

تأثير تضمين المواد المتحولة الطور في حجرة مجمدة منزلية

عبد الهادي مسالخي¹، أ.د.م. وجيه ناعمة²

1طالب دكتوراه في كلية الهندسة الميكانيكية- جامعة دمشق.

2أستاذ في كلية الهندسة الميكانيكية- جامعة دمشق.

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 والمجمدات المنزلية يزيد من كفاءة استخدام الطاقة وبالتالي يزيد من مستوى التصنيف الطاقوي 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 18.3% مما أدى إلى زيادة معامل الأداء بنسبة 13.4% 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 (PCMs)، 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.

تاريخ الإيداع: 2022/7/19

تاريخ القبول: 2022/10/5



حقوق النشر: جامعة دمشق - سورية، يحتفظ

المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص

CC BY-NC-SA 04

Effect of Including Phase Change Material Materials in Domestic Freezer

Abdulahdi Masalkhi¹, Prof. Wajih Naimeh²

¹PhD student at the Faculty of Mechanical Engineering - Damascus University.

²Professor at the Faculty of Mechanical Engineering - Damascus University.

Abstract

Nowadays, energy efficiency has become the crucial criterion for the consumer when replacing energy consuming devices. The phase change Materials (PCMs) store the thermal energy in its latent form between the liquid and solid states at a small temperature change range. For this reason, it can be used in household refrigerator and freezer for increasing energy efficiency and a level of energy classification of refrigerators. In this paper, the type and thickness of the phase change material that can be included in domestic freezers and its impact on the performance indicators of the refrigeration cycle were determined, coefficient of performance and the second law in thermodynamic, as well as the evaporation temperature and destructive exergy in each part of the refrigeration cycle. Evaporation temperature will be increased by 18.3% when including the phase change material (PCM), which lead to increase in the coefficient of performance by 13.4% and decrease in destroyed exergy by 9.9%, as well as a decrease in power consumption by 8.1%. The operating time will be increased by 33% and the compressor off time increased by 70% as well.

Received: 19/7/2022

Accepted: 5/10/2022



Copyright: Damascus University- Syria, The authors retain the copyright under a CC BY- NC-SA

Keywords: Domestic Freezer, Phase Change Materials (PCMs), Glycol Ethylene, Solid-Liquid Phase Transition, Enthalpy-Pressure Diagram, Coefficient of Performance (COP), Exergy, Power Consumption, Second Law Efficiency.

1. المقدمة

بحسب منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية OECD فإن أكبر استهلاك للطاقة الكهربائية في المنازل تصرف للتبريد والتجميد. في السنوات الأخيرة، بُذلت 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 [1], [2]:

1. زيادة كفاءة العزل الحراري في غلاف

المجمدة والباب

إن استخدام ألواح البولي يوريثان بدلاً من البوليسترين والذي كان شائع الاستخدام حتى ثمانينيات القرن الماضي يخفض قيمة الحمل التبريدي حتى 30%.

2. 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 التكاثر وترتفع درجة حرارة التبخر، مما يؤدي إلى تخفيض استهلاك الطاقة الكهربائية بحدود 30%. ومع ذلك فإنه تقنية الضواغط المتغيرة السرعة لا تستخدم بشكل كبير في المنازل بسبب ارتفاع كلفتها.

3. تحسين عملية انتقال الحرارة في المكثفات

والمبخرات

إن الكفاءة العظمى في عملية التبريد يمكن الحصول عليها بتصغير الفرق بين درجة حرارة التكاثر ودرجة حرارة التبخر. إن 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% يخفض من استهلاك الطاقة الكهربائية بمقدار 6%، 10% على الترتيب. خيار آخر لتحسين عملية انتقال الحرارة في المبادلات وهو التهوية القسرية لتحسين عملية انتقال الحرارة بالحمل. ومع ذلك، يجب أن تؤخذ الاستطاعة الكهربائية للمروحة بعين الاعتبار عند حساب نسبة كفاءة الطاقة للبراد.

للمواد المتحولة الطور إمكانية كبيرة في تحسين معامل الأداء للبرادات والمجمدات المنزلية بنسبة تصل إلى 47% [3] وذلك عن طريق تزويد حجرة المجمدة بالمواد المتحولة الطور PCMs.

