



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة محمد الصديق بن يحيى - جيجل

كلية العلوم الدقيقة والإعلام الالي
قسم الفيزياء

مذكرة مقدمة لنيل شهادة ماستر في الفيزياء

تخصص: فيزياء المواد

دراسة عددية حول تأثير إضافة جزيئات نانوية من النحاس (Cu) لمادة
تغير الطور على عملية تخزين الطاقة الحرارية داخل مبادل حراري

من إعداد الطالبتين :

لقربيوي رفيقة

برنو سهام

أمام لجنة المناقشة المكونة من الأساتذة :

رئيسا	جامعة جيجل	بريمي نور الدين
مشرقا	جامعة جيجل	لعور عبد الغاني
متحنا	جامعة جيجل	بن شريف محمد نفري

كلمة شكر وتقدير

بسم الله الرحمن الرحيم

قال رسول الله صلى الله عليه وسلم : "من لم يشكر الناس لم يشكر الله ومن أهدى إليكم معرفة فكافئوه فإن لم تستطعوا
فادعوا له"

يقول تعالى : "لَئِنْ شَكَرْتُمْ لِأَزِيدُنَّكُمْ"
الحمد لله الذي وهب لنا نعمة العقل
الحمد لله الذي يسر لنا أمرنا وأكرمنا بنعمة الفهم
الحمد لله الذي وفقنا وسهل لنا التقدم للأمام

وعملأ بقوله تعالى ونبيه المصطفى واعترافا بالجميل . نحمد الله عز وجل الذي وفقنا في إتمام هذه المذكرة المتواضعة
ونحن في مقامنا هذا نشكرون دعوكم من أوصانا به الله

بقوله تعالى : "وَقَضَى رَبُّكَ أَلَا تَبْعَدُوا إِلَيَّاهُ وَبِالْوَالِدِينَ إِحْسَانًا إِمَا يَبْلُغُنَّ عَنْكُمُ الْكُبُرُ أَحَدُهُمَا أَوْ كُلُّهُمَا فَلَا تَهْلِكُ لَهُمَا
أَفْ وَلَا تُنْهِرُهُمَا وَقُلْ لَهُمَا قُولًا كَرِيمًا وَخُفْضُ لَهُمَا جَنَاحُ الذَّلِيلِ مِنَ الرَّحْمَةِ وَقُلْ رَبِّيْ أَرْحَمَهُمَا كَمَا رَبَّيْنَا
بَارِكَ اللَّهُ فِيهِمَا فَنَّ دُونَكُمَا مَا دَخَلْنَا هَذَا الصَّرْحُ الْعَظِيمُ لَأَنَّكُمْ زَرَعْنَا فِيهِ حُبَّ الْعِلْمِ وَالْعَمَلِ
كما

نتقدم بجزيل الشكر والتقدير إلى الأستاذ الدكتور المشرف لدور عبد الغني على كل

ما قدمه لنا من توجيهات ومعلومات قيمة ساهمت في إثراء موضوع دراستنا في

جوانبه المختلفة كما نتقدم بجزيل الشكر إلى أعضاء لجنة المناقشة المحترمة المتكونة من أستاذ بريهي نور الدين والأستاذ
نحري بن الشرييف محمد

كما نشكر كل من مد لنا يد العون من قريب أو بعيد
وفي الأخير لا يسعنا إلا أن ندعوا الله عز وجل أن يرزقنا السداد والرشد والعفاف والغنى وأن يجعلنا هداة مهتدين

برنو سهام
لقربيوي رفيقة

إهداه

نفر وشرف أن اعتز بهما فوق الواجب، وإن أهدي ثمرة هذا الجهد
المتواضع إلى التي حملتني، إلى التي سهرت الليالي لأنام في أمان، إلى
التي لو أعطيتها كل ما في الدنيا ما وفيت أجرها، إليك يا "أمِي" يا اعز
ما املك

إلى الذي لم يجعل علي بشيء احتجته إلى من سهر وتعب من أجل راحتي
إليك يا نبع العطاء ويا اعز مخلوق في الدنيا "أبي" ومهما قلت لن أوفيتكا
حقكما مقابل الجهد الذي قد متموه لي

إلى من شاركوني طعم الأيام ورافقوني على مر الأعوام "إخوتي" و
"صديقاتي" في كل مشواري الدراسي

إلى كل من كان لنا شرف ملاقاتهم والتعرف عليهم طيلة سنوات
دراستي

إلى كل من مد لي يد العون في مسيرتي العلمية

إلى كل من كان له مكانة خاصة في قلبي

إلى كل من نسيته أقلامنا ولم تنساه قلوبنا

إهدي هاد العمل المتواضع راجيا من الله تعالى التوفيق
في حياتي

رفقة

الإصراء

الحمد لله وحده والصلوة على النبي المصطفى وأمهه ومن وفقه أاما بعد:

الحمد لله الذي وفقني لتنمية هذه المخطوطة في مسيرتي الدراسية وإنجاز هذه

المذكرة المتواضعة

ثمرة الجهد والنجاح بفضل الله تعالى ممددة إلى الوالدين الكريمين حفظهما الله

وأدامهما نوراً دربي

ولكل العائلة الكريمة التي ساندتني ولابن سنتي من الأخوة وزوجاته والأخوات
وأزواجهم وأولادهم ، إلى أستاذتي المشرف الدكتور عبد الغاني لعور الذي لم يبخل
عليها بالمعلومات في إنجاز هذه المذكرة و كذلك إلى الأستاذ الدكتور بريهي نور
الدين إلى الأستاذ الفاضل بووزارة الذي كان سندًا لها طوال مشوارها الجامعي، إلى
زميلتي في المذكرة رفيقة لقريوبي، وإلى كل قسم فيزياء المواد وجميع دفعات 2022 ،
إلى كل من كان لهم انذر على حياتي

جامعة الصديق بن يحيى بوجبل

الطالبة: برونو سهام

كلمة شكر وتقدير

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِيْمِ

قال رسول الله صلى الله عليه وسلم: "من لم يشكر الناس لم يشكر الله ومن أهدي إِلَيْكُمْ معرفة فاكتفوا فإن لم تستطعوا فادعوا الله".

ويقول تعالى: "لَنَّ شَكْرَتُمْ إِذَا كُمْ"

الحمد لله الذي وهب لنا نعمة العقد

الحمد لله الذي يسر لنا أمورنا وعزيزنا بالنجاة

الحمد لله الذي وفقنا وسهل لنا السفرة للعام

و عملا بقوله تعالى ونبيه المصطفى واعترافا بالجميل، محمد الله عز وجل الذي وفقنا في إتمام هذه المذكرة المتواضعة

ونحن في مقامنا هذا نشكر وندعوه لمن اوصانا به الله بمحما

يقوله تعالى: "وَقَضَى رَبُّكَ أَلَّا تَعْبُدُوا إِلَّا رِبِّاهُ وَبِالْوَالِدِينِ إِحْسَانًا إِمَّا يُلْعَنُ عِنْدَكُمْ أَوْ كَلُومًا فَلَا تَقْدِرُ لَهُمَا أَذًنَ

وَلَا تَخْهُرُهُمَا وَقُلْ لَهُمَا قُلْ لَهُمَا وَخُفْضُ لَهُمَا جناح النَّذْلِ مِنَ الرَّحْمَةِ وَقُلْ لِرَبِّكَ أَكَمَا كَمَا رَبِّيَا نَبْ صَغِيرًا**

بارك الله فيكما فلن دونكما ما وخلتنا هزا الصرح العظيم لأنكما زرعتما فينا حب العلم والعلم

كمـ

تقدـمـ بـجـرـيلـ الشـكـرـ وـلتـقـدـمـ لـلـاستـاذـ الدـكتـورـ لـلـشـرفـ لـعـورـ عـبدـ الـغـانـيـ عـلـيـ كـلـ

ما قـدـمـهـ لـنـاـ مـنـ تـوـجـيـحـاتـ وـمـعـلـومـاتـ قـيـمـةـ سـاـمـحـتـ فـيـ إـثـرـاءـ مـوـضـوـعـ دـرـاسـتـاـنـاـ فـيـ

جوـنـجـاـ الـخـلـفـةـ كـمـ تـقـدـمـ بـجـرـيلـ الشـكـرـ لـلـأـصـدـقـاءـ جـنـةـ الـمـنـاقـشـةـ الـمـتـكـوـنةـ مـنـ أـسـتـاذـ بـرـيجـيـ نـورـ الدـينـ وـالـأـسـتـاذـ لـعـورـ عـبدـ

الـغـنـيـ وـالـأـسـتـاذـ بـنـ شـرـيفـ مـحـمـدـ ثـرـيـ

كمـ نـشـكـرـ كـلـ مـنـ مـدـ لـنـاـ يـدـ لـعـونـ مـنـ قـرـيبـ أـوـ بـعـيدـ

فـيـ الـأـخـيـرـ لـوـ يـسـعـنـاـ إـلـاـ أـنـ نـدـعـوـ اللهـ عـزـ وـجـلـ أـنـ يـرـزـقـنـاـ السـدـادـ وـالـرـشـدـ وـالـعـفـافـ وـالـغـنـيـ وـأـنـ يـجـعـلـنـاـ هـدـةـ مـحـتـمـلـينـ

سـهـامـ بـرـنوـ

رـفـيقـةـ لـقـرـيـوـيـ

قائمة الرموز

الوحدة في النظام الدولي	المقدار الفيزيائي	الرمز
Kg	الكتلة	m
Kg/m ³	الكثافة الحجمية	ρ
J/kg.K	السعة الحرارية	C_p
W/ K.m ²	الموصولة الحرارية	k
	الناقلة الحرارية للصلب	k_s
J/Kg	الحرارة الكامنة للانصهار	L_f
K	درجة الحرارة	T
Pa	الضغط	p
N/Kg	الجاذبية الأرضية	g
	انثالبي الكامن	ΔH
	نصف القطر الداخلي للأنبوب	R_i
Pa. S	اللزوجة الديناميكية	μ
1/K	معامل التمدد الحراري	β
	النسبة الحجمية للجسيمات	φ
Pa. S	اللزوجة الديناميكية الفعالة	μ_{nf}
Kg/m ³	الكثافة الفعالة للمائع النانوي	ρ_{nf}
J/kg.K	السعة الحرارية الفعالة	$(C_p)_{nf}$
J/Kg	الحرارة الكامنة للسائل النانوي	L_{nf}

الفهرس

1.....	مقدمة عامة.....
الفصل الأول : تخزين الطاقة	
4.....	مقدمة 1.....
4.....	2 مختلف تخزينات الطاقة.....
4.....	1- تخزين الطاقة الميكانيكية
5.....	2- تخزين الطاقة الكهربائية
5.....	- المكثف
6.....	- التخزين الطاقة بالمكثف الفائق
6.....	- تخزين الطاقة فائق التوصيل
7.....	3- تخزين الطاقة الكيميائية
7.....	4- تخزين الطاقة الكهرو كيميائية.....
7.....	- البطاريات
8.....	- خلية الوقود
9.....	5- تخزين الطاقة الحرارية.....
10.....	1- تخزين عن طريق الحرارة الحسوسية.....
11.....	2- التخزين عن طريق الحرارة الكامنة.....
12.....	3- التخزين عن طريق الكيماء الحرارية
13.....	المراجع
الفصل الثاني : عموميات حول مواد تغير الطور(MCP)	
15.....	1- مقدمة
15.....	2- التغيرات الفيزيائية للمادة
15.....	1- الانصهار والغليان
15.....	2- التسامي والتصلب
15.....	3- التكثف
16.....	4- التجدد
16.....	3- تعريف مواد تغير الطور
16.....	4- خصائص ومعايير اختيار مواد تغير الطور

17.....	1-4-2 الخصائص الفيزيائية
17.....	2-4-2 الخصائص الكيميائية
17.....	3-4-2 الخصائص الحرارية
17.....	4-4-2 الخصائص الاقتصادية
17.....	5-2 تصنيفات مواد تغير الطور
18.....	1-5-2 المواد العضوية
19.....	2-5-2 المواد غير عضوية
19.....	3-5-2 مواد سهلة الانصهار (اليوتكتيك)
19.....	6-2 الفرق بين المواد العضوية والمواد غير العضوية
20.....	7-2 المقارنة بين مختلف أنواع MCP
21.....	8-2 خصائص مواد تغير الطور
21.....	9-2 أشكال مواد متغيرة الطور
22.....	1-9-2 التغليفالجزئي Micro encapsulatio
23.....	2-9-2 التغليف الكلي Macro encapsulatio
25.....	10-2 تطبيقات MCP
24.....	1-10-2 نقل المنتجات الغذائية
25.....	2-10-2 التطبيقات الطبية Application médicales
25.....	3-10-2 صناعة النسيج
26.....	4-10-2 MCP في الثلاجة المنزلية
26.....	5-10-2 MCP في تبريد المكونات الالكترونية
27	6-10-2 التطبيق على المباني
28.....	7-10-2 انبعاث الهواء باستخدام MCP
28.....	8-10-2 تخزين الطاقة الشمسية باستخدام MCP
31-30-29.....	المراجع

الفصل الثالث : الحاكمة العددية والنتائج

33.....	1-3 مقدمة
33.....	2-3 النموذج الفيزيائي
34.....	3-3 الفرضيات العامة

34.....	4-3 معادلات الانفراط
34.....	4-3-1 معادلة انفراط الكثافة
34.....	4-3-2 معادلة انفراط كمية الحركة
35.....	4-3-3 معادلة حفظ الطاقة الحرارية
35.....	4-3-5 الشروط الابتدائية والحدية
36.....	4-3-6 الخواص الفيزيائية للمائع الأساسي والجزئيات النانوية
36	4-3-7 الخصائص الحرارية-الفيزيائية للمائع النانوي
37.....	4-3-8 الخطوات الرئيسية لحل المسائل في برنامج CFD
37.....	4-3-9 عرض تتميي لبرنامج ANSYS
37.....	4-3-10 المحاكاة العددية
41.....	4-3-11 الدقة العددية
41.....	4-3-12 مرحلة ما بعد المعالجة
42.....	4-3-13 النتائج و المناقشة
42.....	4-3-14 تطور الجزء السائل كدالة للوقت
46.....	4-3-15 التطور الزمني لتتساوي درجة الحرارة وخطوط التيار
50.....	4-3-16 خطوط التيار
54.....	4-3-17 تطور الكسر السائل مع الزمن
55.....	4-3-18 الطاقة الحرارية المخزنة
56.....	4-3-19 الخاتمة العامة

المقدمة العامة

إن الزيادة المستمرة في الطلب على إمدادات الطاقة مع تناقص موارد الوقود الأحفوري ، والتي تسببت في أضرار جسيمة في البيئة ، دفعت العلماء إلى تطوير تقنيات أنظمة الطاقة المتتجددة . إن الوفرة غير المؤكدة لإمدادات الطاقة المتتجددة دون انقطاع جعل استخدام أنظمة تخزين الطاقة الحرارية أمراً لا مفر منه . تخزين الطاقة الحرارية هو الجسر الأنسب الذي يربط بين العرض والطلب للطاقة ، مما يزيد أيضاً من كفاءة وموثوقية أنظمة الطاقة . يمكن تخزين الطاقة الحرارية إما باستخدام أنظمة تخزين الحرارة المحسوسة ، أنظمة تخزين الطاقة الحرارية الكامنة ، أو أنظمة التفاعل الكيميائي الحراري العكوس . يقترب إجمالي الطاقة المخزنة في نظام تخزين الطاقة المحسوس بدرجة الحرارة المرتفعة وجسم مادة التخزين والحرارة الخاصة بها . في المقابل تخزن أنظمة تخزين الطاقة الحرارية الكامنة ، التي تتمتع بكفاءة أفضل ، الطاقة الحرارية من خلال تسهيل تغيير الطور لمواد التخزين . تتطلب أنظمة التخزين الحراري خزانات كبيرة لتخزين الحرارة الكافية لتطبيقات معينة مثل نظام توليد الطاقة الشمسية.

على الرغم من أن أنظمة التخزين الحراري الكيميائي وأنظمة تخزين الطاقة الحرارية الكامنة مؤهلة لكفاءة تخزين عالية ، إلا أنها لا تزال في حالة دراسة بسبب عدم وجود دراسات عميقه . من بين أنظمة تخزين الطاقة الثلاثة تعتبر أنظمة تخزين الطاقة الحرارية الكامنة الأكثر قابلية للتطبيق لأن مواد تغير الطور لديها حرارة كامنة للذوبان عالية ، ومتخصصة وتحررها في نطاق درجة حرارة ضيق يخضع لتغيير الطور . مكنت الميزات البارزة لمواد تغير الطور من اكتساب مزايا في تطبيقات مختلفة ، مثل أنظمة الطاقة الشمسية والمباني وأنظمة التبريد والمنسوجات وأنظمة استعادة الحرارة والصناعات العسكرية وما إلى ذلك ...

تصنف مواد تغير الطور إلى مواد عضوية، غير عضوية، والاوتوكتيك و لها مجال من درجات حرارة الانصهار والتصلب، وكفاءة التخزين والتوصيل الحراري التي تعتبر المعايير الأساسية لاختيار هذه المواد. بالإضافة إلى ذلك ، يؤثر الاختيار المناسب لمواد تغير الطور بالخصائص الفيزيائية والكيميائية والдинاميكية الحرارية المرغوبة والتطبيقات المطلوبة.

تعاني مواد تغير الطور من قيود حركية وديناميكية حرارية كبيرة و خاصة الناقلة الحرارية الضعيفة التي تؤدي إلى معدلات نقل حرارة محدودة في أنظمة تخزين الطاقة الحرارية الكامنة. من أجل ذلك اقترح الباحثون عدة تقنيات لتحسين نقل الحرارة مثل تضمين زعانف معدنية ، اضافة رغوات معدنية، اضافة جزيئات نانوية الى غير ذلك.

يهدف هذا العمل الى دراسة تأثير اضافة جزيئات نانوية من النحاس على الاداء الحراري لوحدة تخزين الطاقة الحرارية الكامنة في مبادر حراري.

تم تقسيم المذكورة الى ثلاثة فصول بالإضافة الى مقدمة عامة و خلاصة.

تم التطرق في الفصل الاول الى عرض مختلف طرق تخزينات الطاقة.

الفصل الثاني خصص لعرض شامل مختلف انواع مواد تغير الطور المستعملة في تخزين الطاقة الحرارية الكامنة مع شرح مختلف المعايير لاختيار أفضل و أنساب مواد تغير الطور، قلنا بتصنيفها و ذكر مزايا و مساوئ كل فئة، بالإضافة إلى عرض أهم تطبيقاتها.

الفصل الثالث خصص للمحاكاة العددية و عرض و مناقشة مختلف النتائج المتحصل عليها.

الفصل الأول

تخزين الطاقة

1-1 مقدمة

جميع الدول تقريراً ملزمة بالتقدم في اتجاه الكفاءة الطاقوية مع إمكانات الطاقة المتاحة لديها بسبب السيناريو العالمي الذي يهيمن عليه استنفاد الوقود القائم على البترول ، والاحتباس الحراري المستمر ، والتغيرات البيئية و المناخية ، وزيادة عدد سكان العالم وما يرتبط بذلك من متطلبات الطاقة. لتحقيق ذلك ، من الضروري الاستثمار في جهات محلية جديدة لإنتاج الطاقة واستخدامها ، واعتماد تقنيات لحفظها عليها دون إحداث أي آثار سلبية إضافية على البيئة. تدرج كفاءة الطاقة الحفاظ على الطاقة كقاعدة حيوية. على العكس من ذلك ، فإن تخزين الطاقة مستقل عن نوع الطاقة التي سيتم تخزينها للاستخدام المستقبلي ويطلب أنظمة تخزين فعالة وقدرة على إعادة الطاقة المخزنة مع الحد الأدنى من الخسائر بنفس المستوى المحمول. من بين مصادر الطاقة المتجدددة ، تهيمن الطاقة الشمسية وطاقة الرياح بشكل أكبر من الناحية التكنولوجية ، ومع ذلك ، يجب تحقيق في بعض أشكال تخزين الطاقة لجعل استخدامها مستداماً.

