

استخدام المواد المتغيرة الطور في غرف التبريد

د.م. عاطف عامر⁽¹⁾

الملخص

يهدف تخفيض استهلاك الطاقة الكهربائية في غرف التبريد في أثناء أوقات ذروة استهلاك التيار الكهربائي، والحفاظ على درجة حرارة ثابتة في أثناء انقطاع التيار الكهربائي، أُجريت تجربتان لاستخدام المواد متغيرة الطور من خلال تصميم وتنفيذ مبادلات حرارية تحوي محلول ماء-كلوريد البوتاسيوم كوسيط تشغيل، واختُبرت في غرفة تبريد مخبرية. أُجريت ست تجارب للنظام المقترح، إذ جُمِدَ المحلول ليلاً، حيث تكون درجة حرارة الوسط الخارجي منخفضة، ومن ثم الاستفادة من الحرارة الكامنة للانصهار في الحفاظ على درجة حرارة ثابتة للغرفة في أثناء ساعات ذروة الاستهلاك الكهربائي، أو في أثناء انقطاع التيار الكهربائي. وتم تجريبياً التحقق من قدرة النظام المقترح في الحفاظ على درجة حرارة الغرفة دون 2°C مدة 3 ساعات ونصف.

الكلمات المفتاحية: مبادل حراري، دارة تبريد، مادة متغيرة الطور، معامل الأداء.

⁽¹⁾أستاذ مساعد ، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة دمشق.

Using Phase Change Materials in Cooled Storage Rooms

Dr. Atef Amer⁽¹⁾

Abstract

The purpose of this paper is to decrease the usage of the electrical power in cooled storage rooms, and maintain an appropriate temperature during the power outage by using Phase Change Materials (PCM) in cooled storage of fruits and vegetables, where we designed and fabricated heat exchangers containing Water-Potassium Chloride solution as a phase change material, and applied it in a testing cooling chamber.

Six experiments were done, where the PCM solidified at night, as the ambient temperature is low, and liquefied during the hours of high-power consumption, or power outage durations, taking advantage of the fusion latent heat. The ability of the proposed system was tested experimentally, and its capability was confirmed to maintain the chamber temperature below 2°C for 3 hours and a half.

Keywords: Heat Exchanger, Refrigeration Cycle, Phase Change Material, Coefficient of Performance

⁽¹⁾ Assistant Professor, Damascus University, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering.

1. مقدمة:

المطلوبة دون الحاجة لتشغيل الضاغط [9]. وتم التحقق من نتائج المحاكاة تطبيقياً، إذ تبين أنه يمكن الحفاظ على درجة الحرارة داخل البراد نحو 5 ساعات دون الحاجة لتزويد البراد بالطاقة الكهربائية [10]. من خلال غمر مبخر براد منزلي بمواد متغيرة الطور، والمقارنة بين الماء ومزيج إيوتكتيكي (ماء-كلوريد الصوديوم) كوسيطي تشغيل، تبين أن استخدام المواد متغيرة الطور يحول دون تذبذب درجة الحرارة في أثناء توقف الضاغط عن العمل [1]. كما أن المزيج الإيوتكتيكي يعطي فعالية أكبر في منع تذبذب درجة الحرارة من الماء، وذلك بسبب انخفاض درجة حرارة التحول الطوري له (-5°C)، مع أن حرارة التحول الطوري للماء أكبر [1]. ويبين الشكل (1) تغيرات درجة الحرارة في التجربة لحمل حراري 10W وكمية ماء ومحلول ملحي قدرها 4,25L.

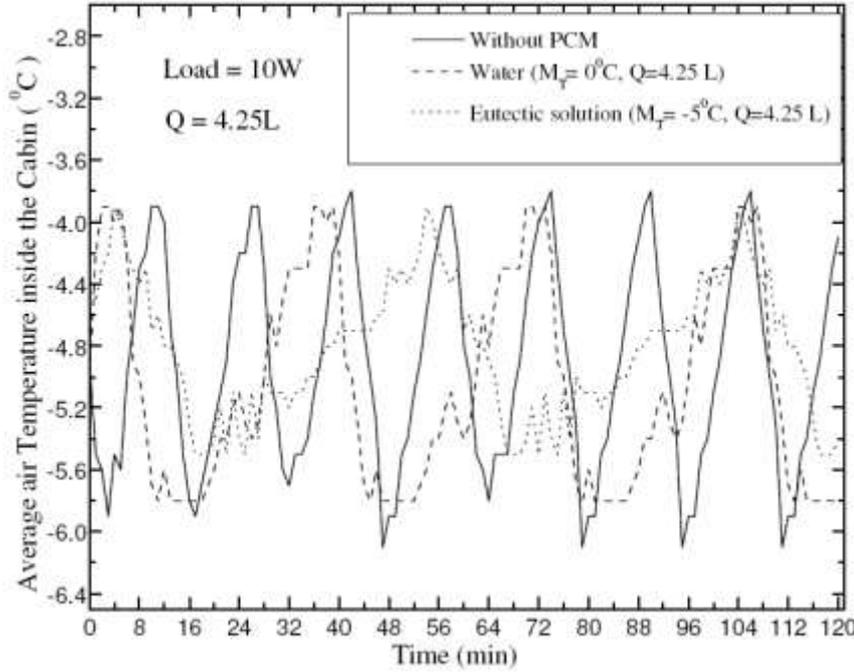
تبين من خلال استخدام إيثيلان غليكول كوسيط تشغيل، إذ تم غمر المبخر ضمنه، أن ارتفاع درجة حرارة حجرة التبريد من -25°C إلى -8°C استغرق 8 ساعات. في حين أن العملية استغرقت ساعة واحدة في حال عدم استخدام PCM [12]. وفي محاكاة عددية لاستخدام مزيج إيوتكتيكي (ماء-كلوريد الأمونيوم) متوضع في صفائح ضمن حجرة التجميد، تبين أن الزمن اللازم لارتفاع درجة الحرارة دون وجود PCM من -25°C إلى -8°C هو ساعة واحدة فقط، في حين أن الأمر استغرق 8 ساعات بوجود PCM، وتم التحقق من نتائج المحاكاة تطبيقياً [13].