إن المواد المتحولة الطور PCMs قادرة على تخزين وتحرير كميات كبيرة من الطاقة الحرارية عن طريق تغير حالتها من السائلة إلى الصلبة وبالعكس. أثناء عمل الضاغط، ستقوم المواد المتحولة الطور PCMs باختزان الطاقة الباردة عن طريق تحولها الطوري (سائل - صلب)، أما أثناء توقف الضاغط عن العمل، ستقوم المواد المتحولة الطور PCMs بتحرير الطاقة الباردة (تحول طوري صلب - سائل) والحفاظ على درجة الحرارة منتظمة داخل حجرة المجمدة لفترة أطول مقارنة بحالة عدم وجود هذه المواد [4].

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 حيز المبخر أكثر فاعلية وأقل استهلاكاً للطاقة منه في حيز المكثف [5].

هذه التقنية ليس فقط تطيل زمن توقف الضاغط عن العمل وإنما أيضاً تطيل زمن عمله، لأن المواد المتحولة الطور (PCMs) تعتبر حملاً حرارياً إضافياً على النظام. ولكن بالمقارنة بين الزمنين، تكون الزيادة في زمن توقف الضاغط عن العمل أعلى منها عند عمل الضاغط مما يعني تخفيضاً في استهلاك النظام من الطاقة [6].

الطريقة المستخدمة في البحث	سنة البحث	اسم الباحث	PCM
التحليلية	2005	K. Azzouz	Eutectic Salt Solutions
العددية	2015	B. Gin	Aqueous Ammonium Chloride Solution
التحليلية	2018	S. Bista	n-Tetradecane
التجريبية	2011	Wen-Long	Eutectic Solutions -1 (90% H2O + 10% NaCl), (%wt.)
التجريبية	2017	D. Shikalga	Ethylene Glycol

2. الإجراء التجريبي للحالة الأساسية

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

- AHAM HRF-01
- AS/NZS 4474.1
- KS C9305
- IEC 62552:2007
- IEC 62552:2015

كما حدد كل مرجع البارامترات التالية عند إجراء

الاختبار وهي:

- درجة الحرارة الجافة المحيطة.

يبين الجدول (1) ملخصاً للدراسات المرجعية المتاحة التي عملت على دراسة تضمين حجرة البراد أو المجمدة المنزلية بالمواد المتحولة الطور. لم يتم بيان طريقة تحديد السماكة المثلى أو درجة حرارة الانصهار اللازمة لمادة التحول الطوري في جميع الدراسات المرجعية الواردة والمتاحة.

لذلك تم في هذا البحث:

1. تحديد قيم درجات الحرارة داخل حجرة المجمدة وزمن عمل الضاغط وتوقفه خلال دورة عمل مستقرة له بشكل تجريبي في مختبرات شركة الحافظ للصناعات الميكانيكية في مدينة دمشق.

2. تحديد المواصفات الفيزيوية-حرارية ودرجة حرارة وكذلك سماكة مادة التحول الطوري الممكن استخدامها ضمن مستويات حجرة المجمدة اعتماداً على الإجراء التجريبي السابق.

3. بيان تأثير تضمين المواد المتحولة الطور ضمن حجرة مجمدة منزلية على زمن توقف وتشغيل الضاغط، درجة حرارة التبخر، معامل أداء دارة التبريد، الاكسرجي الضائع وكذلك مردود قانون الترموديناميك الثاني.

الجدول (1) ملخص الدراسات المرجعية

رقم المرجع	التوفير في الطاقة	التهلاك
[6]	12 %	
[7]	8 %	
[8]	8 %	
[9]	6 %	
[10]	17 %	
T_m (°C)		
	-6 °C	
	-15.4 °C	
	5.5 °C	
	-5 °C	
	-5 °C	

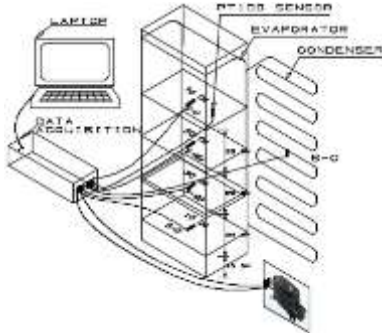
(1,C)،(1,d) صور المجمدة وأماكن توضع حساسات درجة الحرارة ومخطط دارة التبريد، كما يوضح الشكل (2) تغيرات درجات الوسط المحيط مع الزمن ودرجة حرارة وسط المكثف (درجة حرارة التكاثف بإهمال المقاومة الحرارية للأنبوب النحاسي للمكثف). الشكل (3) يوضح درجة حرارة وسط المبخر (درجة حرارة التبخر بإهمال المقاومة الحرارية للأنبوب النحاسي للمبخر) ودرجات الحرارة ضمن حجرة المجمدة خلال دورتي عمل مستقرتين للضاغط. يتبين من الشكلين السابقين أن الضاغط يعمل لمدة 15 min ليتوقف بعدها مدة 10 min. كما يبين الشكل (4) متوسط درجات حرارة المستويات الأربعة ضمن حجرة المجمدة.



