

تأثير إضافة الزعانف في كمية الطاقة المخزنة في نظام التخزين الحراري الكامن

د. م. بسام بدران⁽¹⁾

الملخص

يعدُّ الاختيار المناسب لأبعاد الخزان الحراري الكامن مهماً جداً في تحديد كمية الطاقة الحرارية المخزنة وسرعة شحن تلك الطاقة المخزنة وتفريغها. في هذه الورقة، قُورنَ بين خزانين حراريين بالأبعاد نفسها (10×10×100 سم)، أحدهما يحتوي على ثلاث زعانف نحاسية متباعدة بمقدار 3.3 سم فيما بينها، والآخر لا يحتوي على زعانف نحاسية. طول الزعانف النحاسية 50 سم وبسماكة 1 ملم. المواد المتغيرة الطور التي استُخدمت في هذه التجربة هي الماء الطبيعي. تم إختبار سطح التبريد (سطح تصريف الحرارة) عند درجة حرارة ثابتة وقدرها (18°C-). دلت النتائج التجريبية على أن إضافة الزعانف النحاسية في نظام التخزين الحراري الكامن أدى إلى زيادة سرعة انتشار موجة التخزين بنحو 46% وزيادة الطاقة المخزنة بنحو 54% مدة 24 ساعة تشغيل مستمرة.

الكلمات المفتاحية: نظام التخزين الحراري الكامن، التخزين الحراري، الحرارة الكامنة، المواد المتغيرة الطور، زعانف نحاسية.

⁽¹⁾ أستاذ مساعد، قسم ميكانيك عام، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة دمشق، سورية.

The Effect of Adding Fins on the Amount of Power Storage in Latent Heat Thermal Storage System (LHTES)

Ph. D. Bassam E. Badran⁽¹⁾

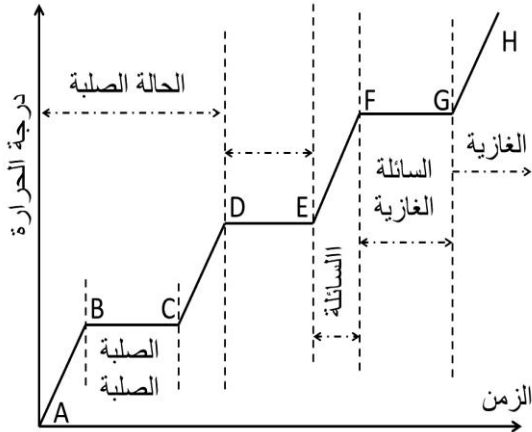
Abstract

The right choice of the dimensions of the heat storage tank is very important in determining the amount of stored thermal power and the speed of charging and discharging that stored energy. In this paper, we have compared two tanks with the same dimensions (10*10*10 cm), one with three copper fins spaced 3.3 cm from each other and another without any fins. The length of the copper fins is 50 cm with a thickness of 1 mm. The phase change material used in this experiment is regular water. The cooling surface (heat sink reservoir) was at a temperature of (-18°C). Experimental results showed that adding copper fins into latent heat thermal storage system produce an increase in the interface speed by 46% and an increase of energy stored by 54% for a period of 24 hours of continuous operation.

Keywords: Latent Heat Thermal Storage System (LHTES), Thermal Storage, Latent Heat, Phase Change Materials, Copper Fins.

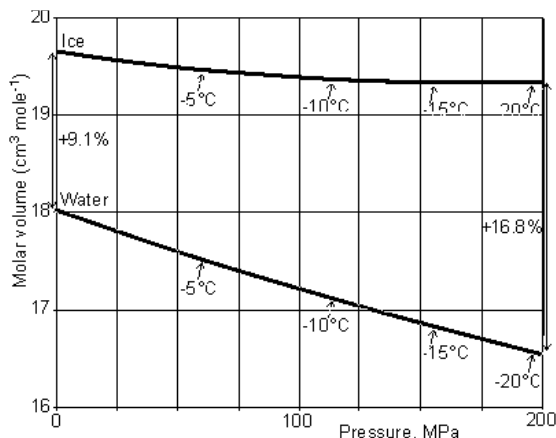
⁽¹⁾ Associate Professor, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Damascus University, Syria.

