

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

أ.د.م. وجيه ناعمة*

م. عبد الهادي مسالخي*

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 الطاقوي 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 المحاكاة الحاسوبية لأربعة 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

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 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 placed behind condensers in domestic refrigerators has been determined to increase performance coefficient (COP) and save electrical energy consumption at conditions of 33 °C room temperature, 4 Litter water in freezing compartment and 12 Litter water in fresh food compartment. In the steady state, the compressor operates for 10 min and stops working for 15 min. Computer simulations for four different types of paraffins was performed. Docosane paraffin with 4.2–4.8 mm thickness was considered the best in terms of thermal performance under the conditions of this problem.

Keywords: household refrigerator, paraffins, phase change (solid–liquid), condensation process, saving power.

1- المقدمة

بحسب منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية OECD فإن أكبر استهلاك للطاقة الكهربائية في المنازل تصرف للتبريد. في السنوات الأخيرة، بذلت العديد من الجهود لتخفيض استهلاك البرادات 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]:

1. زيادة كفاءة العزل الحراري في غلاف البراد 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 تتخفض درجة حرارة التكايف 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 التكايف ودرجة حرارة التبخر. إن ارتفاع درجة حرارة التبخر بمقدار 1°C يخفض من استهلاك الطاقة بمقدار 2-4%. 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.

في البرادات التقليدية التي تعمل بنظام الضواغط on/off وتحت ظروف التشغيل القياسية وحيث تكون عملية انتقال الحرارة من المكثف بشكل متقطع، يكون زمن توقف الضاغط عن العمل أعلى من زمن عمله خلال دورة عمل كاملة له. 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 التكايف وانخفاض قيمة الطاقة الكهربائية المستجرة وزيادة معامل الأداء (COP) [2]. بمعنى آخر، إضافة مواد تحول طوري (صلب - سائل) من جهة المكثف لتكتسب حرارته وتتصهر خلال فترة عمل الضاغط وتقوم بعد ذلك بطرح الحرارة المكتسبة من المكثف إلى الوسط المحيط خلال فترة توقف الضاغط عن العمل.

درس العديد من الباحثين إضافة المواد المتحولة الطور على دارات التبريد لتصبح جزءاً منها (قبل المبخر، قبل الضاغط، بعد الضاغط) أو إضافة المواد المتحولة الطور ضمن حجرة البراد المنزلي لتخفيض عدد مرات إقلاع الضاغط. إلا أن أبحاث قليلة أجريت على استخدام عناصر تخزين الطاقة الحرارية الكامنة من جهة المكثف في البرادات المنزلية، استناداً إلى الأبحاث المنشورة حتى الآن [4]. يبين الجدول (1) ملخصاً للدراسات المرجعية المتاحة التي عملت على دراسة غمر أنابيب المكثف بالمواد المتحولة الطور أو إضافتها ضمن غلاف في الفراغ الموجود بين المكثف والعزل الحراري من الجهة الخلفية للبراد.

لم يتم بيان طريقة تحديد السماكة المثلى أو درجة حرارة الانصهار اللازمة لمادة التحول الطوري في جميع الدراسات المرجعية الواردة.

2- الإجراءات التجريبية

تم إجراء الاختبار اللازم على براد منزلي من طراز SD1107 في مختبرات شركة الحافظ في مدينة دمشق والموضحة مواصفاته في الجدول 2 عند درجة حرارة وسط محيط 33°C . حيث تم الحفاظ على درجة حرارة الوسط المحيط عن طريق مكيفين جداريين موضوعين في غرفة الاختبار المعزولة حرارياً بألواح الستيريوبور سماكة 5

CM. يحتوي براد الاختبار على حجرة المواد المجمدة وحجرة للمواد الطازجة. تم تحميل حجرة التجميد