الشكل (1,a) صورة المجمدة



الشكل (1,b) توضع عبوات التجريب



الشكل (1,c) توضع حساسات درجة الحرارة

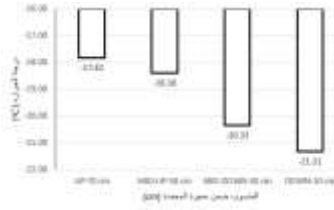
- الرطوبة النسبية المحيطة.
- درجة حرارة الضبط لكل من حجرتي المواد الطازجة والمجمدة.
- عدد مرات فتح وإغلاق الباب.
- نسبة التحميل.
- زمن التجربة.

تم الاعتماد على AHAM HRF-01 في عملية الاختبار والذي يبين شروطه الجدول [2]

الجدول (2) بارامترات وشروط الاختبار بحسب AHAM HRF-01

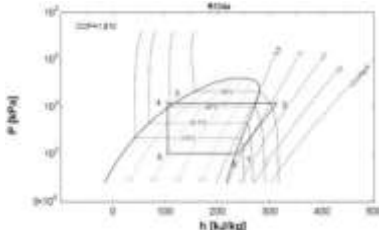
32 (°C)	درجة الحرارة الجافة المحيطة
-	الرطوبة النسبية المحيطة
-18 (°C)	درجة حرارة الضبط لحجرة المجمدة
-	عدد مرات فتح وإغلاق الباب
75%	نسبة التحميل
24 ساعة	زمن التجربة

تم إجراء الاختبار اللازم على مجمدة منزلية 132 Litter من طراز VF0611 في مختبرات شركة الحافظ في مدينة دمشق والموضحة مواصفاتها في الجدول (3) عند درجة حرارة وسط محيط 32 °C. حيث تم الحفاظ على درجة حرارة الوسط المحيط عن طريق مكيفين جداريين وسخانات كهربائية 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. حساسات درجة الحرارة من النوع PT100 وتمت معايرتها قبل البدء بالتجربة ووصلها مع وسيلة الحصول على البيانات (Data Acquisition). تستشعر الحساسات لدرجات حرارة وسط المبخر ووسط المكثف والمناسيب الأربعة داخل حجرة المجمدة، درجتى حرارة قبل وبعد الضاغط وكذلك درجة حرارة الوسط المحيط. درجة حرارة نقطة الضبط لحجرة المجمدة 18 °C - ويتوضع حساس متحكم درجة حرارة حجرة المجمدة في الجزء العلوي منه. تم وصل المجمدة بقباس الكهرباء واستمر بالعمل لمدة 24 ساعة متواصلة. توضح الأشكال (1,a)، (1,b)،



الشكل (4) متوسط درجات الحرارة في كل منسوب من المناسيب الأربعة لحجرة المجمدة

من الشكل (4) نلاحظ أن درجات الحرارة تكون متفاوتة ضمن حجرة المجمدة بمقدار 3.49°C أي بنسبة 19.58% مما يعني ضرورة اعتماد مواد متحولة الطور لها درجات حرارة تحول طوري مختلفة في كل منسوب لكسب القدر الأكبر من عملية التحول الطوري. يبين الشكل (5) مخطط p-h (انتالي-ضغط) لدارة التبريد للحالة الأساسية (بدون مواد تحول طوري ضمن حجرة المجمدة) حيث كان معامل الأداء COP مساوياً لقيمة 1.81 بافتراض أن الإجراءات في المبخر والمكثف والمبادل الحراري الاسترجاعي إيزوثيرمية وعملية الخنق تتم في الأنوية الشعرية بثبوت الإنتالبي وعملية الانضغاط أديباتية حقيقية بحسب درجات الحرارة المقاسة قبل وبعد الضاغط.