1- المقدمة:



الشكل (1) التحولات الطورية في المادة.

تكون كمية الطاقة المخزنة في التحول الطوري صلباً - صلباً الموافق للمنطقة (B - C) صغيرة جداً بسبب التغير الصغير في البنية الذرية للمادة. أمّا في التحول الطوري سائل - غاز الموافق للمنطقة (F - G) فيكون التغير في الحجم النوعية كبيراً جداً نتيجة تحول المادة من الحالة السائلة إلى الحالة الغازية. أمّا في التحول الطوري صلب - سائل الموافق للمنطقة (D - E) فيتميز بأن التغيرات في الحجم النوعية صغيرة، وأن الكثافة الطاقية كبيرة نسبياً وتقدر بنحو (100 kWh/m³). على سبيل المثال يبيّن الشكل (2) التغير الحجمي للماء كمادة متغيرة الطور في التحول الطوري صلب (ثلج) - سائل (ماء) إذ يقدر هذا التغير عند درجة الحرارة (0°C) بنحو (9.1%)، ويصبح (16.8%) عند درجة حرارة (-20°C).



الشكل (2) التغير الحجمي للماء في التحول الطوري صلب - سائل [2].

مع تزايد النمو السكاني والتطور الصناعي والتكنولوجي الذي نشهده في عصرنا هذا ازداد الطلب على الطاقة وتسارع بوتيرة عالية جداً؛ الأمر الذي أدى إلى البحث عن حلول لردم الهوة بين تنامي الطلب على الطاقة من ناحية وإنتاجها وتأمينها على المدى البعيد من ناحية أخرى. طُرِح العديد من الحلول لتفادي توسع هذه الهوة ومنها:

- إيجاد منابع طاقة متجددة كالطاقة الشمسية والطاقة الجيوحرارية والريحية قابلة للاستثمار بشكل غير مكلف.
- تخفيض استهلاك الطاقة إلى الحدود الدنيا من خلال ترشيد الطاقة في الأبنية والمعامل (استهلاك الكهرباء).
- تخزين الطاقة في الأوقات البعيدة عن الذروة واستجراها في الذروة؛ وهنا تبرز أهمية تخزين الطاقة.

ينقسم الحل الأخير إلى قسمين، إمّا تخزين الطاقة المنتجة على شكل طاقة كهربائية Electrical Storage ضمن المدخرات أو البطاريات، أو تخزينها على شكل طاقة حرارية Thermal Storage ضمن خزانات حرارية بحسب الفعل الحراري كما يأتي:

- التخزين المحسوس Sensible Heat Storage.
- التخزين الكامن Latent Heat Storage.
- التخزين الكيميائي Chemical Heat Storage.

1-1 التخزين المحسوس:

يمتاز التخزين المحسوس للحرارة ببساطته وكلفته المنخفضة، كما أن البحوث في هذا المجال قطعت مراحل كبيرة، ووصلت إلى مراحل عالية من النضج التكنولوجي [1]. من عيوب التخزين المحسوس أن الكثافة الطاقية Energy Density صغيرة وتقدر بنحو (25 kWh/m³) مقارنة بباقي الطرائق الحرارية، ووجود تغيرات كبيرة في درجات الحرارة في عمليات التخزين.

2-1 التخزين الكامن:

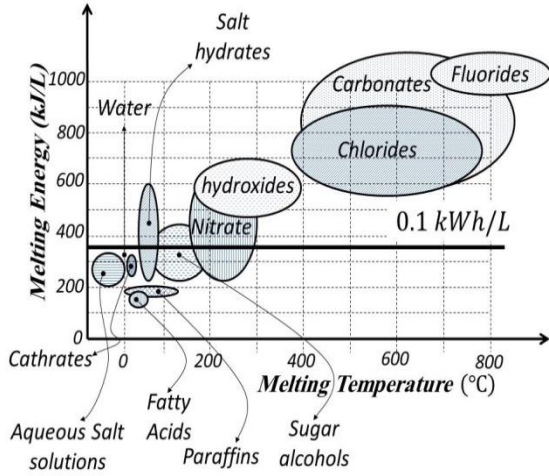
هناك عدة مناطق تتحول فيها المادة طورياً كما في الشكل (1) حيث يكون التحول صلباً - صلباً في المنطقة (B - C) أو صلباً - سائلاً في المنطقة (D - E) أو سائلاً - غازاً في المنطقة (F - G).