إن ارتفاع تكاليف الطاقة، والتأثيرات البيئية للاستهلاك المتزايد للوقود الأحفوري أعطيا أهمية كبيرة لإيجاد مصادر بديلة ومستدامة للطاقة، والسعي لتحسين أداء أنظمة الاستهلاك. ولما كانت أنظمة تبريد المواد الغذائية تعد من الأنظمة الأكثر انتشاراً، لأنها توجد في كل منزل تقريباً (البرادات والثلاجات المنزلية)، وفي المراكز التجارية، وصولاً إلى غرف التبريد التي تعنى بالتخزين المتوسط والطويل الأمد، فإن تحسين أداء هذه المنظومات ينعكس إيجاباً على استهلاك الطاقة. كما أن ظاهرة انقطاع التيار الكهربائي في الدول النامية تمثل مشكلة لأنظمة تبريد الأغذية، إذ يمكن أن تراوح تأثيراتها بين انخفاض جودة الأغذية، وصولاً إلى تلفها كلياً.

تتأثر جودة المواد الغذائية بشدة بتذبذبات درجة الحرارة، إذ تؤدي إلى تغير بنيتها الفيزيائية نتيجة ظاهرتي إعادة تبلور جزيئات الماء داخل المادة، وتصعدها عند السطح [1]، ويتناقص تأثير هاتين الظاهرتين مع انخفاض درجة حرارة التخزين [2,3]. فضلاً عن ذلك، فإن زيادة درجة حرارة الحفظ وتذبذبها يسببان زيادة في الفقد بالوزن وانخفاض جودة الأغذية [4]. كما أن الأغذية تتعرض لإجهادات حرارية وتأثيرات تخفض من جودتها، من قبيل تأكسد الدهون وتغير اللون، نتيجة التغيرات في درجة حرارة الحفظ [5].

2. دراسة مرجعية لاستخدام المواد متحولة الطور:

أدى استخدام PCM في البرادات المنزلية إلى تحسين جودة المواد المحفوظة من خلال خفض التذبذبات في درجة حرارة الحفظ، فضلاً عن زيادة زمن توقف الضاغط عن العمل [6,7,8]. كما بينت المحاكاة العددية لاستخدام PCM في براد منزلي امكانية الحفاظ على درجة الحرارة



الشكل (1) تغيرات درجة الحرارة في براد منزلي عند استخدام وسيطي تشغيل، من أجل حمل حراري [W] 10

الحرارة °100 قيمة حدية لاستخدام الماء، وتُستبدلُ به في هذه الحالة الزيوت، أو الأملاح المنصهرة، أو المعادن السائلة [1].

التخزين الكامن: يعتمد على امتصاص أو تحرير الطاقة في أثناء عملية التحول الطوري لوسيط التشغيل. يبين الشكل (3) تغير درجة الحرارة في المواد المتحولة الطور في أثناء عملية التحول. تحسب كمية الحرارة المخزنة للمواد المتحولة الطور PCM من العلاقة: [11]

$$Q = m \left[c_{p,s} (T_m - T_i) + a_m \Delta h_{sf} + c_{p,l} (T_f - T_m) \right]$$

إذ: Q : كمية الحرارة المخزنة للمواد المتحولة الطور.

m : كتلة المادة المتحولة الطور.

$c_{p,s}$: السعة الحرارية للطور الصلب.

$c_{p,l}$: السعة الحرارية للطور السائل.

h_{sf} : الحرارة الكامنة للانصهار.

a_m : النسبة الكتلية للمادة المنصهرة.

من خلال استخدام PCM في غرفة تبريد، تبيّن حدوث تحسن 2% في معامل أداء الدارة، وذلك نتيجة عملها عند درجة حرارة تبخر أعلى، كما ترافق ذلك مع انخفاض في الحاجة لعملية إذابة الجليد عن المبخر [14].

1.2 أساليب التخزين الحراري:

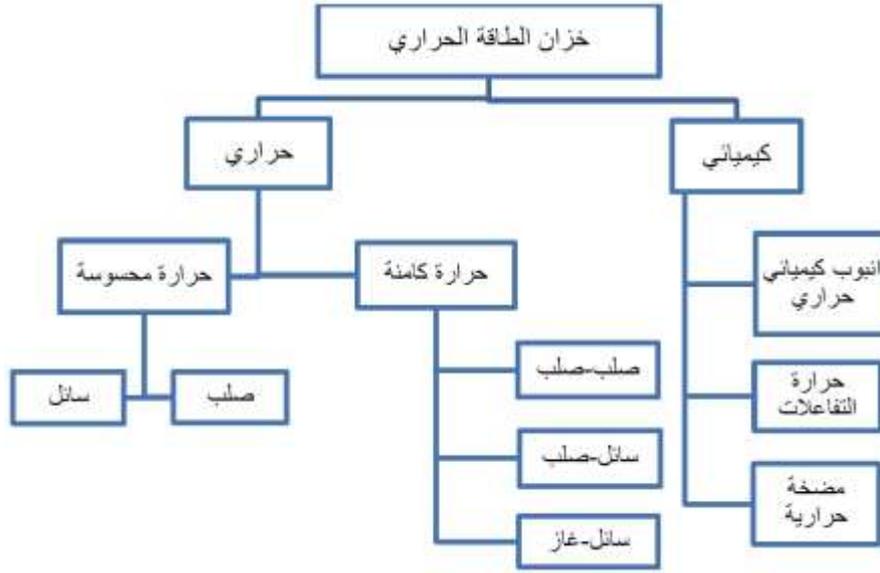
يمكن من خلال استخدام تقنيات التخزين الحراري الحد من التأثيرات السلبية لتغيرات درجة حرارة الحفظ، ويبيّن الشكل (2) الآليات الأساسية المستخدمة في التخزين الحراري [15].

