

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

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

طالب دكتوراه في كلية الهندسة الميكانيكية- جامعة دمشق.

أستاذ في كلية الهندسة الميكانيكية- جامعة دمشق.

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 لوحدة التبريد المختلفة من خلال تطبيق أنظمة تخزين الطاقة الحرارية (TES) باستخدام المواد المتغيرة الطور (PCMs). 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 $32\text{ }^{\circ}\text{C}$. في الحالة المستقرة يعمل الضاغط لمدة 15 min ويتوقف عن العمل لمدة 10 min. تم إجراء المحاكاة الحاسوبية لنوعين من البارافينات المختلفة. تم اعتبار البارافين Eicosane بسماكة 9 mm هو الأفضل من حيث الأداء الحراري عند شروط المسألة المفروضة.

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

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

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

Abdulhadi Masalkhi¹, Prof. Wajih Naimeh²

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

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

Abstract

Thermal energy storage (TES) is nowadays one of the most feasible solutions in facing the challenge of achieving energy savings. Many researchers have investigated energy efficiency of different cold units by applying TES systems using phase change materials (PCMs). In this paper, the type and thickness of the phase change material that can be used in domestic freezers was determined to increase the coefficient of performance and reduce energy consumption at room temperature condition of 32 °C. At steady state the compressor runs for 15 min and stops working for 10 min. computational simulations of two different paraffins were performed. Eicosane paraffin with a thickness of 9 mm was considered to be the best in terms of thermal performance under the imposed problem conditions.

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), Paraffin Wax, Solid-Liquid Phase Transition, Melting Temperature, Phase Change Material Thickness.

1. المقدمة

في الوقت الحاضر تعتبر قضايا الطاقة وما يتعلق بها من تطوير الآليات التي تساعد على تخفيضها أمراً ملحاً بالنسبة للمهندسين. على اعتبارها واحدة من أكثر الأجهزة المنزلية شيوعاً، فإن المجمدات المنزلية تستهلك ما يقدر بنحو ثلث الاستهلاك المنزلي للكهرباء. لا يقتصر الأمر على التخفيض من استهلاك الطاقة فحسب، بل إن تقليل التلوث مهم أيضاً ويرتبط ارتباطاً وثيقاً بالطلب على الطاقة [1].

تشير التقديرات العالمية إلى وجود مجمدة منزلية واحدة لكل ستة أشخاص، مما يعني استهلاكاً للطاقة الكهربائية يقدر بحوالي 8% من الاستهلاك العالمي للطاقة [2].

إن ارتفاع درجة حرارة التبخر أو انخفاض درجة حرارة التكاثف بمقدار درجة مئوية واحدة يخفض من استهلاك الطاقة بمقدار حتى 3,4% على الترتيب. كذلك بتوسيع مساحة سطح التبادل الحراري الفعال للمكثف والمبخر 50% يخفض من استهلاك الطاقة الكهربائية بمقدار 6%، 10% على الترتيب [4], [3].

المواد المتغيرة الطور (PCMs) هي مواد تتصهر وتتجمد عند درجة حرارة ثابتة وضغط ثابت تقريباً.

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 ويخفض من استهلاك الطاقة الكهربائية [6].

في البرادات والمجمدات التقليدية التي تعمل بنظام الضواغط on/off وتحت ظروف التشغيل القياسية وحيث تكون عملية انتقال الحرارة من المكثف بشكل متقطع. حيث من الممكن الاستفادة من زمن توقف الضاغط في تحرير المكثف من طاقته مما 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) [7]. 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.

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.

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

رقم المرجع	النسبة المئوية لاستهلاك الطاقة	T_m (°C)
[8]	12%	50.3
[9]	12.2%	50.3
[10]	26%	50.3
[11]	10%	34
[12]	13%	38

الجدول (1) ملخص الدراسات المرجعية

كما حدد كل مرجع البارامترات التالية عند إجراء الأبحاث وهي:

- درجة الحرارة الجافة المحيطة.
- 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 99 Litter 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 والمناسيب الأربعة داخل حجرة المجمدة، ودرجتي حرارة قبل وبعد الضاغط وكذلك درجة حرارة الوسط المحيط ودرجة حرارة وسط المكثف. درجة حرارة نقطة الضبط لحجرة المجمدة

