الجمهورية العربية السورية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جـامعــة دمشـــق

كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

قسم هندسة الميكانيك العام

رفع كفاءة دارات التبريد باستخدام المواد المتحولة الطور في المكثف والمبخر معاً

أطروحة مقدمة لنيل درجة الدكتوراه في هندسة التبريد

إعداد

م. عبد الهادي مروان مسالخي

إشراف

أ.د.م. وجيه محمد خير ناعمة

2022

قرار لجنة الحكم

أعضاء لجنة الحكم

د. وجيه ناعمة — الأستاذ في قسم هندسة الميكانيك العام — كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية
جامعة دمشق — الاختصاص: هندسة آلات التبريد — عضواً مشرفاً

د. علي سلامي — الأستاذ في قسم هندسة الميكانيك العام — كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية
جامعة دمشق — الاختصاص: تحويل الطاقة والقياسات الحرارية — عضواً

د. بسام كيروان — الأستاذ في قسم هندسة الميكانيك العام — كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية
جامعة البعث — الاختصاص: هندسة التبريد — عضواً

د. محمد سيف الدين الحلاق — الأستاذ المساعد في قسم هندسة الميكانيك العام — كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية
جامعة دمشق — الاختصاص: التحكم الآلي — عضواً

د. غسان مدلل — الأستاذ المساعد في قسم هندسة الميكانيك العام — كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية
جامعة دمشق — الاختصاص: التدفئة والتكييف — عضواً

تصريح خطي

أنا الموقع أدناه أصرح بعلمي الكامل وقبولي:

1. أن كل ما ينتج عن البحث والأطروحة هو ملكية فردية ومالية بالتشارك مع جامعة دمشق، وأنني ألتزم بأخذ موافقة الجامعة في حال رغبتي بنشر البحث أو الأطروحة أو جزء منها نصاً أو مضموناً خارج إطار الجامعة (من دور نشر أو مكتبات أو مواقع ألكترونية وغيرها من وسائل النشر).
2. أنه لا يوجد أي جزء من هذه الأطروحة مقتبس من عمل علمي آخر، أو أنجز للحصول على شهادة أخرى في جامعة دمشق أو أية جامعة أو معهد تعليمي داخل أو خارج الجمهورية العربية السورية.

الاسم والتوقيع

م. عبد الهادي مسالخي

شكر وتقدير للجهات التي تعاونت وأسهمت في تذليل العقبات وقدمت التسهيلات

ليس بعد تمام العمل من شيء أجمل ولا أحلى من الحمد، فالحمد لله والشكر له كما ينبغي لجلال وجهه وعظيم سلطانه.

ثم إنه لا يسعني إلا أن أشيد بالفضل وأقر بالمعروف لكل من أسهم في إنجاز هذا البحث، وأخص بالذكر أستاذي المشرف **أ.د.م وجيه ناعمة** على ما قدمه لي من علم ومعرفة ومتابعة، من قلب فاض بالمحبة والمودة والاحترام والتقدير لكم.

إن قلت شكراً فشكري لن يوفيكم حقاً سعيتم فكان السعي مشكوراً

كما لا يسعني إلا أن أتقدم بجزيل الشكر والامتنان لأستاذي **أ.د.م. بسام بدران** على ما خصني به من التوجيه والتصويب، الأستاذ المعطاء، الذي يقدم بلا مقابل ويمنح بنية رفع المستوى العلمي والأكاديمي للطلاب والذي أقول له إنه مهما نطقت الألسن بأفضالها، ومهما خطت الأيدي بوصفها، ومهما جسدت الروح معانيها تظل مقصرة أمام روعتك وعلو همتك.

إن جفَّ حبري عن التعبير يكتبه قلب به صفاء الحب تعبيرا

والامتنان لشركة الحافظ للصناعات الميكيانيكية في دمشق إدارة ومهندسين وفنيين على ما قدموه ويقدمونه من مقومات لطلاب جامعة دمشق وإسهامات لربط المنحى الأكاديمي بالواقع العملي وأخص بالذكر المهندس عبد الرحمن الدلول والأساتذة ماهر قاسم وفادي الجمّال ويوسف قزيها وشادي سلوم.

وخالص الشكر لأعضاء الهيئة التدريسية أساتذة قسم هندسة الميكانيك العام وأخص بالذكر أعضاء لجنة الحكم الموقرة.

د. وجيه ناعمة	الأستاذ في قسم هندسة الميكانيك العام	كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية	
جامعة دمشق	الاختصاص: هندسة آلات التبريد	عضواً مشرفاً	
د. علي سلامي	الأستاذ في قسم هندسة الميكانيك العام	كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية	
جامعة دمشق	الاختصاص: تحويل الطاقة والقياسات الحرارية	عضواً	
د. بسام كيروان	الأستاذ في قسم هندسة الميكانيك العام	كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية	

جامعة البعث الاختصاص: هندسة التبريد عضواً

د. محمد سيف الدين الحلاق الأستاذ المساعد في قسم هندسة الميكانيك العام كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

جامعة دمشق الاختصاص: التحكم الآلي عضواً

د. غسان مدلل الأستاذ المساعد في قسم هندسة الميكانيك العام كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

جامعة دمشق الاختصاص: التدفئة والتكييف عضواً

ومسك الختام ...

إلى ابتسامتي التي تبعث بوجودها الفرح ووردة عمري التي تنشر في حياتي الحب. إلى ثلاثة أحرف تحمل كل مشاعري وأنا أضعف الناس أمام حروفها الغالية. إلى من كانت دعواتها عنوان دربي وسر نجاحي وحنانها بلسماً لجراحي.

..... إلى أمي

إلى مثلي الأعلى في الاجتهاد والصبر الذي يرخص من أجلي دمه وحياته.

إلى من كان يصطاد بصنارة جهده الراحة لنا ويخطف بها التعب من قلبنا.

إلى سر قوتي في حياتي وهم الاسم الأوسط على واجهة أطروحتي.

..... إلى أبي

إلى النجوم التي تسير معي وتبقى في ذاكرتي ثابتة تضيء حياتي بأجمل اللحظات.

..... إلى إخوتي الأعزاء

إلى رفاق المشوار من شاركوني الصعاب والأفراح ستبقى محبتكم في قلبي ولن أمحوها مهما حدث.

..... إلى أصدقائي

فهرس المحتويات

فهرس المحتويات 1

فهرس الأشكال التوضيحية 6

فهرس الجداول..... 12

قائمة المصطلحات..... 14

المستخلص 18

الإطار العام للبحث 20

الملخص 22

1- المقدمة والدراسات المرجعية..... 24

1-1- الطرق المستخدمة لتحسين كفاءة البرادات والمجمدات المنزلية 25

1-2- زيادة كفاءة العزل الحراري في غلاف المجمدة والباب 26

1-2-1- تحسين كفاءة الضاغط..... 26

1-2-2- تحسين عملية انتقال الحرارة في المكثفات والمبخرات..... 26

1-3- التخزين الطاقي 27

1-3-1- طرق تخزين الطاقة 28

1-3-2- استخدامات تخزين الطاقة الحرارية..... 30

1-4- المواد المتغيرة الطور Phase Change Materials (PCMs)..... 31

1-4-1- تصنيف المواد المتحولة الطور 31

1-4-2- متطلبات المواد المتغيرة الطور (PCMs)..... 33

1-4-3- تطبيقات المواد المتغيرة الطور (PCMs) 35

1-4-4- تقييم المواد المتغيرة الطور (PCMs)..... 36

1-5- الدراسات المرجعية 38

1-5-1- الدراسة المرجعية الأولى (Mehmet Akif Ezan, 2017)..... 38

1-5-2- الدراسة المرجعية الثانية (R. Elarem, 2017)..... 39

1-5-3- الدراسة المرجعية الثالثة (B. Gin a, 2010)..... 41

1-5-4- الدراسة المرجعية الرابعة (Angelo Maiorino, 2020)..... 43

1-5-5 الدراسة المرجعية الخامسة(Wen-Long Cheng, 2013)..... 44

1-5-6- الدراسة المرجعية السادسة (NARESH KURUGONDA, 2017)..... 45

1-5-7- الدراسة المرجعية السابعة (G. Sonnenrein A. E., 2014)..... 47

1-5-8- الدراسة المرجعية الثامنة (Nilesh Purohit, 2019)..... 49

1-6- الإضافة العلمية التي سيقدمها البحث..... 50

2- الحالة الأساسية - المجمدة التقليدية..... 52

2-1- المراجع التي يجب الاعتماد عليها عند اختبارات التطوير للبرادات والمجمدات المنزلية 53

2-2- المجمدة المنزلية المختارة والتجربة الأساسية - المنصة الاختبارية..... 54

2-3- دراسة الحالة الأساسية عند درجة حرارة وسط محيط 32 ^{o}C..... 60

2-4- دراسة الحالة الأساسية عند درجة حرارة وسط محيط ^{o}C 38.....68

3- حالة المواد المتحولة الطور ضمن حجرة المجمدة 74

3-1- الحل التحليلي ومسألة ستيفان.....75

3-2- دراسة حالة تضمين المواد المتحولة الطور في حجرة المجمدة عند درجة حرارة وسط محيط ^{o}C 32

77.....

3-3- دراسة حالة تضمين المواد المتحولة الطور في حجرة المجمدة عند درجة حرارة وسط محيط ^{o}C 38

84.....

3-4- عيوب تضمين المواد المتحولة الطور ضمن حجرة المجمدة.....88

4- حالة تضمين المواد المتحولة الطور في جزء المكثف..... 89

4-1- دراسة حالة تضمين المواد المتحولة الطور في جزء المكثف عند درجة حرارة وسط محيط ^{o}C 32 ....

91.....

4-1-1- الشكل الهندسي لمكثف المجمدة المنزلية 91

4-1-2- اختيار المادة المتحولة الطور.....92

4-1-3- المحاكاة الحاسوبية.....94

4-1-4- المعادلات الرياضية التفاضلية الناظمة للمسألة المدروسة 94

4-2- دراسة حالة تضمين المواد المتحولة الطور في جزء المكثف عند درجة حرارة وسط محيط ^{o}C 38

104.....

4-2-1- اختيار المادة المتحولة الطور.....104

4-2-2- النتائج التجريبية.....112

5- حالة تضمين المواد المتحولة الطور في جزء المبخر وجزء المكثف معاً 116

5-1- تغير درجة حرارة التبخر ودرجة حرارة التكاثف 117

5-2- دورة التبريد ومعامل الأداء 119

6- مقارنة مؤشرات الأداء والنتائج 120

6-1- دراسة حالة تغير الشروط المحيطة 121

6-2- المقارنة الطاقية عند درجة حرارة وسط محيط ^{o}C 38 123

6-2-1- درجة حرارة التبخر 123

6-2-2- درجة حرارة التكاثف 124

6-2-3- مقارنة معاملات الأداء 126

6-3- زمن تشغيل وتوقف الضاغط للحالة المستقرة ونسب التشغيل 127

6-4- الاستطاعة المستجرة والاستهلاك الكهربائي اليومي 128

6-5- المقارنة الإكسرجية عند درجة حرارة وسط محيط ^{o}C 32 130

6-5-1- تحليل الإكسرجي والإكسرجي الضائع 130

6-5-2- مردود قانون الترمويناميك الثاني (مردود الإكسرجي) 133

6-6- أخطاء القياس 134

6-7- الجدوى الاقتصادية وفترة استرداد رأس المال 134

7- التوصيات 136

قائمة المراجع 138

8- الملحقات 145

نتائج برنامج EES للحالة الأساسية عند درجة حرارة وسط محيط ^{o}C 32 146

نتائج برنامج EES للحالة الأساسية عند درجة حرارة وسط محيط ^{o}C 38 147

نتائج برنامج EES لحالة المواد المتحولة الطور ضمن حجرة المجمدة عند درجة حرارة وسط محيط ^{o}C 32 148

نتائج برنامج EES لحالة المواد المتحولة الطور ضمن حجرة المجمدة عند درجة حرارة وسط محيط ^{o}C 38 149

نتائج برنامج EES لحالة المواد المتحولة الطور في جزء المكثف عند درجة حرارة وسط محيط ^{o}C 38 150

نتائج برنامج EES لحالة المواد المتحولة الطور في جزأي المبخر والمكثف عند درجة حرارة وسط محيط ^{o}C 38

..... 151

نتائج برنامج EES لدراسة انتقال الحرارة في المبخر 152

نتائج برنامج EES لدراسة انتقال الحرارة في المكثف 153

تحليل الإكسرجي..... 154

الأبحاث المنشورة 155

توثيق التجارب والنتائج..... 159

Abstract 160

فهرس الأشكال التوضيحية

الشكل 1-1: طرق تخزين الطاقة (Dincer, 2011).....29

الشكل 1-2: تصنيف المواد المتحولة الطور (صلب/سائل) (Dincer, 2011).....32

الشكل 1-3: تغير درجة حرارة الهواء مع وبدون PCM (Mehmet Akif Ezan, 2017). 39

الشكل 1-4: الحالات التي تمت دراستها عند تغير مواضع المادة المتحولة الطور ضمن حجرة المواد الطازجة وحجرة المواد المجمدة (R. Elarem, 2017).....40

الشكل 1-5: النسبة المئوية لمتوسط وقت التشغيل لكل دورة للضاغط عند الأحمال الحرارية المختلفة (R. Elarem, 2017).....41

الشكل 1-6: مقارنة تغير درجات حرارة حجرة المجمدة خلال ساعتي انقطاع لمصدر الطاقة الكهربائية مع وبدون PCM.....42

الشكل 1-7: مقارنة تغير درجات حرارة حجرة المجمدة خلال فتح باب المجمدة مع وبدون PCM.....42

الشكل 1-8: مقارنة تغير درجات حرارة حجرة المجمدة خلال عملية تذويب الجليد فتح باب المجمدة مع وبدون PCM.....43

الشكل 1-9: منحني DSC لمادة التحول الطوري المختارة 44

الشكل 1-10: الاستهلاك الكهربائي مع وبدون PCM.....45

الشكل 1-11: معامل الأداء مع وبدون PCM.....45

الشكل 1-12: مقارنة انخفاض الطاقة الكهربائية المستهلكة 46

الشكل 1-13: مقارنة معاملات الأداء 47

الشكل 1-14: صور المكثف بعد تضمين المواد المتحولة الطور 48

الشكل 1-15: نسب استهلاك الطاقة للحالات الجديدة مقارنة بالحالة الأساسية (من دون PCM).....49

الشكل 1-16: علاقة فترة استرداد رأس المال مع كتلة الطعام المبردة لحالة تضمين المواد المتحولة الطور ...50

الشكل 2-1: وحدات التجريب M-PACK.....57

الشكل 2-2: صورة أمامية توضح المبخر وصورة خلفية توضح المكثف للمجمدة المنزلية.....57

الشكل 2-3: المختبر التجريبي 58

الشكل 2-4: حساسات درجة الحرارة ضمن رفوف المجمدة.....58

الشكل 2-5: دراة تبريد المجمدة المنزلية.....59

الشكل 2-6: توضح حساسات درجة الحرارة للمنصة الاختبارية.....59

الشكل 2-7: وسيلة الحصول على البيانات – (Data Acquisition) 60

الشكل 2-8: تغير قيم حساسات درجات حرارة غرفة المختبر (الوسط المحيط) مع الزمن 61

الشكل 2-9: تغير متوسط درجات حرارة الوسط المحيط ودرجة حرارة التكاثف مع الزمن لدورتي عمل مستقرتين للضاغط.....62

الشكل 2-10: تغير درجة حرارة التبخر ودرجات حرارة المناسيب الأربعة ضمن حجرة المجمدة.....62

الشكل 2-11: متوسط درجات الحرارة في كل منسوب من المناسيب الأربعة لحجرة المجمدة ودرجة حرارة التبخر 63

الشكل 2-12: تغير درجة حرارة الخروج من المبخر وسحب الضاغط مع الزمن.....64

الشكل 2-13: تغير درجة حرارة الخروج من المكثف والدخول للأنبوبة الشعرية مع الزمن.....64

الشكل 2-14: مخطط p-h لدورة التبريد للحالة الأساسية.....66

الشكل 2-15: إحدى الصور الحرارية التجريبية التي أُخذت لجزء من مكثف المجمدة عند عمل الضاغط.....67

الشكل 2-16: تغير درجات حرارة المكثف مع المسافة ابتداءً من نقطة الخروج من الضاغط.....67

الشكل 2-17: تغير قيم حساسات درجات حرارة غرفة المختبر مع الزمن 68

الشكل 2-18: تغير متوسط درجات حرارة الوسط المحيط ودرجة حرارة التكاثف مع الزمن لدورتي عمل مستقرتين للضاغط.....69

الشكل 2-19: تغير درجة حرارة التبخر ودرجات حرارة المناسيب الأربعة ضمن حجرة المجمدة.....69

الشكل 2-20: متوسط درجات الحرارة في كل منسوب من المناسيب الأربعة لحجرة المجمدة ودرجة حرارة التبخر 70

الشكل 2-21: تغير درجة حرارة الخروج من المبخر وسحب الضاغط مع الزمن.....71

الشكل 2-22: تغير درجة حرارة الخروج من المكثف والدخول للأنبوبة الشعرية مع الزمن.....71

الشكل 2-23: مخطط p–h لدورة التبريد للحالة الأساسية.....72

الشكل 3-1: مسألة ستيفان لصفيحة.....76

الشكل 3-2: السماكات المطلوبة لمادة التحول الطوري في كل منسوب من منسوب المجمدة.....78

الشكل 3-3: عملية قياس التراكيز لمحلول غليكول إيثيلين 81

الشكل 3-4: توضع مادة التحول الطوري ضمن رفوف المجمدة.....81

الشكل 3-5: درجة حرارة وسط المبخر ودرجات الحرارة ضمن حجرة المجمدة مع الزمن للحالة الجديدة 82

الشكل 3-6: متوسط درجات الحرارة في كل منسوب من المناسيب الأربعة للحالة الجديدة.....82

الشكل 3-7: مخطط p–h لحالة تضمين PCMs ضمن جدرة المجمدة عند درجة حرارة وسط محيط 32 ^{o}C 83

الشكل 3-8: السماكات المطلوبة لمادة التحول الطوري في كل منسوب من منسوب المجمدة.....84

الشكل 3-9: تغير درجة حرارة وسط المبخر ودرجات الحرارة ضمن حجرة المجمدة مع الزمن 86

الشكل 3-10: متوسط درجة حرارة التبخر ومتوسط درجات الحرارة في كل رف من رفوف المجمدة المنزلية. ..86

الشكل 3-11: مخطط p–h لحالة تضمين PCMs ضمن جدرة المجمدة عند درجة حرارة وسط محيط 38 ^{o}C 88

الشكل 4-1: مكثف المجمدة المنزلية المختارة 91

الشكل 4-2: زمن انتهاء عملية التصلب والانصهار للبارافينات المستخدمة في التجربة الحاسوبية 96

الشكل 4-3: درجات حرارة الانصهار بعد 1 دقيقة..... 99

الشكل 4-4: درجات حرارة الانصهار بعد 6 دقيقة..... 99

الشكل 4-5: درجات حرارة الانصهار بعد 11 دقيقة..... 99

الشكل 4-6: درجات حرارة الانصهار بعد 14 دقيقة..... 99

الشكل 4-7: درجات حرارة الانصهار بعد 15 دقيقة..... 100

الشكل 4-8: كسر التحول الطوري للانصهار بعد 1 دقيقة..... 100

الشكل 4-9: كسر التحول الطوري للانصهار بعد 6 دقيقة..... 100

الشكل 4-10: كسر التحول الطوري للانصهار بعد 11 دقيقة..... 100

الشكل 4-11: كسر التحول الطوري للانصهار بعد 14 دقيقة..... 101

الشكل 4-12: كسر التحول الطوري للانصهار بعد 15 دقيقة..... 101

الشكل 4-13: درجات حرارة التصلب بعد 1 دقيقة..... 101

الشكل 4-14: درجات حرارة التصلب بعد 6 دقيقة..... 101

الشكل 4-15: درجات حرارة التصلب بعد 9 دقيقة..... 102

الشكل 4-16: درجات حرارة التصلب بعد 10 دقيقة..... 102

الشكل 4-17: كسر التحول الطوري للتصلب بعد 1 دقيقة..... 102

الشكل 4-18: كسر التحول الطوري للتصلب بعد 6 دقيقة..... 102

الشكل 4-19: كسر التحول الطوري للتصلب بعد 9 دقيقة..... 103

الشكل 4-20: كسر التحول الطوري للتصلب بعد 10 دقيقة 103

الشكل 4-21: تغير كسر التحول الطوري خلال عمليتي الانصهار والتصلب..... 103

الشكل 4-22: نموذج مكثف المجمدة المنزلية باستخدام برنامج ANSYS..... 105

الشكل 4-23: علاقة زمن انتهاء عملية التجمد والانصهار للمادة المتحولة الطور (شمع البارفين) عند درجات حرارة تحول طوري وسماكات مختلفة 105

الشكل 4-24: درجات حرارة الانصهار بعد 1 دقيقة 107

الشكل 4-25: درجات حرارة الانصهار بعد 6 دقيقة 107

الشكل 4-26: درجات حرارة الانصهار بعد 11 دقيقة 107

الشكل 4-27: درجات حرارة الانصهار بعد 16 دقيقة 107

الشكل 4-28: درجات حرارة الانصهار بعد 19 دقيقة 108

الشكل 4-29: درجات حرارة الانصهار بعد 20 دقيقة 108

الشكل 4-30: تغير الكسر الكتلي مع الزمن للانصهار والتجمد 108

الشكل 4-31: تغير متوسط درجة حرارة المادة المتحولة الطور مع الزمن للانصهار والتجمد..... 109

الشكل 4-32: نتائج الماسح الكالومتري التفاضلي 110

الشكل 4-33: اختبار العينة البارافينية 111

الشكل 4-34: تغير متوسط قراءتي حساسي درجة الحرارة مع الزمن\..... 111

الشكل 4-35: رسم الخزان على برنامج Solid Work 112

الشكل 4-36: تركيب الخزان (a)..... 113

الشكل 4-37: تركيب الخزان (b)..... 113

الشكل 4-38: تركيب الخزان (c)..... 114

الشكل 4-39: تغير درجة حرارة وسط المكثف (درجة حرارة التكاثف) ودرجة حرارة الوسط المحيط مع الزمن 115

الشكل 4-40: مخطط h–p لحالة PCM بجزء المكثف عند درجة حرارة وسط محيط ^{o}C 38..... 115

الشكل 5-1: تغير درجة حرارة التبخر مع الزمن 118

الشكل 5-2: تغير درجة حرارة التكاثف مع الزمن..... 118

الشكل 5-3: مخطط p–h 119

الشكل 6-1: تغير درجة حرارة التكاثف عند درجة حرارة وسط محيط ^{o}C 25 مع وبدون مواد تحول طوري . 122

الشكل 6-2: تغير قيم الموصلية الحرارية والسعة الحرارية ومساحة سطح التبادل الحراري بين حالتي وجود صندوق التخزين (بدون تحول طوري) وبدونه 123

الشكل 6-3: تغير درجة حرارة التبخر مع الزمن لدورتي عمل مستقرتين للضاغط 124

الشكل 6-4: متوسط درجة حرارة التبخر لكل حالة ومقدار الاختلاف عن الحالة الأساسية 124

الشكل 6-5: تغير درجة حرارة التكاثف مع الزمن لدورتي عمل مستقرتين للضاغط..... 125

الشكل 6-6: متوسط درجة حرارة التكاثف لكل حالة ومقدار الاختلاف عن الحالة الأساسية..... 125

الشكل 6-7: مقارنة معاملات الأداء للحالات المدروسة ومقدار الاختلاف عن الحالة الأساسية..... 126

الشكل 6-8: مخطط h–p لكل من دورتي التبريد الأساسية والحالة الجديدة لتضمين المواد المتحولة الطور في المكثف والمبخر معاً 127

الشكل 6-9: زمن التشغيل وزمن التوقف للضاغط في كل حالة ومقدار الاختلاف عن الحالة الأساسية 128

الشكل 6-10: نسبة زمن التشغيل لكل حالة ومقدار الاختلاف عن الحالة الأساسية 128

الشكل 6-11: تغير الاستطاعة الكهربائية المستجرة مع الزمن..... 129

الشكل 6-12: الاستهلاك الكهربائي اليومي لكل حالة ومقدار الاختلاف عن الحالة الأساسية..... 130

الشكل 6-13: الإكسرجي الضائع في كل جزء من أجزاء الدارة لكل حالة من الحالات المدروسة..... 132

الشكل 6-14: الإكسرجي الكلي الضائع لكل حالة من الحالات المدروسة ومقدار الاختلاف عن الحالة الأساسية 132

الشكل 6-15: مقارنة بين مراديد الإكسرجي لكل حالة من الحالات المدروسة..... 133

فهرس الجداول

جدول 1-1: مقارنة تقنية لأنظمة التخزين (Dincer, 2011).....30

جدول 1-2: مقارنة اقتصادية لأنظمة التخزين (Dincer, 2011) 31

جدول 1-3: خواص بعض المواد المتغيرة الطور العضوية (Dincer, 2011) 32

جدول 1-4: خواص بعض المواد المتغيرة الطور اللاعضوية (Dincer, 2011).....33

جدول 1-5: مواصفات المواد المتحولة الطور مع الأغلفة المستخدمة.....48

جدول 2-1: بارامترات وشروط الاختبار بحسب AHAM HRF-01 54

جدول 2-2: مواصفات المجمدة المختارة لإجراء التجارب 56

جدول 2-3: بارمترات نقط دارة التبريد للحالة الأساسية.....65

جدول 2-4: بارمترات نقط دارة التبريد للحالة الأساسية.....72

جدول 3-1: تراكيز مركب غليكول-إيثيلين والمواصفات الفيزيو-حرارية عند درجات حرارة التحول الطوري المطلوبة 79

جدول 3-2: القيم الناتجة عن حل معادلات انتقال الحرارة.....80

جدول 3-3: مقارنة بين أعلى وأقل درجة حرارة ضمن حجرة المجمدة بين الحالة الأساسية والحالة الجديدة 82

جدول 3-4: تراكيز مركب غليكول-إيثيلين والمواصفات الفيزيو-حرارية عند درجات حرارة التحول الطوري المطلوبة 85

جدول 3-5: مقارنة بين أعلى وأقل درجة حرارة ضمن حجرة المجمدة بين الحالة الأساسية والحالة الجديدية ...87

جدول 4-1: البارفينات المستخدمة في التجارب (الصيغ الكيميائية، درجات حرارة التحول الطوري وانتالبي الانصهار) (KAHWAJI, S, MICHEL, B, JOHNSON, 2018) 92

جدول 4-2: المواصفات الثيرموفيزيائية للبارافينات المستخدمة في التجارب (KAHWAJI, S, MICHEL, B, JOHNSON, 2018).....93

جدول 4-3: المواصفات والفيزو–حرارية ودرجات حرارة الانصهار للبارافينات المستخدمة في المحاكاة الحاسوبية 93

جدول 4-4: القيم الناتجة عن حل معادلات انتقال الحرارة.....98

جدول 6-1: خطأ القياس المطلق.....134

جدول 6-2: خطأ القياس النسبي للنتائج 134

جدول 6-3: التكاليف التأسيسية الأولية 135

قائمة المصطلحات

Phase Change Material: Substances that change from a solid state to a liquid or vice versa at an almost constant temperature and pressure.	**المواد المتحولة الطور**: وهي المواد التي تتحول من حالة صلبة إلى سائلة أو بالعكس عند درجة حرارة وضغط ثابتين تقريباً.
Evaporating Temperature: the temperature equivalent to the evaporating pressure.	**درجة حرارة التبخر**: وهي درجة الحرارة المكافئة لضغط التبخر.
Condensing Temperature: the equivalent temperature of condensing pressure.	**درجة حرارة التكاثف**: وهي درجة الحرارة المكافئة لضغط التكاثف.
Coefficient of Performance: The ratio between refrigeration effect and specific work of the compressor .	**معامل أداء دارة التبريد**: وهو النسبة بين الإنتاجية التبريدية والعمل النوعي للضاغط.
Exergy: the maximum work that can be provided by system in a reversible process in a system with certain initial state and surrounding conditions.	**الإكسرجي**: وهو العمل الأعظمي الذي يمكن أن يعطيه نظام ما بعملية عكوسة بين حالة ابتدائية معينة وشروط محيطة.
Second Law Efficiency: The ratio of the real cycle efficiency (first law efficiency) to the ideal cycle efficiency under the same conditions.	**مردود قانون الترموديناميك الثاني:** نسبة المردود الحقيقي للدورة (مردود القانون الأول) إلى مردود الدورة المثالية عند الشروط نفسها.
Stefan Condition: the velocity of the moving boundary as a function of the boundary conditions.	**شرط ستيفان**: يعبر عن سرعة الحدود المتحركة كتابع للشروط الحدية.

Solidification Time: the time at which the freezing process ends.	**زمن التجمد:** وهو الزمن الذي تستغرقه عملية التجمد.
Melting Time: the time at which the melting process ends.	**زمن الانصهار:** وهو الزمن الذي تستغرقه عملية الانصهار.
Phase Change Mass Fraction: It is the ratio between the liquid mass to the total mass, and it is (0) in the case of all mass is solid and tit is (1) in the case of all mass is liquid.	**الكسر الكتلي للتحول الطوري:** هو النسبة بين الكتلة السائلة إلى الكتلة الكلية ويأخذ القيمة (0) بحالة الكتلة كلها صلبة ويأخذ القيمة (1) بحالة الكتلة كلها سائلة.

Nomenclature **الرموز**

الرمز	Description	الشرح	الواحدة
k	Thermal Conductivity	معامل التوصيل الحراري	$W/m.$℃
T	Absolute Temperature	درجة الحرارة المطلقة	K
C_p	Heat Capasity	السعة الحرارية بثبات الضغط	J/kg℃
S	Inteface Location	موقع السطح الفاصل	m
t	Time	الزمن	s
h_{fg}	Heat of Fusion	حرارة التحول الطوري	J/kg
x	x coordinate	الإحداثي x	m
r	Radius	نصف القطر	m
l	Characteristic Length	الطول المميز	m
g	Gravity	تسارع الجاذبية الأرضية	m/s^2
A	Area	المساحة	m^2
V	Volume	الحجم	m^3

m	Mass	الكتلة	kg
h_{conv}	Natural Convection Heat Transfer Coefficient	معامل انتقال الحرارة بالحمل الطبيعي	$W/m^2.K$
U	Overall Heat Transfer Coefficient	معامل انتقال الحرارة الكلي	$W/m^2.K$
P	Pressure	الضغط	kPa
s	Specific Entropy	الإنتروبي النوعي	$kJ/kg.K$
h	Specific Enthalpy	الإنتالبي النوعي	kJ/kg
w	Specific Power	العمل النوعي	kJ/kg
Ex_{dest}	Specific Destoyrd Exergy	الإكسـرجي النـوعي الضائع	
Q	Thermal Capacity	الاستطاعة الحرارية	W
V	Velocity	السرعة	m/s
Greek symbols			**الرموز اليونانية**
λ	Stefan Function	تابع لعدد ستيفان	–
ρ	Density	الكثافة	$\mathrm{kg/m^3}$
μ	Dynamic Viscosity	اللزوجة التحريكية	$\mathrm{Ns/m^2}$
$\alpha_{s=}\frac{k_s}{\rho C_p}$	Thermal diffusivity	الانتشارية الحرارية للطور الصلب	$\mathrm{m^2s^{-1}}$
θ	Mass Concentration Ratio	نسبة التركيز الكتلي	–
$\square = \mu/\rho$	kinematic Viscosity	اللزوجة الحركية	m^2/s
β	Volume Expansioz Coefficient	معامل التمدد الحجمي	$1/K$
η_{ex}	Second Law Efficiency	مردود القانون الثاني	–
Subscripts			**الرموز السفلية**
sur	Surrounding	المحيط	
l	Liquid	سائل	
s	Solid	صلب	
m	Melting	الانصهار	
$comp$	Compressor	ضاغط	
eva	Evaporator	مبخر	

$cond$	Condenser	مكثف
$H.EX$	Heat Exchanger	مبادل حراري
$capillary$	Capillary	الأنبوبة الشعرية
o	Dead Point	النقطة الميتة
use	Used	المفيد

Dimensional Number **الأعداد اللابعدية**

$St = \frac{C_p(T_m - T_{sur})}{h_{fg}}$	Dimensional Stefan number, which represents the ratio between the sensible and latent heat of a phase change material	عدد ستيفان اللابعدي ويمثل النسبة بين كمية الحرارة المحسوسة والكامنة لمادة التحول الطوري
$Nu = \frac{h_{conv} l}{k}$	Dimensional Nusselt number, represents the enhancement of heat transfer through a fluid layer as a result of convection relative to conduction across the same fluid layer.	عدد نوسلت اللابعدي ويمثل النسبة بين انتقال الحرارة بالحمل إلى انتقال الحرارة بالتوصيل لنفس المائع
$Re = \frac{Vl}{\upsilon}$	Dimensional Reynolds number, Represents the viscous diffusivity or diffusivity for momentum	عدد رينولدز اللابعدي ويمثل نسبة قوى العطالة إلى قوى اللزوجة
$Pr = \frac{\mu C_p}{k}$	Dimensional Prandtl Number The relative thickness of the velocity and the thermal boundary layers	عدد براندل اللابعدي ويمثل النسبة بين سماكتي الطبقتين الحركية والحرارية

Abbreviations **الاختصارات**

PCM	Phase Change Material	مادة التحول الطوري
TES	Thermal Energy Storage	تخزين الطاقة الحرارية
COP	Coefficient of Performance	معامل الأداء
CSE	Cold Storage Energy	التخزين الحراري البارد
HSE	Heat Storage Energy	التخزين الحراري الساخن

المستخلص

خلفية البحث

إن جميع الدراسات المرجعية والتي اختصت بتضمين المواد المتحولة الطور ضمن البراد أو المجمدة المنزلية سواء كان في حجرة المجمدة أو المكثف لم تقدم أية آلية لتحديد السماكات المثلى لمواد التحول الطوري وهو ما تم نتاجه في هذا البحث.

هدف البحث

الاستفادة المثلى من عملية التحول الطوري والتخزين الكامن وتقليل التخزين المحسوس ما أمكن عند تضمين مواد متحولة الطور في المجمدة المنزلية.

المواد والطرائق

تمت الاستعانة بمختبرات شركة الحافظ للصناعات الميكانيكية في دمشق بغية القيام بالإجراءات التجريبية، كما تم الاعتماد في الدراسة النظرية التحليلية والعددية على برنامجي EES وANSYS.

النتائج العملية

قدم البحث مقارنة لمؤشرات الأداء (معامل الأداء، الاستهلاك الكهربائي، الإكسرجي الضائع، مردود قانون الترموديناميك الثاني) بين الحالة الأساسية وحالة تضمين المواد المتحولة الطور في المكثف والمبخر.

الاستنتاجات من وجهة نظر الباحث

لوحظ تحسنٌ في معاملات الأداء عن الحالة الأساسية بقيمة 13.46%، 5.95%، 19.78% لحالة تضمين المواد المتحولة الطور في جزء المبخر، حالة تضمين المواد المتحولة الطور في جزء المكثف، حالة تضمين المواد المتحولة الطور في جزأي المبخر والمكثف معاً على الترتيب.

الكلمات المفتاحية

المجمدة المنزلية، المواد المتحولة الطور، التخزين الحراري الكامن البارد، التخزين الحراري الكامن الساخن، شمع البارافين، محلول غليكول إيثيلين، مؤشرات الأداء.

الإطار العام للبحث

مقدمة

ركز هذا البحث على عمليات التطوير لأداء دارة تبريد مجمدة منزلية من خلال دمج تقنية المواد المتحولة الطور في المبادلات الحرارية (المبخر والمكثف) لدارة التبريد.

بعض الدراسات السابقة

سيتم شرح الدراسات المرجعية التي تم الاعتماد عليها في البحث وذكر النتائج التي توصل إليها كل باحث.

مشكلة البحث

عدم وجود منهجية كافية لتحديد بارامترات المواد المتحولة الطور الممكن استخدامها في المجمدات المنزلية.

هدف البحث

إن الهدف الأساسي من البحث هو تحديد بارامترات المواد المتحولة الطور عند تضمينها في جزأي المكثف والمبخر معاً. الاستفادة المثلى من عملية التحول الطوري والتخزين الكامن وتقليل التخزين المحسوس ما أمكن عند تضمين المواد المتحولة الطور في المجمدة المنزلية.

أهمية البحث

يهدف البحث إلى مقارنة مؤشرات الأداء الرئيسية للحالة الأساسية والحالات الجديدة وتحديد مقدار الوفر في استهلاك الطاقة الكهربائية وبيان الجدوى الاقتصادية.

مسوغات البحث

في العقود الأخيرة، جذبت المواد المتحولة الطور أنظار الباحثين نظراً لما يحمله التخزين الحراري الكامن من أهمية في كبر السعة التخزينية مقارنة بالمساحة التي يشغلها حيث إن السعة التخزينية خلال عملية التحول الطوري أكبر بمقدار 200–100 مرة من التخزين المحسوس.

محددات البحث

تمت دراسة تأثير تضمين المواد المتحولة الطور على ضغطي التبخر والتكاثف لمجمدة منزلية والذي ينعكس بدوره على بقية مؤشرات الأداء.

حدود البحث

تم إجراء التجارب المطلوبة على منصة اختبارية لمجمدة منزلية ضمن مختبرات شركة الحافظ للصناعات الميكانيكية في مدينة دمشق.

منهج البحث وأدواته

اتبع البحث المنهج التحليلي والعددي والتجريبي لتحديد البارامترات المطلوبة واستخلاص النتائج.

الملخص

جرى في هذا البحث دراسة تأثير تضمين المواد المتحولة الطور في جزأي المبخر والمكثف على مؤشرات الأداء لمجمدة منزلية (درجة حرارة التبخر، درجة حرارة التكاثف، معامل الأداء، نسبة زمن التشغيل، الاستهلاك الكهربائي، الإكسرجي، مردود قانون الترموديناميك الثاني).

تم في البداية القيام بإجراء تجريبي لدراسة الحالة التقليدية عند درجتي حرارة وسط محيط $32^{o}C$, $38\ ^{o}C$ لتحديد درجات حرارة التبخر والتكاثف وزمن تشغيل وتوقف الضاغط عن العمل خلال دورة عمل مستقرة. ومن ثم وباستخدام الحلول التحليلية والمحاكاة الحاسوبية، تم تحديد البارامترات المثلى للمادة المتحولة الطور سواء كانت في جزء المبخر أو جزء المكثف. وبعد ذلك، تمت إعادة التجارب باستخدام المواد المتحولة الطور وتقييم التحسين في مؤشرات أداء المجمدة المنزلية.

وُجد أن استخدام المواد المتحولة الطور في جزأي المبخر والمكثف يرفع من قيمة معامل الأداء بمقدار 19.78% ويخفض من نسبة زمن التشغيل واستهلاك الطاقة الكهربائية بنسبة 13.27%، 15.39% كما ويحد من الإكسرجي الكلي المهدور في الدارة بنسبة 29%.

تمت دراسة الحالة الأسوأ لتغير الشروط المحيطة والتصميمية على درجة حرارة التكاثف بين الحالتين الأساسية وحالة تضمين المواد المتحولة في جزء المكثف وهي حالة عدم حدوث تحول طوري للمادة المتحولة الطور ولوحظ انخفاضٌ في درجة حرارة التكاثف بنسبة 1.6% للحالة الجديدة عن التقليدية.

الكلمات المفتاحية

المجمدة المنزلية، المواد المتحولة الطور، التخزين الحراري الكامن البارد، التخزين الحراري الكامن الساخن، شمع البارافين، محلول غليكول إيثيلين، مؤشرات الأداء.

الفصل الأول

1- المقدمة والدراسات المرجعية

في الوقت الحاضر تعتبر قضايا الطاقة وما يتعلق بها من تطوير الآليات التي تساعد على تخفيضها أمراً ملحاً بالنسبة للمهندسين والمختصين. على اعتبارها واحدة من أكثر الأجهزة المنزلية شيوعاً، فإن المجمدات المنزلية تستهلك ما يقدر بنحو 33% من الاستهلاك المنزلي للكهرباء. ولا يقتصر الأمر على التخفيض من استهلاك الطاقة فحسب، بل إن تقليل التلوث مهم أيضاً ويرتبط ارتباطاً وثيقاً بالطلب على الطاقة (Wen-Long Cheng, 2013).

إن عدد البرادات والمجمدات المنزلية عالمياً يقدر بحوالي 1.5 مليار براد ومجمدة، وتستهلك من الكهرباء ما قيمته 8% من الاستهلاك العالمي، وتتسبب سنوياً بتوليد 480 مليون طن مكافئ من غاز ثاني أكسيد الكربون CO_2. (G. Sonnenrein E. B., 2020), (Jonathan Cofre-Toledo D. A.-R., 2018).

ينبعث ما يقرب من 40٪ من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون العالمية من توليد الكهرباء من خلال احتراق الوقود الأحفوري لتوليد الحرارة اللازمة لتشغيل المحطات الحرارية. وينتج عن حرق هذه الأنواع من الوقود إنتاج ثاني أكسيد الكربون (CO_2) وهو السبب الرئيسي للاحتباس الحراري (Lamiaa Abdallah, 2013).

بحسب الدراسات، فإنه يمكن توفير 0.23314 kg CO_2 عند توفير استهلاك 1 kWh (RenSMART, n.d.).

1-1- الطرق المستخدمة لتحسين كفاءة البرادات والمجمدات المنزلية

بحسب منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية OECD فإن أكبر استهلاك للطاقة الكهربائية في المنازل تصرف للتبريد والتجميد. في السنوات الأخيرة، بُذل العديد من الجهود لتخفيض استهلاك البرادات والمجمدات المنزلية من الطاقة الكهربائية من قبل مؤسسات البحث العلمي والشركات المصنعة. يتم تخفيض استهلاك الطاقة الكهربائية في البرادات المنزلية إما بواسطة تحسين كفاءة عملية التبريد أو بتحسين

عملية تحويل الطاقة الكهربائية إلى طاقة ضغط لزوم عملية التبريد وذلك بواسطة إحدى الطرق التالية (Jonathan Cofre-Toledo D. A.-R., 2018):

1-2- زيادة كفاءة العزل الحراري في غلاف المجمدة والباب

إن استخدام ألواح البولي يوريثان ذات معامل توصيل حراري 0.02 W/m.K بدلاً من البوليسترين ذات معامل توصيل حراري 0.03 W/m.K والذي كان شائع الاستخدام حتى ثمانينيات القرن الماضي يخفض قيمة الحمل التبريدي حتى 30%. أيضاً فإن استخدام الألواح المعزولة باستخدام تقنية الفاكيوم (Vacuum Insulated Panels – VIPs) ذات معامل توصيل حراري 0.002-0.04 W/m.K تخفض كمية الحرارة المتسربة عبره 50% عن استخدام ألواح البولي يوريثان. إلا أن الوثوقية المنخفضة للألواح المفرغة وتكاليف الإنتاج المرتفعة حالت دون انتشار استخدامها. (Jonathan Cofre-Toledo D. A.-R., 2018) ويجب تحديد السماكة الاقتصادية للعازل الحراري في حالة زيادة سماكة العازل الحراري للتعويض عن انخفاض معامل التوصيل الحراري.

1-2-1- تحسين كفاءة الضاغط

إن استخدام الضواغط المتغيرة السرعة تتيح الانتقال من عملية التشغيل المتقطع on/off للضاغط إلى عملية التشغيل المستمر بسرعات متغيرة تبعاً للحمل التبريدي.

باستخدام الضواغط المتغيرة السرعة تقل فواقد الاحتكاك وفواقد الضغط كما تنخفض درجة حرارة التكاثف وترتفع درجة حرارة التبخر، ما يؤدي إلى تخفيض استهلاك الطاقة الكهربائية بحدود 30% (Jonathan Cofre-Toledo D. A.-R., 2018). ومع ذلك فإن تقنية الضواغط المتغيرة السرعة لا تستخدم بشكل كبير في المنازل بسبب ارتفاع كلفتها.

1-2-2- تحسين عملية انتقال الحرارة في المكثفات والمبخرات

إن الكفاءة العظمى في عملية التبريد يمكن الحصول عليها بتصغير الفرق بين درجة حرارة التكاثف ودرجة حرارة التبخر.

ارتفاع درجة حرارة التبخر بمقدار درجة مئوية واحدة يخفض من استهلاك الطاقة بمقدار حتى 4%. كذلك بتوسيع مساحة سطح التبادل الحراري الفعال للمكثف والمبخر 50% ينخفض من استهلاك الطاقة الكهربائية بمقدار 6%، 10% على الترتيب (Jonathan Cofre-Toledo D. A.-R., 2018). وهناك خيار آخر لتحسين عملية انتقال الحرارة في المبادلات وهو التهوية القسرية لتحسين عملية انتقال الحرارة بالحمل. ومع ذلك، يجب أن تؤخذ الاستطاعة الكهربائية للمروحة بالحسبان عند حساب نسبة كفاءة الطاقة للبراد.

للمواد المتحولة الطور إمكانية كبيرة في تحسين معامل الأداء للبرادات والمجمدات المنزلية بنسبة تصل إلى 47% (Adil A.M. Omara, 2020) وذلك عن طريق تزويد حجرة المجمدة بالمواد المتحولة الطور PCMs.

