفريغ. يمكن ملاحظة أن نسبة السائل للرجوة المسامية يتطور بشكل عام أسرع بكثير لجميع النسب الحجمية للجسيمات النانوية مقارنة مع غير المسامية. ومع ذلك، كلما زادت النسبة الحجمية للجسيمات النانوية كلما أصبح وقت التصلب الكامل أقل. ويرجع ذلك إلى الموصلية الحرارية المحسنة لـ NPCM مقارنةً بـ PCM النقي. وبشكل عام يكون معدل ذوبان/التصلب لـ NPCM المسامي أسرع مع النسبة الحجمية الأكبر و رجوة منخفضة المسامية.

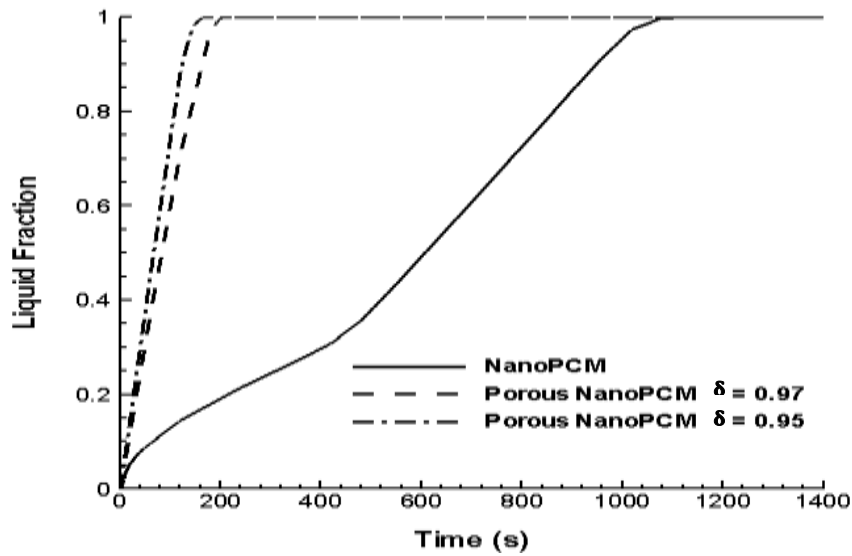
الوقت الكلي لتصلب (s)			الوقت الكلي للذوبان (s)			$\phi$
$\delta = 0.95$	$\delta = 0.97$	NPCM	$\delta = 0.95$	$\delta = 0.97$	NPCM	
840	1080	14340	174	199	1260	0%
780	960	8040	166	209	1140	1%
720	900	5940	147	184	1260	3%

جدول 7.4: تأثير النسب الحجمية للصفائح النانوية/الرجوة المسامية على وقت الكلي للذوبان و التصلب

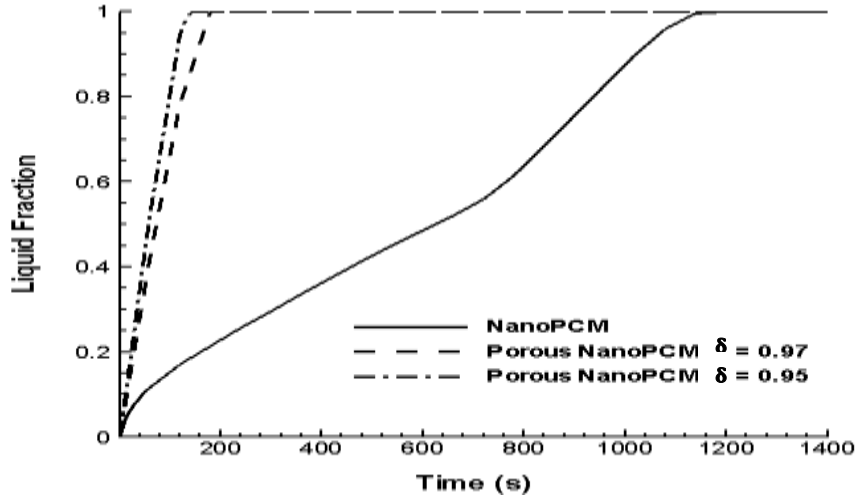
(a)  $\varphi = 0\%$



(b)  $\varphi = 1\%$



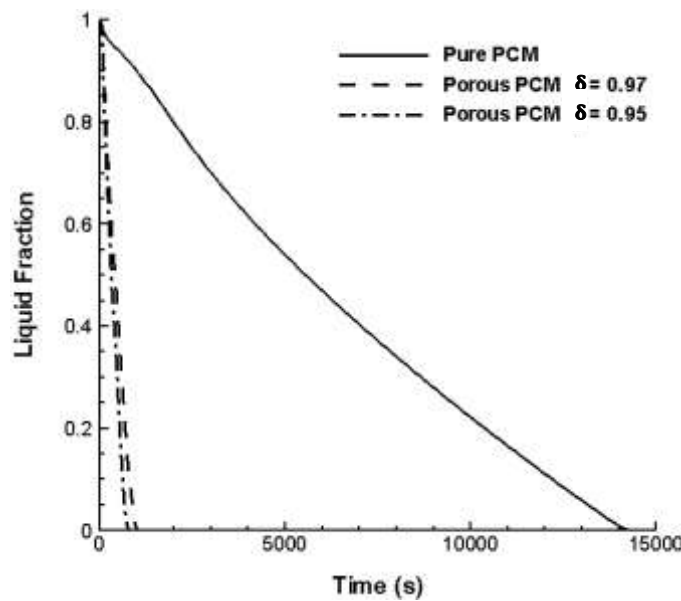
(c)  $\varphi = 3\%$



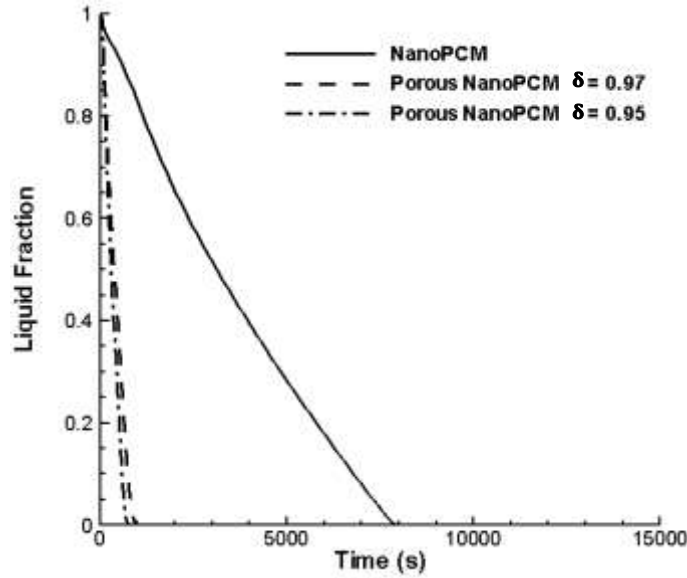
الشكل 21.4: تأثيرات المسامية على نسبة السائل لـ NPCM المسامي عند النسب الحجمية:

(a)  $\varphi = 0\%$ ، (b)  $\varphi = 1\%$  و (c)  $\varphi = 3\%$  أثناء الشحن

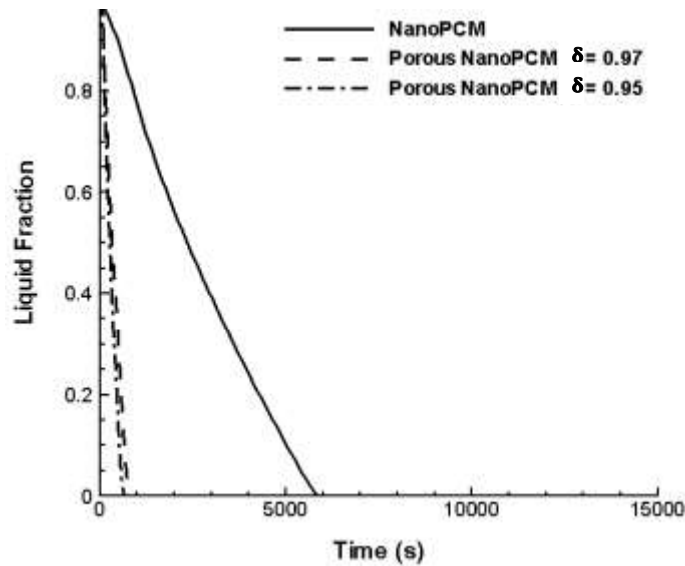
(a)  $\varphi = 0\%$



(b)  $\varphi = 1\%$



(c)  $\varphi = 3\%$



الشكل 22.4: تأثيرات المسامية على نسبة السائل لـ NPCM المسامي عند النسب الحجمية:

(a)  $\varphi = 0\%$ ، (b)  $\varphi = 1\%$  و (c)  $\varphi = 3\%$  أثناء التفريغ

#### 4.4 الخاتمة

تم فحص الأداء الحراري لمزيج من 1-تيترايديكانول مع نسب كتلية مختلفة (0، 1 و 3%) من الصفائح النانوية للجرافين (GNPs) في نموذج القشرة والأنبوب لوحدة تخزين الطاقة الشمسية الحرارية. بالإضافة إلى ذلك تم فحص الأداء الحراري لـ NPCM المسامي في نموذج القشرة والأنبوب. تم استخلاص الاستنتاجات التالية:

- 1- يكون تأثير الجسيمات النانوية أكثر فعالية أثناء وضع التوصيل الحراري.
- 2- عند زيادة التركيز GNPs من 0 إلى 1%، تنخفضت الطاقة المخزنة بنسبة 5.3% وبنسبة 10.3% عند زيادة تركيز GNPs من 1 إلى 3%.
- 3- أدى تركيز GNPs العالي إلى تقليل وقت التفريغ.
- 4- أدت زيادة تركيز الجسيمات النانوية من 0 إلى 1% خلال دورة التفريغ إلى تقليل وقت التصلب بنسبة 44%، بينما أدت زيادة التركيز من 1 إلى 3% إلى انخفاض زمن التصلب المقدر بنسبة 26.1%.
- 5- أثناء عملية الشحن، على الرغم من تقليل وقت الانصهار بنسبة 9.5% لتركيز GNPs من 0 إلى 1%، زاد وقت الانصهار بنسبة 10.5% لمحتوى GNPs من 1 إلى 3%.
- 6- كان تعزيز معدل نقل الحرارة لتركيز GNPs بنسبة 3% مقيداً بزيادة غير مرغوب فيها في اللزوجة مما أدى إلى ضعف الحمل الحراري الطبيعي ووقت شحن أطول.
- 7- تم تحسين عمليتي الشحن والتفريغ في نظام القشرة والأنبوب بشكل كبير باستخدام الرغوة المسامية.
- 8- يتم تقليل وقت الذوبان والتصلب باستخدام رغوة مسامية بغض النظر عن نسبة حجم الصفائح النانوية ونسبة المسامية.

## الفصل الرابع: الدراسة العددية لأداء PCM محسن في وحدة تخزين القشرة و الأنبوب

9- تم تقليل وقت الكلي للذوبان/التصلب باستخدام NPCM المسامي بنسبة تتراوح من 83% إلى 88% ومن 92% إلى 95% على التوالي.

10- معدلات الشحن و التفريغ للمسامية  $\delta = 0.95$  أسرع لجميع النسب الحجمية مقارنة بالمسامية  $\delta = 0.97$  بسبب الموصلية الحرارية العالية.

11- نتائج هذا العمل البحثي مفيدة لتطوير أنظمة تخزين كامنة للطاقة الشمسية أكثر كفاءة.

# الخاتمة العامة

## الخاتمة

يلعب تخزين الطاقة دورًا مهمًا في الحفاظ على الطاقة المتاحة وتحسين استخدامها، نظرًا لأن العديد من مصادر الطاقة متقطعة بطبيعتها. من بين الطرق المختلفة المستخدمة لتخزين الطاقة الحرارية، تعد أنظمة تخزين الحرارة الكامنة، والتي تتضمن تخزين الحرارة وتحريرها من خلال الانتقال الصلب- السائل لمواد متغيرة الطور (PCM)، أحد أكثر الخيارات جاذبية. و تتمتع هذه الأنظمة بمزايا مختلفة فيما يتعلق بالآخرين: الحرارة الكامنة لمعظم المواد أعلى بكثير من الحرارة المحسوسة و بالتالي تتطلب كتلة أصغر من وسيط التخزين لتخزين/استرداد كمية معينة من الطاقة الحرارية مع ما يترتب على ذلك من انخفاض في التكاليف و هو جانب أساسي للتشغيل الفعال لمعظم الأنظمة الحرارية. لذلك أصبح نظام تخزين الحرارة الكامنة لتغير الطور تدريجياً اختياراً شائعاً للإدارة الحرارية لمختلف تطبيقات انتقال الحرارة العابرة من خلال تخزين الطاقة عن طريق تغير الطور الذي يحدث عند درجة حرارة ثابتة تقريباً.