الشكل (5) مخطط h-p لدارة التبريد للحالة الأساسية

في هذا البحث، تم اختيار مركب غليكول إيثيلين كمادة التحول الطوري بتركيز مختلفة وبالتالي درجات حرارة تحول طوري مختلفة تتناسب مع درجات الحرارة ضمن المناسيب الأربعة لحجرة المجمدة وبحرارة تحول طوري متغيرة بحسب التركيز الوزني لمحلول غليكول إيثيلين وفق المعادلة [11]:

$$Q_m = 113,900 - 1,414\theta + 2.86\theta^2 \quad (1)$$

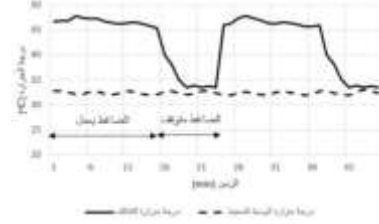
حيث θ هو نسبة التركيز الكتلي.

تم اعتماد تراكيز مركب غليكول-إيثيلين والموصفات الفيزيو-حرارية عند درجات حرارة التحول الطوري المطلوبة من المراجع [11], [12] كما هو موضح في الجدول [4].

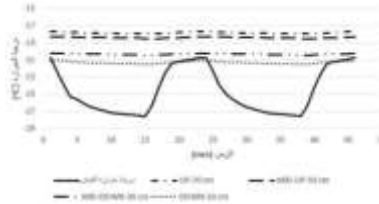


الشكل (1,d) مخطط دارة التبريد
الجدول (3) مواصفات المجمدة المستخدمة في التجربة

طراز المجمدة	VF0611
السعة	132 Litter
الارتفاع	125 cm
العرض	50 cm
العمق	64 cm
الضاغط	مكبيسي
الفريون	134a
التغذية	220 volt/ 50 Hz
المبخر	Roll and Band
المكثف	Wire and Tube



الشكل (2) تغيرات درجة حرارة الوسط المحيط ودرجة حرارة التكاثر مع الزمن



الشكل (3) يوضح درجة حرارة وسط المبخر ودرجات الحرارة ضمن حجرة المجمدة مع الزمن

خلال فترة عمل الضاغط ترتفع درجة حرارة التكاثر إلى 46.1°C أي أعلى من درجة حرارة الوسط المحيط بمقدار 14.1°C لتتخفف درجة حرارة المكثف وتقترب من درجة حرارة الوسط المحيط عند توقف الضاغط عن العمل كما يظهر الشكل (2).

تنخفض درجة الحرارة بانخفاض المنسوب ضمن حجرة المجمدة نظراً لارتفاع كثافة الهواء كما يظهر الشكل (3) والذي يظهر أيضاً أن متوسط درجة حرارة وسط المبخر تساوي -25.9°C .

3. الحل التحليلي لتحديد سماكة المادة المتحولة

الطور

في الرياضيات والفيزياء وتطبيقاتهما، لا سيما في انتقالات الطور في المادة، تُعد مسألة ستيفان "Stefan problem" 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 النازمة 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، قبل حوالي 60 عاماً، في عام، تمت دراسة مسألة مماثلة تتعلق بتكوين قشرة الأرض بواسطة لامي وكلايرون. يعرف

حل مسائل ستيفان بحل نيومان - Neumann

[13] solution.

من وجهة نظر رياضية، يمكن تقسيم النظام المغلق إلى قسمين طور صلب وآخر 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 الحد الفاصل بين الطورين الصلب والسائل "Interface" وهي

الجدول (4) تراكيز مركب غليكول-إيثيلين والمواصفات الفيزيائية-حرارية عند درجات حرارة التحول الطوري المطلوبة

المسورب	UP	MID-UP	MID-DOWN	DOWN
حرارة المنسوب متوسط درجة	-17.82	-18.38	-20.33	-21.31
Tm	-17	-18	-20	-21
التراكيز الحجمي (%)	27.4	29.6	32.9	39.0
التراكيز الكتلي (%)	29	31	34	38
L (J/kg)	113,490.8	113,462.5	113,420.2	113,363.8
ρ (kg/m ³)	1,069.56	1,071.77	1074.61	1,087.53
Cps (J/kg.°C)	3,381	3,362	3,290	3,234
κ (W/m. °C)	0.486	0.455	0.401	0.344
$\mu = (10^{-3})$ Ns/m ²	4.05	5.03	5.92	6.18

للربط بين معادلتَي الطورين وإغلاق النظام، لا بد من شرط ستيفان للحد الفاصل بفرض ثبات الكثافة بين