1-3- التخزين الطاقي

تخزين الطاقة الحرارية (Thermal Energy Storage-TES) هي تقنية تخدم خفض الاستجرار الكبير للطاقة في أوقات الذروة وخاصة في التطبيقات الحرارية مثل التدفئة، تسخين المياه، التبريد، تكييف الهواء. تمتلك أنظمة التخزين الحراري إمكانيات ضخمة لتسهيل الاستخدام الأمثل للمعدات الحرارية وبدائل اقتصادية للطاقة على نطاق واسع. تظهر أنظمة تخزين الطاقة الحرارية على أنها الطريق الأنسب لتصحيح عدم التطابق بين العرض والطلب على الطاقة. لذلك فهي تقنية جيدة لتقابل احتياجات المجتمع واستخدام الطاقة بكفاءة أعلى وسلامة بيئية أكبر. إن أنظمة تخزين الطاقة الحرارية قديمة جداً قدم الحضارة ذاتها حيث تم حصاد الجليد وتخزينه لاستخدامات لاحقة. في العصر الحديث، تم استخدام أنظمة تخزين الطاقة الحرارية في العديد من التطبيقات بدءاً من تخزين المياه المسخنة بالطاقة الشمسية حتى بناء أنظمة تكييف الهواء. مؤخراً تم تطوير هذه التقنية إلى النقطة التي يمكن أن يكون لها تأثير كبير على التقنيات الحديثة في توفير استهلاك الطاقة. إن أنظمة تخزين الطاقة الحرارية هي مفتاح للعديد من الأنظمة الحرارية

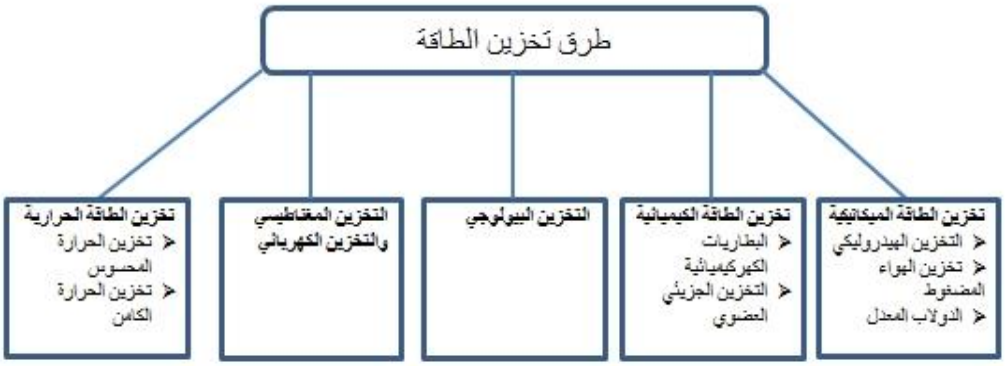
الناجحة. وحتى الآن ما زالت الأبحاث والاكتشافات مستمرة حولها. كما أن أنظمة تخزين الطاقة الحرارية الجيدة تحد من الضياعات الطاقية وتقود إلى توفير في استهلاك الطاقة.

هناك نوعان أساسيان لأنظمة تخزين الطاقة الحرارية، التخزين المحسوس والتخزين الكامن. كذلك لكل وسيط يستعمل لتخزين الطاقة مجموعة واسعة من الخيارات اعتماداً على درجة الحرارة والغاية من عملية التخزين. تتلقى أنظمة تخزين الطاقة الحرارية عبر التخزين الكامن قدراً كبيراً من الاهتمام، ولعل المثال الأكثر وضوحاً من أنظمة تخزين الطاقة الحرارية الكامنة هو تحويل الماء إلى جليد. تملك أنظمة التبريد المدمجة بأنظمة تخزين الجليد ميزات كبيرة بالمقارنة مع نظام التبريد التقليدي نظراً لقدرتها على تخزين كميات كبيرة من الطاقة بشكل حراري كامن. إن اختيار نظام تخزين الطاقة الحرارية يعتمد بشكل رئيسي على فترة التخزين المطلوبة (نهاري، موسمي، ...)، ظروف التشغيل. عملياً، ركز العديد من أنشطة البحث والتطوير المتعلقة بالطاقة على كفاءة استخدام الطاقة وتخزينها.

1-3-1- طرق تخزين الطاقة

مع تزايد النمو السكاني والتطور الصناعي والتكنولوجي الذي نشهده، ازداد الطلب على الطاقة وتسارع بوتيرة عالية، الأمر الذي أوجب البحث عن حلول لردم الهوة بين تنامي الطلب على الطاقة من ناحية وإنتاجها وتأمينها على المدى البعيد من ناحية أخرى، ولأجل هذه الغاية طرح العديد من الحلول منها:

1. إيجاد منابع متجددة للطاقة.
2. تخفيض الاستهلاك للحدود الدنيا.
3. المواءمة بين منحني الإنتاج ومنحني الاستهلاك، وهنا تبرز أهمية تخزين الطاقة.
4. يبين الشكل (1-1) طرق تخزين الطاقة (Dincer, 2011).



الشكل 1-1: طرق تخزين الطاقة (Dincer, 2011)

إن استخدام أنظمة تخزين الطاقة الحرارية (TES) يقودنا إلى فوائد هامة منها:

- تخفيض تكلفة واستهلاك الطاقة.
- تحسين جودة الهواء الداخلي في عمليات التدفئة والتكييف.
- زيادة مرونة العمليات.
- استخدام المعدات بكفاءة أعلى.

هناك نوعان أساسيان لأنظمة تخزين الطاقة الحرارية : التخزين المحسوس (التخزين في مواد مثل الماء، الصخر، ...) والتخزين الكامن (التخزين خلال عملية التحول الطوري صلب/سائل في مواد مثل جليد/ماء، هيدرات الملح، ...). لكل وسيط تخزين هناك مجموعة واسعة من الخيارات اعتماداً على درجة الحرارة والغاية. تتلقى أنظمة التخزين الحراري عبر التخزين الكامن قدراً كبيراً من الاهتمام، كما أنها تقلل من حجم التخزين بنسبة تصل إلى مئة مرة (Dincer, 2011). ركزت العديد من أنشطة البحث والتطوير المتعلقة بالطاقة على كفاءة استخدام الطاقة وحفظها. وفي هذه الصدد، تبرهن أنظمة تخزين الطاقة الحرارية على وثوقيتها وفعاليتها. إن الصعوبة في هذه الطريقة تكمن في اختيار المواد المتغيرة الطور Phase Change Materials (PCMs) المناسبة للتطبيق المدروس حيث إن عمليات الشحن والتفريغ ستتم عند درجة حرارة التحول الطوري والتي يجب أن تتطابق مع درجة الحرارة المطلوب الحفاظ عليها.

1-3-2- استخدامات تخزين الطاقة الحرارية

يبين الجدول (1-1) مقارنة تقنية لأنظمة التخزين. كما ويبين الجدول (1-2) مقارنة اقتصادية لأنظمة التخزين (Dincer, 2011).

جدول 1-1: مقارنة تقنية لأنظمة التخزين (Dincer, 2011)

ES technology	ESD) (kJ/m^3)	MPD) (kW/m^3)	SE (kJ/kg)	MSP (kW/kg)	CSL	TDT (s)	UL	AA
• Mechanical ES								
–Flywheels	5×10^4	5×10^3	6	0.6	Days	$1–10^3$	20 years	RB/SA
–Compressed air	10^4	1	–	–	Weeks	$10^4–10^5$	20 years	EU
–Pumped hydrostorage	10^3	0.1	1	1×10^{-4}	Weeks	$10^4–10^5$	20 years	EU
• Thermal ES								
–Sensible heat								
High-temperature oil	10^5	10	100	0.01	Days	$10^4–10^5$	20 years	EU
Low-temperature rocks	3×10^4	3	10	0.001	Days	$10^4–10^5$	20 years	RH
–Latent heat								
Various salts	3×10^5	30	100	0.01	Weeks	$10^4–10^5$	$10^2–10^3$ cycles	RH
• Electromagnetic ES								
–Capacitors	100	10^8	0.3	3×10^5	Days	$10^{-6}–10^{-3}$	10^4 cycles	SA
–Magnets/coils	10^5	10	1000	0.1	Days	$10^{-3}–10^5$	20 years	EU/SA
• Chemical ES								
–Batteries								
Pb acid	5×10^4	5	100	10	Weeks	$10–10^4$	10^3 cycles	ES/SLI/AP
Others	10	10	500	–	Weeks	$10–10^5$	$10^3–10^5$ cycles	EU/SA/AP
–Hydrogen	9×10^6	–	10^5	–	Months	$10^4–10^5$	20 years	EU/SA/AP
–Methanol	2×10^7	–	3×10^4	–	Months	$10^4–10^5$	20 years	EU/SA/AP

ESD: كثافة تخزين الطاقة، MPD: كثافة الطاقة الأعظمية (استناداً إلى زمن التفريغ)، SE: الطاقة النوعية، MSP: الاستطاعة النوعية العظمى (استناداً إلى زمن التفريغ)، CSL: العمر الافتراضي للشحن، TDT: زمن التفريغ النموذجي، UL: العمر المفيد، AA: مجال التطبيق، EU: التخزين النهاري للطاقة الكهربائية. ES: الخدمة الطارئة حال خروج منظومة التوليد عن العمل، SLI: إقلاع السيارات والإضاءة ، RB: المكابح، RH: التدفئة الصناعية، SA: تطبيقات خاصة، AP: دفع السيارات.

جدول 1-2: مقارنة اقتصادية لأنظمة التخزين (Dincer, 2011)

Technology	State-of-the-art technology		Future technology goal	
	Capital cost ($/kW)	Efficiency (%)	Capital cost ($/kW)	Efficiency (%)
• Pumped hydro				
–Above ground	300–500	71–74	–	–
–Underground	–	–	500[a]	75
• Compressed air	770	50–52	600[b]	65–70
• Superconducting magnetic	–	–	2600[c]	80–90
• Batteries	600	75	35–55[d]	50–60
• Flywheels	–	–	1200	70
• Thermal				
–Residential low temperature	200	100	150	100
–Industrial high temperature[b]	400	70	200	85–95
–Commercial cooling	400	85–100	100	85–95
–Seasonal storage	–	–	200	60–70
• Hydrogen				
–Daily storage	40–50	68–84	45	68
–Electrolytic production[e]	400–500	60–65	200–300	80–85

a: عنفة – مضخة أحادية، b: منظومة بطاقة تخزين 8 h من دون استهلاك وقود، c: منظومة بطاقة تخزين 11 h، d: بطارية سيارة بطاقة تخزين 2 h، e: الكفاءة لمحطة التحليل الكهربائي فقط.

1-4- المواد المتغيرة الطور Phase Change Materials (PCMs)

المواد المتغيرة الطور (PCMs) هي مواد تنصهر وتتجمد عند درجة حرارة ثابتة وضغط ثابت تقريباً، وهي قادرة على تخزين وإطلاق كميات كبيرة من الطاقة. يتم امتصاص الحرارة أو تحريرها عندما تتغير هذه المواد من الحالة الصلبة إلى الحالة السائلة وبالعكس، وبالتالي تصنف هذه المواد على أنها وحدات تخزين الحرارة الكامنة.

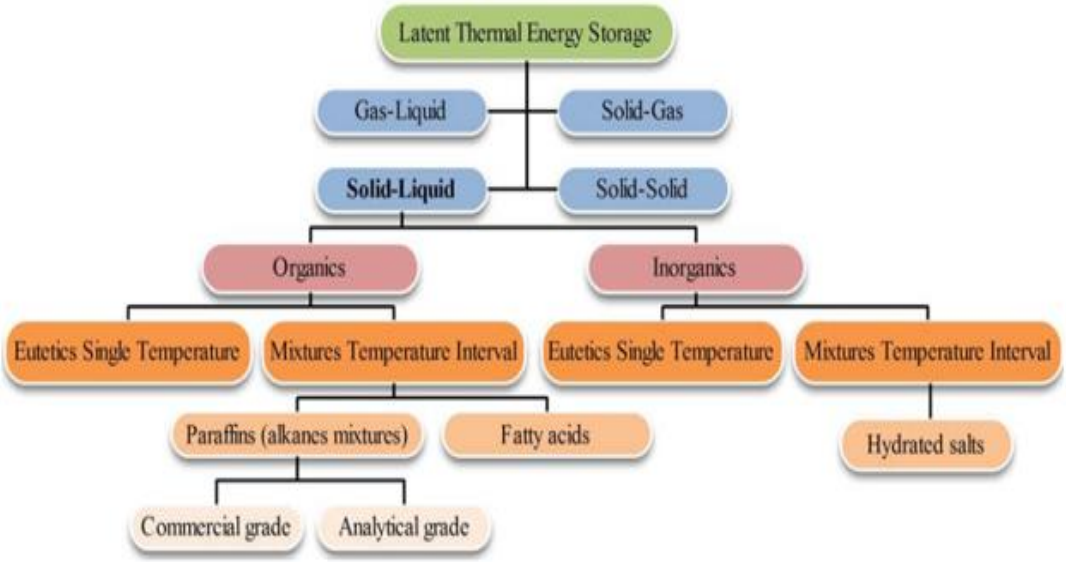
1-4-1- تصنيف المواد المتحولة الطور

توفر المواد المتغيرة الطور في أنظمة تخزين الطاقة الحرارية عملية التنظيم الحراري. يبين الشكل (1-2) تصنيف المواد المتغيرة الطور (صلب/سائل) والتي تصنف بشكل عام إلى نوعين رئيسيين:

مواد متحولة الطور عضوية (Organic PCMs) مثل شمع البارافين (Paraffin Wax).

مواد غير عضوية (nonorganic PCMs) مثل هيدرات الملح (Salt Hydrates).

تحتوي المواد اللاعضوية على بعض الخواص المفيدة، منها: قيم حرارة كامنة عالية، موصلية حرارية عالية، غير قابلة للاشتعال، انخفاض تكلفتها بالمقارنة مع المواد العضوية، متوفرة. ومع ذلك فقد أدت مساوئها إلى استخدام المواد العضوية وهي: التآكل، غير مستقرة، إعادة تصلب غير قويم، تبريد زائد يمكن أن يؤدي إلى تغير في خواص عملية التحول الطوري. يبين الجدول (1–3) بعضاً من خواص المواد المتغيرة الطور العضوية، كما يبين الجدول (1–4) بعضاً من خواص المواد المتغيرة الطور اللاعضوية (Dincer, 2011).



الشكل 1-2: تصنيف المواد المتحولة الطور (صلب/سائل) (Dincer, 2011)

جدول 1-3: خواص بعض المواد المتغيرة الطور العضوية (Dincer, 2011)

PCM Name		Melting Temperature [°C]	Heat of Fusion [kJ/kg]
$CH_3(CH_2)_{16}COO(CH_2)_3CH_3$	Butyl stearate	19	140
$CH_3(CH_2)_{11}OH$	l-dodecanol	26	200
$CH_3(CH_2)_{12}OH$	l-tetradecanol	38	205
$CH_3(CH_2)_n(CH3\ldots$	Paraffin	20-60	200
$45\%CH_3(CH_2)_8COOH$ $55\%CH_3(CH_2)_{10}COOH$	45/55 capric-lauric acid	21	143
$CH_3(CH_2)_{12}COOC_3H_7$	Propyl palminate	19	186

جدول 1-4: خواص بعض المواد المتغيرة الطور اللاعضوية (Dincer, 2011)

PCM Name	Melting Temperature [°C]	Heat of Fusion [kJ/kg]	Thermal conductivity [W/mK]	Density [kg/m^3]
$KF{\cdot}4H_2O$ Potassium fluoride tetrahydrate	18.5	231	n.a.	1447 (liquid,20°C) 1455 (solid, 18°C)
$Mn(NO_3)_2{\cdot}6H_2O$ Manganese nitrate hexahydrate	25.8	125.9	n.a.	1738 (liquid,20°C) 1728 (liquid, 40°C) 1795 (solid, 5°C)
$CaCl_2{\cdot}6H_2O$ Calcium chloride hexahydrate	29.0	190.8	0.540 (liquid, 38.7°C) 1.088 (solid, 23°C)	1562 (liquid, 32°C) 1802 (solid, 24°C) 1710 (solid, 25°C)
$CaBr_2{\cdot}6H_2O$ Calcium bromide hexahydrate	34	115.5	n.a.	1956 (liquid, 35°C) 2194 (solid, 24°C)
$Na_2SO_4{\cdot}10H_2O$ Sodium sulphate decahydrate	32.4	254	0.544	1485 (solid)
$Na_2CO_3{\cdot}10H_2O$ Sodium carbonate decahydrate	34.2	246.5	n.a.	1442
$Na_2HPO_4{\cdot}12H_2O$ Sodium orthophosphate dodecahydrate	35.5	265	n.a.	1522
$Zn(NO_3)_2{\cdot}6H_2O$ Zinc nitrate hexahydrate	36.2	146.9	0.464 (liquid, 39.9°C) 0.469 (liquid, 61.2°C)	1828 (liquid, 36°C) 1937 (solid, 24°C) 2065 (solid, 14°C)

n.a.=not available

1-4-2- متطلبات المواد المتغيرة الطور (PCMs)

تعتبر المواد المتغيرة الطور التي لها درجات حرارة تحول طوري (−20, 120 °C) مفيدة لتطبيقات أنظمة تخزين الطاقة الحرارية (TES) مثل: التطبيقات التي تحتاج لدرجات حرارة منخفضة، إنتاج المياه الساخنة، التدفئة، التبريد الشمسي. إن تطوير مثل هذه الأنظمة يتطلب تصميماً دقيقاً للمبادلات الحرارية الخاصة بها.

المتطلبات الترموديناميكية

1. نقطة انصهار عند درجة حرارة التشغيل المطلوبة.

2. حرارة انصهار لواحدة الكتل عالية، حيث إنّ أقل كمية من المادة يخزن فيها أكبر كمية من الطاقة الحرارية.
3. كثافة عالية بحيث تأخذ حجماً أقل.
4. حرارة نوعية عالية بحيث يكون للأثر المحسوس أهمية.
5. موصلية حرارية عالية تجعل الفرق بين درجتي حرارة الشحن والتفريغ صغيراً.
6. ذوبان متجانس بحيث يكون الطوران الصلب والسائل شبه متجانسين (فرق الكثافتين بين الطورين الصلب والسائل صغير وإلا فإنّ ذلك يؤدّي للتغيير في التركيب الكيميائي للمادة).
7. تغيرات حجمية صغيرة خلال المرحلة الانتقالية بحيث يمكن للمبادلات الحرارية ذات الشكل البسيط أن تكون ضمن منظومة التخزين.

المتطلبات الحركية

الإقلال ما أمكن (أو التخلص) من حدوث ظاهرة التبريد الدوني (Supercooling) والتي سيتم شرحها لاحقاً.

المتطلبات الكيميائية

1. بسيطة.
2. قابلة للتطبيق.
3. فعالة.
4. ذات جزيئات متراصة.
5. ذات وثوقية عالية.

المتطلبات الاقتصادية

1. متوفرة تجارياً.
2. رخيصة الثمن.

1-4-3- تطبيقات المواد المتغيرة الطور (PCMs)

توجد طرق مختلفة لاستخدام أنظمة التخزين الحراري باستخدام المواد المتغيرة الطور (PCMs) في التبريد والتدفئة (Gabriela, 2012):

المواد المتغيرة الطور والتي لها درجات حرارة انصهار (5-15 °C) يمكن أن تستخدم في أنظمة التخزين الحراري البارد (Cold Thermal Energy Storage-CTES) عند تشغيل المبردات ليلاً. عندما يكون الطلب على الطاقة الكهربائية قليلاً (وغالباً سعر استهلاك الكهرباء في معظم البلدان منخفضاً) ويتم انصهار المواد المتغيرة الطور نهاراً لتأمين عملية التبريد. كما يمكن استخدام PCM في التحكم الحركي.

المواد المتغيرة الطور والتي لها درجات حرارة انصهار قريبة من درجة حرارة الغرفة مثل $CaCl_2.6H_2O$ والتي تنصهر عند درجة حرارة 27 °C يمكن دمجها مع هيكل البناء للتغلب على التقلبات الحرارية.

يمكن لأنظمة التدفئة بواسطة الطاقة الشمسية استخدام المواد المتغيرة الطور ذات درجات حرارة انصهار (25-30 °C) لتوفير التدفئة مساءً.

يمكن استخدام المواد المتغيرة الطور ذات درجات حرارة انصهار (40-60 °C) في أنظمة التدفئة صباحاً ومساءً مثل $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O - MgCl_2 \cdot 6H_2O$ اليوتكتيكي الذي ينصهر عند درجة حرارة 58 °C.

في أنظمة تسخين المياه، يمكن تسخين المياه في خزان معبأ بكبسولات تحوي مادة متغيرة الطور لها درجات حرارة انصهار (55-70 °C) مثل $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O - MgCl_2.6H2O$ اليوتكتيكي.

يمكن أن يتضمن اللاقط الشمسي المستخدم لتسخين المياه مواد متغيرة الطور لها درجات حرارة انصهار (60-90 °C) مثل $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ ذات درجة حرارة انصهار 89 °C.

يمكن استخدام الكهرباء خارج أوقات الذروة لإذابة المواد المتغيرة الطور ذات درجات حرارة انصهار أعلى من 25 °C واستخدامها للتدفئة في أوقات الذروة.

يمكن لأنظمة التكييف بواسطة الطاقة الشمسية المركزة استخدام مواد متغيرة الطور لها درجات حرارة انصهار (100-175 °C) مثل $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ ذو درجة حرارة انصهار (117 °C).

1-4-4- تقييم المواد المتغيرة الطور (PCMs)

عند تقييم واختيار المواد المتغيرة الطور، هناك العديد من الاعتبارات التي يجب الأخذ بها: التجمد، التبريد الدوني، تشكل بلورات السائل، الدورة الحرارية، التغليف، التوافق.

التجمد (Solidification)

العديد من المواد لا تستعمل كمواد متغيرة الطور نظراً لسلوك تجمدها. فالبعض منها له سلوكات تجمد متضاربة. والبعض يتبلور بشكل بطيء ويشكل خلائط لزجة أو تكون غير مستقرة على مدى درجات حرارة معينّة. البعض منها له سلوك تجمد متطابق وبالتالي تكون صالحة كمواد متغيرة الطور. للتغلب على مشكلة التجمد، يمكن زيادة معدل تشكل البلورات عن طريق إضافة بلورات متجانسة أو غير متجانسة.

التبريد الدوني (Subcooling)

التبريد الدوني هو وصول درجة حرارة السائل إلى درجة حرارة التجمد أو أقل دون أن يتحول إلى الطور الصلب. وسبب ذلك هو عدم وجود نويات كافية. النويات هي نمو عدد كبير من الخلايا ضمن المادة المتحولة. العديد من المشاكل التي تظهر في هيدرات الملح المستخدمة كمادة تحول طوري، إذ إنها تميل بسلوكها إلى التبريد الدوني، والسبب في ذلك يكون إما بطْء معدل تشكل البلورات من السائل أو بطْء معدل نمو النوى أو كلاهما. وبالتالي يؤدي ذلك إلى وصول السائل لنقطة الانصهار الترموديناميكية دون أن يتجمد. وبالتالي ينخفض مردود التخزين الحراري. بعض الأدلة التجريبية تربط الميل إلى التبريد الدوني مع لزوجة السائل عند نقطة الانصهار. المواد ذات اللزوجة العالية في الحالة السائلة لها معاملات انتشارية منخفضة لذراتها أو أيوناتها. وبالتالي تكون غير قادرة على إعادة ترتيب نفسها لتشكيل الطور الصلب. يحدث التبريد الدوني عند محاولة تجميد بعض المواد والوصول إلى درجة حرارة أقل من درجة حرارة انصهارها قبل بدء التجمد. بمجرد بدء التجمد ترتفع درجة الحرارة إلى درجة حرارة نقطة الانصهار وتبقى ثابتة لحين انتهاء تجمد المادة. التبريد الدوني هو أمر غير مرغوب فيه في عمليات التخزين الحراري، لأنه يمنع استرداد الطاقة عند عملية التفريغ.

تشكل البلورات من السائل (Nucleation)

غالباً ما يمكن التخلص من التبريد الدوني عن طريق إضافة مواد ذات نوى فعالة. وقد تحقق بعض النجاح عند إضافات مثل هذه المواد إلى المادة المتغيرة الطور وفشل أحياناً أخرى. إن معرفة المادة الواجب إضافتها يعتمد على التجربة والخطأ. في النوى المتجانسة يمكن زيادة معدل تشكل البلورات دون إضافة أية مواد أخرى عن طريق الموجات الفوق الصوتية عند تحريك السائل وبالتالي زيادة انتشار الأيونات في السائل. وبالتالي يتم تفكك البلورات وتوزيعها في السائل، وإيجاد مراكز بلورات جديدة. العديد من البلورات، مثل ثيوسلفات الصوديوم والبوتاسيوم، تم إضافة نوى لها من أكثر من محلول مميع .أيضاً، فئات أخرى من المواد، مثل المعادن والبلورات العضوية، تمت إضافة النوى لها عن طريق الموجات فوق الصوتية. في حالة النوى غير المتجانسة أو المحاليل الحاوية على شوائب تعتبر بمثابة ركيزة لتشكل النوى. ولكي تكون الشائبة عاملاً فعالاً في تشكل البلورات، يجب أن تستوفي المعايير التالية:

1. لديها نقطة انصهار أعلى من أعلى نقطة تصل لها المادة المتغيرة الطور في عملية التخزين الحراري.
2. غير قابلة للذوبان في الماء.
3. لا تشكل محاليل صلبة مع هيدرات الملح.
4. لديها بنية بلورية مشابهة لهيدرات الملح.
5. لديها أبعاد خلية لا تختلف بأكثر من 10% من خلية الهيدرات.
6. لا تتفاعل كيميائياً مع هيدرات الملح.

الدورة الحرارية (Thermal Cycling)

يجب أن تكون المواد المتغيرة الطور قادرة على الخضوع لعملية الانصهار والتجمد لعدد من المرات. بعض المواد غير المناسبة تظهر تغيرات على مدى قصير نسبياً. وتظهر بعض النتائج التجريبية أن حمض البالمتيك الذي عادة ما يكون لونه أبيض يتحول إلى اللون الأصفر بعد 21 دورة عمل وتقل نقطة الانصهار حوالي ^{o}C 2، كما ويحدث تغير في منحني التجمد (Dincer, 2011).

التغليف (Encapsulation)

يتطلب الاستخدام الجيد للمواد المتغيرة الطور تغليفها بشكل سليم. يجب أن تمنع الكبسولات تسرب المادة المتغيرة الطور. يجب أن تكون الموصلية الحرارية لمادة التغليف عالية بحيث يسهل انتقال الحرارة بشكل فعال. كذلك يجب أن تكون مقاومة ميكانيكياً للتلف عند المعالجة والنقل. يجب الانتباه لمواد التغليف عند استخدام هيدرات الملح كمادة متغيرة الطور من ناحية التآكل والتعب.

التوافق (Compatibility)

لتحديد مدى ملاءمة مادة التغليف للمادة المتغيرة الطور. تخضع عادة المادة المتغيرة الطور لاختبارات التوافق مع مادة التعبئة والتغليف. على سبيل المثال، فإن صفائح البلاستيك والألمنيوم غير مناسبة عند استخدام المواد المتغيرة الطور العضوية التي يمكن أن تصل درجات الحرارة فيها إلى أعلى من ^{o}C 70. البارافينات متوافقة مع معظم المعادن والسبائك ولكن يجب تنعيم بعض المواد البلاستيكية.

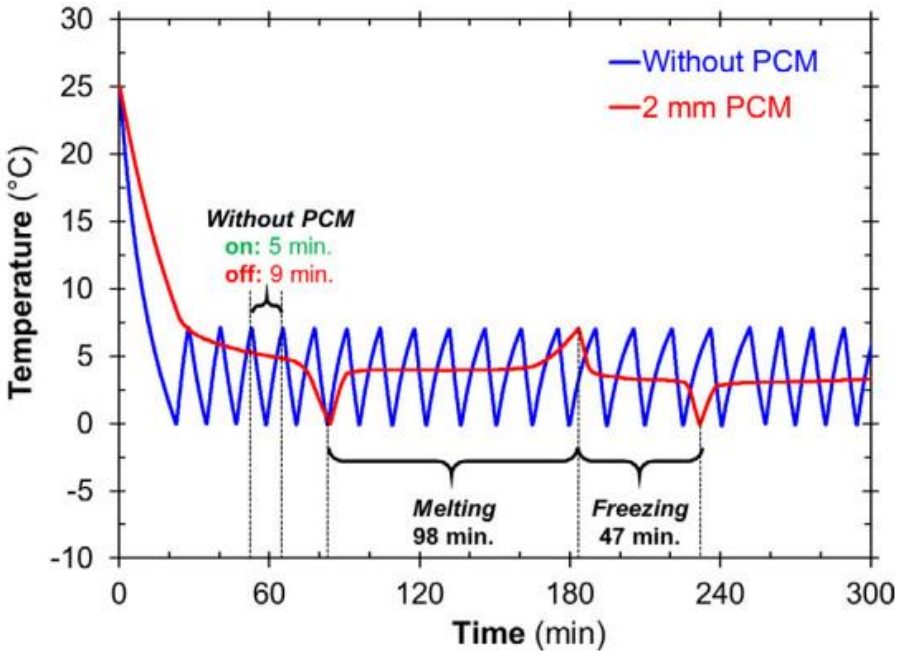
1-5- الدراسات المرجعية

الدراسات المرجعية التي سيتم سردها تتعلق بمدى تأثير تضمين المواد المتحولة الطور في الجزء الساخن (Heat Storage Condenser-HSC) أي فيما يتعلق بجزء المكثف من دارة تبريد البراد المنزلي أو المجمدة المنزلية، أو في الجزء البارد منها (Cold Storage Evaporator-CSE) أي فيما يتعلق بجزء المبخر وحجرة البراد أو المجمدة المنزلية. هذا التأثير يمكن أن يتم على دارة التبريد أو جودة الطعام ضمن البراد أو المجمدة المنزلية.

1-5-1- الدراسة المرجعية الأولى (Mehmet Akif Ezan, 2017)

تبحث هذه الدراسة عدديًا في تأثير دمج لوح المادة المتغيرة الطور (PCM) داخل مبرد المشروبات العمودي (Vertical Beverage Cooler-VBC) على استهلاك الطاقة، والاستقرار الحراري وخصائص تدفق الهواء داخل المبرد. يتم وضع لوح المادة المتحولة الطور وهي الماء، على الجانب الخلفي من مبخر من النوع Roll and Band تم إجراء تحليلات عددية عابرة (غير مستقرة) باستخدام برنامج ANSYS-

FLUENT لمبرد فارغ. لمحاكاة وحدة التحكم في التشغيل/الإيقاف لنظام التبريد، استنتجت مجموعة التحليلات البارامترية أن تكامل PCM في المبرد يعزز أداء تبريد VBC عن طريق إطالة مدة عمل وتوقف الضاغط عن العمل. علاوة على ذلك ، أثناء توقف الضاغط ، يحافظ PCM على درجة حرارة الهواء داخل مساحة التبريد في النطاق المطلوب عن طريق الحد من الزيادات المفاجئة في درجة الحرارة كما يبين الشكل (1-3).



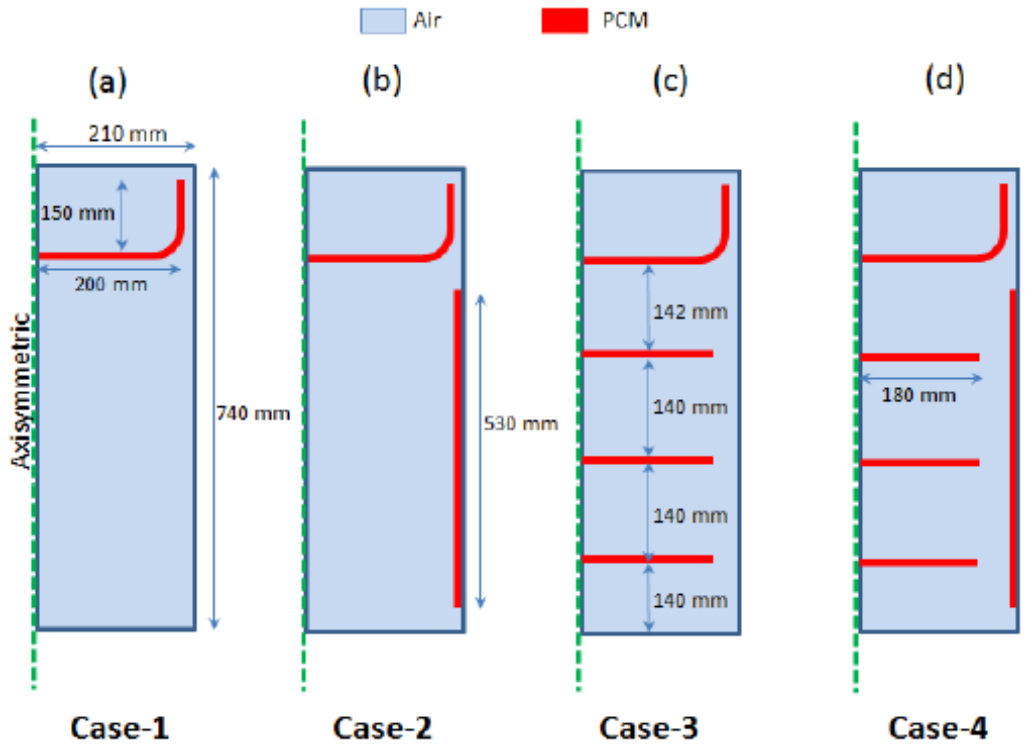
الشكل 1-3: تغير درجة حرارة الهواء مع وبدون PCM (Mehmet Akif Ezan, 2017).

1-5-2- الدراسة المرجعية الثانية (R. Elarem, 2017)

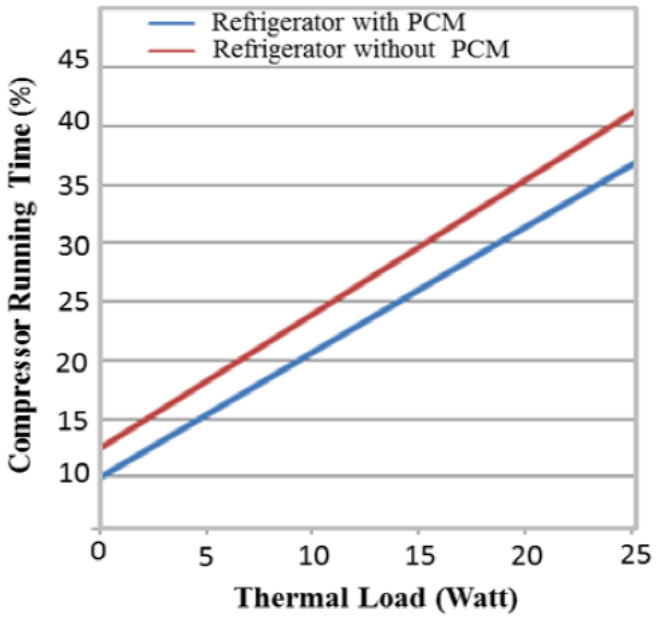
تم إجراء دراسة تجريبية لتحسين كفاءة الطاقة للثلاجة المنزلية من خلال دمج مادة تغيير الطور (PCM) لتجميع الطاقة الحرارية الباردة بشكل كامن وتثبيت درجة الحرارة في حجرة الثلاجة. تم اقتراح تصميم جديد للمبادل الحراري PCM في هذه المقالة وذلك بوضع صفائح PCM بأماكن مختلفة ضمن الحجرة. تشير النتائج التجريبية إلى أنه من خلال دمج المبادل الحراري PCM الجديد هذا، يتم تقليل استهلاك الطاقة بنسبة 12% وزيادة COP بنسبة 8% مقارنة بالثلاجة بدون PCM. من أجل تحديد أفضل التصاميم أداءً من بين العديد من حالات حجرات الثلاجة الموضوعة مع PCM، تم إجراء عمليات محاكاة CFD

ذات الحالة غير المستقرة ثنائية الأبعاد. لجميع الحالات، تم محاكاة الثلاجة المنزلية لدراسة تأثير وضع PCM على مجالات درجة الحرارة. تشير النتائج العددية إلى أن استخدام مواضع PCM على المبخر والجدران وفي رفوف حجرات الثلاجة له تأثير كبير على استقرار درجة الحرارة وتجانسها بسرعة (تحسن 86.66% عن الحالة الأساسية). ومع ذلك، هناك حد لا يؤدي بعده زيادة تغطية PCM في الرفوف بأكثر من 75% إلى أي تحسينات كبيرة. يبين الشكل (1–4) الحالات التي تمت دراستها عند تغير مواضع المادة المتحولة الطور ضمن حجرة المواد الطازجة وحجرة المواد المجمدة.

كما يبين الشكل (1–5) النسبة المئوية لمتوسط وقت التشغيل لكل دورة للضاغط عند الأحمال الحرارية المختلفة.



الشكل 1-4: الحالات التي تمت دراستها عند تغير مواضع المادة المتحولة الطور ضمن حجرة المواد الطازجة وحجرة المواد المجمدة (R. Elarem, 2017)

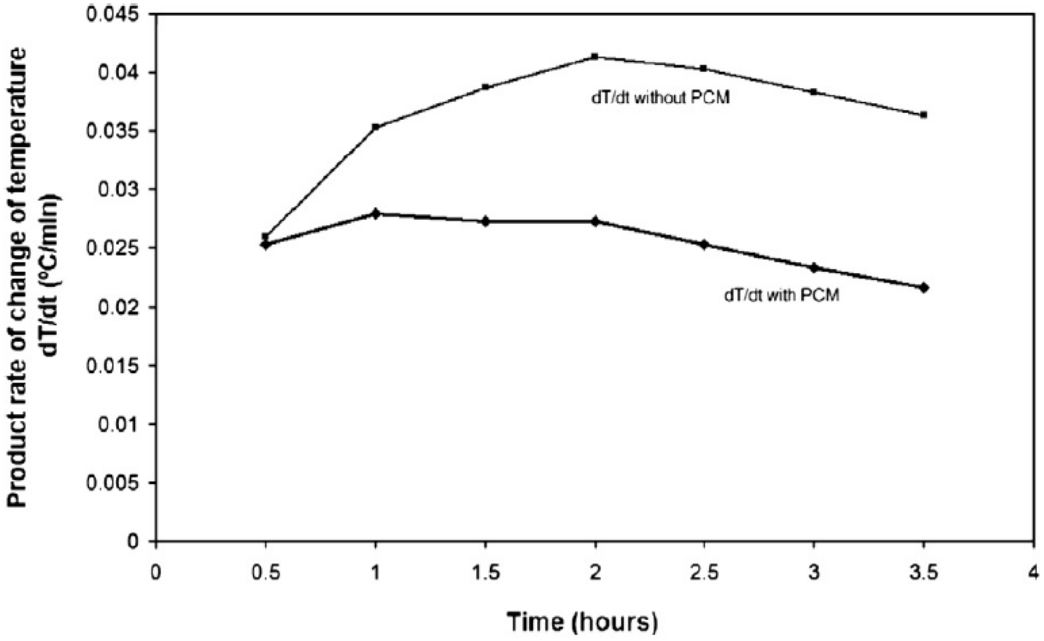


الشكل 1-5: النسبة المئوية لمتوسط وقت التشغيل لكل دورة للضاغط عند الأحمال الحرارية المختلفة (R. Elarem, 2017)

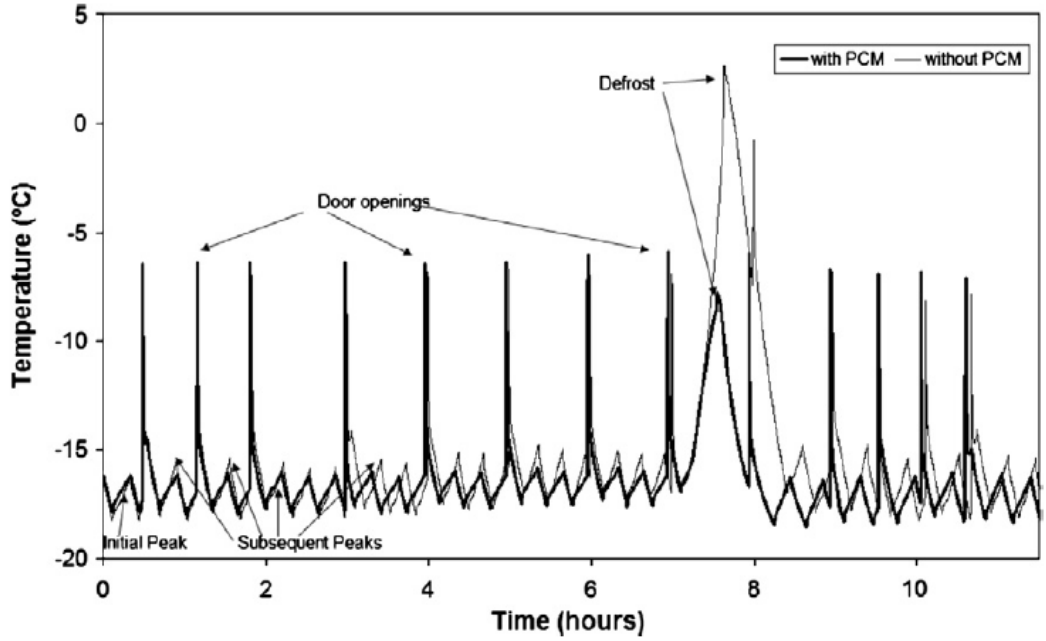
1-5-3- الدراسة المرجعية الثالثة (B. Gin a, 2010)

تم إجراء تحقيق في فعالية ألواح مادة تغيير الطور (PCM) الموضوعة على الجدران الداخلية للمجمدة للحفاظ على درجات حرارة ثابتة في ظل وجود أحمال حرارية مثل فتح الأبواب وإزالة الصقيع وانقطاع الطاقة الكهربائية. تمت دراسة استجابة درجة الحرارة أثناء انقطاع مصدر الطاقة الكهربائية، ودورة تذويب تدوم 30 دقيقة، ونظام فتح باب مكون من 13 فتحة باب على مدى 11 ساعة. لقد قلل نظام PCM هذا بشكل كبير من معدل زيادة درجة الحرارة داخل الفريزر أثناء إزالة الجليد وانقطاع مصدر الطاقة الكهربائية. تم قياس استهلاك الطاقة أثناء التشغيل المستقر، وخلال دورة التذويب لمدة 30 دقيقة ، وأيضاً لحالة فتح باب المجمدة ثماني مرات على فترة 40 دقيقة بين كل مرة. وجد أن الأحمال الحرارية تسببت في زيادة استهلاك الطاقة، وأن وجود PCM أثناء إزالة الجليد وفتح الأبواب أدى إلى انخفاض طفيف في استهلاك الطاقة مقارنةً بالحالة الأساسية لعدم وجود PCM.

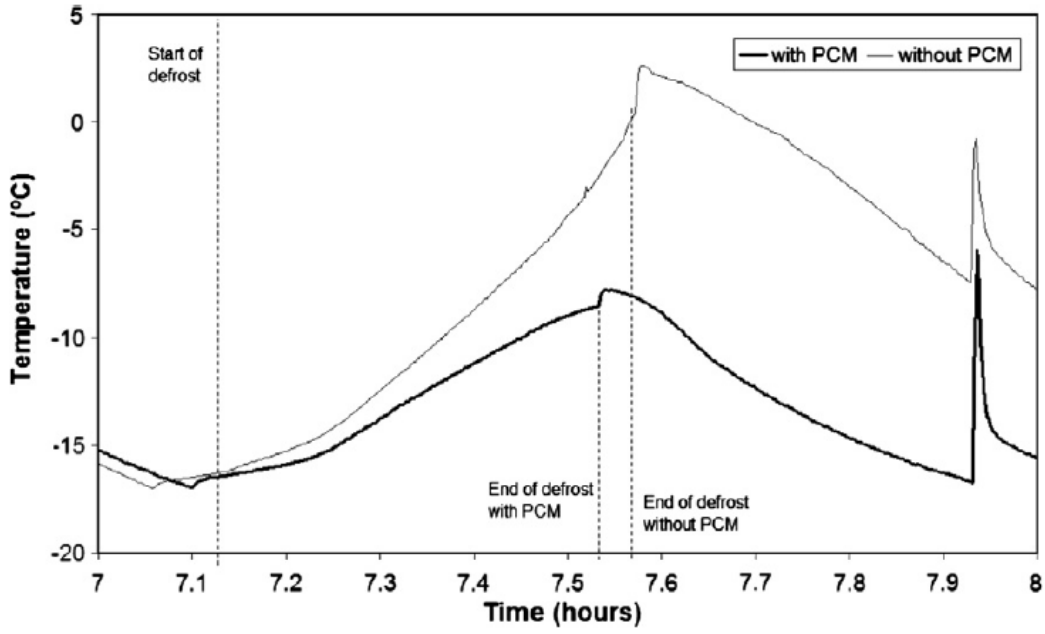
تبين الأشكال التالية (1-8 ,1-7 ,1-6) مقارنة تغير درجات حرارة حجرة المجمدة خلال ساعتي انقطاع لمصدر الطاقة الكهربائية، فتح باب المجمدة، وعملية تذويب الجليد لحالتي وجود PCM وبدونها.