هناك العديد من أشكال تخزين الطاقة ، بما في ذلك الميكانيكية والكهربائية والكيميائية والحرارية والعديد من الأنواع الأخرى التي لا تزال قيد التطوير. من بين التقنيات المتطورة ، يحتل تخزين الطاقة الحرارية مكانة رائدة مع مجموعة واسعة جداً من التطبيقات في أنظمة الطاقة التقليدية وغير التقليدية.

1-2 مختلف تخزينات الطاقة

تحتلت طرق التخزين حسب طبيعة الطاقة المراد تخزينها في وحدات التخزين.

1-2-1 تخزين الطاقة الميكانيكية

يشمل تخزين الطاقة الميكانيكية بشكل أساسي تخزين طاقة المياه التي يتم ضخها ، وتخزين طاقة الهواء المضغوط وتخزين طاقة دولاب الموارنة.

تخزين المياه التي يتم ضخها: يتم ضخ المياه التي تستخدم فائض الكهرباء ك وسيط للطاقة السائلة عندما تكون شبكة الطاقة منخفضة من خزان منخفض إلى خزان مرتفع ، ويتم إرجاع المياه الموجودة في الخزان المرتفع أثناء الحمل الأقصى لشبكة الطاقة إلى الخزان السفلي لتشغيل مولد التوربينات بالنسبة لتوليد الطاقة ، تبلغ الكفاءة عموماً حوالي 75٪ ، مع إمكانية التعديل اليومية .

العيوب: صعوبة اختيار الموقع واعتماده على التضاريس ؛ دورة استثمار طويلة وخسائر عالية ، بما في ذلك خسارة التخزين بالضخ + خسارة الخط ؛ في هذه المرحلة ، يتم تقييدها أيضاً بسياسة أسعار الكهرباء.

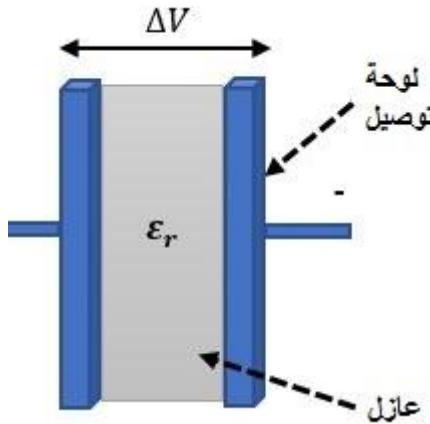
- تخزين طاقة الهواء المضغوط (CAES): تخزين طاقة الهواء المضغوط هو استخدام فائض الكهرباء عندما يكون حمل نظام الطاقة منخفضاً. يدفع المحرك الكهربائي ضاغط الهواء لضغط الهواء في الكهف المغلق ذي السعة الكبيرة تحت الأرض كغرفة تخزين الهواء. عندما يكون توليد الطاقة غير كافٍ ، يتم خلط الهواء المضغوط وحرقه بالزيت أو الغاز الطبيعي من خلال مبادل حراري ، ثم إدخاله في التوربينات الغازية لتوليد الطاقة.

العيوب الرئيسي هو الكفاءة المنخفضة. والسبب هو أن درجة حرارة الهواء سترتفع عند ضغطه ، وتختفي درجة الحرارة عندما يتم إطلاق الهواء وتمدده. في عملية ضغط الهواء ، يتم فقدان جزء من الطاقة على شكل حرارة ، والتي يجب إعادة تسخينها قبل التمدد. عادةً ما يستخدم الغاز الطبيعي كمصدر حرارة لتسخين الهواء ، مما يؤدي إلى انخفاض كفاءة تخزين الطاقة. تمثل أوجه القصور الأخرى التي يمكن تصورها في الحاجة إلى أجهزة تخزين الغاز على نطاق واسع ، وظروف جيولوجية معينة ، والاعتماد على حرق الوقود الأحفوري [1].

2-2 تخزين الطاقة الكهربائية

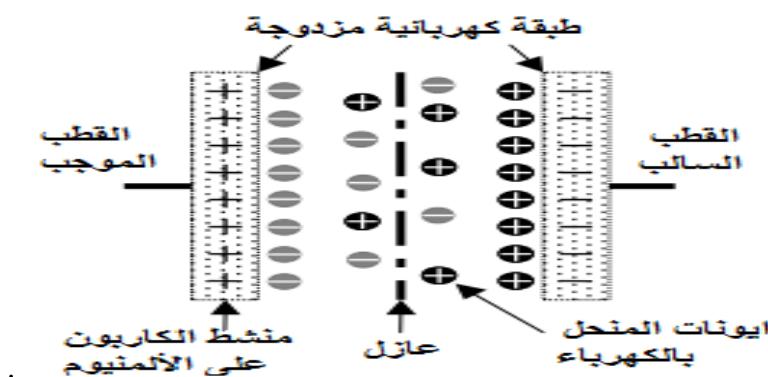
تسمح بعض الأنظمة بخزين الطاقة مباشرةً في شكل كهربائي. وهي أساس المكثفات ، المكبات الفائقة والمكونات الكهربائية المكونة من لوحين موصلين يخزنان الشحنات الكهربائية المعاكسة. وهم قادرون على توفير طاقة عالية لفترة قصيرة جداً. على عكس البطاريات الكهروكيميائية ، يمكن تفريغها في وقت من الثانية أو أقل مردة يتراوح بين 80٪ أو أكثر من 90٪. ومع ذلك ، فإن هذه الأجهزة لا تخزن كميات كبيرة من الطاقة [3].

- المكثف : المكثف أحد مكونات التخزين الكهروستاتيكي (الشكل 1-1). وهو مكون الكتروني أولى، يتكون من لوحين موصلين تسمى الأقطاب الكهربائية ويفصل بينهما عازل قابل للاستقطاب. تمثل الخاصية الرئيسية لها في القدرة على تخزين الشحنات الكهربائية الملصقة على تجهيزاتها. تناسب القيمة المطلقة لهذه الرسوم مع القيمة المطلقة للجهد المطبق عليه [2].



الشكل 1-1: بنية المكثف [2].

- تخزين الطاقة بالمكثف الفائق : يتم استخدام هيكل الطبقة المزدوجة الكهربائي المكون من قطب كهربائي مسامي ومنحل بالكهرباء للحصول على سعة كبيرة. على عكس البطاريات التي تستخدم تفاعلات كيميائية ، فإن عملية الشحن والتفرغ للمكثفات الفائقة هي دائمًا عملية فизيائية. وقت شحن قصير وعمر خدمة طويل وخصائص درجة حرارة جيدة وتوفير الطاقة وحماية البيئة. لا يوجد شيء معقد بشأن المكثفات الفائقة ، أي شحن المكثف ، والباقي يتعلق بالمواد. الاتجاه البحثي الحالي هو ما إذا كان بإمكانه تحقيق مساحة صغيرة وسعة أكبر. لا يزال تطوير المكثفات الفائقة سريعاً جداً ، وفي الوقت الحالي ، تحظى المكثفات الفائقة الجديدة القائمة على مواد الحرفين بشعبية كبيرة [3].



الشكل 1-2 : بنية المكثف الفائق [3].

- تخزين الطاقة فائقة التوصيل (SMES) : جهاز يستخدم خاصية المقاومة الصفرية للموصلات الفائقة لتخزين الطاقة الكهربائية. يشتمل نظام تخزين الطاقة فائقة التوصيل تقريرياً على أربعة أجزاء: ملفات فائقة التوصيل

وأنظمة التبريد وأنظمة تنظيم الطاقة وأنظمة المراقبة. يعد تطوير تقنية المواد فائقة التوصيل الأولوية القصوى لтехнологيا تخزين الطاقة فائقة التوصيل . يمكن تقسيم المواد فائقة التوصيل تقريرًا إلى مواد فائقة التوصيل بدرجة حرارة منخفضة ، ومواد فائقة التوصيل بدرجة حرارة عالية ، ومواد فائقة التوصيل بدرجة حرارة الغرفة. أدت التكلفة العالية لتخزين الطاقة فائقة التوصيل (المواد وأنظمة التبريد ذات درجة الحرارة المنخفضة) إلى تقييد تطبيقه بشكل كبير. الموثوقية والقيود الاقتصادية ، لا تزال التطبيقات التجارية بعيدة [2].

1-3 تخزين الطاقة الكيميائية

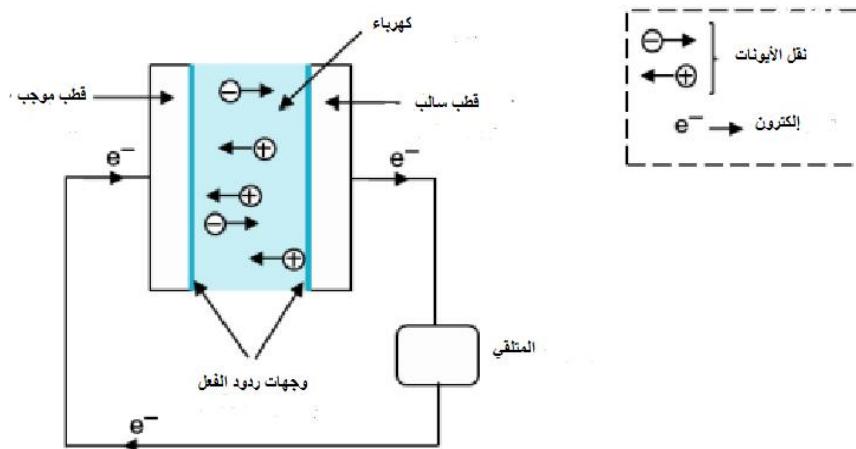
تخزين الطاقة عن طريق التفاعل الكيميائي هي عملية يتم خلالها ثبيت جزيئات الامتصاص بواسطة رابطة تساهمية على سطح المادة الماصة مما يجعل الآلة غير قابلة للانعكاس. على سبيل المثال استخدام الطاقة الشمسية عن طريق تفاعل كيميائي ماص للحرارة. يتم تخزين الحرارة داخل النظام وتحريرها باستخدام محفز. التفاعلات الكيميائية لها كثافة طاقة مثيرة للاهتمام ويمكن استخدامها في تطبيقات البناء. ومع ذلك ، فإن الجزء الماcus للحرارة غالبا ما يكون معقدا للغاية وقد يحتاج إلى تفريغه في بيئة صناعية [7].

1-4 تخزين الطاقة الكهروكيميائية

يتضمن هذا التخزين استخدام مختلف الأجهزة التي تحول الطاقة الكيميائية إلى كهرباء.

- البطاريات : هو جهاز أكثر شيوعا يحول الطاقة الكيميائية المخزنة إلى طاقة كهربائية. ويوجد نوعان من البطاريات: البطاريات الغير قابلة لإعادة الشحن، وبطاريات يمكن إعادة شحنها واستخدامها بشكل متكرر.

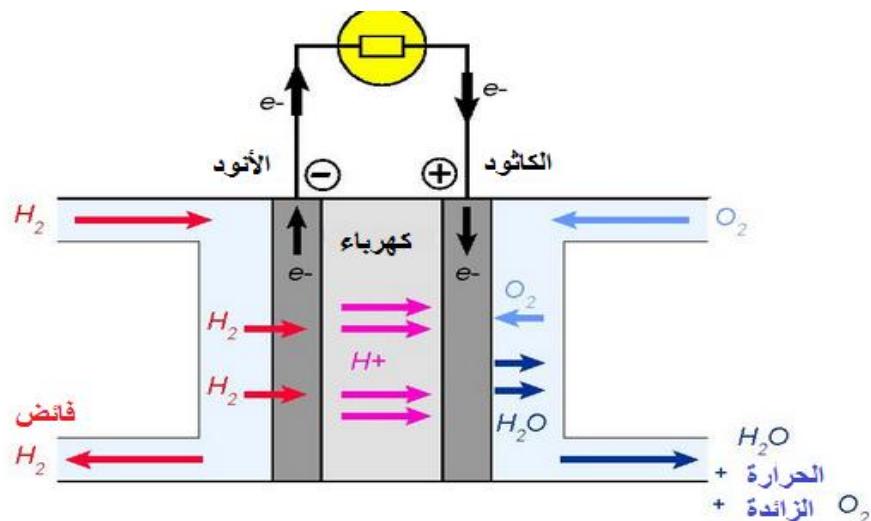
تشكون البطارية من مجموعة في سلسلة و / او بالتوالي مع مركب كهر وكميائي. يتكون كل مجمع من قطبين، أحدهما موجب والآخر سالب مفصل بواسطة مادة موصلة (الشكل 1-3). المجمع مولد كهر وكميائي قادر على إمداد الطاقة الكهربائية من الطاقة المخزنة كيميائيا. هذا التحويل للطاقة قابل للعكس بالنسبة للمجمع ، على عكس البطارية [3].



الشكل 1-3 : مبدأ المركب الكهروكيميائي [3].

تشغل المجمعات الكهروكيميائية ولا سيما بطاريات الليثيوم أيون سوق الهواتف المحمولة بالكامل تقريباً. كما أنها تستخدم في التطبيقات عالية الطاقة وفي الفضاء مثل أقمار غاليليو. تستخدم بطاريات Ni-Cd أيضاً في التطبيقات التي تتطلب طاقة عالية ويمكن أن تعمل في درجات حرارة عالية نسبياً. أما بالنسبة لبطارية الرصاص، فان سوقها يمثل قضية صناعية مهمة. يتعلق الأمر بطارية التشغيل بالإضافة إلى معظم البطاريات الثابتة. اعتماداً على طبيعة الأقطاب الكهربائية والالكترويليت، توجد تقنيات مختلفة للهراكم الكهروكيميائية، وأكثرها استخداماً هي: ليثيوم أيون و حمض الرصاص والنحاس ونيكل ونيكل الكادميوم [3].

- **خلية الوقود** : جهاز يحول الطاقة الكيميائية إلى كهرباء من خلال تفاعل كيميائي. توجد عدة أنواع مختلفة من خلايا الوقود مجهزة بهبط، أنود والكترويليت. مبدأها هو عكس التحليل الكهربائي. ينتج التفاعل الكيميائي نتيجة الأكسدة وتلقي الغازات كهرباء، وماء و الحرارة. تنتج خلية الوقود جهداً كهربائياً يبلغ حوالي 0.7 إلى 0.8 فولط، اعتماداً على الشحن (كثافة التيار) ويولد حرارة. تراوح درجة حرارة التشغيل من 60 إلى 200 درجة مئوية حسب الموذج. الماء يتم تنفيذه بشكل عام على شكل بخار مع فائض من الأكسجين [3].



الشكل 1-4 : مخطط خلية الوقود [3].

1-2-5 تخزين الطاقة الحرارية

يقوم على عدد من التقنيات التي تخزن الطاقة الحرارية في مستودعات تخزين الطاقة ليتم استخدامها لاحقاً. وتستخدم تلك الطاقة المخزنة في معادلة الطلب على الطاقة بين النهار والليل. ويمكن حفظ المخزون الحراري عند درجة حرارة أعلى (أُسخن) أو أقل (أَبْرَد) من درجة الحرارة المحيطة. ومن استخدامات الطاقة المخزنة اليوم إنتاج الثلج أو الماء المبرد أو المحاليل سهلة الانصهار في الليل أو الماء الساخن الذي يستخدم لاحقاً في البيئات الباردة أو الساخنة أثناء النهار.

تُجمع الطاقة الحرارية في الغالب من مجمع الطاقة الشمسيّة الحرارية النشط أو في الأغلب في ترسانات الحرارة والطاقة ثم تنقل إلى مستودعات معزولة لتسخدم لاحقاً في التطبيقات المختلفة، مثل أجهزة التدفئة أو التدفئة المنزلية أو في سخانات تدفئة المياه.

يتم تخزين الطاقة الحرارية في الأشكال الثلاثة التالية :

- التخزين عن طريق الحرارة المحسوسة .
- التخزين عن طريق الحرارة الكامنة .
- التخزين عن طريق الكيمياء الحرارية .



الشكل 1-5 : مختلف الطرق الممكنة لتخزين الطاقة الحرارية [5].

1-2-5-1 تخزين عن طريق الحرارة المحسوسة : في وحدة تخزين الحرارة المحسوسة، يتم تخزين الطاقة الحرارية عن طريق تغيير درجة حرارة وسط التخزين ، والذي قد يكون سائلا او صلبا .

تعتمد كمية الطاقة المخزنة في الوحدة على السعة الحرارية للسائل وتغيرات درجة الحرارة وكمية مادة التخزين وبالتالي، من الأفضل أن يكون لوسط التخزين سعة حرارية عالية واستقرار طويل الأمد في ظل التدوير الحراري، والتواافق مع وعاء الاحتواء والاهم من ذلك التكلفة منخفضة. يمكن تصنيف التخزين الحراري المحسوس على أساس وسيط تخزين الحرارة كتخزين الوسائط السائلة مثل الماء والسوائل القائمة على الزيت والملح المصهور وما إلى ذلك، او التخزين الصلب والمتوسط مثل الأحجار والمعادن وغيرها [6].

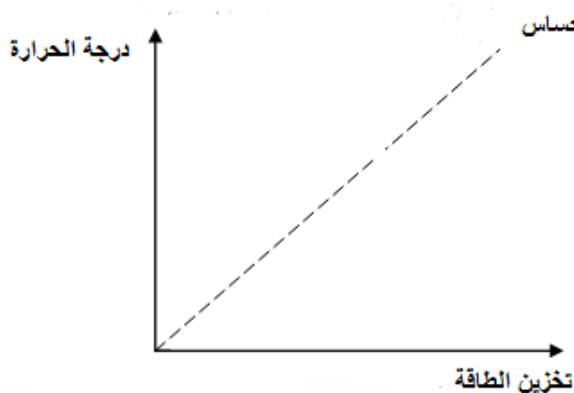
$$Q = \int_{T_i}^{T_f} m C_p dT$$

Q : كمية الطاقة المخزنة.

m : كتلة مادة التخزين (kg).

C_p : الحرارة النوعية لمادة التخزين.

dT : التغيير اللامتناهي في درجة الحرارة أثناء عملية التخزين.



الشكل 1-6: تخزين الطاقة الحرارية عن طريق الحرارة المحسوسة [7].

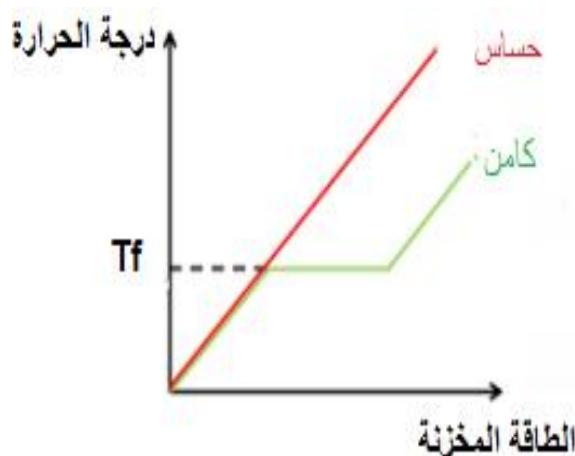
١-٢-٥-٢ التخزين عن طريق الحرارة الكامنة : يتضمن التخزين الحراري الكامن مادة التسخين حتى تغير طورها بمعنى التحول من المرحلة الصلبة إلى المرحلة السائلة او من الطور السائل إلى الطور الغازي او حتى انتقالها إلى الحالة الصلبة . عندما تصل المادة إلى درجة حرارة تغير طورها فإنها تتصرف كمية من الحرارة لتحقيق التحول المعروف باسم الحرارة الكامنة للانصهار او التبخر . على العكس من ذلك ، عندما يتم تبريد المادة السائلة او الغازية ، فإنها تعود إلى الحالة الصلبة او السائلة عن طريق استعادة الحرارة الكامنة . تعتمد كمية الحرارة المخزنة او المنبعثة على كثافة المادة وفقاً للمعادلة :

$$Q = m \times L_f$$

Q : كمية الطاقة المخزنة.

m : كثافة المادة المخزنة (kg).