جدول (1): ملخص الدراسات المرجعية

رقم المرجع	التوفير في استهلاك الطاقة	T_m (°C)	PCM	الطريقة المستخدمة في البحث	تاريخ البحث	اسم الباحث
5	12%	50.3	paraffin	التجريبية	2011	Wen-Long
6	12.2%	50.3	paraffin	العديدية	2013	Wen-Long
7	26%	50.3	paraffin	العديدية	2014	Xu-Dong
1	10%	34	Copolymer compound	التجريبية	2015	G. Sonnenrein
8	13%	38	Polyethylene glycol	التجريبية	2019	A. Pirvaram

4 Litter من الماء وحجرة المواد الطازجة 12 Litter من الماء. مقاييس درجة الحرارة من النوع K وتمت معايرتها قبل البدء بالتجربة ووصلها مع وسيلة الحصول على البيانات (Data Acquisition). درجة حرارة نقطة الضبط لحجرة البراد 5°C ويتوضع حساس درجة حرارة حجرة البراد في الجزء العلوي منه. تم وصل البراد بقباس الكهرباء واستمر بالعمل لمدة 10 ساعات متواصلة. يوضح الشكلين (1,a) و (1,b) صور البراد الأمامية والخلفية، كما يوضح الشكل 2 تغيرات درجات الحرارة مع الزمن لحساسين موضوعين في غرفة الاختبار. توضح الأشكال (3,a), (3,b), (3,c) تغيرات درجة حرارة بداية المكتف ووسطه ونهايته مع الزمن.

جدول (2) : مواصفات البراد المستخدم في التجربة

SD1107	طرز البراد
280 Litter	السعة
143 cm	الارتفاع
55 cm	العرض
64 cm	العمق
مكيسي	الضاغط
134a	الفريون
220 volt/ 50 Hz	التغذية
Roll and Band	المبخر
Wire and Tube	المكتف

لذلك تم في هذا البحث:

1. تحديد قيم درجة حرارة التكاثر وزمن عمل الضاغط وتوقفه خلال دورة عمل مستقرة له بشكل تجريبي في مختبرات شركة الحافظ للصناعات الميكانيكية في مدينة دمشق.

2. إجراء المحاكاة الحاسوبية باستخدام برنامج ANSYS16.1-Fluent لتحديد درجة حرارة الانصهار وسماكة مادة التحول الطوري اللازم وضعها بين مكثف البراد والعزل الحراري من الجهة الخلفية للبراد.

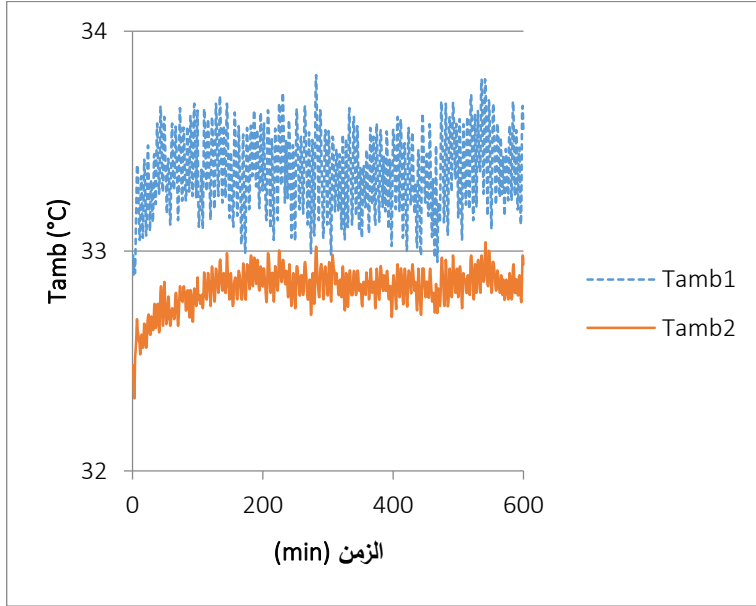


الشكل (1,a)