الشكل 1-6: مقارنة تغير درجات حرارة حجرة المجمدة خلال ساعتي انقطاع لمصدر الطاقة الكهربائية مع وبدون PCM



الشكل 1-7: مقارنة تغير درجات حرارة حجرة المجمدة خلال فتح باب المجمدة مع وبدون PCM



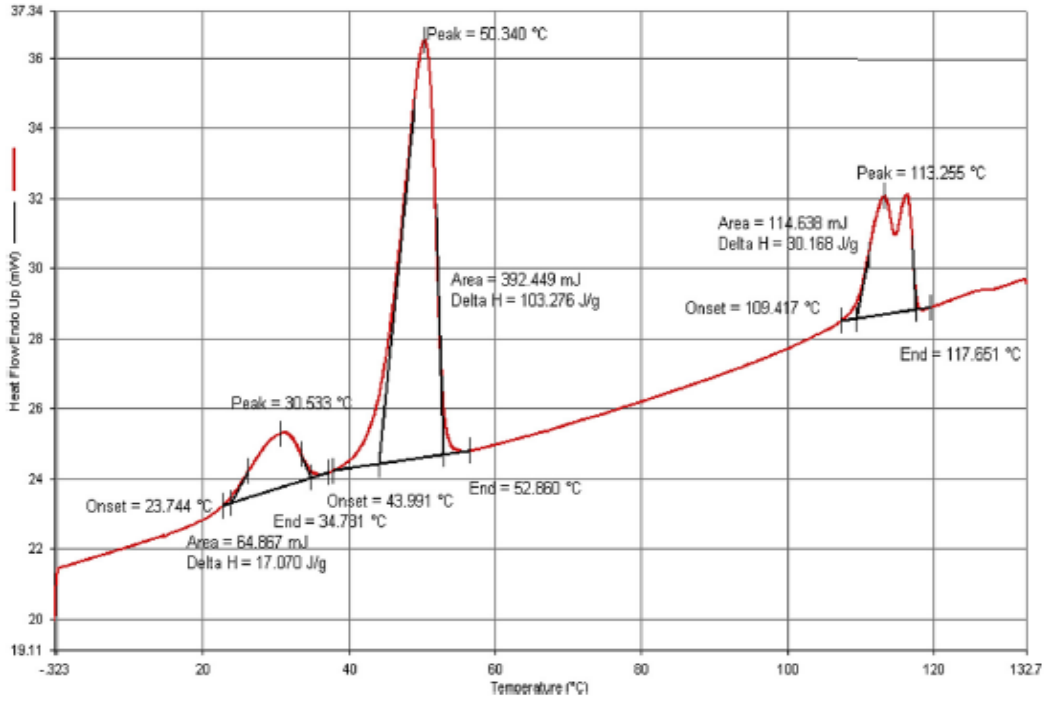
الشكل 1-8: مقارنة تغير درجات حرارة حجرة المجمدة خلال عملية تذويب الجليد فتح باب المجمدة مع وبدون PCM

1-5-4- الدراسة المرجعية الرابعة (Angelo Maiorino, 2020)

يؤدي استخدام PCM في ثلاجة الخزانة إلى زيادة وقت إيقاف التشغيل وينقل استهلاك الطاقة إلى فترات أخرى لتقليل ذروة الطلب على الطاقة. يمكن استغلال المرونة العالية للثلاجة مع PCM لتقليل تكلفة تشغيلها مع الأخذ بالحسبان أن العديد من البلدان اعتمدت تعريفات وقت الاستخدام (Time of Use-)TOU، والتي تعتمد فيها تكلفة الكهرباء على وقت استخدام الطاقة على مدار اليوم والأسبوع. ومن ثم، اقترح هذا العمل خوارزمية تعتمد على طريقة (Simulated Annealing-SA) لتحديد مخطط زمني لعمل الثلاجة مع PCM لتقليل تكاليف التشغيل. تم استخدام النتائج التجريبية كمدخلات للخوارزمية، وتم اختيار تسعة تعريفات 2-TOU (فترة الذروة وفترة خارج الذروة) وثلاثة تعريفات 3-TOU (فترة الذروة وفترة خارج الذروة وفترة خارج الذروة الفائقة) لخمس دول مختلفة لاختبار المنهجية. تم إثبات إمكانية تحقيق وفورات في التكاليف الجارية للعديد من دراسات الحالة من 9% إلى 76%. علاوة على ذلك، بارتفاع الفرق بين تكلفة الكهرباء وقت الذروة وخارج وقت الذروة، تزداد الفوائد الاقتصادية التي حققتها الطريقة المقترحة.

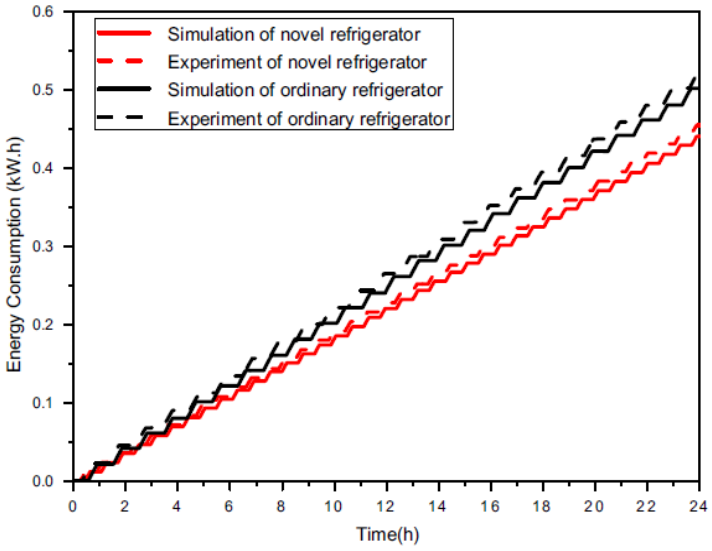
1-5-5- الدراسة المرجعية الخامسة(Wen-Long Cheng, 2013)

تم إنشاء النموذج الديناميكي لمجمدة منزلية جديدة مع SSPCM (Shape-Stabilized Phase Change Material) – مكثف تخزين الحرارة بالشكل الكامن وكانت النتائج موافقة للتجربة. باستخدام المحاكاة، تبين زيادة معامل الأداء لدارة التبريد 19% وانخفاض الاستهلاك الكهربائي 12% وذلك بسبب الانتقال المستمر للطاقة الحرارية الناتجة عن التكاثف والتخزين الكامن ضمن SSPCM وانخفاض درجة حرارة التكاثف. تم تحليل تأثير درجة حرارة الوسط المحيط ودرجة حرارة حجرة المجمدة على توفير الطاقة. تم اعتماد المادة العضوية شمع البارافين (Paraffin Wax) الممزوجة بالبوليمر عالي الكثافة (بولي إيثيلين عالي الكثاقة-HDPE). تم استخدام طريقة السعة الحرارية الفعالة لدراسة عملية التحول الطوري والحرارة الكامنة المكتسبة والذي يشار إليها بالرسم البياني Differential Scanning Calorimetry-DSC (المسعر التفاضلي) التالي، حيث $C = 1/M.dH/dt.dt/dT$ ، dH/dt معدل الحرارة الممتصة (المحور الشاقولي)، dT/dt معدل تغير درجة الحرارة 10 °C/min. كما تبين الشكل (1-10).

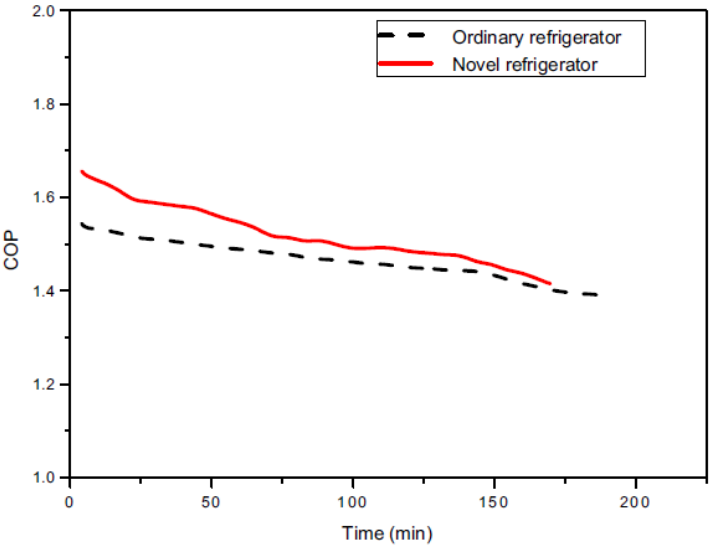


الشكل 1-9: منحني DSC لمادة التحول الطوري المختارة

يبين الشكلان (1-10, 1-11) مقارنة الحالتين (مع وبدون مواد متحولة الطور) من حيث الاستهلاك الكهربائي ومعامل الأداء.



الشكل 1-10: الاستهلاك الكهربائي مع وبدون PCM



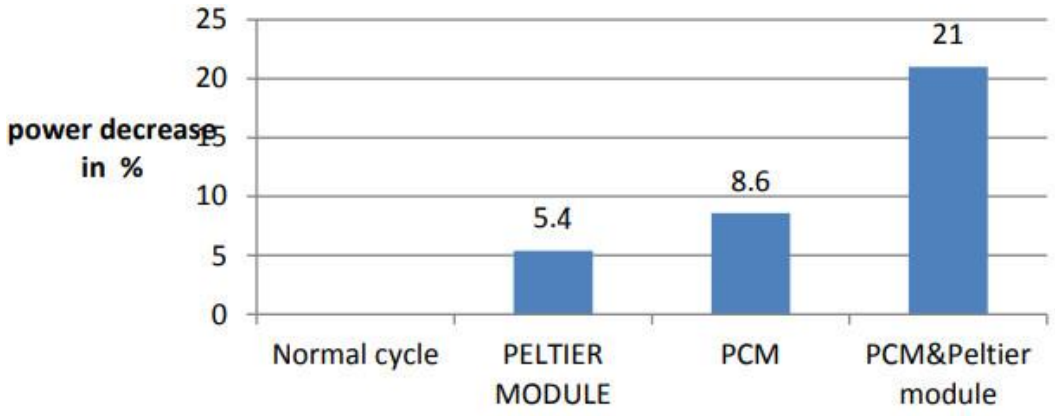
الشكل 1-11: معامل الأداء مع وبدون PCM

1-5-6- الدراسة المرجعية السادسة (NARESH KURUGONDA, 2017)

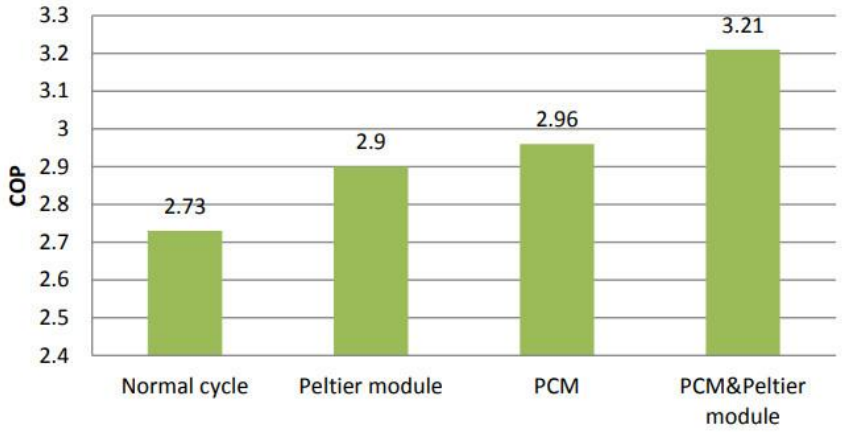
قيمت هذه الدراسة تأثير عناصر تخزين الحرارة الكامنة على درجة حرارة المكثف للثلاجة المنزلية التجارية وتأثير وحدة بلتيير على المبخر. تُستخدم عناصر تخزين الحرارة الكامنة لتقليل درجة حرارة المكثف حيث يتم استخدامها لتخزين الحرارة الكامنة. لذلك يمكن تقليل ضغط التكاثف. تستخدم وحدة بلتيير لزيادة درجة

حرارة التبخر.أجريت التجارب في هذا العمل لمعرفة تأثير كليهما على أداء نظام التبريد المنزلي. تأثير بلتيير (التبريد الكهروحراري) هو اختلاف في درجة الحرارة يتم إنشاؤه عن طريق تطبيق جهد بين قطبين كهربائيين متصلين بمواد شبه موصلة. من خلال تطبيق طاقة تيار مستمر منخفض الجهد على وحدة كهروحرارية من جانب إلى آخر. لذلك، سيكون وجه وحدة واحدة باردًا بينما يتم تسخين الوجه الآخر في نفس الوقت. من خلال تغيير قطبية (موجب وسالب) لجهد التيار المستمر المطبق سوف يتسبب في تحريك الحرارة في الاتجاه المعاكس. وبالتالي ، يمكن استخدام الوحدة الكهروحرارية لكل من التدفئة والتبريد ما يجعلها مناسبة لتطبيق التحكم في درجة الحرارة بدقة. تكون هذه الظاهرة مفيدة عند نقل الحرارة من وسط إلى آخر.

تم إجراء تحليل الأداء على نظام التبريد الانضغاطي البخاري باستخدام R134a كمبرد. تم تحليل النظام لأربع حالات، وهي الحالة الأساسية (بدون أية إضافات)، حالة وجود PCM من طرف المكثف، حالة وجود وحدة بلتيير من طرف المبخر، حالة وجود PCM من طرف المكثف ووحدة بلتيير من طرف المبخر. تم اعتبار حالة وجود PCM من طرف المكثف ووحدة بلتيير من طرف المبخر هي الأفضل من حيث الأداء الحراري حيث انخفض استهلاك الطاقة الكهربائية 21% وارتفع معامل الأداء بنسبة 17.6% عن الحالة الأساسية. يبين الشكلان (1-14 ,1-13) قيم الطاقة الكهربائية المستهلكة ومعاملات الأداء لكل حالة من الحلات الأربعة.



الشكل 1-12: مقارنة انخفاض الطاقة الكهربائية المستهلكة



الشكل 1-13: مقارنة معاملات الأداء

1-5-7- الدراسة المرجعية السابعة (G. Sonnenrein A. E., 2014)

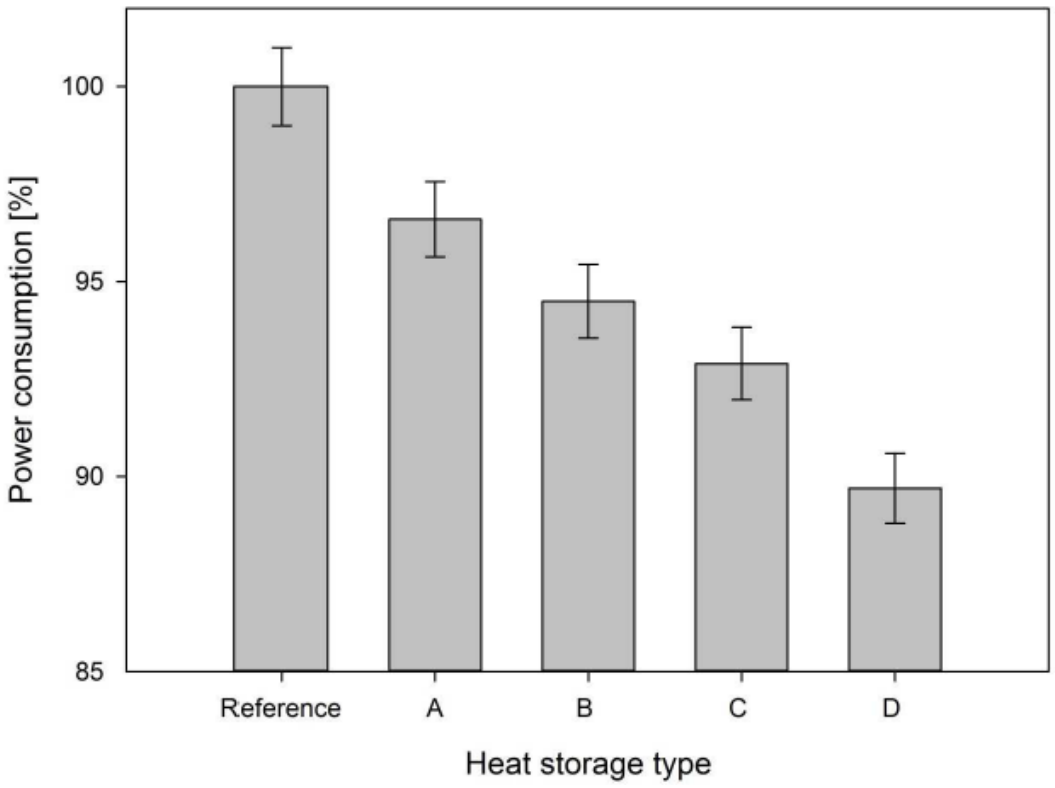
قدمت هذه الدراسة تأثير عناصر تخزين الحرارة الكامنة على درجة حرارة التكاثف لبراد منزلي. من أجل ذلك، تم تجهيز مكثف Wire and Tube بعناصر تخزين حرارية مختلفة (تحتوي على الماء أو البارافين أو مركب البوليمر المشترك). تشير النتائج إلى أن تطبيق المواد المتحولة الطور يقلل من درجة حرارة التكاثف، ما يؤدي إلى انخفاض في استهلاك الطاقة الكهربائية. يبين الشكل (1-14) صور المكثف بعد تضمين المواد المتحولة الطور. كما يبين الجدول (1-5) مواصفات المواد المتحولة الطور التي تم استخدامها في التجارب. كما يبين الشكل (1-15) نسب استهلاك الطاقة للحالات الجديدة مقارنة بالحالة الأساسية (من دون PCM).



الشكل 1-14: صور المكثف بعد تضمين المواد المتحولة الطور

جدول 1-5: مواصفات المواد المتحولة الطور مع الأغلفة المستخدمة

Characteristics	Heat storage type			
	Sensible Water [A]	PCM [B]	PCM [C]	Copolymer compound [D]
Mass [kg]	0.5	0.5	0.5	0.5
Density [kg l^{-1}]	1.0	0.76	0.76	0.89
Approx. phase change temperature [°C]	0	34	34	34
Storage capacity 25-40°C [kJ kg^{-1}]	63	251	251	182
Thermal conductivity [W m^{-1} K^{-1}]	0.6	0.19	0.19	0.64
Encapsulation	Al composite	PE-HD	Al composite	None

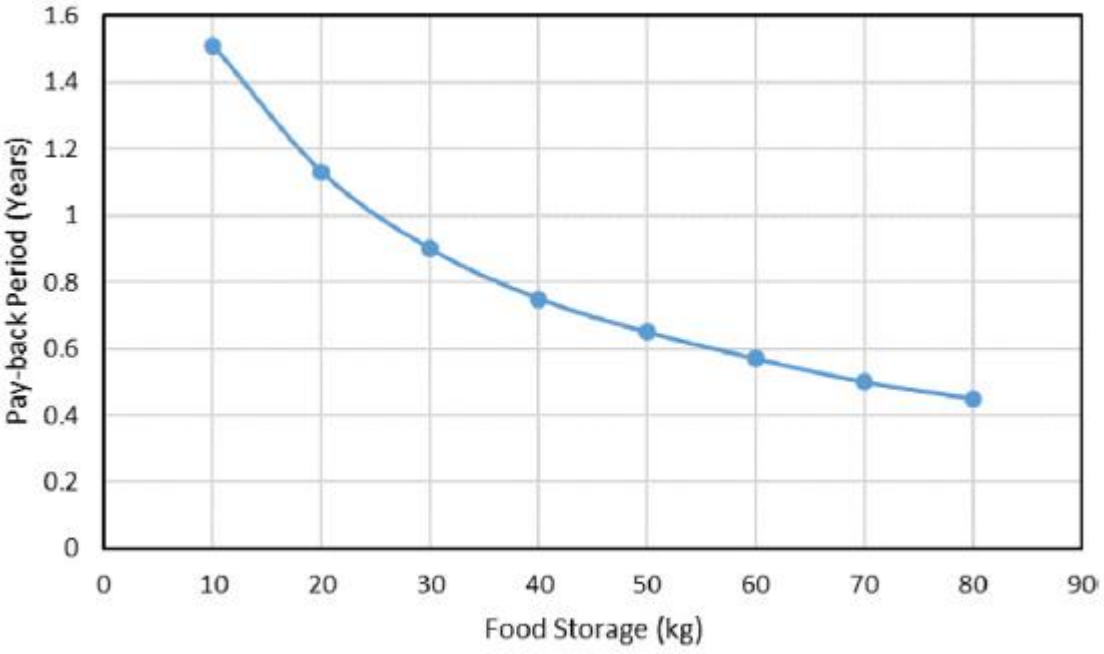


الشكل 1-15: نسب استهلاك الطاقة للحالات الجديدة مقارنة بالحالة الأساسية (من دون PCM)

1-5-8- الدراسة المرجعية الثامنة (Nilesh Purohit, 2019)

يعتبر الأمن الغذائي والسلامة من أهم الأولويات في أيّ مكان. كما أن الحد من هدر الطعام وضمان جودته بتكلفة معقولة أمر منطقي من الناحية التجارية. جذبت فوائد استخدام مواد التخزين الحرارية (Thermal Storage Material–TSM) وخاصة المواد المتحولة الطور (PCM) في خزانات تخزين الأغذية المبردة انتباه الباحثين والمطورين في جميع أنحاء العالم. يمكن أن يضمن الوضع الأمثل لمادة PCM داخل الخزانات المبردة درجة حرارة المنتج ضمن النطاق المقبول، وبالتالي ضمان جودة الطعام. يمكن أن تقدم أيضًا مجموعة من الفوائد الأخرى. هناك أيضًا العديد من التحديات مثل اختيار المواد المناسبة وكميتها ووضعها داخل المقصورة لتحقيق أقصى فائدة. يعد الحد من تلوث الأغذية بسبب PCM وكذلك تجنب تدهور خصائص PCM بسبب التعرض للغذاء والرطوبة من التحديات الأخرى. يجب أن تفوق الفوائد المستمدة من استخدام مادة PCM أيضًا الاستثمار الأولي وأي تحسين في تكلفة التشغيل لنفسه ليكون ناجحًا تجاريًا. تعقب هذا البحث في استخدام PCM في الخزانات المبردة وتقدم أيضًا آلة

حاسبة بسيطة لتقييم فترة الاسترداد. كما تم تحليل حساسية فترة الاسترداد المحسوبة على المتغيرات البارزة. بين البحث أن فترة استرداد رأس المال لتضمين المواد المتحولة تتناقص بازدياد كتلة الطعام ضمن الحجرة المبردة وفق الشكل (1-16).



الشكل 1-16: علاقة فترة استرداد رأس المال مع كتلة الطعام المبردة لحالة تضمين المواد المتحولة الطور

1-6- الإضافة العلمية التي سيقدمها البحث

إن الدراسات المرجعية الآنفة الذكر انقسمت ما بين دراسة تضمين المواد المتحولة الطور في جزء المبخر وما بين دراسة تضمين المواد المتحولة الطور في جزء المكثف لبراد أو مجمدة منزلية. حيث تمت دراسة تأرجح درجة حرارة الحجرة المبردة أو المجمدة واستهلاك الطاقة الكهربائية ومعامل الأداء إلا أنه في هذا البحث أضاف ما يلي:

1. دراسة الأداء وفق تحليل الإكسرجي وقانون الترموديناميك الثاني.
2. دراسة تضمين المواد المتحولة الطور من جهتي المكثف والمبخر معاً.
3. تحديد طريقة لاختيار البارامترات والسماكات المثلى.

4. دراسة تغير الشروط المحيطة عن الشروط التصميمية. على أساس القيام بالتجارب العملية عند درجتي حرارة وسط محيط ^{o}C 38 ,^{o}C 32.

لذلك جرى في هذا البحث:

1. القيام بالتجارب العملية للحالة الأساسية (حالة المجمدة التقليدية بدون تضمين أية مواد متحولة الطور) مع تحميل حجرة المجمدة بالمواد اللازمة، وذلك لمعرفة البارامترات اللازمة من زمن دورة الضاغط الكاملة بالحالة المستقرة والتي تتضمن زمن التشغيل وزمن التوقف وكذلك لتحديد درجات الحرارة اللازمة (تكاثف، تبخر، قبل وبعد الضاغط، ...) عند درجتي حرارة ^{o}C 32 و^{o}C 38.
2. تحديد بارامترات المادة المتحولة اللازم تضمينها في حجرة المجمدة، ومقارنة هذه الحالة بالحالة الأساسية.
3. تحديد بارامترات المادة المتحولة الطور اللازم تضمينها من جهة المكثف، ومقارنة هذه الحالة بالحالة الأساسية.
4. مقارنة حالة تضمين المواد المتحولة الطور في المكثف وتضمينها في المبخر معاً مع الحالات السابقة.

الفصل الثاني

2- الحالة الأساسية – المجمدة التقليدية

إن الهدف من الإجراء التجريبي للحالة الأساسية – المجمدة التقليدية أي بدون تضمين مواد التحول الطوري في هذه المرحلة هو تحديد زمن دورة عمل الضاغط والتي تتضمن زمن التشغيل وزمن التوقف للضاغط. وكذلك تحديد مؤشرات الأداء للحالة الأساسية من استهلاك الطاقة الكهربائية، معامل الأداء COP، نسبة زمن التشغيل المستقر، الإكسرجي، مردود قانون الترموديناميك الثاني، وذلك لمقارنة النتائج مع الحالات الجديدة.

2-1- المراجع التي يجب الاعتماد عليها عند اختبارات التطوير للبرادات والمجمدات المنزلية

بحسب (ASHRAE Handbook—Refrigeration, 2018) يوجد خمسة مراجع يمكن اتباع أحدها عند إجراء اختبارات التطوير على حجرة المواد الطازجة أو المجمدة المنزلية وفق التالي:

1. AHAM HRF-01
2. AS/NZS 4474.1
3. KS C9305
4. IEC 62552:2007
5. IEC 62552:2015

كما حدد كل مرجع البارامترات التالية عند إجراء الاختبار وهي:

1. درجة الحرارة الجافة المحيطة.
2. الرطوبة النسبية المحيطة.
3. درجة حرارة الضبط لكل من حجرتي المواد الطازجة والمجمدة.
4. عدد مرات فتح وإغلاق الباب.
5. نسبة التحميل.
6. زمن التجربة.

تم الاعتماد على AHAM HRF-01 في عملية الاختبار والذي يبين شروطه الجدول (2-1):

جدول 2-1: بارامترات وشروط الاختبار بحسب AHAM HRF-01

البارامتر	التجربة الأولى	التجربة الثانية
درجة الحرارة الجافة المحيطة	32 °C	38 °C
الرطوبة النسبية المحيطة	–	–
درجة حرارة الضبط لحجرة المجمدة	−18 °C	−18 °C
عدد مرات فتح وإغلاق الباب	بدون فتح وإغلاق	بدون فتح وإغلاق
نسبة التحميل	75%	75%
زمن التجربة	24 ساعة	24 ساعة

ذكر المرجع أن عملية اختبار أي تطوير على البرادات أو المجمدات المنزلية تتم بدون فتح وإغلاق للباب. إن أية عملية فتح للباب في حالة تضمين المواد المتحولة الطور ستخفف من تذبذبات درجة الحرارة ضمن الحجرة المبردة أو المجمدة نظراً للطاقة الباردة والتي من الممكن طرحها من المواد المتحولة الطور (B. Gin a, 2010).

كما أن المرجع أوصى بنسبة تحميل 75% من الحمل الاسمي وهي الحالة الأكثر انتشاراً. إن أية زيادة أو نقصان في نسبة التحميل يؤدي إلى تغير نسبة زمن التشغيل وبالتالي إلى زيادة تبريد محسوس أو تسخين محسوس للمواد المتحولة الطور والذي من الممكن إهماله مقارنة بالتبريد الكامن.

2-2- المجمدة المنزلية المختارة والتجربة الأساسية – المنصة الاختبارية

تم إجراء الاختبار اللازم على مجمدة منزلية Litter 132 من طراز VF0611 في مختبرات شركة الحافظ في مدينة دمشق والموضحة مواصفاتها في الجدول (2-2) عند درجة حرارة وسط محيط 32 °C للتجربة الأولى و38 °C للتجربة الثانية. حيث تم الحفاظ على درجة حرارة الوسط المحيط عن طريق مكيفين جداريين باستطاعة 1 طن تبريدي لكل منهما عند درجة حرارة خارجية مساوية 35 °C وسخانات كهربائية باستطاعة 6 kW متوضعة في غرفة الاختبار المعزولة حرارياً بألواح الستيريوبور سماكة 5 cm. تحتوي

المجمدة على أربعة رفوف. تم تحميل حجرة التجميد Litter 99 من مواد التجريب 75%) من الحمل الاسمي للمجمدة). مواد التجريب هي عبارة عن وحدات M–PACK وهو الاسم المتعارف عليه تجارياً وهي اختصار لعبارة "Measurement Package" أي حزمة القياس ويزن كل منها kg 1 أو 0.5 kg وهي مزيج من الماء والغلوكوز والخشب وتستعمل خصيصاً عند إجراء اختبارات التطوير على المجمدات كما هو مبين في الشكل (2–1). حساسات درجة الحرارة من النوع PT100 وتمت معايرتها قبل البدء بالتجربة ووصلها مع منظومة تحصيل البيانات (Data Acquisition). تستشعر الحساسات لدرجات الحرارة وفق التالي:

- بداية المبخر (خروج مزيج بخار وسائل وسيط التبريد من الأنبوبة الشعرية) ووسط المبخر (درجة حرارة التبخر) ونهاية المبخر (درجة حرارة دخول بخار وسيط التبريد إلى المبادل الحراري الاسترجاعي).
- بداية المكثف (دفع الضاغط) ووسط المكثف (درجة حرارة التكاثف) ونهاية المكثف (دخول سائل وسيط التبريد إلى المبادل الحراري الاسترجاعي).
- سحب الضاغط (خروج بخار وسيط التبريد من المبادل الحراري الاسترجاعي).
- دخول سائل وسيط التبريد إلى الأنبوبة الشعرية (خروج سائل وسيط التبريد من المبادل الحراري الاسترجاعي)
- المناسيب ضمن الحجرة المجمدة في كل رف وفق الارتفاعات التالية عن سطح الأرضية (DOWN10 cm, MID–DOWN–30 cm, MID–UP–50 cm, UP–70 cm).
- درجة حرارة الوسط المحيط.

درجة حرارة نقطة الضبط لحجرة المجمدة °C 18– ويتوضع حساس متحكم درجة حرارة حجرة المجمدة في الجزء العلوي منه. تتألف دارة تبريد المجمدة المنزلية من الضاغط والمكثف والمبادل الحراري الاسترجاعي والأنبوبة الشعرية التي تقوم بخنق وسيط التبريد R134a، والمبخر. تم وصل المجمدة بقابس

الكهرباء واستمر بالعمل لمدة 24 ساعة متواصلة. توضح الأشكال (2-1, 2-2, 2-3, 2-4, 2-5, 2-6, 2-7) صور المجمدة المنزلية وأماكن توضع حساسات درجة الحرارة ومخطط دارة التبريد.

إن منظومة تحصيل البيانات هي من طراز OMB-DAQ 55/56 والتي تستخدم عدداً من المدخلات (تردد، جهد، مزدوجات حرارية) وتخرجها على شاشة الحاسب.

جدول 2-2: مواصفات المجمدة المختارة لإجراء التجارب

طراز المجمدة	VF0611
السعة	132 Litter
الارتفاع	125 cm
العرض	50 cm
العمق	64 cm
الضاغط	مكبسي باستطاعة 0.25 HP من نوع باناسونيك وموديل QB57C11GAX0
وسيط التبريد	R134a
التغذية	220 volt/ 50 Hz
المبخر	Roll and Band بمساحة إجمالية 2 m^2
المكثف	Wire and Tube أنبوب نحاسي وريش نحاسية بطول أنبوب 6,960 m
العزل الحراري لجدران المجمدة	5 cm من مادة الفوم ذي معامل التوصيل الحراري 0.024 W/m.K



الشكل 2-1: وحدات التجريب M-PACK



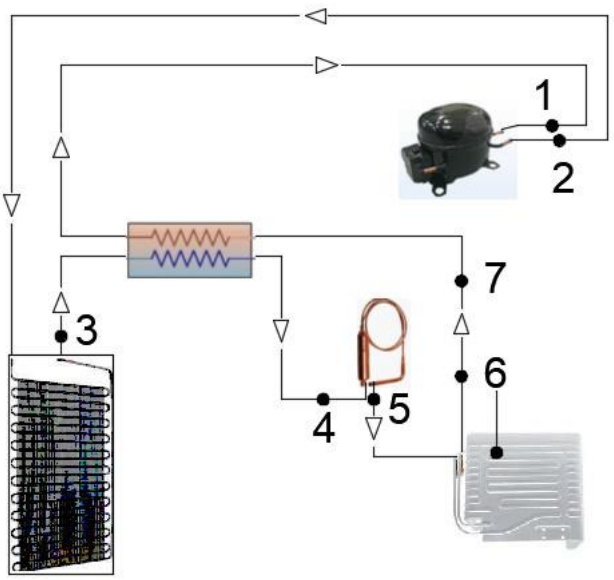
الشكل 2-2: صورة أمامية توضح المبخر وصورة خلفية توضح المكثف للمجمدة المنزلية



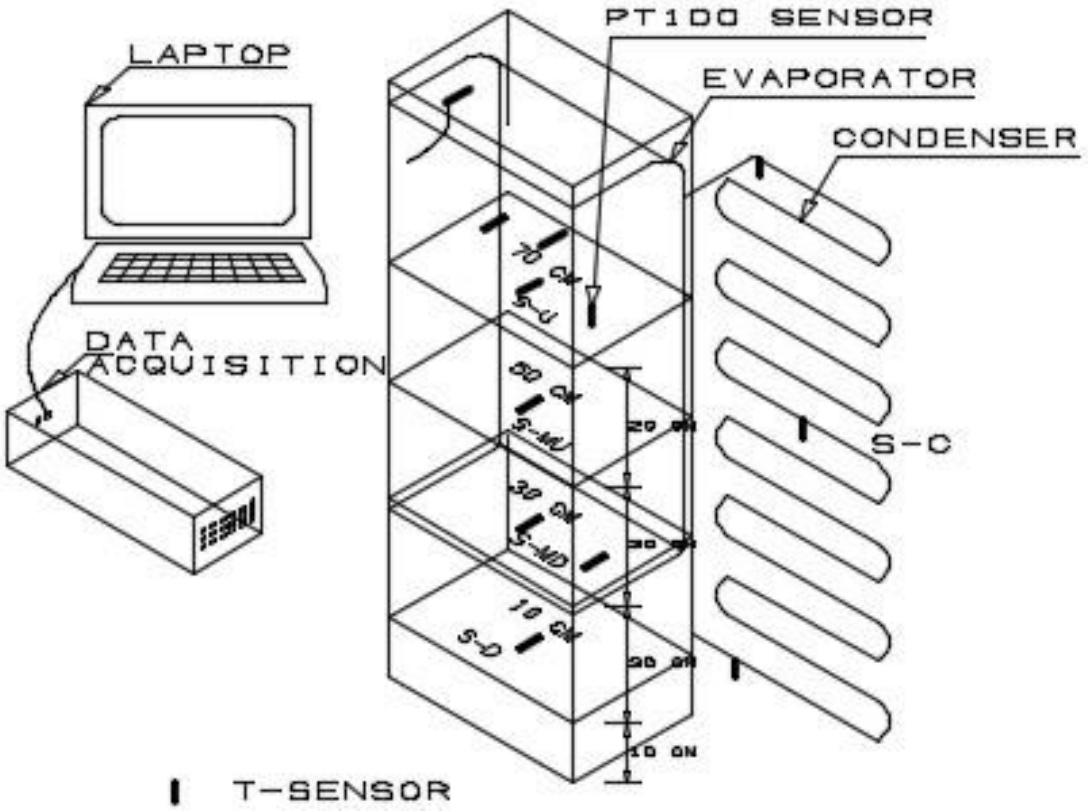
الشكل 2-3: المختبر التجريبي



الشكل 2-4: حساسات درجة الحرارة ضمن رفوف المجمدة



الشكل 2-5: دراة تبريد المجمدة المنزلية



الشكل 2-6: توضح حساسات درجة الحرارة للمنصة الاختبارية

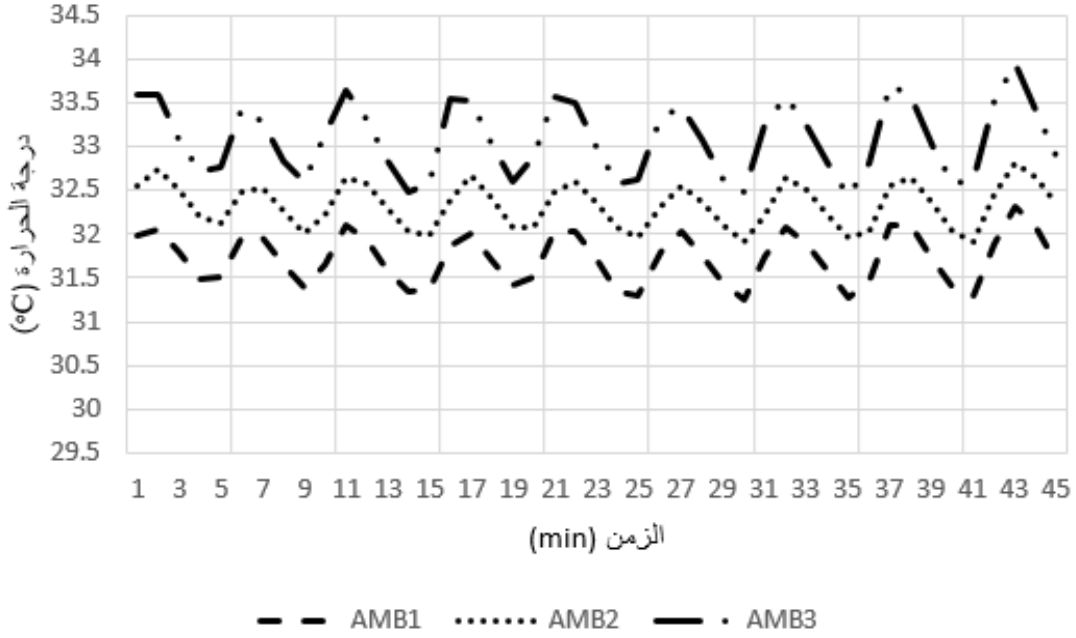


الشكل 2-7: وسيلة الحصول على البيانات – (Data Acquisition)

2-3- دراسة الحالة الأساسية عند درجة حرارة وسط محيط ^{o}C 32

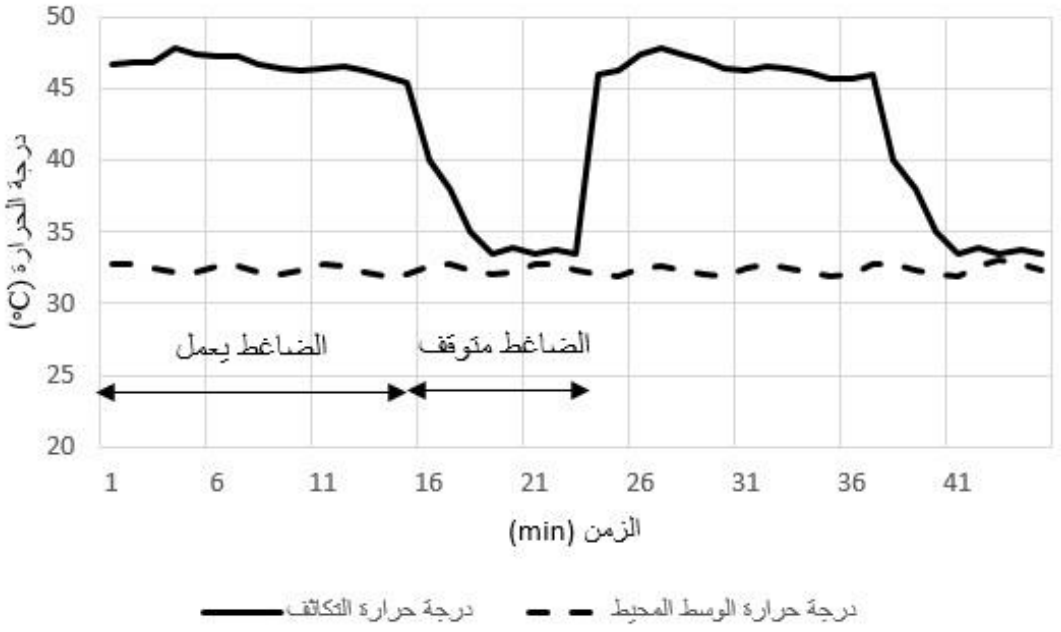
تمت المحافظة على درجة حرارة غرفة المختبر بحدود ^{o}C 32 عن طريق مكيفين جداريين وسخانات كهربائية. يوجد ثلاثة حساسات لقياس درجة حرارة الغرفة بأماكن مختلفة من الغرفة. وتم اعتماد المتوسط الحسابي لهم.

يبين الشكل (2-8) علاقة درجات حرارة الحساسات الثلاثة مع الزمن.



الشكل 2-8: تغير قيم حساسات درجات حرارة غرفة المختبر (الوسط المحيط) مع الزمن

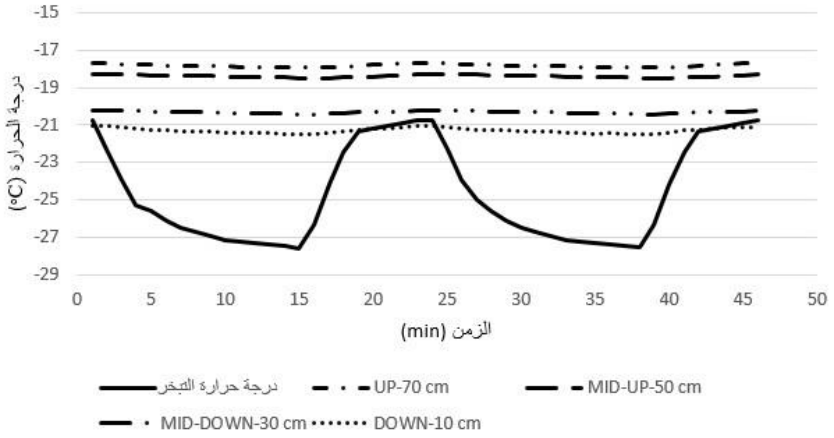
كما يوضح الشكل (2–9) تغيرات متوسط درجات حرارة الوسط المحيط ودرجة حرارة وسط المكثف (والتي يمكن اعتبارها درجة حرارة التكاثف بإهمال المقاومة الحرارية لأنبوب المكثف) مع الزمن لدورتي عمل مستقرتين للضاغط. خلال فترة عمل الضاغط ترتفع درجة حرارة التكاثف إلى 46.1 °C أي أعلى من درجة حرارة الوسط المحيط بمقدار 14.1 °C لتنخفض درجة حرارة المكثف وتقترب من درجة حرارة الوسط المحيط عند توقف الضاغط عن العمل. كما يتبين من الشكل (2–9) أن الضاغط يعمل لمدة 15 min ليتوقف بعدها مدة 10 min عن العمل لتكون مدة دورة عمل الضاغط 25 min بنسبة تشغيل 60%.



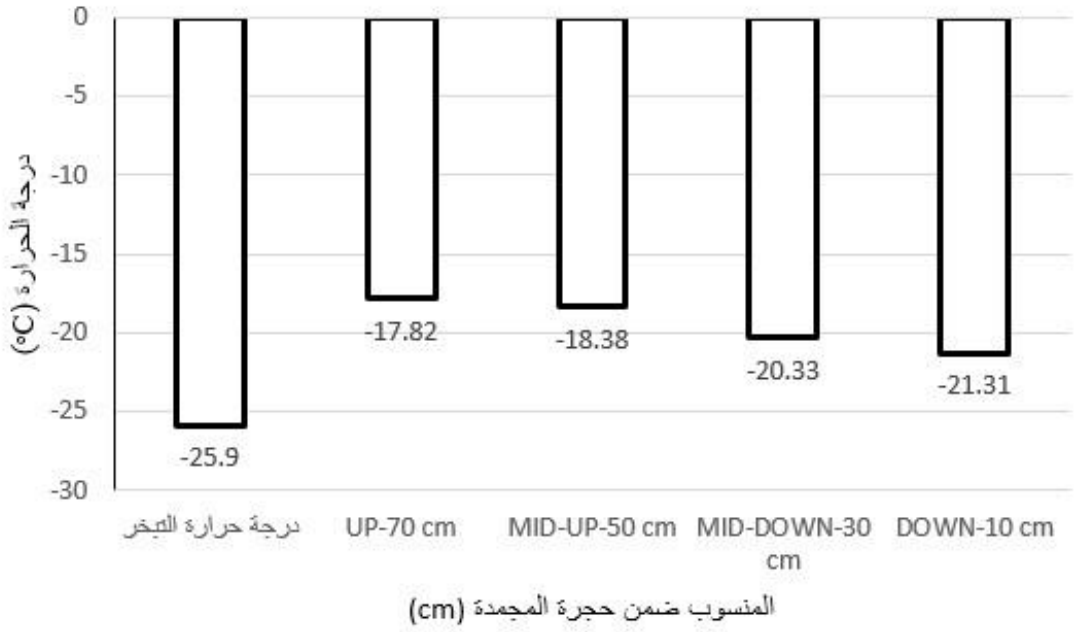
الشكل 2-9: تغير متوسط درجات حرارة الوسط المحيط ودرجة حرارة التكاثف مع الزمن لدورتي عمل مستقرتين للضاغط

يوضح الشكل (2–10) درجة حرارة وسط المبخر (درجة حرارة التبخر بإهمال المقاومة الحرارية للأنبوب النحاسي للمبخر) ودرجات الحرارة ضمن المناسيب الأربعة حجرة المجمدة خلال دورتي عمل مستقرتين للضاغط.

يوضح الشكل (2–11) قيم درجات الحرارة ضمن حجرة المجمدة باختلاف المناسيب، وكذلك درجة حرارة التبخر، حيث بلغ متوسط درجات حرارة التبخر $-25.9\ ^{o}C$.



الشكل 2-10: تغير درجة حرارة التبخر ودرجات حرارة المناسيب الأربعة ضمن حجرة المجمدة



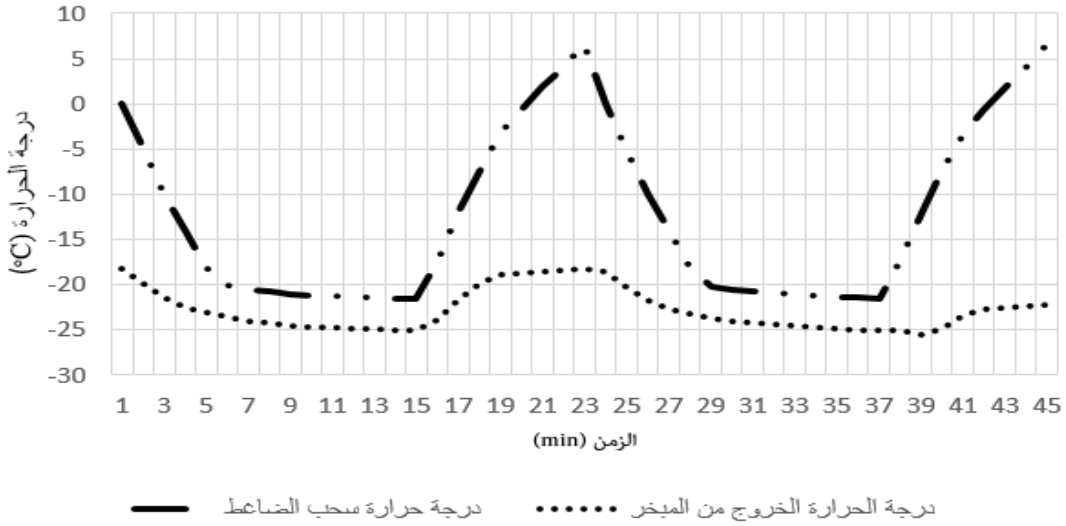
الشكل 2-11: متوسط درجات الحرارة في كل منسوب من المناسيب الأربعة لحجرة المجمدة ودرجة حرارة التبخر

يُلاحظ من الشكل (2–10) أن درجات الحرارة تكون متفاوتة ضمن حجرة المجمدة بمقدار 3.49 °C أي بنسبة 19.58% ما يعني ضرورة اعتماد مواد متحولة الطور لها درجات حرارة تحول طوري مختلفة في كل منسوب لكسب القدر الأكبر من عملية التحول الطوري عند إجراء الاختبارات على البراد المحدَث.