أظهرت مراجعة الأدبيات التي تم إجراؤها على أحدث ما توصلت إليه أنظمة التخزين الحراري PCM باستخدام الطرق المختلفة لتحسين انتقال الحرارة و أهمية تطوير نماذج CFD الدقيقة و الممكنة من أجل المحاكاة العددية لعمليات انتقال الحرارة التي تحدث أثناء عمليتي الشحن والتفريغ. تم تطبيق طريقتين هما: (1) PCM مع الجسيمات النانوية (NPCM) و (2) NPCM مع وسط مسامي. بالنسبة إلى NPCM، يلزم التحميل الدقيق للجسيمات النانوية لتحسين الموصلية الحرارية دون التأثير على الخصائص الفيزيائية الحرارية الأخرى مثل اللزوجة والكثافة والحرارة الكامنة لذوبان ودرجة حرارة الذوبان وما إلى ذلك، والتي يمكن أن تكون مهمة لشكل آخر من أشكال انتقال الحرارة مثل الحمل الطبيعي وتغير الطور. علاوة على ذلك، مع التحميل المنخفض للجسيمات النانوية، لا تتحسن الموصلية الحرارية الفعالة ل NPCM بشكل ملحوظ. بالنسبة ل PCM مع وسط مسامي، يجب أن تكون مسامية الوسط المسامي عالية بما فيه الكفاية لضمان تيار الموائع

عبر المسام للحمل الطبيعي. ولمعرفة المزيد حول انتقال الحرارة لـ NPCM و PCM في وسط مسامي، يحاول هذا البحث دمجها معًا كـ NPCM في وسط مسامي للتحسين الحراري لنظام تخزين الحرارة الكامنة. تم تطوير نموذج CFD ثنائي الأبعاد لوحدة تخزين القشرة والأنبوب مع PCM داخل القشرة ويتم تدفق HTF داخل الأنبوب. تم تشغيل عمليات المحاكاة العابرة باستخدام النموذج الصحفي و المضطرب k-ε مع ضبط الخطوة الزمنية على 0.1 ثانية. تم تمكين نموذج التصلب/الذوبان لوصف ظاهرة تغير الطور في PCM. تم تطبيق طريقة ربط خواص الضغط بخواص السرعة للجريان من نوع (SIMPLE). وتم اختيار طريقة الحل للضغط، الطاقة و الزخم على التوالي PRESTO، second-order upwind و second-order upwind. تم التحقق من تقارب الحل في كل خطوة زمنية مع معيار التقارب  $10^{-6}$  للطاقة و  $10^{-3}$  لجميع المتغيرات الأخرى. تمت مقارنة النتائج التي تم الحصول عليها مع النتائج التجريبية من قبل لاكروا [9]، كيرييا وآخرون [10]، عطال وآخرون [11]. أظهرت معايرة النتائج أن نموذج CFD المطور يوفر تنبؤًا دقيقًا لسلوك نظام التخزين الحراري.

تم تحقيق في تحسين انتقال الحرارة باستخدام جسيمات النانوية من الجرافين باستخدام نموذج CFD ثنائي الأبعاد لوحدة تخزين القشرة والأنبوب مع GNPs مشتمت في 1-تيترايديكانول داخل القشرة ، ويتدفق الماء داخل الأنبوب. تم النظر في تراكيز الحجمية للجسيمات النانوية 0، 1 و 3%. تم الحصول عدديا على أن وقت الذوبان الكلي قد انخفض مع تركيز الحجمي 1% بينما أظهر تركيز الحجمي 3% نفس وقت الذوبان لـ PCM النقي، أما وقت التصلب الكلي قد انخفض مع زيادة التركيز الحجمي لجسيمات النانوية. و مع ذلك، كان هناك انخفاض في الحرارة الكامنة للانصهار والتي بدورها قللت من الطاقة الحرارية الكلية لكل وحدة كتلة من NPCM. للتركيز الحجمي 1% و 3% تم تقليل وقت الذوبان بنسبة 9.5% و 0% على التوالي، بينما يقل وقت التصلب الكلي بنسبة 44% عند زيادة تركيز GNPs من 0 إلى 1% و بنسبة 26.1% عند زيادة GNPs من 1 إلى 3%. أشارت النتائج إلى أن تركيز العالي للجسيمات النانوية يزيد

من وقت الذوبان الكلي وهذا بسبب اللزوجة العالية لـ NPCM بالرغم من زيادة الموصلية الحرارية لـ PCM و هذا راجع إلى الحمل الذي يهيمن على عملية الذوبان. بينما مع ارتفاع التركيز الحجمي ينخفض وقت التصلب الكلي بسبب زيادة الموصلية الحرارية لـ PCM لان خلال عملية التصلب يهيمن التوصيل الحراري. تقل الطاقة المخزنة بنسبة 5.3% عند زيادة التركيز من 0 إلى 1% وبنسبة 10.3% عند زيادتها من 1 إلى 3%.

تم تحقيق في تحسين انتقال الحرارة باستخدام التقنية المشتركة بين الجسيمات النانوية من جرافين ورغوة الألمنيوم بمسامية مختلفة (95% و 90%) بإجراء محاكاة CFD ثنائية الأبعاد لوحدة تخزين القشرة والأنبوب أثناء عمليتي شحن وتفريغ. أظهرت النتائج أن ذوبان NPCM في وجود الرغوة المسامية يؤدي إلى تحسن كبير في الوقت مقارنة بالذوبان في وجود PCM غير مسامي ونقي. ومع ذلك ، فإن التركيز العالي للجسيمات النانوية يؤدي إلى انخفاض في معدل تغير الطور بسبب اللزوجة العالية الناتجة عن المحتوى العالي للجسيمات النانوية. ومنه يصبح الحمل الحراري الطبيعي ضعيفاً وبالتالي تصبح حركة الذوبان أبطأ. من ناحية أخرى، تثبط المسامية المنخفضة تطور الحمل الطبيعي في NPCM بسبب زيادة المقاومة الهيدروليكية للتدفق و تصبح الحرارة تنتقل بشكل أساسي من خلال التوصيل الحراري. ومع ذلك، يتم تقليل وقت الذوبان باستخدام NPCM المسامي من حوالي 83% إلى 88%. كما أظهرت النتائج أن تصلب NPCM في وجود الرغوة المسامية يؤدي إلى تحسن كبير في الوقت مقارنة بالتصلب في وجود PCM غير مسامي ونقي. يكون وقت عملية التصلب الكامل لـ NPCM المسامي أقصر بكثير مما يؤدي إلى توفير الوقت الكلي يتراوح من حوالي 92% إلى 95%.