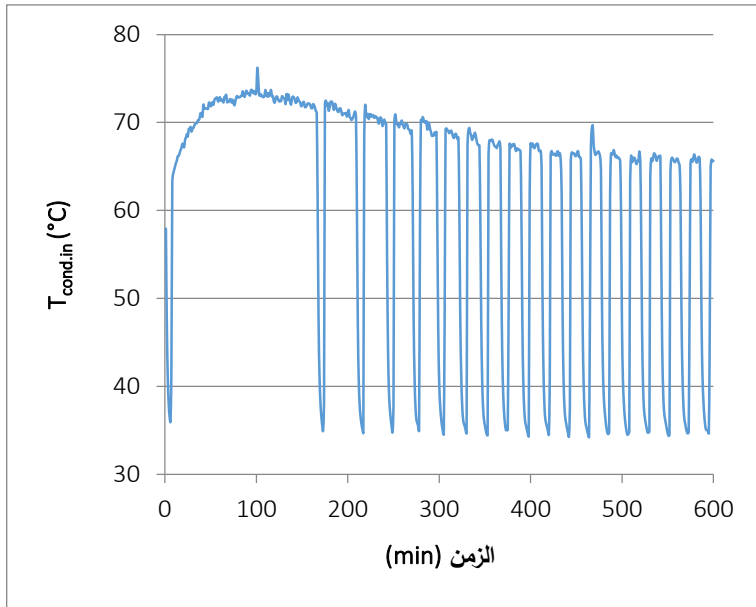


الشكل (1,b)

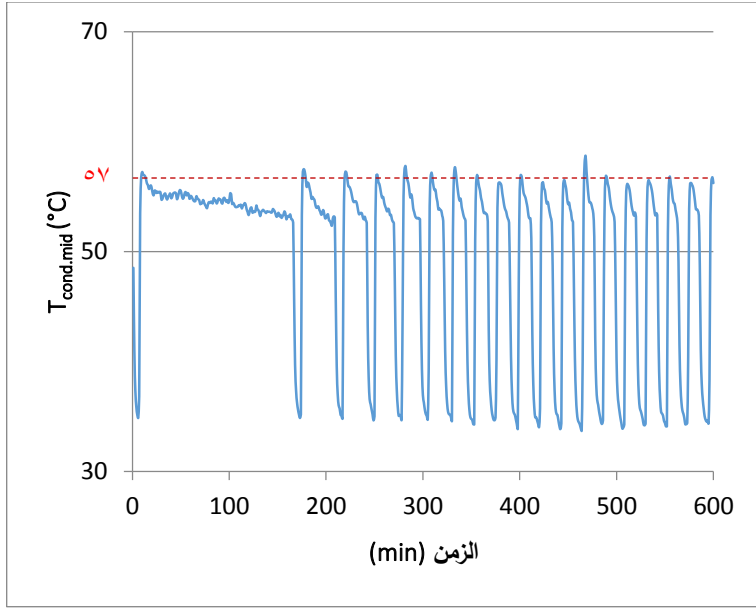
الشكلان: صور البراد (1,a) أمامية، (1,b) خلفية



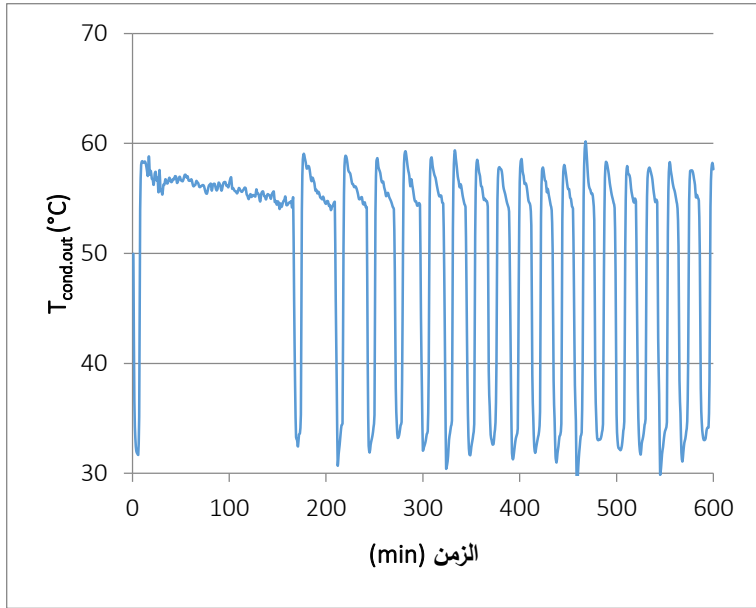
الشكل (2): تغيرات درجة حرارة الوسط المحيط مع الزمن