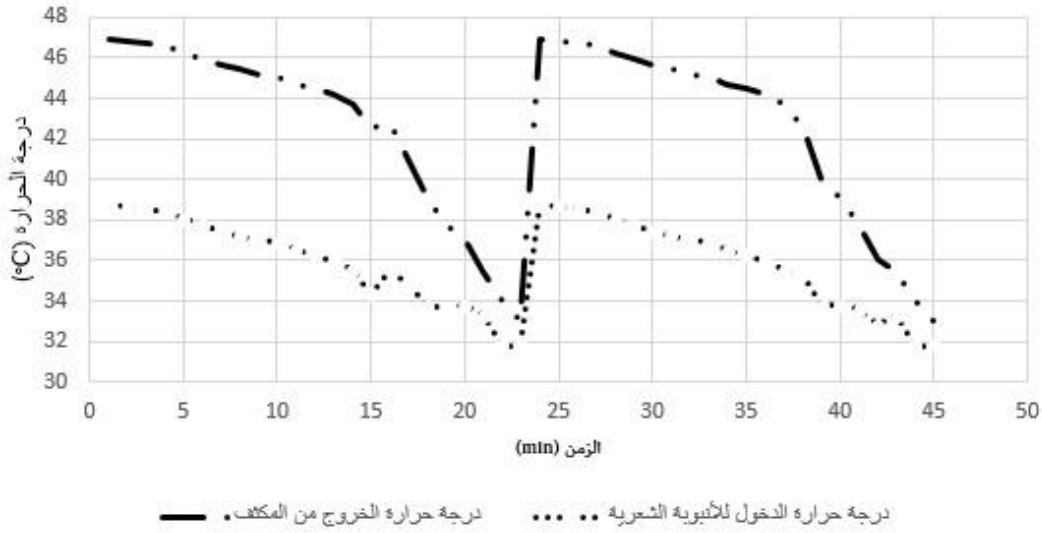
يوضح الشكل (2–12) تغير درجتي حرارة الخروج من المبخر (وهي درجة حرارة دخول بخار وسيط التبريد للمبادل الحراري الاسترجاعي) ودرجة حرارة سحب الضاغط (وهي درجة حرارة خروج بخار وسيط التبريد من المبادل الحراري الاسترجاعي) وذلك لدورتي عمل مستقرتين للضاغط. من الملاحظ أنه في المبادل الحراري الاسترجاعي يحدث زيادة تسخين (Super Heating) لبخار وسيط التبريد 4.5 °C وبالتالي يتم تجنب دخول البخار المشبع الجاف أو سائل وسيط التبريد إلى الضاغط. يُلاحظ أيضاً أن تغير درجة حرارة سحب الضاغط خلال فترة توقفه عن العمل أكبر من تغير درجة حرارة الخروج من المبخر خلال نفس الزمن وذلك بسبب توضع حساس سحب الضاغط خارج الحجرة المبردة بينما يتوضع حساس الخروج من المبخر ضمن الحجرة المبردة.

كما يوضح الشكل (2–13) تغير درجتي حرارة الخروج من المكثف (درجة حرارة دخول (سائل) وسيط التبريد إلى المبادل الحراري الاسترجاعي) ودرجة حرارة الدخول للأنبوبة الشعرية (وهي درجة حرارة خروج

سائل وسيط التبريد من المبادل الحراري الاسترجاعي). من الملاحظ أنه في المبادل الحراري الاسترجاعي يحدث زيادة تبريد (Sub–Cooling) لسائل وسيط التبريد بحدود $8.2\ ^oC$ وذلك يؤدي إلى زيادة السعة التبريدية في المبخر.



الشكل 2-12: تغير درجة حرارة الخروج من المبخر وسحب الضاغط مع الزمن



الشكل 2-13: تغير درجة حرارة الخروج من المكثف والدخول للأنبوبة الشعرية مع الزمن

يمكن من خلال النتائج السابقة رسم دورة التبريد على مخطط p–h (انتالبي – ضغط) وفق الفرضيات التالية:

- المقاومة الحرارية لأنابيب وسيط التبريد النحاسية مهملة.

- عمليات التبادل الحراري في المكثف والمبخر والمبادل الحراري الاسترجاعي هي عمليات إيزوبارية.
- عملية الانضغاط هي عملية أديباتية حقيقية ويكون المردود الإيزوانتروبي للضاغط (وهو نسبة العمل المقدم للضاغط في الحالة المثالية إلى العمل الحقيقي المقدم) ويساوي بحسب هذه التجربة 71.64%.

يبين الجدول (2–3) بارامترات النقط الموضحة بالشكل باستخدام برنامج EES Ver. 9.214.

كما يبين الشكل (2–14) مخطط دورة التبريد على مخطط p–h (انتالبي – ضغط) وفق الفرضيات السابقة.

يتضح من مخطط p–h أن قيمة معامل أداء دارة التبريد للحالة الأساسية يساوي COP=1.81. والذي يحسب بالعلاقة:

$$COP = \frac{h_7 - h_5}{h_2 - h_1}$$

حيث تمثل النقطة (7) نقطة الخروج من المبخر.

تعطى معادلة التوازن الحراري للمبادل الحراري الاسترجاعي بالشكل:

$$\eta \int_{t_4}^{t_3} C_{p,l} dt = \int_{t_7}^{t_1} C_{p,v} dt$$

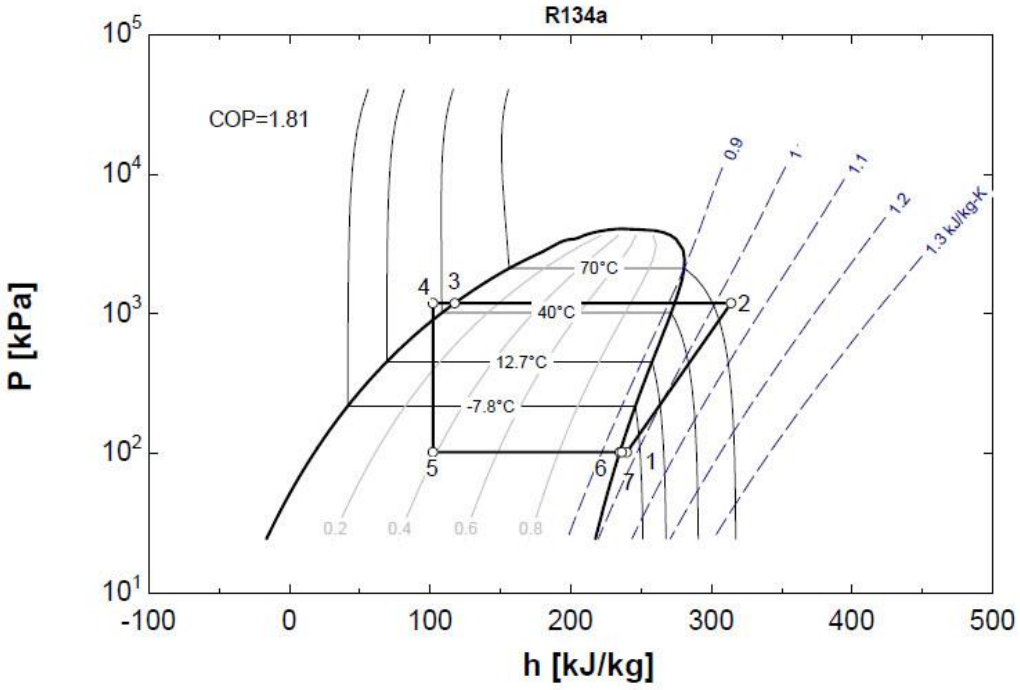
حيث η مردود المبادل الحراري الاسترجاعي.

$C_{p,l}$: السعة الحرارية لسائل وسيط التبريد تحت ضغط ثابت.

$C_{p,v}$: السعة الحرارية لبخار وسيط التبريد تحت ضغط ثابت.

جدول 2-3: بارمترات نقط دارة التبريد للحالة الأساسية

	cp_i [kJ/kg-K]	h_i [kJ/kg]	P_i [kPa]	$P_{sat,i}$ [kPa]	s_i [kJ/kg-K]	T_i [C]	x_i
1	0.7966	239.8	102.3	102.3	0.9715	-19.55	
2		313.9	1195	1195	1.032	82.3	
3	1.538	117.5	1195		0.4237	46.13	0
4		102	1195		0.3744	35.81	
5		102	102.3		0.4146	-25.87	0.3879
6		234.8	102.3		0.9514	-25.87	1
7		236.2	102.3			-24.05	



الشكل 2-14: مخطط p–h لدورة التبريد للحالة الأساسية

إن متوسط استطاعة الضاغط الكهربائية المستجرة هو 125 W خلال فترة عمل الضاغط، عندئذ تكون الاستطاعة التبريدية تساوي: $125X1.81 = 226.25\ W$.

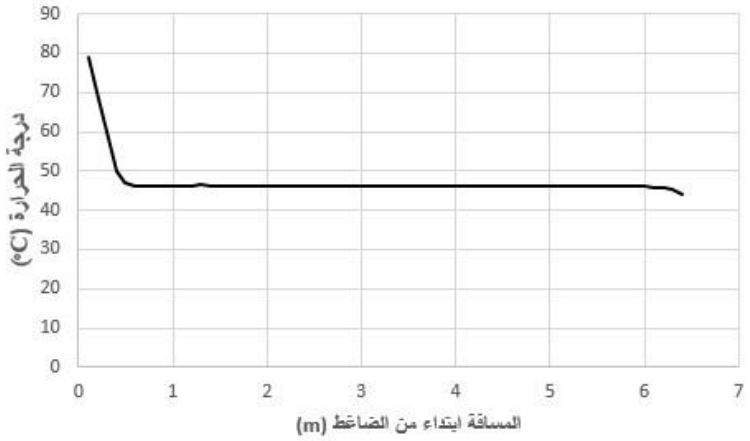
ويمكن حساب الاستطاعة التبريدية من خلال ضرب معدل التدفق الكتلي لوسيط التبريد بالإنتاجية التبريدية.

يبين الشكل (2–15) إحدى الصور الحرارية التجريبية التي أُخذت لجزء من مكثف المجمدة عند عمل الضاغط بواسطة كاميرا حرارية موجودة في شركة الحافظ.



الشكل 2-15: إحدى الصور الحرارية التجريبية التي أُخذت لجزء من مكثف المجمدة عند عمل الضاغط

يبين الشكل (2–16) تغير درجات حرارة المكثف مع المسافة ابتداءً من نقطة الخروج من الضاغط اعتماداً على الصور الحرارية.

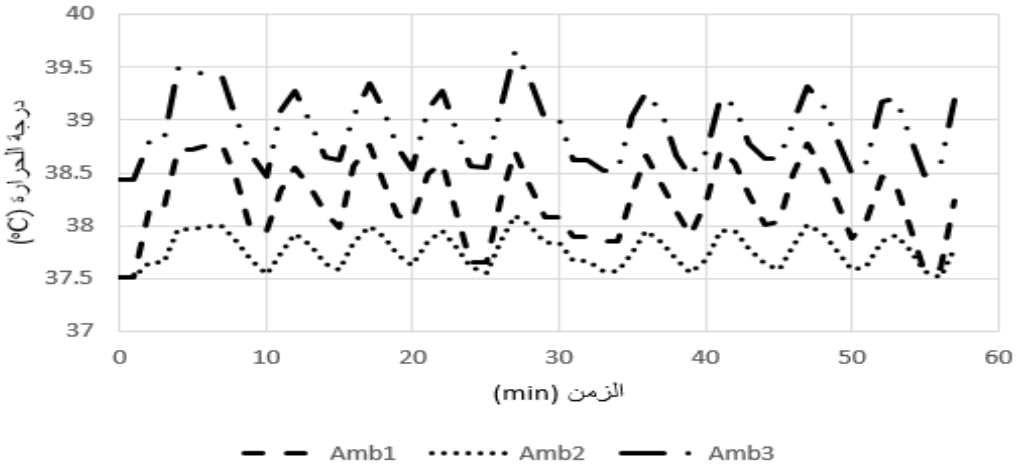


الشكل 2-16: تغير درجات حرارة المكثف مع المسافة ابتداءً من نقطة الخروج من الضاغط

بحسب الشكل (2–16) فإن البخار المحمص لوسيط التبريد R134a يخرج من الضاغط بدرجة حرارة 79.2 °C ويقطع مسافة 0.48 m للوصول إلى درجة حرارة التكاثف 46.1 °C. تم إدخال هذه الشروط كشروط حدين ضمن برنامج ANSYS.

2-4- دراسة الحالة الأساسية عند درجة حرارة وسط محيط $38\ ^oC$

تمت المحافظة على درجة حرارة غرفة المختبر بحدود $38\ ^oC$ عن طريق مكيفين جداريين وسخانات كهربائية. يوجد ثلاثة حساسات لقياس درجة حرارة الغرفة حيث يبين الشكل (2-17) علاقة درجات حرارة الحساسات الثلاث مع الزمن.

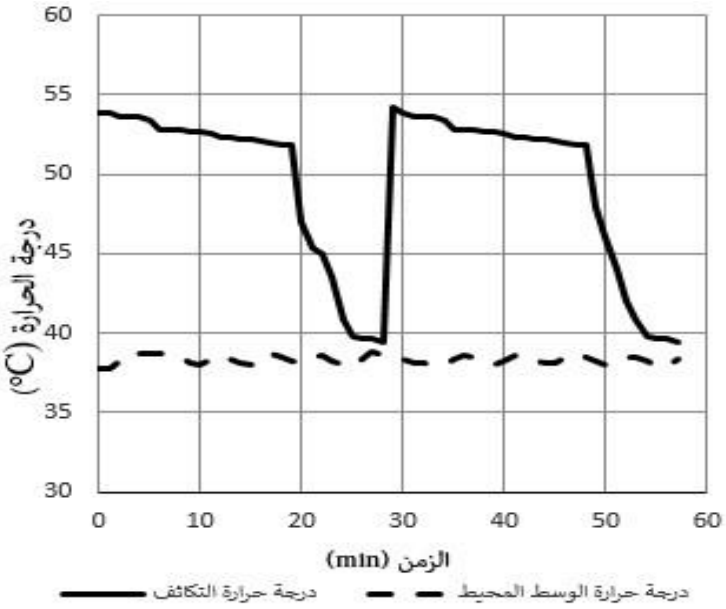


الشكل 2-17: تغير قيم حساسات درجات حرارة غرفة المختبر مع الزمن

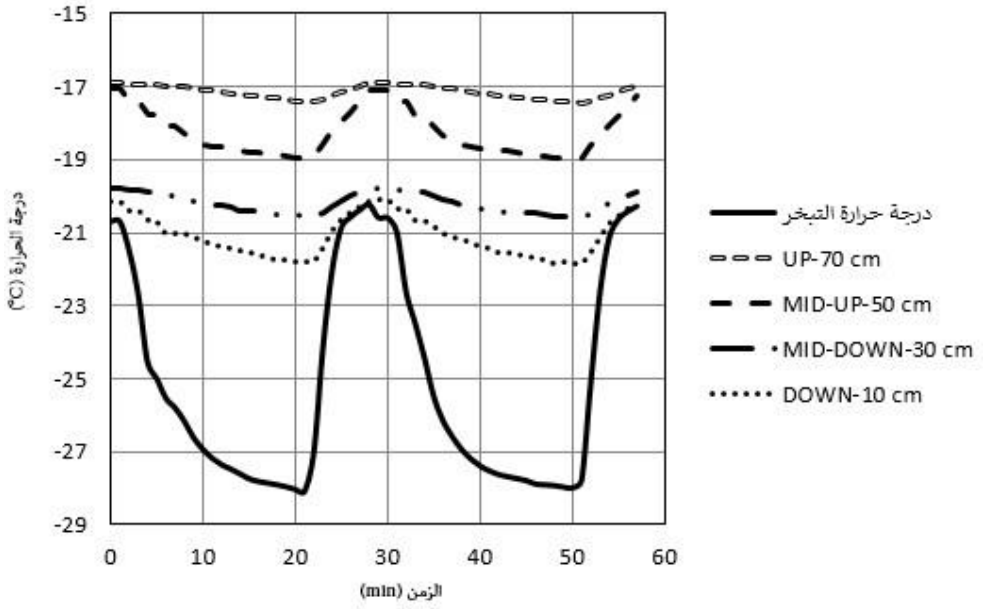
كما يوضح الشكل (2-18) تغيرات متوسط درجات حرارة الوسط المحيط ودرجة حرارة وسط المكثف (والتي يمكن اعتبارها درجة حرارة التكاثف بإهمال المقاومة الحرارية لأنبوب المكثف) مع الزمن لدورتي عمل مستقرتين للضاغط. خلال فترة عمل الضاغط ترتفع درجة حرارة التكاثف إلى $52.24\ ^oC$ أي أعلى من درجة حرارة الوسط المحيط بمقدار $14.24\ ^oC$ لتنخفض درجة حرارة المكثف وتقترب من درجة حرارة الوسط المحيط عند توقف الضاغط عن العمل. كما يتبين من الشكل (2-18) أن الضاغط يعمل لمدة 22 min ليتوقف بعدها مدة 7 min عن العمل لتكون مدة دورة عمل الضاغط 29 min بنسبة تشغيل 75.86%.

يوضح الشكل (2-19) درجة حرارة وسط المبخر (درجة حرارة التبخر بإهمال المقاومة الحرارية للأنبوب النحاسي) ودرجات الحرارة ضمن المناسيب الأربعة حجرة المجمدة خلال دورتي عمل مستقرتين للضاغط.

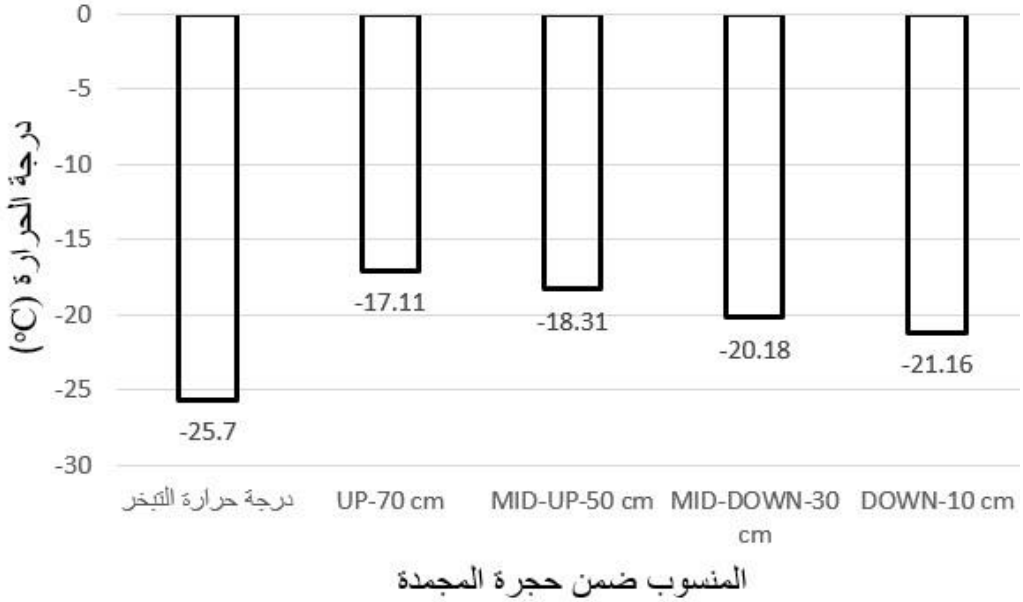
يوضح الشكل (2–19) قيم درجات الحرارة ضمن حجرة المجمدة باختلاف المناسيب وكذلك درجة حرارة التبخر، حيث بلغ متوسط درجات حرارة التبخر $-25.7\ ^{o}C$.



الشكل 2-18: تغير متوسط درجات حرارة الوسط المحيط ودرجة حرارة التكاثف مع الزمن لدورتي عمل مستقرتين للضاغط



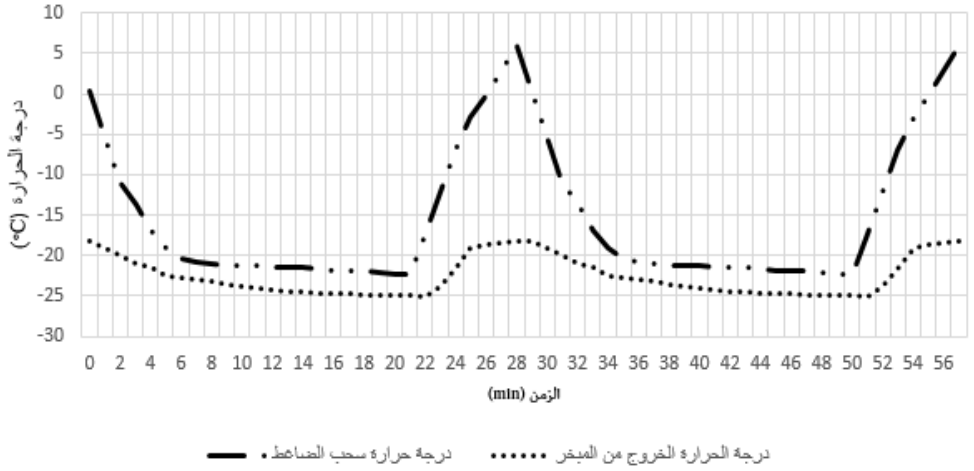
الشكل 2-19: تغير درجة حرارة التبخر ودرجات حرارة المناسيب الأربعة ضمن حجرة المجمدة



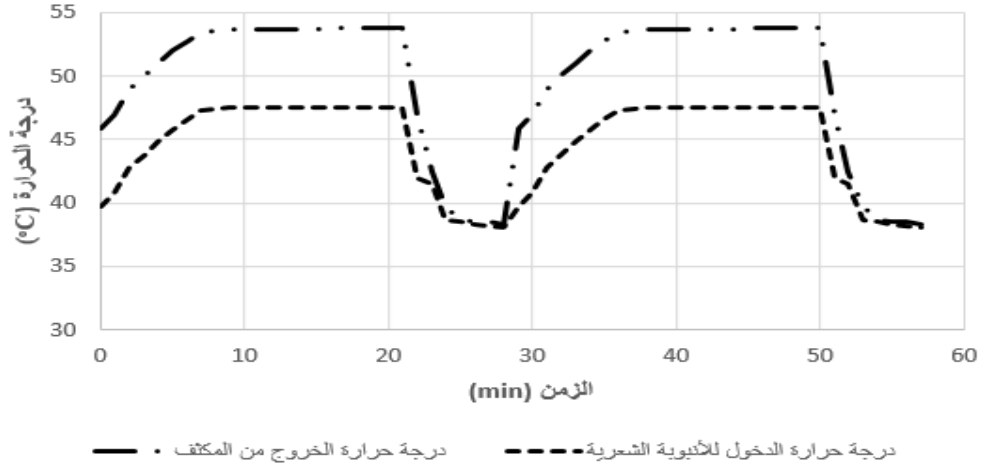
الشكل 2-20: متوسط درجات الحرارة في كل منسوب من المناسيب الأربعة لحجرة المجمدة ودرجة حرارة التبخر

من الشكل (2–20) نلاحظ أن درجات الحرارة تكون متفاوتة ضمن حجرة المجمدة بمقدار 4.05 °C نظراً لاختلاف كثافة الهواء ضمن الحجرة المجمدة (لا يوجد انتقال حرارة بالحمل القسري ضمن الحجرة المجمدة) أي بنسبة 23.67% ما يعني ضرورة اعتماد مواد متحولة الطور لها درجات حرارة تحول طوري مختلفة في كل منسوب لكسب القدر الأكبر من عملية التحول الطوري عند إجراء الاختبارات على البراد المحدث. يوضح الشكل (2–21) تغير درجتي حرارة الخروج من المبخر (وهي درجة حرارة دخول بخار وسيط التبريد للمبادل الحراري الاسترجاعي) ودرجة حرارة سحب الضاغط (وهي درجة حرارة خروج بخار وسيط التبريد من المبادل الحراري الاسترجاعي) وذلك لدورتي عمل مستقرتين للضاغط. من الملاحظ أنه في المبادل الحراري الاسترجاعي يحدث زيادة تسخين (Super Heating) لبخار وسيط التبريد بحدود 3.5 °C وبالتالي يتم تجنب دخول البخار المشبع الجاف إلى الضاغط. يُلاحظ أيضاً أن تغير درجة حرارة سحب الضاغط خلال فترة توقفه عن العمل أكبر من تغير درجة حرارة الخروج من المبخر خلال نفس الزمن وذلك بسبب توضع حساس سحب الضاغط خارج الحجرة المبردة بينما يتوضع حساس الخروج من المبخر ضمن الحجرة المبردة.

كما يوضح الشكل (2–22) تغير درجتي حرارة الخروج من المكثف (درجة حرارة دخول (سائل) وسيط التبريد إلى المبادل الحراري الاسترجاعي) ودرجة حرارة الدخول للأنبوبة الشعرية (وهي درجة حرارة خروج سائل وسيط التبريد من المبادل الحراري الاسترجاعي). من الملاحظ أنه في المبادل الحراري الاسترجاعي يحدث زيادة تبريد (Sub–Cooling) لبخار وسيط التبريد بحدود 6.2 ^{o}C وذلك يؤدي إلى زيادة السعة التبريدية في المبخر.



الشكل 2-21: تغير درجة حرارة الخروج من المبخر وسحب الضاغط مع الزمن



الشكل 2-22: تغير درجة حرارة الخروج من المكثف والدخول للأنبوبة الشعرية مع الزمن

يمكن من خلال النتائج السابقة رسم دورة التبريد على مخطط p–h (انتالبي – ضغط) وفق الفرضيات التالية:

- المقاومة الحرارية لأنابيب وسيط التبريد النحاسية مهملة.

- عمليات التبادل الحراري في المكثف والمبخر والمبادل الحراري الاسترجاعي هي عمليات إيزوبارية.
- عملية الانضغاط هي عملية أديباتية حقيقية ويكون المردود الإيزوانتروبي للضاغط (وهو نسبة العمل المنجز للضاغط في الحالة المثالية إلى العمل الحقيقي المنجز) مساوياً 68.94%.

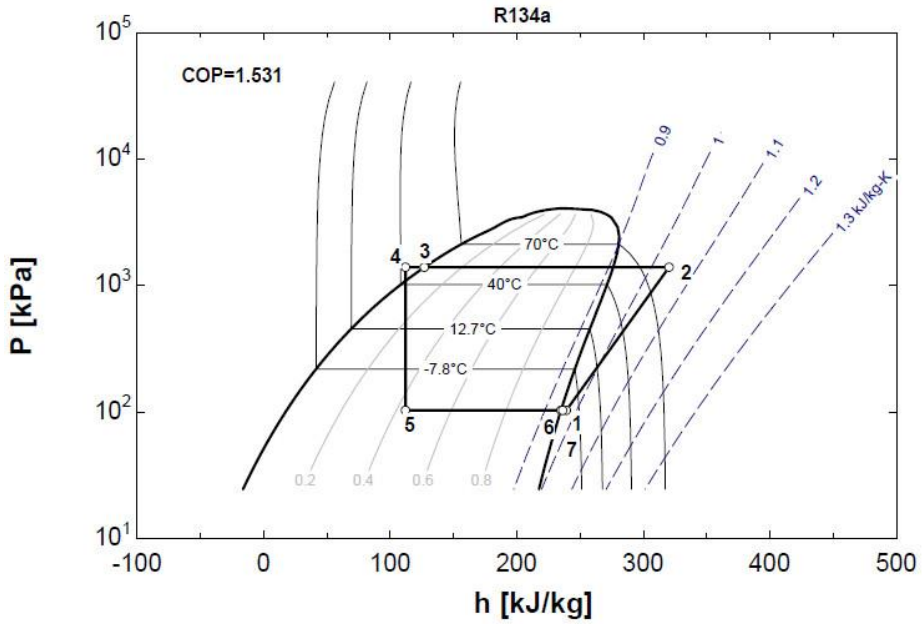
يبين الجدول (2–4) بارامترات النقط باستخدام برنامج EES.

كما يبين الشكل (2–23) مخطط دورة التبريد على مخطط p–h (انتالبي – ضغط) وفق الفرضيات السابقة.

يتضح من مخطط p–h أن قيمة معامل أداء دارة التبريد للحالة الأساسية يساوي COP=1.531.

جدول 2-4: بارمترات نقط دارة التبريد للحالة الأساسية

	cp_i [kJ/kg-K]	h_i [kJ/kg]	P_i [kPa]	$P_{sat,i}$ [kPa]	s_i [kJ/kg-K]	T_i [c]	x_i
1	0.7967	239.1	103.1	103.1	0.9681	-20.38	
2		320.3	1394	1394	1.039	90.75	
3	1.585	127	1394		0.4525	52.24	0
4		112.1	1394		0.4059	42.57	
5		112.1	103.1		0.4549	-25.7	0.4334
6		234.9	103.1		0.9512	-25.7	1
7		236.3	103.1			-23.88	



الشكل 2-23: مخطط p–h لدورة التبريد للحالة الأساسية

إن متوسط استطاعة الضاغط الكهربائية المستجرة هو 142.01 W خلال فترة عمل الضاغط، عندئذ تكون الاستطاعة التبريدية تساوي: $142.01X1.531 = 217.42\ W$.

الفصل الثالث

3- حالة المواد المتحولة الطور ضمن حجرة المجمدة

إن الهدف من هذا البحث هو تحديد نوع وسماكة مادة التحول الطوري الممكن تضمينها ضمن حجرة المجمدة ومعرفة أداء دارة التبريد والمجمدة المنزلية. إن دراسة مسألة التحول الطوري في أنظمة التخزين الكامن وتحديد العلاقة بين جبهة انتشار موجة التجمد أو الانصهار (الحد الفاصل بين الطورين الصلب والسائل) تعرف بمسائل ستيفان.

3-1- الحل التحليلي ومسألة ستيفان

تُعد مسألة ستيفان "Stefan problem " في الرياضيات والفيزياء وتطبيقاتهما، لا سيما في انتقالات الطور في المادة، نوعاً خاصاً من مسألة القيمة الحدية لنظام المعادلات التفاضلية الجزئية (PDE)، حيث يمكن أن تتحرك الحدود بين المراحل الطورية بمرور الوقت. كما تُعتبر أيضاً مجموعة فرعية من فئة كبيرة من المسائل المعروفة باسم مسألة الحدود المتحركة "Moving Boundary Problem".

تهدف مسألة ستيفان الكلاسيكية إلى وصف تطور الحدود بين مرحلتين من مادة تمر بتغير طور، على سبيل المثال ذوبان مادة صلبة كتحول الجليد إلى ماء. يتم تحقيق ذلك عن طريق المعادلات التفاضلية الناظمة لانتقال الحرارة في كلا المنطقتين، مع مراعاة الحدود والشروط الابتدائية. في الحد الفاصل بين المرحلتين (مسألة ستيفان الكلاسيكية)، يتم ضبط درجة الحرارة على درجة حرارة التحول الطوري. لإغلاق النظام الرياضي، يلزم وجود معادلة أخرى وهو شرط ستيفان الحدي.

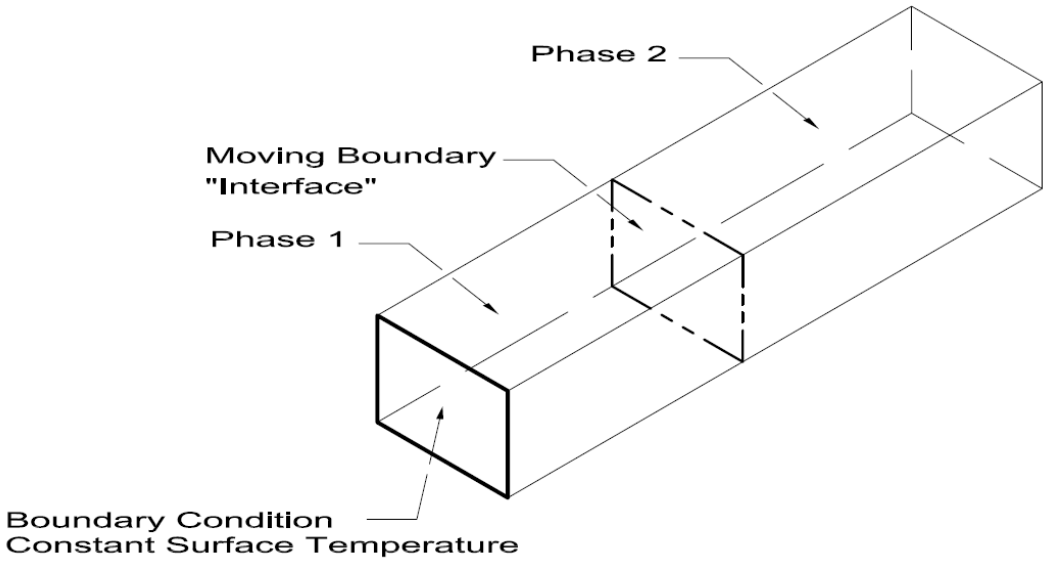
تمت تسمية المسألة على اسم جوزيف ستيفان، الفيزيائي الذي قدم الفئة العامة لمثل هذه المسائل عام 1890 م في سلسلة من أربع أوراق بحثية تتعلق بتجمد الأرض وتكوين الجليد البحري. ومع ذلك، تمت قبل حوالي 60 عامًا دراسة مسألة مماثلة تتعلق بتكوين قشرة الأرض بواسطة لامي وكلابيرون. يعرف حل مسائل ستيفان بحل نيومان – Neumann solution. (G. Myers, 2019).

يمكن من وجهة نظر رياضية تقسيم النظام المغلق إلى قسمين طور صلب وأخر سائل بحيث تكون المعادلات التفاضلية الجزئية في كل طور مستمرة وقابلة للتفاضل. من وجهة نظر فيزيائية، تمثل هذه الحلول الخصائص الفيزيائية والحرارية لكل طور. الحدود المتحركة "Moving Boundaries" أو الحدود

الفاصلة بين الطورين الصلب والسائل "Interface" وهي عبارة عن أسطح رقيقة تسعى سماكتها إلى الصفر تفصل بين الطورين. وبالتالي فإن حل المعادلات التفاضلية الجزئية الكامل للنظام سيعاني من انقطاعات عبر الحد الفاصل. ومن هنا برزت الحاجة إلى إضافة شرط إضافي للنظام وهو شرط ستيفان "The Stefan Condition" لإغلاق النظام الفيزيائي.

يعبر شرط ستيفان عن سرعة الحدود المتحركة كتابع للشروط الحدية (ثبات درجة الحرارة الحدية).

في مسائل انتقال الحرارة مع حدوث تغير في الطور، يتم الأخذ بعبن الاعتبار معادلة حفظ الطاقة على جانبي الحد المتحرك. بمعنى آخر، عند حدوث التحول الطوري لمادة، يلزم انتقال كمية من الحرارة بين الطورين مساوية لكمية حرارة التحول الطوري (كمية الحرارة الكامنة) وهو ما عبر عنه ستيفان بشرطه لتكوين نظامٍ مغلقٍ منظومٍ بمعادلات تفاضلية جزئية قابلة للتفاضل وإيجاد الحل. يبين الشكل (3-1) مسألة ستيفان لانتقال الحرارة مع تحول طوري عند تعرض صفيحة لمنبع درجة حرارة ثابتة مع الزمن من أحد السطوح واعتبار بقية السطوح على أنها أديباتية.



الشكل 3-1: مسألة ستيفان لصفيحة

تعبر المعادلات التفاضلية الجزئية التالية عن انتقال الحرارة بالتوصيل غير المستقر أحادي البعد ضمن صفيحة لا متناهية في البعد:

للطور الصلب:

$$k_s \frac{\partial 2T}{\partial x^2} = \rho c_s \frac{\partial T}{\partial t} \qquad (3\text{-}1)$$

للطور السائل:

$$k_l \frac{\partial 2T}{\partial x^2} = \rho c_l \frac{\partial T}{\partial t} \qquad (3\text{-}2)$$

الشرط الابتدائي:

$$T_{ini} = T_m \qquad (3\text{-}3)$$

الشرط الحدي:

$$T_{sur} = T_{cons} \qquad (3\text{-}4)$$

للربط بين معادلتي الطورين وإغلاق النظام، لا بد من شرط ستيفان للحد الفاصل بفرض ثبات الكثافة بين الطورين (الصلب والسائل) والذي يعبر عنه كالآتي:

$$k_s \frac{\partial T_s}{\partial x} - k_l \frac{\partial T_l}{\partial x} = \rho h_{fg} \frac{dS}{dt} \qquad (3\text{-}5)$$

قدم (Lamberg, 2003) حلاً تحليلياً على صيغة معادلة جبرية لمسألة الحدود المتحركة ضمن صفيحة لا متناهية في الطول يتم انتقال الحرارة فيها ببعد واحد مع حدوث تغير في الطور. واستطاع بذلك إيجاد علاقة تربط بين السطح الفاصل بين طوري المادة المتغيرة الطور مع الزمن وفق التالي:

$$S = 2\lambda\sqrt{\alpha_s t} \qquad (3\text{-}6)$$

$$\lambda e^{\lambda^2} erf(\lambda) = \frac{St}{\sqrt{\pi}} = \frac{C_p(T_m - T_{sur})}{h_{fg}\sqrt{\pi}} \qquad (3\text{-}7)$$

3-2- دراسة حالة تضمين المواد المتحولة الطور في حجرة المجمدة عند درجة حرارة وسط محيط 32 ^{o}C

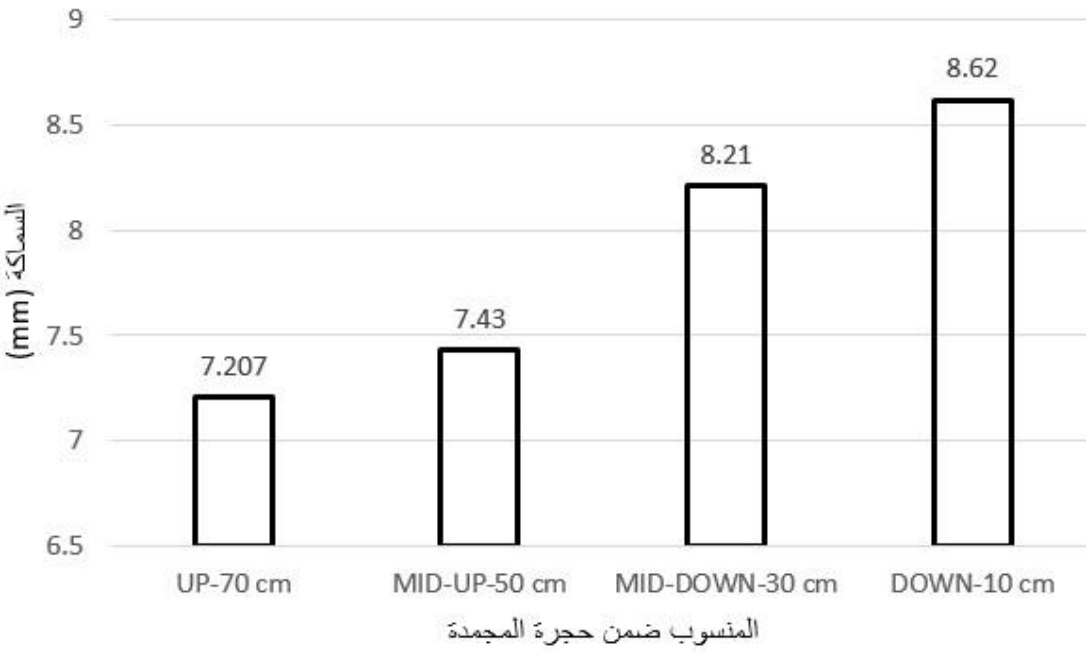
بحسب درجات الحرارة ضمن حجرة المجمدة والتي تم إيجادها من الدراسة التجريبية للحالة الأساسية عند درجة حرارة وسط محيط 32 ^{o}C، يمكن اعتماد محلول غليكول إيثيلين بتراكيز مختلفة متناسبة مع درجات الحرارة ضمن حجرة المجمدة كمادة تحول طوري. بين المرجع (ASHRAE Handbook Fundamentals, 2013) المواصفات الثيرموفيزيائية لمحلول غليكول إيثيلين عند تراكيز مختلفة. كما

بين المرجع (Kumano, 2007) علاقة كمية حرارة التحول الطوري لمحلول غليكول إيثيلين بدلالة التركيز الكتلي وفق المعادلة:

$$h_{fg} = 113{,}900 - 1{,}414\Theta + 2.86\Theta^2 \qquad (3\text{-}8)$$

حيث Θ: نسبة التركيز الكتلي.

بالاعتماد على النتائج الواردة للحالة الأساسية وباستخدام برنامج EES الخاص بحل المعادلات الجبرية والتفاضلية، يمكن تحديد سماكة المادة المتحولة الطور والمستخدمة في كل منسوب من مناسيب المجمدة لتتصلب بشكل كامن ومحسوس خلال فترة عمل الضاغط وتنصهر خلال فترة توقف الضاغط عن العمل طارحة الطاقة الباردة التي اختزنتها كما يظهر الشكل (3−2) والجدول (3−1).



الشكل 3-2: السماكات المطلوبة لمادة التحول الطوري في كل منسوب من منسوب المجمدة

جدول 3-1: تراكيز مركب غليكول-إيثيلين والمواصفات الفيزيو-حرارية عند درجات حرارة التحول الطوري المطلوبة

المنسوب	UP	MID-UP	MID-DOWN	DOWN
متوسط درجة حرارة المنسوب	-17.82	-18.38	-20.33	-21.31
درجة حرارة التحول الطوري (^oC)	-17	-18	-20	-21
التركيز الحجمي (%)	27.4	29.6	32.9	39.0
التركيز الكتلي (%)	29	31	34	38
h_{fg} (J/kg)	113,490.8	113,462.5	113,420.2	113,363.8
ρ (kg/m^3)	1069.56	1071.77	1074.61	1078.53
Cps ($J/kg.^oC$)	3,381	3,362	3,290	3,234
K ($W/m.^oC$)	0.486	0.455	0.401	0.344
μ ($/10^{-3}$) (Ns/m^2)	4.05	5.03	5.92	6.18
السماكة (mm)	7.207	7.43	8.21	8.62

لإيجاد حجم المادة المتحولة الطور، سيتم افتراض زيادة فترة توقف الضاغط عن العمل لمدة 10 min إضافية عند عمل المواد المتحولة الطور كمصدر للتبريد. ويتم تجريبياً إيجاد الزيادة في زمن عمل الضاغط. إن كمية الاستطاعة الكاملة المخزنة تُعطى بالعلاقة:

$$Q = \frac{m}{t}\left[C_{p,s}\int_{T_1}^{T_m} dT + h_{fg} + C_{p,l}\int_{T_m}^{T_2} dT\right] \qquad (3\text{-}9)$$

تمت إعادة التجربة الأساسية عند درجة حرارة وسط محيط ^oC 32 مع إدخال مواد تحول طوري ضمن كل منسوب من مناسيب المجمدة بأبعاد 30X25 cm ووفقاً للسماكات الواردة سابقاً. يبين الشكلان (3-

(3−4 ,3 عملية قياس التراكيز لمحلول غليكول إيثيلين ومن ثم توضع المواد المتحولة الطور ضمن رفوف المجمدة.

حساب معاملات انتقال الحرارة

إن الغاية من دراسة انتقال الحرارة هي التأكد من كفاية سطوح التبادل الحراري بين الهواء ضمن الحجرة المجمدة وPCM.

يُعطى معامل انتقال الحرارة بين الهواء وPCM بالعلاقة (Çengel, 2006):

$$h_{conv} = \frac{Nuk_{air}}{l} \qquad (3\text{-}10)$$

$$Nu = 0.54Ra^{1/4} \qquad if \qquad 10^4 \leq Ra < 10^7 \qquad (3\text{-}11)$$

$$Nu = 0.15Ra^{1/3} \qquad if \qquad 10^7 \leq Ra \leq 10^{17} \qquad (3\text{-}12)$$

يُعطى عدد رالي بالعلاقة:

$$Ra = \frac{g\beta\Delta Tl^3}{\upsilon^2} Pr_{air} \qquad (3\text{-}13)$$

تُحسب مساحة سطح التبادل الحراري بين المادة المتحولة الطور والهواء من خلال قانون نيوتن للتبريد:

$$A = \frac{mL}{th_{conv}\Delta T} \qquad (3\text{-}14)$$

يبين الجدول (3−2) القيم الناتجة عن حل معادلات انتقال الحرارة السابقة.