L_f : الحرارة الكامنة لتغيير حالة المادة (J/kg).



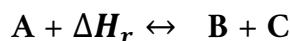
الشكل 1-7 : التخزين عن طريق الحرارة المحسوسة والكامنة.

3-5-3 التخزين عن طريق الكيمياء الحرارية

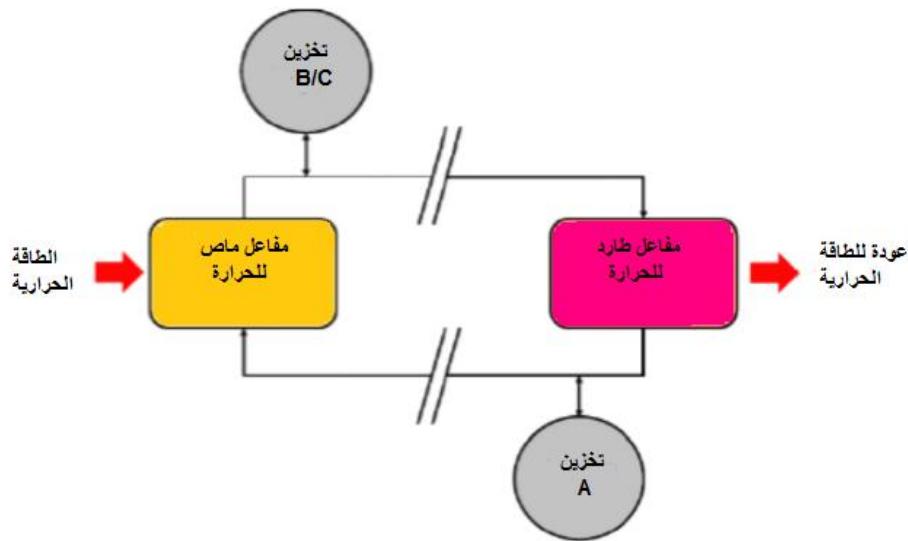
يشمل مصطلح التخزين الكيميائي الحراري ظاهرتين : الامتصاص و تفاعل كيميائي. تخزين الحرارة عن طريق الامتصاص مهم في درجات الحرارة المنخفضة ($T=80^{\circ}\text{C}$) بينما بالنسبة للتطبيقات الشمسية المركبة ($T=200 - 1000^{\circ}\text{C}$) يكون التفاعل الكيميائي هو الأنساب [8]. يستغل المسار الكيميائي الحراري انعكاس التفاعلات الكيميائية لتخزين الطاقة. بشكل عام، تكون التفاعلات من الشكل :



ردود الفعل الأكثر شيوعا تكون من الشكل التالي:



بالنسبة لهذا النوع من التخزين، يجب أن يكون التفاعل قابلا للانعكاس كليا حتى لا تفقد العملية قدرتها التخزينية أثناء الدورات. يبين (الشكل 1-8) مخطط تخزين الحرارة الكيميائية [8].



الشكل 1-8 : رسم تخطيطي لنظام تخزين الحراري كيميائي [8].

أثناء مرحلة الشحن، تسمح الطاقة الحرارية بتنفيذ التفاعل الماصل للحرارة. يتم فصل وتخزين نواتج هذه التفاعلات (B و C). عندما نريد استعادة الطاقة الحرارية، المنتجات المخزنة (B و C) تقوم بإجراء تفاعل عكسي طارد للحرارة وبالتالي استعادة الحرارة وتجديد المنتج الأولي (A) [9].

المراجع

- [1]<https://www.connaissancesdesenergies.org/fiche-pedagogique/stockage-de-l-energie>.
- [2] E. korsaga, Z koalage,D. Bonkoungou, F. Zougmoré, Comparaison et détermination des dispositifs de stockage appropriés pour un système photovoltaïque autonome en zone sahélienne, Journal International de Technologie, de l'innovation, de la physique, de l'Energie et de l'Environnement,4(1),2018.
- [3] R . Ghedbane , « stockage de l'énergie thermique par des matériaux a changement de phase (MCP) liquide-solide», Mémoire du Master, Université Mohamed seddik Ben Yahia-jijel,2019.
- [4] DJ. Bourgueba , I. Bekkouche , « Simulation numérique du stockage par chaleur latente», Mémoire du Master, Université Abou Belkaid-Tlemcen, 2014.
- [5] M. Boutaoui, « Simulation numérique du stockage thermique par chaleur latente dans une capsule Elliptique », Mémoire du Master: Thermique et Combustion, Université M'Hamed Bougara-Boumerdes, 2016.
- [6]A.Benhamza et B.settou , « Simulation numérique d'un capteur solaire plan utilisant des matériaux a changement de phase », Mémoire du Master académique Génie Energétique , Université KASDI Merbah d'Ouargla,2016.
- [7] A. SOUPART-CARON, « Stockage de chaleur dans les Matériaux a changement de phase », these du doctoral: Mécanique des fluides, 2006.
- [8] M. Daffass , «Intégration des matériaux a changement de phase (MCPs) comme système de stockage de le chaleur», Mémoire du Master, Université Mohamed seddik Ben Yahia-jijel, 2021
- [9] R. Hachana , «Réalisation et expérimentation d'un enceinte de stockage de la chaleur dans lesable », Mémoire du Master, Université MoHamed KHider de Biskra ,2020.

الفصل الثاني

عموميات حول مواد تغير الطور

(MCP)

1-2 مقدمة

تعد التحولات الطورية هي أساس للعديد من العلوم الطبيعية كالفيزياء والكيمياء وعلم الأحياء و تعتبر المنطلق الرئيسي للعلوم الهندسية كالمهندسة الكهربائية والميكانيكية وهندسة المواد .

فقد وجدت هذه التحولات الطورية بشكل كبير في الطبيعة أين استغلها الإنسان في تطوير وتحسين مواد قديمة. سمح التوسع في دراسة التحولات الطورية إلى حل العديد من المسائل التقنية التي كانت تواجهه التكنولوجيا، ومنذ هذا الباب مفتوحاً مادامت إرادة تحسين الحياة على أساس التقدم العلمي موجودة . في هذا الفصل سوف نتطرق إلى مفاهيم عامة حول مواد تغير الطور(MCP) ، نقوم بتعريفها وذكر خصائصها وتصنيفاتها، بالإضافة إلى أشكالها وأهم تطبيقاتها في مجالات حياتنا .

2-2 التغيرات الفيزيائية للمادة**2-2-1 الانصهار و الغليان**

عندما تسخن المادة المتجمدة ترتفع درجة حرارتها و تكتسب جزيئاتها طاقة حركية إلى أن تبلغ نقطة انصهار، عندئذ يكون لدى الجزيئات ما يكفي من الطاقة للانفصال عن بعضها فينصر الجامد ويصبح سائلاً. في حالة الغليان يؤدي المزيد من الحرارة إلى ارتفاع درجة حرارة السائل إلى أن يبلغ نقطة الغليان، فتبعد الجزيئات عن بعضها البعض تماماً و يتتحول السائل إلى حالة غازية.

2-2-2 التسامي و التصلب

يعرف التسامي على أنه تحول حالة المادة من الحالة المصلبة إلى الحالة الغازية مباشرة دون المرور بالحالة السائلة [1].

التصلب هو عكس التسامي.

3-2-2 التكتف

عندما يبرد الغاز بدرجة كافية يكتشف ويتحول إلى حالة سائلة، والسبب في ذلك يعود إلى فقدان جزيئاته شيئاً من طاقته الداخلية، ولا تعود قادرة على البقاء بعيدة من بعضها البعض فتؤدي إلى تكتفها عندما تلقي أسطحة باردة.

2-2-4 التجمد

عند تبريد أي سائل بدرجة كافية تفقد جزيئاته مزيداً من الطاقة وتنغلب قوى التجاذب فيما بينها على حركاتها العشوائية، وغالباً تحول المادة الصلبة إلى بلورات. يمكن القول أن التجمد هو تحول المادة من الحالة السائلة إلى الحالة الصلبة.

2-3 تعريف مواد تغير الطور

مادة تغير الطور (MCP) هي مادة ذات حرارة انصهار مرتفعة جداً، هذه المادة قادرة على تخزين الحرارة أثناء الذوبان وتحريرها أثناء التصلب.

عندما يحدث تغير الطور للمادة تم عملية امتصاص أو تحرير الحرارة. مما يؤدي إلى فقدان أو تخزين كمية كبيرة من الطاقة في شكل حرارة. والتي تم بشكل عام في درجة حرارة ثابتة أو ضمن مجال لدرجات الحرارة، هذا النوع من الطاقة يعرف بالطاقة الحرارية الكامنة أين يتم التركيز في هذه الأنظمة على الانتقال "صلب - سائل"؛ لأن انتقال الطور "الغاز - سائل" أو "الغاز - الصلب" محدود في أنظمة تخزين الطاقة الحرارية بسبب التغيرات الكبيرة في الحجم عند تغير الطور[2].

يلخص الجدول التالي مزايا وعيوب أنواع تغير الطور.

الجدول 2-1 : المزايا والعيوب لتغير الطور.

سلبيات	مزايا	تغير الطور
تغير كبير في الحجم .	قيمة حرارة الكامنة كبيرة.	الغاز / السائل
الحرارة الكامنة متوسطة.	التغير في الحجم منخفض.	السائل / الصلبة
تغير كبير في الحجم.	قيمة حرارة الكامنة كبيرة.	صلب / غاز

2-4 خصائص ومعايير اختيار مواد تغير الطور

يتم اختيار مواد تغير الطور الأفضل للتطبيقات العملية على أساس مجموعة من الخصائص ومعايير حيث تعتبر الخصائص الاقتصادية والخصائص الفيزيائية والكيميائية والحرارية من أهم المعايير الواجبأخذها بعين الاعتبار[3].

2-4-1 الخصائص الفيزيائية

تشتمل معايير الاختيار المثلثى لهذه المواد على عدة خصائص فيزيائية كأن تكون ذات كثافة عالية وهذا لتقليل من حاوية التخزين ، وأن تتمتع بالقليل من التبريد الفائق أثناء التجمد حيث تعد هذه الظاهرة من أخطر المسائل المتعلقة بمواد تغير الطور، والتي تتجلى في خفض درجة حرارة المواد إلى ما دون درجة حرارة تغير الطور المتعلقة قبل أن تبدأ المادة في التصلب وتحرير الحرارة[4].

2-4-2 الخصائص الكيميائية

بالنسبة للخصائص الكيميائية، المواد المختارة يجب أن تكون غير سامة وغير قابل للاشتعال وعدم قابليتها لتفاعل مع مواد أخرى لتجنب مشاكل التآكل. بالإضافة إلى ذلك يجب أن تكون مستقرة كيميائياً لتجنب التدهور. حيث أنه غالباً ما يضمن الاستقرار الكيميائي للمواد عمراً طويلاً[4].

2-4-3 الخصائص الحرارية

يجب أن تحتوي المواد المختارة على نطاق لدرجة حرارة تغيير الطور مناسب لنطاق التطبيقات المطلوبة لضمان تخزين وإطلاق الحرارة في نطاق حرارة ثابت. هذا النطاق عادة ما يكون ضيقاً جداً، حيث تتراوح درجة حرارة تغير المادة بين 5°C [5]. وكل مادة لديها نقطة انصهار محددة كما أن لها قيم فريدة للتوصيل الحراري في الحالات الصلبة والسائلة. وتعد المواد ذات الحرارة الكامنة العالية ، والحرارة النوعية العالية ، والموصولة الحرارية المرتفعة في المراحل الصلبة والسائلة هي الأكثر تفضيلاً لسرعة تغيير الطور ولتوفير تخزين حراري إضافي معقول يمكن أن يكون ذو قيمة كبيرة[6].

2-4-4 الخصائص الاقتصادية

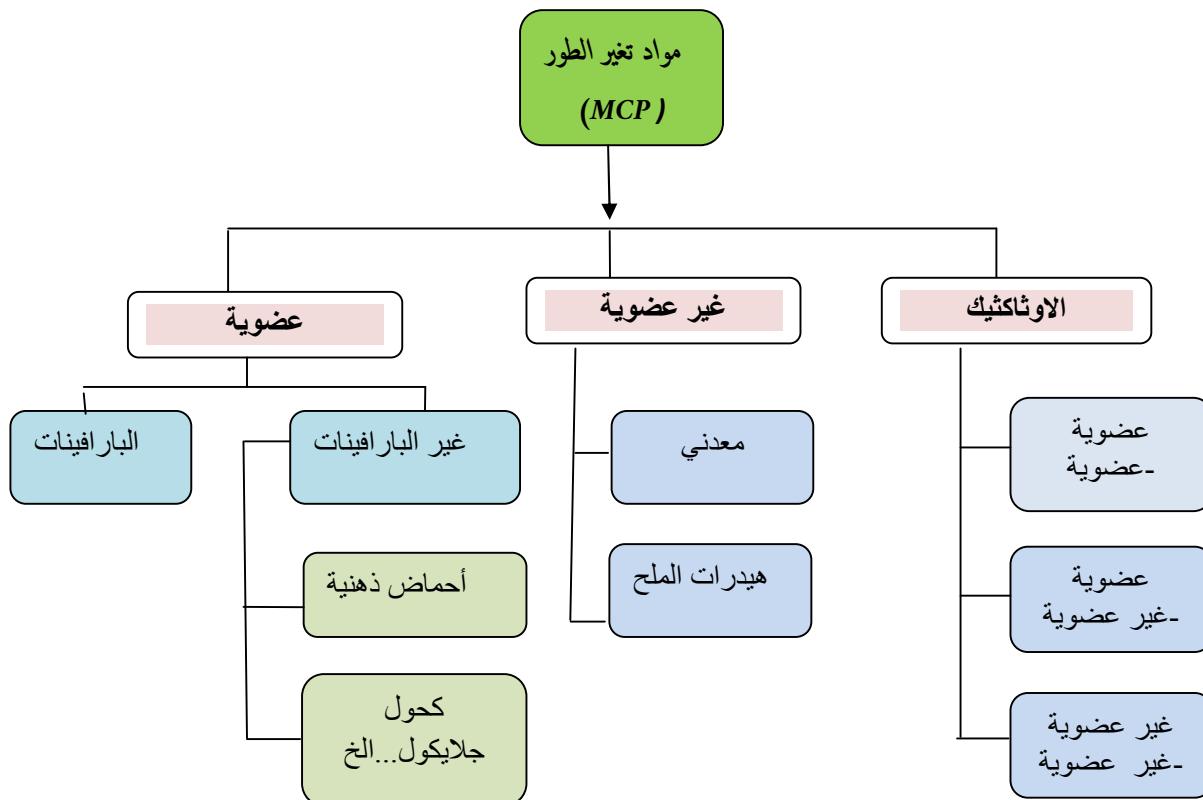
بحانب تلبية جميع الخصائص السابقة، يجب أن تكون جميع المواد المختارة متوفرة و منخفضة التكاليف بالإضافة إلى كونها محافظة على البيئة.

2-5 تصنیفات مواد تغير الطور

تصنف مواد تغير الطور (MCP) إلى ثلاثة عائلات رئيسية :

- المواد العضوية.
- المواد غير عضوية.

- مواد سهلة الانصهار (اليوتيكيك).
- كما يمكن تقسيم كل من هذه العائلات إلى مجموعات فرعية . تم توضيح ذلك في الشكل (1-2).



الشكل 1-2 : تصنيف مواد تغير الطور [7].

1-5-2 المواد العضوية

المواد العضوية لها درجة حرارة أو نطاق درجة حرارة بين 0 إلى 150 درجة مئوية. وهي أكثر استخداماً يعتمد أساساً على البارافين¹ (C_nH_{2n+2}) والأحماض الدهنية ($cH(cH)H_2cooH$). تشتمل هذه المواد على اندماج متطابق مما يعني أنها تذوب بشكل متكرر والتجميد يتم بدون فصل للطوار و ما يترب عن ذلك تدهور في الحرارة الكامنة للانصهار [8]. المواد العضوية لديها عيوب معينة ، مقارنة بمزايا MCP غير العضوية: لديهم موصلية أقل في الحالة الصلبة وفي الحالة السائلة، لديهم انخفاض في الحرارة الكامنة للانصهار فهي قابلة للاشتعال. ومع ذلك ، نجد لها مزايا فهي متوفرة في نطاق واسع ومتواقة مع مواد البناء التقليدية ، مستقرة كيميائياً. وقابلة لإعادة التدوير [9].

¹ البارافينات عبارة عن مواد عضوية تتكون من خليط من الهيدروكربونات مشبعة وهي في حد ذاتها ألكانات ذات صيغة عامة .





الشكل 2-2 : البارافينات الخام، المسحوقة أو المغلفة [7].

2-5-2 المواد غير عضوية

تشمل عائلة مادة تغير الطور غير العضوية على مجموعتين هما أملاح الهيدرات والمعادن وسبائكها، [8] درجات حرارة انصهارها بين 100 - درجة مئوية و 1000 + درجة مئوية. لها العديد من المزايا : تتميز بالحرارة الكامنة العالية والموصلية الحرارية العالية غير القابلة للاشتعال ولديها تكلفة معقولة. تستخدم هذه المواد بشكل أساسي في تطبيقات الطاقة الشمسية ذات الحرارة المرتفعة. و من بين مساوئها هي أنها قابلة للتآكل مما يؤدي إلى صعوبة صيانتها [9].

2-5-3 مواد سهلة الانصهار (اليوتكتيك)

هو خليط من عنصرین أو أكثر، عند أدنى نقطة تجمد يتصلب الخليط في وقت واحد تعرف بنقطة اليوتكتيك، يذوب كل منهما و يتجمد بشكل متطابق مشكلا خليطا من البلورات المكونة أثناء عملية التبلور.

اليوتكتيك يتجمد و يذوب دائمًا تقريرًا با دون فصل لأنّه يتجمد إلى منتج حميم من البلورات، مما يترك فرصة ضئيلة لفصل المكونات. عند ذوبان كلا المكونين يتم تسليمهما في وقت واحد مرة أخرى مع استبعاد الفصل [10].

2-6 الفرق بين المواد العضوية والمواد غير العضوية

تعتبر المواد غير عضوية و العضوية أساسية لعلم الكيمياء، حيث تعد الكائنات الحية مصدراً للمواد العضوية ويعتبر الفرق الأساسي ما بين المواد غير عضوية وعضوية هي احتواها على الكربون، وروابط سلسل الكربون، وتحديداً روابط الكربون هيدروجين. الكربون ليس شرطاً أساسياً لاعتبار المواد عضوية، إذ توجد

بعض المواد التي تحتوي في تركيبها على عنصر الكربون، إلا أنها تُعتبر غير عضوية ومنها كلوريد الصوديوم، الماس وثاني أكسيد الكربون.²

2-7 المقارنة بين مختلف أنواع الـ MCP

قدم العديد من المؤلفين [11,12,13] مقارنة بين المزايا والعيوب لختلف مواد تغير الطور العضوية وغير العضوية وسهلة الانصهار الجدول (2-2).

الجدول 2-2 : يمثل إيجابيات وسلبيات كل فئة من MCP.

المواد	الإيجابيات	السلبيات
المواد العضوية	<ul style="list-style-type: none"> ▪ متوفرة في ظاق در جات حرارة واسعة. ▪ متوافق مع مواد البناء التقليدية. ▪ مستقر كيميائيا. ▪ طاقة اندماج عالية. ▪ آمن وغير مستجيب. ▪ قابلة لإعادة التدوير. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ الموصلية الحرارية منخفضة في الحالة المصلبة. ومطلوب نقل حرارة كبير أثناء دورة التجميد. ▪ قيمة الحرارة الكامنة الجوية ضعيفة . ▪ قابلة للاشتعال (يتطلب حاویات مناسبة). ▪ يتطلب حجم كبير.
المواد العضوية	<ul style="list-style-type: none"> ▪ حرارة كامنة عالية. ▪ تكلفة منخفضة . ▪ نقطة الانصهار محددة. ▪ غير قابل للاشتعال. ▪ الموصلية الحرارية عالية. ▪ الحرارة النوعية مرتفعة. ▪ متوفرة. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ظاهرة التبريد الفائق. ▪ التغير السريع في الحجم . ▪ تأكل لمعظم المعادن. ▪ صعوبة الفصل.