على الخواص الفيزيائية للمادة وخصوصاً الموصلية الحرارية. هناك عوامل أخرى مختلفة تعتمد على اختيار المادة المتغيرة الطور، وهي:

- العوامل الحرارية والفيزيائية معاً.
- العوامل التحريكية.
- العوامل الكيميائية.
- العوامل الاقتصادية.

هناك العديد من المراجع التي تشرح العوامل الحرارية والفيزيائية للعديد من المواد المتغيرة الطور من حيث درجة حرارة الانصهار، وكمية حرارة الانصهار هذه المواد [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9].

يبين الشكل (3) أنواع المواد المتغيرة الطور المستخدمة بدلالة درجة حرارة الانصهار بالدرجة سليزيوس والكثافة الطاقة لها بالكيلوجول بالنسبة إلى واحد الحجم (لتر). في هذه الدراسة إختارنا الماء الطبيعي كمادة متغيرة الطور لتوافر عوامله الحرارية والفيزيائية في كثير من المراجع.



الشكل (3) تصنيف المواد المتغيرة الطور بحسب درجة حرارة المادة وحرارة الانصهار [8].

3- الإجراء التجريبي.

يتألف الجهاز التجريبي [10] من ثلاثة أقسام رئيسية، وهي:
القسم الأول: الخزان الحراري وسطح التبريد (المصرف الحراري).
القسم الثاني: الدارة التبريدية الانضغاطية والدارة المساعدة.

تعطى الكثافة الطاقة في التحول الطوري صلب - سائل بحسب القانون الأول في الترموديناميك بالمعادلة:

$$Q = \rho * h_{sf} \left(\frac{kJ}{m^3} \right) \quad (1)$$

$$Q = 3600 * \rho * h_{sf} \left(\frac{kWh}{m^3} \right)$$

إذ:

ρ كثافة المادة (kg/m^3).

h_{sf} حرارة التحول الطوري للمادة (kJ/kg)

(أو تسمى حرارة الانصهار Heat of Fusion).

يمتاز التخزين الكامن بالقدرة على تخزين كمية أكبر من الطاقة بالمقارنة بالتخزين المحسوس، كما أن عمليات الشحن والتفريغ تكون أبسط منها في التخزين الكيميائي، ولكن تكمن الصعوبة في هذه الطريقة باختيار المواد المتغيرة الطور (PCMs) المناسبة للتطبيق المدروس، إذ إن عمليات الشحن والتفريغ تجري عند درجة حرارة ثابتة وتساوي درجة حرارة التحول الطوري التي يجب أن تتطابق مع درجة الحرارة التطبيق المختار.

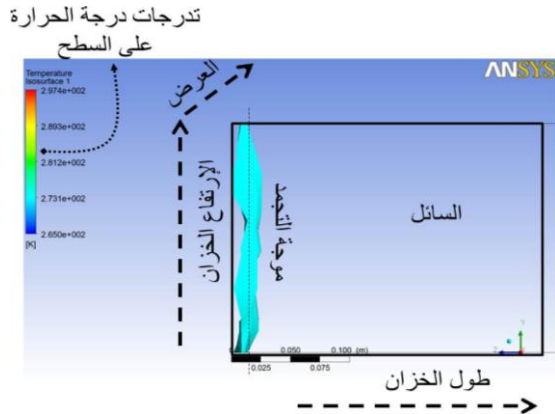
3-1 التخزين الكيميائي.

يمتاز التخزين الكيميائي بالقدرة على تخزين أعلى كمية من الحرارة بين الطرائق الثلاث، إذ تقدر الكثافة الطاقة له بنحو ($300 kWh/m^3$)، ولكن ما يُعيب هذه الطريقة زمن استرجاع الطاقة المخزنة كبير جداً والفعالية منخفضة نسبياً.