جدول 3-2: القيم الناتجة عن حل معادلات انتقال الحرارة

مساحة PCM الحقيقية	مساحة PCM المطلوبة	Ra	Nu	h
m^2	m^2			$W/m^2.K$
0.7	0.68	$1.006X10^6$	17.09	5.182

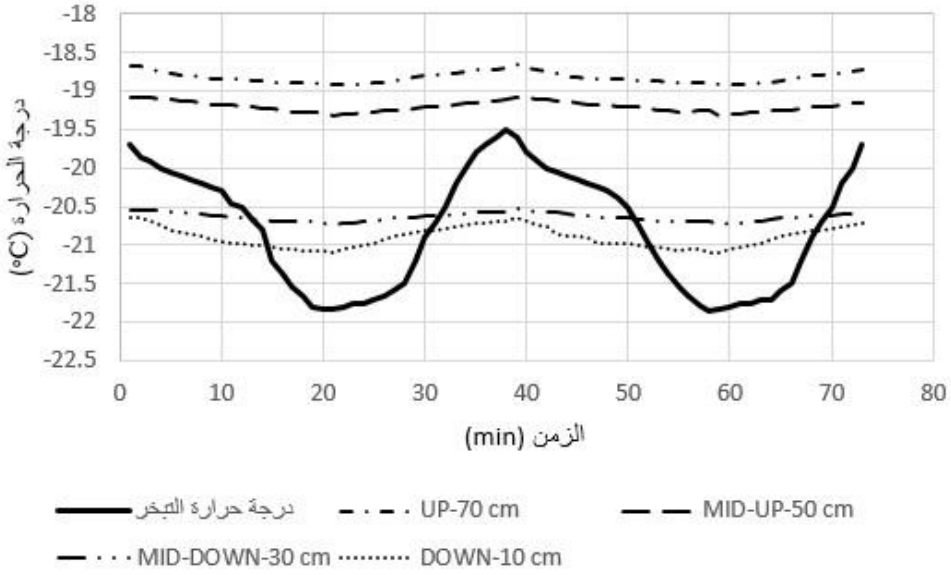


الشكل 3-3: عملية قياس التراكيز لمحلول غليكول إيثيلين

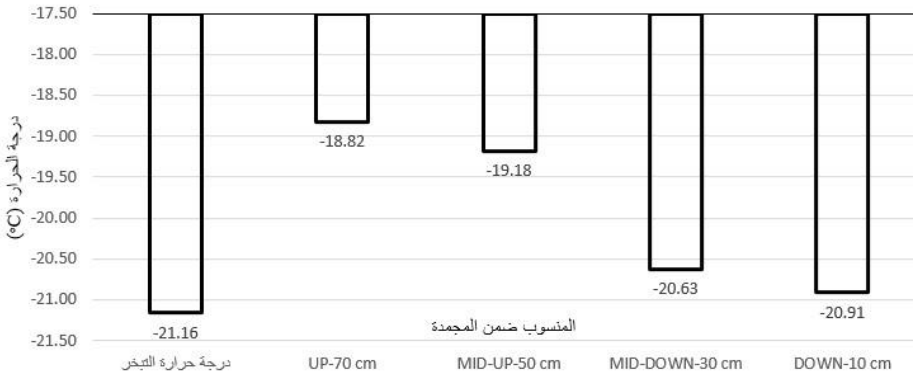


الشكل 3-4: توضع مادة التحول الطوري ضمن رفوف المجمدة

يوضح الشكل (3–5) درجة حرارة وسط المبخر ودرجات الحرارة ضمن حجرة المجمدة مع الزمن لدورتي عمل مستقرتين. حيث بلغ متوسط درجة حرارة التبخر $-21.16\ ^{o}C$.



الشكل 3-5: درجة حرارة وسط المبخر ودرجات الحرارة ضمن حجرة المجمدة مع الزمن للحالة الجديدة



الشكل 3-6: متوسط درجات الحرارة في كل منسوب من المناسيب الأربعة للحالة الجديدة

يوضح الجدول (3−3) مقارنة بين أعلى وأقل درجة حرارة ضمن حجرة المجمدة للحالتين الأساسية وتضمين المواد المتحولة الطور.

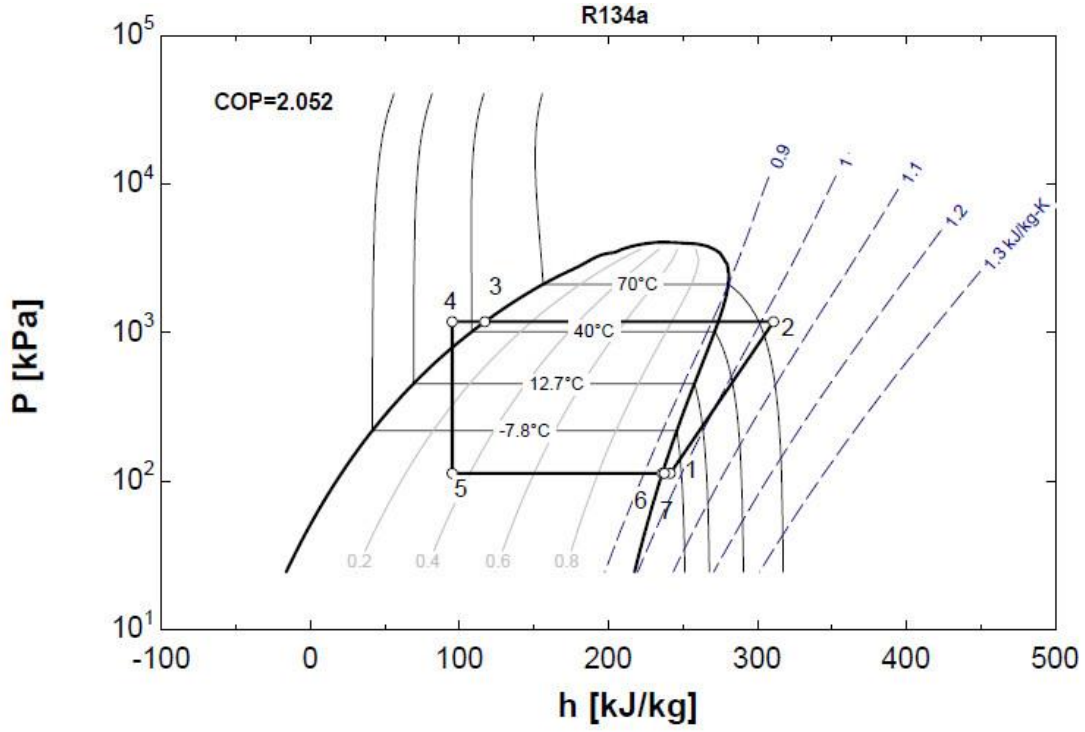
جدول 3-3: مقارنة بين أعلى وأقل درجة حرارة ضمن حجرة المجمدة بين الحالة الأساسية والحالة الجديدة

	أعلى درجة حرارة	أقل درجة حرارة	الفرق
	(^oC)	(^oC)	(^oC)
الحالة الأساسية	−17.7	−21.15	3.45
حالة تضمين المواد المتحولة الطور	−18.67	−21.08	2.41

الملاحظ من الجدول (3–2) أن الفرق بين أعلى وأقل درجتي حرارة لحالة تضمين المواد المتحولة الطور ضمن حجرة المجمدة انخفض عن الحالة الأساسية بمقدار 30.15% ما يعني انخفاضاً في التدرج الحراري وتقلبات درجة الحرارة ضمن حجرة المجمدة وبالتالي شروط حفظ وتخزين أفضل نظراً لوجود مصدر آخر للطاقة الباردة خلال فترة توقف الضاغط عن العمل.

كما يتبين من الشكل (3–5) أن الضاغط يعمل لمدة 20 min ليتوقف بعدها مدة 18 min عن العمل لتكون مدة دورة عمل الضاغط 38 min بنسبة تشغيل 52.6%.

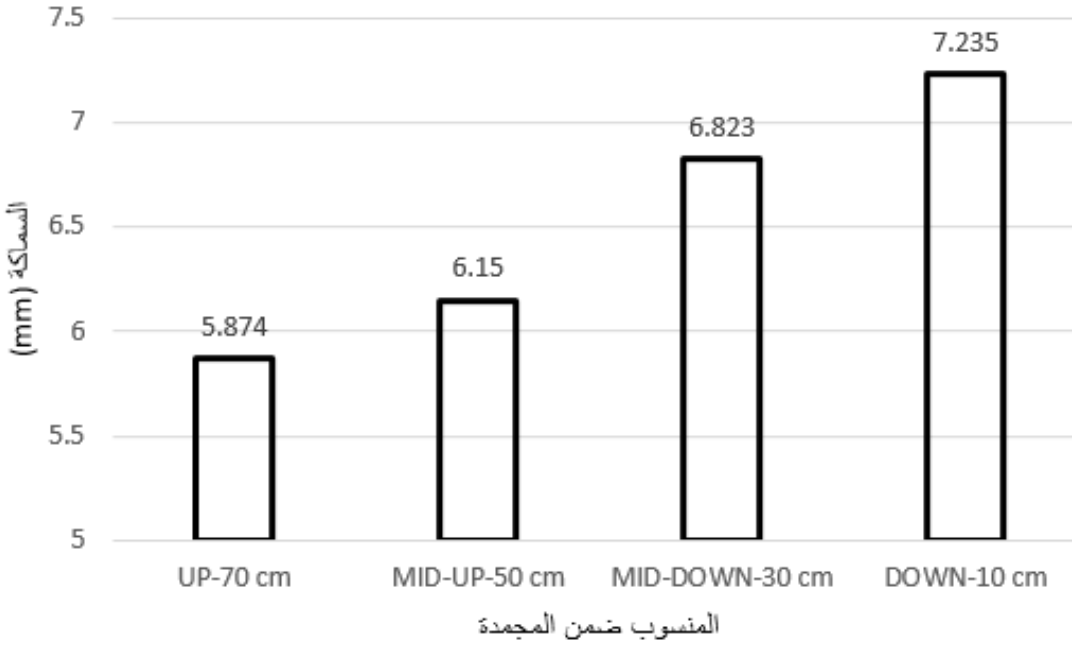
يبين الشكل (3–7) مخطط h–p لدارة التبريد لحالة تضمين حجرة المجمدة بالمواد المتحولة الطور حيث أصبح معامل الأداء COP مساوياً لقيمة 2.052 أي بزيادة قدرها 13.4% عن الحالة الأساسية نظراً لارتفاع درجة حرارة التبخر بسبب زيادة الحمل الحراري على المبخر (Nilesh Purohit, 2019).



الشكل 3-7: مخطط h–p لحالة تضمين PCMs ضمن جدرة المجمدة عند درجة حرارة وسط محيط 32 °C

3-3- دراسة حالة تضمين المواد المتحولة الطور في حجرة المجمدة عند درجة حرارة وسط محيط ^{o}C 38

تم اتباع المنهجية ذاتها المعتمدة عند درجة حرارة وسط محيط ^{o}C 32. بالاعتماد على الطريقة التحليلية أيضاً، تم اختيار سماكات وتراكيز المواد المتحولة الطور (غليكول إيثيلين) في كل رف من رفوف المجمدة والتي يظهرها الشكل (3-8) والجدول (3-4).



الشكل 3-8: السماكات المطلوبة لمادة التحول الطوري في كل منسوب من منسوب المجمدة

جدول 3-4: تراكيز مركب غليكول-إيثيلين والمواصفات الفيزيو-حرارية عند درجات حرارة التحول الطوري المطلوبة

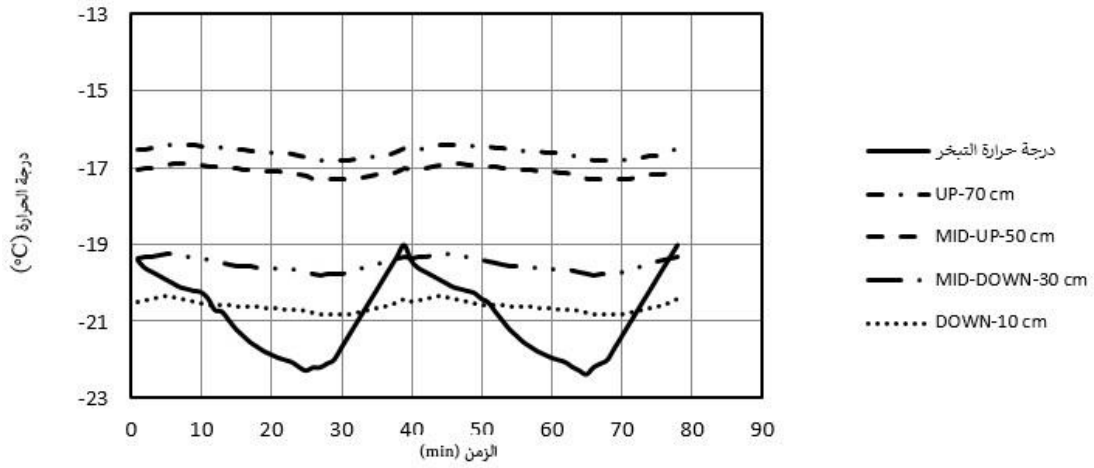
المنسوب	UP	MID-UP	MID-DOWN	DOWN
متوسط درجة حرارة المنسوب	-17.11	-18.31	-20.18	-21.16
درجة حرارة التحول الطوري (^oC)	-17	-18	-20	-21
التركيز الحجمي (%)	27.4	29.6	32.9	39.0
التركيز الكتلي (%)	29	31	34	38
h_{fg} (J/kg)	113,490.8	113,462.5	113,420.2	113,363.8
ρ (kg/m^3)	1069.56	1071.77	1074.61	1078.53
Cps ($J/kg.^oC$)	3,381	3,362	3,290	3,234
K ($W/m.^oC$)	0.486	0.455	0.401	0.344
$\mu= (/10^{-3})$ (Ns/m^2)	4.05	5.03	5.92	6.18
السماكة (mm)	5.874	6.15	6.823	7.235

إن زمن توقف الضاغط عن العمل سواء كان عند درجة حرارة وسط محيط ^oC 32 أو ^oC 38 هو أقل من زمن عمل الضاغط، لذلك تم اعتماد السماكات لتتصهر المواد المتحولة الطور كاملة خلال فترة توقف الضاغط عن العمل وليس لتتجمد خلال فترة عمل الضاغط للتقليل ما أمكن من التخزين المحسوس. وبالتالي فإن السماكات المطلوبة عند درجة حرارة وسط محيط ^oC 38 هي أقل من السماكات في حالة ^oC 32 نظراً لانخفاض زمن توقف الضاغط عن العمل. لتعويض ذلك، فقد تم وضع طبقتين من المواد المتحولة الطور بأبعاد 30X25 cm لكل منهما في كل رف بدلاً من طبقة واحدة كما هي في حالة درجة حرارة وسط محيط ^oC 32.

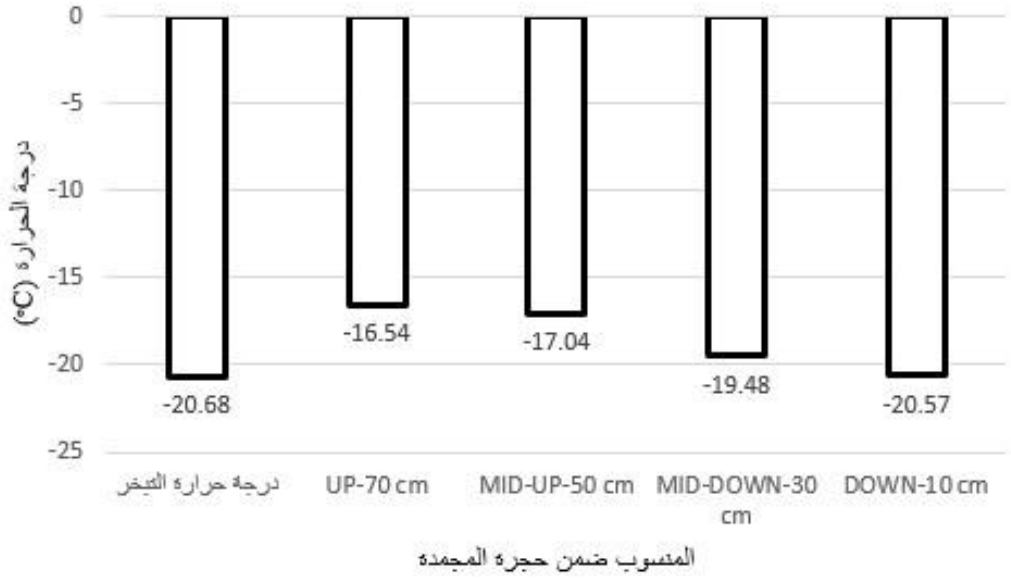
يوضح الشكل (3–9) تغير درجة حرارة وسط المبخر ودرجات الحرارة ضمن حجرة المجمدة مع الزمن لدورتي عمل مستقرتين. حيث بلغ متوسط درجة حرارة التبخر $-20.68\ ^{o}C$.

يوضح الشكل (3–10) متوسط درجة حرارة التبخر ومتوسط درجات الحرارة في كل رف من رفوف المجمدة المنزلية.

يوضح الجدول (3–5) مقارنة بين أعلى وأقل درجة حرارة ضمن حجرة المجمدة للحالتين الأساسية وتضمين المواد المتحولة الطور.



الشكل 3-9: تغير درجة حرارة وسط المبخر ودرجات الحرارة ضمن حجرة المجمدة مع الزمن



الشكل 3-10: متوسط درجة حرارة التبخر ومتوسط درجات الحرارة في كل رف من رفوف المجمدة المنزلية.

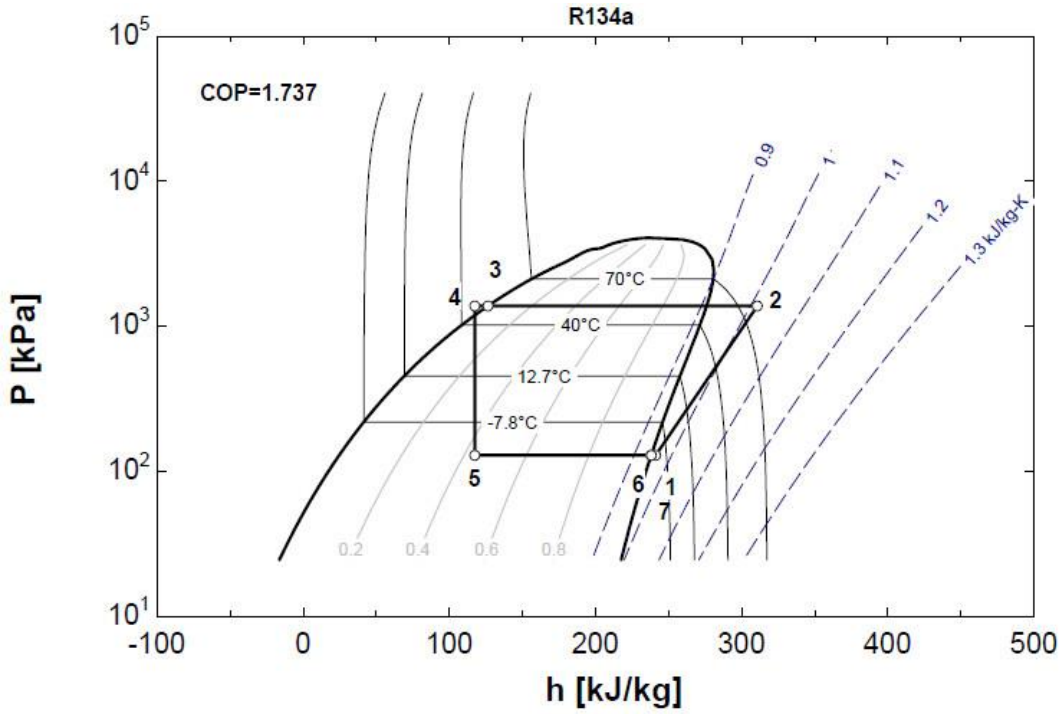
جدول 3-5: مقارنة بين أعلى وأقل درجة حرارة ضمن حجرة المجمدة بين الحالة الأساسية والحالة الجديدية

	أعلى درجة حرارة	أقل درجة حرارة	الفرق
	(^oC)	(^oC)	(^oC)
الحالة الأساسية	−16.89	−21.82	4.93
حالة تضمين المواد المتحولة الطور	−16.40	−20.85	4.45

الملاحظ من الجدول (3−4) أن الفرق بين أعلى وأقل درجتي حرارة لحالة تضمين المواد المتحولة الطور ضمن حجرة المجمدة انخفض عن الحالة الأساسية بمقدار 9.7% ما يعني انخفاضاً في التدرج الحراري وتقلبات درجة الحرارة ضمن حجرة المجمدة وبالتالي شروط حفظ وتخزين أفضل نظراً لوجود مصدر آخر للطاقة الباردة خلال فترة توقف الضاغط عن العمل. كما لُوحظ أن التحسن في تقلبات درجة الحرارة ضمن الحجرة المجمدة عند درجة حرارة وسط محيط 32^oC أفضل منه عند درجة حرارة $38\ ^oC$.

كذلك يتبين من الشكل (3−9) أن الضاغط يعمل لمدة 26 min ليتوقف بعدها مدة 13 min عن العمل لتكون مدة دورة عمل الضاغط 39 min بنسبة تشغيل 66.67%.

يبين الشكل (3−11) مخطط h−p لادارة التبريد لحالة تضمين حجرة المجمدة بالمواد المتحولة الطور حيث أصبح معامل الأداء COP مساوياً لقيمة 1.737 أي بزيادة قدرها 13.46% عن الحالة الأساسية نظراً لارتفاع درجة حرارة التبخر.



الشكل 3-11: مخطط p–h لحالة تضمين PCMs ضمن جدرة المجمدة عند درجة حرارة وسط محيط 38 °C

3-4- عيوب تضمين المواد المتحولة الطور ضمن حجرة المجمدة

- **الحيز الذي تشغله المواد المتحولة الطور**

إن حجم المواد المتحولة الطور التي تم تضمينها ضمن حجرة المجمدة في هذا البحث يساوي 1.12 Liter أي ما نسبته 0.84% من الحجم الكلي للمجمدة. يمكن إهمال هذه النسبة مقارنة بالأداء الحراري الذي تضيفه المواد المتحولة الطور.

- **السمية**

إن حال بعض المواد المتحولة الطور هي حال بعض الفريونات من حيث السمية. يبدأ تأثير السمية لمحلول غليكول إيثيلين عند تراكيز 25 mg/dl (Registry, 2020). لذلك يجب مراعاة التغليف الجيد لمحلول غليكول إيثيلين عند تضمينها في المجمدات المنزلية. ووصلها بمصرف مباشرة في حال تسربها.

الفصل الرابع

4- حالة تضمين المواد المتحولة الطور في جزء المكثف

الهدف من هذا البحث هو تحديد نوع وسماكة مادة التحول الطوري الممكن تضمينها في الجزء الساخن من دارة التبريد (جزء المكثف) ومعرفة أداء دارة التبريد والمجمدة المنزلية. وكما ذُكر سابقاً فإنه في المجمدة المنزلية يمكن تضمين المواد المتحولة الطور في حيزين اثنين، الأول في حيز درجات الحرارة المنخفضة (المبخر) والثاني في حيز درجات الحرارة المرتفعة (المكثف). أكدت الأبحاث أن تضمين المواد المتحولة الطور في المكثف يرفع من معامل الأداء نظراً لانخفاض درجة حرارة التكاثف كما يخفض من استهلاك الطاقة الكهربائية. (A. Pavithran, 2020)

في البرادات والمجمدات التقليدية التي تعمل بنظام الضواغط on/off وتحت ظروف التشغيل القياسية حيث تكون عملية انتقال الحرارة من المكثف بشكل متقطع، من الممكن الاستفادة من زمن توقف الضاغط في تحرير المكثف من طاقته ما سيؤدي إلى زيادة مجال عملية انتقال الحرارة من المكثف إلى الوسط المحيط لتصبح على طول مجال دورة عمل الضاغط وبالتالي تخفيض درجة حرارة التكاثف وانخفاض قيمة الطاقة الكهربائية المستجرة وزيادة معامل الأداء (COP) (MARCHI NETO, 2009). بمعنى آخر، إضافة مواد تحول طوري (صلب – سائل) من جهة المكثف لتكتسب حرارة التكاثف منصهرة خلال فترة عمل الضاغط وتقوم بعد ذلك بطرح الحرارة المكتسبة من المكثف إلى الوسط المحيط وتتصلب خلال فترة توقف الضاغط عن العمل بدلاً من طرح حرارة التكاثف خلال عمل الضاغط فقط كما تبين عند دراسة الحالة الأساسية.

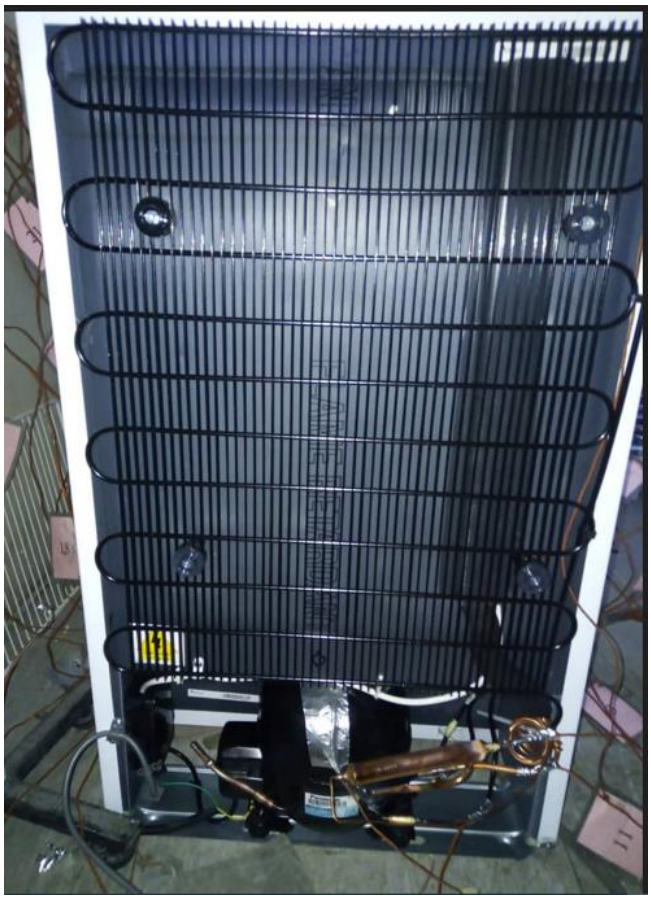
لذلك تم في هذا الفصل تحديد درجة حرارة وسماكة مادة التحول الطوري التي يمكن وضع مكثف المجمدة فيها اعتماداً على النتائج التجريبية لدرجة حرارة التكاثف وزمن دورة عمل الضاغط وذلك باستخدام المحاكاة الحاسوبية.

4-1- دراسة حالة تضمين المواد المتحولة الطور في جزء المكثف عند درجة حرارة وسط محيط 32 ^{o}C

سيتم في هذا الجزء تحديد مواصفات المادة المتحولة الطور (درجة حرارة تحول طوري + سماكة) اللازم غمر مكثف المجمدة المنزلية بها اعتماداً على نتائج الحالة الأساسية.

4-1-1- الشكل الهندسي لمكثف المجمدة المنزلية

مكثف المجمدة المنزلية المختارة من نوع أنابيب وريش (Wire and Tube). الأنابيب والريش الأسطوانية مصنوعة من مادة النحاس. أبعاد المكثف 456.4 mm X 932.7 وقطر أنبوب المكثف 4.76 mm وقطر الريشة 1.4 mm. عدد لفات أنابيب المكثف 12 لفة وعدد الريش الأسطوانية الممتدة على طول المكثف هو 46 ريشة كما هو موضح بالشكل (4-1).



الشكل 4-1: مكثف المجمدة المنزلية المختارة

4-1-2- اختيار المادة المتحولة الطور

قدم (KAHWAJI, S, MICHEL, B, JOHNSON, 2018) دراسة تجريبية لتحديد المواصفات الفيزيو-حرارية ودرجات حرارة التحول الطوري وكذلك حرارة التحول الطوري لبعض البارافينات المستخدمة كمواد تحول طوري. يبين الجدول (4-1) البارفينات المستخدمة في التجارب بحسب المرجع والصيغ الكيميائية لها ودرجات حرارة التحول الطوري وانتالبي الانصهار. كما ويبين الجدول (4-2) المواصفات الثيرموفيزيائية لها.

جدول 4-1: البارفينات المستخدمة في التجارب (الصيغ الكيميائية، درجات حرارة التحول الطوري وانتالبي الانصهار)

(KAHWAJI, S, MICHEL, B, JOHNSON, 2018)

PCM	T_{mpt} (°C)	$\Delta_{fus}H$ (J g^{-1})	Comments
Nonadecane	31.8 ± 1.5 (30.8 – 32)	181 ± 18 (163 – 222)	The solid-solid transition is at T ~ 22 °C and is clearly discernable from the solid-liquid transition.
Eicosane	37.5 ± 1.5 (35.4 – 36.9)	246 ± 25 (217 – 251)	The solid-solid transition was only observed as an abrupt exothermic peak upon cooling.
Docosane	43.8 ± 1.5 (42.9 – 44.1)	234* ± 23 (154 – 253)	Up to 40% of $\Delta_{fus}H$ is a contribution from the solid-solid transition.
PW48	48.2 ± 1.5 (53 – 57)	156 ± 16	T_{mpt} is well below the melting temperature range specified by the supplier.
PW52	51.8 ± 1.5 (58 – 62)	171 ± 17	T_{mpt} is well below the melting temperature range specified by the supplier.
PW58	57.7 ± 1.5 (≥65)	197* ± 20	$\Delta_{fus}H$ includes contribution from solid-solid transition. T_{mpt} is well below the melting temperature range specified by the supplier.

* Includes contribution from solid-solid transition very close to the melting point.

جدول 4-2: المواصفات الثيرموفيزيائية للبارافينات المستخدمة في التجارب (KAHWAJI, S, MICHEL, B, JOHNSON, 2018)

PCM	T_{mpt} (°C)	$\Delta_{fus}H$ (J g^{-1})	ρ_s (g cm^{-3})	α_s (mm s^{-2})	$C_{p,s}$ (J K^{-1} g^{-1})	$C_{p,l}$ (J K^{-1} g^{-1})	κ_s (W K^{-1} m^{-1})	κ_l (W K^{-1} m^{-1})
Nonadecane	31.8 ± 1.5	181 ± 18	0.78 ± 0.08	0.19 ± 0.05	1.7 ± 0.2 (15 °C)	2.3 ± 0.2 (60 °C)	0.26 ± 0.04 (19 °C)	0.18 ± 0.03 (60 °C)
Eicosane	37.5 ± 1.5	246 ± 25	0.83± 0.08	0.26 ± 0.06	2.0 ± 0.2 (22 °C)	2.6 ± 0.3 (55 °C)	0.44 ± 0.07 (19 °C)	0.23 ± 0.03 (60 °C)
Docosane	43.8 ± 1.5	234* ± 23	0.82 ± 0.08	0.27 ± 0.07	1.7 ± 0.2 (20 °C)	2.2 ± 0.2 (55 °C)	0.37 ± 0.06 (19 °C)	0.24 ± 0.04 (60 °C)
PW48	48.2 ± 1.5	156 ± 16	0.86 ± 0.09	0.13 ± 0.03	2.3 ± 0.2 (25 °C)	2.3 ± 0.2 (70 °C)	0.26 ± 0.04 (19 °C)	0.20 ± 0.03 (70 °C)
PW52	51.8 ± 1.5	171 ± 17	0.78 ± 0.08	0.14 ± 0.03	2.0 ± 0.2 (25 °C)	2.1 ± 0.2 (70 °C)	0.22 ± 0.03 (19 °C)	0.20 ± 0.03 (70 °C)
PW58	57.7 ± 1.5	197* ± 20	0.88 ± 0.09	0.13 ± 0.03	2.0 ± 0.2 (25 °C)	2.3 ± 0.2 (75 °C)	0.23 ± 0.03 (19 °C)	0.15 ± 0.02 (70 °C)

* Includes contribution from solid-solid transition very near the melting point.

تم اختيار نوعين من البارفينات وهما Eicosane– Docosane تتناسبان مع الحالة المدروسة كما يوضح الجدول (4–3).

جدول 4-3: المواصفات والفيزو–حرارية ودرجات حرارة الانصهار للبارافينات المستخدمة في المحاكاة الحاسوبية

Docosane	Eicosane	البارافين
$C_{22}H_{46}$	$C_{20}H_{42}$	الصيغة الكيميائية
43.8	37.5	درجة حرارة التحول الطوري (°C)
234	246	h_{fg} (kJ/kg)
820	830	ρ (kg/m3)
1.7	2	$C_{p.s}$ (kJ/kg.K)
2.2	2.6	$C_{p.l}$ (kJ/kg.K)
0.37	0.44	k_s (W/m.K)
0.24	0.23	k_l (W/m.K)

4-1-3- المحاكاة الحاسوبية

الهدف من المحاكاة الحاسوبية هو تحديد درجة حرارة وسماكة مادة التحول الطوري اللازم غمر مكثف المجمدة بها لتخزين الطاقة الحرارية الناتجة عن تكاثف وسيط التبريد خلال فترة عمل الضاغط بالحالة المستقرة (15 min) (والتي تم حسابها من الحالة الأساسية)، ما يؤدي إلى حدوث التحول الطوري (صلب – سائل)، وانتقال هذه الطاقة المخزنة إلى الوسط المحيط خلال فترة توقف الضاغط عن العمل (10 min) (والتي حصلنا عليها من الحالة الأساسية أيضاً) بواسطة حدوث التحول الطوري (سائل – صلب). وبالتالي إن عملية طرح الحرارة تكاثف وسيط التبريد للوسط المحيط تستمر على كامل دورة عمل الضاغط (on/off) بدلاً من أن تكون خلال فترة العمل للضاغط. إن درجة حرارة التحول الطوري الواجب اختيارها يجب أن تقع بين درجة حرارة الوسط المحيط (32 °C) ودرجة حرارة التكاثف (46.1 °C). وفي حدود درجات الحرارة المذكورة يمكن استخدام أنواع متعددة من البارافينات كمادة تحول طوري لهذه الغاية. تم إجراء التجربة الحاسوبية على نوعين من البارافينات وفق الجدول (4-3).

4-1-4- المعادلات الرياضية التفاضلية الناظمة للمسألة المدروسة

تم اعتماد نموذج معادلات انتقال الحرارة بالتوصيل غير المستقر أحادي البعد حول اسطوانة دورانية (كون انتقال الحرارة يتم من أنابيب المكثف) وكذلك معادلات الريشة الأديباتية (ريش المكثف) وشروط ستيفان لعملية التحول الطوري وفق التالي:

انتقال الحرارة أحادي البعد غير المستقر للطور السائل

$$\frac{\partial 2T}{\partial r^2} = \frac{1}{\alpha_l}\frac{\partial T}{\partial t} \qquad (4\text{-}1)$$

انتقال الحرارة أحادي البعد غير المستقر للطور الصلب

$$\frac{\partial 2T}{\partial r^2} = \frac{1}{\alpha_s}\frac{\partial T}{\partial t} \qquad (4\text{-}2)$$

شرط ستيفان للسطح الفاصل بين الطورين الصلب والسائل

$$k_s \frac{\partial T_s}{\partial x} - k_l \frac{\partial T_l}{\partial x} = \rho L \frac{ds}{dt} \quad (4\text{-}3)$$

معادلة التدرج الحراري ضمن الريشة الأديباتية

$$\frac{T_x - T_\infty}{T_b - T_\infty} = \frac{cosh[a(l-x)]}{cosh(al)} \quad (4\text{-}4)$$

الشرط الابتدائي للانصهار

$$T_{ini} = T_{amb} \quad (4\text{-}5)$$

الشرط الابتدائي للتصلب

$$T_{ini} = T_{cons} \quad (4\text{-}6)$$

الشرط الحدي للانصهار

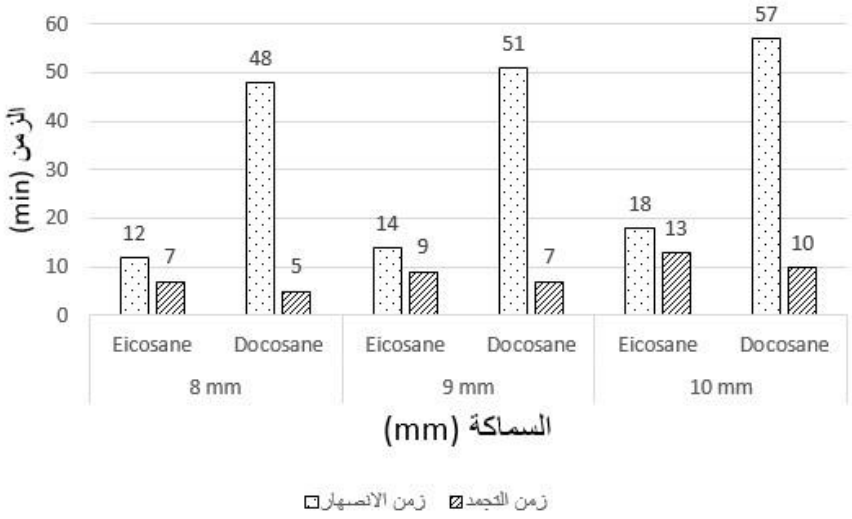
$$T_s = T_{cons} \quad (4\text{-}7)$$

الشرط الحدي للتصلب

$$T_s = T_{amb} \quad (4\text{-}8)$$

تم اختيار ثلاث سماكات 8,9,10 mm لكل نوع من نوعي البارافينات الواردة في الجدول (4−3). وضعت جميع البارافينات ضمن غلاف من الستانلس ستيل 304 بأبعاد 60 cm X 46 cm ذي الموصلية الحرارية 16.2 W/m.k سماكة 1 mm. يعتبر الستانلس ستيل غير قابل للتفاعل الكيميائي مع البارافينات (KAHWAJI, S, MICHEL, B, JOHNSON, 2018). تم إجراء 6 تجارب حاسوبية لمعرفة زمن انتهاء عمليتي التصلب والانصهار لكل نوع من أنواع البارافينات وفق السماكات الواردة. إن عملية الانصهار تنتهي عندما يصبح كسر التحول الطوري (نسبة كتلة الطور السائل إلى الكتلة الكلية) مساوياً الواحد، وكذلك فإن عملية التصلب تنتهي عندما يصبح كسر التحول الطوري مساوياً القيمة صفر. يوضح الشكل (4−2) زمن انتهاء عملية التصلب والانصهار للبارافينات المستخدمة في التجربة الحاسوبية عند السماكات 8, 9, 10 mm. من الملاحظ أنه بازدياد درجة حرارة التحول الطوري يزداد زمن عملية الانصهار وينخفض زمن عملية التصلب وذلك بسبب انخفاض الفرق بين درجة حرارة التكاثف ودرجة حرارة التحول الطوري وبالتالي انخفاض كمية الحرارة المتبادلة عند الانصهار وازدياد الزمن اللازم

للانصهار، وارتفاع الفرق بين درجة حرارة التحول الطوري ودرجة حرارة الوسط المحيط وبالتالي زيادة كمية الحرارة المتبادلة عند التصلب وانخفاض الزمن اللازم للتصلب. إن معاملي التوصيل الحراري للطورين الصلب والسائل يدخلان في شرط ستيفان وبالتالي فإن فرق درجتي حرارة التحول الطوري والمنبع الحراري أو التحول الطوري والمصب الحراري لهما التأثير الأكبر على زمن النتهاء عملية الانصهار أو التجمد.



الشكل 4-2: زمن انتهاء عملية التصلب والانصهار للبارافينات المستخدمة في التجربة الحاسوبية

عند نفس فرق درجات الحرارة لحالتي التجمد والانصهار، يكون زمن الانصهار أعلى من زمن التجمد لسببين:

الأول عند حدوث انصهار بسبب حرارة التكاثف يحدث بنفس الوقت تبريد من طرف الهواء وتم أخذه بعين الاعتبار كشرط حدي في المحاكاة الحاسوبية، بينما بحالة التصلب يوجد مصرف حراري فقط من طرف الهواء بدون أي منبع حراري.

والثاني هو اختلاف مساحة سطوح التبادل الحراري لحالة الانصهار (مساحة سطح المكثف المريش) وحالة التصلب (مساحة سطح الخزان الحراري الملامس للهواء).

يعتبر البارافين Eicosane ذو درجة حرارة التحول الطوري $37.5\ ^oC$ وبسماكة 9 mm مناسباً لشروط التجربة المخبرية حيث ينصهر خلال 14 min ويتصلب خلال 9 min ما يعني بقاء دقيقة واحدة لزيادة

التسخين المحسوس لحالة الانصهار ودقيقة واحدة لزيادة التبريد المحسوس لحالة التصلب، وهذا يمكن إهماله بحسب الكثير من الدراسات.

حساب معاملات انتقال الحرارة

إن الغاية من دراسة انتقال الحرارة هي التأكد من كفاية سطوح التبادل الحراري بين المكثف وPCM من جهة وبين PCM والهواء من جهة أخرى.

بفرض أن انتقال الحرارة بين وسيط التبريد والمادة المتحولة الطور يتم بالتوصيل والحمل، وكثافتا الطورين الصلب والسائل للمادة المتحولة الطور متساويتان، يعطى معامل انتقال الحرارة الكلي في حالة انصهار المادة المتحولة الطور بين وسيط التبريد وPCM بالعلاقة (عامر، 2019):

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{conv}} + \frac{\delta_{pcm}}{k_{pcm}} + \frac{1}{2\pi\lambda_{pipe}} ln\frac{d_{out}}{d_{in}}} \qquad (4\text{-}9)$$

معامل انتقال الحرارة بالحمل أثناء تكاثف وسيط التبريد داخل الأنبوب (Shah, 2009):

$$h_{conv,ref} = 1.23Re^{(-\frac{1}{3})}\left[\frac{\rho_l(\rho_l-\rho_g)gk^3}{\mu^2}\right] \qquad (4\text{-}10)$$

تُحسب مساحة سطح التبادل الحراري اللازمة للمكثف بالعلاقة:

$$A_{cond} = \frac{Q_{lat}}{U\Delta t}$$

يعطى معامل انتقال الحرارة بالحمل الطبيعي بين المادة المتحولة الطور والهواء المحيط في حالة التصلب بإهمال المقاومة الحرارية للغلاف الذي تتوضع فيه المادة المتحولة الطور واعتبار الهواء غاز مثالي بالشكل:

$$h_{conv,air} = \frac{Nuk_{air}}{l} \qquad (4\text{-}11)$$

يُحسب عدد نوسلت من العلاقات التجريبية:

$$Nu = 0.59Ra^{1/4} \qquad if \qquad 10^4 \le Ra < 10^9 \qquad (4\text{-}12)$$

$$Nu = 0.10Ra^{1/3} \qquad if \qquad 10^9 \le Ra \le 10^{13} \qquad (4\text{-}13)$$

يُعطى عدد رالي بالعلاقة:

$$Ra = \frac{g\beta\Delta T l^3}{\upsilon^2} Pr_{air} \qquad (4\text{-}14)$$

تُحسب مساحة سطح التبادل الحراري بين المادة المتحولة الطور والهواء من خلال قانون نيوتن للتبريد:

$$A = \frac{mL}{th_{conv,air}\Delta T} \qquad (4\text{-}15)$$

حيث t هو زمن توقف الضاغط عن العمل.

يبين الجدول (4–4) القيم الناتجة عن حل معادلات انتقال الحرارة السابقة.

جدول 4-4: القيم الناتجة عن حل معادلات انتقال الحرارة

مساحة الخزان المطلوبة	مساحة المكثف المطلوبة	مساحة الخزان الحقيقية	مساحة المكثف الحقيقية	Ra	Nu	U	h_{in}
m^2	m^2	m^2	m^2			$W/m^2.K$	$W/m^2.K$
0.1132	0.1704	0.437	0.1955	$3.867X10^9$	157	45.67	703

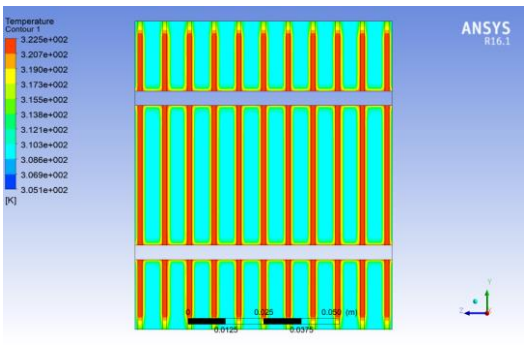
تبين الأشكال (3–4) وحتى (7–4) الصور الحرارية الناتجة عن برنامج المحاكاة ANSYS – 16.1 والتي تظهر التدرج الحراري لجزء من خزان التحول الطوري الحاوي على المكثف خلال أزمنة مختلفة من عملية الانصهار وتبادل الحرارة مع المكثف.

تبين الأشكال (8–4) وحتى (12–4) صور تغير كسر التحول الطوري لخزان التحول الطوري أثناء عملية الانصهار خلال أزمنة مختلفة.

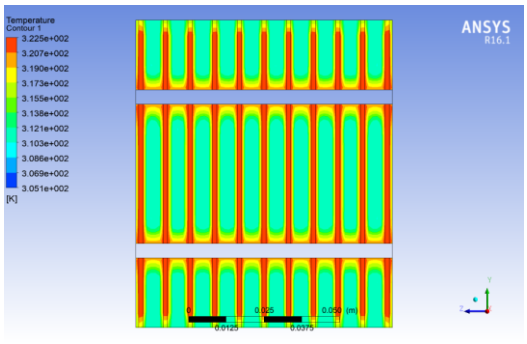
تبين الأشكال (13–4) وحتى (16–4) الصور الحرارية الناتجة عن برنامج المحاكاة والتي تظهر التدرج الحراري لجزء من خزان التحول الطوري الحاوي على المكثف خلال أزمنة مختلفة من عملية التصلب وتبادل الحرارة مع الوسط المحيط.

تبين الأشكال (17–4) وحتى (20–4) صور تغير كسر التحول الطوري لخزان التحول الطوري أثناء عملية التصلب خلال أزمنة مختلفة.

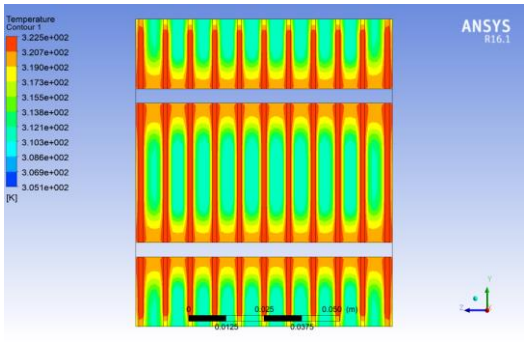
يبين الشكل (21–7) تغير كسر التحول الطوري خلال عمليتي الانصهار والتصلب.