الهدف من هذا البحث هو تحسين أداء انتقال الحرارة باستخدام رغوة NPCM من خلال تحسين الأداء الحراري لمادة متغيرة الطور PCM. يتم ملاحظة التحسين الحراري المرغوب في انتقال الحرارة بالتوصيل عن طريق تحسين وقت الشحن/التفريغ. فشل رغوة NPCM في تحقيق أي كسب حراري للحمل الطبيعي

بسبب اللزوجة العالية لـ سائل NPCM و مسامية المنخفضة لرغوة الألمنيوم. يمكن الحصول على أداء حراري أفضل للحمل الطبيعي باستخدام جسيمات النانوية بنسب حجمية صغيرة مع مسامية عالية و لكن يجب ضمان توازن للاستفادة من انتقال الحرارة بكل من التوصيل و الحمل للحصول على أفضل تحسين حراري ممكن لرغوة NPCM. قد يؤدي هذا البحث الرائد باستخدام رغوة NPCM إلى العديد من الأبحاث المستقبلية لاستبدال نظام تخزين الطاقة المحسوسة بنظام تخزين الطاقة الحرارية الكامنة لمختلف التطبيقات الحرارية.

بناءً على المناقشة أعلاه، تم تحديد الأعمال المستقبلية التالية:

- إجراء التحليل والمحاكاة باستخدام أشكال هندسية مختلفة لتكوين أنظمة التخزين ودراسة مواد PCM الأخرى مع استخدام طرق تحسين انتقال الحرارة.
- عمل تجريبي مع جسيمات نانوية خفيفة مع نسب حجمية مختلفة.
- عمل تجريبي بمسامية مختلفة ومواد ذات وسط مسامي.
- عمل تجريبي لقياس الخصائص الفيزيائية الحرارية مثل اللزوجة والموصلية الحرارية لـ PCM و NPCM و PCM مع وسط مسامي و NPCM مع وسط مسامي.

# قائمة المراجع

## قائمة المراجع

- [1] A. Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen, D. Buddhi, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 13 (2009) 318–345.
- [2] S. Bellan, J. Gonzalez-Aguilar, M. Romero, M.M. Rahman, D.Y. Goswami, E.K. Stefanakos, D. Couling, Numerical analysis of charging and discharging performance of a thermal energy storage system with encapsulated phase change material, *Applied Thermal Engineering*. 71 (2014) 481–500.
- [3] P. Pinel, C.A. Cruickshank, I. Beausoleil-Morrison, A. Wills, A review of available methods for seasonal storage of solar thermal energy in residential applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 15 (2011) 3341–3359.
- [4] A. Mishra, A. Shukla, A. Sharma, Latent heat storage through phase change materials, *Resonance*. 20 (2015) 532–541.
- [5] T. Xiong, Y. Wang, X. Yang, Numerical investigation of dynamic melting process in a thermal energy storage system using U-tube heat exchanger, *Advances in Mechanical Engineering*. 9 (2017) 1687814017707415.
- [6] S. Jegadheeswaran, S.D. Pohekar, Performance enhancement in latent heat thermal storage system: a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 13 (2009) 2225–2244.
- [7] M. Liu, W. Saman, F. Bruno, Review on storage materials and thermal performance enhancement techniques for high temperature phase change thermal storage systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 16 (2012) 2118–2132.
- [8] B. Cárdenas, N. León, High temperature latent heat thermal energy storage: Phase change materials, design considerations and performance enhancement techniques, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 27 (2013) 724–737.
- [9] N.I. Ibrahim, F.A. Al-Sulaiman, S. Rahman, B.S. Yilbas, A.Z. Sahin, Heat transfer enhancement of phase change materials for thermal energy storage applications: A critical review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 74 (2017) 26–50.
- [10] P. Sivasamy, A. Devaraju, S. Harikrishnan, Review on heat transfer enhancement of phase change materials (PCMs), *Materials Today: Proceedings*. 5 (2018) 14423–14431.
- [11] M. Lacroix, Numerical simulation of a shell-and-tube latent heat thermal energy storage unit, *Solar Energy*. 50 (1993) 357–367.
- [12] M.A. Kibria, M.R. Anisur, M.H. Mahfuz, R. Saidur, I. Metselaar, Numerical and experimental investigation of heat transfer in a shell and tube thermal energy storage system, *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 53 (2014) 71–78.
- [13] A. Atal, Y. Wang, M. Harsha, S. Sengupta, Effect of porosity of conducting matrix on a phase change energy storage device, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 93 (2016) 9–16.

- [14] A.F. Regin, S.C. Solanki, J.S. Saini, Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 12 (2008) 2438–2458.
- [15] L.F. Cabeza, A. Castell, C. de Barreneche, A. De Gracia, A.I. Fernández, Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 15 (2011) 1675–1695.
- [16] S. Rostami, M. Afrand, A. Shahsavari, M. Sheikholeslami, R. Kalbasi, S. Aghakhani, M.S. Shadloo, H.F. Oztop, A review of melting and freezing processes of PCM/nano-PCM and their application in energy storage, *Energy*. 211 (2020) 118698.
- [17] S.D. Sharma, H. Kitano, K. Sagara, Phase change materials for low temperature solar thermal applications, *Res. Rep. Fac. Eng. Mie Univ.* 29 (2004) 31–64.
- [18] S.E. Kalnæs, B.P. Jelle, Phase change materials and products for building applications: A state-of-the-art review and future research opportunities, *Energy and Buildings*. 94 (2015) 150–176.
- [19] A.F. Regin, S.C. Solanki, J.S. Saini, An analysis of a packed bed latent heat thermal energy storage system using PCM capsules: Numerical investigation, *Renewable Energy*. 34 (2009) 1765–1773.
- [20] Z.S. Abdel-Rehim, A. Lashine, Packed bed-PCM material latent heat thermal energy storage system, *ESRJ–Faculty of Engineering at Shoubra*. 14 (2011) 23.
- [21] H. Peng, H. Dong, X. Ling, Thermal investigation of PCM-based high temperature thermal energy storage in packed bed, *Energy Conversion and Management*. 81 (2014) 420–427.
- [22] L. Xia, P. Zhang, R.Z. Wang, Numerical heat transfer analysis of the packed bed latent heat storage system based on an effective packed bed model, *Energy*. 35 (2010) 2022–2032.
- [23] S. Karthikeyan, G.R. Solomon, V. Kumaresan, R. Velraj, Parametric studies on packed bed storage unit filled with PCM encapsulated spherical containers for low temperature solar air heating applications, *Energy Conversion and Management*. 78 (2014) 74–80.
- [24] Z. Duan, Z. Zhang, J. Wang, X. Cao, J. Zhang, Thermal performance of structured packed bed with encapsulated phase change materials, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 158 (2020) 120066.
- [25] M.-J. Li, B. Jin, Z. Ma, F. Yuan, Experimental and numerical study on the performance of a new high-temperature packed-bed thermal energy storage system with macroencapsulation of molten salt phase change material, *Applied Energy*. 221 (2018) 1–15.
- [26] C. Li, Q. Li, Y. Ding, Investigation on the thermal performance of a high temperature packed bed thermal energy storage system containing carbonate salt based composite phase change materials, *Applied Energy*. 247 (2019) 374–388.
- [27] X. Yang, Z. Cai, An analysis of a packed bed thermal energy storage system using sensible heat and phase change materials, *International Journal of Heat and Mass*

Transfer. 144 (2019) 118651.