أبرزنا في هذه الورقة أهمية إضافة زعانف نحاسية إلى نظام تخزين حراري كامن وتأثيرها في كمية الحرارة المخزنة، وسرعة انتشار موجة التجمد أو مايسمى بالرياضيات شرط تحرك السطح الفاصل Moving Boundary Condition.

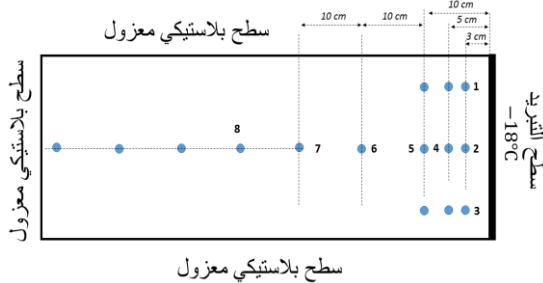
2- اختيار المادة المتغيرة الطور:

يعتمد اختيار المادة المتغيرة الطور على درجة حرارة التطبيق المختار، ومن ثم على حرارة التحول الطوري، وكمية الطاقة المخزنة التي تتناسب أيضاً مع حرارة التحول الطوري (صلب - سائل) للمادة، أو مايسمى حرارة الانصهار، وأخيراً على سرعة تجاوب الخزان الحراري (سرعة انتشار الموجة) في التطبيق المختار؛ وهذا يعتمد



الشكل (5) شكل الخزان الحراري.

يتألف الخزان الحراري في العمل التجريبي كما في الشكل (6) من خمسة سطوح بلاستيكية من مادة البلكسي Plexi سماكة 2 سم، وبأبعاد (10*10*100 سم) معزول عن الوسط الخارجي بمادة الستيريويور بسماكة 10 سم، ومزود بفتحة دخول وفتحة خروج المادة المتغيرة الطور أمّا السطح السادس فهو سطح التبادل الحراري (مصرف حراري Heat Sink). سطح التبادل الحراري (المصرف الحراري) هو سطح نحاسي مربوط بشكل ثانوي مع دائرة تبريد انضغاطية رئيسة تعمل على تثبيت درجة حرارة السطح بما يتناسب والتجربة.

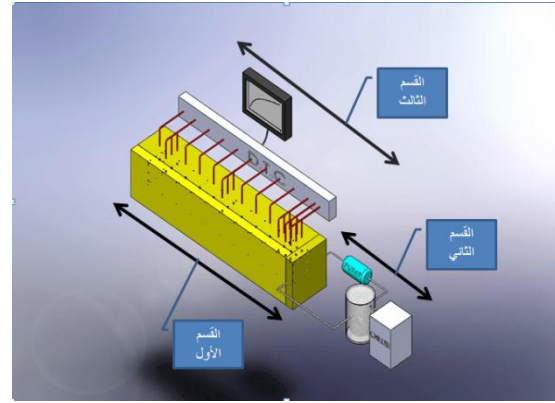


الشكل (6) الخزان الحراري في المرجع [10].

لتحديد درجة الحرارة - الثابتة - التي سيُحافظ عليها سطح التبريد في أثناء التجربة أهمية كبيرة؛ وذلك للأسباب الآتية:

- التغلب على المقاومة الحرارية للجليد المتشكل لضمان وصول موجة التجمد إلى آخر الخزان.
- الابتعاد عن التبريد الزائد لضمان حصول التجربة بالقرب من درجة حرارة التحول الطوري، وعدم التأثير في الانتشار أحادي البعد (عدم حصول تشوه في الموجة).

القسم الثالث: عناصر قياس درجة الحرارة (PT100) وجهاز تحصيل المعلومات Data Acquisition System كما في الشكل (4).



الشكل (4) أقسام التجربة.