التخزين المحسوس:

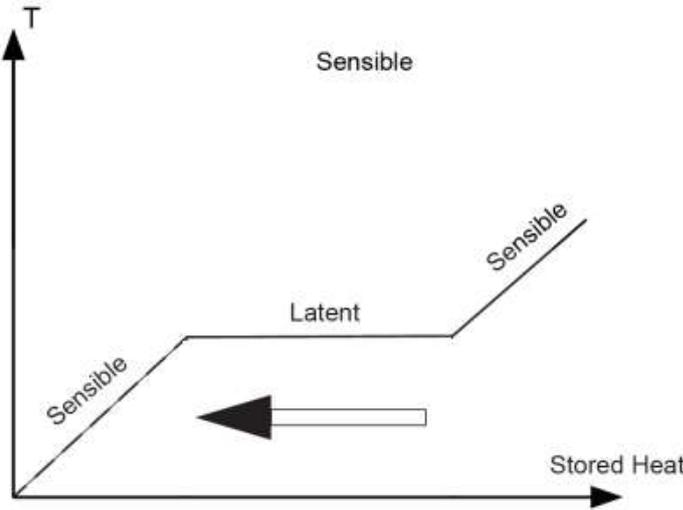
يعتمد على تغير درجة حرارة وسيط التشغيل في أثناء عمليتي التفريغ والشحن، وتتعلق كمية الحرارة المخزنة بالسعة الحرارية، وتغير درجة حرارة، وكمية وسيط التشغيل، وتعطى كمية الحرارة بالعلاقة:

$$Q = mc_p (T_f - T_i)$$

يمثل الماء أفضل الوسائط السائلة للتخزين المحسوس نظراً إلى توافره وارتفاع سعته الحرارية. لكن تمثل درجة



الشكل (2) آليات التخزين الحراري



الشكل (3) تغير درجة الحرارة في أثناء عملية التحول الطوري

الكهربائي، مع الحفاظ على درجة حرارة حجرة التبريد منخفضة. [16]

تعمل المبخرات إما بالحمل القسري أو الحمل الطبيعي، ومع أنّ الحمل القسري يؤدي إلى توزيع أفضل لدرجة الحرارة منه في الحمل الطبيعي، إلا أنه يؤدي إلى استهلاك أكبر للطاقة، كما يساعد على انتشار الروائح وزيادة الفقد

2.2 تطبيق PCM في أنظمة التبريد:

1.2.2 استخدام PCM من جهة المبخر:

نتيجة الحرارة الكامنة العالية لـ PCM، فإنّ تطبيقها من جهة المبخر يؤدي إلى زيادة في زمن توقف الضاغط عن العمل. وتبعاً لذلك، فإنّه يمكن إيقاف تشغيل دارة التبريد في ساعات ذروة الاستهلاك، أو في حالات انقطاع التيار

تغطية الحمل الحراري الناتج عن التسرب من الجدران وتنفس المادة المخزنة بعد مرحلة المعالجة التبريدية الأولية للتفاح. أبعاد الحجر هي $108 \times 114 \times 124 \text{cm}$. إذ أن جدرانها مصنوعة من ألواح من الفوم بسماكة 6cm، وموصلية حرارية 0.022W/m.K ، مغلفة بطبقتين من الفولاذ بسماكة 1mm وموصلية حرارية 25W/m.K ، مع وجود باب زجاجي للحجرة يسمح بعملية إدخال المواد وإخراجها، مؤلف من طبقتين بسماكة 4mm وفراغ هوائي 3mm، ومن ثم فإن معامل انتقال الحرارة للباب الزجاجي $3.3 \text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ ، ويُعزّل الباب طبقة من الستيروفوم بسماكة 5cm وموصلية حرارية 0.022W/m.K . يوضّح الشكل (4) مخططاً تمثيلاً لتوضع المبخر وشرائح الـ PCM وحساسات درجة الحرارة ضمن حجرة التبريد فضلاً عن صورة واقعية.

درجة الحرارة المطلوبة داخل الحجر 0°C والرطوبة النسبية 85%. والأحمال الحرارية للحجرة هي؛ حمل المعالجة التبريدية الأولية للمادة، إذ يُبرّد التفاح ليصل إلى درجة حرارة التخزين المطلوبة؛ حمل التسرب الحراري من الوسط المحيط، ودرجة حرارة الوسط المحيط هي 33°C والرطوبة النسبية 40%؛ حمل ناتج عن تهوية الحجر، وعدد مرات التهوية هو 4 مرات يومياً؛ حمل ناتج عن تنفس المنتج؛ حمل ناتج عن تشغيل حجرة التبريد، مثل الإشعاع الحراري لأجهزة الإضاءة والحرارة الناتجة عن عمل مراوح المبخر. وقد حُسِبَت كمية PCM بحيث تغطي الحمل الحراري بعد انتهاء عملية المعالجة التبريدية، وأن انتقال الحرارة يتم بالحمل الطبيعي، ومن ثم فإن الحمل الحراري للمعالجة التبريدية والحمل الناتج عن تشغيل حجرة التبريد معدومان. ومنه، فإن الحمل الحراري المطلوب تغطيته باستخدام PCM عند توقف الضاغط عن العمل هو حمل التسرب وحمل التنفس. يبيّن الجدول (1) قيم الأحمال

بالوزن نتيجة السرعة العالية للهواء [6] ويمكن من خلال استخدام PCM الحفاظ على توزيع منتظم لدرجة الحرارة في حالة الحمل الطبيعي، مما يؤدي إلى تحسن في شروط التخزين [10].

ويمكن زيادة فعالية النظام العامل بالحمل الطبيعي من خلال غمر المبخر في PCM إذ يؤدي التماس المباشر مع المبخر إلى زيادة معدل انتقال الحرارة من المبخر، وإمكانية تخزين الزيادة في الإنتاجية التبريدية [20] كما ينتج عن هذا التصميم زيادة في درجة الحرارة وفي ضغط التبخر، وانخفاض في الحجم النوعي لبخار وسيط التبريد، مما يؤدي إلى زيادة الإنتاجية التبريدية وانخفاض العمل المستهلك في الضاغط [17,19,20].

2.2.2 استخدام PCM من جهة المكثف:

يؤدي هذا الأمر إلى زيادة معدل انتقال الحرارة من المكثف، ومن ثم تخفيض درجة الحرارة التكاثرية وزيادة في تبريد سائل وسيط التبريد الخارج من المكثف، مما يؤدي إلى زيادة في الإنتاجية التبريدية ومعامل أداء الدارة [18] لا يمكن من خلال هذا التصميم الحفاظ على درجة الحرارة ضمن حجرة التبريد في حال انقطاع التيار الكهربائي.

صُمِّمَتْ وَنُفِّذَتْ مبادلات حرارية تتوضع داخلها المادة متغيرة الطور PCM للتحقق من إمكانية الاستفادة من الطاقة

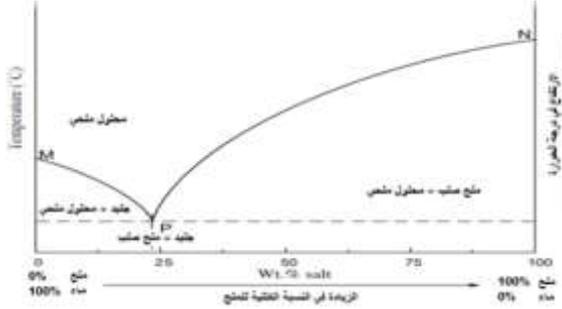
3. الإجراء التطبيقي:

الكامنة لها وإضافته إلى نموذج تجريبي لحجرة تبريد منفذة سابقاً في مخبر التبريد في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية في جامعة دمشق، بحيث يمكن الحفاظ على درجة حرارة منخفضة في حجرة التبريد في أوقات توقف الضاغط عن العمل. وأجريت التجارب في شهر حزيران عام 2018.