PCM	الطريقة المستخدمة في البحث	تاريخ البحث	اسم الباحث
Paraffin	التجريبية	2011	Wen-Long
Paraffin	العقدية	2013	Wen-Long
Paraffin	العقدية	2014	Xu-Dong
Copolymer Compound	التجريبية	2015	G. Sonnenrein
Polyethylene Glycol	التجريبية	2019	A. Pirvaram

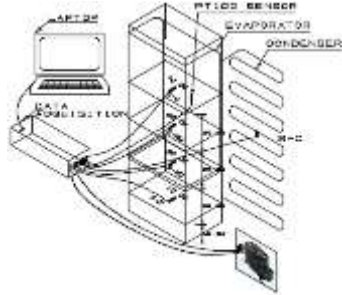
2. الإجراء التجريبي اللازم لتعيين بارامترات المادة المتحولة الطور

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



الشكل (1,b) توضع عبوات التجريب



الشكل (1,c) توضع حساسات درجة الحرارة



الشكل (1,d) مخطط دائرة التبريد



الشكل (1,e) مكثف المجمدة

18°C ويتوضع حساس متحكم درجة حرارة حجرة المجمدة في الجزء العلوي منه. تم وصل المجمدة بقياس الكهرباء واستمر بالعمل لمدة 24 ساعة متواصلة. توضح الأشكال (1,a)، (1,b)، (1,c)، (1,d) صور المجمدة وأماكن توضع حساسات درجة الحرارة ومخطط دائرة التبريد وصورة المكثف، كما يوضح الشكل (2) تغيرات درجات الوسط المحيط مع الزمن ودرجة حرارة وسط المكثف (درجة حرارة التكاثف بإهمال المقاومة الحرارية للأنبوب النحاسي للمكثف) خلال دورتي عمل مستقرتين للضاغط. يتبين من الشكل أن الضاغط يعمل لمدة 15 min ليتوقف بعدها مدة 10 min.

خلال فترة عمل الضاغط ترتفع درجة حرارة التكاثف إلى 46.1°C أي أعلى من درجة حرارة الوسط المحيط (32°C) بمقدار 14.1°C لتتخفض درجة حرارة المكثف وتقترب من درجة حرارة الوسط المحيط عند توقف الضاغط عن العمل كما يظهر الشكل (2). وبالتالي يتوجب اختيار مادة تحول طورها لغمر مكثف المجمدة بها بدرجة حرارة تحول طورها ضمن المجال 32°C - 46.1°C وبسماكة مناسبة حتى تتصهر خلال فترة عمل الضاغط (15 min) وتتصلب خلال فترة توقفه (10 min).



الشكل (1,a) صورة المجمدة

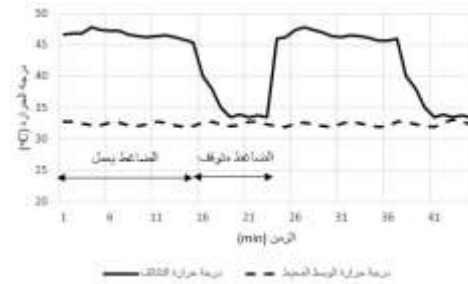
المستقرة (15 min)، مما يؤدي إلى حدوث التحول الطوري (صلب - سائل)، وانتقال هذه الطاقة المخزنة إلى الوسط المحيط خلال فترة توقف الضاغط عن العمل (10 min) بواسطة حدوث التحول الطوري (سائل - صلب). وبالتالي إن عملية طرح الحرارة تكاثف وسيط التبريد للوسط المحيط تستمر على كامل دورة عمل الضاغط (on/off) بدلاً من أن 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. يوضح الجدول (2) المواصفات والفيزيو-حرارية ودرجات حرارة الانصهار للبارافينات المستخدمة في المحاكاة الحاسوبية [13] على برنامج ANSYS16.1-Fluent.

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:

$\frac{\partial T}{\partial r^2} = \frac{1}{\alpha_l} \frac{\partial T}{\partial t}$	انتقال الحرارة أحادي البعد غير المستقر للطور السائل (1)
$\frac{\partial T}{\partial r^2} = \frac{1}{\alpha_s} \frac{\partial T}{\partial t}$	انتقال الحرارة أحادي البعد غير المستقر للطور الصلب (2)
$k_s \frac{\partial T_s}{\partial x} - k_l \frac{\partial T_l}{\partial x} = \rho L \frac{ds}{dt}$	شرط ستيفان للسطح الفاصل بين الطورين الصلب والسائل (3)
$\frac{T_x - T_\infty}{T_b - T_\infty} = \frac{\cosh[a(l-x)]}{\cosh(al)}$	معادلة التدرج الحراري ضمن الريشة الأديباتية (4)

