

تحديد الأبعاد الهندسية لخزان حراري كامن لتغطية حمل كهربائي في أوقات الذروة

د. بسام بدران⁽¹⁾ و د. حسين تينة⁽²⁾ و د. جمال العباس⁽³⁾

الملخص

إن الاختيار المناسب للأبعاد الهندسية لخزان حراري كامن بما في ذلك المادة المتحولة الطور مهم جداً في تحديد كمية الطاقة الحرارية المخزنة وسرعة عملية الشحن (التفريغ) التي يمكن أن تستخدم لاحقاً في تغطية حمل كهربائي ما في أوقات الذروة. في هذه الورقة تم تحديد أبعاد الخزان الحراري لتغطية 10 طن تبريدي (35 كيلوواط استطاعة اسمية) وتحديد السماكة العظمى للمادة المتحولة الطور تحليلاً وعددياً بالاعتماد على برمجيات عددية متقدمة ANSYS-Fluent. تبين أن سماكة الطبقة المتحولة العظمى على سطح الأنبوب الأسطواني هي 3.5 سم عند درجة حرارة (-15°C) بعد 8 ساعات من العمل المستمر في عملية الشحن، كما تبين أن هذه السماكة لا علاقة لها بقطر الأنبوب ونوعيته، وتزداد مع انخفاض درجة حرارة المصدر الحراري.

الكلمات المفتاحية: نظام التخزين الحراري الكامن - الحرارة الكامنة - المواد المتغيرة الطور - سطح أسطواني.

(1)، (2)، (3) أستاذ مساعد. كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة دمشق، سورية.

Identifying The dimensions of a Latent Thermal Storage Tank to Cover an Electrical Load during Peak Times

Dr. Bassam Badran; Dr. Husain Tenah and Dr. Jamal Abaas
Abstract

The right choice of the dimensions of the heat storage tank as well as the phase change material are very important in determining the amount of stored thermal power and the speed of charging (discharging) that we could use later on in covering a certain on-peak electrical load. In this paper, we have determined the thermal tank dimensions to cover 10 tons of refrigeration (35 kW nominal capacity), and the maximum thickness of phase change material that we can obtain from a cylindrical surface analytically and numerically based on advanced simulation packages (ANSYS-Fluent). We have found the thickness on a cylindrical tube is 3.5 cm for a cooling temperature of (-15°C) based on 8 hours of continuous work in charging mode. It has been found also that the thickness is not related to or a function to the diameter as well as the type of the pipe and it increases with lowering the temperature of the heat source.

Keywords: Latent Heat Thermal Storage System (LHTES) - Latent Heat – Phase Change Material, Cylindrical Surface.

من البرامج الحاسوبية المتقدمة. اخترنا الماء الصناعي Industrial Water كما يصنف في الجمعية الأمريكية للمواصفات والتكنولوجيا NIST كمادة متحولة الطور. المواصفات الفيزيائية والحرارية للماء بحسب الجدول (1) هي:

الجدول (1) المواصفات الفيزيائية والحرارية للماء.

0.6 W/m K	الموصلية الحرارية للماء
2.22 W/m K	الموصلية الحرارية للجليد
298 K	حرارة الماء الابتدائية
934 kg/m ³	كثافة الجليد
273 K	درجة حرارة التجمد
2.2 kJ/kg K	السعة الحرارية للجليد
334 kJ/kg	إنتالبي التحول الطوري

هناك مجموعة من الطرق لقياس كمية الجليد المتشكل ضمن الخزان الحراري الكامن، وذلك بالاعتماد على التغير الحجمي في الطور السائل والطور الصلب ضمن المادة المتحولة الطور، وأغلب هذه الطرق تعتمد طريقة الفرق في الخواص الكهربائية لكل من السائل والصلب [5] وخاصة الموصلية الكهربائية والتي تختلف وبشكل واضح بين الطورين.