- [28] Q. Mao, Y. Zhang, Thermal energy storage performance of a three-PCM cascade tank in a high-temperature packed bed system, *Renewable Energy*. 152 (2020) 110–119.
- [29] F. Agyenim, N. Hewitt, P. Eames, M. Smyth, A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 14 (2010) 615–628.
- [30] L. Jian-you, Numerical and experimental investigation for heat transfer in triplex concentric tube with phase change material for thermal energy storage, *Solar Energy*. 82 (2008) 977–985.
- [31] M.N.R. Dimaano, T. Watanabe, Performance investigation of the capric and lauric acid mixture as latent heat energy storage for a cooling system, *Solar Energy*. 72 (2002) 205–215.
- [32] A. Sari, K. Kaygusuz, Thermal performance of a eutectic mixture of lauric and stearic acids as PCM encapsulated in the annulus of two concentric pipes, *Solar Energy*. 72 (2002) 493–504.
- [33] H. Rieger, H. Beer, The melting process of ice inside a horizontal cylinder: effects of density anomaly, (1986).
- [34] H. Rieger, U. Projahn, M. Bareiss, H. Beer, Heat transfer during melting inside a horizontal tube, (1983).
- [35] M. Esen, A. Durmuş, A. Durmuş, Geometric design of solar-aided latent heat store depending on various parameters and phase change materials, *Solar Energy*. 62 (1998) 19–28.
- [36] S. Seddegh, X. Wang, A.D. Henderson, A comparative study of thermal behaviour of a horizontal and vertical shell-and-tube energy storage using phase change materials, *Applied Thermal Engineering*. 93 (2016) 348–358.
- [37] N. Kousha, M.J. Hosseini, M.R. Aligoodarz, R. Pakrouh, R. Bahrapoury, Effect of inclination angle on the performance of a shell and tube heat storage unit—An experimental study, *Applied Thermal Engineering*. 112 (2017) 1497–1509.
- [38] D.B. Khillarkar, Z.X. Gong, A.S. Mujumdar, Melting of a phase change material in concentric horizontal annuli of arbitrary cross-section, *Applied Thermal Engineering*. 20 (2000) 893–912.
- [39] N.H.S. Tay, M. Belusko, F. Bruno, Experimental investigation of tubes in a phase change thermal energy storage system, *Applied Energy*. 90 (2012) 288–297.
- [40] N.H.S. Tay, F. Bruno, M. Belusko, Experimental validation of a CFD model for tubes in a phase change thermal energy storage system, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 55 (2012) 574–585.
- [41] Z. Hu, A. Li, R. Gao, H. Yin, Enhanced heat transfer for PCM melting in the frustum-shaped unit with multiple PCMs, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 120 (2015) 1407–1416.

- [42] J.M. Mahdi, E.C. Nsofor, Multiple-segment metal foam application in the shell-and-tube PCM thermal energy storage system, *Journal of Energy Storage*. 20 (2018) 529–541.
- [43] J.M. Mahdi, H.I. Mohammed, E.T. Hashim, P. Talebizadehsardari, E.C. Nsofor, Solidification enhancement with multiple PCMs, cascaded metal foam and nanoparticles in the shell-and-tube energy storage system, *Applied Energy*. 257 (2020) 113993.
- [44] Z. Wang, J. Wu, D. Lei, H. Liu, J. Li, Z. Wu, Experimental study on latent thermal energy storage system with gradient porosity copper foam for mid-temperature solar energy application, *Applied Energy*. 261 (2020) 114472.
- [45] X. Yang, P. Wei, X. Wang, Y.-L. He, Gradient design of pore parameters on the melting process in a thermal energy storage unit filled with open-cell metal foam, *Applied Energy*. 268 (2020) 115019.
- [46] Y. Zhang, A. Faghri, Heat transfer enhancement in latent heat thermal energy storage system by using an external radial finned tube, *Journal of Enhanced Heat Transfer*. 3 (1996).
- [47] K.A.R. Ismail, C.L.F. Alves, M.S. Modesto, Numerical and experimental study on the solidification of PCM around a vertical axially finned isothermal cylinder, *Applied Thermal Engineering*. 21 (2001) 53–77.
- [48] F. Agyenim, P. Eames, M. Smyth, A comparison of heat transfer enhancement in a medium temperature thermal energy storage heat exchanger using fins, *Solar Energy*. 83 (2009) 1509–1520.
- [49] L. Tan, Y. Kwok, A. Date, A. Akbarzadeh, Numerical study of natural convection effects in latent heat storage using aluminum fins and spiral fillers, *International Journal of Mechanical and Aerospace Engineering*. 6 (2012) 238–245.
- [50] F. Agyenim, P. Eames, M. Smyth, Experimental study on the melting and solidification behaviour of a medium temperature phase change storage material (Erythritol) system augmented with fins to power a LiBr/H<sub>2</sub>O absorption cooling system, *Renewable Energy*. 36 (2011) 108–117.
- [51] D. Zhao, G. Tan, Numerical analysis of a shell-and-tube latent heat storage unit with fins for air-conditioning application, *Applied Energy*. 138 (2015) 381–392.
- [52] M. Rahimi, A.A. Ranjbar, D.D. Ganji, K. Sedighi, M.J. Hosseini, R. Bahrampoury, Analysis of geometrical and operational parameters of PCM in a fin and tube heat exchanger, *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 53 (2014) 109–115.
- [53] A. Sevault, J. Soibam, N.E.L. Haugen, Ø. Skreiberg, Thermal energy storage in a stovepipe using phase change material: a numerical study, (2018).
- [54] V. Joshi, M.K. Rathod, Experimental and numerical assessments of thermal transport in fins and metal foam infused latent heat thermal energy storage systems: A comparative evaluation, *Applied Thermal Engineering*. 178 (2020) 115518.
- [55] C. Zhao, M. Opolot, M. Liu, F. Bruno, S. Mancin, K. Hooman, Numerical study of melting performance enhancement for PCM in an annular enclosure with internal-external fins and metal foams, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 150 (2020)

119348.