الجدول (3) مواصفات المجمدة المستخدمة في التجربة	
طراز المجمدة	VF0611
السعة	132 Litter
الارتفاع	125 cm
العرض	50 cm
العمق	64 cm
الضاغط	مكبسي
الفريون	134a
التغذية	220 volt/ 50 Hz
المixer	Roll and Band
المكثف	Wire and Tube



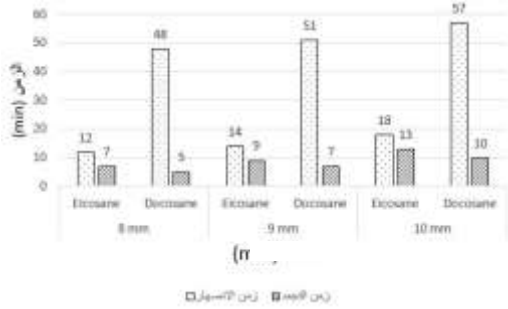
الشكل (2) تغيرات درجة حرارة الوسط المحيط ودرجة حرارة التكاثف مع الزمن

قدم [13] KAHWAJI, S دراسة تجريبية لتحديد المواصفات الفيزيو-حرارية ودرجات حرارة التحول الطوري وكذلك حرارة التحول الطوري لبعض البارافينات المستخدمة كمواد تحول طوري. تم اختيار نوعين من البارافينات وهما **Eicosane- Docosane** تتناسب مع الحالة المدروسة كما يوضح الجدول (4).

الجدول (4) المواصفات والفيزيو-حرارية ودرجات حرارة الانصهار للبارافينات المستخدمة في المحاكاة الحاسوبية [9]		
البارافين	Eicosane	Docosane
الصيغة الكيميائية	C ₂₀ H ₄₂	C ₂₂ H ₄₆
T _m (°C)	37.5	43.8
L (kJ/kg)	246	234
ρ (kg/m ³)	830	820
C _{p,s} (kJ/kg.K)	2	1.7
C _{p,l} (kJ/jg.K)	2.6	2.2
k _s (W/m.K)	0.44	0.37
k _l (W/m.K)	0.23	0.24

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



الشكل (3) زمن انتهاء الانصهار والتصلب لكل نوع من البارافينات المستخدمة

يعتبر البارفين Eicosane ذو درجة حرارة التحول الطوري 37.5°C ويسمكة 9 mm مناسباً لشروط التجربة المخبرية حيث ينصهر خلال 14 min ويتصلب خلال 9 min مما يعني بقاء دقيقة واحدة لزيادة التسخين المحسوس لحالة الانصهار ودقيقة واحدة لزيادة التبريد المحسوس لحالة التصلب وهذا يمكن إهماله بحسب الكثير من الدراسات.

تبين الأشكال (4-a) وحتى (4-h) الصور الحرارية الناتجة عن برنامج المحاكاة ANSYS - 16.1 والتي تظهر التدرج الحراري لجزء من خزان التحول الطوري الحاوي على المكثف خلال كل دقيقة من عملية الانصهار وتبادل الحرارة مع المكثف.

تبين الأشكال (5-a) وحتى (5-h) صور تغير كسر التحول الطوري لخزان التحول الطوري أثناء عملية الانصهار كل دقيقة.

تبين الأشكال (6-a) وحتى (6-e) الصور الحرارية الناتجة عن برنامج المحاكاة والتي تظهر التدرج الحراري لجزء من خزان التحول الطوري الحاوي على المكثف خلال كل دقيقة من عملية التصلب وتبادل الحرارة مع الوسط المحيط.

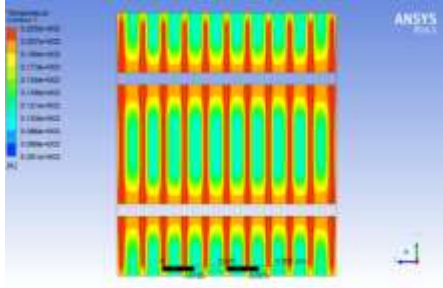
تبين الأشكال (7-a) وحتى (7-e) صور تغير كسر التحول الطوري لخزان التحول الطوري أثناء عملية التصلب كل دقيقة.

يبين الشكل (8) تغير كسر التحول الطوري خلال عمليتي الانصهار والتصلب.