الغرض من الحجر هو تخزين التفاح، بحيث تكون سعة التخزين 272kg، إن استخدام PCM سوف يقتصر على

الحرارية للحجرة. بالتالي فإنَّ الحمل الحراري المطلوب
تغطيته بواسطة PCM هو 99W.

الحمل الطبيعي. إذ أن النقطة الإيوتكتيكية هي النقطة التي يحدث فيها التحول الطوري صلب-سائل للمزيج دون أن يحدث هناك انفصال لمكوناته، كما هو موضَّح في الشكل (5). ويوضَّح الجدول (2) الخواص الفيزيائية والحرارية للمزيج.



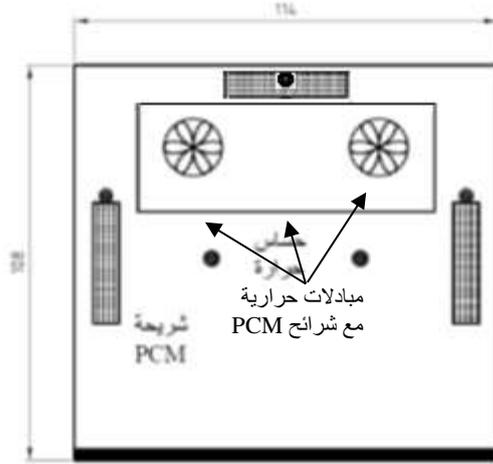
الشكل (5) المخطط الإيوتكتيكي لمحلول ماء-كلوريد البوتاسيوم

الجدول (2) الخواص الفيزيائية والحرارية لمزيج (ماء-كلوريد البوتاسيوم)

المزيج	نسبة المزج		درجة حرارة الانصهار [°C]	الكثافة [kg/m ³]	السعة الحرارية [kJ/kg.K]		الحرارة الكامنة للانصهار [kJ/kg]
	KCl	H ₂ O			سائل	صلب	
KCl+H ₂ O	19.5	80.5	-10.7	1140	3.127	0.58	283

1.3 مكونات دائرة التبريد:

تتألف دائرة التبريد الموجودة في المخبر من ضاغط Danfoss SC15CMX باستطاعة 950W عند درجة حرارة تبخر -15°C ، ومبخر هوائي (الحافظ) يعمل بالحمل القسري باستطاعة 1000W، ومكثف هوائي مناسب لاستطاعة الضاغط، فضلاً عن الأجهزة المساعدة. أُصِيفَتْ ثلاث مبخرات ثانوية على التفرع مع المبخر الأساسي - المسؤول عن عملية المعالجة الأولية للمادة المراد تخزينها - وذلك لتجميد PCM. يُعَيَّرُ مسار وسيط التبريد باستخدام صمامين كهربائيين، حيث تعمل الصمامات على توجيه وسيط التبريد إلى المبخر الأساسي في أثناء عملية المعالجة التبريدية الأولية. عند انتهاء عملية المعالجة الأولية



الشكل (4) مخطط تمثيلي وصورة لـحجرة التبريد والمبادلات المنفذ

الجدول (1) الأحمال الحرارية لحجرة التبريد

الحمل الحراري	[W]
حمل التسرب	86
المعالجة التبريدية	300
حمل التنفس	13
حمل الاستثمار	60

اختير مزيج إيوتكتيكي (ماء-كلوريد البوتاسيوم). ويمتاز هذا المزيج بأنَّ درجة الحرارة عند النقطة الإيوتكتيكية له تساوي -10.7°C ، ومن ثَمَّ فهي مناسبة للحفاظ على درجة حرارة صفرية ضمن الحجرة في حال

$$\alpha_{in} = 0.95 a V^{0.8} \rho^{0.2} \frac{A_{pipe}}{d_{in}} = 593.57 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

إذ:

a : ثابت يتعلق بوسيط التبريد المستخدم. V : السرعة

الوسطية لوسيط التبريد داخل الأنبوب.

ρ : كثافة سائل وسيط التبريد.

A_{pipe} : مساحة السطح الداخلي للأنبوب.

ومن ثم، فإن معامل انتقال الحرارة الكلي

$U = 96.487 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$. وتحسب مساحة سطح

التبادل الحراري من العلاقة:

$$A = \frac{\dot{Q}}{U \Delta T} = \frac{877}{96.487(15-10)} = 2.358 \text{ m}^2$$

الجدول (3) الخواص الفيزيائية والأبعاد المعتمد عليها في حساب معامل انتقال الحرارة الكلي

a	ثابت يتعلق بوسيط التبريد	1.22
ρ	كثافة سائل وسيط التبريد	30.41 kg/m ³
V	سرعة وسيط التبريد	3.22 m/s
d_{in}	القطر الداخلي للأنبوب	9 mm
d_{out}	القطر الخارجي للأنبوب	10 mm
λ_{pipe}	الموصلية الحرارية للأنبوب	390 W/m.K
λ_{PCM}	الموصلية الحرارية لـ PCM	0.858 W/m.K
δ_{PCM}	سماعة PCM	5 mm

3.3 تصميم المبادلات الحرارية:

يوضع خزان التبريد ضمن خزان نحاسي آخر أبعاده

$33 \times 30 \times 7 \text{ cm}$ ، يحوي ضمنه PCM، بما يضمن توزع

PCM بسماعة 5 mm على جوانب خزان التبريد. ويزود

خزان PCM ببريش من النحاس على سطحه الخارجي

لزيادة فعالية التبادل الحراري بين PCM وبين الهواء.

حُسِبَت كمية PCM اللازمة بحيث يتم الحفاظ على

درجة حرارة الحجر مدة 4 ساعات، وذلك في أثناء توقف

الضاغط عن العمل:

$$m = \frac{\dot{Q}_{gain} t}{h_{sf}} = \frac{99 \times 4 \times 3600}{283 \times 1000} = 5 \text{ kg}$$

إذ: h_{sf} : الحرارة الكامنة للتحويل الطوري [kJ/kg].