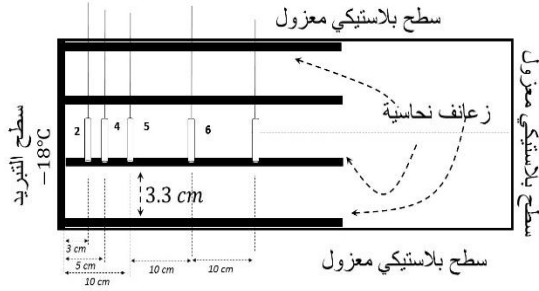
3-1 تحديد أبعاد الخزان الحراري.

حتى يكون انتشار الموجة أحادي البعد بحسب شروط ستيفان، يجب أن تكون سرعة انتشار الموجة في اتجاه معين أقل بكثير من سرعة انتشارها في الاتجاهات الأخرى. عندما يتحقق ذلك الشرط تُطلق صفة أحادي البعد على الانتشار المدروس، لتحقيق ذلك يجب أن يكون الخزان جسماً نصف لانتهائي الطول. الطول اللانتهائي لا يوجد عملياً، لذلك يجب اختيار نسبة معينة بين أبعاد الخزان تحقق هذا الشرط دون أن يمتد الخزان إلى اللانهاية. من أجل ذلك جَرِّبنا مجموعة من الأبعاد باستخدام برنامج ANSYS (نسخة 14.5) لمعرفة الأبعاد المناسبة للخزان التي تحقق انتشار موجة التجمد في اتجاه معين. تبين لنا من خلال المحاكاة أن الأبعاد التالية (10*10*100 سم) هي الأبعاد التي تعطي موجة تجمد منتظمة في اتجاه واحد، كما هو ظاهر في الشكل (5).

3-3 حساسات قراءة الحرارة ودراة التحصيل.

يحتوي الخزان الحراري على 20 فتحة لاستخدامها في قراءة درجات حرارة السائل المتغير الطور، موضحة بشكل تمثلي في الشكل (6). استُخدمت فقط 5 فتحات في منتصف الخزان (2، 4، 5، 6....) في المقارنة بين الخزائين. استُخدمت حساسات (PT100) في قراءة درجات الحرارة على المآخذ الخمسة، وسُجّلت بواسطة دارة تحصيل مساعدة Data Acquisition System، سُجّلت قراءات درجة الحرارة من الحساسات كل نصف دقيقة (Run = 30 sec).

لدراسة تأثير وجود الزعانف في كمية الحرارة المخزنة استُخدم الخزان الحراري السابق نفسه، ووُضع بداخله زعانف نحاسية بسماكة 1 مم، رُكّب بشكل عامودي على سطح التبريد الرئيس، وشُكّلت اقنية على طول الخزان بأبعاد (3.3×10×50 سم)، كما في الشكل (8).



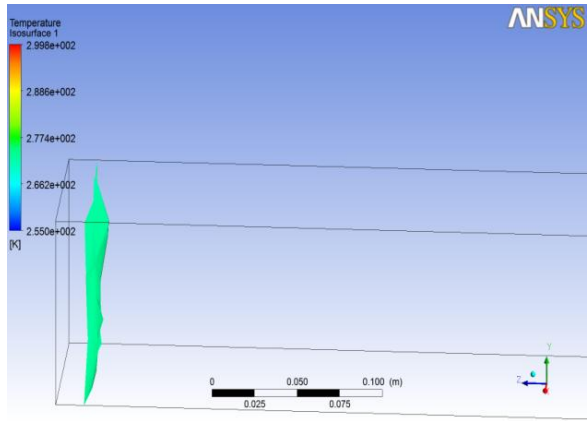
الشكل (8) الخزان الحراري مع وجود زعانف نحاسية.

4- تحليل النتائج ومناقشتها:

فُورنتت كمية الطاقة المخزنة على شكل جليد المتشكل ضمن الخزان في الحالتين (من دون زعانف ومع زعانف) عند درجة حرارة (-18 °C) وتبين ما يأتي:

(a) حُدّد موقع السطح الفاصل بعد 24 ساعة من التشغيل المستمر، إذ كان في الخزان الأول (من دون زعانف) على بعد 7 سم من سطح التبريد [10] وتم تأكيدها مرة أخرى كما في الشكل (9)، وعلى بعد 13.5 سم في الخزان الثاني (مع زعانف)، كما هو ظاهر في الشكل (10) أي بزيادة وقدها 54%.