²<https://mawdoo3.com>

<ul style="list-style-type: none"> ■ القليل من البيانات المتابعة عن خصائص هذه المواد ■ قليل الا استخدام في التطبيقات الصناعية 	<ul style="list-style-type: none"> ■ نقطة انصهار محددة ■ حرارة كامنة أعلى بقليل من حرارة المركبات العضوية الندية. 	مواد سهلة الانصهار
---	---	---------------------------

2-8 خصائص مواد تغير الطور

تم جمع خصائص بعض مواد تغير الطور (MCP) في الجدول التالي :

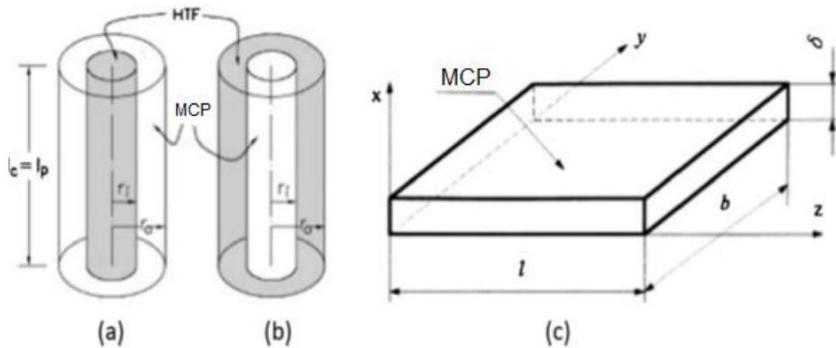
الجدول 2-3 : يمثل الخصائص الفيزيائية الحرارية لبعض مواد تغير الطور (MCP). [14]

المحظى الحراري (kJ/kg) للانصهار	حرارة (الانصهار) °C)	المادة	مواد
333.6	0	الماء	العضوية
140	19	Stéarate de butyle	
143	21	(caprique-laurique) حمض	
231	18.5	KF.4H ₂ O	العضوية
125.9	25.8	Mn(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	
251	32	Na ₂ SO ₄ .10H ₂ O	
127	25	66,6%CaCL ₂ .6H ₂ O+33,3%MgCl ₂ O.6H ₂ O	اليوتكتيك
188	26.8	48%CaCL ₂ +4,3%NaCl+47,3%H ₂ O	
136	30	47%Ca(NO ₃) ₂ .4H ₂ O+53%Mg(NO ₃) ₂ 6H ₂ O	

2-9 أشكال مواد متغيرة الطور

يجب أن يكون لديك تبادل حراري فعال بين MCP وسائل نقل الحرارة من أجل الحصول على كفاءة تخزين كبيرة للطاقة، لذلك عادة ما يتم احتواء MCP في منطقة نقل الحرارة الكبيرة أين يكون التبادل الحراري عالي بين MCP وسائل نقل الحرارة.

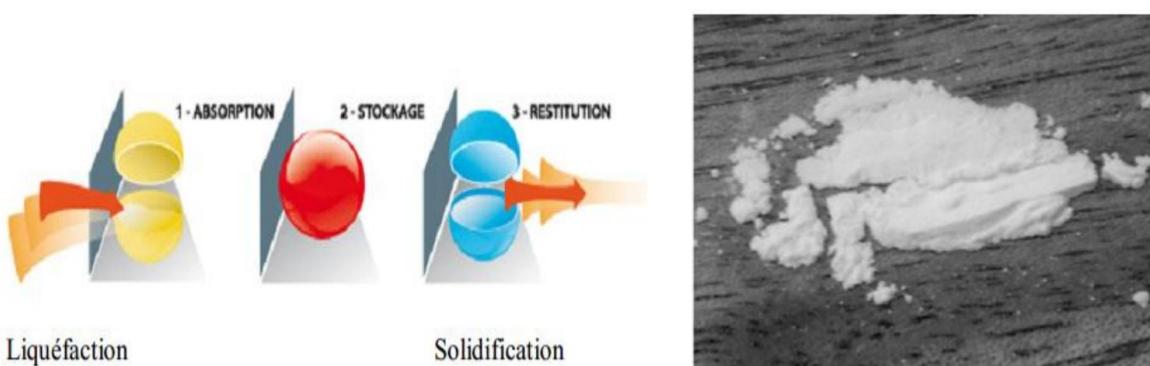
يمثل الشكل (2-3) بعض الأمثلة عن تغليف مواد تغير الطور. (a) غلاف حاویة MCP مع سائل نقل الحرارة في أنبوب. (b) وعاء أسطواني يحتوي على مادة تغير الطور مع سائل نقل الحرارة يتتدفق حوله. (c) وعاء مستطيل الشكل من لوحة MCP ، يمكن لسائل التدفق حوله و نقل الحرارة [15].



الشكل 2-3 : حاويات مواد تغير الطور.

1-9-2 التغليف الجزيئي Micro encapsulation

يتضمن التغليف الجزيئي لـ MCP تعبئة مواد MCP في كبسولات ذات أشكال هندسية مختلفة (تغليف دقيق) : التغليف الدقيق هو جهاز يتم فيه وضع MCP في أغلفة صغيرة الحجم تتراوح من $1\text{ }\mu\text{m}$ إلى ما يقارب حوالي $300\text{ }\mu\text{m}$. ميزة MCP المغلفة بالكبسولة هي أنها توفر سطح تبادل طاقوي كبير كما هو موضح في الشكل (4-2). (5-2).



الشكل 2-4 : صورة لمسحوق MCP مغلف بدقة.

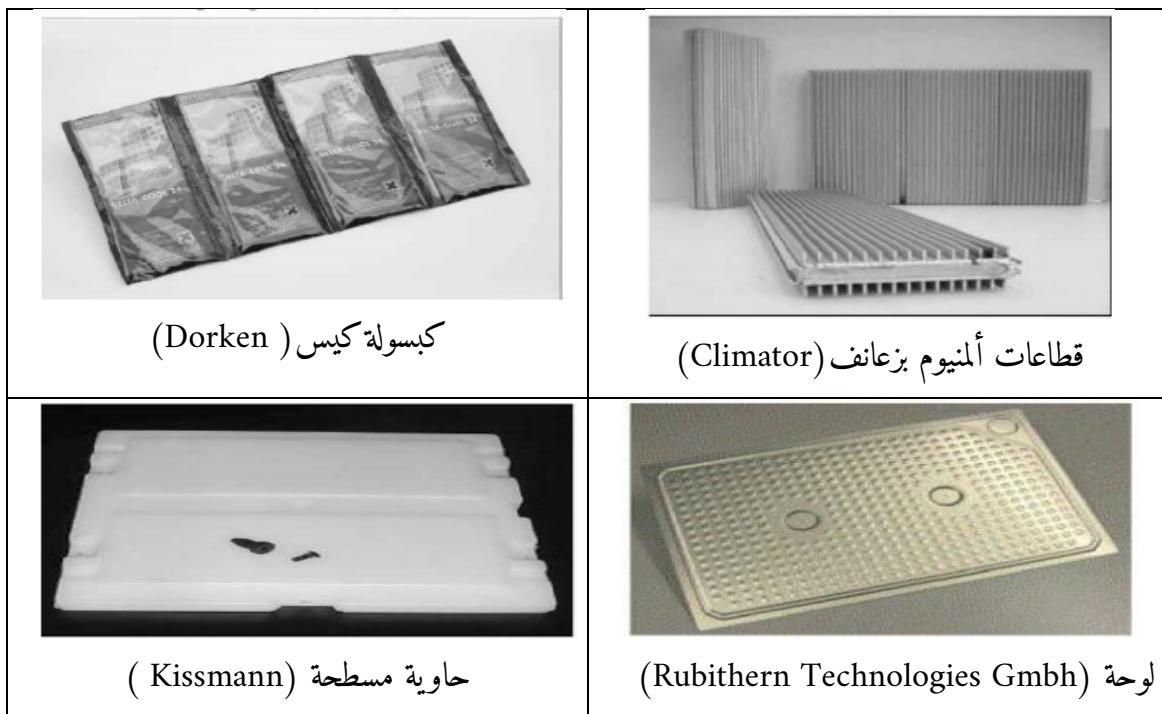
2-9-2 التغليف الكلي Macro encapsulation

كبسولات ذات أشكال هندسية مختلفة (تغليف كبير) : يعني التغليف الكلي ملء MCP في حاوية ما كروسكوبية ذات أحجام كبيرة (بعض المليترات أو اللترات). غالباً ما تكون عبوات وأكياس بلاستيكية أو معدنية، كما هو موضح في بعض الأمثلة في الشكل (6-2)، (7-2). الميزة الأساسية في استعمال هذا النوع من التغليف هو زيادة مساحة التبادل الحراري .



الشكل 2-6 : كبسولات ذات أشكال مختلفة: متوازي خطى ، كروية ، أسطواني [17] .

 كبسولة كرة الفولاذ المقاوم للصدأ	 كبسولة اسطوانية SERI U.K.M
 كبسولة شريطية	 كبسولة كروية



الشكل 2-7 : صور فوتوغرافية للتغليف الكلي ل مختلف الأشكال الهندسية [18].

10-2 تطبيقات MCP

2-10-1 نقل المنتجات الغذائية

في الصناعات الغذائية تُستخدم مواد تغير الطور في الحد قدر الإمكان من التغيرات في درجات الحرارة التي تتعرض لها الأطعمة ، وبالتالي الحفاظ عليها وعلى مكوناتها و عدم تلفها. أغلبيةها تكون في شكل أكياس بلاستيكية صغيرة تحتوي على المادة المراد حفظها [19].



الشكل 2-8 : تطبيقات نقل الأغذية [20].

2-10-2 التطبيقات الطبية Application médicales

من بين التطبيقات الرئيسية في القطاع الطبي لمواد تغير الطور نجد مثلاً استخدامها في الحفاظ على الدم والأعضاء كالمراقبة طبية أخرى كضمادات ساخنة أو باردة تستعمل لعلاج الألم الموضعي.

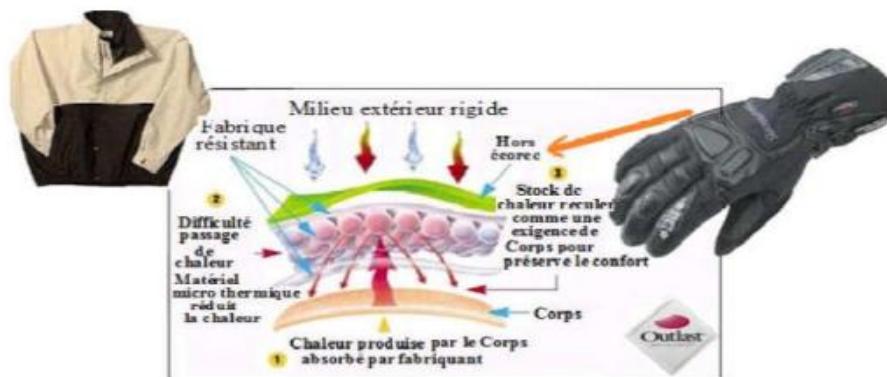


الشكل 2-9 : أوعية بها MCP تحتوي على الدم والأعضاء [20].

2-10-3 صناعة النسيج

يمكن تطبيق مواد تغير الطور في العديد من المجالات في صناعة النسيج والتي تعمل على تحسين الراحة الحرارية للملابس. حيث تستخدم المواد التي تكون درجة حرارة انصهارها وتبولورها قريبة جداً من درجة حرارة سطح الجسم [21].

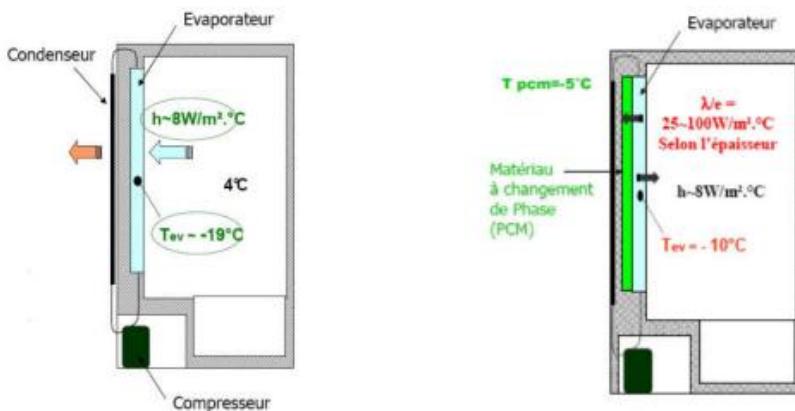
المواد المستخدمة في هذا النوع من التطبيقات هي عموماً البارافينات التي يبلغ متوسط درجة الحرارة فيها من 30 إلى 34 درجة مئوية ، مما يجعلها مريحة جداً لجسم.



الشكل 2-10 : فعالية MCP في المنسوجات [20].

4-10-2 في الثلاجة المنزلية MCP

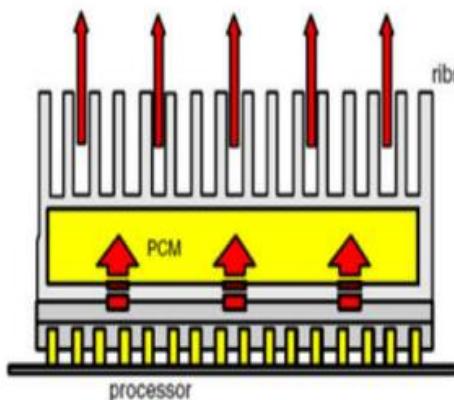
تعمل الثلاجات باستمرار حيث تستهلك ما يقارب 18 مليار كيلو واط في الساعة أي ما يعادل 20% من الاستهلاك الكهربائي. يعد دمج مواد تغير الطور في هذه الأجهزة حل تكنولوجي مبتكر واقتصادي من أجل تقليل من استهلاك الطاقة والحد من ذروة الطلب على الطاقة الكهربائية [22]. يوضح الشكل (11-2) مثلاً على ثلاجة منزلية تحتوي على مادة تغير الطور.



.[20] (أ) : ثلاجة عادية ، (ب) : ثلاجة بنظام (MCP)

5-10-2 MCP في تبريد المكونات الإلكترونية

نظام التبريد الأكثر شيوعاً للمكونات الإلكترونية هو الحمل الحراري (الطبيعي أو القسري) للهواء الحيط. يمكن أن تتصبّر MCP كمية كبيرة من الحرارة عن طريق الذوبان ، مما يجعلها بديلاً مهماً لتبديد الطاقة المنبعثة من المكونات الإلكترونية. هذا النظام مناسب بشكل خاص لاستخدام الدوري للمعدات الإلكترونية. يمكن لـ MCP بعد ذلك التخلص من حرارته (عن طريق إعادة التماسك) خلال فترة عدم النشاط. يوضح الشكل (12-2) مثلاً للمعدات الإلكترونية المبردة باستخدام MCP.



الشكل 2-12: مثال على معالج تم تبريدته بواسطة MCP [20]

2-10-6 التطبيق على المباني

يعد استخدام مواد تغير الطور (MCP) لتخزين الحرارة في المباني أحد التطبيقات الواudedة. حالياً تتجه غالبية الدراسات حول مواد تغير الطور (MCP) لاستخدامها ودمجها في غلاف المبني لتعديل درجة الحرارة أجل الحصول على راحة أحسن داخل المبني.

يتم استخدام MCP في المباني على الشكل التالي:

الدّمج المباشر: يتم خلط MCP مع مواد البناء والتي تكون عادةً الجبس أو الخرسانة.

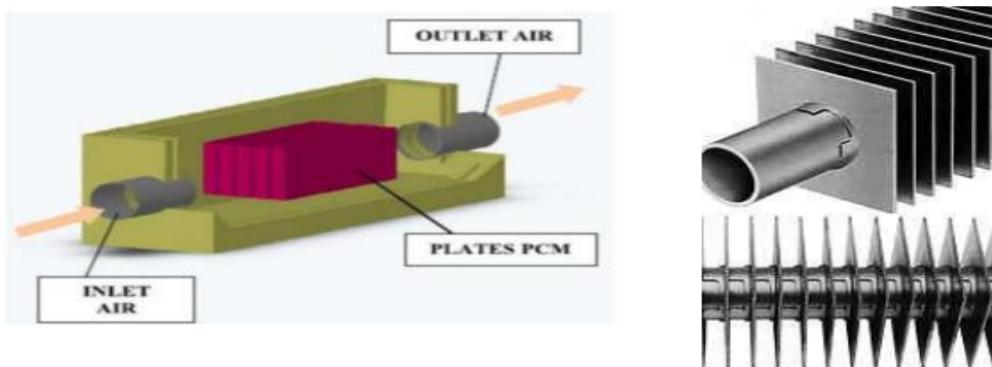
التغليف قبل الدّمج: تغلف مواد تغير الطور في كبسولات يتم دمجها مع مواد البناء أو وضعها في المبادرات الحرارية [23].



الشكل 2-13: مثال على استخدام MCP في المباني [24].

7.9.2 انتعاش الهواء باستخدام MCP

طريقة أخرى تم استكشافها أساساً مبادلات الهواء في شكل لوحة MCP. تعمل على جعل هواء التهوية منعش عند ملامسته للألوح. يظهر مخطط الجهاز في شكل (14-2).

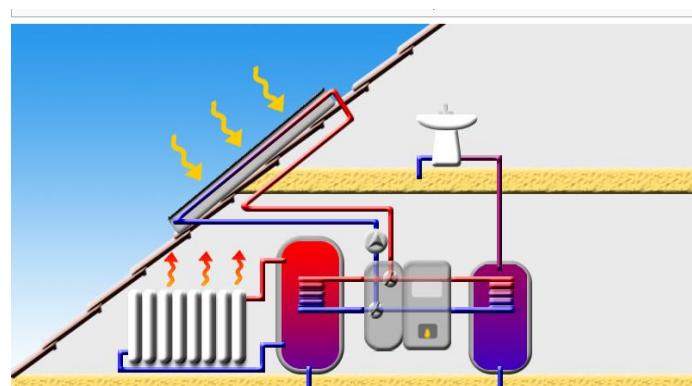


شكل 14-2 : المبادر الحراري [20]MCP.

8.9.2 تخزين الطاقة الشمسية بواسطة MCP

تعتمد الطاقة الشمسية على الطقس خلال النهار ، والتي تعتمد على الموسم ، لذا فإن الطاقة الاحتياطية ضرورية لضمان استمرارية تشغيل المنشآت الشمسية.

كان استخدام مواد تغير الطور لتخزين الطاقة واستخدامها في الفترات الحرجة حلاً غير كافٍ. من أهم تطبيقات الطاقة الشمسية تسخين المياه. يتطلب هذا التطبيق مكونين: مجمع شمسي ووحدة تخزين حراري. من أجل زيادة سعة التخزين الحرارية ، يمكن استبدال الماء بمادة متغيرة الطور (MCP) ، تتميز بإرتفاع الحرارة الكامنة نسبياً للانصهار [20].