\dot{Q}_{gain}

يُحوَّل وسيط التبريد إلى المبخرات الثانوية. يبيّن الشكل (6) مخططاً تمثيلاً لدارة التبريد المستخدمة مع ربط المبادلات الحرارية التي صُمِّمَت.

2.3 تصميم المبخرات الثانوية:

يتألف كل مبخر ثانوي من وشيعة نحاسية. تُوضَع

الوشيعة ضمن خزان نحاسي أبعاده $6 \times 26 \times 32 \text{ cm}$ ،

وتغمر بمحلول مانع للتجمد (إيثيلين غليكول)، بحيث

يتحول الخزان كلاً إلى وشيعة تبريد تعمل على تجميد

PCM. يبيّن الشكل (7) توضع المبخر الثانوي ضمن

الخزان بوجود PCM، وقد صُمِّمَت هذه المبادلات ورُسمَت

على برنامج SolidWorks. كما حُسِبَت مساحة سطح

المبخرات الثانوية بناءً على الافتراضات الآتية:

• يتم التبادل الحراري بين وسيط التبريد و PCM بالتوصيل فقط.

• إهمال تأثير الجريان الناتج عن تغير كثافة PCM نتيجة

تغير درجة الحرارة في أثناء عملية التبريد.

حُسِبَ معامل انتقال الحرارة الكلي من العلاقة [21]،

وذلك بناءً على الخصائص الفيزيائية في الجدول (3):

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{in}} + \frac{\delta_{PCM}}{\lambda_{PCM}} + \frac{1}{2\pi\lambda_{pipe}} \ln \frac{d_{out}}{d_{in}}}$$

إذ:

U : معامل انتقال الحرارة الكلي.

α_{in} : معامل انتقال الحرارة بالحمل داخل الأنابيب.

δ_{PCM} : سماعة طبقة PCM.

λ_{PCM} : الموصلية الحرارية لـ PCM.

λ_{pipe} : الموصلية الحرارية لمعدن الأنبوب.

d_{out} : القطر الخارجي للأنبوب.

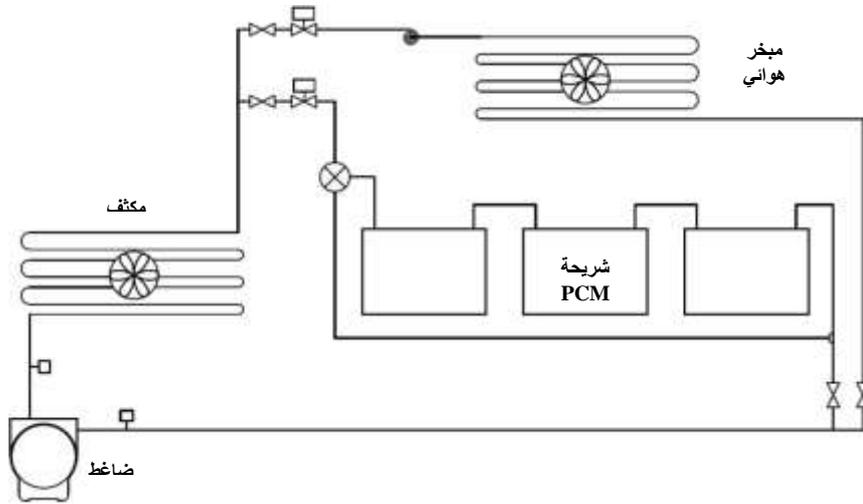
d_{in} : القطر الداخلي للأنبوب.

ويحسب معامل انتقال الحرارة بالحمل لوسيط التبريد

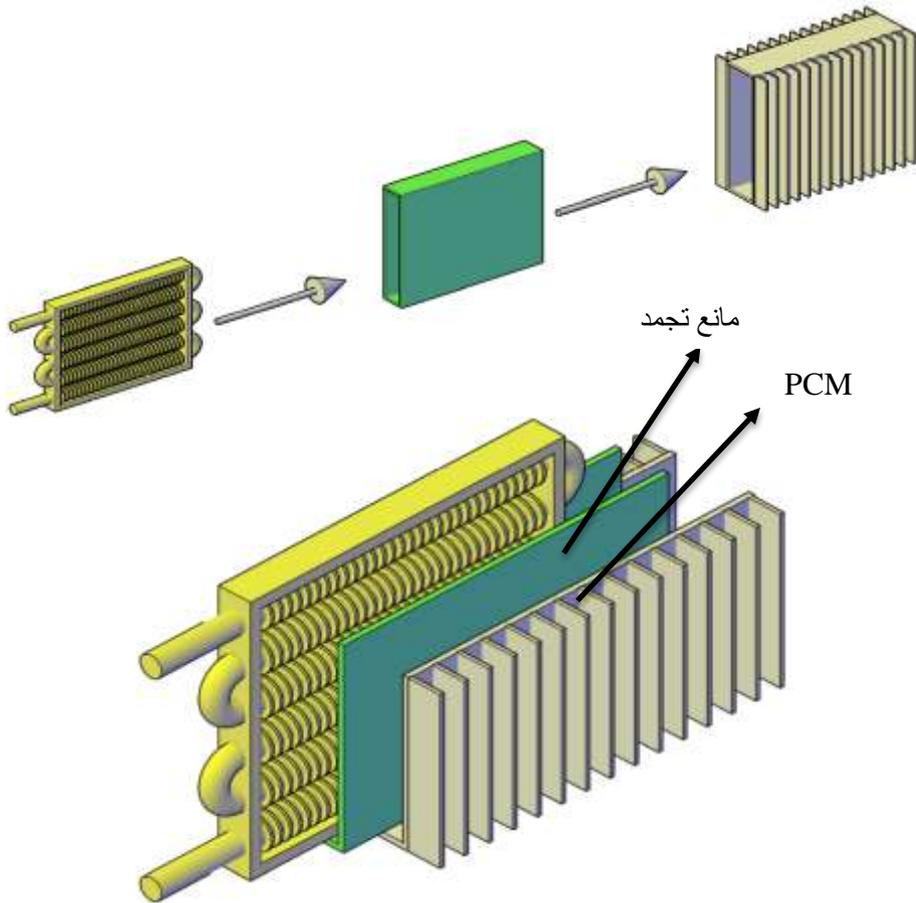
داخل الأنبوب من العلاقة: [21]