الشكل (3,a): تغيرات درجة حرارة بداية المكثف مع الزمن



الشكل (3,b): تغيرات درجة حرارة وسط المكثف مع الزمن



الشكل (3,c): تغيرات درجة حرارة نهاية المكثف مع الزمن

الملاحظ من الأشكال السابقة (3,a), (3b), (3,c) أن أول دورة عمل للضاغط استمرت 17 min حيث استمر الضاغط فيها بالعمل لمدة 166 min وتوقف عن العمل لمدة 7 min. ومع استمرار الضاغط بالعمل، ينخفض زمن دورته للوصول إلى حالته المستقرة. حيث استقر زمن دورة الضاغط 25 min يعمل فيها 10 min ويتوقف عن العمل 15 min. يظهر الشكل (3,b) أن درجة حرارة التكاثف الوسطية هي 57°C عند درجة حرارة وسط محيط 33°C .

3- المحاكاة الحاسوبية

الهدف من المحاكاة الحاسوبية هو تحديد درجة حرارة وسماكة مادة التحول الطوري اللازم وضعها خلف مكثف البراد لتخزين الطاقة الحرارية الناتجة عن تكاثف وسيط التبريد خلال فترة عمل الضاغط بالحالة المستقرة (10 min)، مما يؤدي إلى حدوث التحول الطوري (صلب - سائل)، وانتقال هذه الطاقة المخزنة إلى الوسط المحيط خلال فترة توقف الضاغط عن العمل (15 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 (33°C) ودرجة حرارة التكاثف (57°C). وفي حدود درجات الحرارة المذكورة يمكن استخدام أنواع متعددة من البارافينات كمادة تحول طوري لهذه الغاية. تم إجراء التجربة الحاسوبية على أربعة أنواع من البارافينات. يوضح الجدول (4) المواصفات الكيميائية والفيزيائية ودرجات حرارة الانصهار [9] للبارافينات المستخدمة في المحاكاة الحاسوبية على برنامج ANSYS16.1-Fluent.

الهدف من المحاكاة الحاسوبية هو تحديد درجة حرارة وسماكة مادة التحول الطوري اللازم وضعها خلف مكثف البراد لتخزين الطاقة الحرارية الناتجة عن تكاثف وسيط التبريد خلال فترة عمل الضاغط بالحالة المستقرة (10 min)، مما يؤدي إلى حدوث التحول الطوري (صلب - سائل)، وانتقال هذه الطاقة المخزنة إلى الوسط المحيط خلال فترة توقف الضاغط عن العمل (15 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 (33°C) ودرجة حرارة التكاثف (57°C). وفي حدود

درجات الحرارة المذكورة يمكن استخدام أنواع متعددة من البارافينات كمادة تحول طوري لهذه الغاية. تم إجراء التجربة الحاسوبية على أربعة أنواع من البارافينات. يوضح الجدول (4) المواصفات الكيميائية والفيزيا-حرارية ودرجات حرارة الانصهار [9] للبارافينات المستخدمة في المحاكاة الحاسوبية على برنامج ANSYS16.1-Fluent.