يبين الشكل (1) العلاقة بين سماكة المادة المتحولة الطور والزمن باستخدام طريقة الموصلية الكهربائية لأنبوب بولي إيثيلين بقطر داخلي 15 ملم، وقطر خارجي 25 ملم، وتدفق (2 l/min)، ودرجة حرارة المصدر الحراري (T = -5°C) على طول الأنبوب وباستخدام حساسات حرارة PT100. نلاحظ من الشكل السابق أن سماكة الجليد بعد مضي 6 ساعات عمل تقدر بحوالي (2.2 cm) [6] بعد طرح نصف قطر الأنبوب (12.5 mm)

1- المقدمة:

تستعمل أنظمة تخزين الجليد Thermal Ice Storage في أنظمة التكييف لفوائدها في تخفيض الطاقة الكهربائية المستهلكة، ومن ثم زيادة المردود الطاقي وتخفيض القدرة التبريدية المطلوبة عند الحاجة [1,2,3]. يستعمل التخزين الحراري الكامن لقدرته العالية على امتصاص أو طرح كمية كبيرة من الحرارة نتيجة تحول المادة من الحالة الصلبة إلى الحالة السائلة أو بالعكس [4]. كمية الحرارة الممتصة أو المحررة تسمى حرارة الانصهار Heat of Fusion حيث تُعطى الكثافة الطاقية في التحول الطوري صلب - سائل بحسب القانون الأول في الترموديناميك بالمعادلة الآتية:

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

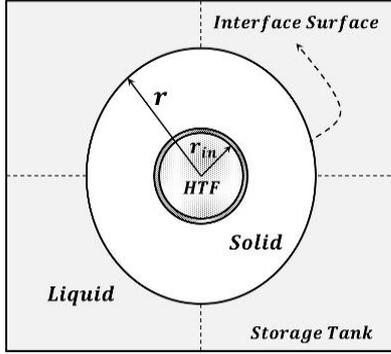
حيث

ρ كثافة المادة (kg/m^3).

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

حرارة الانصهار (Heat of Fusion).

تتم عملية التخزين نتيجة تبادل الحرارة (الطاقة) بين المصدر الحراري (مثلاً الطاقة الشمسية أو الطاقة الضائعة أو الطاقة التبريدية.. إلخ) والمادة المتحولة الطور المختارة عبر سطح تبادل حراري معين، وقد يكون هذا السطح على شكل (1 مستوي، أو 2 أسطواني أو 3 دائري). إن شكل سطح التبادل الحراري بين المادة المتحولة الطور والمصدر الحراري Heat Source هو أحد العوامل المؤثرة في تحديد كمية الحرارة المخزنة في نظام التخزين الحراري الكامن. في هذا البحث قمنا بتحديد أبعاد الخزان الحراري لتغطية 10 طن تبريدي (استطاعة اسمية) وما يعادل 35 كيلواط كهربائي والسماكة العظمى للمادة المتحولة الطور والمتشكلة على سطح أسطواني عددياً باستخدام مجموعة



الشكل (2) مقطع قطري للمادة المتحولة الطور حول الأنبوب النحاسي.

تحتسب كمية حرارة التوصيل (Q_{cond}) على أساس توصيل حراري فقط [7] ضمن المادة المتحولة طورياً بفرض أن سماكة الأنبوب مهملة، ودرجة حرارة السطح ثابتة، والفعل الحلمي مهمل في الأنبوب ومهمل على السطح الفاصل بين الطورين الصلب والسائل. تعطى معادلة التوصيل ضمن الطور الصلب بالشكل:

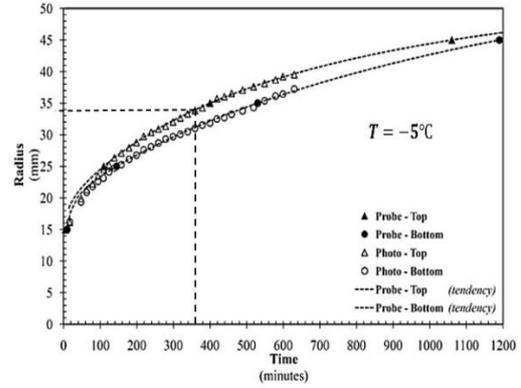
$$Q_{cond} = \frac{2\pi l K_{solid}(T_{in} - T_{liq})}{\ln(r/r_{in})} \quad (4)$$

حيث:

درجة حرارة المادة المتحولة في الحالة السائلة والتي لاتساوي درجة حرارة التحول الطوري للمادة.	T_{liq} (°C)
درجة حرارة المصدر الحراري والتي تساوي درجة حرارة الأنبوب.	T_{in} (°C)
معامل التوصيل الحراري للمادة المتحولة في الحالة الصلبة.	K_{solid} ($\frac{kW}{m * K}$)
نصف قطر سطح التبادل الحراري.	r_{in} (m)

بتعويض المعادلة (3) و (4) ضمن المعادلة (2) والحل عن طريق فصل المتحولات، نحصل على علاقة الزمن (بالساعة) بدلالة نصف قطر المادة المتحولة (بالمتر) والتي تُعطى بالشكل:

$$4at = -r^2 + 2r^2 \ln\left(\frac{r}{r_{in}}\right) + r_{in}^2 \quad (5)$$



الشكل (1) تحديد سماكة الطبقة المتحولة الطور بوساطة الموصلية الكهربائية.

1- الإجراء التحليلي والرياضي:

بإجراء التوازن الطاقى على شريحة من المادة المتحولة الطور حول أنبوب نحاسي نجد أن:

$$Q_{cond} = Q_{PCM} \quad (2)$$

الطاقة الكامنة التي نحصل عليها خلال عملية التحول الطوري خلال فترة زمنية (dt) كما في الشكل (2) هي:

$$Q_{PCM} = \rho * h * \frac{dV}{dt} \quad (kW) \quad (3)$$

$$= \rho * h * (2\pi l * r) \frac{dr}{dt}$$

حيث

حجم المادة المتحولة طورياً	V (m^3)
إنتالبي التحول الطوري.	h ($\frac{kJ}{kg}$)
كثافة المادة المتحولة.	ρ ($\frac{kg}{m^3}$)
نصف قطر المادة المتحولة.	r (m)
طول المادة المتحولة أو طول سطح التبادل الحراري.	l (m)

يبين الجدول (2) سماكة الجليد المتشكل لمجموعة من درجات الحرارة لوسيط نقل الحرارة بحسب المعادلة السابقة (5) بعد طرح نصف قطر الأنبوب.

الجدول (2) سماكات الجليد المختلفة.

Temperature	Thickness
268 K = -5°C	6.2 cm
263 K = -10°C	6.6 cm
258 K = -15°C	8.0 cm
253 K = -20°C	8.6 cm

إن الإجراء التحليلي السابق يعتمد على مبدأ التوازن الطاقة الحراري عند جبهة التحول الطوري مع شروط ابتدائية غير معقدة لتقييم الدراسة العددية الأكثر قرباً من النتائج التي نحصل عليها من الدراسة التجريبية. يمكن اعتبار الدراسة التحليلية الحدود العليا أو أكبر سماكة للجليد المتشكل حول الأنبوب النحاسي التي يمكن الحصول عليها نظرياً والتي لا يمكن أن تتحقق عملياً.

2- الدراسة والنمذجة العددية.

سنقوم على دراسة نوعين من المحاكاة الحاسوبية حيث إن كلا منها متعلق بالآخر. ستكون المحاكاة الأولى لأنبوب واحد بهدف تحديد سماكة الجليد العظمى المتشكلة حول الأنبوب الذي يؤدي إلى تحديد عدد الأنابيب التي يجب أن تستخدم ضمن الخزان في المحاكاة الثانية.

1.3 المحاكاة الأولى - أنبوب واحد فقط ضمن

الخزان.