د.م. عاطف عامر . استخدام المواد المتغيرة الطور في غرف التبريد

وَمِنْ ثَمَّ فَإِنَّ حَجْمَ شَرَائِحِ PCM الثَّلَاثِ
 $V = 4.21 \times 10^{-3} \text{ m}^3$



الشكل (6) مخطط تمثيلي لدارة التبريد المستخدمة



الشكل (7) مخطط توضيحي للمبخّر الثانوي وخبزان PCM

كما صُمِّمَتِ الريش بحيث تكون ذات توازن شاقولي ويطول مساوٍ لارتفاع الشريحة $W=0.3m$ ، وسماكة $t=0.6mm$. حُسِبَ ارتفاع الريش من أجل مردود للريشة $\square = 90\%$. بالتالي يحسب ارتفاع الريشة من مخطط كفاءة الريش المستوية بالعلاقة [22]:

$$\xi = (L + 0.5t) \sqrt{\frac{\alpha}{\lambda_{cu} t}} = 0.13 \Rightarrow L = 0.03 m$$

\square_{cu} : الموصلية الحرارية للنحاس.

ومنه، فإن معدل انتقال الحرارة للريشة الواحدة [22]:

$$\dot{Q}_{fin} = \eta \alpha A_{fin} \Delta T = 0.43 W$$

إن عدد الريش التي استُخِدِمَت على سطح الشرائح هو 192 ريشة. ومن ثَمَّ فإنَّ معدل انتقال الحرارة لمجموع الريش فضلاً عن السطح غير المریش $100W$. أي إنَّ المساحة الكلية لسطح الشرائح كافية لتغطية حمل التسرب الحراري.

4.3 القياسات التجريبية:

أُجْرِيَتِ ست تجارب لاستخدام PCM في حجرة التبريد، وقُورِنَتِ بأداء الحجرة دون وجود PCM، حيث تم أخذ قراءات درجة الحرارة ضمن فواصل زمنية قدرها 15 دقيقة، وذلك باستخدام حساسات حرارة دقتها $0.1^\circ C$.

استُخِدِمَ حساسان لقياس درجة حرارة الهواء في الحجرة. كما قيسَتِ درجة الحرارة على سطح شرائح PCM، وذلك لتتبع عملية التحول الطوري وتأثيرها في درجة حرارة الحجرة. يوضِّح الشكل (4) توزُّع حساسات الحرارة ضمن الحجرة.

يبين الجدول (4) قيم درجة الحرارة والرطوبة النسبية للجو المحيط عند إجراء التجارب في مخبر التبريد في كلية الهمك في شهر حزيران 2018.

من أجل مساحة سطح التبادل الحراري بين شرائح PCM والهواء نفرض الهواء غازاً مثالياً عند الضغط الجوي، وأن التدفق الحراري مسقر. ونظراً إلى أنَّ انتقال الحرارة يتم بالحمل الطبيعي، فإن معامل انتقال الحرارة بالحمل يحسب من العلاقة [21]:

$$Ra = \frac{g \beta \Delta T H^3 Pr}{\nu^2}$$

$$= \frac{9.81 \times \frac{1}{273} \times (0 - 10.7) \times 0.3^3 \times 0.707}{(13.28 \times 10^{-6})^2}$$

$$= 41.62 \times 10^{-6} < 10^{-9}$$

إذ:

Ra: عدد راييلي.

g: تسارع الجاذبية.

β : معامل التمدد الحجمي للهواء.

ΔT : فرق درجات الحرارة بين الهواء وسطح الشرائح.

H: ارتفاع شريحة PCM.

Pr: عدد براندل للهواء.

ν : اللزوجة الحركية للهواء.

$$[21] \quad Nu = 0.59 Ra^{0.25} = 47.4$$

$$\alpha = \frac{Nu \lambda_a}{H} = \frac{47.7 \times 0.0244}{0.3} = 3.88 W/m^2 \cdot K$$

\square_a : الموصلية الحرارية للهواء.

ومن ثَمَّ، من خلال تطبيق قانون نيوتن في التبريد على الهواء الملامس لشرائح PCM فإنَّ مساحة سطح التبادل الحراري اللازمة هي:

$$A = \frac{\dot{Q}}{\alpha \Delta T} = 2.22 [m^2]$$

تم تزيين السطح الخارجي للشرائح من أجل زيادة فعالية انتقال الحرارة، وتحقيق مساحة سطح التبادل الحراري اللازمة.

الحرارة مع PCM، الذي يؤدي إلى تدفق حراري كبير نسبياً.

• خلال المرحلة الرابعة، تتباطأ سرعة تغير درجة حرارة PCM، وذلك نتيجة تناقص الفرق بين درجة حرارة الشرائح والهواء في الحجرة. وبالمقابل، يتسارع التغير في درجة حرارة الهواء، وذلك نتيجة انخفاض فعالية التبادل الحراري مع الشرائح، مما يؤدي إلى ظهور تأثيرات التسرب الحراري من الوسط المحيط بشكل أكبر.

• نلاحظ أن استخدام PCM في النظام المقترح أدى إلى الحفاظ على درجة حرارة هواء حجرة التبريد ضمن الحدود المطلوبة مدة تصل إلى 3 ساعات ونصف، على الرغم من عدم تزويد الحجرة بالطاقة الكهربائية لتشغيل الضاغط أو المراوح. كما أن هذا التطبيق أعطى تذبذباً ضئيلاً في درجة حرارة الهواء بالمقارنة بحالة عدم استخدام PCM، الأمر الذي ينعكس إيجاباً على جودة المواد المخزنة. وتجدر الإشارة إلى أن وجود مواد غذائية مخزنة ضمن الحجرة سوف يؤدي إلى تباطؤ أكبر في تغير درجة حرارتها، نتيجة المقاومة الحرارية التي تبديها هذه المواد.