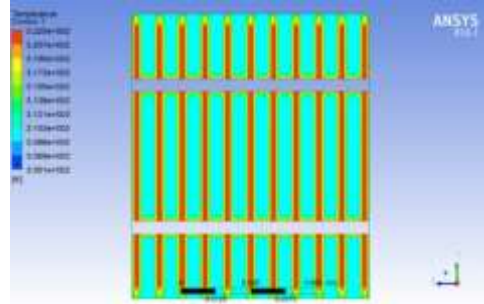
$T_{ini} = T_{amb}$	الشرط الابتدائي للانصهار (5)
$T_{ini} = T_c$	الشرط الابتدائي للتصلب (6)
$T_s = T_c$	الشرط الحدي للانصهار (7)
$T_s = T_{amb}$	الشرط الحدي للتصلب (8)

5. النتائج والمناقشة

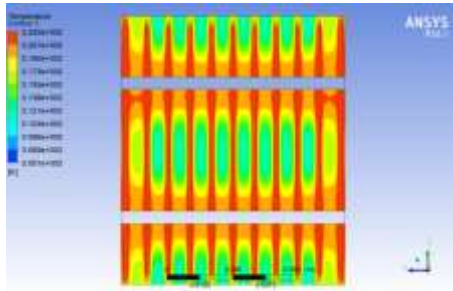
تم اختيار ثلاث سماكات (8,9,10 mm) لكل نوع من نوعي البارافينات الواردة في الجدول (4). وضعت جميع البارافينات ضمن غلاف من الستانلس ستيل 304 بأبعاد 60 cm X 46 cm ذو الموصلية الحرارية 16.2 W/m.k سماكة 0.1 mm. يعتبر الستانلس ستيل غير قابل للتفاعل الكيميائي مع البارافينات [13]. تم إجراء 6 تجارب حاسوبية لمعرفة 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 (3) زمن انتهاء عملية التصلب والانصهار للبارافينات المستخدمة في التجربة الحاسوبية عند السماكات 8, 9, 10 mm. الملاحظ أنه بازدياد درجة حرارة التحول الطوري يزداد زمن عملية الانصهار وينخفض زمن عملية التصلب وذلك بسبب انخفاض الفرق بين درجة حرارة التكاثر 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.



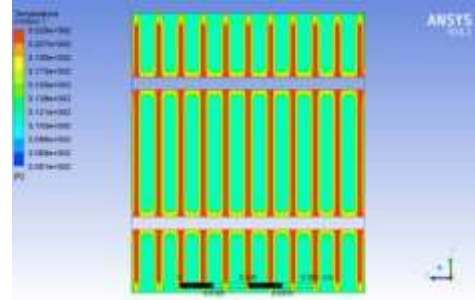
الشكل (4,f) درجات حرارة الانصهار بعد 11 دقيقة



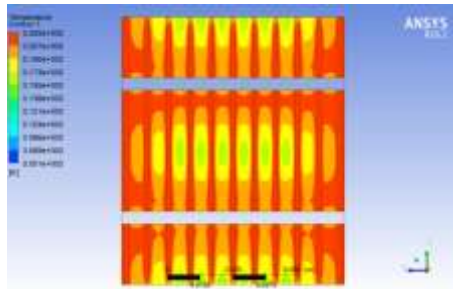
الشكل (4,a) درجات حرارة الانصهار بعد 1 دقيقة



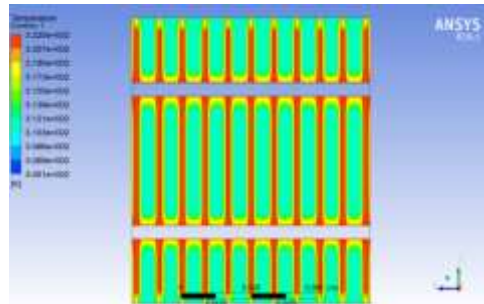
الشكل (4,g) درجات حرارة الانصهار بعد 13 دقيقة



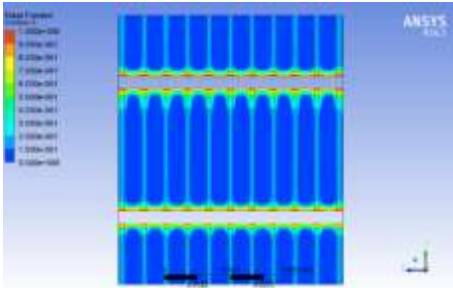
الشكل (4,b) درجات حرارة الانصهار بعد 3 دقيقة