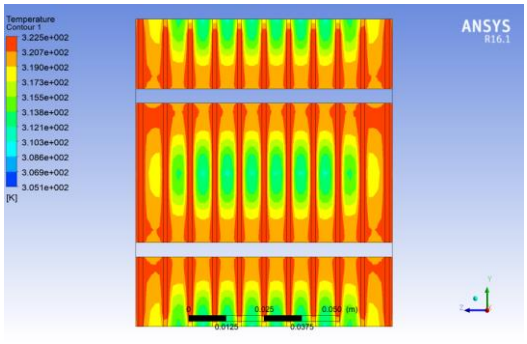
الشكل 4-3: درجات حرارة الانصهار بعد 1 دقيقة



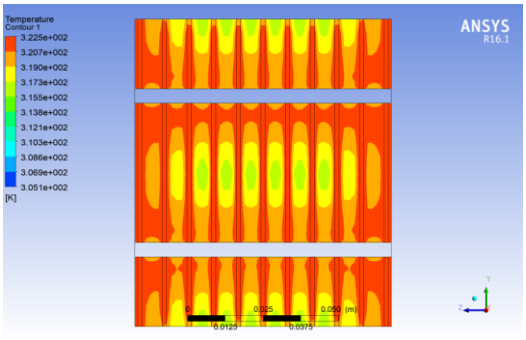
الشكل 4-4: درجات حرارة الانصهار بعد 6 دقيقة



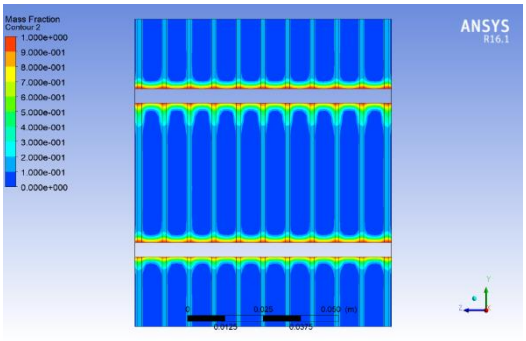
الشكل 4-5: درجات حرارة الانصهار بعد 11 دقيقة



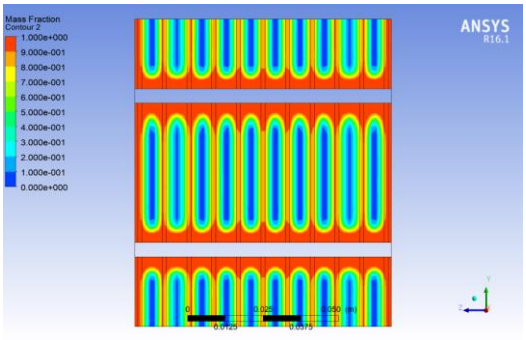
الشكل 4-6: درجات حرارة الانصهار بعد 14 دقيقة



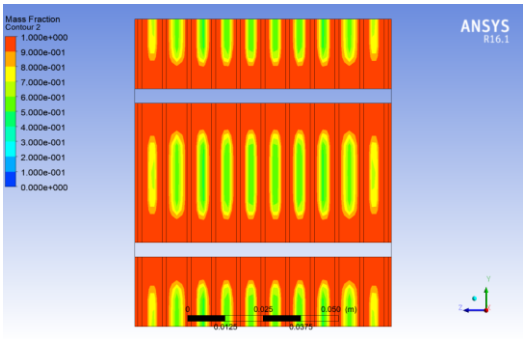
الشكل 4-7: درجات حرارة الانصهار بعد 15 دقيقة



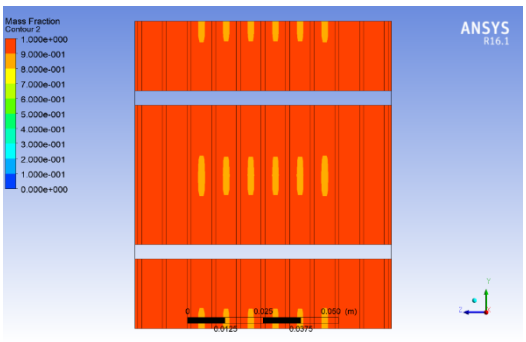
الشكل 4-8: كسر التحول الطوري للانصهار بعد 1 دقيقة



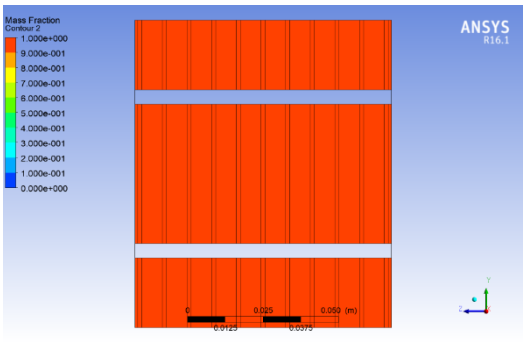
الشكل 4-9: كسر التحول الطوري للانصهار بعد 6 دقيقة



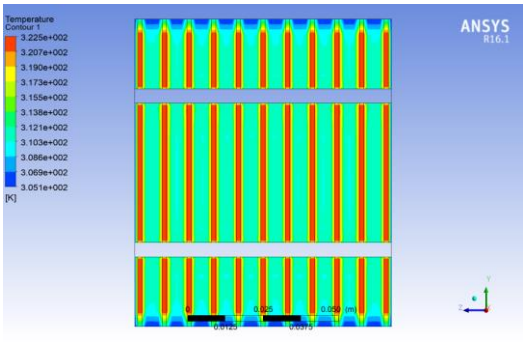
الشكل 4-10: كسر التحول الطوري للانصهار بعد 11 دقيقة



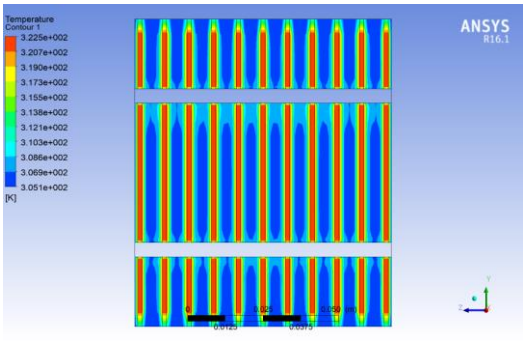
الشكل 4-11: كسر التحول الطوري للانصهار بعد 14 دقيقة



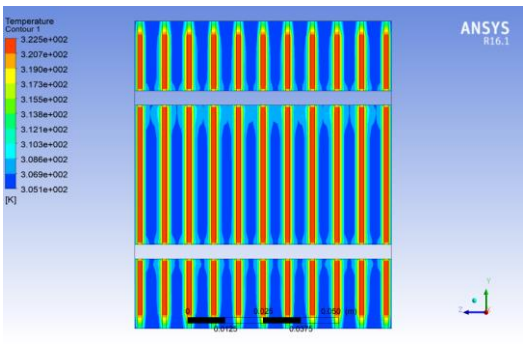
الشكل 4-12: كسر التحول الطوري للانصهار بعد 15 دقيقة



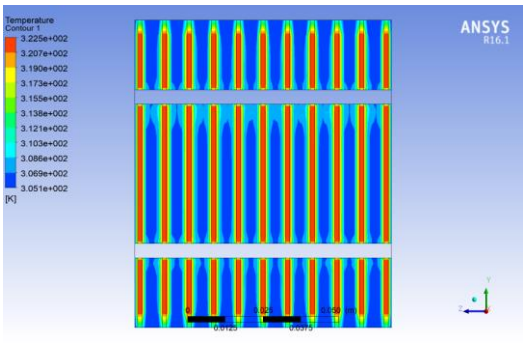
الشكل 4-13: درجات حرارة التصلب بعد 1 دقيقة



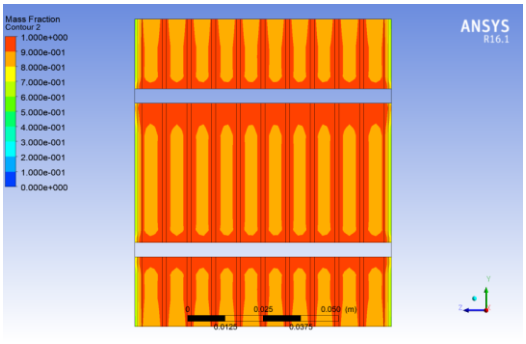
الشكل 4-14: درجات حرارة التصلب بعد 6 دقيقة



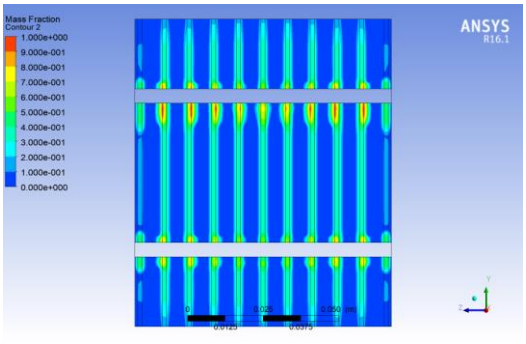
الشكل 4-15: درجات حرارة التصلب بعد 9 دقيقة



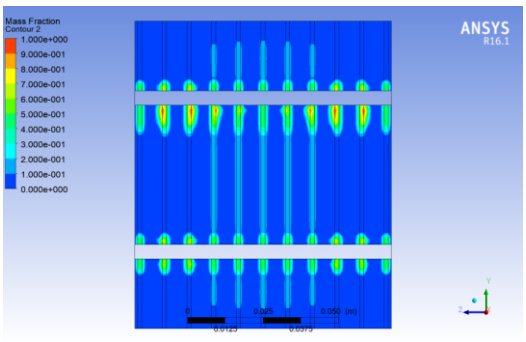
الشكل 4-16: درجات حرارة التصلب بعد 10 دقيقة



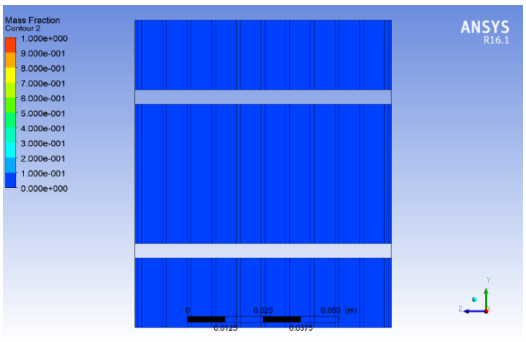
الشكل 4-17: كسر التحول الطوري للتصلب بعد 1 دقيقة



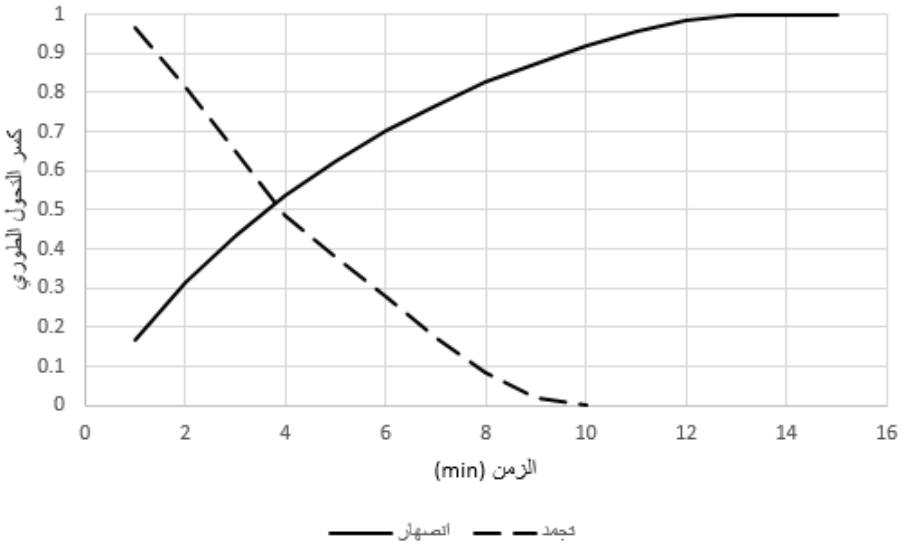
الشكل 4-18: كسر التحول الطوري للتصلب بعد 6 دقيقة



الشكل 4-19: كسر التحول الطوري للتصلب بعد 9 دقيقة



الشكل 4-20: كسر التحول الطوري للتصلب بعد 10 دقيقة



الشكل 4-21: تغير كسر التحول الطوري خلال عمليتي الانصهار والتصلب

4-2- دراسة حالة تضمين المواد المتحولة الطور في جزء المكثف عند درجة حرارة وسط محيط 38 ^{o}C

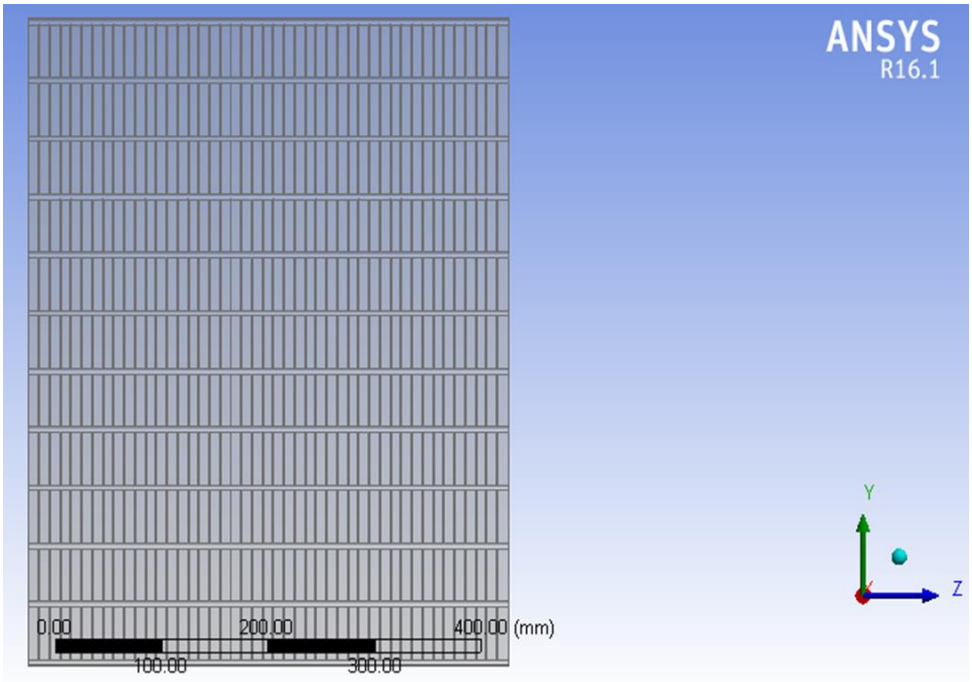
سيتم في هذا الجزء تقديم طريقة اختيار المادة المتحولة الطور (درجة حرارة تحول طوري+سماكة) ونتائج اختبار المجمدة المنزلية بعد غمر المكثف بخزان التحول الطوري الذي يحوي المادة المتغيرة الطور وهي شمع البارافين.

4-2-1- اختيار المادة المتحولة الطور

بالاعتماد على نتائج الحالة الأساسية عند درجة حرارة 38 ^{o}C والتي بينت أن درجة حرارة التكاثف تبلغ 52.24 ^{o}C عند درجة حرارة وسط محيط 38 ^{o}C والتي بقي فيها الضاغط يعمل بالحالة المستقرة لمدة 22 min ويتوقف عن العمل لمدة 7 min أي بنسبة زمن تشغيل 75.8%. يمكن اختيار المادة المتحولة الطور لغمر أنابيب المكثف بها عند درجة حرارة تحول طوري تقع ضمن المجال]52.24 ^{o}C – 38 ^{o}C[وتحديد سماكتها بحيث تنصهر خلال فترة عمل الضاغط 22 min مكتسبة حرارة التكاثف وتتصلب خلال فترة توقف الضاغط عن العمل 7 min طارحة حرارة التكاثف إلى الوسط المحيط.

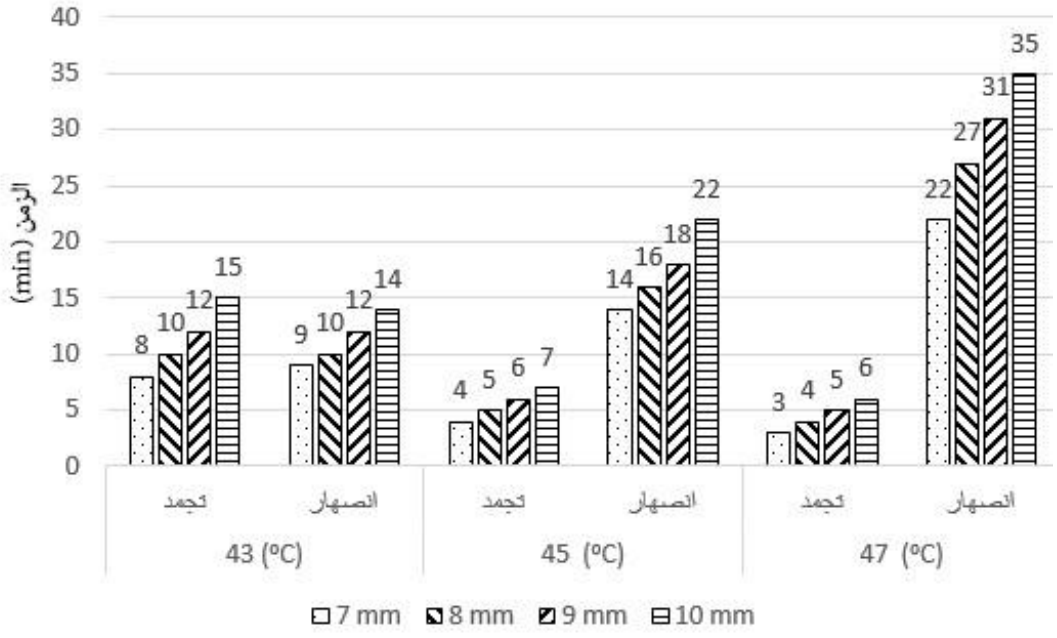
تمت دراسة عملية الانصهار والتصلب للمادة المتحولة الطور (شمع البارافين) بنفس منهجية تحديد سماكة مادة التحول الطوري عند درجة حرارة وسط محيط 32 ^{o}C وباستخدام برنامج المحاكاة ANSYS-FLUENT 16.1 وعند أربع سماكات وهي (7, 8, 9, 10 mm) وعند ثلاث درجات حرارة تحول طوري وهي (43, 45, 47 ^{o}C) لتحديد المواصفات المثلى والمتوافقة مع التجربة الأساسية.

يبين الشكل (4-22) نمذجة مكثف المجمدة المنزلية على برنامج ANSYS-Fluent 16.1.



الشكل 4-22: نموذج مكثف المجمدة المنزلية باستخدام برنامج ANSYS

يبين الشكل (4–23) نتائج المحاكاة الحاسوبية وهي زمن انتهاء التجمد أو الانصهار عند درجات حرارة تحول طوري وسماكات مختلفة لشمع البارافين.



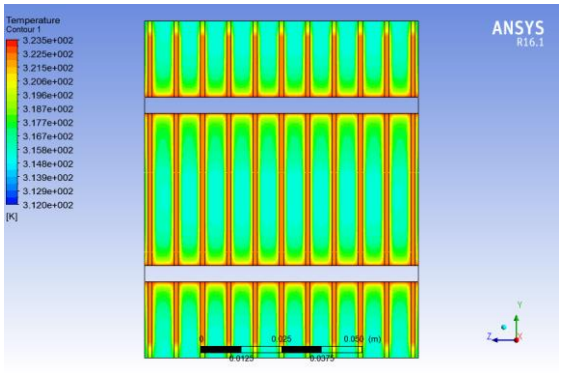
الشكل 4-23: علاقة زمن انتهاء عملية التجمد والانصهار للمادة المتحولة الطور (شمع البارفين) عند درجات حرارة تحول طوري وسماكات مختلفة

من الملاحظ من الشكل (4–23) أن اختيار شمع البارافين بدرجة حرارة تحول طوري ^{o}C 45 وسماكة 10 mm يعتبر الأنسب لهذا البحث عند درجة حرارة وسط محيط ^{o}C 38 من حيث زمن انتهاء عمليتي الانصهار خلال زمن عمل الضاغط والتصلب خلال زمن توقفه عن العمل.

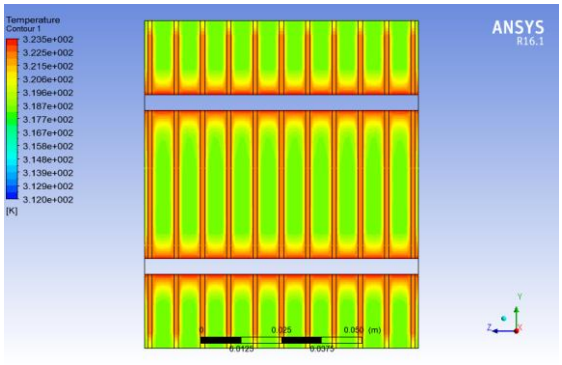
تبين الأشكال (4–24) وحتى (4–29) الصور الحرارية الناتجة عن برنامج المحاكاةANSYS – 16.1 والتي تظهر التدرج الحراري لجزء من خزان التحول الطوري الحاوي على المكثف خلال أزمنة مختلفة من عملية الانصهار وتبادل الحرارة مع المكثف للمادة المختارة بسماكة 10 mm.

كما يبين الشكل (4–30) تغير كسر التحول الطوري خلال عمليتي الانصهار والتصلب للمادة المختارة بسماكة 10 mm.

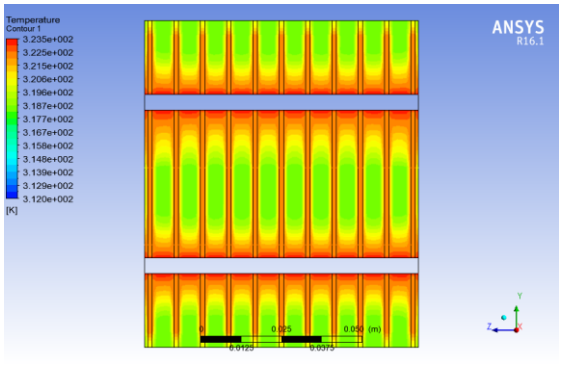
يبين الشكل (4–31) تغير متوسط درجة حرارة خزان التحول الطوري خلال عمليتي الانصهار والتصلب للمادة المختارة بسماكة 10 mm.



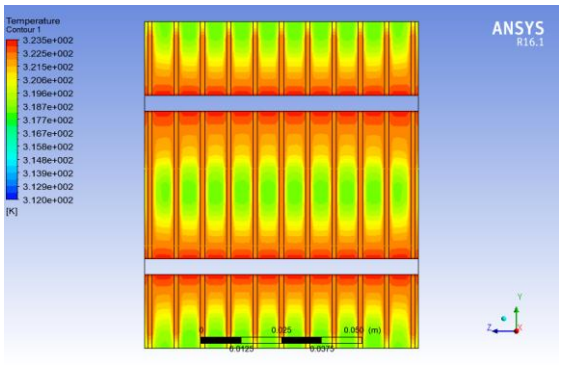
الشكل 4-24: درجات حرارة الانصهار بعد 1 دقيقة



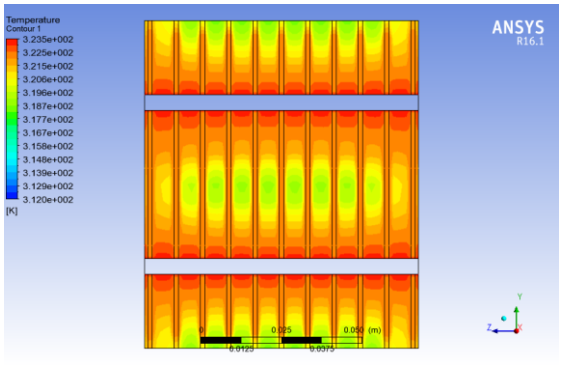
الشكل 4-25: درجات حرارة الانصهار بعد 6 دقيقة



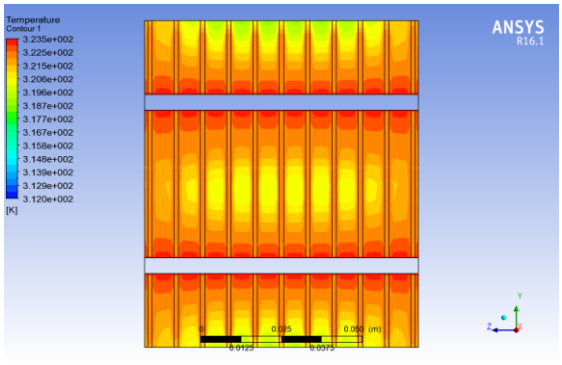
الشكل 4-26: درجات حرارة الانصهار بعد 11 دقيقة



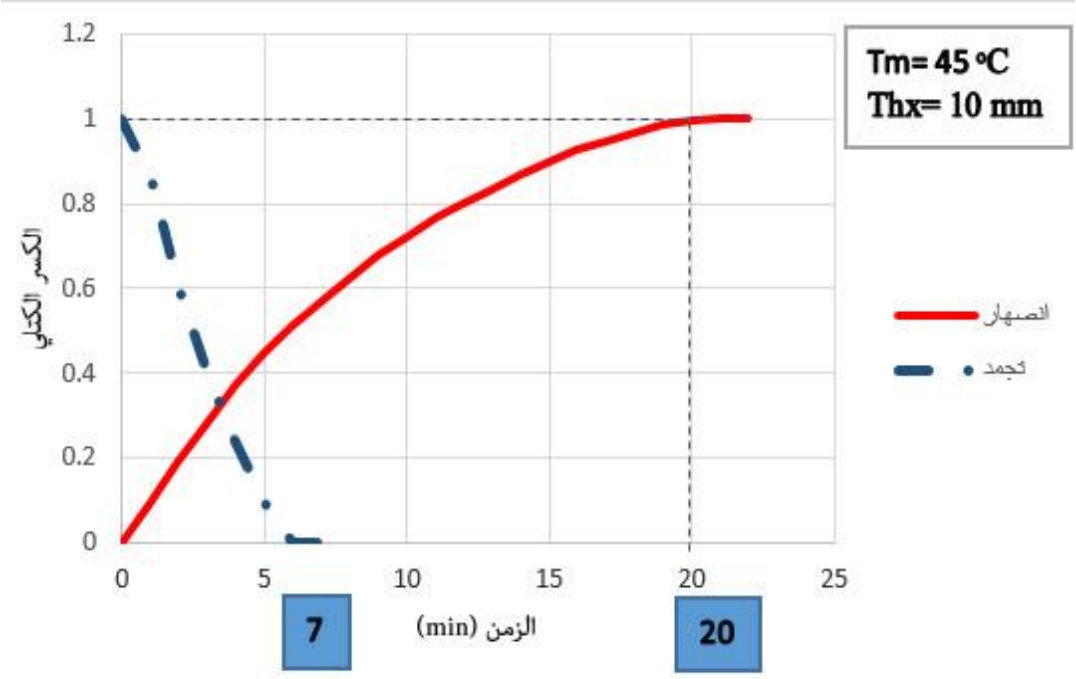
الشكل 4-27: درجات حرارة الانصهار بعد 16 دقيقة



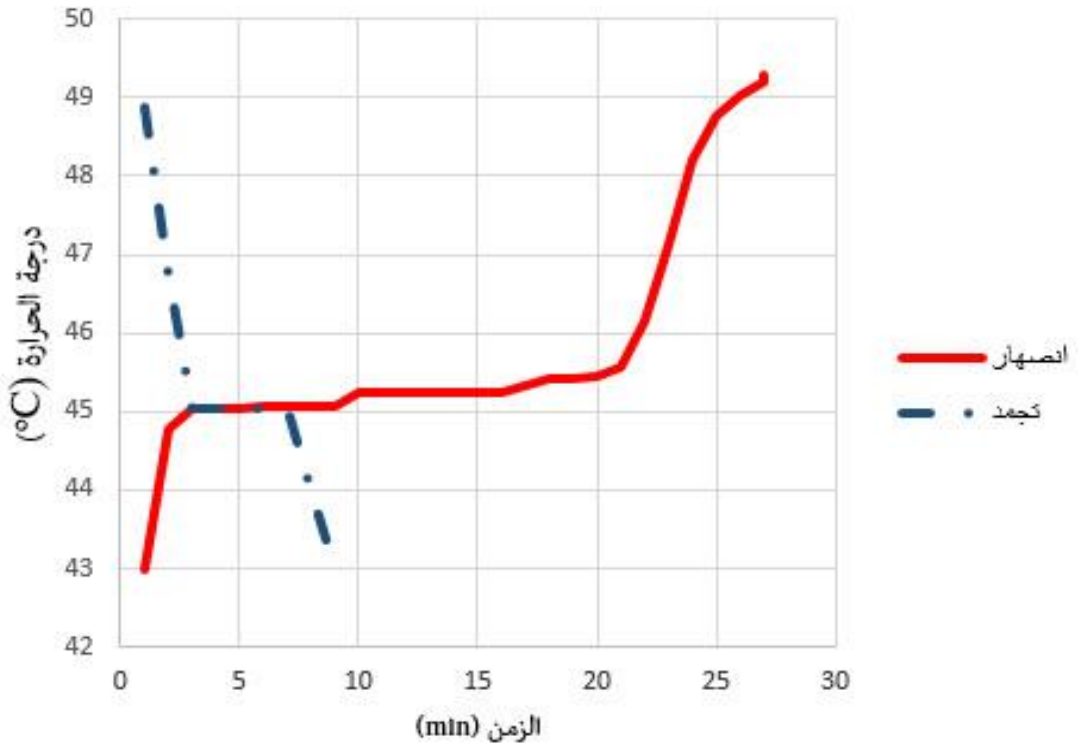
الشكل 4-28: درجات حرارة الانصهار بعد 19 دقيقة



الشكل 4-29: درجات حرارة الانصهار بعد 20 دقيقة



الشكل 4-30: تغير الكسر الكتلي مع الزمن للانصهار والتجمد



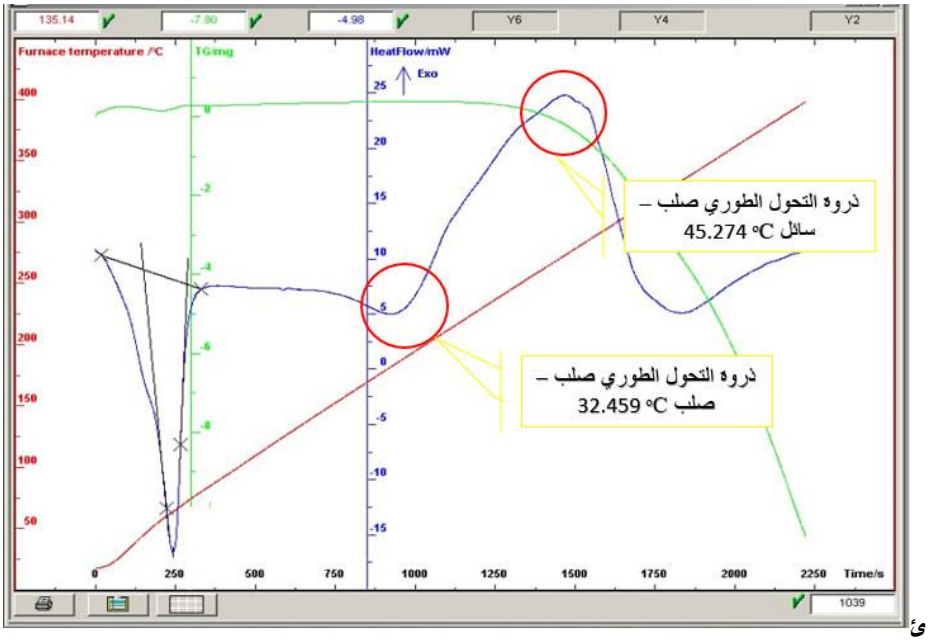
الشكل 4-31: تغير متوسط درجة حرارة المادة المتحولة الطور مع الزمن للانصهار والتجمد

قدم (النصار، 2018) دراسة لعينة من شمع البارافين ضمن خزان تحول طوري. تم في البداية دراسة عينة من المادة باستخدام جهاز الماسح الكالوميتري التفاضلي (Differential Scanning Calorimetry (DSC)) لتحديد درجة حرارة التحول الطوري وانتالبي الانصهار.

يقوم جهاز الماسح الكالومتري التفاضلي بإعطاء تغير ثابت في درجة الحرارة مع الزمن 0.2 °C/s ثم يقوم بقياس الفرق في درجات الحرارة بين العينة المدروسة والعينة المرجعية والتي تحول وبشكل مباشر إلى الفرق في كميات الحرارة بينهما. (بسام بدران، عيسى محمود، 2017).

يبين الشكل (4-32) نتائج الماسح الكالومتري التفاضلي لهذه العينة حيث يمكن اعتماد درجة حرارة التحول الطوري 45.274 وحرارة التحول الطوري 174.795 kJ/kg. يعبر المنحني باللون الأحمر عن تغير درجة الحرارة مع الزمن والذي من الممكن اعتباره خطياً. يظهر المنحني الأزرق تغير التدفق الحراري للمادة المدروسة حيث نجد فيه بعد بدء التجربة قمتان، الصغرى تدل على التحول الطوري صلب – صلب حيث

بين الاختبار أن درجة الحرارة عندها 32.459 °C والقمة الكبرى تدل على التحول الطوري صلب – سائل عند درجة حرارة 45.274 °C.

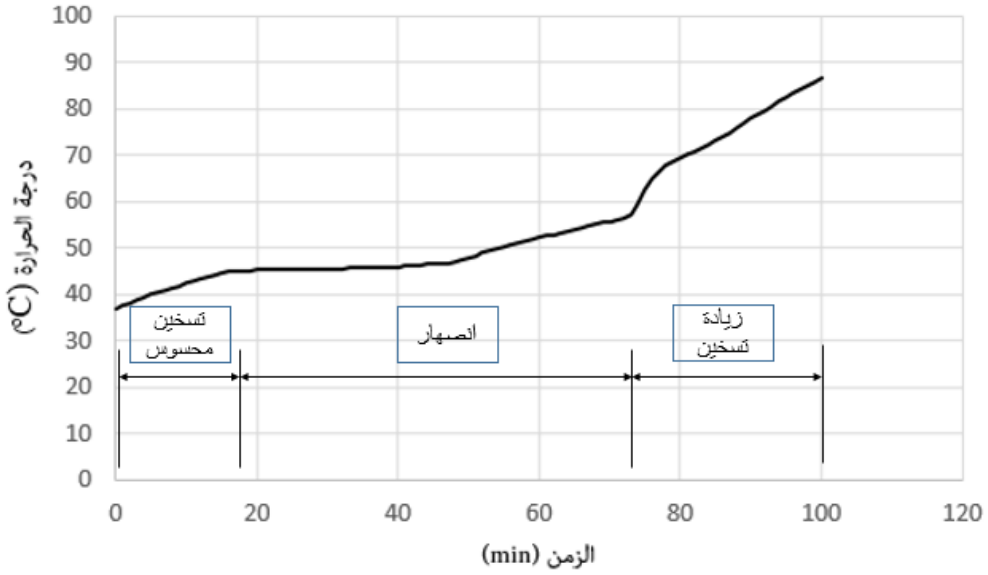


الشكل 4-32: نتائج الماسح الكالومتري التفاضلي

تم إعادة اختبار العينة البارافينية في مختبرات شركة الحافظ بمحافظة دمشق. حيث تم وضع كتلة قدرها 500 gram ضمن وعاء يحوي سخانين كهربائيين باستطاعة 20 Watt لكل منهما. تم وضع حساسين حرارة ضمن الوعاء واستمرت التجربة لمدة 100 min كما هو موضح بالشكل (4-33). يوضح الشكل (4-34) علاقة تغير متوسط قراءتي حساسي درجة الحرارة مع الزمن والذي بين أن درجة حرارة الانصهار هي بحدود درجة حرارة 45 °C.



الشكل 4-33: اختبار العينة البارافينية



الشكل 4-34: تغير متوسط قراءتي حساسي درجة الحرارة مع الزمن

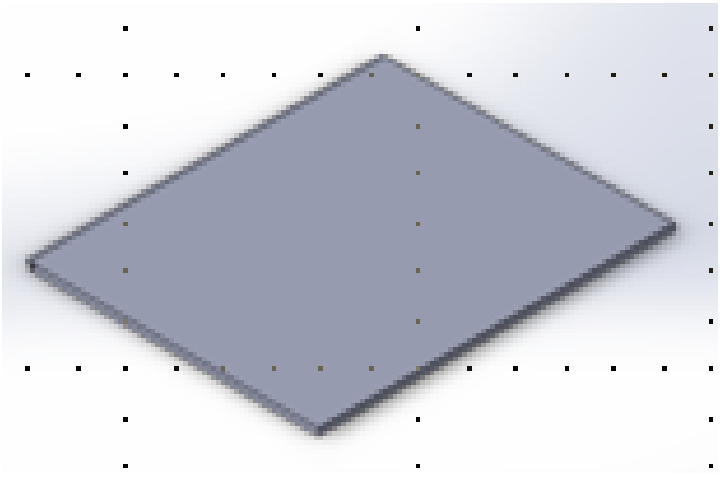
يتبين حسب النتائج السابقة أن المادة المتحولة الطور (شمع البارافين) المختبرة وبسماكة 10 mm مناسبة للتجربة من حيث درجة حرارة التحول الطوري.

4-2-2- النتائج التجريبية

بعد تحديد درجة حرارة وسماكة المادة المتحولة الطور اللازم غمر مكثف المجمدة المنزلية بها، تم تصنيع خزان التحول الطوري من مادة الستانلس ستيل سماكة 1 mm باستخدام آلة CNC في مختبرات الحافظ أيضاً. تم رسم الخزان باستخدام برنامج Solid Work بأبعاد L X W X H = 950 X 10 X 460 mm وتصديره إلى آلة CNC.

تبين الأشكال (4-35, 4-36, 4-37, 4-38) مراحل تصنيع وتركيب خزان الستانلس ستيل.

بعد صنع الخزان تم فك براغي المكثف والمثبت بها على جسم البراد وتلبيس المكثف بالخزان ومن ثم تسخين المادة المتحولة الطور بمسخنات خارجية وسكبها في الخزان.



الشكل 4-35: رسم الخزان على برنامج Solid Work



الشكل 4-36: تركيب الخزان (a)



الشكل 4-37: تركيب الخزان (b)



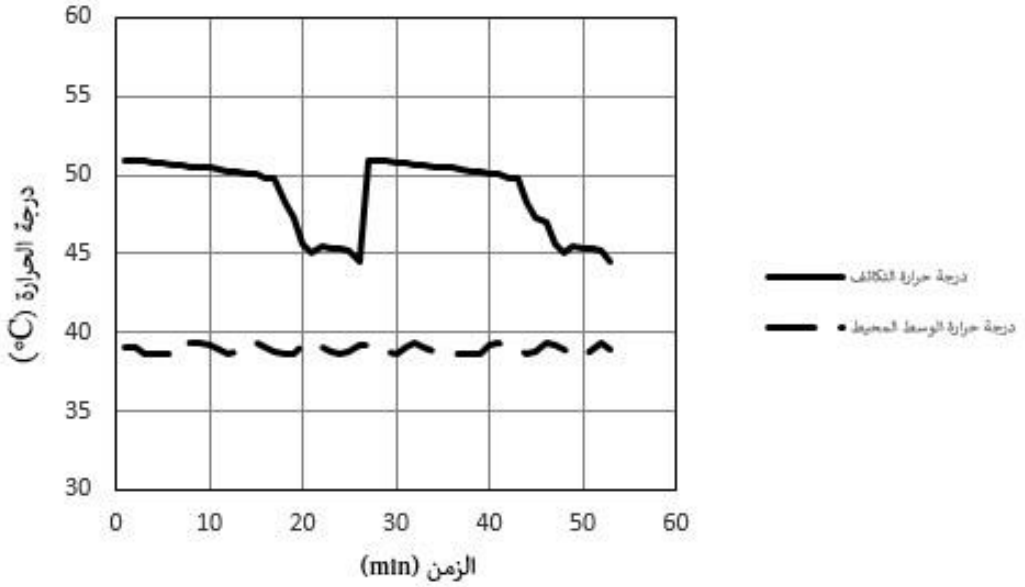
الشكل 4-38: تركيب الخزان (c)

تم إعادة التجربة للحالة الأساسية عند درجة حرارة وسط محيط ^{o}C 38 مع غمر مكثف المجمدة المنزلية بشمع البارافين ضمن خزان التحول الطوري واستمرت التجربة 24 ساعة وتم أخذ قراءات حساسات درجة الحرارة لدورتي عمل مستقرتين للضاغط حيث يعمل الضاغط لمدة 20 min ويتوقف لمدة 7 min في الحالة المستقرة.

يبين الشكل (4–39) تغير درجة حرارة وسط المكثف ودرجة حرارة الوسط المحيط مع الزمن لدورتي عمل مستقرتين للضاغط.

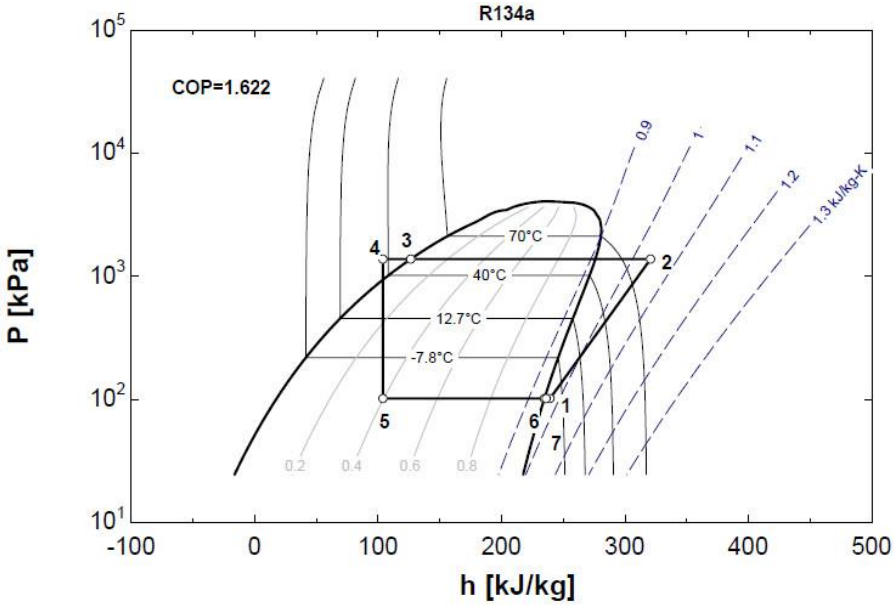
الملاحظ من الشكل (4–39) أن متوسط درجة حرارة وسط المكثف للحالة الجديدة تساوي ^{o}C 50.03 في حين كانت للحالة الأساسية ^{o}C 52.24 أي بانخفاض قدره 4.23% عن الحالة الأساسية. والملاحظ أيضاً أن درجة حرارة وسط المكثف خلال فترة توقف الضاغط وصلت إلى قيمة مساوية لدرجة حرارة التحول الطوري وثبتت عندها حتى انتهاء عملية التصلب خلال فترة توقف الضاغط عن العمل، في حين أنه في الحالة الأساسية سعت للوصول إلى درجة حرارة الوسط المحيط. بمعنى آخر فإن درجة حرارة وسط

المكثف انخفضت عن الحالة الأساسية خلال فترة عمل الضاغط وارتفعت عن الحالة الأساسية خلال فترة توقف الضاغط عن العمل.



الشكل 4-39: تغير درجة حرارة وسط المكثف (درجة حرارة التكاثف) ودرجة حرارة الوسط المحيط مع الزمن

يبين الشكل (4-40) مخطط h-p لدارة التبريد حيث بلغ معامل الأداء قيمة COP=1.622 أي بزيادة قدرها 5.95% عن الحالة الأساسية.



الشكل 4-40: مخطط h-p لحالة PCM بجزء المكثف عند درجة حرارة وسط محيط 38 °C

الفصل الخامس

5- حالة تضمين المواد المتحولة الطور في جزء المبخر وجزء المكثف معاً

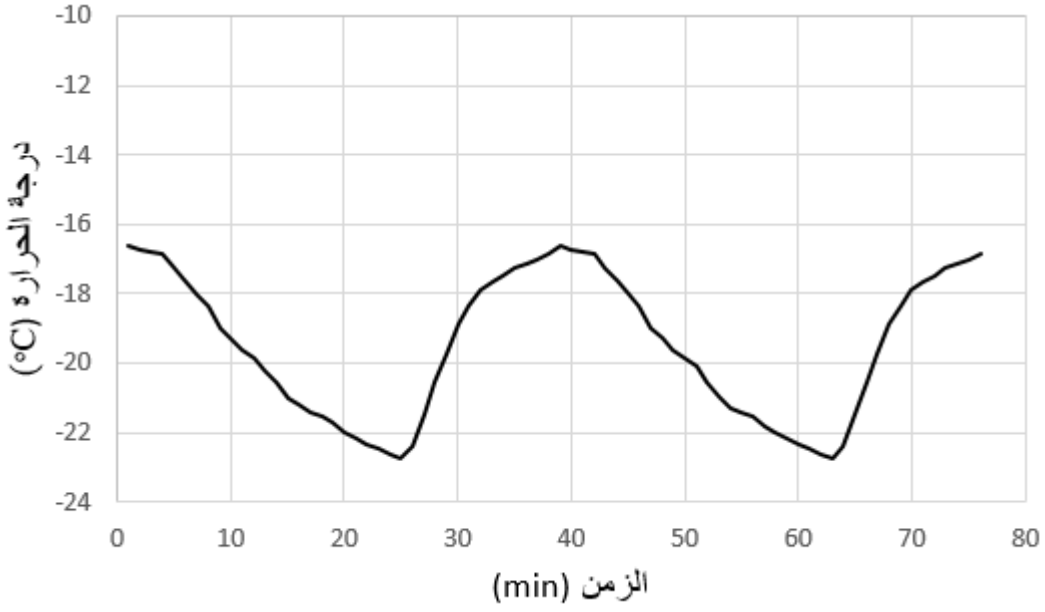
سيتم في هذا الجزء من البحث تقييم تأثير تضمين المواد المتحولة الطور في جزء المبخر (التخزين الحراري الكامن البارد) وفي جزء المكثف (التخزين الحراري الكامن الساخن) معاً. لم تذكر أي من الأبحاث المتاحة دراسة هذه الحالة.

تم إعادة التجربة عند درجة حرارة وسط محيط ^{o}C 38 وذلك بتضمين المواد المتحولة الطور ضمن حجرة المجمدة بنفس البارامترات المستخلصة في الفصلين الثالث والرابع ولكن مع الانتباه إلى أن زمن تشغيل الضاغط ازداد من 22 min إلى 26 min وزمن توقفه ازداد من 7 min إلى 13 min في حالة تضمين المواد المتحولة الطور ضمن حجرة المجمدة، بينما تم اختيار المادة المتحولة الطور في جزء المكثف اعتماداً على شروط الحالة الأساسية وهي زمن تشغيل 22 min وزمن توقف 13 min. وبالتالي فعند اختيار نفس بارامترات المادة المتحولة الطور في جزء المكثف، فإنه يتم زيادة تسخين محسوس للمادة المتحولة الطور بشكلها السائل لمدة 4 min عند عمل الضاغط وزيادة تبريد محسوس المادة المتحولة الطور بشكلها لمدة 6min عند توقف الضاغط عن العمل.