الطورين (الصلب والسائل) والذي يعبر عنه كالآتي:

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

قدم [14] Piia Lamberg 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:

$$S = 2\lambda\sqrt{\alpha_s t} \quad (5)$$

$$\lambda e^{\lambda^2} \operatorname{erf}(\lambda) = \frac{St}{\sqrt{\pi}} \quad (6)$$

$$= \frac{C_p(T_m - T_{sur})}{L\sqrt{\pi}}$$

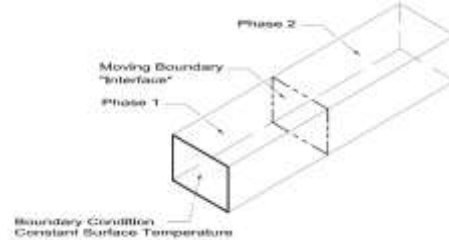
حيث:

k_s	معامل التوصيل الحراري للطور الصلب	W/m. °C
k_l	معامل التوصيل الحراري للطور السائل	W/m. °C
T	درجة الحرارة المطلقة	K
T_{ini}	درجة الحرارة الابتدائية	K
T_{amb}	درجة حرارة الوسط المحيط	K
T_{sur}	درجة حرارة الوسط المحيط	K
T_c	درجة حرارة ثابتة للمنبع	K
T_m	درجة حرارة التحول الطور	K
T_s	درجة حرارة الطور الصلب	K
T_l	درجة حرارة الطور السائل	K
ρ	الكثافة	kg/m ³
C_l	السعة الحرارية بثبات الضغط للطور السائل	J/kg°C
C_s	السعة الحرارية بثبات الضغط للطور الصلب	J/kg°C
C_p	السعة الحرارية بثبات	J/kg°C

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 بعين 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 نظاماً مغلقاً منظوماً بمعادلات تفاضلية جزئية قابلة للتفاضل وإيجاد الحل. يبين الشكل (6) 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 (6) مسألة ستيفان

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

للطور الصلب:

$$k_l \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \rho c_l \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

للطور السائل:

$$k_s \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \rho c_s \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

$$T_{ini} = T_m \quad \text{الشرط الابتدائي}$$

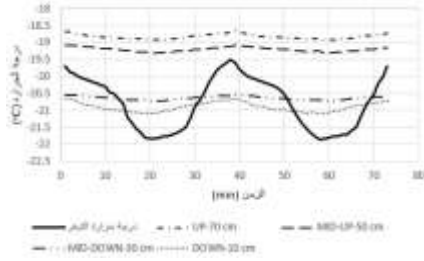
$$T_{sur} = T_c \quad \text{الشرط الحدي}$$



الشكل (8) توضع مادة التحول الطوري ضمن المجمدة

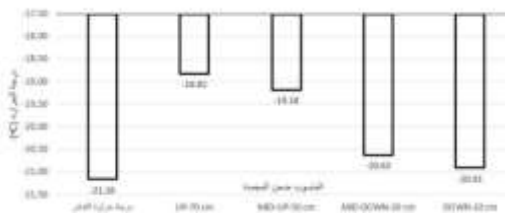
4. النتائج التجريبية

بتضمين المواد المتحولة الطور ضمن حجرة المجمدة وبالحفاظ على باقي الشروط الأخرى، الشكل (9) يوضح درجة حرارة وسط المبخر ودرجات الحرارة ضمن حجرة المجمدة مع الزمن لدورتي عمل مستقرتين. يظهر الشكل أن الضاغط يعمل لمدة 20 min ليتوقف بعدها مدة 17 min عن العمل أي بنسبة إطفالة زمن التشغيل 33% وإطفالة زمن إيقاف الضاغط 70%. كما أنه من الملاحظ ارتفاع متوسط درجة حرارة وسط المبخر -21.16°C أي بنسبة 18.3% نظراً لاكتساب وسيط التبريد الطاقة الحرارية الناتجة عن التحول الطوري (سائل/صلب) للمادة المتحولة الطور.



الشكل (9) درجة حرارة وسط المبخر ودرجات الحرارة ضمن حجرة المجمدة مع الزمن للحالة الجديدة

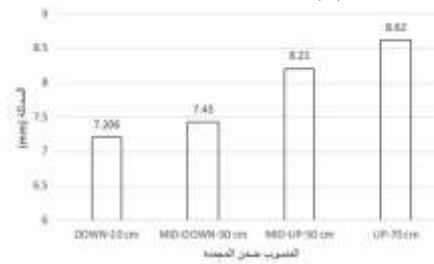
يوضح الشكل (10) متوسط درجات الحرارة في كل منسوب من المناسيب الأربعة.