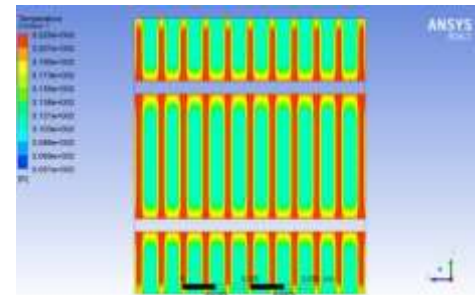
الشكل (4,h) درجات حرارة الانصهار بعد 15 دقيقة



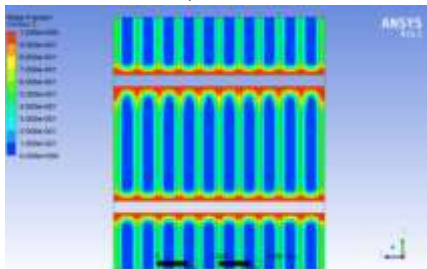
الشكل (4,c) درجات حرارة الانصهار بعد 5 دقيقة



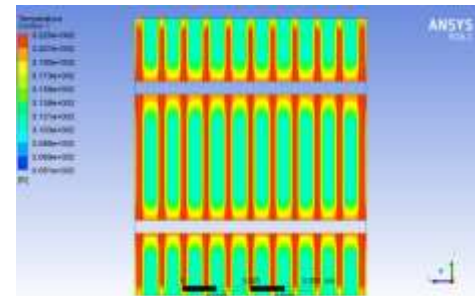
الشكل (5,a) كسر التحول الطوري للانصهار بعد 1 دقيقة



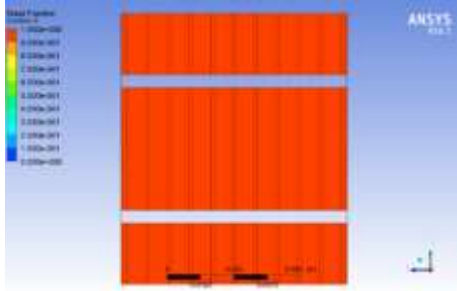
الشكل (4,d) درجات حرارة الانصهار بعد 7 دقيقة



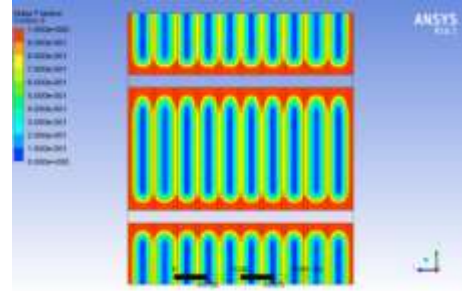
الشكل (5,b) كسر التحول الطوري للانصهار بعد 3 دقيقة



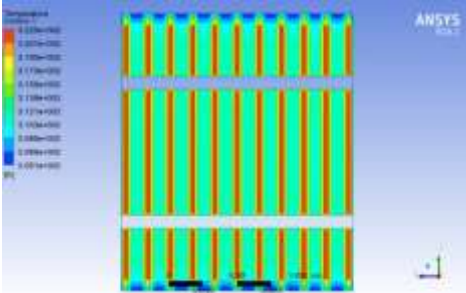
الشكل (4,e) درجات حرارة الانصهار بعد 9 دقيقة



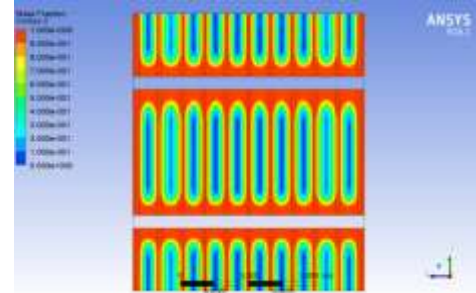
الشكل (5,h) كسر التحول الطوري للانصهار بعد 15 دقيقة



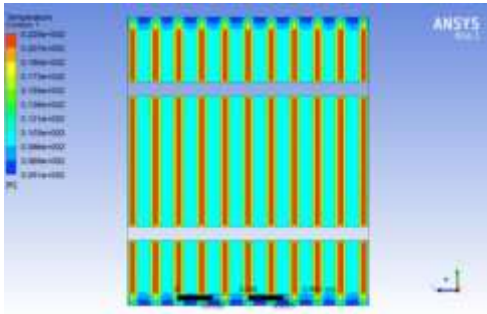
الشكل (5,c) كسر التحول الطوري للانصهار بعد 5 دقيقة