3-1- المعادلات الرياضية التفاضلية الناظمة للمسألة المدروسة

تم اعتماد نموذج معادلات انتقال الحرارة بالتوصيل غير المستقر أحادي البعد ضمن صفيحة كبيرة وشروط ستيفان لعملية التحول الطوري وفق التالي:

خلال عملية انصهار المادة المتحولة الطور (الضاغط يعمل):

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

$$T_{ini} = T_{amb} \text{ الشرط الابتدائي}$$

$$T_{sur} = T_c \text{ الشرط الحدي}$$

خلال عملية تجمد المادة المتحولة الطور (الضاغط متوقف):

$$k_s \frac{\partial 2T}{\partial x^2} = \rho c_s \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$T_{ini} = T_c \text{ الشرط الابتدائي}$$

$$T_{sur} = T_{amb} \text{ الشرط الحدي}$$

شرط ستيفان للسطح الفاصل بين الطورين السائل والصلب [10]:

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

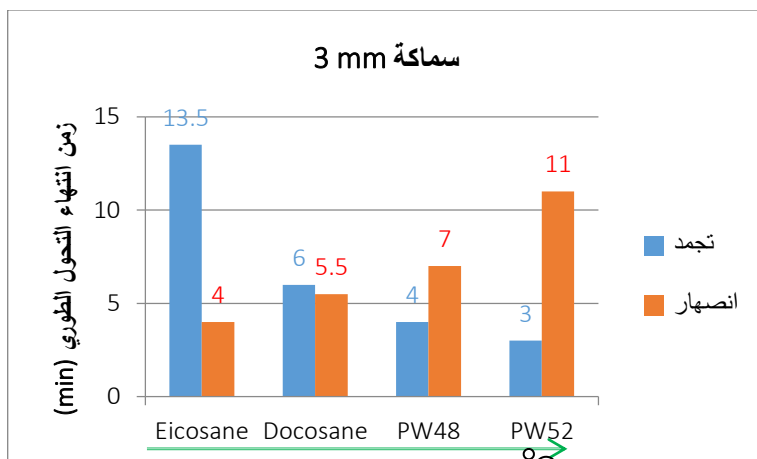
3-2- النتائج والمناقشة

تم اختيار ثلاث سماكات (3,4,5 mm) لكل نوع من البارافينات الواردة في الجدول (4). وضعت جميع البارافينات ضمن غلاف من الستانلس ستيل 304 بأبعاد 55 cm X 40 cm ذو الموصلية الحرارية 16.2 W/m.k سماكة 0.1 mm. يعتبر الستانلس ستيل غير قابل للتفاعل الكيميائي مع البارافينات [9]. تم إجراء 12 تجربة حاسوبية لمعرفة زمن انتهاء عمليتي التجمد 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 للواحد، وكذلك فإن عملية التجمد تنتهي عندما يصبح كسر التحول الطوري مساوياً القيمة صفر توضح الأشكال (4,a)، (4,b)، (4,c) زمن انتهاء عملية التجمد والانصهار للبارافينات المستخدمة في التجربة الحاسوبية عند السماكات 5,4,3 mm على الترتيب. نلاحظ من الأشكال (4,a)، (4,b)، (4,c) أنه بازياد درجة حرارة التحول الطوري يزداد زمن عملية الانصهار وينخفض زمن عملية التجمد و ذلك بسبب انخفاض الفرق بين درجة حرارة التكاثف ودرجة حرارة التحول الطوري وبالتالي انخفاض كمية الحرارة المتبادلة عند الانصهار، وارتفاع الفرق بين درجة حرارة التحول الطوري ودرجة حرارة الوسط المحيط وبالتالي زيادة كمية الحرارة المتبادلة عند التجمد.

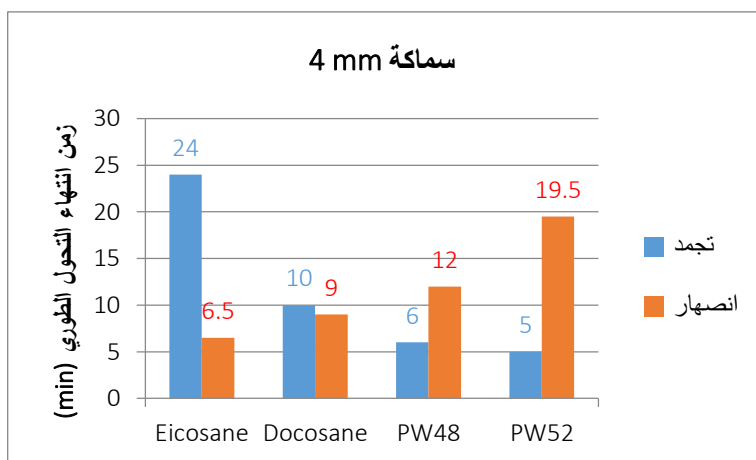
جدول (2): المواصفات الكيميائية والفيزيا-حرارية ودرجات حرارة الانصهار للبارافينات المستخدمة في المحاكاة الحاسوبية [9]