الشكل (10) متوسط درجات الحرارة في كل منسوب من المناسيب الأربعة للحالة الجديدة

	الضغط للطور الصلب	
	بعملية التصلب وللطور السائل بعملية الانصهار	
S	موقع السطح الفاصل	[m]
λ	تابع لعدد ستيفان	
$\alpha_s = \frac{k_s}{\rho C_p}$	الانتشارية الحرارية للطور الصلب	m^2s^{-1}
t	الزمن	s
	عدد ستيفان اللابعدى والذي يمثل النسبة بين كمية الحرارة المحسوسة والكامنة لمادة التحول الطوري	-
St		
L	حرارة التحول الطوري	J/kg
μ	اللزوجة الحركية	Ns/m^2

بالاعتماد على الشكلين (4) و(3) والجدول (4) والمعادلتين (5)، (6) وباستخدام برنامج EES الخاص بحل المعادلات الجبرية والتفاضلية، يمكن تحديد سماكة المادة المتحولة الطور والمستخدم في كل منسوب من مناسيب المجمدة لتتصلب بشكل كامل ومحسوس خلال فترة عمل الضاغط وتنصهر خلال فترة توقف الضاغط عن العمل طارحة الطاقة الحرارية الباردة التي اختزنتها كما يظهر الشكل (7).



الشكل (7) السماكات المطلوبة لمادة التحول الطوري في كل منسوب من منسوب المجمدة

تم إعادة التجربة السابقة مع إدخال مواد تحول طوري ضمن كل منسوب من مناسيب المجمدة بأبعاد 30X25 cm ووفقاً للسماكات الواردة ضمن الشكل (7). يبين الشكل (8) توضع مادة التحول الطوري ضمن المجمدة.

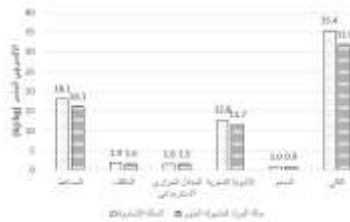
يوفر تحليل الاكسرجي مقياساً حقيقياً لمدى اقتراب الأداء الفعلي من الحالة المثالية، كما يحدد بشكل أدق مواقع الخسائر الترموديناميكية في الدارة.

تبين المعادلات التالية الاكسرجي الضائع في كل جزء من أجزاء دارة التبريد والاكسرجي الكلي ومردود قانون الترموديناميك الثاني [15] بإهمال الإكسرجي الحركي والاكسرجي الكامن.

الجزء المدروس	الاكسرجي الضائع
$Ex_{des-comp} = +T_0(S_1 - S_2)$	الضاغط
$Ex_{des-cond} = (h_2 - h_3) - T_0(S_2 - S_3) - q_c(1 - \frac{T_0}{T_c})$	المكثف
$Ex_{des-H.EX} = (h_3 - h_4) - T_0(S_3 - S_4) + (h_6 - h_1) - T_0(S_6 - S_1)$	المبادل الحراري الاسترجاعي
$Ex_{des-EX.V} = +T_0(S_5 - S_3)$	الأنبوبة الشعرية
$Ex_{des-evap} = (h_5 - h_6) - T_0(S_5 - S_6) + q_e(1 - \frac{T_0}{T_e})$	المبخر
$Ex_{des} = Ex_{des-comp} + Ex_{des-cond} + Ex_{des-H.EX} + Ex_{des-EX.V} + Ex_{des-evap}$	الاكسرجي الضائع في الدارة
$\eta_{ex} = \frac{w_{use}}{1 - \frac{Ex_{des}}{Ex_{des,comp}}} = \frac{w_{comp} - Ex_{des}}{w_{comp}}$	مردود الاكسرجي

يبين الشكل (12) الاكسرجي الضائع في كل جزء من أجزاء الدارة للحالتين الأساسية وحالة تضمين المواد المتحولة الطور. من الملاحظ أن أكبر ضياع للإكسرجي يتم في الضاغط تليه الأنبوبة الشعرية، كما وأن أقل ضياع للإكسرجي يتم في المبخر.

ينخفض ضياع الاكسرجي الكلي لحالة تضمين المواد المتحولة الطور عن الحالة الأساسية بمقدار 9.9% نظراً لارتفاع درجة حرارة التبخر.