ولذلك أُجريت المحاكاة النظرية بتطبيق عدد من درجات الحرارة لسطح التبريد على الأبعاد المختارة السابقة للحصول على موجة مستقرة ببعدها واحد بحسب شرط ستيفان، اختيرت درجة الحرارة (-18°C) لسطح التبادل الحراري من أجل المقارنة. يبين الشكل (7) موجة التجمد في الخزان الحراري المستوية عند درجة حرارة (-18°C = 255K). درجة الحرارة السابقة تتناسب ودرجة حرارة التبخير لوسائط التبريد المستخدمة في الدارات الانضغاطية التقليدية.

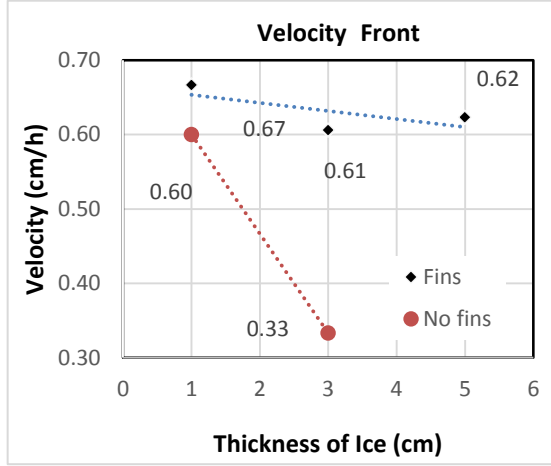


الشكل (7) موجة التجمد عند درجة حرارة 255 كالفن.

3-2 الدارة التبريدية والدارة المساعدة.

تتألف دارة التبريد من الأجزاء التقليدية لدارات التبريد: [ضاغط- مكثف- مبخر- صمام خنق- مروحة المكثف]، جُربت عدة ضواغط واختير الضاغط الأنسب (ذو الاستطاعة الملائمة) الذي يؤمن درجة التبريد المطلوبة مع الاستقرار طوال مدة التجربة. أما الدارة المساعدة فهي عبارة عن مبادل حراري جسمه الخارجي مصنوع من مادة البليكسي (Plexi) سماكة 10 سم ومعزول بالستيريوبور سماكة 2 سم، ومبخر دارة التبريد الرئيسة موجود بداخله، وهذا المبادل المملوء بمزيج من الماء مع مانع تجمد بحيث تصل درجة حرارة تجمد هذا المزيج إلى (-30 °C) فضلاً عن وجود مضخة تسريع تعمل على ضخ المزيج أنف الذكر إلى سطح التبريد. إن الهدف من دارة التبريد الثانوية تأمين ثباتية لدرجة حرارة سطح التبريد طوال مدة التجربة.

طبقة من الجليد بسماكة (3 cm) منعت نقل الحرارة الكامنة إلى المصرف الحراري (سطح التبريد) في الخزان الأول، ولكن وجود الزعانف النحاسية في الخزان الثاني أدى إلى التغلب على هذه الممانعة، وتشكيل طبقة أكبر من الجليد. يبيّن الشكل (11) سرعة انتشار الموجة في كلا الخزائين.



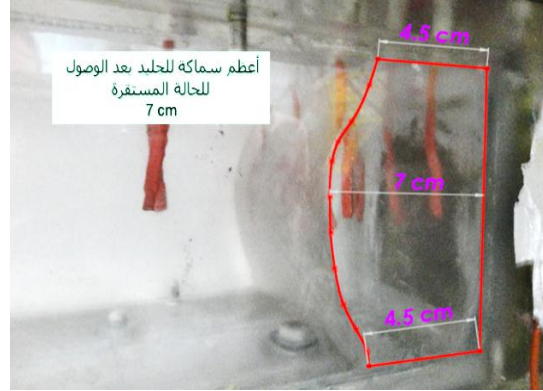
الشكل (11) مقارنة سرعة انتشار الموجة على طول الخزان في الحالتين.