بإعادة التجربة وفق المعطيات السابقة، استمر الضاغط في الحالة المستقرة بالعمل لمدة 25 min وتوقف عن العمل لمدة 13 min.

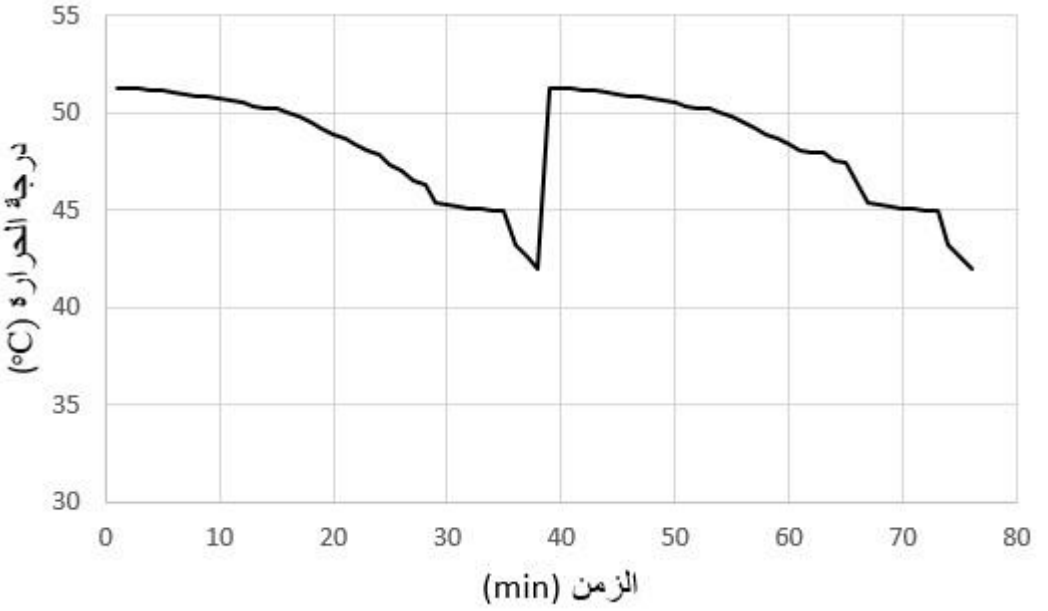
5-1- تغير درجة حرارة التبخر ودرجة حرارة التكاثف

يبين الشكل (5-1) تغير درجة حرارة وسط المبخر مع الزمن لدورتي عمل مستمرتين للضاغط. حيث بلغت متوسط درجة حرارة التبخر ^{o}C 19.91- أي بارتفاع قدره 22.53% عن الحالة الأساسية.



الشكل 5-1: تغير درجة حرارة التبخر مع الزمن

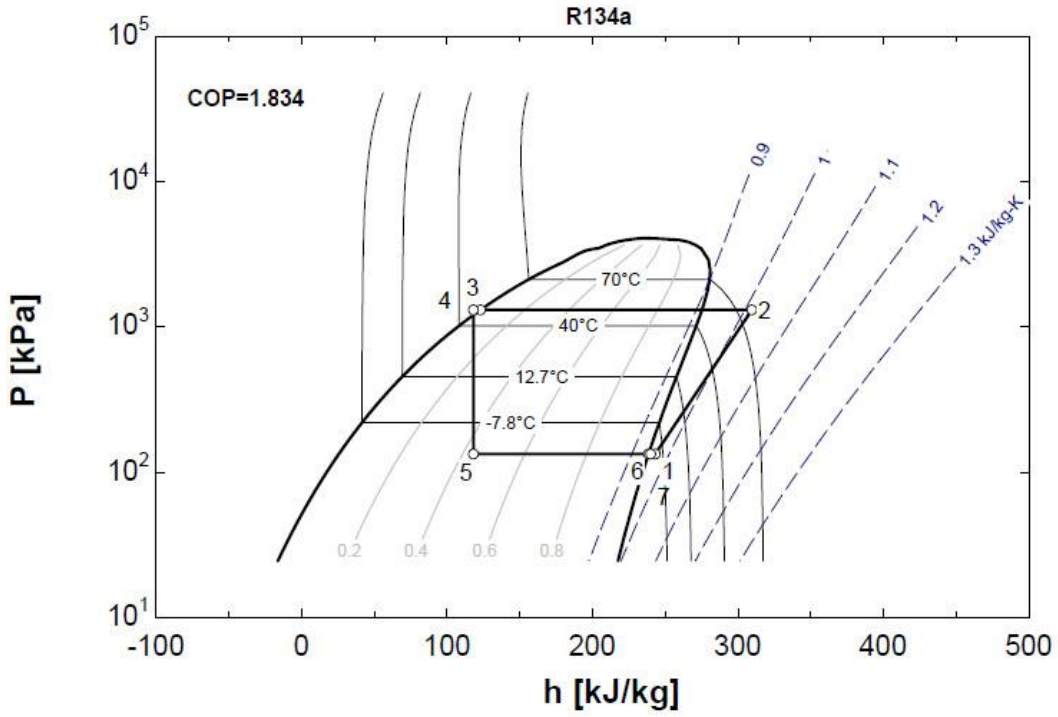
كما يبين الشكل (5–2) تغير درجة حرارة وسط المكثف مع الزمن حيث بلغت متوسط درجة حرارة التكاثف 49.69 °C أي بانخفاض قدره 4.9%.



الشكل 5-2: تغير درجة حرارة التكاثف مع الزمن

5-2- دورة التبريد ومعامل الأداء

يبين الشكل (5-3) مخطط p-h للحالة الجديدة حيث حقق معامل الأداء قيمة 1.834 أي بزيادة قدرها 19.79% عن الحالة الأساسية.



الشكل 5-3: مخطط p-h

الفصل السادس

6- مقارنة مؤشرات الأداء والنتائج

تم تقديم المنهجية المتبعة في البحث لدراسة وتقييم تأثير تضمين المواد المتحولة الطور في جزأي المبخر والمكثف كلاً على حدة أو معاً. كما تم تحديد درجات حرارة التبخر والتكاثف ومعاملات الأداء ونسب تشغيل الضاغط خلال دورته المستقرة.

بالإضافة إلى مؤشرات الأداء السابقة، سيتم تقييم تضمين المواد المتحولة الطور في جزأي المبخر والمكثف من خلال مقارنة الاستهلاك الطاقي اليومي وتحليل الإكسرجي.

6-1- دراسة حالة تغير الشروط المحيطة

تم الاعتماد على مرجع AHAM HRF-01 والخاص بعمليات تطوير البرادات والمجمدات المنزلية في عملية الاختبار وأخذ القياسات اللازمة، والذي بين أنه من الممكن إجراء تجارب الاختبار عند درجات حرارة وسط محيط ^oC 32 و^oC 38. ولكن أثناء العمل والاستثمار، من الممكن أن تتغير درجات حرارة الوسط المحيط عن درجات الحرارة التصميمية وخاصة عندما يتم وضع البراد أو المجمدة المنزلية ضمن وسط محيط لا يوجد فيه تحكم بدرجات الحرارة. لذلك سيتم إجراء دراسة نظرية وتجريبية للحالة الأسوأ لتضمين المادة المتحولة الطور في جزء المكثف والتي تقابل عدم حدوث تحول طوري لهذه المادة.

تمت المقارنة بين حالتين عند درجتي حرارة وسط محيط ^oC 25: الأولى للحالة الأساسية من دون مواد تحول طوري والثانية مع تضمين نفس مواد التحول الطوري وبنفس السماكة المدروسة عند درجة حرارة وسط محيط ^oC 38 لحالة المكثف فقط. بلغت درجة حرارة التكاثف للحالة الأولى ^oC 39.77 وللثانية ^oC 39.15 أي أن درجة حرارة التكاثف انخفضت بمقدار 1.6% حتى بحالة عدم حدوث تحول طوري.

يمكن تفسير ذلك علمياً بالأسباب التالية:

1. معامل التوصيل الحراري للمادة المتحولة الطور بطورها الصلب يساوي 0.44 W/m.K بينما للهواء 0.025 W/m.K أي إن معامل التوصيل الحراري للمادة المتحولة الطور أكبر بمقدار 17.6 مرة من معامل التوصيل الحراري للهواء.

2. السعة الحرارية للمادة المتحولة الطور بطورها الصلب يساوي 2 kJ/kg.K بينما للهواء 1.007 kJ/kg.K وبالتالي يتم نقل كمية من الحرارة بواسطة المادة المتحولة الطور أكبر منها بواسطة الهواء. كما يتم تخزين حرارة التكاثف ولكن بشكل محسوس خلال فترة عمل الضاغط وطرحها للوسط المحيط خلال فترة توقف الضاغط عن العمل.

3. إن مساحة سطح التبادل الحراري مع الهواء في حالة وجود صندوق التخزين تساوي $0.437\ m^2$ بينما في حالة تعرض المكثف مباشرة للهواء فهي تساوي مساحة الأنابيب مع الريش وهي $0.1955\ m^2$ أي إن مساحة سطح التبادل الحراري الممكن طرح حرارة التكاثف عبرها أكبر بمقدار 2.23 مرة.

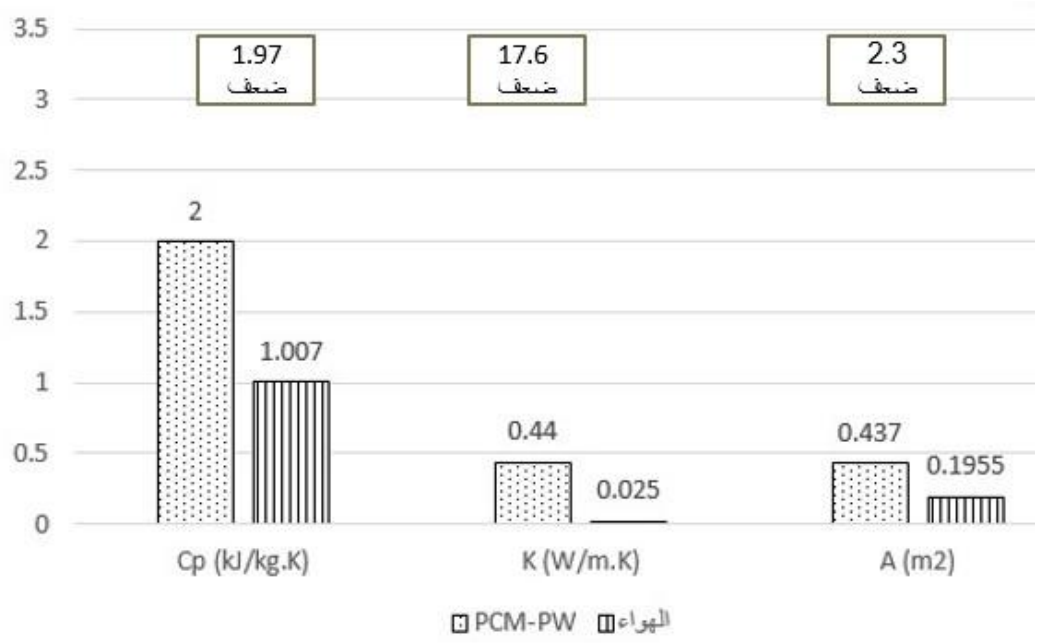
كل الأسباب السابقة تزيد من كمية حرارة التكاثف المطروحة حتى في حال عدم حدوث تحول طوري للمادة المتحولة الطور. مما يخفض من درجة حرارة التكاثف وبالتالي ويحسن مؤشرات الأداء.

يبين الشكل (6-14) علاقة تغير درجة حرارة التكاثف مع الزمن عند درجة حرارة وسط محيط 25 ^oC مع وبدون مواد متحولة الطور ذات درجة حرارة تحول طوري 45 ^oC. إن تضمين PCM من جهة المكثف لا يؤثر على زمن تشغيل وتوقف الضاغط، لذلك نلاحظ تطابق الأزمنة بين الحالتين في الشكل (6-14).



الشكل 6-1: تغير درجة حرارة التكاثف عند درجة حرارة وسط محيط 25 ^oC مع وبدون مواد تحول طوري

يبين الشكل (6–15) تغير قيم الموصلية الحرارية والسعة الحرارية ومساحة سطح التبادل الحراري بين حالتي وجود صندوق التخزين (بدون تحول طوري) وبدونه .

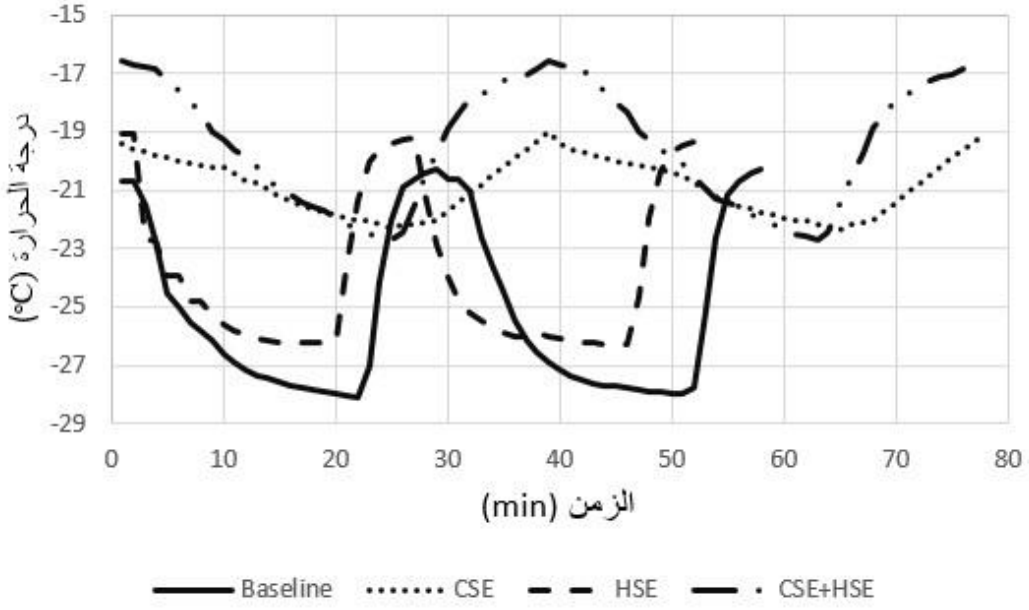


الشكل 6-2: تغير قيم الموصلية الحرارية والسعة الحرارية ومساحة سطح التبادل الحراري بين حالتي وجود صندوق التخزين (بدون تحول طوري) وبدونه

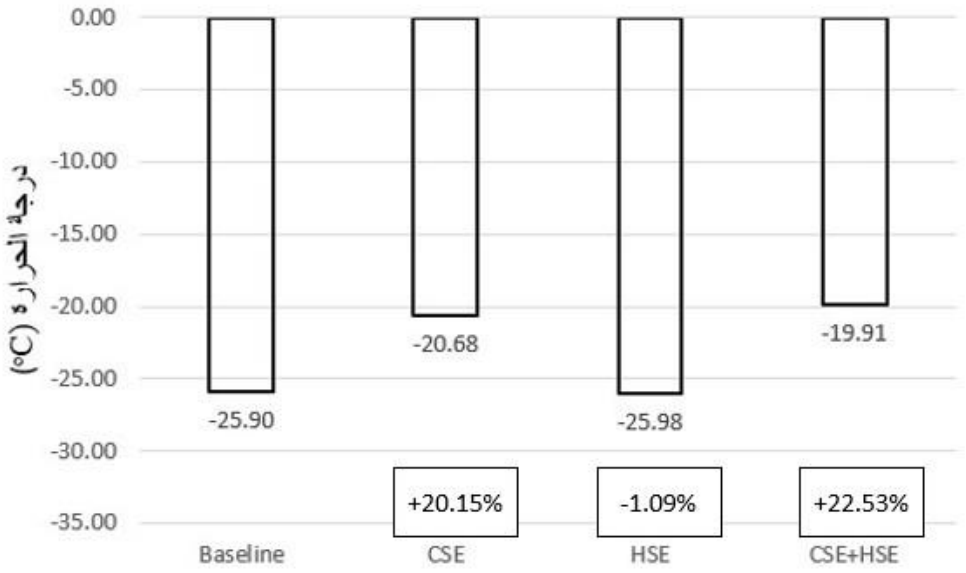
6–2– المقارنة الطاقية عند درجة حرارة وسط محيط ^{o}C 38

6–2–1– درجة حرارة التبخر

يبين الشكل (6–1) مقارنة تغير درجة حرارة التبخر بين الحالة الأساسية (Baseline) وحالة تضمين المواد المتحولة الطور في جزء المبخر (Cold Storage Energy–CSE) وحالة تضمين المواد المتحولة الطور في جزء المكثف (Hot Storage Energy–HSE) وكذلك حالة تضمين المواد المتحولة الطور في جزأي المبخر والمكثف معاً (CSE+HSE) وذلك لدورتي عمل مستقرتين للضاغط. كما يبين الشكل (6–2) مقارنة بين متوسط درجة حرارة التبخر للحالات المذكورة ومقدار الاختلاف عن الحالة الأساسية.



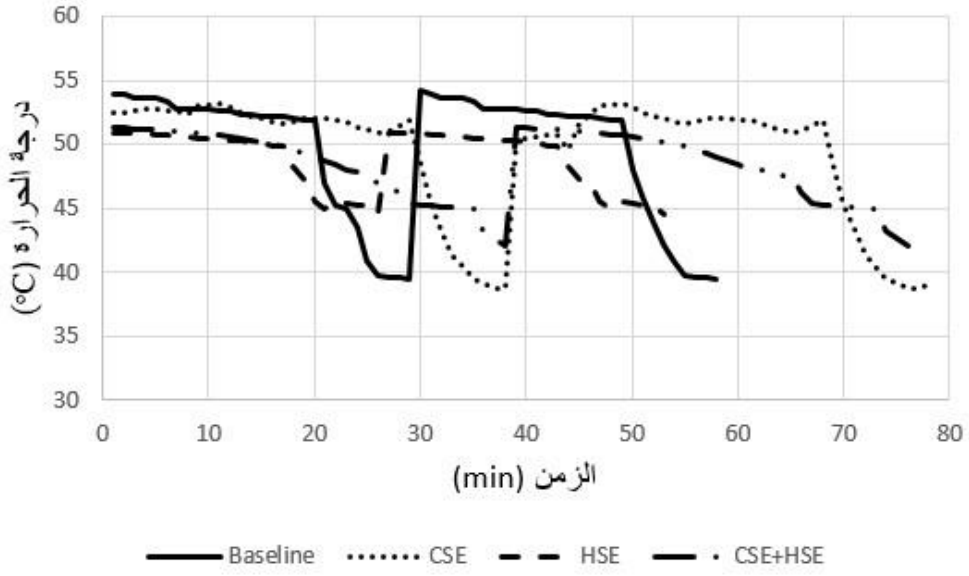
الشكل 6-3: تغير درجة حرارة التبخر مع الزمن لدورتي عمل مستقرتين للضاغط



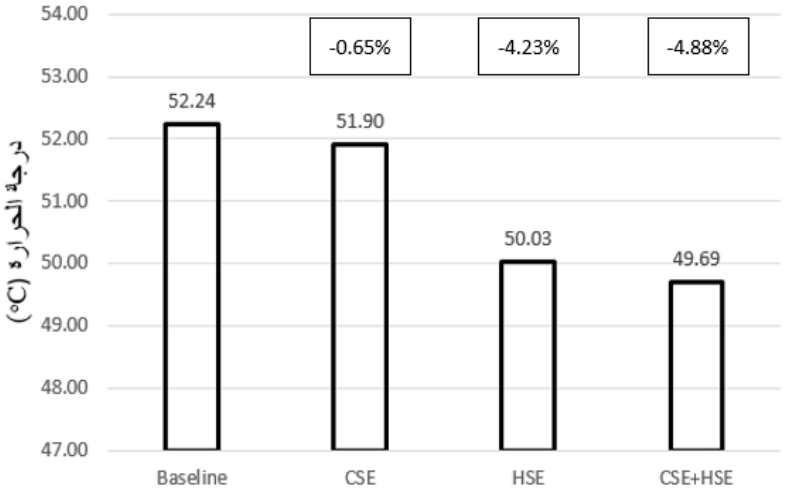
الشكل 6-4: متوسط درجة حرارة التبخر لكل حالة ومقدار الاختلاف عن الحالة الأساسية

6-2-2- درجة حرارة التكاثف

يبين الشكل (6-3) تغير درجة حرارة التكاثف لكل من الحالات المدروسة مع الزمن لدورتي عمل مستقرتين للضاغط. كما يبين الشكل (6-4) مقارنة متوسط درجة حرارة التكاثف لكل حالة ومقدار الاختلاف عن الحالة الأساسية.



الشكل 6-5: تغير درجة حرارة التكاثف مع الزمن لدورتي عمل مستقرتين للضاغط



الشكل 6-6: متوسط درجة حرارة التكاثف لكل حالة ومقدار الاختلاف عن الحالة الأساسية

نلاحظ من الشكل السابق أن تضمين المواد المتحولة الطور من جهة المكثف يعمل على تخفيض درجة التكاثف بسبب استمرار عملية طرح حرارة التكاثف على كامل دورة عمل وتوقف الضاغط.

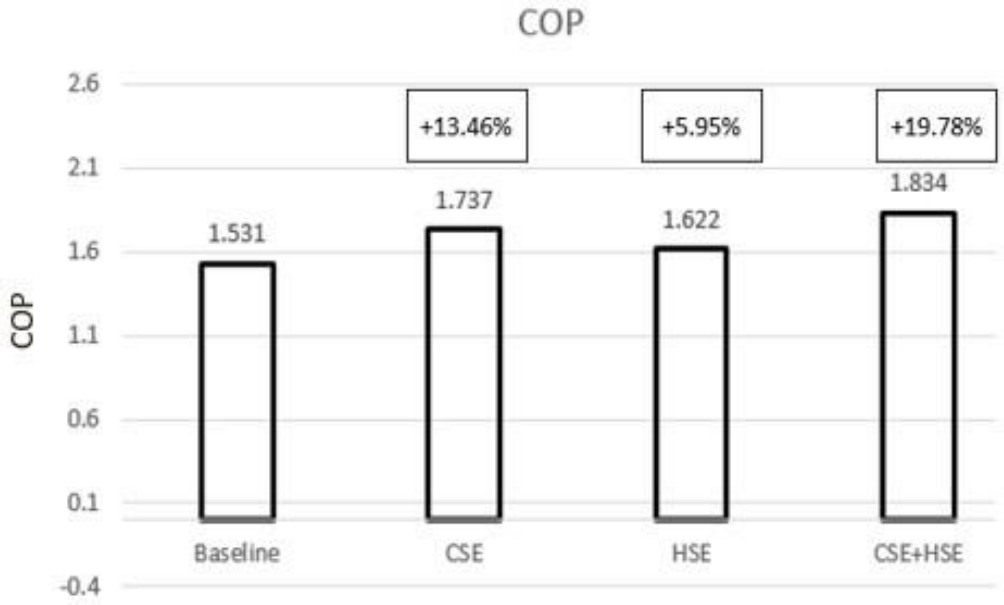
إن انتقال الحرارة من سطوح المكثف خلال فترة عمل الضاغط إلى الهواء المحيط في حالة عدم وجود PCM يتم بالحمل.

انتقال الحرارة يتم من سطوح المكثف إلى المادة المتحولة الطور خلال فترة عمل الضاغط يتم بالتوصيل وخلال فترة توقف الضاغط عن العمل يتم بالحمل إلى الهواء المحيط بحال وجود PCM.

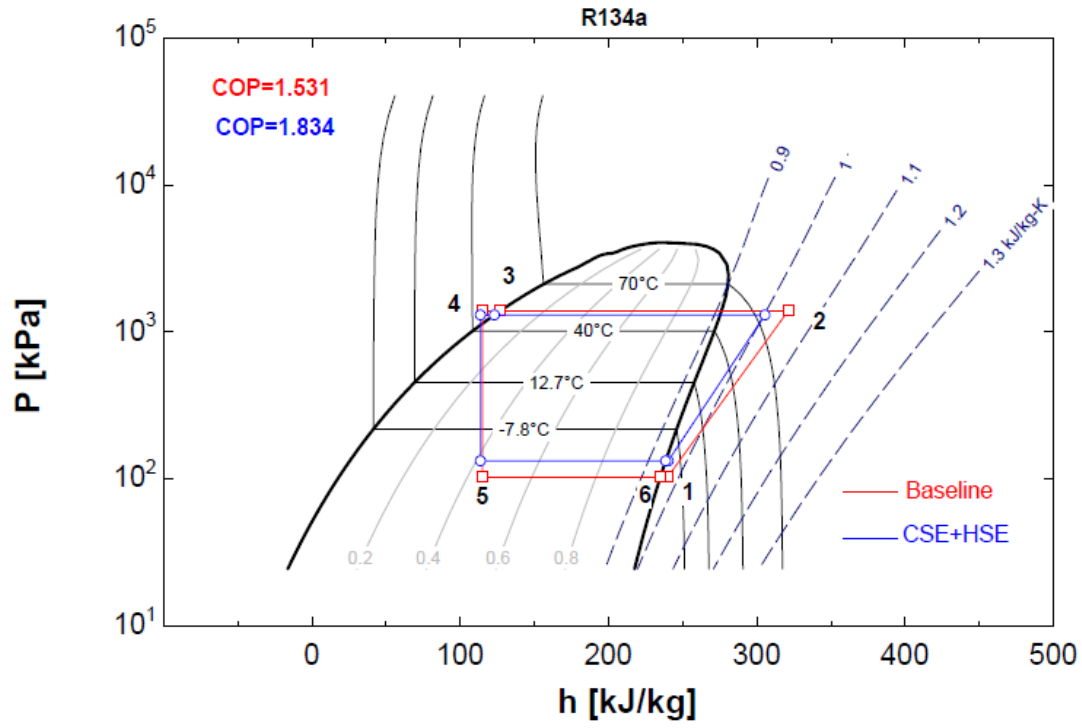
6-2-3- مقارنة معاملات الأداء

من خلال الفصول السابقة تم إيجاد معاملات الأداء لكل حالة على حدة. يبين الشكل (6-5) مقارنة معاملات الأداء للحالات المدروسة ومقدار الاختلاف عن الحالة الأساسية، ويبين الشكل (6-6) مخطط h-p لكل من دورتي التبريد الأساسية والحالة الجديدة لتضمين المواد المتحولة الطور في المكثف والمبخر معاً. تمت دراسة مقارنة معامل الأداء كنسبة مئوية لإمكانية مقارنتها مع الدراسات المرجعية المماثلة.

من الملاحظ أن تضمين PCM في جزء المبخر له أثر أكبر على معامل الأداء من تضمينها في جزء المكثف. لأن ارتفاع درجة حرارة التبخر له تأثير أكبر من انخفاض درجة حرارة التكاثف كما تمت الإشارة إليه سابقاً في فصل المقدمة.



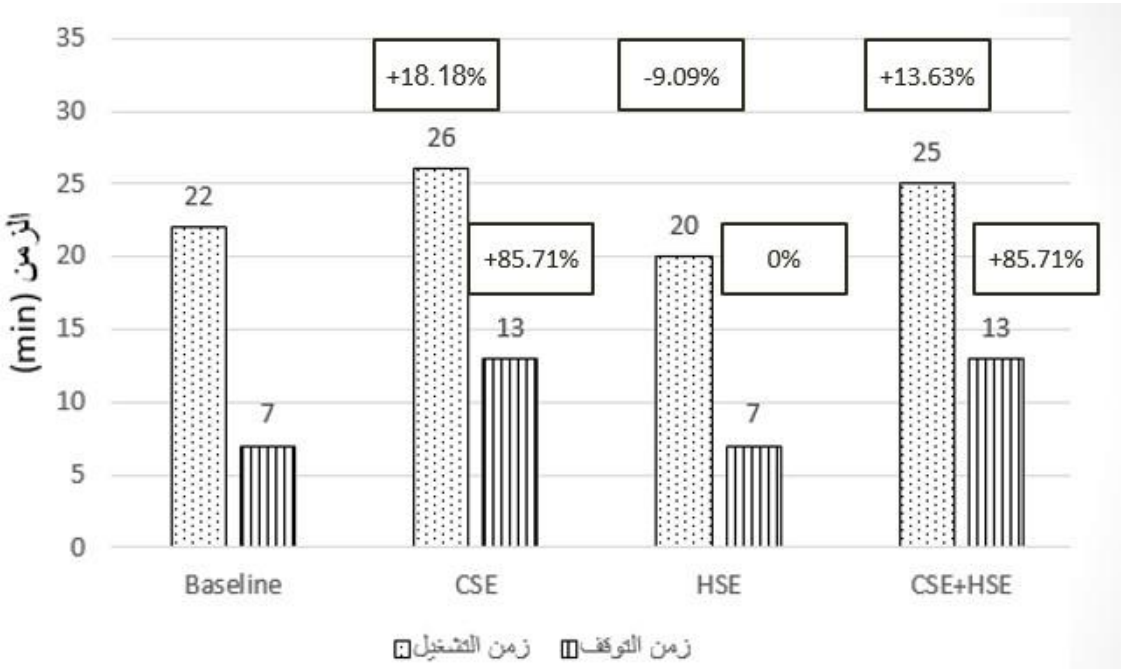
الشكل 6-7: مقارنة معاملات الأداء للحالات المدروسة ومقدار الاختلاف عن الحالة الأساسية



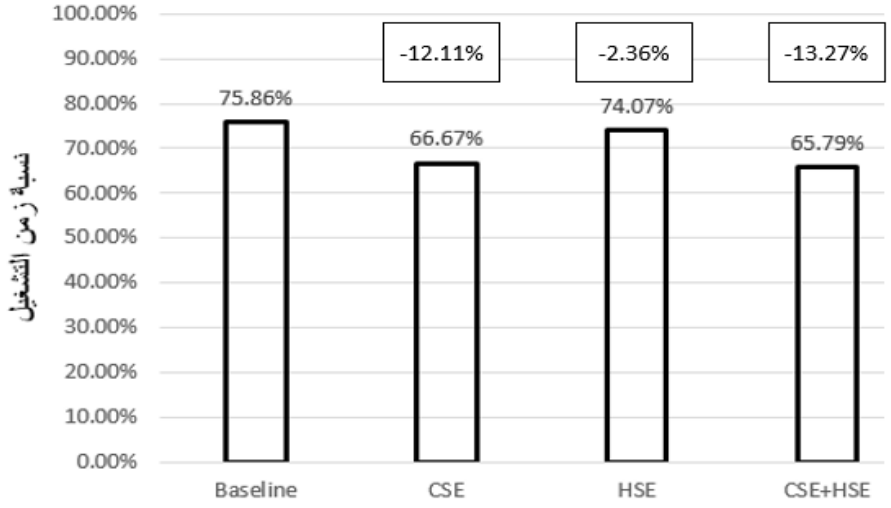
الشكل 6-8: مخطط h–p لكل من دورتي التبريد الأساسية والحالة الجديدة لتضمين المواد المتحولة الطور في المكثف والمبخر معاً

6-3- زمن تشغيل وتوقف الضاغط للحالة المستقرة ونسب التشغيل

يبين الشكل (6-7) زمن تشغيل وتوقف الضاغط عن العمل لكل من الحالات المدروسة. كما يبين الشكل (6-8) نسبة زمن تشغيل الضاغط لكل حالة (وهو نسبة زمن تشغيل الضاغط إلى زمن الدورة كاملة للحالة المستقرة) ومقدار الاختلاف عن الحالة الأساسية.



الشكل 6-9: زمن التشغيل وزمن التوقف للضاغط في كل حالة ومقدار الاختلاف عن الحالة الأساسية



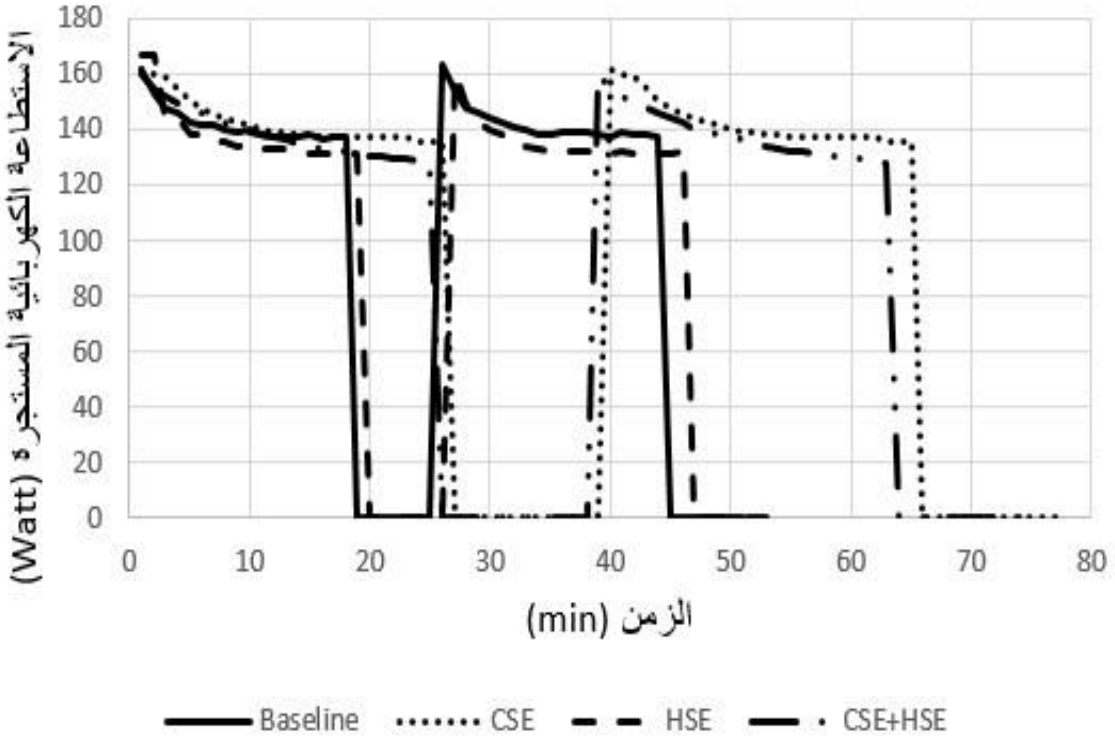
الشكل 6-10: نسبة زمن التشغيل لكل حالة ومقدار الاختلاف عن الحالة الأساسية

لا يؤثر تضمين PCM من جهة المكثف على زمن التوقف والتشغيل نظراً لعدم تغير الحمل الحراري ضمن المجمدة.

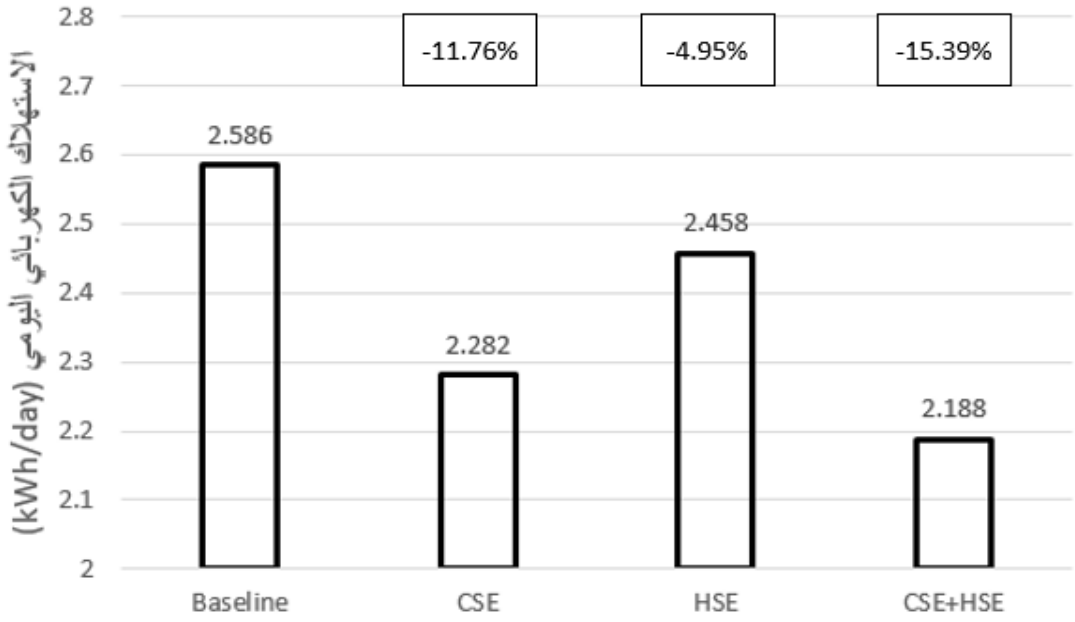
6-4- الاستطاعة المستجرة والاستهلاك الكهربائي اليومي

نظراً لتغير درجات حرارة التكاثف والتبخر ضمن الحالات المدروسة، فإن العمل النوعي للضاغط والاستطاعة المستجرة وكذلك الاستهلاك الكهربائي اليومي تتغير. يبين الشكل (6-9) تغير الاستطاعة

الكهربائية المستجرة لكل حالة من الحالات المدروسة مع الزمن لدورتي عمل مستقرتين للضاغط. حيث نلاحظ من الشكل أن الاستطاعة الكهربائية عند بداية إقلاع الضاغط تكون كبيرة وذلك بسبب تيار إقلاع الضاغط ذي السرعة الثابتة. وبسبب زيادة الحمل الحراري على المبخر بحالة CSE فإن الاستطاعة الكهربائية تزداد عن الحالة الأساسية ولكن الإنتاجية التبريدية تزداد بنسبة أكبر كما لاحظنا في مقارنة معاملات الأداء، وإن الاستهلاك الكهربائي ينخفض بسبب زيادة زمن توقف الضاغط عن العمل بنسبة أكبر من زيادة زمن عمله كما لاحظنا في مقارنة نسبة زمن التشغيل. كما يبين الشكل (6-10) قيم الاستهلاك الكهربائي اليومي لكل حالة ومقدار الاختلاف عن الحالة الأساسية اعتماداً على الاستطاعة الكهربائية المستجرة وزمن عمل الضاغط.



الشكل 6-11: تغير الاستطاعة الكهربائية المستجرة مع الزمن



الشكل 6-12: الاستهلاك الكهربائي اليومي لكل حالة ومقدار الاختلاف عن الحالة الأساسية

6-5- المقارنة الإكسرجية عند درجة حرارة وسط محيط 32 °C

الإكسرجي أو مقياس العمل الكامن هو العمل الأعظمي الذي يمكن أن يعطيه نظام ما بعملية عكوسة بين حالة ابتدائية معينة وشروط محيطة. (بسام بدران، عيسى مراد، 2015-2016).

6-5-1- تحليل الإكسرجي والإكسرجي الضائع

تحليل الإكسرجي هو أسلوب تحليل ديناميكي حراري يعتمد على القانون الثاني للترموديناميك والذي يوفر وسيلة بديلة لتقييم ومقارنة العمليات والأنظمة بشكل منطقي وذات مغزى.

يوفر تحليل الإكسرجي مقياساً حقيقياً لمدى اقتراب الأداء الفعلي من الحالة المثالية، كما يحدد بشكل أدق مواقع الخسائر الترموديناميكية في الدارة.

تبين المعادلات التالية الإكسرجي الضائع في كل جزء من أجزاء دارة التبريد والإكسرجي الكلي بإهمال الإكسرجي الحركي والإكسرجي الكامن (Chandrasekharan, 2014).

الضاغط

$$Ex_{des-comp} = +T_0(s_1 - s_2) \qquad (6\text{-}1)$$

المكثف

$$Ex_{des-cond} = (h_2 - h_3) - T_0(s_2 - s_3) - q_{cond}(1 - \frac{T_0}{T_{cond}}) \quad (6\text{-}2)$$

المبادل الحراري الاسترجاعي

$$Ex_{des-H.EX} = (h_3 - h_4) - T_0(s_3 - s_4) + (h_7 - h_1) - T_0(s_7 - s_1) \quad (6\text{-}3)$$

الأنبوبة الشعرية:

$$Ex_{des-capillary} = +T_0(S_5 - S_3) \qquad (6\text{-}4)$$

المبخر:

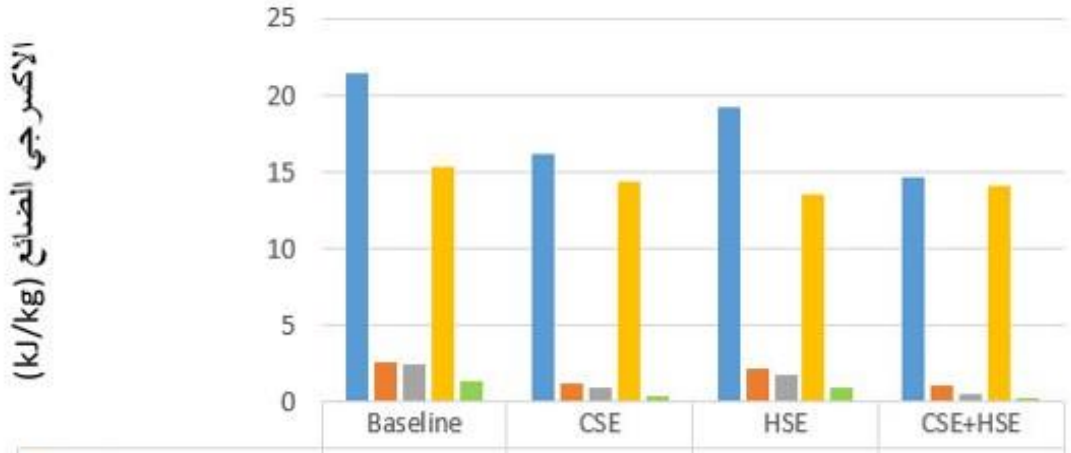
$$Ex_{des-evap} = (h_5 - h_7) - T_0(s_5 - s_7) + q_{eva}(1 - \frac{T_0}{T_{eva}}) \quad (6\text{-}5)$$

الإكسرجي الكلي الضائع في الدارة:

$$Ex_{des} = Ex_{des-comp} + Ex_{des-cond} + Ex_{des-H.EX} + Ex_{des-capillary} + Ex_{des-evap} \qquad (6\text{-}6)$$

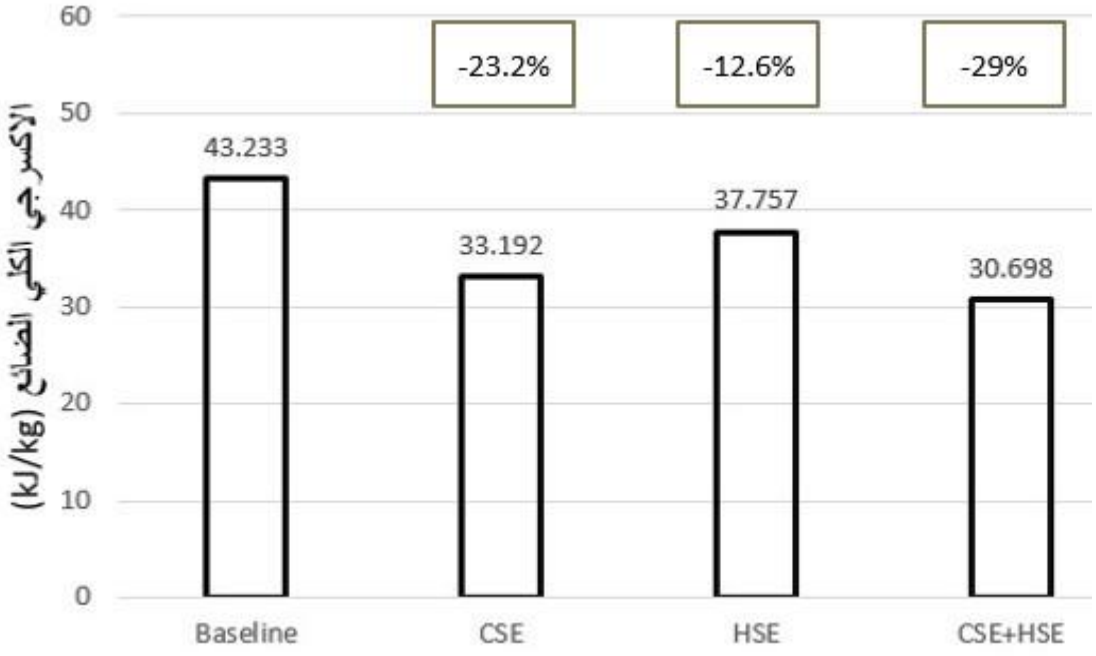
بالاعتماد على معادلات الإكسرجي الضائع في كل جزء من أجزاء دارة التبريد والنتائج السابقة، يوضح الشكل (6–11) الإكسرجي الضائع في كل جزء من أجزاء دارة التبريد لكل حالة من الحالات المدروسة (Baseline, CSE, HSE, CSE+HSE). كما يبين الشكل (6–12) مقارنة بين الإكسرجي الكلي الضائع في عناصر دارة التبريد لكل حالة من الحالات المدروسة.

الملاحظ من الشكل (6–11) أن أكبر ضياع للإكسرجي يكون في الضاغط تليه الأنبوبة الشعرية، كما أن أقل ضياع للإكسرجي يكون في المبخر. لذلك فإن الضاغط هو الجزء الأكثر اهتماماً من قبل الباحثين لدراسة تخفيض ضياعات الإكسرجي خلاله وزيادة مردوده الايزوانتروبي.