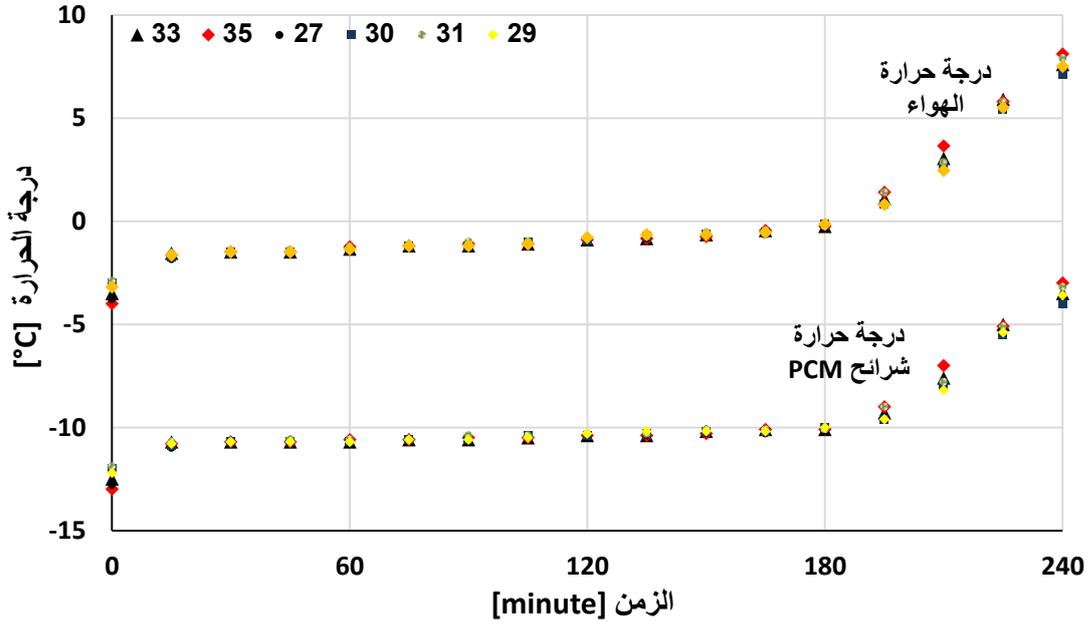
الجدول (4) قيم درجات الحرارة والرطوبة النسبية للهواء الخارجي

درجة الحرارة [°C]	الرطوبة النسبية %
33	42
35	37
27	44
30	40
31	42
29	40

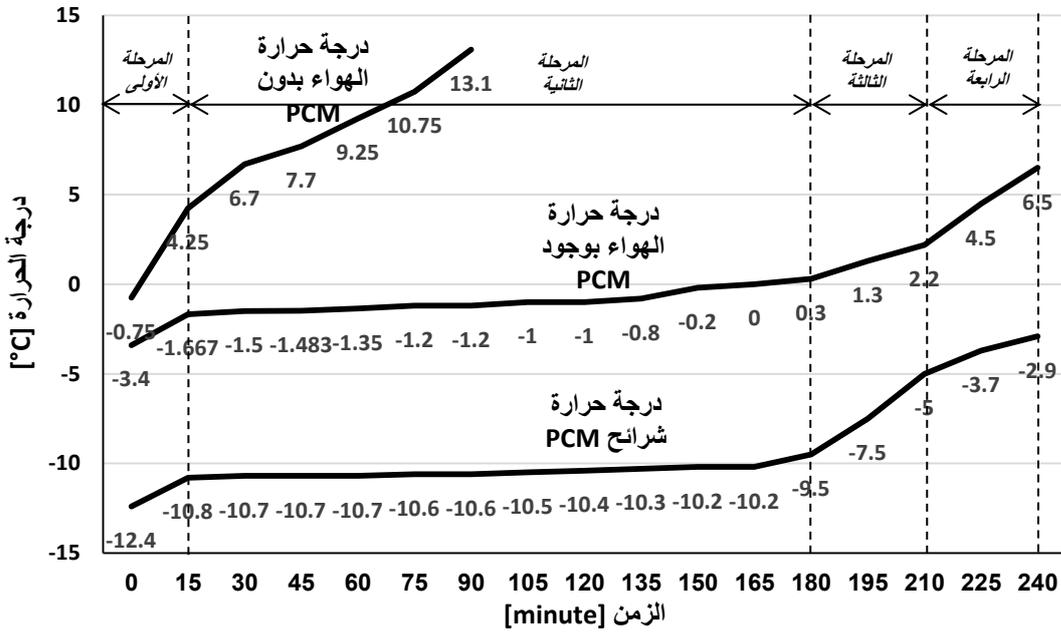
بعد ذلك أخذ المتوسط الحسابي لدرجة حرارة الهواء في الحجرة، والمتوسط الحسابي لدرجة حرارة الشرائح وفُورنا. يبيّن الشكل (8) تغير درجات الحرارة في كل من التجارب الست كتابع للزمن.

4. النتائج والمناقشة:

- يوضّح المخطط (9) المتوسط الحسابي لدرجات حرارة الشرائح، وهواء الغرفة بوجود الشرائح، وفي حال عدم وجودها.
- يمكن تقسيم الشكل إلى أربعة مجالات:
- خلال المرحلة الأولى، يحدث ارتفاع في درجة حرارة شرائح PCM مع بقائها في طور التجمد. أي إنّ التبريد يحدث بشكل محسوس.
- خلال المرحلة الثانية، تتغير درجة حرارة شرائح PCM تغيراً طفيفاً، وذلك نتيجة عملية انصهار وسيط التشغيل، التي تعمل على مقاومة تغيرات درجة الحرارة في الشرائح. يلاحظ في هذه المرحلة أن درجة حرارة هواء الحجرة تتغير بحدود درجة واحدة فقط خلال 3 ساعات تقريباً.
- خلال المرحلة الثالثة، يحدث تغير متسارع في درجة حرارة الشرائح. يفسر هذا الأمر بانصهار كامل كمية PCM، والفرق في درجات الحرارة بين الشرائح وهواء الحجرة. تحافظ درجة حرارة الحجرة على معدل التغير نفسه في المرحلة الثانية، وذلك نتيجة فرق درجات



• الشكل (8) تغير درجات الحرارة في التجارب الست.