PW52	PW48	Docosane	Eicosane	البارافين
C_nH_{2n+2} $n = 24 - 36$	C_nH_{2n+2} $n = 24 - 36$	$C_{22}H_{46}$	$C_{20}H_{42}$	الصيغة الكيميائية
51.8	48.2	43.8	37.5	T_m (°C)
171	156	234	246	L (kJ/kg)
780	860	820	830	ρ (kg/m ³)
3	2.3	1.7	2	$C_{p,s}$ (kJ/kg.K)
2.1	2.3	2.2	2.6	$C_{p,l}$ (kJ/jg.K)
0.22	0.26	0.37	0.44	k_s (W/m.K)
0.15	0.2	0.24	0.23	K_l (W/m.K)

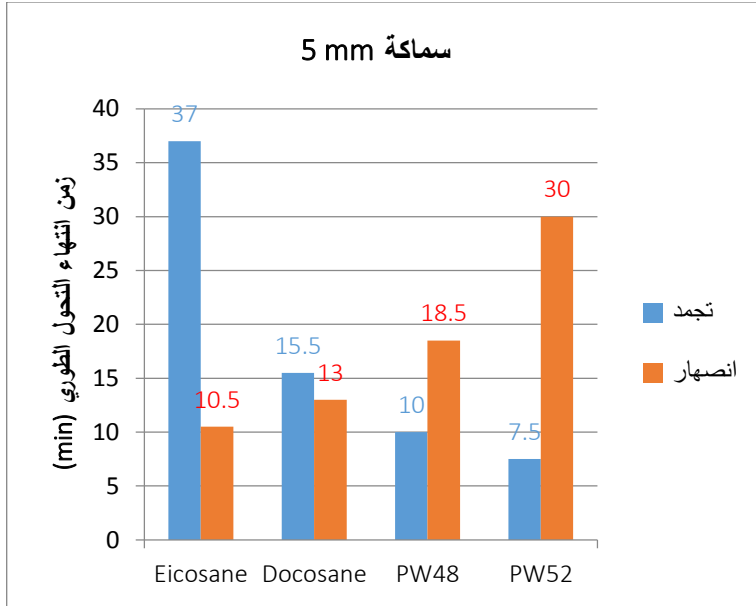


ازدياد درجة حرارة التحول الطوري

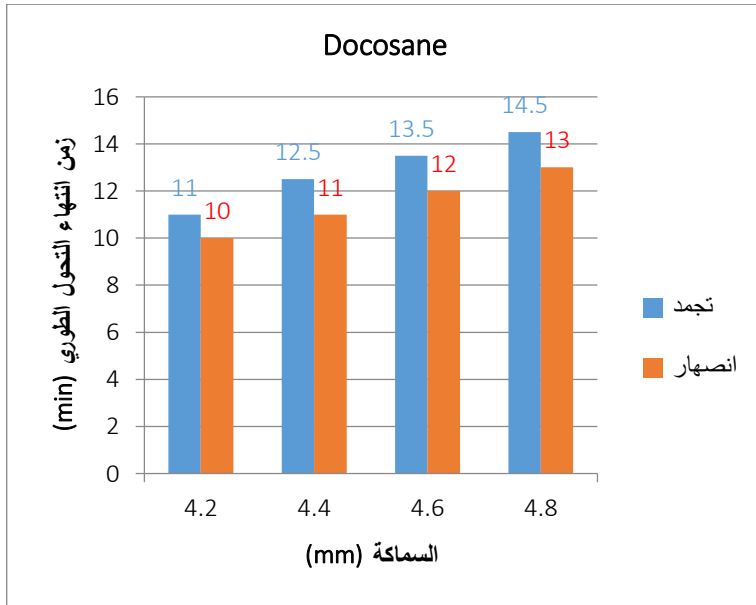
الشكل (4,a) زمن انتهاء التجمد والانصهار عند سماكة 3 mm