نلاحظ من الشكل (11) أن السرعة تناقصت حاداً في الخزان الأول، وبقيت ثابتة في الخزان الثاني تقريباً وذلك بسبب وجود الزعانف النحاسية التي أدت دوراً مهماً في نقل حرارة التحول الطوري إلى المصرف الحراري، وهذا يتناسب مع زيادة سماكة الجليد المتشكل في الخزان الثاني مقارنة بالخزان الأول.

(d) نلاحظ أيضاً من الشكل (12) أن كمية التخزين (سماكة الجليد المتشكل) تزداد مع زيادة زمن التشغيل في الخزان الثاني، ولكنها تتوقف على بعد 7 سم في الخزان الأول. بفرض أن العلاقة بين سماكة الجليد المتشكل وزمن التشكل تجريبياً هي علاقة خطية فيمكن استخراج الموديل الرياضي للماء فقط الذي يربط بين سماكة الجليد وزمن التشكل بالشكل:

$$Time = 108 * Thickness - 25$$

إذ: الزمن: دقيقة. السماكة: سنتيمتر.



الشكل (9) سماكة الجليد المتشكلة في الخزان من دون زعانف [9].



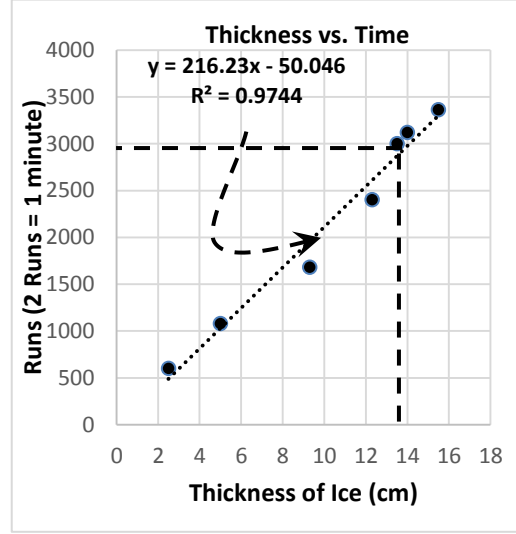
الشكل (10) سماكة الجليد المتشكلة في الخزان مع زعانف نحاسية.

(b) إن سرعة انتشار موجة التحول الطوري بالنسبة إلى الصف الأول من الحساسات في الخزان الأول (0.6 cm/hour) (أي الحساس رقم (2) كما في الشكل (6)، الذي يبعد (3 cm) عن سطح التبريد)، أما بالنسبة إلى الخزان الثاني فكانت (0.67 cm/hour) إذ يوجد فرق صغير نسبياً في السرعة نحو 11%، وهذا يعود إلى عدم وجود أي مقاومة تمنع عملية التحول الطوري ضمن الخزان.

(c) إن سرعة انتشار موجة التحول الطوري بالنسبة إلى الصف الثاني من الحساسات في الخزان الأول (0.33 cm/hour) (أي الحساس رقم (4) كما في الشكل (6) الذي يبعد (5 cm) عن سطح التبريد)، أما في الخزان الثاني فكانت (0.61 cm/hour) أي بزيادة مقدارها 46%. يعود هذا الفرق إلى تشكل