الشكل (9) تغير درجة الحرارة الوسطية لشرائح PCM، ودرجة حرارة هواء الغرفة

5. الاستنتاجات:

التيار الكهربائي، كما يؤدي إلى توفير في تكاليف التشغيل، إذ أن تكلفة توليد التيار الكهربائي باستخدام المولدات تمثل عبئاً على المستثمرين، نظراً إلى إمكانية

• يمثل استخدام المواد متغيرة الطور في النظام المقترح حلاً فعالاً لمشكلة حفظ المواد الغذائية في أوقات انقطاع

- القيام بعملية تجميد PCM في أوقات توفر التيار والإفادة منها في الحفاظ على درجة حرارة مناسبة في فترات انقطاع التيار.
- يمكن من خلال استخدام شرائح PCM على التفرع مع المبخر الرئيس لدارة التبريد تحقيق وفر في استهلاك الطاقة الكهربائية والحفاظ على درجة حرارة مستقرة داخل غرف التبريد، وذلك من خلال تخفيض عدد مرات تشغيل الضاغط، وتجنب تشغيل الدارة في ساعات الذروة، التي تترافق مع تكاليف أعلى للكهرباء.
 - تحدث عملية التبادل الحراري بين هواء الحجرة وسطح شرائح PCM بالحمل الطبيعي، مما يؤدي إلى الحفاظ على رطوبة نسبية عالية داخل الحجرة. ينتج عن ذلك انخفاض في نسبة الفقد في وزن المادة المخزنة نتيجة انخفاض معدل التبخر من سطحها.
 - يؤدي استقرار درجة الحرارة داخل الحجرة في أثناء العمل على شرائح PCM إلى عدم حدوث انصهار لبلورات الماء الموجود داخل المادة المخزنة، مما يؤدي إلى الحفاظ على جودة المادة وبنيتها.
 - يوصى إجراء المزيد من التجارب بوجود المادة المراد حفظها، وذلك لدراسة التأثير المتراكب للتخزين الحراري للمادة وشرائح PCM.

12. Ahamed,MM. Kannakumar,J. P.M Reddy “Experimental Investigation on the Performance Analysis of Cold Storage Plant Using with and without Phase Change Material (PCM)”, International Journal of Scientific Engineering and Research Vol1, 2013.
13. Gin,B. Farid,M.M. Bansal P. “Modeling of Phase Change Material Implemented into Cold Storage Application”, HVAC&R Research, 17:3, 257-267, 2011.
14. Baffa,J. “Phase Change Material and Controls Study”, Emerging Technologies Program, San Diego Gas & Electric, 2016.
15. Baylin,F. “Low Temperature Thermal Energy Storage: A State of the Art Survey”, Report no. SERI/RR-54-164, Golden, Colorado, USA: Solar Energy Research Institute, 1979.
16. Oró,E. Miró,L. Farid,M.M. Cabeza, L.F. “Improving Thermal Performance of Freezers Using Phase Change Materials, Int. J. Refrig. 35 (4), pp 984–991, 2012.
17. Khan,M.I.H. Afroz,H.M. “Effect of Phase Change Material on Performance of a Household Refrigerator”, Asian J. Appl. Sci. 6 (2), pp 56–67, 2013.
18. Cheng,W.L. Mei,B.J. Liu,Y.N. Huang,Y.H. X.D. Yuan, “A Novel Household Refrigerator with Shape-Stabilized PCM (Phase Change Material) Heat Storage Condensers: An Experimental Investigation”, Energy 36 (10), pp 5797–5804, 2011.
19. Rahman,M. Hossain,A. Das,S.K. Hasan, R. Adnan “Performance Improvement of a Domestic Refrigerator by using PCM (Phase Change Material)”, Glob. J. Res.Eng. 13 (10), 2014.
20. . Visek, M Joppolo,C.M. Molinaroli, L. Olivani, A. “Advanced Sequential Dual Evaporator Domestic Refrigerator/Freezer: System Energy Optimization”, Int. J. Refrig. 43, pp 71–79, 2014.
21. Bergman,T.L. Lavine,A.S. Incropera,F.P. Dweitt, D.P. “Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 7th ed.”, John Wiley & Sons, Inc, 2011.
22. Çengel,Y.A. Ghajar,A.J. “Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications, 5th ed.”, McGraw-Hill Education, 2015

References

1. Khan,I.H. Afroz,H. “Diminution of Temperature Fluctuation inside the Cabin of Household Refrigerator using Phase Change Material”, International Journal of Recent advances in Mechanical Engineering Vol.3, No.1, 2014.
2. Canet, W. “Quality and Stability of Frozen Vegetables”, In: Thorne, S. (Ed.), Developments in Food Preservation, Elsevier, London, pp. 1–50, 1989
3. Alvarez,M.D. Canet,W. “Effect of Temperature Fluctuations during Frozen Storage on the Quality of Potato Tissue”, Zeitschrift Fur Lebensmittel-Untersuchung Und Forschung Afood Research and Technology 206, pp 52–57, 1998.
4. Phimoksiripol,Y. Siripatrawan,U. Tulyathan,V. Cleland,D.J. “Effects of Freezing and Temperature Fluctuations during Frozen Storage on Frozen Dough and Bread Quality”, Journal of Food Engineering, Vol. 84, No.1 pp 48-56, 2008.
5. Gormley,R. Walesh,T. Hussey, K. Butler, F. “The Effect of Fluctuating vs. Constant Frozen Storage Temperature Regimes on some Quality Parameters of Selected Food Products”, Lebensm. Wiss. Technol. 35, pp 190-200, 2002.
6. Maltini,E. Cortella,G. Stecchini,M. Deltorre, M. Pittia, P. Spaziani, M. Mansutti,G. “Design and Performances of a Constant Temperature Compartment for Domestic Refrigerator”, International Congress on Engineering and Food, Montpellier, 2004.
7. Zalba, B. Marin,J.M. Cabeza,L.F. H. Mehling, “Review on Thermal Energy Storage with Phase Change: Materials, Heat Transfer Analysis and Applications”, Appl. Therm. Eng. Vol. 23, No. 3, pp 251–283, 2003.
8. Subramaniam,P. Tulapurkar,C. Thiyagarajan, R. Thangamani,G. “Phase Change Materials for Domestic Refrigerators to Improve Food Quality and Prolong Compressor off Time”, Int. Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, 2010.
9. Gin, B. Farid,M.M. Bansal, P.K. “Effect of Door Opening and Defrost Cycle on a Freezer with Phase Change Panels”, Energy Conservation and Management, Vol. 51, No. 12, pp 2698- 2706, 2010.
10. Gin,B. Farid, M.M. “The Use of PCM Panels to Improve Storage Condition of Frozen Food”, Journal of Food Engineering, Vol. 100, 2010.
11. Flores,A.A, Goff,H.D. “Re-Crystallization in Ice Cream after Constant and Cycling Temperature Storage Conditions as Affected by Stabilizers” Journal of Dairy Science Vol. 82, No. 7, pp 1408–1415, 1999.

Received	2019/3/17	إيداع البحث
Accepted for Publ	2019/7/3	قبول البحث للنشر