الشكل 15 : تخزين الطاقة في مجمع شمسي باستخدام MCP . [25]

المراجع

- [1] ThoughtCo "Learn the Phase Changes of Matter", 2018
- [2] 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
- [3] R. D. Beltrán and J. Martínez-Gómez, 'Analysis of phase change materials (PCM) for building wallboards based on the effect of environment', *Journal of Building Engineering*.
- [4] P. B. Salunkhe and J. K. D., 'Investigations on latent heatstorage materials for solar water and space heating applications', *Journal of Energy Storage.*, vol. 12, pp. 243–260, Aug. 2017.vol. 24, p. 100726, Jul. 2019.
- [5] A. Sarı, C. Alkan, and C. Bilgin, 'Micro/nano encapsulation of some paraffine eutectic mixtures with poly(methylmethacrylate) shell: Preparation, characterization and latent heat thermal energy storage properties', *Applied Energy*., vol. 136, pp. 217–227, Dec. 2014.
- [6] L. F. Cabeza, A. Castell, C. Barreneche, A. de Gracia, and A. I. Fernández, 'Materials usedas PCM in thermal energystorage in buildings: A review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews.*, vol. 15, no. 3, pp. 1675–1695, Apr. 2011.
- [7]. M. Boutaoui, simulation numérique de Stockage thermique par chaleur latente dans une capsule Elliptique mémoire de master : termique et combustion , université M Hamed Bougara Boumerdes ,2016
- [8] N Boulaktou, Etude des transferts thermiques lors de la fusion d'un matériau à changement de phase (MCP), Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat en sciences, Option : Physique énergétique , Skikda 1955 Aout 20 Universite.

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

[10] نجام خولة ،دراسة نظام التخزين الحراري الموسمى للإشعاع الشمسي على شكل حرارة كامنةأطروحة دكتوراه نظام ل.م.د.ميدان علوم وتقنولوجيا -تخصص هندسة ميكانيكية فرع-طاقويات، جامعة عمار ثليجي – الأغواط كلية التقنولوجيا قسم الهندسة الميكانيكية، جوان2021.

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

[12] A. abhat, S .Aboul- Enein, N .Malatidis « Heat of fusion storage system for solar heating applications ».C.Den Quden ,1981

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

[14] S. Blaise, Eango « Contribution au stockage d'énergie thermique en bâtiment : développement d'un système actif à matériaux à changement de phase» l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2011

[15]BENHAMZA Abderrahmane. Simulation numerique d'un capteur solaireplan utilisant des materiaux a changement de phase, Mémoire master academique , Génie Energétique, Université KASDI Merbah d' Ouargla, Année Universitaire : 2015 /2016.

[16] NEHARI Taieb, Etude du refroidissement des cellules photovoltaïques par un matériau à changement de phase, En vue de l'obtention du Diplôme de Doctorat en Sciences, Spécialité : Génie Mécanique, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, Année Universitaire 2015 / 2016.

[17] S. Ben Jabrallah, Professeur universitaire, physique-énergétique « Les Matériaux à changement de phase», Laboratoire d'énergétique et des Transferts Thermique et Massique(Tunis)

[18] M. Alkilani and al, Review of solar air collectors with thermal storage units, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15, 2011, pp 1476–1490

[19] Guezel abasse ; etude numerique des transferts de chaleur et de masse lors de la fusion d'un matériau à changement de phase , Diplôme de master Académique , Spécialité :installations énergétiques et turbomachines université Mohamed Larbi BenMhidi, Oum El Bouaghi, promotion :2017/2018

[20] -D'effas Meriem , Intégration des matériaux à changement de phase (MCP) comme système de stockage de la chaleur, Mémoire En vue de l'obtention du diplôme de Master en Physique Spécialité : physique des matériaux, Université Mohamed Seddik Ben - Jijel , Année Universitaire 2020-2021.

[21] A. GONTARD, K. GRYSKA, L. LALLEMAND « Amélioration de la conductivité thermique de matériau à changement de phase », Université de Pau des pays de l'Adour 2012.

[22] D. Guerraiche, Contribution à l'étude des Transferts Thermiques lors de la Solidification d'un Liquide dans un Capteur Solaire, thèse de doctorat : Energétique, Université Batna 2 – Mostefa Ben Boulaïd, 2020

[23] S. Berreksi, S. Latarsa, Simulation numérique du stockage thermique par chaleur latente dans une capsule sphérique, mémoire de master : systèmes Thermique et Combustion, Université M'Hamed Bougara, Boumerdes, 2016.

[24] B. Binet « Etude de la fusion dans des enceintes munies de sources de chaleur discrètes». Sherbrooke (Québec), CANADA Novembre 1998.

[25] M. Benbrika, Etude Thermique des Performances d'un Echangeur de Chaleur à Section Elliptique pour le Stockage Thermique par Chaleur Latente, THÈSE DE DOCTORAT LMD Génie Mécanique / Energétique , Université Amar Telidji – Laghouat, Année Universitaire 2019-2020.

الفصل الثالث

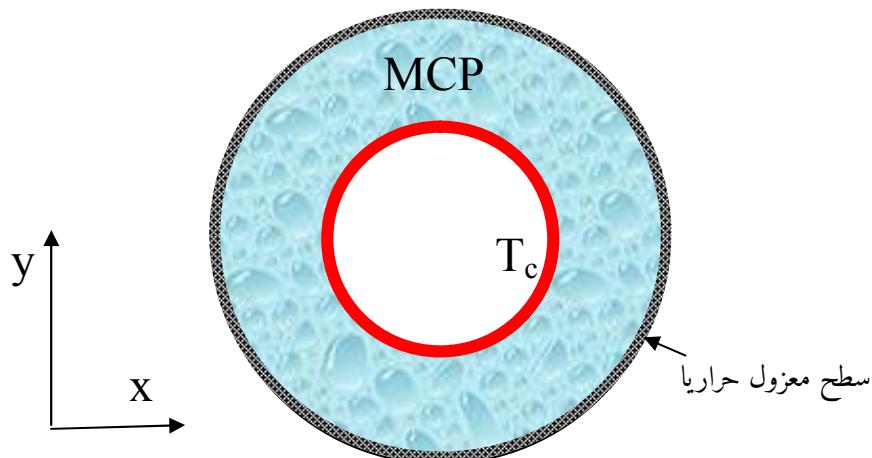
المحاكاة العددية و النتائج

1-3 مقدمة

خصص هذا الفصل لدراسة تأثير إضافة جزيئات نانوية من النحاس على عملية انصهار مادة تغيير الطور(MCP) في أنبوب مبادل حراري. تمت إجراء عمليات المحاكاة العددية باستخدام برنامج ANSYS-FLUENT لتسليط الضوء على السلوك الحراري والدیناميکي لمادة تغيير الطور(MCP) أثناء مرحلة تخزين الطاقة الحرارية في المبادل الحراري. تقوم بعرض النموذج الفيزيائي و كتابة معادلات الإنحفاظ و كذلك الشروط الحدية، بعد ذلك تقوم بشرح طريقة المحاكاة باستعمال البرنامج المستعمل و إخراج النتائج. يتم فحص الخصائص الحرارية لذوبان مادة تغيير الطور من خلال توزيع درجات الحرارة أثناء تطور عملية الانصهار، و خطوط التيار. يتم توضيح ديناميكياً تغيير المرحلة من خلال التطور مع وقت للكسر السائل كعامل تحكم في عملية الانصهار.

2-3 النموذج الفيزيائي

يوضح الشكل (1-3) مخطط النموذج الفيزيائي لوحدة التخزين الحراري الكامن، ويكون من أنبوبين متلاحمي المركز(وحدة تخزين الحرارة ذات الغلاف والأنبوب). يملأ الفراغ الداخلي بمادة تغيير الطور مضاد إليها نسب مختلفة من جزيئات نانوية من النحاس، يتم تسخينها بواسطة مائع نقل الحرارة درجة حرارته تفوق درجة حرارة تغيير الطور للمادة. بينما يتم اعتبار سطح الأنبوب الخارجي معزول حراريا.



الشكل 1-3 : مخطط توضيحي للنموذج الفيزيائي.

3-3 الفرضيات العامة

اعتمدنا في هذه الدراسة على عدد من الفرضيات المبسطة : الفرضيات المتعلقة بالمهندسة، نوع التدفق، والاليات النقل وتغيير الطور . ومن أجل إيجاد حل بسيط وواقعي اعتبرنا الفرضيات التالية:

- في الطور السائل نفترض أن السريران ثنائي الأبعاد، نيوتوني، رقائق، والمائع غير قابل للضغط.
- يتم إهمال التبديد للزوج والإشعاع .
- إهمال اختلاف الحجم الناتج عن تغير الطور.
- نعتبر أن الخصائص الحرارية-الفيزيائية في الحالة السائلة أو الصلبة ثابتة.
- نعتبر أن مادة تغيير الطور نقية تماماً.
- مادة تغيير الطور متتجانسة.

4-3 معادلات الإنفاذ

1-4-3 معادلة إنفاذ الكثافة :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} = 0 \quad (1.3)$$

بالنسبة للسائل غير قابل للضغط، تبقى الكثافة ثابتة ولدينا $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$ لذلك:

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} = 0 \quad (2.3)$$

حيث u_x و u_y هما مركبات سرعة السائل في الاتجاهين x و y على التوالي $[m.s^{-1}]$.

2-4-3 معادلة إنفاذ كمية الحركة :

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \vec{\nabla} u \right) = -\vec{\nabla} p + \mu \Delta u + \vec{F}. \quad (3.3)$$

: (Ox) باتجاه

$$\rho \left(\frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} \right) + S_x \quad (4.3)$$

: (Oy) باتجاه

$$\rho \left(\frac{\partial u_y}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} \right) - \rho g \beta (T - T_{ref}) + S_y \quad (5.3)$$

$\rho g \beta(T - T_{ref})$ يمثل مصطلح التقرير لـ Boussinesq. تختلف الكثافة للسائل باختلاف درجة الحرارة وهذا الاختلاف في الكثافة هو سبب حركة السوائل. إذا كان الاختلاف صغيرا، فيمكن التعامل مع الكثافة على أنها ثابتة.

S_x و S_y تمثل معاملات تصحيح السرعة في الاتجاهين x و y على التوالي، المستخدمة لتعديل معادلات كمية الحركة في المنطقة الفاصلة بين السائل والصلب ، يستخدم نموذج Darcy للسوائل المسامية لتعديل السرعات في المناطق الصلبة و المنطقة الفاصلة:

$$S_x = Au_x \quad S_y = Au_y \quad (6.3)$$

مع A تمثل المسامية التي يعبر عنها بـ:

$$A = C \frac{(1 - f_l)^2}{f_l^2 + 0.000001} \quad (7.3)$$

C و f_l يمثلان ثابت Darcy و كسر الكلمة على التوالي.

$$f_l = \begin{cases} 1, & T > T_l \\ \frac{T - T_s}{T - T_l}, & T_s < T < T_l \\ 0, & T < T_s \end{cases} \quad (8.3)$$

درجات حرارة في الطورين السائل و الصلب على التوالي.

3-4-3 معادلة حفظ الطاقة الحرارية :

من خلال مراعاة ظاهرة تغير الطور في المادة أثناء الانصهار، يمكن اعتبار ثلات مناطق متميزة: منطقة صلبة و منطقة سائلة و منطقة فاصلة حيث تتوارد المراحلتين.

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u_x \frac{\partial T}{\partial x} + u_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = k \Delta T + S_T \quad (9.3)$$

3-5 الشروط الابتدائية والحدية

$$t=0 : T = T_i$$

$$t > 0$$

$$u = v = 0 \quad , \quad T = T_0 = 323K \quad \text{على سطح الأنابيب الداخلي :}$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad \text{السطح الخارجي للأنبوب معزول حراريا :}$$

3-6 الخواص الفيزيائية للماء الأساسي والجزيئات النانوية

يلخص الجدول (3-1) مختلف الخصائص الحرارية الفيزيائية للماء الأساسي بالإضافة إلى الجزيئات النانوية.

الجدول (3-1) : الخصائص الفيزيائية للماء والجزيئات النانوية من النحاس.

$\phi = 2\%$	$\phi = 1\%$	الماء الأساسي (الماء)	الجزيئات النانوية من النحاس	الخصائص
2588.8	1792.79	997.1	8954	$(kg \cdot m^3)\rho$
1.04748	0.8	0.6	400	$\left(\frac{W}{m} \cdot ^\circ C\right) K$
1552.796	2283.107	4179	383	$\left(\frac{j}{kg} \cdot ^\circ C\right) C_p$
1.03×10^5	1.68×10^5	3.35×10^5	-	$(j/kg)L_f$
1.555×10^3	1.158×10^3	8.9×10^4	-	$(pa \cdot s)\mu$
2.6×10^7	1.95×10^7	1.44×10^7	1.17×10^4	$\left(\frac{m^2}{s}\right)\alpha$
7.63×10^5	1.13×10^4	2.1×10^4	1.67×10^5	$\left(\frac{1}{^\circ C}\right)\beta$

3-7 الخصائص الحرارية- الفيزيائية للماء النانوي

نتغير مختلف الخواص الحرارية-الفيزيائية للمادة عند إضافة الجزيئات النانوية حيث يتم حسابها كالتالي:

- الكثافة الحجمية:

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_s \quad (10.3)$$

- السعة الحرارية:

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \phi)(\rho C_p)_f + \phi(\rho C_p)_s \quad (11.3)$$

- معامل التمدد الحجمي :

$$(\rho\beta)_{nf} = (1 - \phi)(\rho\beta)_f + \phi(\rho\beta)_s \quad (12.3)$$

• الزوجة :

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1 - \phi)^{2.5}} \quad (13.3)$$

• يستخدم تقرير Maxwell-Garnetts لحساب الناقلة الحرارية للسائل النانوي:

$$k_{nf} = k_f \frac{k_s + 2k_f - 2\phi(k_f - k_s)}{k_s + 2k_f + \phi(k_f - k_s)} \quad (14.3)$$

• الحرارة الكامنة للسائل النانوي بالصيغة

$$(\rho L)_{nf} = (A - \phi)(\rho L)_f \quad (15.3)$$

μ_{nf} : الزوجة الديناميكية الفعالة .

ρ_{nf} : الكثافة الفعالة .

β_{nf} : معامل التدفق الحراري .

k_{nf} : الموصلية الحرارية .

$(C_p)_{nf}$: السعة الحرارية .

L_{nf} : هي الحرارة الكامنة للسائل النانوي .

3-8 الخطوات الرئيسية لحل المسائل في برنامج CFD

3-8-1 عرض تقديمي لبرنامج ANSYS :

هي أداة لإدارة المشاريع. يمكن اعتبارها واجهة عالية المستوى ANSYS Workbench تربط جميع أدوات البرامج الخاصة بنا . يتيح لك Workbench إدارة الملفات وإطلاق البرامج المختلفة من نافذة واحدة. يتعامل مع نقل البيانات بين أدوات Ansys .

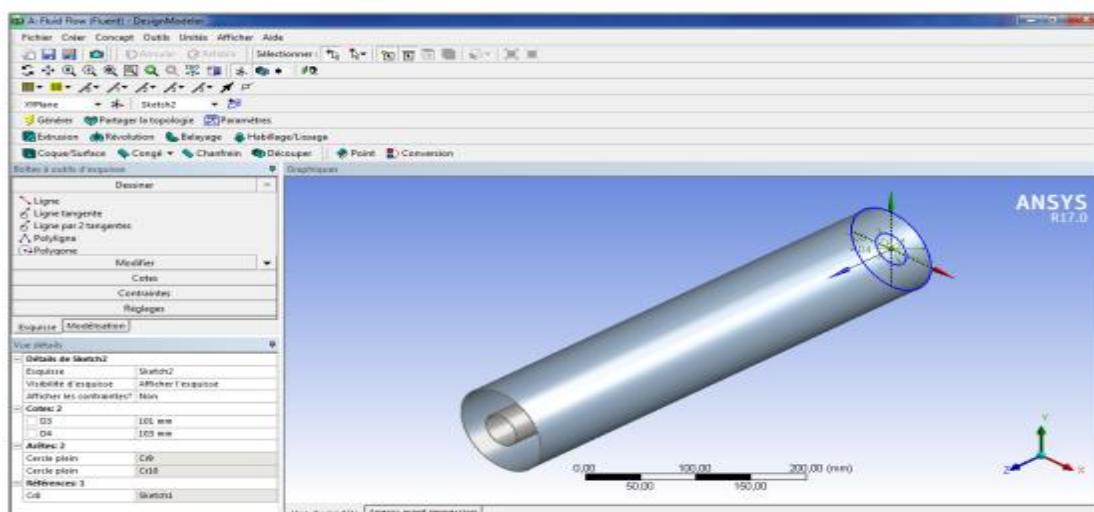
3-8-2 المحاكاة العددية :

داخل برنامج ANSYS يستطيع معالجة مسائل مكانيك الموائع و عمليات تغير الطور ويتم هنا استخدام البرنامج Fluent حيث يتم إتباع الخطوات المبينة في الجدول (3-2) . تم إجراء المحاكاة في المجال ثنائي الأبعاد.

الجدول 3-2 : الخطوات الالزمة لمحاكاة في برنامج Fluent.

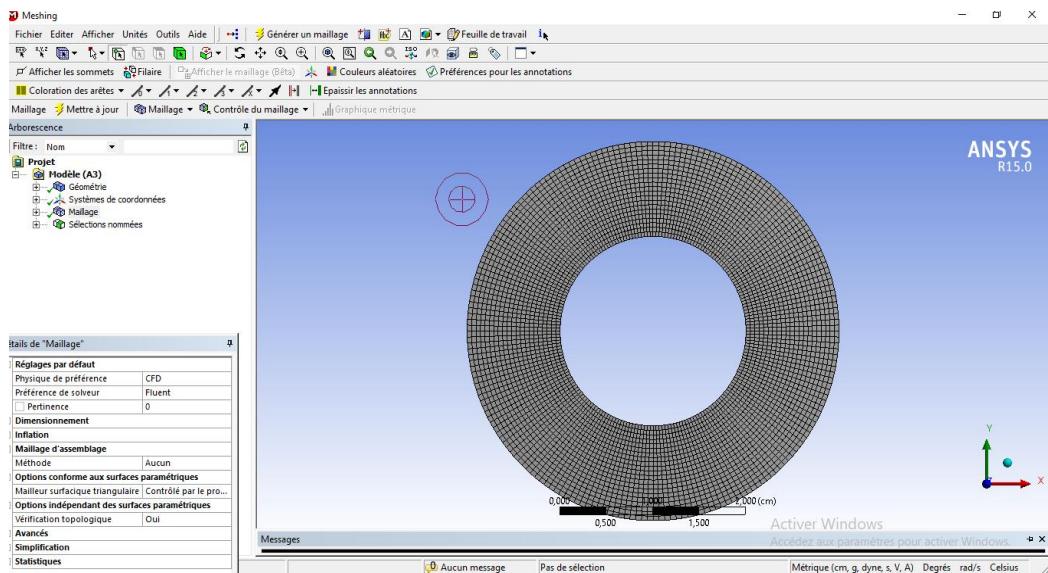
2 DM Geometry	CAO – création de la géométrie	ANSYS DesignModeler
3 Mesh	Maillage	ANSYS Meshing
4 Setup	Mise en données et simulation	ANSYS Fluent
5 Solution	Résultats CFD	
6 Results	Post-traitement	CFDPost

- تكون الهندسة/CAD من رسم هندسة المسالة المراد دراستها.



الشكل 3-2: واجهة إنشاء النموذج الفيزيائي.

- اختيار الشبكة : للحصول على دقة أفضل واستقرار أفضل ، اعتمدنا شبكة منتظمة ، مكونة من خطوط متصلة عبر المجال الذي يتبع محيط الأسطح التي تحدد الشكل الهندسي.
- إدخال البيانات : اختر النماذج والفرضيات الملائمة للمشكلة .