حتى يكون انتشار الموجة أحادي البعد بحسب شروط نيومان وستيفان، 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 اللانهائي لا يوجد عملياً، لذلك يجب اختيار نسبة معينة بين أبعاد

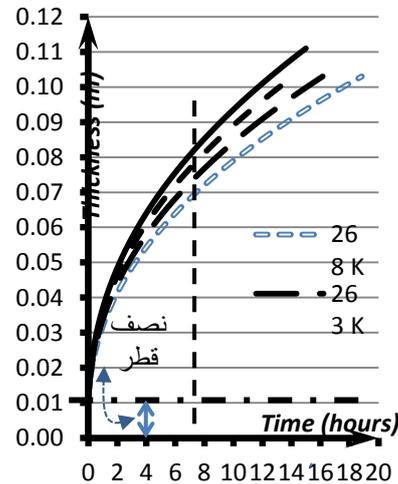
حيث

$$\alpha = \frac{K_{solid} * (T_{in} - T_{liquid})}{\rho * h}$$

باختيار:

- نصف قطر الأنبوب النحاسي الخارجي ($r_{in} = 1.1 \text{ cm}$)
- درجة الحرارة الابتدائية للمادة المتحولة ($T_{liquid} = 298 \text{ K}$) حسب الجدول (1).
- درجة حرارة المصرف الحراري (T_{in}) متغيرة.
- 8 ساعات عمل كامل.

بعد تعويض البارامترات السابقة في المعادلة (5) نحصل على الشكل (3) الذي يبين العلاقة بين نصف قطر المادة المتحولة الطور (السماكة) بالمتراً مع الزمن بالساعة باختلاف درجة حرارة المصرف الحراري (T_{in}). نلاحظ أن السماكة تبدأ من الصفر (سطح المصرف الحراري) حسب المعادلة (5) وتزداد في بداية التجمد بشكل سريع ثم يبدأ معدل التجمد بالانخفاض.



الشكل (3) العلاقة التحليلية بين الزمن وسماكة الطبقة المتحولة طورياً.

أن مادة الأنبوب، ومن ثم معامل التوصيل الحراري لمعدن الأنبوب، تؤثر بشكل مهم في سماكة الطور الصلب، كون سماكة الأنبوب المستخدم صغيرة جداً بحدود (1 mm) .

2.1.3 دراسة سماكة الطور الصلب لحساب الأبعاد الهندسية للخزان الحراري التجريبي:

باستخدام المواصفات السابقة في برنامج ANSYS 14 نحصل على الشكل (4) الذي يوضح العلاقة بين سماكة الطور الصلب (الجليد) على طول الأنبوب في الخزان الحراري مع الزمن عندما تكون درجة حرارة الوسيط الناقل $(-15^\circ\text{C} = 258.15\text{ K})$ بعد ثماني (8) ساعات عمل مستمر.

يبين الشكل (4) أن السماكة العظمى للطور الصلب المتشكل عند انتهاء التجربة الحاسوبية هي (3.5 cm) ، أي أن نصف القطر الكلي للأنبوب مع الجليد هو (4.6 cm) . يبين الشكل (5) توزيع درجات الحرارة في الاتجاه القطري للأنبوب وعلى طول الأنبوب بعد ثماني ساعات عمل باستخدام المحاكاة العددية. اللون الأحمر يدل على أن درجة حرارة الابتدائية ضمن الخزان وهي $(0^\circ\text{C} = \text{K})$ ، بينما يدل اللون الأزرق على أن درجة حرارة سائل نقل الحرارة ضمن الأنبوب $(258\text{ K} = 258^\circ\text{C})$ ، الألوان بين الأحمر والأزرق المبينة في الشكل تدل على توزيع درجة حرارة بين السائل الموجود في الخزان ودرجة حرارة سائل نقل الحرارة.