- [56] M. Arıcı, E. Tütüncü, Ç. Yıldız, D. Li, Enhancement of PCM melting rate via internal fin and nanoparticles, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 156 (2020) 119845.
- [57] B. Kok, Examining effects of special heat transfer fins designed for the melting process of PCM and Nano-PCM, *Applied Thermal Engineering*. 170 (2020) 114989.
- [58] D.S. Mehta, B. Vaghela, M.K. Rathod, J. Banerjee, Thermal performance augmentation in latent heat storage unit using spiral fin: An experimental analysis, *Journal of Energy Storage*. 31 (2020) 101776.
- [59] M.N.A. Hawlader, M.S. Uddin, M.M. Khin, Microencapsulated PCM thermal-energy storage system, *Applied Energy*. 74 (2003) 195–202.
- [60] P.B. Salunkhe, P.S. Shembekar, A review on effect of phase change material encapsulation on the thermal performance of a system, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 16 (2012) 5603–5616.
- [61] J. Stekli, L. Irwin, R. Pitchumani, Technical challenges and opportunities for concentrating solar power with thermal energy storage, *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*. 5 (2013).
- [62] C. Liu, Z. Rao, J. Zhao, Y. Huo, Y. Li, Review on nanoencapsulated phase change materials: preparation, characterization and heat transfer enhancement, *Nano Energy*. 13 (2015) 814–826.
- [63] Y. Xuan, Y. Huang, Q. Li, Experimental investigation on thermal conductivity and specific heat capacity of magnetic microencapsulated phase change material suspension, *Chemical Physics Letters*. 479 (2009) 264–269.
- [64] M. Fuensanta, U. Paiphansiri, M.D. Romero-Sánchez, C. Guillem, Á.M. López-Buendía, K. Landfester, Thermal properties of a novel nanoencapsulated phase change material for thermal energy storage, *Thermochimica Acta*. 565 (2013) 95–101.
- [65] K. Tumirah, M.Z. Hussein, Z. Zulkarnain, R. Rafeadah, Nano-encapsulated organic phase change material based on copolymer nanocomposites for thermal energy storage, *Energy*. 66 (2014) 881–890.
- [66] Y. Fang, H. Yu, W. Wan, X. Gao, Z. Zhang, Preparation and thermal performance of polystyrene/n-tetradecane composite nanoencapsulated cold energy storage phase change materials, *Energy Conversion and Management*. 76 (2013) 430–436.
- [67] Y. Fang, X. Liu, X. Liang, H. Liu, X. Gao, Z. Zhang, Ultrasonic synthesis and characterization of polystyrene/n-dotriacontane composite nanoencapsulated phase change material for thermal energy storage, *Applied Energy*. 132 (2014) 551–556.
- [68] T.E. Alam, J. Dhau, D.Y. Goswami, M.M. Rahman, E. Stefankos, Experimental investigation of a packed-bed latent heat thermal storage system with encapsulated phase change material, in: *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, American Society of Mechanical Engineers, 2014: p. V06BT07A050.
- [69] S. Bellan, J. Gonzalez-Aguilar, M. Romero, M.M. Rahman, D.Y. Goswami, E.K.

Stefanakos, Numerical modeling of thermal energy storage system, in: ASME 2014 8th International Conference on Energy Sustainability Collocated with the ASME 2014 12th International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2014.

- [70] G. Zhang, J. Li, Y. Chen, H. Xiang, B. Ma, Z. Xu, X. Ma, Encapsulation of copper-based phase change materials for high temperature thermal energy storage, *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 128 (2014) 131–137.
- [71] R. Fukahori, T. Nomura, C. Zhu, N. Sheng, N. Okinaka, T. Akiyama, Macro-encapsulation of metallic phase change material using cylindrical-type ceramic containers for high-temperature thermal energy storage, *Applied Energy*. 170 (2016) 324–328.
- [72] H. Shabgard, T.L. Bergman, N. Sharifi, A. Faghri, High temperature latent heat thermal energy storage using heat pipes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 53 (2010) 2979–2988.
- [73] C.W. Robak, T.L. Bergman, A. Faghri, Enhancement of latent heat energy storage using embedded heat pipes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 54 (2011) 3476–3484.
- [74] K. Nithyanandam, R. Pitchumani, Computational studies on a latent thermal energy storage system with integral heat pipes for concentrating solar power, *Applied Energy*. 103 (2013) 400–415.
- [75] H. Shabgard, C.W. Robak, T.L. Bergman, A. Faghri, Heat transfer and exergy analysis of cascaded latent heat storage with gravity-assisted heat pipes for concentrating solar power applications, *Solar Energy*. 86 (2012) 816–830.
- [76] H. Shabgard, M.J. Allen, N. Sharifi, S.P. Benn, A. Faghri, T.L. Bergman, Heat pipe heat exchangers and heat sinks: Opportunities, challenges, applications, analysis, and state of the art, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 89 (2015) 138–158.
- [77] M.M. Farid, Y. Kim, A. Kansawa, Thermal performance of a heat storage module using PCM's with different melting temperature: experimental, (1990).
- [78] M.M. Farid, A. Kanzawa, Thermal performance of a heat storage module using PCM's with different melting temperatures: mathematical modeling, (1989).
- [79] T. Watanabe, H. Kikuchi, A. Kanzawa, Enhancement of charging and discharging rates in a latent heat storage system by use of PCM with different melting temperatures, *Heat Recovery Systems and CHP*. 13 (1993) 57–66.
- [80] L. Yang, X. Zhang, G. Xu, Thermal performance of a solar storage packed bed using spherical capsules filled with PCM having different melting points, *Energy and Buildings*. 68 (2014) 639–646.
- [81] Y.Q. Li, Y.L. He, H.J. Song, C. Xu, W.W. Wang, Numerical analysis and parameters optimization of shell-and-tube heat storage unit using three phase change materials, *Renewable Energy*. 59 (2013) 92–99.
- [82] G. Peiró, J. Gasia, L. Miró, L.F. Cabeza, Experimental evaluation at pilot plant scale of multiple PCMs (cascaded) vs. single PCM configuration for thermal energy storage,

Renewable Energy. 83 (2015) 729–736.