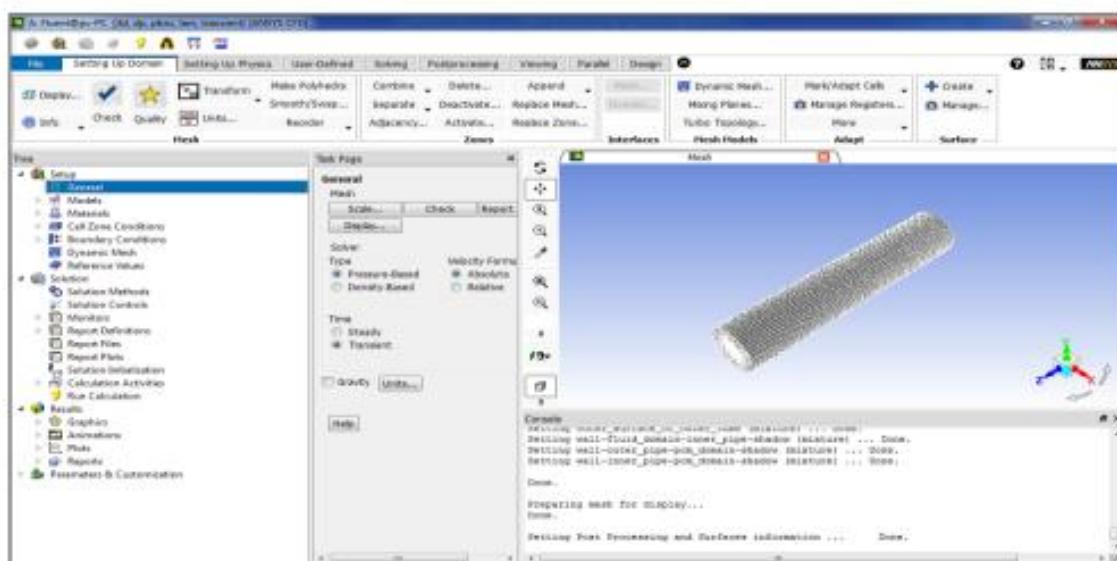
الشكل 3-3 : واجهة انشاء الشبكة.

- إجراء المحاكاة بواسطة هذا البرنامج ، من الضروري وصف معلمات الحل كما في الجدول (3-3).

الجدول 3-3 : إدخال البيانات في البرنامج.

<ul style="list-style-type: none"> • الفضاء 2D • التغير مع الزمن. • 1-st-Order ضمني . • السريان رقائقي والمائع لزج . • اختيار إدخال علاقات نقل الحرارة . • اختيار التصلب والذوبان. 	اختيار المعالجة
<ul style="list-style-type: none"> • اختيار المواد المستخدمة في النموذج من القوائم الموجودة ؛ او تقديمهم وفقاً لاحتياجاتنا. 	اختيار المواد
<ul style="list-style-type: none"> • المعادلات : <ul style="list-style-type: none"> • معادلات الحركة . • معادلات الطاقة. • معلمات الحساب (للنظام المتغير مع الزمن): <ul style="list-style-type: none"> • الخطوة الزمنية: 0.2 	التحكم في الحل

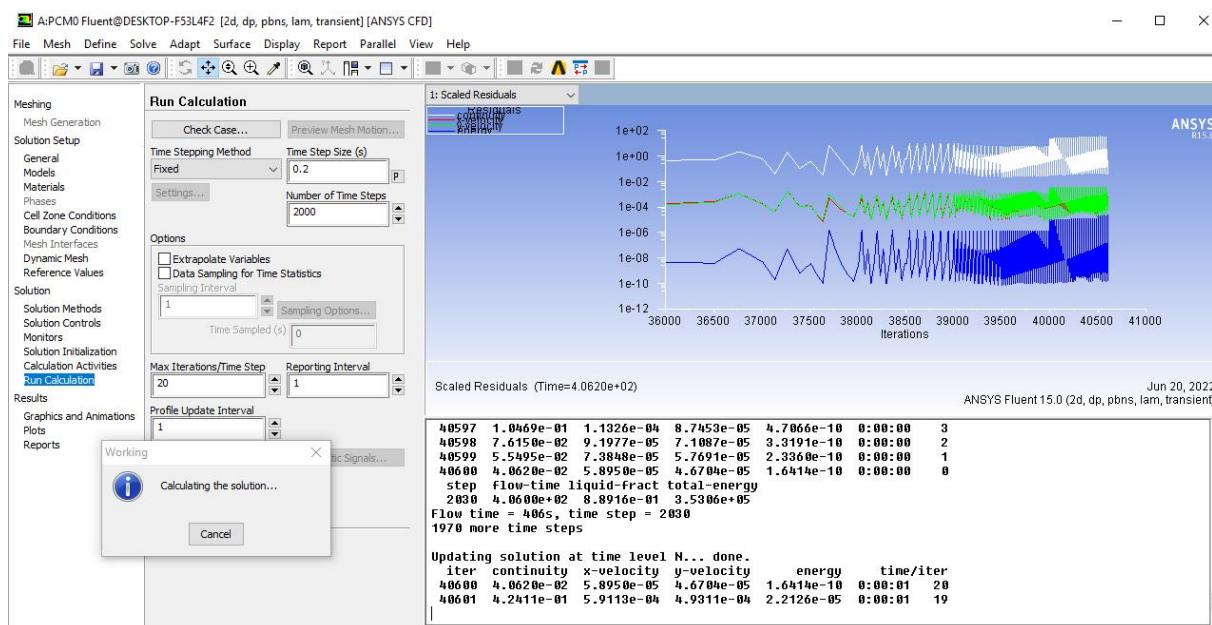
<p>الحد الأقصى للتكرار لكل خطوة</p> <ul style="list-style-type: none"> • معلمات (sous- relaxation) . الضغط: 0.3 . الكافية: 0.9 . القوة: 0.9 . الحركة: 0.7 . الكسر السائل: 0.9 . الطاقة: 1 • اختيار طرق الحل. <p>((PRESTO)) الضغط نستعمل (secondorder-Upwind) الحركة نستعمل (Second order- Up)</p>	
---	--



الشكل 3-4 : واجهة المعالجة.

3-8-3 الدقة العددية :

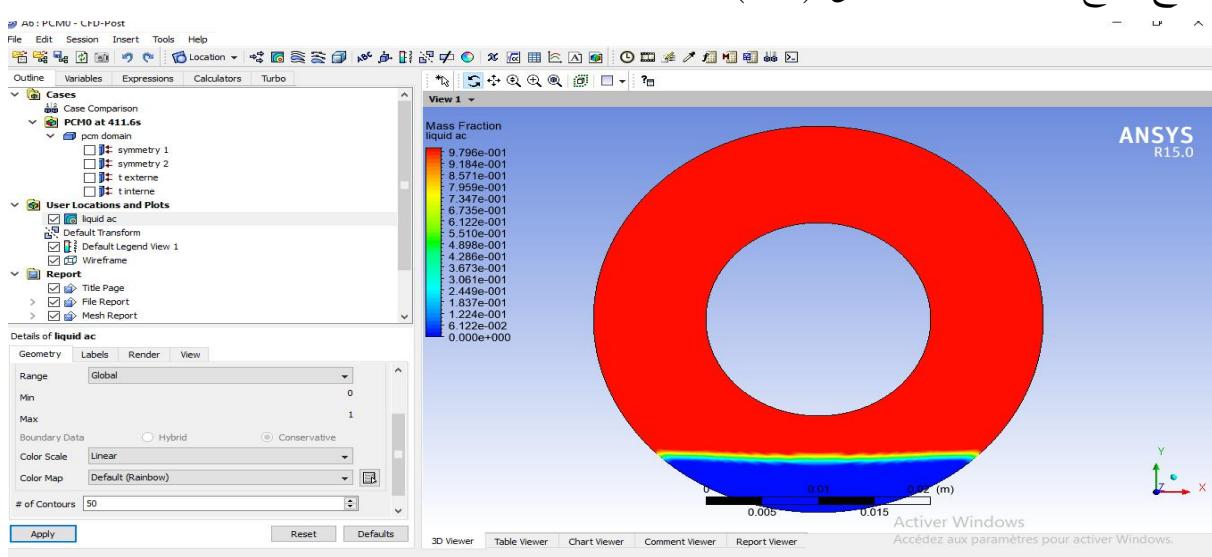
يتم حل المعادلات التفاضلية الجزئية بواسطة محل CFD بعد تحديدها ووضعها في شكل جبلي يتم إجراء هذا القرار بواسطة خوارزمية تكرارية حتى التقارب، انظر الشكل (5-3).



الشكل 5-3 : واجهة التنفيذ.

4-8-3 مرحلة ما بعد المعالجة :

إخراج النتائج وتحليلها ، انظر الشكل (6-3).



الشكل 6-3 : واجهة CFD Post

3-9 النتائج والمناقشة

تم الحصول على النتائج المقدمة للنظام كا هو موضح في الفقرة أعلاه باستخدام الرمز التجاري FLUENT . يتم تمثيل النتائج العددية التي تم الحصول عليها علي شكل الكسر السائل ، متساوي الحرارة وخطوط التيار في الأشكال. ركزنا اهتمامنا على تأثير إضافة الجزيئات النانوية من النحاس على عملية تخزين الطاقة الحرارية.

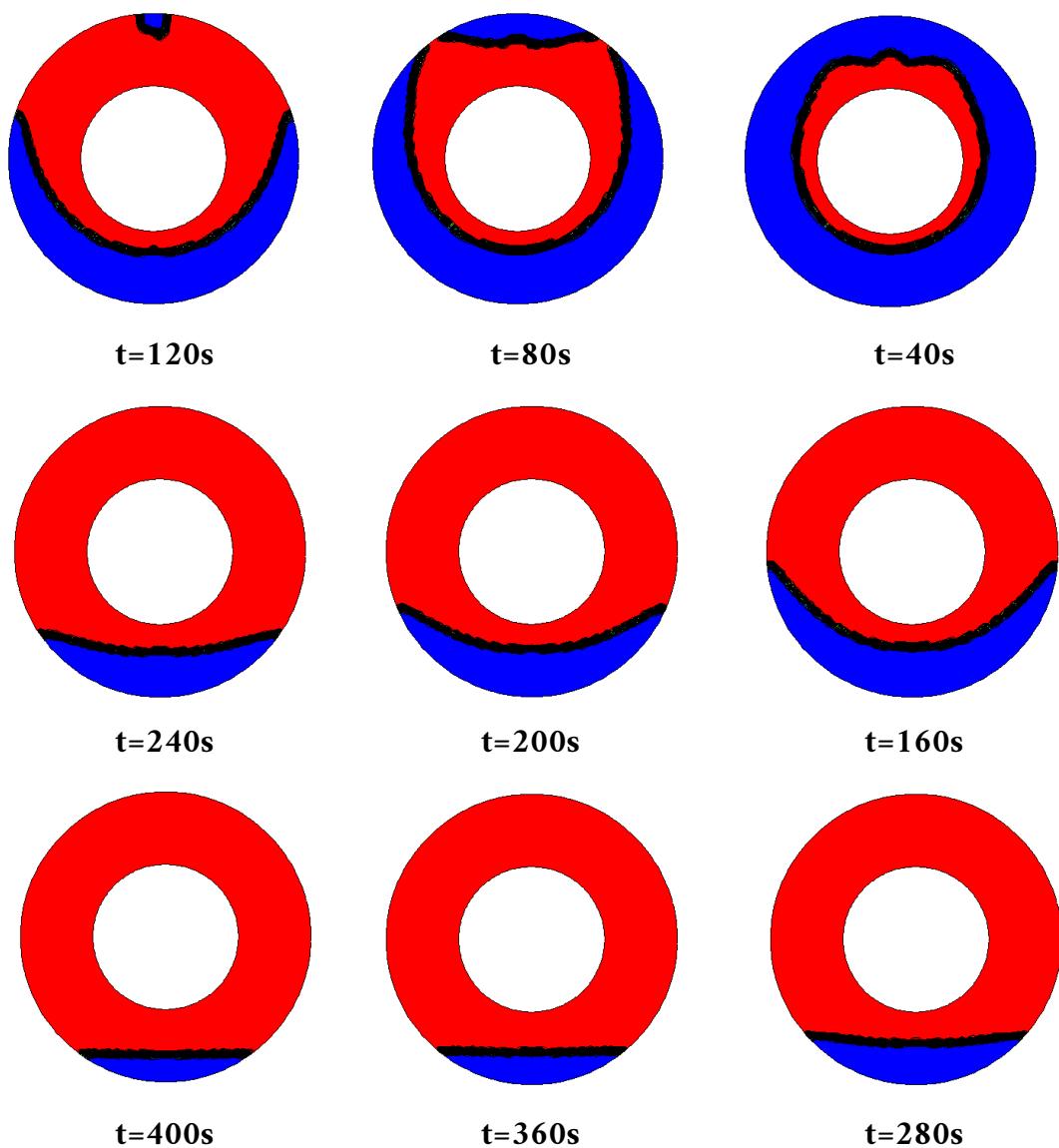
3-9-1 تطور الجزء السائل كدالة للوقت

تمثل الأشكال 3/7-3/8-3/9 التغيرات في الكسر السائل مع مرور الوقت لمدة تغير الطور المستخدمة. يمكننا فحص شكل وحركة واجهة الاندماج بمرور الوقت.

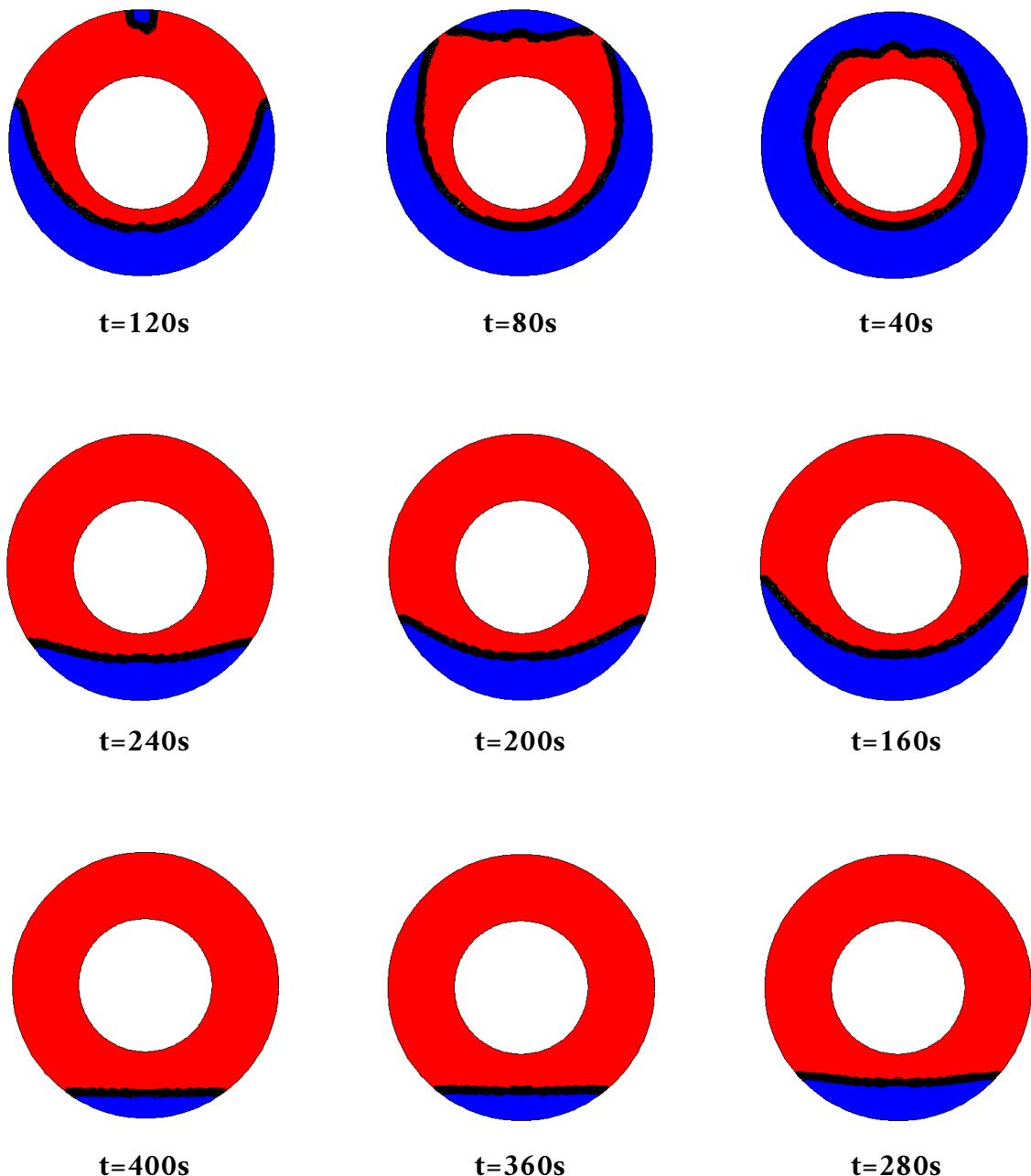
يمثل اللون الأحمر الحالة التي تكون فيها المادة سائلة تماماً ، ويمثل اللون الأزرق الحالة التي تكون فيها المادة صلبة تماماً. يمثل الخط الأسود جبهة الانصهار الذي يفصل بين المنطقة السائلة والصلبة. كا هو موضح في هذه الأشكال.

نلاحظ من خلال الأشكال بأن معدل الذوبان متغيراً في المراحل الأولى من عملية الذوبان لمدة تغير الطور وهذا راجع إلى أن مساحة التبادل الحراري بين MCP في حالته الصلبة و كمية المادة المذابة كبيرة، انتقال الحرارة المسيطر في هذه المرحلة يكون عن طريق التوصيل الحراري. مع مرور الوقت تصبح كمية مادة تغير الطور المذابة كبيرة، في هذه المراحل يصبح انتقال الحرارة بالحمل هو المسيطر.

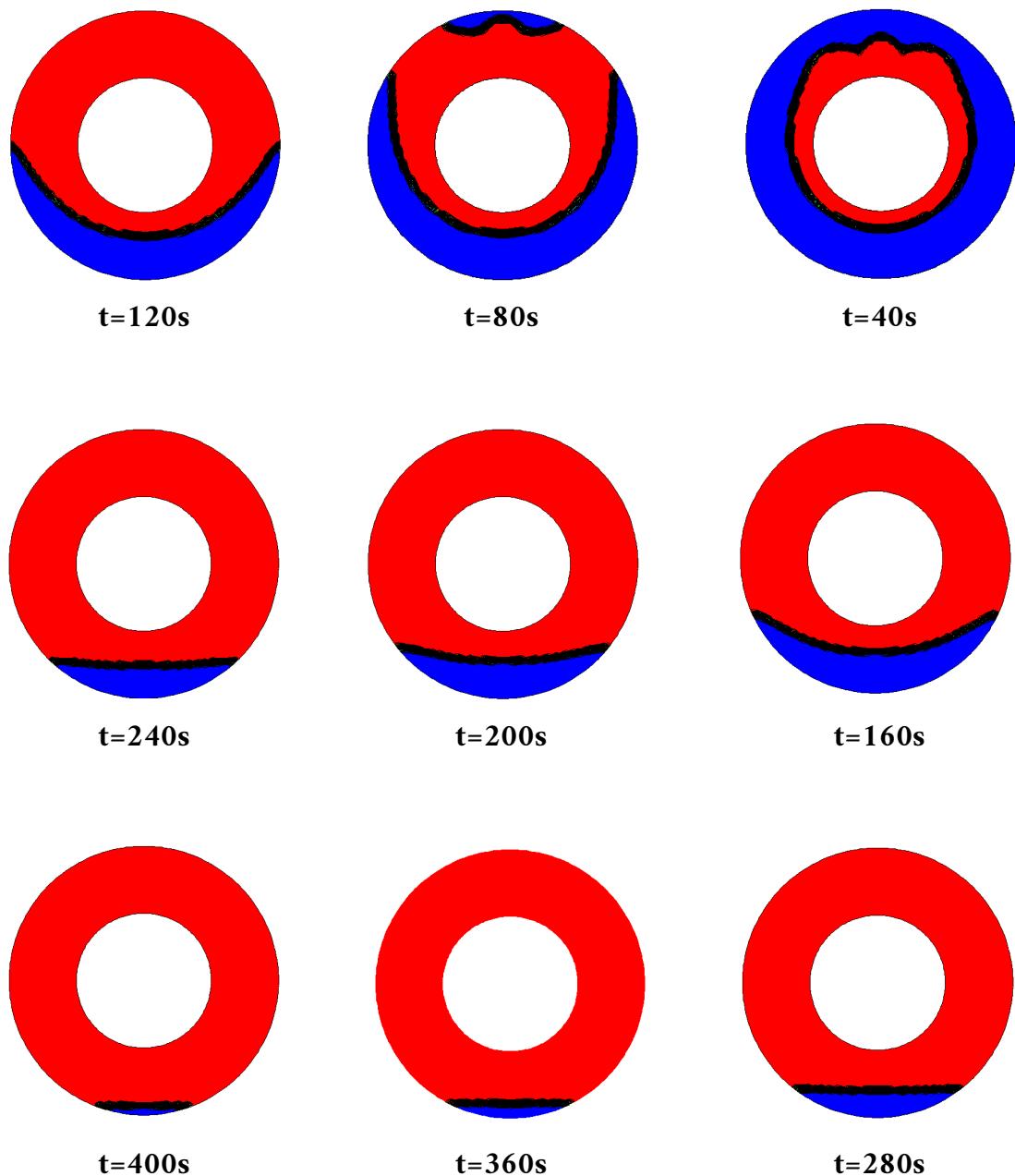
نلاحظ من خلال الأشكال أيضاً أن عملية الذوبان تتأثر بإضافة جزيئات النحاس النانوية حيث كلما زدنا نسبة الجزيئات النانوية كلما كانت عملية الذوبان أسرع، فثلا نلاحظ عند اللحظة $t=280s$ أن كمية المادة غير المذابة المتبقية تقل كلما زاد تركيز الجزيئات مقارنة بالمادة بدون إضافة جزيئات.