الخزان تحقق هذا الشرط دون أن يمتد الخزان إلى اللانهاية. من أجل ذلك قمنا بتجريب مجموعة من الأبعاد باستخدام برنامج ANSYS لمعرفة الأبعاد المناسبة للخزان التي تحقق انتشار موجة التجمد في اتجاه معين. هذه التجارب العددية تمت بشروط معينة تحاكي الفرضيات المأخوذة نظرياً، وهي:

دائرة المادة المتحولة الطور:

1. المواصفات الفيزيائية للماء (المادة المتحولة الطور) ثابتة ولا تتغير مع الزمن وموجودة ضمن الجدول (1).
2. درجة الحرارة الابتدائية للمادة المتحولة الطور $(T_{liquid} = 298\text{ K})$ والتي لا تساوي درجة حرارة التحول الطوري [8].
3. زمن التشغيل هو 8 ساعات مساءً بعيداً عن الذروة (من الثامنة مساءً وحتى الرابعة صباحاً) بما يتناسب وفترة عدم وجود الموظفين في عملهم.

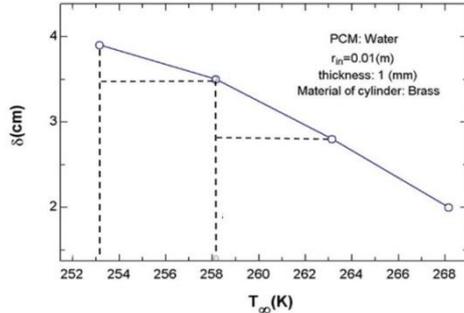
دائرة وسيط نقل الحرارة والخزان

4. وسيط نقل الحرارة هو إيثيلين غليكول نسبة 40%.
5. سرعة وسيط نقل الحرارة ضمن الأنبوب النحاسي هي (5 m/sec) .
6. قطر أنبوب النحاس الداخلي (2 cm) والحامل لوسيط نقل الحرارة.
7. درجة حرارة سطح الأنبوب النحاسي تساوي $(-15^\circ\text{C} = 15\text{ K})$ وهي ثابتة على طول الأنبوب.
8. ارتفاع الخزان الحراري (cm) .

1.1.3 دراسة تأثير القطر الداخلي ومعامل التوصيل الحراري للأنبوب النحاسي الأصفر.

تبين من الدراسة العددية [9] التي أجريت في جامعة دمشق أن تأثير تغيير الأقطار الداخلية للأنابيب الموجودة داخل الخزان إلى أقطار أكبر من (4 cm) ضعيف جداً على سماكة الطور الصلب، كما تبين أيضاً

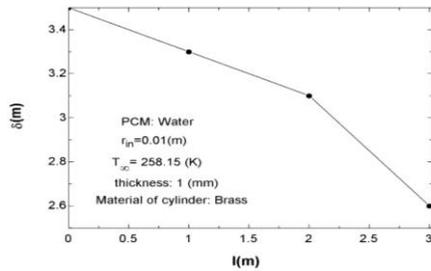
تكون كمية الطاقة الكهربائية المبذولة على الضاغط كبيرة جداً لا تتناسب مع كمية الطاقة المخزنة.



الشكل (6) علاقة سماكة الطور الصلب مع درجة حرارة سائل نقل الحرارة بعد 8 ساعات عمل.

4.1.3 تأثير طول الأنبوب في سماكة الطور الصلب المتشكل حول أنبوب أسطواني.

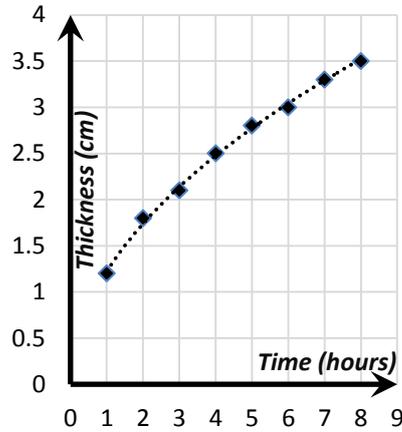
يبين الشكل (7) العلاقة بين سماكة الطور الصلب مع طول الأنبوب داخل الخزان الحراري بعد ثماني ساعات عمل. نلاحظ أن تأثير طول الأنبوب في سماكة الطور الصلب صغير جداً بحيث يمكن إهمالها عند استخدام أنابيب بطول أقل من 2 متر.