الشكل (12) الاكسرجي الضائع في كل جزء من أجزاء الدارة للحالتين الأساسية والجديدة

كما يبين الجدول (6) المقارنة بين معامل الأداء، استهلاك الطاقة الكهربائية ليوم كامل ومردود قانون الترموديناميك الثاني (مردود الإكسرجي) للحالتين الأساسية وتضمين المواد المتحولة الطور ونسبة التحسين.

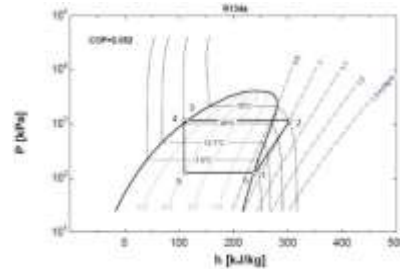
يوضح الجدول (5) مقارنة بين أعلى وأقل درجة حرارة ضمن حجرة المجمدة للحالتين الأساسية وتضمين المواد المتحولة الطور.

الجدول (5) مقارنة بين أعلى وأقل درجة حرارة ضمن حجرة المجمدة

الفرق	أقل درجة حرارة (°C)	أعلى درجة حرارة (°C)	الحالة الأساسية
3.49	21.48	17.67	حالة تضمين المواد المتحولة الطور
2.41	21.08	18.67	

الملاحظ من الجدول (5) أن الفرق بين أعلى وأقل درجتي حرارة لحالة تضمين المواد المتحولة الطور ضمن حجرة المجمدة انخفض عن الحالة الأساسية بمقدار 30.9% مما 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.

يبين الشكل (11) مخطط h-p لدارة التبريد لحالة تضمين حجرة المجمدة بالمواد المتحولة الطور حيث أصبح معامل الأداء COP مساوياً لقيمة 2.052 بزيادة قدرها 13.4% عن الحالة الأساسية نظراً لارتفاع درجة حرارة التبخر.



الشكل (11) مخطط h-p لدارة التبريد للحالة الأساسية

5. تحليل الإكسرجي ومردود قانون

الترموديناميك الثاني

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

لذلك يجب مراعاة الغلظة الجيدة لمحلول غليكول إيثيلين عند تضمينها في المجمدات المنزلية. ووصلها بمصرف مباشرة في حال تسربها.

8. النتائج

تم في هذا البحث بيان أهمية تضمين المواد المتحولة الطور ضمن المجمدات المنزلية ومدى تأثيرها على مؤشرات الأداء الرئيسية (معامل الأداء، استهلاك الطاقة، مردود قانون الترموديناميك الثاني)، كما تمت دراسة تأثيرها على درجة حرارة التبخير والإكسرجي الضائع. تم دراسة فترة استرداد رأس المال وكانت مساوية 1.38 year.

9. التوصيات

استخلصت النتائج الواردة في الورقة بناء على الشروط الواردة في المرجع AHAM HRF-01 والخاص بإجراء التجارب على حجرة المواد الطازجة والمجمدات المنزلية. وتتغير هذه الشروط وخاصة درجة حرارة الوسط المحيط على مدار السنة مما يمكن أن يؤدي إلى زيادة تبريد أو زيادة تسخين للمادة المتحول الطوري (طرح حرارة محسوسة أو اكتسابها). وبالتالي يمكن الانطلاق من الشروط الموضوعية من قبل المراجع المتخصصة وتغييرها لدراسة تأثير تغيير البارامترات المنصوح بها عند إجراء التجارب على حجرة المواد الطازجة والمجمدات المنزلية المضمنة بالمواد المتحولة الطور.

التمويل: هذا البحث ممول من جامعة دمشق وفق رقم التمويل (501100020595).