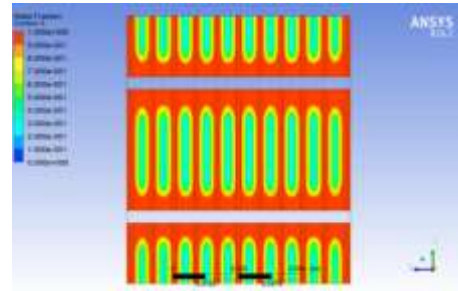
الشكل (6,a) درجات حرارة التصلب بعد 1 دقيقة



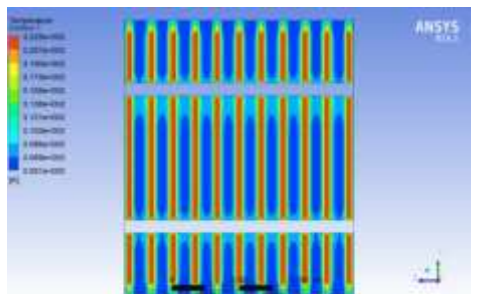
الشكل (5,d) كسر التحول الطوري للانصهار بعد 7 دقيقة



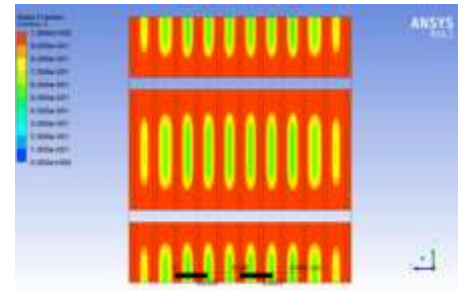
الشكل (6,b) درجات حرارة التصلب بعد 3 دقيقة



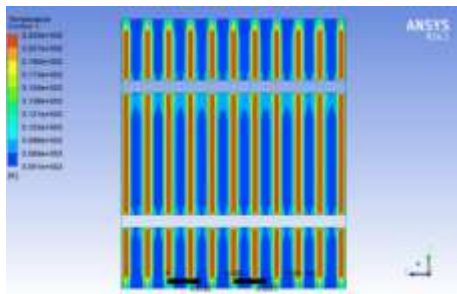
الشكل (5,e) كسر التحول الطوري للانصهار بعد 9 دقيقة



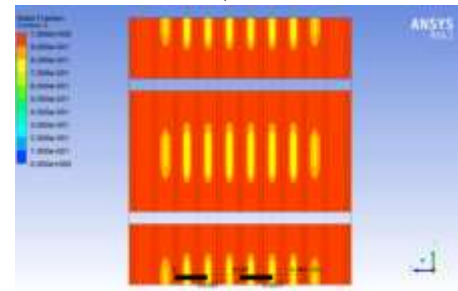
الشكل (6,c) درجات حرارة التصلب بعد 5 دقيقة



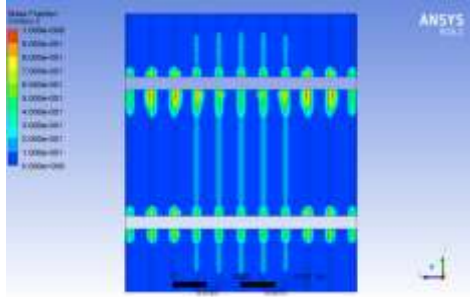
الشكل (5,f) كسر التحول الطوري للانصهار بعد 11 دقيقة



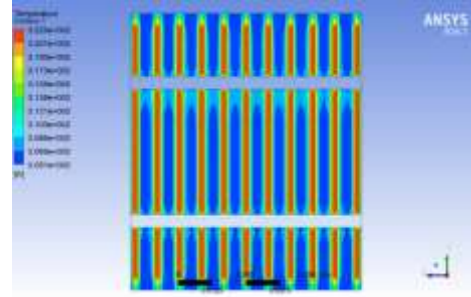
الشكل (6,d) درجات حرارة التصلب بعد 7 دقيقة



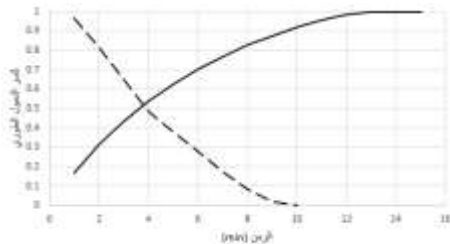
الشكل (5,g) كسر التحول الطوري للانصهار بعد 13 دقيقة