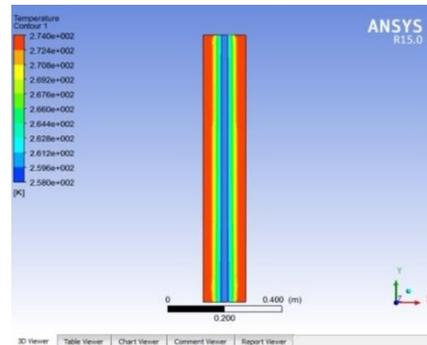
الشكل (7) علاقة سماكة الطور الصلب على طول الأنبوب بعد 8 ساعات عمل.

5.1.3 تأثير درجة الحرارة الابتدائية للمادة المتحولة الطور في سماكة الطور الصلب المتشكل حول أنبوب أسطواني.

يبين الشكل (8) العلاقة بين سماكة الطور الصلب المتشكل مع درجة الحرارة الابتدائية للماء مع ثبات درجة حرارة سائل نقل الحرارة وطول الأنبوب داخل الخزان



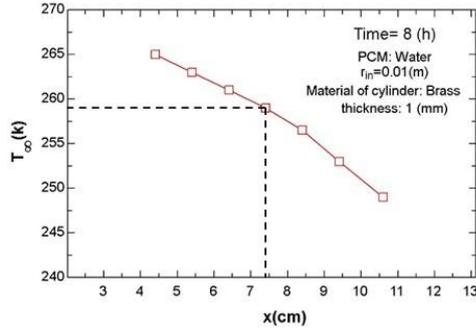
الشكل (4) تغير سماكة المادة المتحولة الطور تقريباً خلال ثماني ساعات عمل مستمر.



الشكل (5) توزيع درجات الحرارة على طول الأنبوب بعد ثماني ساعات عمل.

3.1.3 دراسة تأثير درجة حرارة سائل نقل الحرارة في سماكة الطور الصلب المتشكل حول أنبوب أسطواني وتحديد درجة الحرارة المطلوبة من سائل نقل الحرارة.

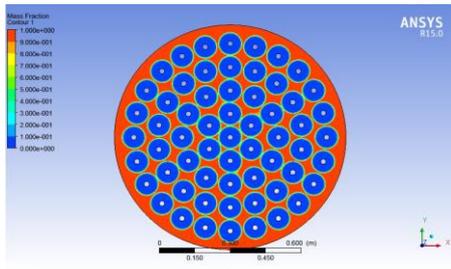
يوضح الشكل (6) العلاقة بين سماكة الطور الصلب المتشكل مع تغير درجات حرارة السائل الناقل للحرارة بعد ثماني ساعات عمل. نلاحظ أن زيادة الفرق بين درجة حرارة سائل نقل الحرارة ($T_{HTF} = T_{\infty}$) ودرجة حرارة التحول الطوري (T_{pc}) تؤدي إلى زيادة كمية الحرارة المنتقلة بين سائل نقل الحرارة والمادة المتحولة الطور. كما نلاحظ أن سماكة الطور الصلب المتشكل تنخفض نسبياً عند استخدام سائل نقل حرارة بدرجة حرارة أقل من ($258.15 K$) بحيث يصبح ميل المنحني أقل، ومن ثم



الشكل (9) العلاقة بين درجة حرارة سائل نقل الحرارة والبعد بين

الأنابيب ضمن الخزان الحراري المصمم على 8 ساعات عمل.