الشكل 7-3 : تغيرات الكسر السائل خلال أزمنة مختلفة من أجل $\varphi = 0\%$.



الشكل 3-8 : الكسر السائل خلال أزمنة مختلفة من أجل $\varphi = 1\%$.



الشكل 3-9 : الكسر السائل خلال أزمنة مختلفة من أجل $\varphi = 2\%$.

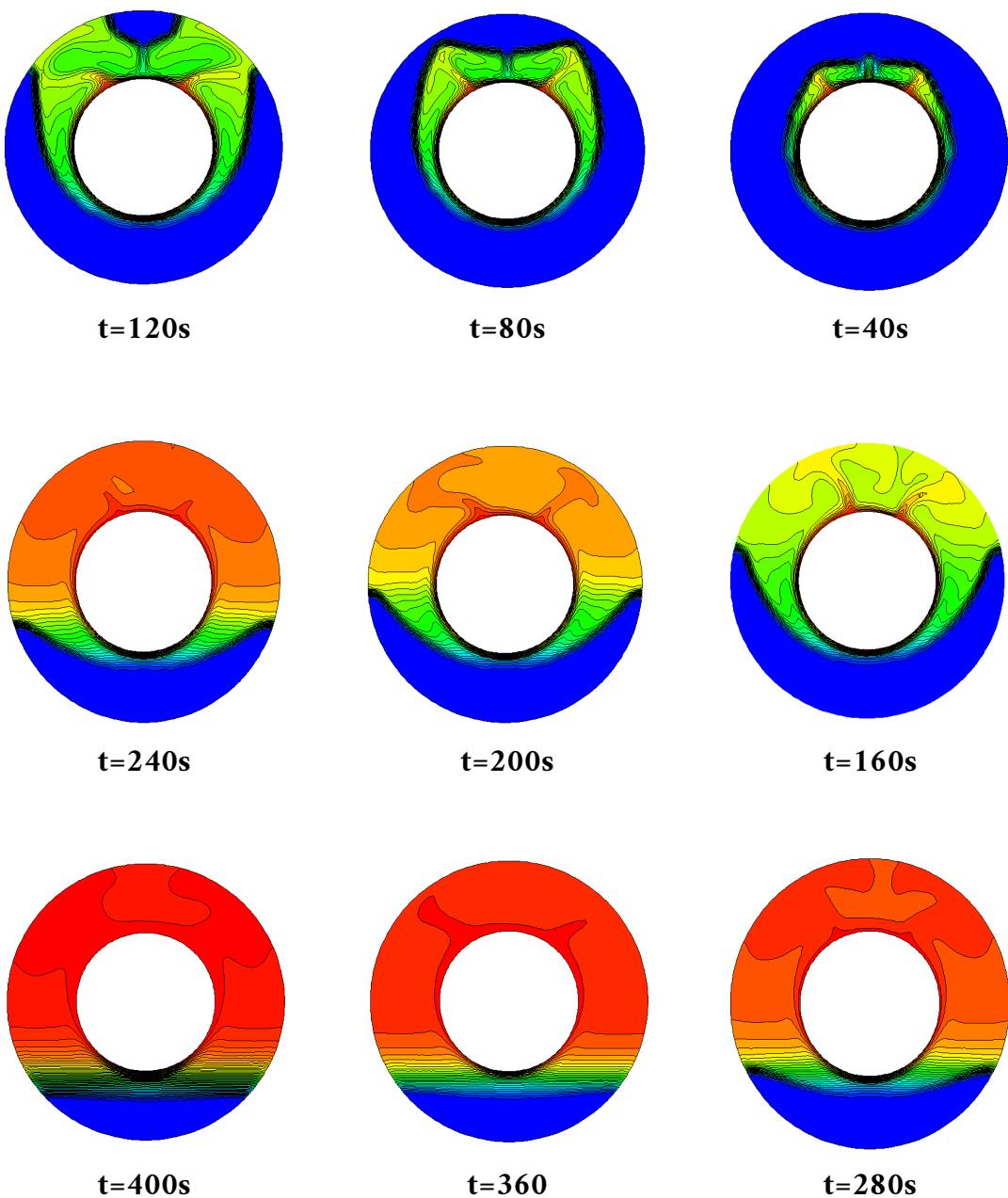
3-9-2 التطور الزمني للتساوي درجة الحرارة وخطوط التيار

يوضح الشكل 3-10/3-11-3-12 نتائج متساوي الحرارة وخطوط التيار في أوقات ذوبان مختلفة لمادة تغير الطور بدون الجزيئات النانوية و عند إضافتها بقيم مختلفة . نلاحظ أنه يتم حساب قيم حدود درجة الحرارة بناءً على اختلاف درجة الحرارة بين درجة حرارة الانصهار ودرجة حرارة المادة. نظراً لحفاظ على درجة حرارة الجدار الساخن أعلى من درجة حرارة انصهار المادة ، تبدأ المادة في الذوبان على الجدار الداخلي العلوي.

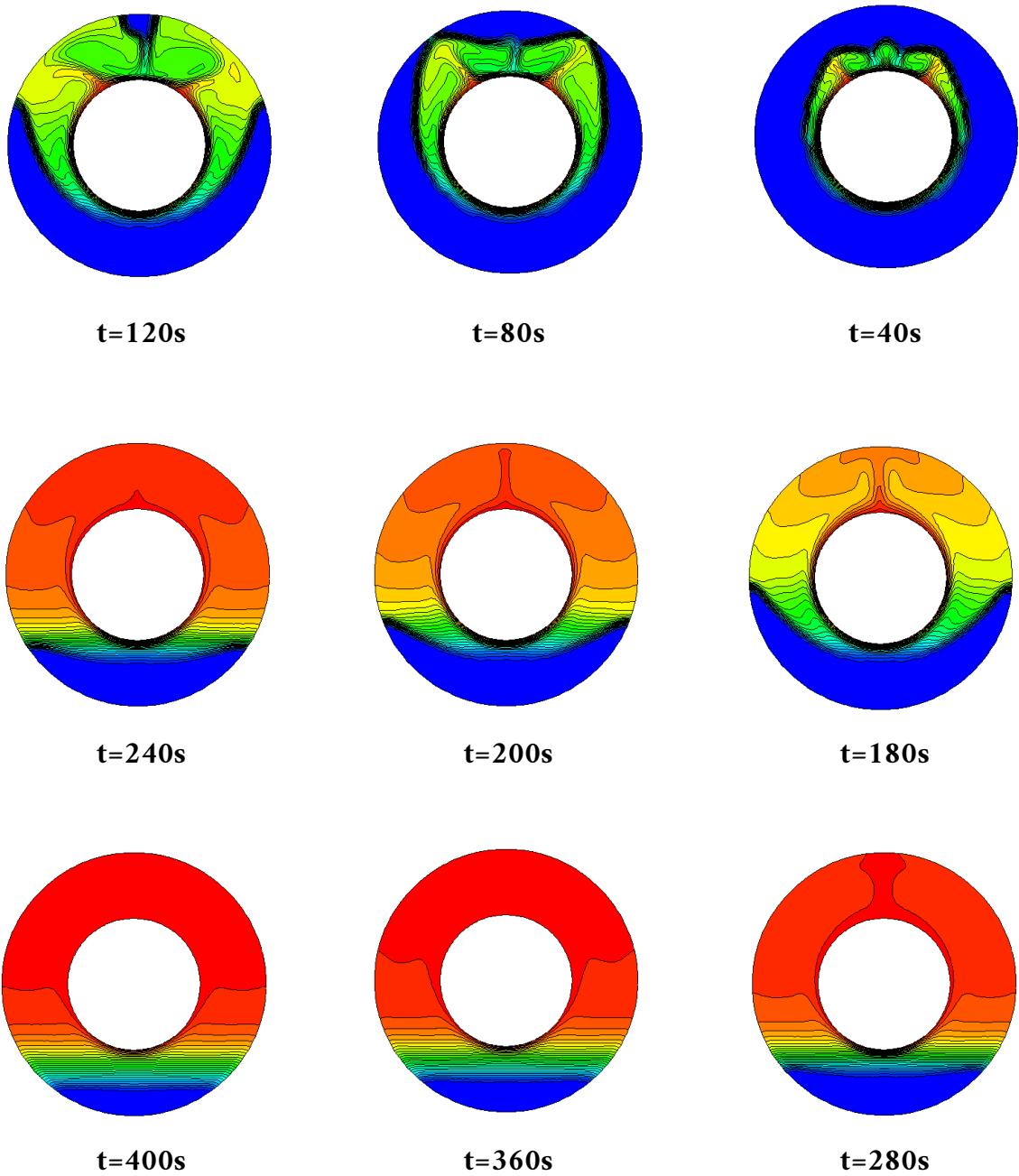
في بداية عملية الذوبان ، تكون متساوي درجة الحرارة متوازية بالقرب من الجدار الساخن ، وذلك بفضل سيطرة انتقال الحرارة عن طريق التوصيل الحراري . هذا بسبب النطاق المحدود للحركة بسبب المقاومة التي تفرضها قوى اللزوجة.

مع مرور الوقت ، يصبح انتقال الحرارة بالحمل هو المسيطر في المنطقة السائلة من مادة تغير الطور. تؤدي تيارات الحمل الحراري إلى ذوبان أسرع في المنطقة العلوية من التجويف مقارنة بالمنطقة السفلية بسبب ارتفاع درجة الحرارة في هذه المنطقة. هذا يفسر شكل مقدمة الانصهار. يتراكم MCP المنصهر ، الذي يرتفع على طول الجدار الساخن تدريجياً . ويفسر صعود المائع الساخن للأعلى على حركة المائع بعد الذوبان بسبب تغير في الكثافة مشكلاً ذوبان أكبر في المنطقة العلوية.

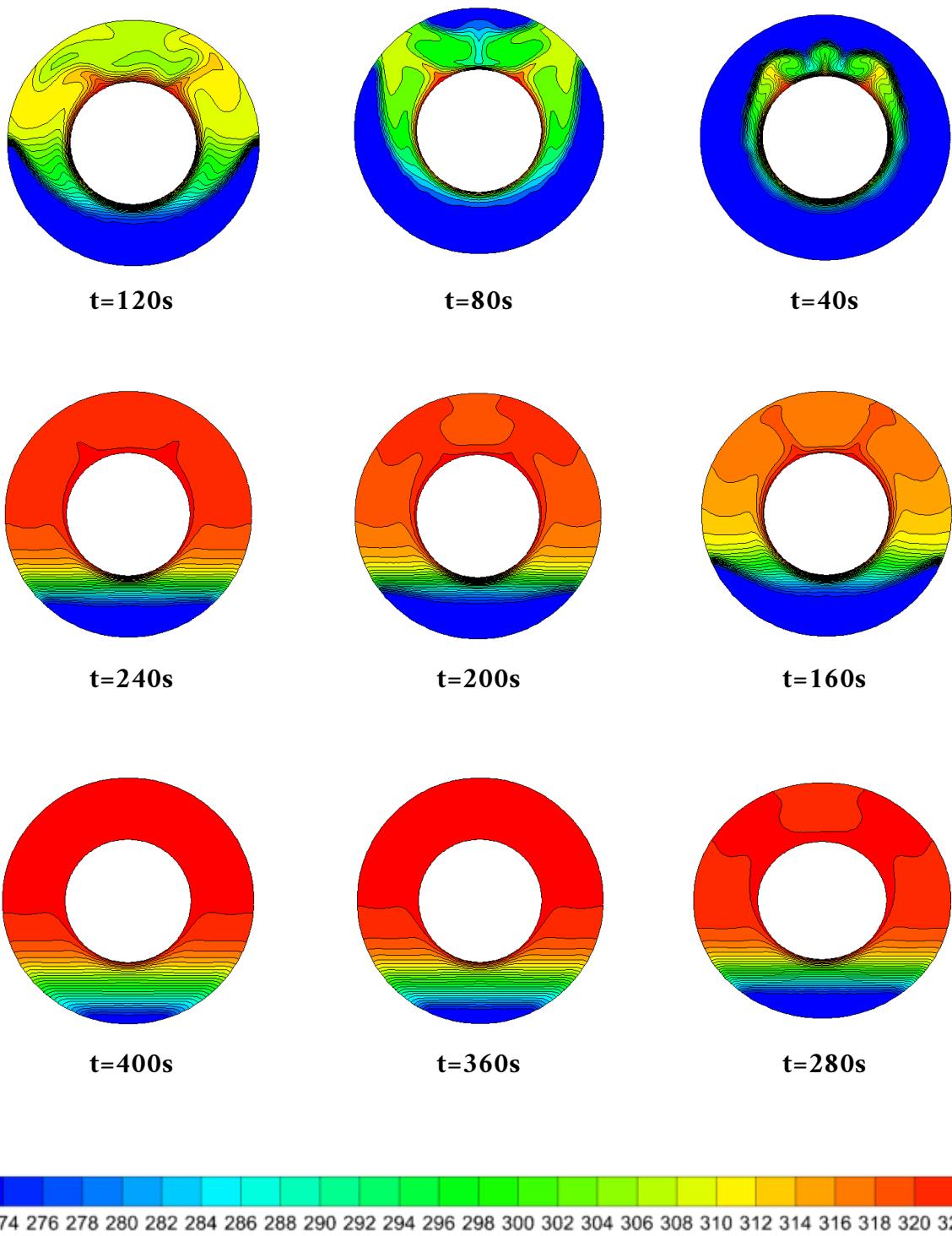
تعمل الحرارة المتراكمة للمادة على تسريع الذوبان في الجزء العلوي ، وتنزل على طول السطح البيني الصلب والسائل ، مما يؤدي إلى إطلاق حرارته تدريجياً. يصل إلى قاع التجويف بأقل قدر من الطاقة الحرارية ، وهو ما يفسر الذوبان الضعيف في هذه المنطقة من التجويف.



الشكل 3-10: خطوط تساوي درجة الحرارة من أجل $\varphi = 0\%$ خلال أزمنة مختلفة.



الشكل 3-11: خطوط تساوي درجة الحرارة من أجل $\varphi = 1\%$ خلال أزمنة مختلفة.



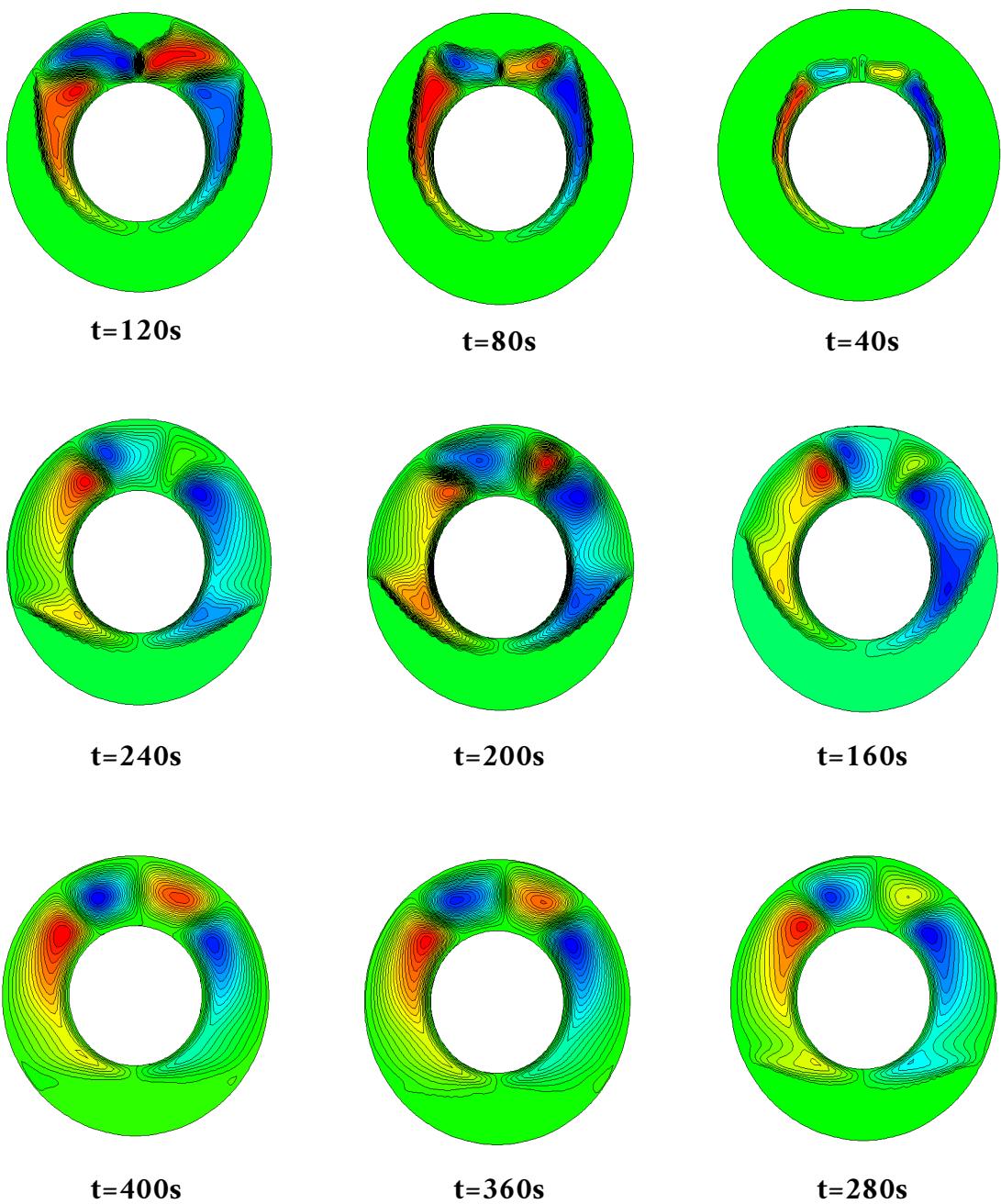
الشكل 3-12: خطوط تساوي درجة الحرارة من أجل $\varphi = 2\%$ خلال أزمنة مختلفة.