	Baseline	CSE	HSE	CSE+HSE
الضاغط	21.44	16.16	19.21	14.71
المكثف	2.586	1.283	2.263	1.075
المبادل الحراري الاسترجاعي	2.469	0.902	1.785	0.485
الأنبوبة الشعرية	15.37	14.4	13.51	14.1
المبخر	1.368	0.447	0.989	0.328

الشكل 6-13: الإكسرجي الضائع في كل جزء من أجزاء الدارة لكل حالة من الحالات المدروسة



الشكل 6-14: الإكسرجي الكلي الضائع لكل حالة من الحالات المدروسة ومقدار الاختلاف عن الحالة الأساسية

6-5-2- مردود قانون الترموينامیك الثاني (مردود الإكسرجي)

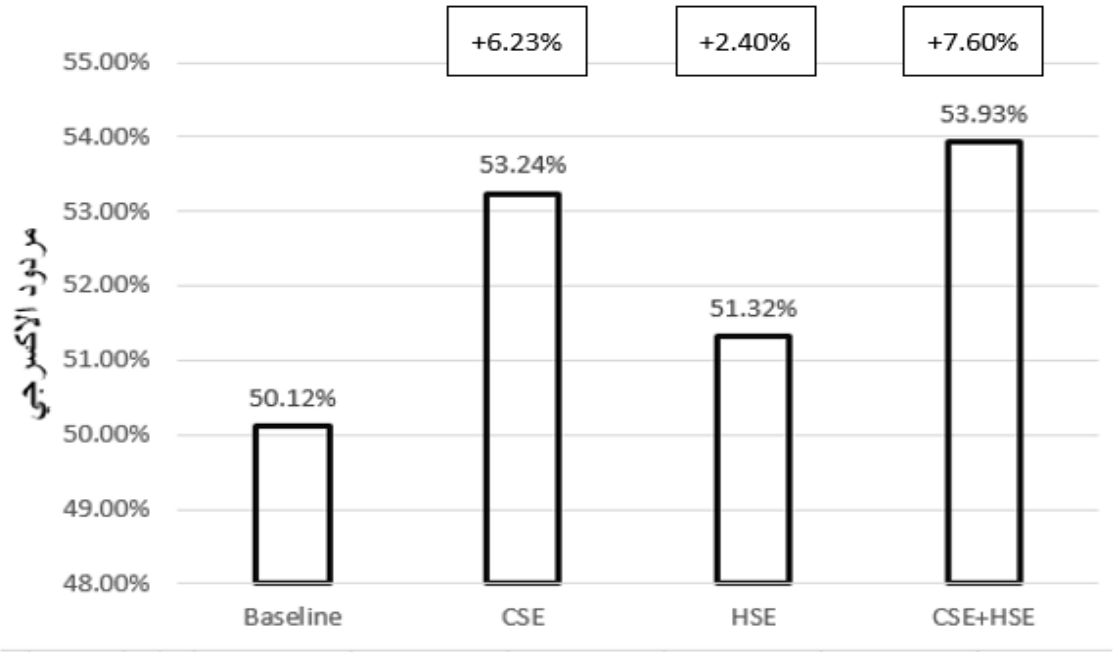
يعرف مردود قانون الترموديناميك الثاني بأنه نسبة المردود الحقيقي للدورة (مردود القانون الأول) إلى المردود الأعظمي عند الشروط نفسها (بسام بدران، عيسى مراد، 2015-2016). وما يعبر عنه في دارات التبريد بأنه نسبة معامل الأداء الحقيقي لدورة التبريد إلى معامل أداء دورة كارنو عند نفس درجتي حرارة التبخر والتكاثف، ويعبر عنه بالشكل التالي أيضاً:

مردود الإكسرجي:

$$\eta_{ex} = \frac{w_{use}}{w_{comp}} = \frac{w_{comp} - Ex_{des}}{w_{comp}} = 1 - \frac{Ex_{des}}{w_{comp}} \qquad (6\text{-}7)$$

بمعنى أنه يساوي العمل المفيد إلى عمل الضاغط في دورة التبريد الانضغاطية البخارية.

يبين الشكل (6-13) مقارنة بين مراديد الإكسرجي لكل حالة من الحالات المدروسة ومقدار الاختلاف عن الحالة الأساسية.



الشكل 6-15: مقارنة بين مراديد الإكسرجي لكل حالة من الحالات المدروسة

6-6- أخطاء القياس

يبين الجدول (6-1) قيم خطأ القياس المطلق لكل بارامتر مستخدم في عملية القياس وذلك بعد عملية المعايرة. يعتمد هذا الجدول على التجهيزات والبرامج الموجودة في شركة الحافظ.

جدول 6-1: خطأ القياس المطلق

الخطأ المطلق	الواحدة	الكمية
$\pm$ 0.01 °C	[°C]	درجة الحرارة
$\pm$ 0.5 min	[min]	الزمن
$\pm$ 0.5 W	[W]	الاستطاعة الكهربائية

وفقاً للجدول السابق وباستخدام برنامج EES تكون قيم خطأ القياس النسبية لكل بارامتر وفق الجدول (6-2).

جدول 6-2: خطأ القياس النسبي للنتائج

الخطأ النسبي	الواحدة	الكمية
$\pm$ 1.12%	W/W	معامل الأداء COP
±1.23%	kWh/day	الاستهلاك الكهربائي اليومي
$\pm$ 0.6%	-	نسبة زمن التشغيل
$\pm$ 0.88%	kJ/kg	الإكسرجي
$\pm$ 1.18 %	-	مردود الإكسرجي

6-7- الجدوى الاقتصادية وفترة استرداد رأس المال

تم توضيح الأهمية الفنية والفيزيائية لتضمين المواد المتحولة الطور في المجمدة المنزلية. ولتوضيح الأهمية الاقتصادية لها، تم تقييم العامل الاقتصادي فترة استرداد رأس المال.

يقوم هذا المعيار على حساب الفترة الزمنية اللازمة لاستعادة رأس المال المستثمر في المشروع من الأرباح

التي يحققها. ويتم احتساب فترة الاسترداد كما يلي:

- تقسيم مبلغ الاستثمار على وسطي الأرباح السنوية الإجمالية (فيما إذا كانت هذه الأرباح متساوية عبر الزمن).
- تجميع مبالغ الأرباح الإجمالية السنوية حتى الوصول إلى مبلغ يساوي مبلغ الاستثمار. فتكون فترة الاسترداد مساوية لرقم السنة التي تتحقق فيها هذه المساواة.

من محاسن هذه الطريقة بساطتها وسهولة حسابها, وهي مفيدة عندما تكون الأولوية لدى المستثمرين هي استعادة رأس المال المستثمر بأسرع فترة, ومن مساوئها أنها:

- لا تأخذ بعين الاعتبار القيمة الزمنية للنقود.
- لا تأخذ بعين الاعتبار ما يحققه المشروع من موارد بعد انقضاء فترة الاسترداد.

نبين فيما يلي حساب فترة استرداد رأس المال لحالة تضمين PCM ضمن حجرة المجمدة على اعتبار تأثيرها الأكبر على الاستهلاك الكهربائي مقارنة بتضمين PCM ضمن المكثف.

يبين الجدول (6-3) التكاليف التأسيسية الأولية لحالة تضمين PCM ضمن حجرة المجمدة.

جدول 6-3: التكاليف التأسيسية الأولية

المادة	السعر (ل.س)
المادة المتحولة الطور ضمن حجرة المجمدة	80,000
الإجمالي	**80,000**

التوفير في الاستهلاك الكهربائي اليومي وحسب النتائج المذكورة هو:

0.304 kWh/day = 110.96 kWh/year

وإن سعر الكيلو واط الساعي عالمياً ما يعادل 600 ل.س

يكون التوفير السنوي 66,576 = 600 X 110.96 ل.س

أي يتم استرداد رأس المال خلال فترة 1.2 = 80,000/66,675 سنة.

الفصل السابع

7- التوصيات

بعض من المقترحات سيتم سردها تتعلق بمتابعة البحث والتطوير وهي:

1. دراسة تضمين المواد المتحولة الطور عند درجات حرارة وسط محيط مختلفة.
2. تقييم أداء المواد المتحولة الطور بحيث تكون جزءأ من دارة التبريد.
3. تأثير الترييش على خزان التحول الطوري الحاوي مكثف البراد أو المجمدة المنزلية لتحسين عملية انتقال حرارة التكثف إلى الوسط المحيط. ومقارنة تأثير الترييش فقط بتأثير تضمين المواد المتحولة الطور.
4. دراسة تأثير تغيير الشكل الهندسي للمواد المتحولة الطور.
5. دراسة أداء تضمين المواد المتحولة الطور في البرادات الصناعية أو في دارات التبريد غير الانضغاطية البخارية.
6. دراسة إعادة تصميم دارة التبريد بمختلف مكوناتها بعد تضمين المواد المتحولة الطور ومقارنة النتائج عندئذ.
7. مقارنة بين تأثير تضمين المواد المتحولة الطور من جهة المكثف وتأثير زيادة مساحة سطح التبادل الحراري للمكثف.
8. دراسة تأثير التغير الحجمي للمادة المتحولة الطور.

قائمة المراجع

المراجع باللغة الإنجليزية

[1] A. Pavithran, M. S. (2020). An investigation on the effect of PCM incorporation in refrigerator through CFD simulation. *Materials Today: Proceedings*.

[2] A. Pirvaram, S. S. (2019). Energy management of a household refrigerator using eutectic environmental friendly PCMs in a cascaded condition. *Energy, 181*, pp. 321-330.

[3] ABDUL HADI N. KHALIFA, A. A. (2018). EXPERIMENTAL STUDY ON THERMAL ENERGY STORAGE PRODUCED BY SOLAR ENERGY FOR DRIVING DOMESTIC FREEZER. *Journal of Engineering Science and Technology, 13*, pp. 2829-2842.

[4] Adil A.M. Omara, A. A. (2020). Thermal management and performance enhancement of domestic refrigerators and freezers via phase change materials: A review. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*.

[5] Ajeet Kumar RAI, A. K. (2012). A review on phase change materials and their applications. *IJARET, 3*(2), pp. 214-225.

[6] Anand Pavithran, M. S. (2020). An investigation on the effect of PCM incorporation in refrigerator through CFD simulation PCM. *Materials Today: Proceedings*.

[7] Angelo Maiorino, M. G.-B. (2020). Achieving a running cost saving with a cabinet refrigerator incorporating a phase change material by the scheduling optimisation of its cyclic operations. *International Journal of Refrigeration, 117*, pp. 237-246.

[8] *ASHRAE Handbook ،Fundamentals.* (2013).

[9] *ASHRAE Handbook—Refrigeration*..(2018)

[10] B. Gin a, ,. M. (2010). Effect of door opening and defrost cycle on a freezer with phase change panels. *Energy Conversion and Management, 51*, pp. 2698-2706.

[11] B.DURGA PRASAD NARESH KURUGONDA. .(2017)EXPERIMENTAL ANALYSIS ON HOUSEHOLD REFRIGERATOR THROUGH THE INTEGRATION OF LATENT HEAT STORAGE ELEMENTS IN WIRE AND TUBE CONDENSER AND PELTIER MODULE AT THE EVAPORATOR. *JETIR.4* ،

[12] Çengel, Y. A. (2006). *Heat and Mass Transfer.*

[13] Chandrasekharan, M. (2014). Exergy Analysis of Vapor Compression Refrigeration System Using R12 and R134a as Refrigerants. *International Journal of Students, 4*, pp. 134-139.

[14] Dincer, I. (2011). *Thermal Energy Storage – Systems and Applications.* New Jersey: A John Wiley and Sons ،Ltd. ،Publication.

[15] G. Myers, M. G.-S. (2019). The Stefan problem with variable thermophysical properties and phase change temperature. *International Journal of Heat and Mass Transfer*.

[16] G. Sonnenrein, A. E. (2014). Reducing the power consumption of household refrigerators through the integration of latent heat storage elements in wire-and-tube condensers. *International Journal of Refrigeration*.

[17] G. Sonnenrein, E. B. (2020). Improving the performance of household refrigerating appliances through the integration of phase change materials in the context of the new global refrigerator standard IEC 62552:2015. *International Journal of Refrigeration, 119*, pp. 448-456.

[18] Gabriela, L. (2012). Thermal Energy Storage with Phase Change Material. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, pp. 75-98.

[19] Jonathan Cofre-Toledo, D. A.-R. (2018). Evaluation of an integrated household refrigerator evaporator with. *International Journal of Refrigeration*.

[20] Joseph Sekhar Saji Raveendran. .(2020) Experimental studies on the performance improvement of household refrigerator.

[21] KAHWAJI, S, MICHEL, B, JOHNSON. (2018). A comprehensive study of properties of paraffin phase change materials for solar thermal energy storage and thermal management applications. *Energy*.

[22] Kumano, H. (2007). Study on latent heat of fusion of ice in aqueous solutions". *International Journal of Refrigeration*.

[23] Lamberg, P. (2003). Approximate analytical model for solidification in a finite PCM storage with internal fins. *Applied Mathematical Modelling, 27*, pp. 491-513.

[24] Lamiaa Abdallah, T. E.-S. (2013). Reducing Carbon Dioxide Emissions from Electricity Sector Using Smart Electric Grid Applications. *Journal of Engineering*.

[25] MARCHI NETO, I. (2009). Refrigerator COP with thermal storage. *Applied Thermal Engineering, 29*, pp. 2358-2364.

[26] Matej Visek, C. M. (2014). Advanced sequential dual evaporator domestic refrigerator/freezer: System energy. *International Journal of Refrigeration*.

[27] Mehmet Akif Ezan, E. O. (2017). A numerical study on the usage of phase change material (PCM) to prolong compressor off period in a beverage cooler. *Energy Conversion and Management, 142*, pp. 95-106.

[28] Nilesh Purohit, M. S. (2019). Thermal storage material enhanced refrigerated display cabinet. *Materials Today*.

[29] R. Elarem, S. M. (2017). Performance analysis of a household refrigerator integrating a PCM heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*.

[30] Registry, A. f. (2020). Ethylene Glycol and Propylene Glycol Toxicity. ATSDAR.

[31] *RenSMART*. (n.d.). Retrieved from https://www.rensmart.com/Calculators/KWH-to-CO2

[32] Shah, M. M. (2009). An Improved and Extended General Correlation for Heat Transfer During Condensation in Plain Tubes. *HVAC&R RESEARCH, 15*.

[33] Shikalgar Niyaj D, S. S. (2017). Performance Evaluation of a Domestic Refrigerator with a Thermal Storage arrangement Using Propane as a Refrigerant. *Energy Procedia, 109*, pp. 34-39.

[34] Wen-Long Cheng, X.-D. Y. (2013). Numerical analysis of a novel household refrigerator with shape-stabilized PCM (phase change material) heat storage condensers. *Energy, 59*, pp. 265-276.

[35] Xianghai Xing, W. L. (2022). Ternary composite phase change materials (PCMs) towards low phase. *Energy Reports, 8*, pp. 2646-2655.

المراجع باللغة العربية

[36] بسام بدران، أشرف النصار. (2018). *دراسة تجريبية لتحسين كمية الطاقة المخزنة بوجود مواد متغيرة الطور باستخدام الأنابيب الحرارية المريشة*. دمشق.

[37] بسام بدران، عيسى محمود. (2017). *تخزين الطاقة الحرارية (2) أسس التخزين الحراري الكامن*. جامعة دمشق.

[38] بسام بدران، عيسى مراد. (2015-2016). *التطبيقات الترموديناميكية*. دمشق: جامعة دمشق.

[39] عاطف عامر. (2019). استخدام المواد المتغيرة الطور في غرف التبريد. *مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية، 35*.

8- الملحقات

الملحق (A)

نتائج برنامج EES للحالة الأساسية عند درجة حرارة وسط محيط

32 ^{o}C

	cp_i [kJ/kg-K]	h_i [kJ/kg]	P_i [kPa]	$P_{sat,i}$ [kPa]	s_i [kJ/kg-K]	T_i [C]	x_i
1	0.7966	239.8	102.3	102.3	0.9715	-19.55	
2		313.9	1195	1195	1.032	82.3	
3	1.538	117.5	1195		0.4237	46.13	0
4		102	1195		0.3744	35.81	
5		102	102.3		0.4146	-25.87	0.3879
6		234.8	102.3		0.9514	-25.87	1
7		236.2	102.3			-24.05	

الملحق (B)

نتائج برنامج EES للحالة الأساسية عند درجة حرارة وسط محيط

38 ^{o}C

	cp_i [kJ/kg-K]	h_i [kJ/kg]	P_i [kPa]	$P_{sat,i}$ [kPa]	s_i [kJ/kg-K]	T_i [c]	x_i
1	0.7967	239.1	103.1	103.1	0.9681	-20.38	
2		320.3	1394	1394	1.039	90.75	
3	1.585	127	1394		0.4525	52.24	0
4		112.1	1394		0.4059	42.57	
5		112.1	103.1		0.4549	-25.7	0.4334
6		234.9	103.1		0.9512	-25.7	1
7		236.3	103.1			-23.88	

الملحق (C)

نتائج برنامج EES لحالة المواد المتحولة الطور ضمن حجرة المجمدة عند درجة حرارة وسط محيط $32\ ^oC$

	cp_i [kJ/kg-K]	h_i [kJ/kg]	P_i [kPa]	$P_{sat,i}$ [kPa]	s_i [kJ/kg-K]	T_i [c]	x_i
1	0.8038	241.5	113	113	0.9703	-17.04	
2		310.9	1185	1185	1.024	79.31	
3	1.535	117	1185		0.4222	45.8	0
4		95.15	1185		0.3519	31.08	
5		95.15	113		0.384	-23.68	0.3455
6		236.1	113		0.9492	-23.68	1
7		237.6	113			-21.86	

الملحق (D)

نتائج برنامج EES لحالة المواد المتحولة الطور ضمن حجرة المجمدة عند درجة حرارة وسط محيط $38\ ^oC$

	cp_i [kJ/kg-K]	h_i [kJ/kg]	P_i [kPa]	$P_{sat,i}$ [kPa]	s_i [kJ/kg-K]	T_i [c]	x_i
1	0.8129	241.1	129	129	0.9586	-16.84	
2		310.6	1383	1383	1.013	81.82	
3	1.582	126.5	1383		0.4509	51.9	0
4		117.4	1383		0.4228	46.1	
5		117.4	129		0.4688	-20.68	0.435
6		238	129		0.9464	-20.68	1
7		238.2	129			-20.48	

الملحق (E)

نتائج برنامج EES لحالة المواد المتحولة الطور في جزء المكثف

عند درجة حرارة وسط محيط $38\ ^oC$

	cp_i [kJ/kg-K]	h_i [kJ/kg]	P_i [kPa]	$P_{sat,i}$ [kPa]	s_i [kJ/kg-K]	T_i [c]	x_i
1	0.7959	239.2	101.8	101.8	0.9694	-20.34	
2		320.7	1383	1383	1.041	90.99	
3	1.582	126.5	1383		0.4509	51.9	0
4		103.9	1383		0.38	37.11	
5		103.9	101.8		0.4224	-25.98	0.3972
6		234.7	101.8		0.9515	-25.98	1
7		236.2	101.8			-24.16	

الملحق (F)

نتائج برنامج EES لحالة المواد المتحولة الطور في جزأي المبخر والمكثف عند درجة حرارة وسط محيط 38 ^{o}C

	cp_i [kJ/kg-K]	h_i [kJ/kg]	P_i [kPa]	$P_{sat,i}$ [kPa]	s_i [kJ/kg-K]	T_i [c]	x_i
1	0.8159	243.2	133.3	133.3	0.9639	-14.17	
2		309.6	1308	1308	1.014	79.8	
3	1.564	123	1308		0.4405	49.69	0
4		118.2	1308		0.4255	46.58	
5		118.2	133.3		0.4707	-19.91	0.435
6		238.5	133.3		0.9457	-19.91	1
7		240	133.3			-18.09	

الملحق (G)

نتائج برنامج EES لدراسة انتقال الحرارة في المبخر

```
h=Nu*Lamda_air/l
Nu=0.54*Ra^(1/4)
Ra=(g*beta*deltat*l^3)*Pr_air/new^2
A=Q_lat/(h*deltat)
Q_lat=1069*0.35*0.007*0.25*113490/(10*60)

l=0.35*0.25/(0.35+0.35+0.25+0.25)
k[1]=Conductivity(Air,T=T[1])
T[1]=-20
Lamda_air=k[1]

Pr[1]=Prandtl(Air,T=T[1])
Pr_air=Pr[1]
g=9.81
beta=-1/T[1]
deltat=1
mu[1]=Viscosity(Air,T=T[1])
new=mu[1]/rho[1]
rho[1]=Density(Air,T=T[1],P=P[1])
P[1]=100000
raw_air=rho[1]
mio_air=mu[1]
```

$$h = \nu \cdot \frac{Lamda_{air}}{l}$$

$$\nu = 0.54 \cdot Ra^{[1/4]}$$

$$Ra = g \cdot \beta \cdot \delta t \cdot l^3 \cdot \frac{Pr_{air}}{new^2}$$

$$A = \frac{Q_{lat}}{h \cdot \delta t}$$

$$Q_{lat} = 1069 \cdot 0.35 \cdot 0.007 \cdot 0.25 \cdot \frac{113490}{10 \cdot 60}$$

$$l = 0.35 \cdot \left[\frac{0.25}{0.35 + 0.35 + 0.25 + 0.25} \right]$$

$$k_1 = \mathbf{k}\left['Air', T = T_1\right]$$

$$T_1 = -20$$

$$Lamda_{air} = k_1$$

$$Pr_1 = \mathbf{Pr}\left['Air', T = T_1\right]$$

$$Pr_{air} = Pr_1$$

$$g = 9.81$$

$$\beta = \frac{-1}{T_1}$$

$$\delta t = 1$$

$$\mu_1 = \mathbf{Visc}\left['Air', T = T_1\right]$$

$$new = \frac{\mu_1}{\rho_1}$$

$$\rho_1 = \rho\left[\text{'Air'}, T = T_1, P = P_1\right]$$

$$P_1 = 100000$$

$$raw_{air} = \rho_1$$

$$mio_{air} = \mu_1$$

A=0.68 Ra=1.006.1000000 Nu=17.09 h=5.182

Arrays Table: Main

	k_i	T_i	P_i	Pr_i	μ_i	ρ_i
1	0.02211	-20	100000	0.7394	0.0000163	1.376

الملحق (H)

نتائج برنامج EES لدراسة انتقال الحرارة في المكثف

```
U=1/((1/h_in)+(delta_pcm/lamda_pcm)+(ln(d_out/d_in)/(2*pi*lamda_pipe)))
h_in=10*1.32*(Re^(-1/3))*(raw_l*(raw_l-raw_g)*g*k^3/mio^2)^(1/3)
Re=v*d_in/new

delta_pcm=0.009
lamda_pcm=0.44
d_out=4.76/1000
d_in=d_out-2*0.0001
lamda_pipe=401

v=Q/A
Q=0.1/raw_l
A=pi*d_in^2/4
raw_l=rho[1]
rho[1]=Density(R134a,T=T[1],x=x[1])
T[1]=46.1
x[1]=0

raw_g=rho[2]
rho[2]=Density(R134a,T=T[2],x=x[2])
T[2]=T[1]
x[2]=1
g=9.81
k[3]=Conductivity(R134a,T=T[3],x=x[3])
T[3]=T[1]
x[3]=1
k=k[3]
mu[4]=Viscosity(R134a,T=T[4],x=x[4])
x[4]=x[3]
mu[4]=mio
T[4]=T[1]
new=mio/raw_l

Q_lat=U*Area*tt
Q_lat=raw_pcm*V_pcm*L_pcm/(10*60)
tt=8.6
raw_pcm=830
V_pcm=0.009*0.95*0.46
L_pcm=2460*5
```

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{in}} + \frac{\delta_{pcm}}{lamda_{pcm}} + \frac{\ln\left[\frac{d_{out}}{d_{in}}\right]}{2 \cdot \pi \cdot lamda_{pipe}}}$$

$$h_{in} = 10 \cdot 1.32 \cdot Re^{\left[\frac{-1}{3}\right]} \cdot \left[raw_l \cdot (raw_l - raw_g) \cdot g \cdot \frac{k^3}{mio^2}\right]^{[1/3]}$$

$$Re = v \cdot \frac{d_{in}}{new}$$

$$\delta_{pcm} = 0.009$$

$$lamda_{pcm} = 0.44$$

$$d_{out} = \frac{4.76}{1000}$$

$$d_{in} = d_{out} - 2 \cdot 0.0001$$

$$lamda_{pipe} = 401$$

$$v = \frac{Q}{A}$$

$$Q = \frac{0.1}{raw_l}$$

$$A = \pi \cdot \frac{d_{in}^{\ 2}}{4}$$

$$raw_l = \rho_1$$

$$\rho_1 = \rho\left['R134a', T = T_1, x = x_1\right]$$

$$T_1 = 46.1$$

$$x_1 = 0$$

$$raw_g = \rho_2$$

$$\rho_2 = \rho\left['R134a', T = T_2, x = x_2\right]$$

$$T_2 = T_1$$

$$x_2 = 1$$

$$g = 9.81$$

$$k_3 = \mathbf{k}\left['R134a', T = T_3, x = x_3\right]$$

$$T_3 = T_1$$

$$x_3 = 1$$

$$k = k_3$$

$$\mu_4 = \mathbf{Visc}\left['R134a', T = T_4, x = x_4\right]$$

$$x_4 = x_3$$

$$\mu_4 = mio$$

$$T_4 = T_1$$

$$new = \frac{mio}{raw_l}$$

$$Q_{lat} = U \cdot Area \cdot tt$$

$$Q_{lat} = raw_{pcm} \cdot V_{pcm} \cdot \frac{L_{pcm}}{10 \cdot 60}$$

$$tt = 8.6$$

$$raw_{pcm} = 830$$

$$V_{pcm} = 0.009 \cdot 0.95 \cdot 0.46$$

$$L_{pcm} = 2460 \cdot 5$$

A1=0.1132 A2=0.1704 Ra=3.876.1000000000 Nu=157 U=45.66 h=703

Arrays Table: Main

	k_i	μ_i	ρ_i	T_i	x_i
1			1120	46.1	0
2			59.46	46.1	1
3	0.01676			46.1	1
4		0.00001301		46.1	1

الملحق (I)

تحليل الإكسرجي

Exergy

T_eva=-19.91
T_con=49.69
P_sat[1]=P_sat(R134a,T=T_eva)
P_sat[2]=P_sat(R134a,T=T_con)

P[1]=P_sat[1]
P[2]=P_sat[2]
P[3]=P_sat[2]
P[4]=P_sat[2]
P[5]=P_sat[1]
P[6]=P_sat[1]

x[3]=0
x[6]=1

h[1]=Enthalpy(R134a,P=P[1],T=T[1])

eta_comp=0.874-0.0135*(P[2]/P[1])
eta_comp=(Enthalpy(R134a,P=P[2],s=s[1])-h[1])/(h[2]-h[1])

h[3]=Enthalpy(R134a,P=P[3],x=x[3])

P[7]=P_sat[1]
T[7]=T[6]+1.82
h[7]=Enthalpy(R134a,P=P[7],T=T[7])
T[1]=T[7]+3.92

cp[3]=Cp(R134a,P=P[3],x=x[3])
cp[1]=Cp(R134a,T=T[1],P=P[1])
0.5055*cp[3]*(h[3]-h[4])=cp[1]*(h[1]-h[6])
h[5]=h[4]

h[6]=Enthalpy(R134a,P=P[6],x=x[6])

COP=q_e/w_c
q_e=h[7]-h[4]
w_c=h[2]-h[1]
q_c=h[2]-h[3]

s[1]=Entropy(R134a,P=P[1],T=T[1])
s[2]=Entropy(R134a,P=P[2],h=h[2])
s[3]=Entropy(R134a,P=P[3],x=x[3])
s[4]=Entropy(R134a,P=P[4],h=h[4])
s[5]=Entropy(R134a,P=P[5],h=h[5])
s[6]=Entropy(R134a,P=P[6],x=x[6])

T[2]=Temperature(R134a,P=P[2],h=h[2])
T[3]=Temperature(R134a,P=P[3],x=x[3])
T[4]=Temperature(R134a,P=P[4],h=h[4])
T[5]=Temperature(R134a,P=P[5],h=h[5])
T[6]=Temperature(R134a,P=P[6],h=h[6])

x[5]=Quality(R134a,P=P[5],h=h[5])

T_0=25+273.15
T_0e=25+273.15
T_0c=25+273.15
Ex_dcomp=T_0*(s[1]-s[2])
Ex_dcon=(h[2]-h[3])-T_0c*(s[2]-s[3])-q_c*(1-(T_0c/(T_con+273.15)))
Ex_dhx=(h[3]-h[4])-T_0*(s[3]-s[4])+(h[7]-h[1])-T_0*(s[7]-s[1])
Ex_dEX.V=T_0*(s[5]-s[3])
Ex_deva=(h[5]-h[7])-T_0e*(s[5]-s[7])+q_e*(1-(T_0e/(T_eva+273.15)))

Ex_des=Ex_dcomp+Ex_dcon+Ex_dhx+Ex_dEX.V+Ex_deva
eta_ex=1-(Ex_des/w_c)

W_comp=138
m=W_comp/w_c

SOLUTION

Unit Settings: SI C kPa kJ mass deg

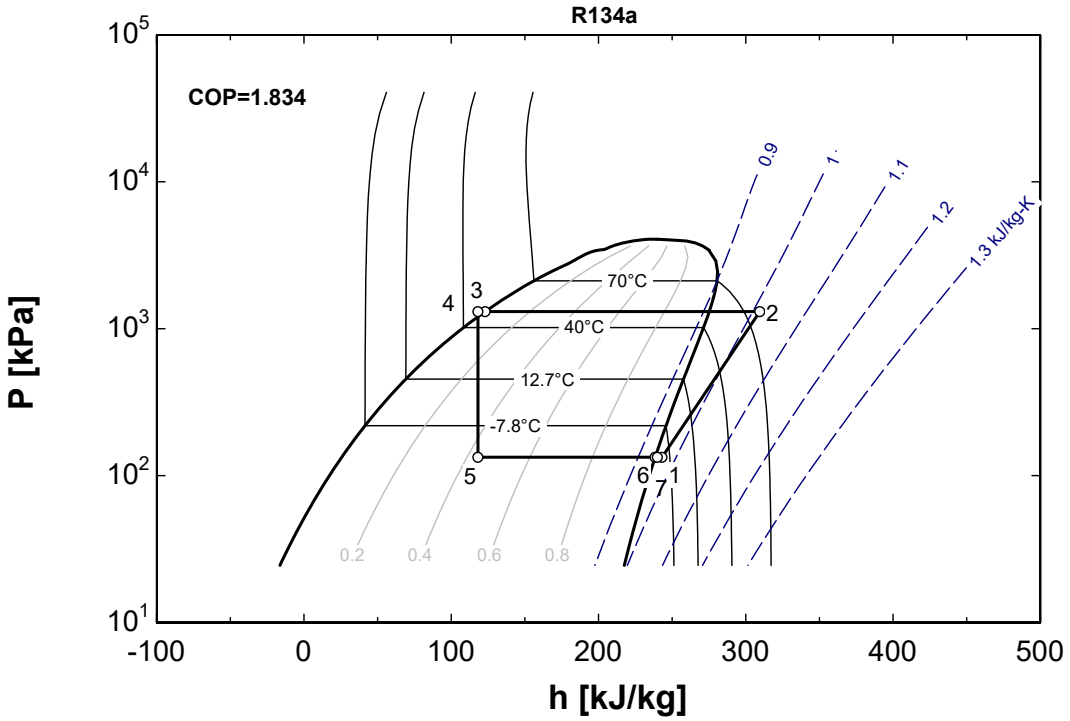
COP = 1.834
η_{ex} = 0.5393
[Ex_{dcon} = 1.075 [kJ/kg-K
[Ex_{deva} = 0.328 [kJ/kg-K
[Ex_{dhx} = 0.485 [kJ/kg-K
[q_c = 186.5 [kJ/kg
T_0 = 298.2
T_{0e} = 298.2
T_{eva} = -19.91
W_{comp} = 138

η_{comp} = 0.7415 [kJ/kg]
Ex_{dcomp} = 14.71 [kJ/kg-K]
Ex_{des} = 30.698 [kJ/kg-K]
$Ex_{dEX.V}$ = 14.1 [kJ/kg-K] m
[= 2.078 [kg/kJ
[q_e = 121.8 [kJ/kg
T_{0c} = 298.2
T_{con} = 49.69
[w_c = 66.39 [kJ/kg

4 potential unit problems were detected.
EES suggested units (shown in purple) for cp[1] cp[3] eta_comp Ex_dcomp Ex_dcon Ex_des .

Arrays Table: Main

	cp_i [kJ/kg-K]	h_i [kJ/kg]	P_i [kPa]	$P_{sat,i}$ [kPa]	s_i [kJ/kg-K]	T_i [c]	x_i
1	0.8159	243.2	133.3	133.3	0.9639	-14.17	
2		309.6	1308	1308	1.014	79.8	
3	1.564	123	1308		0.4405	49.69	0
4		118.2	1308		0.4255	46.58	
5		118.2	133.3		0.4707	-19.91	0.435
6		238.5	133.3		0.9457	-19.91	1
7		240	133.3			-18.09	



الملحق (J)

الأبحاث المنشورة

الورقة الأولى

تحديد سماكة المادة المتحولة الطور الممكن استخدامها خلف المكثفات في البرادات المنزلية

م. عبد الهادي مسالخي* **أ.د.م. وجيه ناعمة****

مجلة جامعة البعث **سلمت بتاريخ 09/09/2021**

الملخص:

في الوقت الحاضر، أصبحت كفاءة استخدام الطاقة المعيار الحاسم للمستهلك عند استبدال الأجهزة المستهلكة للطاقة. إن المواد المتحولة الطور (PCMs) هي المواد التي تقوم بتخزين الطاقة الحرارية بشكلها الكامن بين الحالتين السائلة والصلبة عند مجال تغير درجات حرارة صغير. من خلال استغلال هذه الميزة للمواد المتحولة الطور (PCMs)، فإن استخدامها في المبردات المنزلية يزيد من كفاءة استخدام الطاقة وبالتالي يزيد من مستوى التصنيف الطاقي للبرادات. تم في هذه المقالة تحديد نوع وسماكة مادة التحول الطوري الممكن وضعها خلف المكثفات في البرادات المنزلية لزيادة معامل الأداء وتوفير استهلاك الطاقة الكهربائية عند شروط درجة حرارة الغرفة 33 °C وتعبئة حجرة التجميد وحجرة المواد الطازجة 4 Litter، 12 Litter من الماء على الترتيب. في الحالة المستقرة يعمل الضاغط لمدة 10 min ويتوقف عن العمل لمدة 15 min. تم إجراء المحاكة الحاسوبية لأبعة أنواع من البارافينات المختلفة. تم اعتبار البارافين Docosane بسماكة 4.2–4.8 mm هو الأفضل من حيث الأداء الحراري عند شروط المسألة المفروضة.

الكلمات المفتاحية: البراد المنزلي، البارافينات، التحول الطوري (صلب–سائل)، عملية التكاثف، حفظ الطاقة.

---

* طالب دكتوراه في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة دمشق

** أستاذ في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة دمشق

Al Baath University
Journal of Al Baath University

جامعة البعث
مجلة جامعة البعث

قبول نشر بحث
طالب دراسات عليا

الرقم: ٢٠١٢
التاريخ ٢١ /١١/ 2021

طالب الدراسات العليا: عبد الهادي مسالخي الدكتور المشرف: وجيه ناعمة

كلية: الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة: دمشق

نود إعلامكم بقبول بحثكم الموسوم:

تحديد سماكة المادة المتحولة الطور الممكن استخدامها خلف المكثفات في البرادات المنزلية

للنشر في مجلة جامعة البعث بالمجلد **43** لعام **2021**

بعد أن تم تحكيمه من قبل مختصين.

نشكر لكم هذه المساهمة الطيبة ونتطلع إلى استمرار تواصلكم مع مجلتنا ومدها بما لديكم من جديد والاطلاع على الأبحاث المنشورة في المجلة على موقع المجلة والرابط المدونين في أسفل الصفحة.

موقع الجامعة www.albaath-univ.edu.sy والرابط magazine @ albaath-univ.edu.sy

رئيس تحرير مجلة جامعة البعث للعلوم الطبية والهندسية والأساسية والتطبيقية

أ.د. درغام سلوم

21-11-2021

الورقة الثانية

تأثير تضمين المواد المتحولة الطور في حجرة مجمدة منزلية

Effect of Including Phase Change Material Materials in Domestic Freezer

م. عبد الهادي مسالخي[i]

أ.د.م. وجيه ناعمة[ii]

سلمت بتاريخ 19/07/2022

الملخص

في الوقت الحاضر، أصبحت كفاءة استخدام الطاقة المعيار الحاسم للمستهلك عند استبدال الأجهزة المستهلكة للطاقة. إن المواد المتحولة الطور (PCMs) هي المواد التي تقوم بتخزين الطاقة الحرارية بشكلها الكامن بين الحالتين السائلة والصلبة عند مجال تغير درجات حرارة صغير. من خلال استغلال هذه الميزة للمواد المتحولة الطور (PCMs)، فإن استخدامها في المبردات المنزلية يزيد من كفاءة استخدام الطاقة وبالتالي يزيد من مستوى التصنيف الطاقي للبرادات. تم في هذه الورقة تحديد نوع وسماكة مادة التحول الطوري الممكن تضمينها في المجمدات المنزلية ومدى تأثيرها على مؤشرات الأداء لدارة التبريد من معامل الأداء (COP) ومردود قانون الترموديناميك الثاني وكذلك درجة حرارة التبخر والإكسرجي الضائع في كل جزء من أجزاء دارة التبريد. وُجد بعد تضمين المادة المتحولة الطور أن درجة حرارة التبخر ارتفعت بمقدار 8.5% مما أدى إلى زيادة معامل الأداء بنسبة 8.7% وانخفاض الإكسرجي الضائع بنسبة 9.9% وكذلك انخفاض الطاقة الكهربائية المستهلكة بنسبة 8.1%. كما أن زمن التشغيل لدورة عمل الضاغط المستقرة ازداد 33% وازداد معه زمن توقف الضاغط عن العمل بنسبة 70%.

الكلمات المفتاحية: المجمدة المنزلية، المواد المتحولة الطور (PCM)، غليكول إيثيلين (GE) ، التحول الطوري (صلب–سائل)، درجة حرارة التبخر، مخطط انتالبي–ضغط لدارة التبريد، معامل أداء دارة التبريد، الإكسرجي، الاستطاعة الكهربائية المستهلكة، مردود قانون الترموديناميك الثاني.

---

i طالب دكتوراه في كلية الهندسة الميكانيكية– جامعة دمشق.

ii أستاذ في كلية الهندسة الميكانيكية– جامعة دمشق.

Syrian Arab Republic
Damascus University
Damascus University Journal

الجمهورية العربية السورية
جامعة دمشق
مديرية مجلات جامعة دمشق

موافقة نشر
research approval

Damascus 05/10/2022

No. 5460

Dear

Eng. Abdulhadi Masalkhi

Prof. Wajih Naimeh

We are pleased to inform you that your research entitled:

«Effect of Including Phase Change Material Materials in Domestic Freezer»

Sent to us on 19/07/2022
has been accepted by
Damascus University Journal for The Engineering Sciences

On 05/10/2022

Best regards

Editor in chief Journal for The Engineering Sciences

Prof. Natalia Atfeh

Director of journal

Prof. Ahed Abou younes

ISSN 1999-7302

دمشق 2022/10/05

رقم البحث: 5460

السادة

م. عبد الهادي مسالخي

أ. د. م. وجيه ناعمة

يسرنا إعلامكم أن بحثكم المعنون:

«تأثير تضمين المواد المتحولة الطور في حجرة مجمدة منزلية»

المرسل إلينا بتاريخ 2022/07/19

قد قبل للنشر في

مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية

بتاريخ 2022/10/05

مع فائق الاحترام

رئيس التحرير مجلة العلوم الهندسية

أ. د. نتالي عطفة

مدير المجلات

أ. د. عهد أبو يونس

ISSN 2789-6854 (online)

الورقة الثالثة

تحديد بارامترات المادة المتحولة الطور الممكن استخدامها في جزء المكثف في المجمدات المنزلية

Determination of the Parameters of a Phase Change Material That Can be Used in The Condenser Sector of Domestic Freezers

م. عبد الهادي مسالخي[i]

أ.د.م. وجيه ناعمة[ii]

سلمت بتاريخ 19/07/2022

الملخص

يعد تخزين الطاقة الحرارية (TES) في الوقت الحاضر أحد الحلول الأكثر جدوى في مواجهة التحدي المتمثل في تحقيق توفير الطاقة. قام العديد من الباحثين بالتحقيق في كفاءة الطاقة لوحدات التبريد المختلفة من خلال تطبيق أنظمة تخزين الطاقة الحرارية (TES) باستخدام المواد المتغيرة الطور (PCM). تم في هذه المقالة تحديد نوع وسماكة مادة التحول الطوري الممكن استخدامها في المجمدات المنزلية لزيادة معامل الأداء وتوفير استهلاك الطاقة الكهربائية عند شروط درجة حرارة الغرفة 32 °C. في الحالة المستقرة يعمل الضاغط لمدة 15 min ويتوقف عن العمل لمدة 10 min. تم إجراء المحاكة الحاسوبية لنوعين من البارافينات المختلفة. تم اعتبار البارافين Eicosane بسماكة 9 mm هو الأفضل من حيث الأداء الحراري عند شروط المسألة المفروضة. تمت دراسة حالة تغير الشروط الخارجية وعدم حدوث تحول طوري وتبين أنه في حال عدم حدوث تحول طوري فإن الطاقة الحرارية المطروحة من المكثف لحالة تضمين المواد المتحولة الطور ستبقى أكبر منها للحالة الأساسية نظراً لتمتع المواد المتحولة الطور بسعة حرارية أكبر من الهواء.

الكلمات المفتاحية: المجمدة المنزلية، المواد المتحولة الطور (PCM)، شمع البارافين، التحول الطوري (صلب–سائل)، ، درجة حرارة الانصهار، سماكة مادة التحول الطوري.

---

i طالب دكتوراه في كلية الهندسة الميكانيكية– جامعة دمشق.

ii أستاذ في كلية الهندسة الميكانيكية– جامعة دمشق.

Syrian Arab Republic
Damascus University
Damascus University Journal

الجمهورية العربية السورية
جامعة دمشق
مديرية مجلات جامعة دمشق

موافقة نشر
research approval

Damascus 05/10/2022

No. 5462

Dear

Eng. Abdulhadi Masalkhi

Prof. Wajih Naimeh

We are pleased to inform you that your research entitled:

«Determination of the Parameters of a Phase Change Material That Can be Used in The Condenser Sector of Domestic Freezers»

Sent to us on 19/07/2022
has been accepted by
Damascus University Journal for The Engineering Sciences

On 05/10/2022

Best regards

Editor in chief Journal
for The Engineering Sciences

Prof. Natalia Atfeh

Director of journal

Prof. Abed Abou younes

ISSN 1999-7302

دمشق 2022/10/05

رقم البحث: 5462

السادة

م. عبد الهادي مسالخي

أ. د. م. وجيه ناعمة

يسرنا إعلامكم أن بحثكم المعنون:

«تحديد بارامترات المادة المتحولة الطور الممكن استخدامها في جزء المكثف في المجمدات المنزلية»

المرسل إلينا بتاريخ 2022/07/19

قد قبل للنشر في

مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية

بتاريخ 2022/10/05

مع فائق الاحترام

رئيس التحرير مجلة العلوم الهندسية

أ. د. ناتاليا عطفة

مدير المجلات

أ. د. عهد أبو يونس

ISSN 2789-6854 (online)

الملحق (K)

توثيق التجارب والنتائج

الحافظ

إلى من يهمه الأمر

إن الطالب المهندس عبد الهادي مسالخي قد أجرى لدينا في مخابر شركة الحافظ في مدينة دمشق التجارب الخاصة باستكمال أعمال الدكتوراه في جامعة دمشق – اختصاص هندسة التبريد على مجمدة منزلية من طراز VF0611 سعة 132 Liter. أُجريت التجارب عند درجتي حرارة وسط محيط 32 °C و 38 °C ودرجة حرارة نقطة ضبط لحجرة المجمدة مساوية 18- °C. ضمّن المهندس عبد الهادي مسالخي المواد المتحولة الطور تارة في حجرة المجمدة وتارة في جزء المكثف وتارة ضمن حجرة المجمدة والمكثف معاً، واستخدم محلول غليكول إيثيلين كمادة متحولة الطور في حجرة المجمدة وشمع البارافين كمادة متحولة الطور في جزء مكثف المجمدة المنزلية. وسيط التبريد R134a والمبخر من نوع Roll and Band والمكثف من نوع Wire and Tube. واستمر بالتجارب وأخذ التجارب والقياسات اللازمة من الشهر الرابع 2018 وحتى الشهر السادس من عام 2022 بشكل متقطع وتم تضمين النتائج المخبرية في أطروحة الدكتوراه الخاصة به والتي يقوم بها في جامعة دمشق – كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية وإجراء الدراسة الطاقية اللازمة.

مدير إدارة الجودة وتطوير المنتجات
م. عبد العال الدلول

Abstract

In this thesis, the effect of including phase-transforming materials in the evaporator and condenser parts on the performance indicators of a domestic freezer is studied (evaporation temperature, condensing temperature, coefficient of performance, operating time ratio, electrical consumption, exergy, and the second law efficiency).

An experimental procedure is initially undertaken at 32 ^{o}C, 38 ^{o}C surrounding temperature to determine Evaporative Temperature, Condensing Temperature, Compressor Working Time and Compressor off time. By using analytical solutions and computer simulations, the optimum parameters of the phase change material are determined, whether it is in the evaporator part or the condenser part. Then, the experiments are produced again using the phase transformed materials and the improvement in the performance indicators of the domestic freezer is evaluated.

It is found that the use of PCMs in the evaporator and condenser parts increases the cofficient of performance factor by 19.78% and reduces the operating time and electrical energy consumption by 13.27%, 15.39%, and also reduces the total destroyed exergy by 29%.

The worst case is studied for the change of the ambient and design conditions on the condensing temperature between baseline case and including PCM in condenser part, this case is mean that no cahanging in phase will be occurred. A decrease in the condensing temperature was observed by 1.6% for the new case from the baseline one.

Keywords: Domestic Freezer, Phase Change Material (PCM), Cold Latent Thermal Storage, Hot Latent Thermal Storage, Solidification, Melting, Paraffin Wax, Glycol Ethylene Solution, Performance Indicators,

Syrian Arab Republic
Damascus University
Faculty of Mechanical and Electrical Engineering
Department of General Mechanical

A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Ph.D. in Refrigeration Engineering

Increasing the Efficiency of Refrigeration Cycles Using Phase Change Materials at the Condenser and Evaporator Sections

by

Eng. Abdulhadi Marwan Masalkhi

Supervisor

Prof. Dr.Eng. Wajih Mohammad Khier Naimeh

2022