الشكل (4,b): زمن انتهاء التجمد والانصهار عند سماكة 4 mm

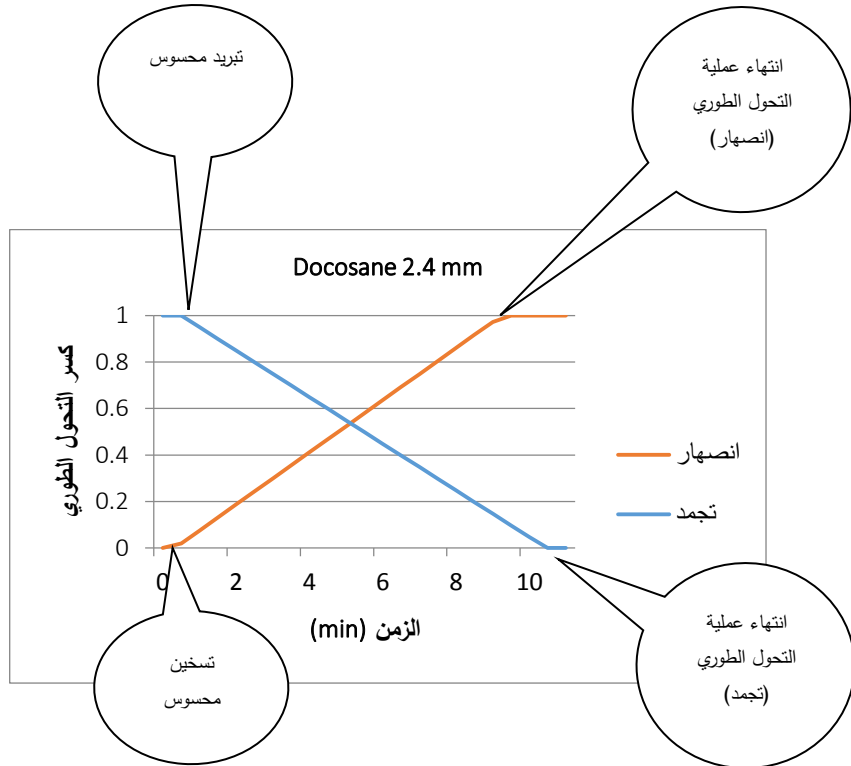


الشكل (4,C) زمن انتهاء التجمد والانصهار عند سماكة 5 mm



الشكل (5): زمن انتهاء التجمد والانصهار للبارافين Docosane عند سماكات مختلفة

يبين الشكل (5) زمن انتهاء عملية التحول الطوري للبارافين Docosane عند السماكات الواردة. عند اعتماد السماكة 4.2 mm فإن البارافين Docosane سينصهر خلال فترة عمل الضاغط (10 min) ويتجمد خلال 11 min مما يعني وجود فترة 4 min من دورة عمل الضاغط يكون فيها البارافين بطوره الصلب. وعند اعتماد السماكة 4.8 mm فإن جزءاً من البارافين لن ينصهر خلال فترة عمل الضاغط وسيكتسب طاقة محسوسة فقط. وبالتالي يمكن اعتماد أي قيمة من القيم 4.2, 4.4, 4.6, 4.8 mm لسماكة البارافين Docosane. يبين الشكل (6) العلاقة بين كسر التحول الطوري (تجمد وانصهار) مع الزمن للبارافين Docosane عند سماكة 4.2 mm. الملاحظ من الشكل أن زمن التبريد المحسوس والتسخين المحسوس هو صغير نسبياً بالمقارنة مع زمن عملية التحول الطوري، ويشكل مانسبته 9.5% ، 5.3% على الترتيب.