3-9-3 خطوط التيار

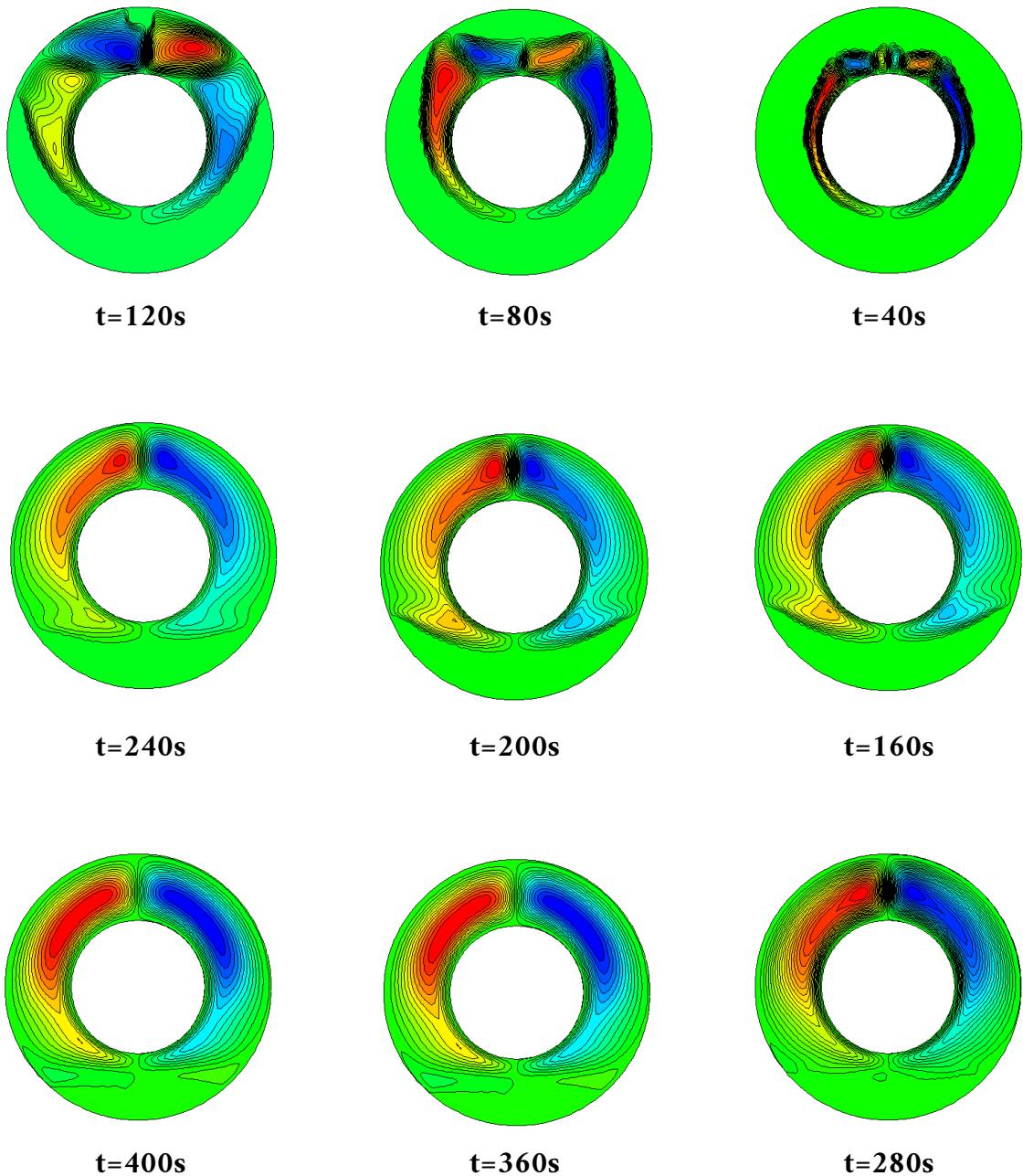
يمثل الشكل 3-13/14-3/15 خطوط التيار خلال أزمنة مختلفة أجل تراكيز جزيئات نانوية مختلفة

$$\varphi = 0\% / \varphi = 1\% / \varphi = 2\%.$$

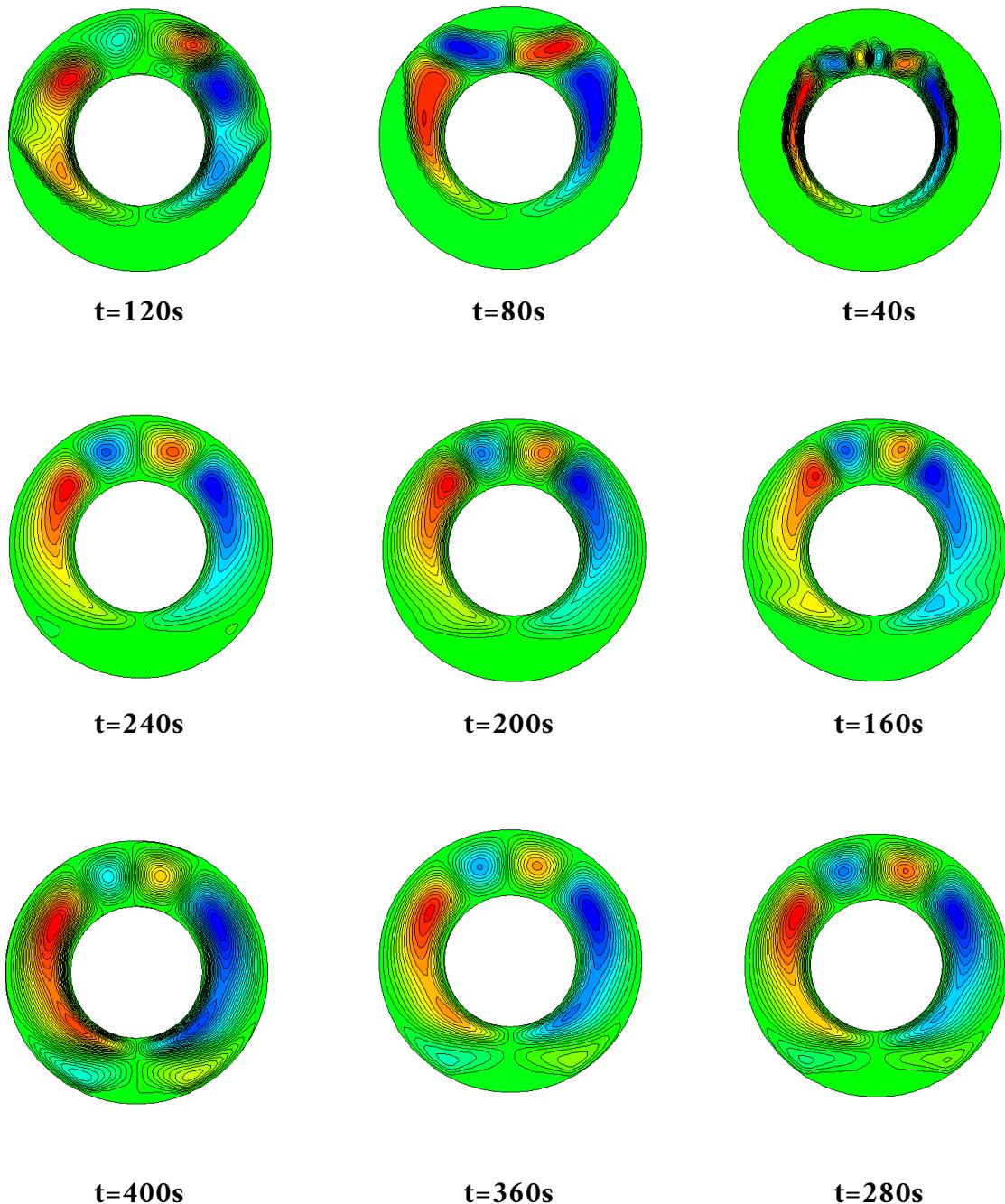
تزداد تيارات الحمل الحراري كلما زادت المنطقة المذابة داخل التجويف مشكلة دوامات صغيرة وأخرى كبيرة داخل المنطقة السائلة تتحرك في اتجاهات مختلفة. تكون سرعة جزيئات المائع المذاب كبيرة في مركز الدوامات و تباطأ سرعتها كلما ابتعدنا عن المركز. تؤدي إضافة جزيئات النحاس النانوية إلى تناقص في حركة جزيئات المائع بسبب الزيادة في عمل اللزوجة.



الشكل 3-13 : خطوط التيار خلال أزمنة مختلفة من أجل $\varphi = 0\%$



الشكل 3-14 : خطوط التيار خلال أزمنة مختلفة من أجل $\varphi = 1\%$.



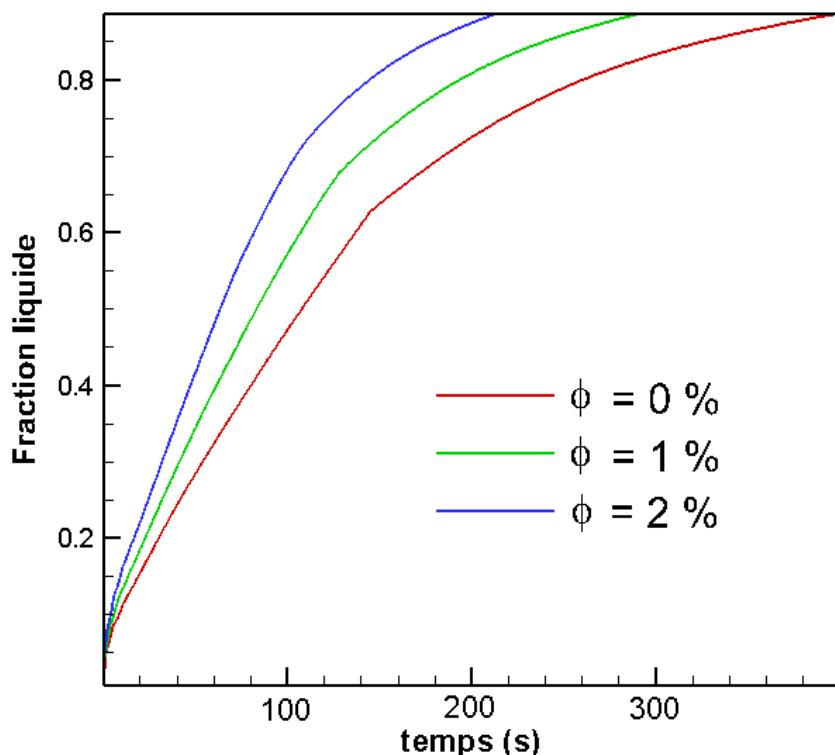
الشكل 3-15 : خطوط التيار خلال أزمنة مختلفة من أجل $\varphi = 2\%$.

3-10 تطور الكسر السائل مع الزمن

الجزء السائل هو النسبة بين الحجم الصلب المنصهر في الوقت t والحجم الكلي L_{MCP} لتحديد الكسر السائل ، يجب حساب الحجم المتصور بالنسبة للحجم الكلي.

يمثل الشكل (3-16) تغير الكسر السائل مع الزمن من أجل مختلف تركيز الجزيئات النانوية. نلاحظ من خلال الشكل أن منحنى الكسر السائل يمكن تقسيمه إلى جزئين أو قسمين ، في الجزء الأول ميل المنحنى يكون كبير لأن هناك عملية متسرعة للذوبان ، في هذه المرحلة تكون عملية التبادل الحراري المسيطر بالتوصيل، حيث ذابت كمية كبيرة من المادة في وقت زمني قصير، أما في الجزء الثاني من المنحنى، نلاحظ أن ميل المنحنيات يصبح صغير، حيث تباطأ عملية الذوبان في هذه المرحلة ويصبح انتقال الحرارة بالحمل هو المسيطر.

نلاحظ أيضاً من خلال الشكل بأن إضافة الجزيئات النانوية تؤثر بشكل كبير على وقت الذوبان حيث كلما زاد تركيز الجزيئات كلما قل زمن الذوبان.

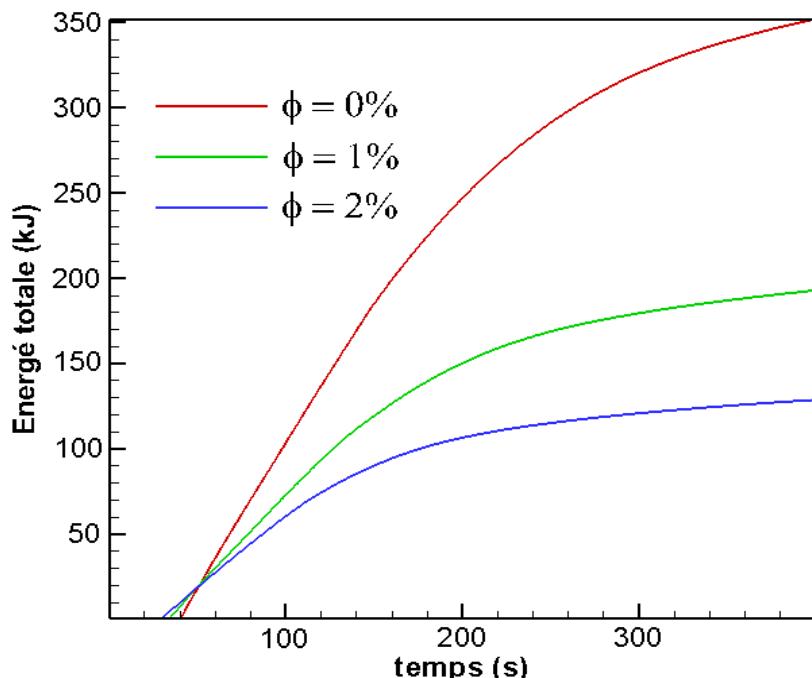


الشكل 3-16 : الكسر السائل خلال أزمنة مختلفة من أجل تركيز مختلف من الجزيئات النانوية.

11-3 الطاقة الحرارية المخزنة

يمثل الشكل (3-17) تغير الطاقة الكلية المخزنة مع الزمن من اجل تراكيز مختلفة من الجزيئات النانوية.

نلاحظ من خلال الشكل انه مع مختلف التراكيز تزداد كمية الطاقة المخزنة مع مرور الوقت حتى تصل إلى أقصى قيمة لها في نهاية عملية الشحن. الطاقة المخزنة الأعلى تكون للمائع النقي. تؤدي زيادة تركيز الجزيئات النانوية إلى تناقض بشكل ملحوظ في كمية الطاقة الكلية المخزنة و هذا راجع إلى تغير الخواص الفيزيائية ، حيث بالرجوع إلى الخواص الفيزيائية السابقة في الجدول (3-1) و العلاقة (3-15) تناقض الطاقة الكامنة للمائع النانوي بزيادة تراكيز الجزيئات بسبب زيادة الكثافة.



الشكل 3-17 : تغير الطاقة الكلية المخزنة مع الزمن من اجل تراكيز مختلفة من الجزيئات النانوية.

الخاتمة العامة

تعتبر أنظمة تخزين الطاقة الحرارية الكامنة من بين الطرق الفعالة لحفظ الطاقة وضمان وفرتها. حيث تعتبر من بين التكنولوجيات الرئيسية التي تسمح بتخزين الطاقة الحرارية على شكل تخزين كامن. تم تسليط الضوء في العديد من الأعمال على أنظمة تخزين الطاقة الحرارية الكامنة التي تعتمد على مواد تغير الطور (MCPs) والتي اعتبرت التقنية الأكثر فعالية لتخزين الطاقة الحرارية. وكون أن هذه المواد لها ناقلية حرارية ضعيفة فمن الضروري إيجاد حلول لتحسينها، تم اعتماد العديد من التقنيات لذلك نذكر منها على سبيل المثال: تضمين زعانف معدنية، إضافة جسيمات نانوية، إضافة رغوات معدنية، أنابيب الحرارة ... على هذا الأساس وضعنا المهدى من هذه الدراسة وهو التحقيق في تحسين الأداء الحراري لنظام تخزين الطاقة الحرارية الكامنة عن طريق تضمين جزيئات نانوية من النحاس المشتبه بكثيارات صغيرة في مادة تغير الطور MCP . قمنا بإجراء عملية المحاكاة العددية باستخدام برنامج ANSYS لدراسة تخزين الطاقة الحرارية الكامنة داخل مبادل حراري عن طريق ذوبان مادة تغير الطور.

في هذه الدراسة تم التحقيق في تحسين إنتقال الحرارة عن طريق تضمين لشتت جزيئات نانوية من النحاس (Cu) ذات الموصلية الحرارية العالية في مادة تغير الطور .

تم استخدام البرنامج ANSYS لإجراء المحاكاة العددية لدراسة تخزين الطاقة الحرارية داخل مبادل حراري ثنائي الأبعاد ومعرفة مدى تأثير إضافة تراكيز مختلفة من الجزيئات النانوية على عملية تخزين .

تم الحصول عدديا على أن وقت الذوبان ينخفض مع زيادة تراكيز الجزيئات النانوية بسبب زيادة الموصلية الحرارية للمائع النانوي .

زيادة تراكيز الجزيئات تؤدي إلى إنخفاض في الحرارة الكامنة للمذوبان مما أدى إلى نقصان في الطاقة الحرارية الكلية .

Abstract

In this work numerically, the efficacy of dispersion of copper nanoparticles (Cu) with different volume fractions on the melting performance of phase change material (PCM) in a tube heat exchanger has been discussed. The efficacy of nanoparticle combination on the flow structure and heat transfer attributes at various steps of the PCM melting process were analyzed and evaluated. Attaining a minimum melting time is regarded as the purpose of the optimization procedure. The melting time is considered for the whole volume fraction of the nanoparticles and the temperature of the heat transfer fluid. The results demonstrate that the dispersion of Cu nanoparticles with a volumetric fraction of 1% - 2% reduces the total melting time. The results also show that although the addition of nanoparticles in the primary stages of the melting process is not very effective, the melting rate increases over time and or increases the volume fraction.

Résumé:

dans ce travail numérique, l'efficacité de la dispersion des nanoparticules de cuivre (Cu) avec différentes fraction volumique sur les performances de fusion d'un matériau à changement de phase (PCM) dans un échangeur de chaleur à tube a été discutée. L'efficacité de la combinaison de nanoparticules sur la structure d'écoulement et les attributs de transfert de chaleur à différentes étapes du processus de fusion MCP a été analysée et évaluée. Atteindre un temps de fusion minimum est considéré comme le but de la procédure d'optimisation. Le temps de fusion est considéré pour toute la fraction volumique des nanoparticules et la température du fluide caloporteur. Les résultats démontrent que la dispersion des nanoparticules de Cu avec une fraction volumétrique de 1% - 2% réduit le temps de fusion total. Les résultats montrent également que bien que l'ajout de nanoparticules dans les étapes primaires du processus de fusion ne soit pas très efficace, la vitesse de fusion augmente avec le temps et/ou augmente la fraction volumique.

الملخص

في هذه الدراسة العددية ، تمت مناقشة فعالية تشتت جزيئات النحاس النانوية (Cu) بتركيز مختلفة على أداء ذوبان مادة تغيير الطور (PCM) في أنبوب مبادل حراري. تم تحليل وتقدير فعالية الجزيئات النانوية المركبة على شكل الجريان وخصائص نقل الحرارة في مراحل مختلفة من عملية ذوبان مادة تغيير الطور. يعتبر تحقيق الحد الأدنى من وقت الذوبان هو الغرض من إجراء التحسين. يتم أخذ بعين الاعتبار وقت الذوبان من أجل جميع تركيزات الجزيئات النانوية ودرجة حرارة سائل نقل الحرارة. توضح النتائج أن تشتت جزيئات النحاس النانوية مع تركيز من 1% إلى 2% يقلل من وقت الذوبان الكلي. تظهر النتائج أيضاً أنه على الرغم من أن إضافة الجسيمات النانوية في المراحل الأولية من عملية الذوبان ليست فعالة جداً ، إلا أن معدل الذوبان يزيد بمرور الوقت مع زيادة تركيز الجزيئات النانوية.