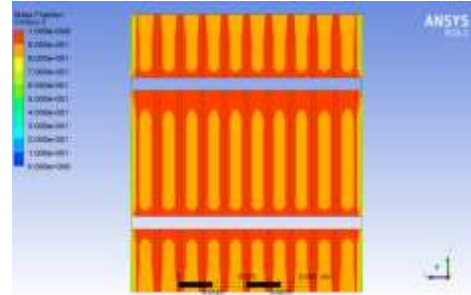
الشكل (7,e) كسر التحول الطوري للتصلب بعد 9 دقيقة



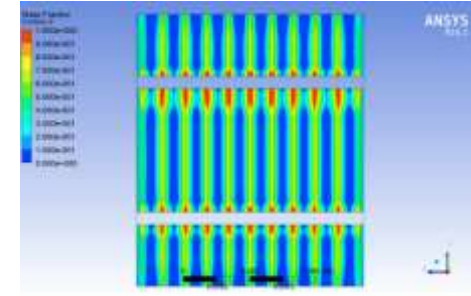
الشكل (6,e) درجات حرارة التصلب بعد 9 دقيقة



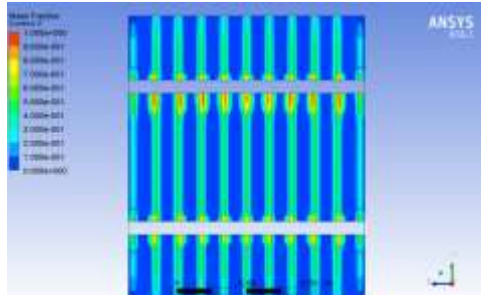
الشكل (8) تغير كسر التحول الطوري خلال عمليتي الانصهار والتصلب



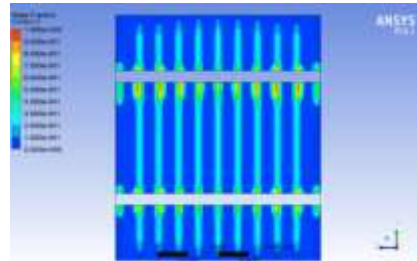
الشكل (7,a) كسر التحول الطوري للتصلب بعد 1 دقيقة



الشكل (7,b) كسر التحول الطوري للتصلب بعد 3 دقيقة



الشكل (7,c) كسر التحول الطوري للتصلب بعد 5 دقيقة



الشكل (7,d) كسر التحول الطوري للتصلب بعد 7 دقيقة

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_c	درجة حرارة ثابتة للمنيق (درجة حرارة التكاثف)	K
T_m	درجة حرارة التحول الطوري	K
T_s	درجة حرارة السطح	K
T_b	درجة حرارة قاعدة الريشة	K
T_{∞}	درجة حرارة التيار	K
T_x	درجة الحرارة عند المسافة x	K
ρ	الكثافة	kg/m ³
$a = \frac{\rho C_p}{k}$	ثابت الريشة	
C_{pl}	السعة الحرارية بثبات الضغط للطور السائل	J/kg°C
C_{ps}	السعة الحرارية بثبات الضغط للطور الصلب	J/kg°C
S	موقع السطح الفاصل	[m]
l	طول الريشة	[m]

تم في هذا البحث دراسة سماكة ودرجة حرارة التحول الطوري للمادة المتحولة الطور الممكن استخدامها من جهة المكثف لتحسين عمل المجمدات المنزلية باستخدام برنامج المحاكاة ANSYS 16.1. حيث يعتبر البارفين Eicosane ذو درجة حرارة التحول الطوري °C 37.5 وبسماكة 9 mm مناسباً لشروط التجربة المخبرية. تم دراسة فترة استرداد رأس المال وكانت مساوية 3.49 year.

8. التوصيات

تضمن البحث الخطوات اللازم اتباعها لتحديد سماكة ونوع مادة التحول الطوري اللازم وضع مكثف المجمدة المنزلية ضمنها لتخزين الطاقة الحرارية الناتجة عن تكاثف وسيط التبريد والتي يمكن اتباعها لأي مجمدة منزلية بحسب مواصفات المجمدة والبارامترات المؤثرة والواردة في البحث.