الجدول (6) مقارنة المؤشرات الأساسية بين نتائج التجريبتين

المؤشر	حالة تضمين نسبة التحسين	المواد المتحولة الطور	الحالة الأساسية
معامل الأداء	13.4%	2.052	1.81
استهلاك الطاقة الكهربائية (kWh/day)	11.04%	1.604	1.803
مردود قانون الترموديناميك الثاني	1.5%	0.5569	0.5487

6. الجدوى الاقتصادية لتضمين المواد

المتحولة الطور ضمن حجرة المجمدة

تم توفير 0.199 kW.h يومياً أي kWh 72.6 سنوياً بحسب نتائج البحث وبالاعتماد على الجدول (6). إن تكلفة إنتاج الكيلو واط الساعي ما يعادل 400 ل.س [17]. أي يمكن توفير $72.6 \times 400 = 29,040$ ل.س. الكلفة التأسيسية للمواد المتحولة الطور هي 40,000 ل.س، وعليه تكون فترة استرداد رأس المال

$$\frac{40,000}{29,040} = 1.38 \text{ year}$$

7. عيوب المواد المتحولة الطور

• **الحيز الذي تشغله المواد المتحولة الطور**
إن حجم المواد المتحولة الطور التي تم تضمينها ضمن حجرة المجمدة يساوي Liter 0.56 أي نسبة 0.42% 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 [18].

References

- Joybari MM, Haghghat F, Moffat J, Sra P. (2015). **Heat and cold storage using phase change materials in domestic refrigeration systems: the state-of-the-art review**. 24. 106:111. Energy and Buildings.
- Sonnenrein G, Elsner A, Baumhögger E, Morbach A, Fieback K, Vrabec J. (2015) **Reducing the power consumption of household refrigerators through the integration of latent heat storage elements in wire-and-tube condensers**. 154. 51-60. International Journal of Refrigeration.
- Adil A.M. Omara, Abubaker A.M. Mohammedali. (2020). **“Thermal management and performance enhancement of domestic refrigerators and freezers via phase change materials: A review”**. Innovative Food Science and Emerging Technologies

4. G. Sonnenrein, et.al.(2015), "**Reducing the power consumption of household refrigerators through the integration of latent heat storage elements in wire-and-tube condensers**". International Journal of Refrigeration.
5. A. Pavithran, M Sharma. A. Kumar Shukla. (2020). "**An investigation on the effect of PCM incorporation in refrigerator through CFD simulation**". Materials Today: Proceedings.
6. K. Azzouz, D. Leducq, J. Guilpart, D Gobin. (2005). "**Improving the energy efficiency of a vapor compression system using a phase change material**". **Second Conference on Phase Change Material & Slurry**" Scientific Conference & Business Forum.
7. B. Gin a, M.M. Farid, P.K. Bansal. (2010). "**Effect of door opening and defrost cycle on a freezer with phase change panels**". 51. 2698-2706. Energy Conversion and Management.
8. S. Bista, S. Hosseini, E. Owens. (2018). "**Performance improvement and energy consumption reduction in refrigeration systems using phase change material (PCM)**". 142. 723-735 Applied Thermal Engineering.
9. Wen-Long Cheng, Bao-Jun Mei, Yi-Ning Liu, Yong-Hua Huang, Xu-Dong Yuan. (2011). "**A novel household refrigerator with shape-stabilized PCM (Phase Change Material) heat storage condensers: An experimental investigation**". 36. 5797-5804. Energy.
10. D. Shikalgar Niyaj, SN. Sapali. (2017). "**Performance Evaluation of a Domestic Refrigerator with a Thermal Storage arrangement Using Propane as a Refrigerant**". 109. 34-39. Energy Procedia.
11. Hiroyuki Kumano, (2007). "**Study on latent heat of fusion of ice in aqueous solutions**". 109. 34-39. International Journal of Refrigeration.
12. ASHRAE Handbook ,Fundamentals ,(2013) Chapter 31 ,"**Physical properties of secondary coolants (brines)**".
13. T. G. Myers, M. G. Hennessy, M. Calvo-Schwarzwälder. (2019) "**The Stefan problem with variable thermophysical properties and phase change temperature**". Bellaterra, Spain.
14. Piia Lamberg (2003). **Approximate analytical model for solidification in a finite PCM storage with internal fins**". 27. 491-513. Applied Mathematical Modelling.
15. M. AZAIEZ. (2016). **TWO PHASES STEFAN PROBLEM WITH SMOOTHED ENTHALPY**. COMMUN. MATH. SCI. Vol. 14, No. 6, pp. 1625-1641.
16. Mohan Chandrasekharan, (2014). "**Exergy Analysis of Vapor Compression Refrigeration System Using R12 and R134a as Refrigerants**". 4. 134-139. International Journal of Students.
17. Paul Breeze, (2021). "**Cost of Electricity Production**". Geothermal Energy Systems,
18. Agency for Toxic Substances and Disease Registry, "**Ethylene Glycol and Propylene Glycol Toxicity**". 2020. ATSDAR.