الشكل (6): علاقة كسر التحول الطوري مع الزمن للبارافين Docosane عند سماكة 2.4 mm

4- النتائج النهائية

تم في هذا البحث تحديد درجة حرارة وسماكة مادة التحول الطوري اللازم وضعها خلف مكثف البراد المنزلي لتخزين الطاقة الحرارية الناتجة عن تكاثف وسيط التبريد خلال فترة عمل الضاغط بالحالة المستقرة وهي 10 دقائق عند درجة حرارة وسط محيط مساوية 33°C وتعبئة حجرة التجميد وحجرة المواد الطازجة 4 Litter، 12 Litter من الماء على الترتيب وذلك بحسب التجربة التي أجريت على براد منزلي من طراز SD1107 في مخابر شركة الحافظ في مدينة دمشق. أجريت المحاكاة الحاسوبية على أربعة أنواع من البارافينات كمادة تحول طوري وهي Eicosane, Docosane, PW4, PW52 عند سماكات مختلفة لكل نوع. خلص البحث إلى إمكانية استخدام Docosane بسماكة 4.2-4.8 mm كوسط للتخزين الحراري الكامن للحرارة المطروحة من مكثف البراد المستخدم تحت الشروط الواردة في التجربة.

5- التوصيات

تضمن البحث الخطوات اللازم اتباعها لتحديد سماكة ونوع مادة التحول الطوري اللازم وضعها خلف مكثف البراد لتخزين الطاقة الحرارية الناتجة عن تكاثف وسيط التبريد والتي يمكن اتباعها لأي براد منزلي بحسب مواصفات البراد والبارامترات المؤثرة والواردة في البحث.

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

1. مع استخدام مواد التحول الطوري خلف المكثف 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.

دلالات الرموز المستخدمة

PCMs: المواد المتحولة الطور.

PW: البارافين.

k: معامل التوصيل الحراري. (W/m. K).

T: درجة الحرارة المطلقة. (K).

x: المسافة. (m).

c: السعة الحرارية. (J/kg. K).

t: الزمن. (s).

s: السماكة. (m).

L: حرارة التحول الطوري. (J/kg).

ρ : الكثافة. (kg/m^3).

الرموز السفلية

s: صلب.

l: سائل.

m: انصهار.

ini: الابتدائي.

قائمة المصادر والمراجع

- [1] 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, JIJR 2941. S0140-7007(14)00357.
- [2] MARCHI NETO, I, 2009, Refrigerator COP with thermal storage. Applied Thermal Engineering, VOL. 29. 2358-2364.
- [3] MEHLING, H, CABEZA, L.F, 2008. Heat and Cold Storage with PCM. An up to Date Introduction into Basics and Applications. Springer.
- [4] JIANG, SL, CHENG WL, 2007, Heat path analysis for hot-wall condensers of household refrigerators. Refrigeration and Air-Conditioning, VOL 7. 93-96.
- [5] WEN-LONG, C, 2011, A novel household refrigerator with shape-stabilized PCM (Phase Change Material) heat storage condensers: An experimental investigation. Energy, VOL. 36. 5797-5804.
- [6] WEN-LON, C, 2013, Numerical analysis of a novel household refrigerator with shape-stabilized PCM (phase change material) heat storage Condensers. Energy, VOL. 59. 265-276.
- [7] XU-DONG, Y, WEN-LONG, C, 2014, Multi-objective optimization of household refrigerator with novel heat-storage condensers by Genetic algorithm. Energy Conversion and Management, VOL. 84. 550–561.
- [8] PIRVARAM, A, SADRAMELI, S.M, ABDOLMALEKI, L, (2019). Energy management of a household refrigerator using eutectic environmental friendly PCMs in a cascaded condition. Energy, VOL.181. 321-330.
- [9] 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.
- [10] MYERS, T, 2019, “The Stefan problem with variable thermophysical properties and phase change temperature”. International Journal of Heat and Mass Transfer.