يوصى بإجراء التجارب العملية ومقارنة قيم معامل الأداء لدراة التبريد (COP) واستهلاك الطاقة الكهربائية بين الحالتين:

1. مع استخدام مواد التحول الطوري.

2. بدون استخدام مواد التحول الطوري.

وذلك لتعزيز أهمية البحث وإضافة فائدة أخرى إلى مجال استخدام مواد التحول الطوري والتخزين الكامن في رفع كفاءة الطاقة.

كما يوصى بدراسة تأثير تغير الشروط الخارجية على عملية التحول الطوري للمواد المتحولة الطور. **التمويل:** هذا البحث ممول من جامعة دمشق وفق رقم التمويل (501100020595).

$\alpha_s = \frac{k_s}{\rho C_{ps}}$	الانتشارية الحرارية للطور الصلب	m^2s^{-1}
$\alpha_l = \frac{k_l}{\rho C_{pl}}$	الانتشارية الحرارية للطور السائل	m^2s^{-1}
t	الزمن	s
x	البعد	m
L	حرارة التحول الطوري	J/kg
r	القطر	m

6. التطبيق العملي والجدوى الاقتصادية

لتغليف المكثف بالمواد المتحولة الطور وبالسماكة المطلوبة، يمكن تصنيع خزان من مادة الستانلس ستيل وهو عديم التفاعل مع البارافينات [13] بالأبعاد المطلوبة حسب نتائج البحث ووضع المكثف ضمنه بعد فكه من براغي التثبيت على جسم المجمدة ومن ثم تعبئة الخزان بالمادة المتحولة الطور بعد تسخينها وتحويلها للشكل السائل وإعادة تثبيت المكثف بجسم المجمدة.

إن الكلفة التأسيسية للخزان والمواد المتحولة الطور هي 110,000 ل.س.

الاستهلاك الكهربائي المقاس عند إجراء التجربة الأساسية هي 1.803 kWh/day.

يتم توفير 12% عند تضمين المواد المتحولة الطور من طرف المكثف [8] أي 0.216 kWh/day. أي سنوياً يتم توفير 78.84 kWh/year.

إن سعر استهلاك الكيلو واط الساعي العالمي هو ما يعادل 400 ل.س [14]. أي سنوياً يمكن توفير

$$78.84 \times 400 = 31,536 \text{ ل.س.}$$

فترة استرداد رأس المال تكون

$$\frac{110,000}{31,536} = 3.49 \text{ year}$$

7. النتائج

References

1. Wen-Long Cheng, Xu-Dong Yuan. (2013). "**Numerical analysis of a novel household refrigerator with shape-stabilized PCM (phase change material) heat storage condensers**". 59. 265-276. Energy.
2. Jonathan Cofre-Toledo, Diego A. Vasco, Cesar A. Isaza-Roldan,, Juan A. Tangarife. (2018) "**Evaluation of an integrated household refrigerator evaporator with two eutectic phase-change materials**". International Journal of Refrigeration.
3. 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. Suwat Trutassanawin, Eckhard A. Groll. (2004). "**Numerical Analysis of a Miniature-Scale Refrigeration System (MSRS) for Electronics Cooling**". International Refrigeration and Air Conditioning.
5. 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.
6. A. Pavithran, M Sharma. A. Kumar Shukla. (2020). "**An investigation on the effect of PCM incorporation in refrigerator through CFD simulation**". Materials Today: Proceedings.
7. MARCHI NETO, I. (2009), "**Refrigerator COP with thermal storage**". 29. 2358-2364. Applied Thermal Engineering.
8. WEN-LONG, C. (2011). "**A novel household refrigerator with shape-stabilized PCM (Phase Change Material) heat storage condensers: An experimental investigation**". 36. 5797-5804. Energy.
9. WEN-LON, C. (2013), Numerical analysis of a novel household refrigerator with shape-stabilized PCM (phase change material) heat storage Condensers. 59. 265-276. Energy.
10. XU-DONG, Y, WEN-LONG, C. (2014). "**Multi-objective optimization of household refrigerator with novel heat-storage condensers by Genetic algorithm**". 84. 550-56. Energy Conversion and Management.
11. SONNENREIN, G. (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.
12. PIRVARAM, A, SADRAMELI, S.M, ABDOLMALEKI, L. (2019). "**Energy management of a household refrigerator using eutectic environmental friendly PCMs in a cascaded condition**". 181. 321-330. Energy.
13. 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.
14. Paul Breeze, (2021). "**Cost of Electricity Production**". Geothermal Energy Systems,