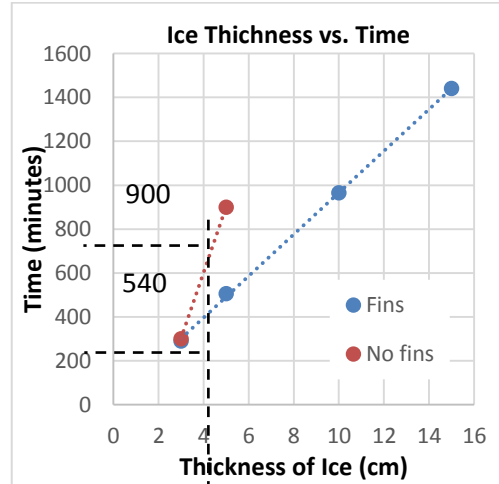
5- الاستنتاجات والتوصيات

1. أدت إضافة مجموعة من الزعانف النحاسية إلى نظام التخزين الحراري الكامن إلى رفع من أداء الخزان حرارياً مقارنة بعدم وجود الزعانف؛ لذلك ينصح باستعمال الزعانف في أنظمة التخزين التبريدية أو التسخينية.
2. تبين من التجارب أن الزعانف النحاسية عملت على أنها مصرف حراري للطاقة؛ ولهذا السبب ازداد كل من كمية الطاقة الحرارية المخزنة و سرعة انتشار موجة التجمد.
3. تبين من التجارب أن الزعانف النحاسية ساعدت على تشكل الجليد بزمن أقل بكثير من عدم وجودها.
4. نوصي استخدام المحاكاة الحاسوبية (مثل برنامج ANSYS) في تحديد البعد الأمثل بين الزعانف والطول الأمثل أيضاً.
5. نوصي باستخدام أشكال شبكية (WICKS) ضمن الخزان لمعرفة تأثير القوى السطحية Surface Forces في عملية التجمد أو الزوبان.
6. نوصي باستخدام مواد متغير طور مختلفة مثل البارفينات والأملاح والحموض، ودراسة سرعة انتشار الموجة، وكمية الطاقة المخزنة.



الشكل (12) سماكة المادة المتغيرة الطور بالنسبة إلى زمن التشغيل في الخزان الثاني (مع زعانف).

(e) نلاحظ من الشكل (13) أن سماكة الجليد في الخزان الأول (من دون زعانف) وصلت إلى 5 سم بعد نحو 900 قراءة (Run = 1 minute)، أي بعد 15 ساعة من تشغيل الجهاز، أما سماكة الجليد في الخزان الثاني فوصلت إلى السماكة نفسها بعد 1080 قراءة (Run = 30 sec)، أي بعد 9 ساعات من تشغيل الجهاز، أي بفارق 43% من زمن التشغيل. يصل الخزان الثاني إلى سماكة 10 سم بعد 14 ساعة من تشغيل الجهاز، في حين تتوقف موجة التجمد في الخزان الأول عند 7 سم.



الشكل (13) العلاقة بين سماكة الجليد وزمن تشكله.

References

- [1] Hahne, E., 2014. "Storage of Sensible Heat," Energy Storage Systems, Vol. 1.
- [2] Chaplin, M., 2014. "Water Structure and Science" from the web site www1.lsbu.ac.uk/water/explan2.html.
- [3] Zalba, B., Marin, J., M., Cabeza, L. F., and Mehling, H., 2003. "Review on thermal Energy Storage with Phase Change Materials, Heat Transfer Analysis and Application," Applied Thermal Engineering Journal.
- [4] Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., and Buddhi, D., 2009. "Review on Thermal Energy Storage with Phase Change Materials and Applications," Renewable & Sustainable Energy Reviews Journal.
- [5] Abedin, A. H. and Rosen, M. A., 2011. "A Critical Review of Thermochemical Energy Storage Systems," The Open Renewable Energy Journal, Open Access.
- [6] Demirbas, M. F., 2006. "Thermal Energy Storage and Phase Change Materials: An Overview," Energy Sources, Taylor & Francis Group.
- [7] Raj, V. A. A., and Velraj, R., 2010. "Review on Free Cooling of Buildings Using Phase Change Materials," Renewable and Sustainable Energy Reviews.
- [8] Farid, M. M., Khudhair, A. M., Razack, S. A. K., Hallaj, S. A., 2004. "A Review on Phase Change Energy Storage: Materials and Applications," Energy Conversion & Management, 45: 1597-1615.
- [9] Cabeza, L. F., Castell, A., Barrenche, C., Gracia, A., Fernandez, A. I., 2011, "Materials Used as PCM in Thermal Energy Storage in Buildings: A Review," Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15: 1675-1695.
- [10] Eiloush, F., 2014. "Experimental Investigation on Solidification Phenomena of Phase Change Materials (PCMs) based on Stefan Problem," MS. Thesis, Damascus University, Syria.

Received	2015/05/14	إيداع البحث
Accepted for Publ.	2015/11/24	قبول البحث للنشر