- [83] P.D. Myers, D. Yogi Goswami, E. Stefanakos, Molten salt spectroscopy for quantification of radiative absorption in novel metal chloride-enhanced thermal storage media, *Journal of Solar Energy Engineering*. 137 (2015).
- [84] H.A. Hasan, I.Y. Hussain, Theoretical formulation and numerical simulation of thermal performance enhancements for cascade thermal energy storage systems, in: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 2018: p. 12043.
- [85] O.S. Elsanusi, E.C. Nsofor, Melting of multiple PCMs with different arrangements inside a heat exchanger for energy storage, *Applied Thermal Engineering*. 185 (2021) 116046.
- [86] J. Lopez, G. Caceres, E.P. Del Barrio, W. Jomaa, Confined melting in deformable porous media: A first attempt to explain the graphite/salt composites behaviour, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 53 (2010) 1195–1207.
- [87] T. Nomura, N. Okinaka, T. Akiyama, Technology of latent heat storage for high temperature application: a review, *ISIJ International*. 50 (2010) 1229–1239.
- [88] S. Pincemin, R. Olives, X. Py, M. Christ, Highly conductive composites made of phase change materials and graphite for thermal storage, *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 92 (2008) 603–613.
- [89] Z. Zhengguo, S. Gang, F. Xiaoming, Study on paraffin/expanded graphite composite phase change thermal energy storage material, *Acta Energetica Solaris Sinica*. 26 (2005) 698.
- [90] M. Xiao, B. Feng, K. Gong, Preparation and performance of shape stabilized phase change thermal storage materials with high thermal conductivity, *Energy Conversion and Management*. 43 (2002) 103–108.
- [91] A. Sari, A. Karaipekli, Thermal conductivity and latent heat thermal energy storage characteristics of paraffin/expanded graphite composite as phase change material, *Applied Thermal Engineering*. 27 (2007) 1271–1277.
- [92] C.Y. Zhao, Z.G. Wu, Heat transfer enhancement of high temperature thermal energy storage using metal foams and expanded graphite, *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 95 (2011) 636–643.
- [93] Z.G. Wu, C.Y. Zhao, Experimental investigations of porous materials in high temperature thermal energy storage systems, *Solar Energy*. 85 (2011) 1371–1380.
- [94] M. Sheikholeslami, A.N. Keshteli, H. Babazadeh, Nanoparticles favorable effects on performance of thermal storage units, *Journal of Molecular Liquids*. 300 (2020) 112329.
- [95] S. Wu, D. Zhu, X. Zhang, J. Huang, Preparation and melting/freezing characteristics of Cu/paraffin nanofluid as phase-change material (PCM), *Energy & Fuels*. 24 (2010) 1894–1898.
- [96] A.A. Valan, A.P. Sasmito, A.S. Mujumdar, Numerical performance study of paraffin wax dispersed with alumina in a concentric pipe latent heat storage system, *Thermal Science*. 17 (2013) 419–430.

- [97] C.J. Ho, J.Y. Gao, Preparation and thermophysical properties of nanoparticle-in-paraffin emulsion as phase change material, *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 36 (2009) 467–470.
- [98] M. Auriemma, A. Iazzetta, Numerical analysis of melting of paraffin wax with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZnO and CuO nanoparticles in rectangular enclosure, *Indian Journal of Science and Technology*. 9 (2016) 1–8.
- [99] R. V Seeniraj, R. Velraj, N. Lakshmi Narasimhan, Heat transfer enhancement study of a LHTS unit containing dispersed high conductivity particles, *J. Sol. Energy Eng.* 124 (2002) 243–249.
- [100] N. Hu, Z.-Q. Zhu, Z.-R. Li, J. Tu, L.-W. Fan, Close-contact melting heat transfer on a heated horizontal plate: revisited in the presence of nano-enhanced phase change materials (NePCM), *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 124 (2018) 794–799.
- [101] K. Kant, A. Shukla, A. Sharma, P.H. Biwole, Heat transfer study of phase change materials with graphene nano particle for thermal energy storage, *Solar Energy*. 146 (2017) 453–463.
- [102] A. Mills, M. Farid, J.R. Selman, S. Al-Hallaj, Thermal conductivity enhancement of phase change materials using a graphite matrix, *Applied Thermal Engineering*. 26 (2006) 1652–1661.
- [103] H.M. Ali, M.M. Janjua, U. Sajjad, W.-M. Yan, A critical review on heat transfer augmentation of phase change materials embedded with porous materials/foams, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 135 (2019) 649–673.
- [104] O. Mesalhy, K. Lafdi, A. Elgafy, K. Bowman, Numerical study for enhancing the thermal conductivity of phase change material (PCM) storage using high thermal conductivity porous matrix, *Energy Conversion and Management*. 46 (2005) 847–867.
- [105] M.S. Phanikumar, R.L. Mahajan, Non-Darcy natural convection in high porosity metal foams, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 45 (2002) 3781–3793.
- [106] B. Buonomo, H. Celik, D. Ercole, O. Manca, M. Mobedi, Numerical study on latent thermal energy storage systems with aluminum foam in local thermal equilibrium, *Applied Thermal Engineering*. 159 (2019) 113980.
- [107] X. Yang, P. Wei, X. Cui, L. Jin, Y.-L. He, Thermal response of annuli filled with metal foam for thermal energy storage: an experimental study, *Applied Energy*. 250 (2019) 1457–1467.
- [108] X. Yang, J. Yu, Z. Guo, L. Jin, Y.-L. He, Role of porous metal foam on the heat transfer enhancement for a thermal energy storage tube, *Applied Energy*. 239 (2019) 142–156.
- [109] B. Akhmetov, M.E. Navarro, A. Seitov, A. Kaltayev, Z. Bakenov, Y. Ding, Numerical study of integrated latent heat thermal energy storage devices using nanoparticle-enhanced phase change materials, *Solar Energy*. 194 (2019) 724–741.
- [110] C. Nie, J. Liu, S. Deng, Effect of geometric parameter and nanoparticles on PCM melting in a vertical shell-tube system, *Applied Thermal Engineering*. 184 (2021) 116290.

- [111] Q. Mao, Y. Li, Experimental and numerical investigation on enhancing heat transfer performance of a phase change thermal storage tank, *Journal of Energy Storage*. 31 (2020) 101725.
- [112] A. Shahsavari, A.A.A.A. Al-Rashed, S. Entezari, P.T. Sardari, Melting and solidification characteristics of a double-pipe latent heat storage system with sinusoidal wavy channels embedded in a porous medium, *Energy*. 171 (2019) 751–769.
- [113] H. Zheng, C. Wang, Q. Liu, Z. Tian, X. Fan, Thermal performance of copper foam/paraffin composite phase change material, *Energy Conversion and Management*. 157 (2018) 372–381.
- [114] M. Esapour, A. Hamzehnezhad, A.A.R. Darzi, M. Jourabian, Melting and solidification of PCM embedded in porous metal foam in horizontal multi-tube heat storage system, *Energy Conversion and Management*. 171 (2018) 398–410.
- [115] P.T. Sardari, H.I. Mohammed, D. Giddings, M. Gillott, D. Grant, Numerical study of a multiple-segment metal foam-PCM latent heat storage unit: Effect of porosity, pore density and location of heat source, *Energy*. 189 (2019) 116108.
- [116] C. Nie, J. Liu, S. Deng, Effect of geometry modification on the thermal response of composite metal foam/phase change material for thermal energy storage, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 165 (2021) 120652.
- [117] J.M. Mahdi, E.C. Nsofor, Melting enhancement in triplex-tube latent heat energy storage system using nanoparticles-metal foam combination, *Applied Energy*. 191 (2017) 22–34.
- [118] M. Al-Jethelah, S. Ebadi, K. Venkateshwar, S.H. Tasnim, S. Mahmud, A. Dutta, Charging nanoparticle enhanced bio-based PCM in open cell metallic foams: An experimental investigation, *Applied Thermal Engineering*. 148 (2019) 1029–1042.
- [119] A. Khalifa, L. Tan, A. Date, A. Akbarzadeh, A numerical and experimental study of solidification around axially finned heat pipes for high temperature latent heat thermal energy storage units, *Applied Thermal Engineering*. 70 (2014) 609–619.
- [120] H.L. Zhang, J. Baeyens, J. Degève, G. Cáceres, R. Segal, F. Pitié, Latent heat storage with tubular-encapsulated phase change materials (PCMs), *Energy*. 76 (2014) 66–72.
- [121] A. Khalifa, L. Tan, A. Date, A. Akbarzadeh, Performance of suspended finned heat pipes in high-temperature latent heat thermal energy storage, *Applied Thermal Engineering*. 81 (2015) 242–252.
- [122] H. Mhiri, A. Jemni, H. Sammouda, Numerical and experimental investigations of melting process of composite material (nanoPCM/carbon foam) used for thermal energy storage, *Journal of Energy Storage*. 29 (2020) 101167.
- [123] S. Tiari, M. Mahdavi, Computational study of a latent heat thermal energy storage system enhanced by highly conductive metal foams and heat pipes, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 141 (2020) 1741–1751.
- [124] X. Yang, J. Yu, T. Xiao, Z. Hu, Y.-L. He, Design and operating evaluation of a finned shell-and-tube thermal energy storage unit filled with metal foam, *Applied Energy*. 261 (2020) 114385.

- [125] Z. Li, A. Shahsavari, A.A.A.A. Al-Rashed, P. Talebizadehsardari, Effect of porous medium and nanoparticles presences in a counter-current triple-tube composite porous/nano-PCM system, *Applied Thermal Engineering*. 167 (2020) 114777.
- [126] Y. Ding, H. Chen, L. Wang, C.-Y. Yang, Y. He, W. Yang, W.P. Lee, L. Zhang, R. Huo, Heat transfer intensification using nanofluids, *KONA Powder and Particle Journal*. 25 (2007) 23–38.
- [127] A. Gakare, A Review on Nanofluids: Preparation and Applications, *Nano Trends-A Journal of Nano Technology & Its Applications*. 21 (2019) 21–35.
- [128] L. Godson, B. Raja, D.M. Lal, S. e al Wongwises, Enhancement of heat transfer using nanofluids—an overview, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 14 (2010) 629–641.
- [129] E.C. Okonkwo, I. Wole-Osho, I.W. Almanassra, Y.M. Abdullatif, T. Al-Ansari, An updated review of nanofluids in various heat transfer devices, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. (2020) 1–56.
- [130] C.-J. Ho, M.W. Chen, Z.W. Li, Numerical simulation of natural convection of nanofluid in a square enclosure: effects due to uncertainties of viscosity and thermal conductivity, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 51 (2008) 4506–4516.
- [131] B. Gavtash, K. Hussain, M. Layeghi, S.S. Lafmejani, Numerical simulation of the effects of nanofluid on a heat pipe thermal performance, *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*. 6 (2012) 1462–1468.
- [132] L. Syam Sundar, K. V Sharma, S. Parveen, M.A. Gaffar, Laminar convective heat transfer of nanofluids in a circular tube under constant heat flux, *International Journal of Nanoparticles*. 2 (2009) 314–320.
- [133] A.P. Sasmito, J.C. Kurnia, A.S. Mujumdar, Numerical evaluation of laminar heat transfer enhancement in nanofluid flow in coiled square tubes, *Nanoscale Research Letters*. 6 (2011) 1–14.
- [134] Y. Hu, Y. He, Z. Zhang, B. Jiang, Y. Huang, Natural convection heat transfer for eutectic binary nitrate salt based Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposites in solar power systems, *Renewable Energy*. 114 (2017) 686–696.
- [135] C. Qi, J. Hu, M. Liu, L. Guo, Z. Rao, Experimental study on thermo-hydraulic performances of CPU cooled by nanofluids, *Energy Conversion and Management*. 153 (2017) 557–565.
- [136] M.M. Sarafraz, V. Nikkhah, M. Nakhjavani, A. Arya, Thermal performance of a heat sink microchannel working with biologically produced silver-water nanofluid: experimental assessment, *Experimental Thermal and Fluid Science*. 91 (2018) 509–519.
- [137] N. Zhao, L. Guo, C. Qi, T. Chen, X. Cui, Experimental study on thermo-hydraulic performance of nanofluids in CPU heat sink with rectangular grooves and cylindrical bugles based on exergy efficiency, *Energy Conversion and Management*. 181 (2019) 235–246.
- [138] M. Fares, A.-M. Mohammad, A.-S. Mohammed, Heat transfer analysis of a shell and tube

heat exchanger operated with graphene nanofluids, *Case Studies in Thermal Engineering*. 18 (2020) 100584.

- [139] A. Fluent, *Ansys fluent theory guide*, ANSYS Inc., USA. 15317 (2011) 724–746.
- [140] G. Eggenspieler, *Turbulence modeling*, ANSYS Inc. (2011).
- [141] M. Pinelli, S. Piva, Solid/liquid phase change in presence of natural convection: a thermal energy storage case study, *J. Energy Resour. Technol.* 125 (2003) 190–198.
- [142] H.A. Adine, H. El Qarnia, Numerical analysis of the thermal behaviour of a shell-and-tube heat storage unit using phase change materials, *Applied Mathematical Modelling*. 33 (2009) 2132–2144.
- [143] Z.-Q. Zhu, M.-J. Liu, N. Hu, Y.-K. Huang, L.-W. Fan, Z.-T. Yu, J. Ge, Inward solidification heat transfer of nano-enhanced phase change materials in a spherical capsule: an experimental study, *Journal of Heat Transfer*. 140 (2018).
- [144] N. Hu, Z.-Q. Zhu, Z.-R. Li, J. Tu, L.-W. Fan, Unconstrained Melting Heat Transfer of Nano-Enhanced Phase-Change Materials in a Spherical Capsule for Latent Heat Storage: Effects of the Capsule Size, *Journal of Heat Transfer*. 141 (2019).
- [145] M. Arici, E. Tütüncü, A. Campo, Numerical investigation of melting of paraffin wax dispersed with CuO nanoparticles inside a square enclosure, *Heat Transfer Research*. 49 (2018).
- [146] A. Zabalegui, D. Lokapur, H. Lee, Nanofluid PCMs for thermal energy storage: Latent heat reduction mechanisms and a numerical study of effective thermal storage performance, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 78 (2014) 1145–1154.