يبين الشكل (9) أن البعد المثالي بين أي أنبوبين (من السطح الخارجي لأنبوب إلى آخر) عند درجة الحرارة المختارة ($258.15 K$) هو ($7.4 cm$) أي أن سماكة الجليد على كل أنبوب هي ($3.7 cm$) بعد ثماني ساعات عمل. الزيادة في سماكة الطور الصلب بمقدار ($0.2 cm$ or 5.5%) نتيجة التأثير التبريدي المتبادل للأنابيب القريبة من بعضها. الشكل (10) يبين المحاكاة الحاسوبية لخزان بقطر ($100 cm$)، وارتفاع ($100 cm$)، ويحتوي على 61 أنبوب. اللون الأحمر يعبر عن الطور السائل للمادة المتحولة الطور، واللون الأزرق يعبر عن الطور الصلب، أما الألوان بينهما فتعبر عن وجود الطور الصلب والسائل معاً، أو ما يسمى في المراجع العلمية بالمنطقة الهشة Mushy Zone.

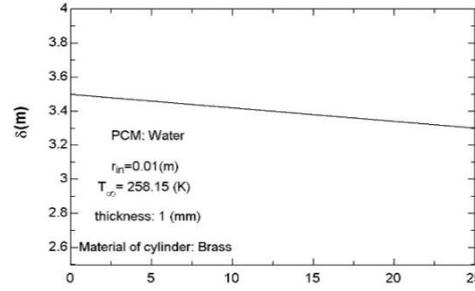


الشكل (10) توزيع درجات الحرارة على الموضع القطري

حول الأنابيب بعد ثماني ساعات عمل.

الشكل (11) يبين المحاكاة الحاسوبية لخزان بقطر ($100 cm$)، وارتفاع ($150 cm$)، ويحتوي على 37 أنبوب مع زوايا خارجية مع الأخذ بعين الاعتبار أن البعد

الحراري بعد ثماني ساعات عمل. نلاحظ أن تأثير درجة الحرارة الابتدائية قليل في سماكة الطور الصلب، حيث تم حساب الارتياح النسبي الأعظمي في سماكة الطور الصلب المتشكل بعد ثماني ساعات عمل وكان مساوياً 5.7% .



الشكل (8) علاقة سماكة الطور الصلب مع درجة حرارة

الماء الابتدائية بعد 8 ساعات عمل.

2.3 المحاكاة الثانية - تحديد عدد الأنابيب والطاقة

التخزينية ضمن الخزان:

بالاعتماد على الدراسة الأولى ونتائجها، تمت في الدراسة الثانية تحديد حجم الخزان المطلوب للشروط السابقة نفسها والاستطاعة التبريدية المقترحة:

1.2.3 تحديد البعد الأمثل بين الأنابيب في الخزان

اعتماداً على سماكة الجليد المتشكل ضمن الخزان الحراري.

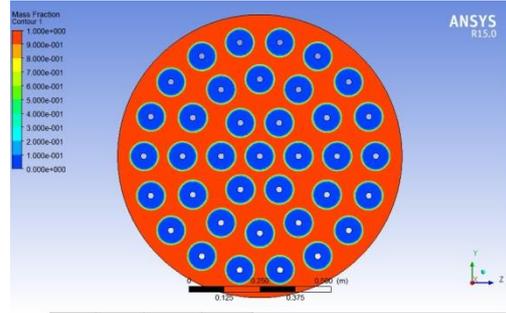
أجرينا العديد من العمليات الحاسوبية باستخدام أبعاد مختلفة بين الأنابيب عند (1 درجة حرارة واحدة و 2) بدرجات حرارة مختلفة أيضاً. تم الوصول إلى النتائج المبينة في الشكل (9) الذي يوضح العلاقة بين البعد الأمثل بين الأنابيب ودرجة حرارة سائل نقل الحرارة ($258.15 K$) في حال كانت عدد ساعات العمل ثماني ساعات فقط.

- درجة حرارة سطح الأنبوب النحاسي تساوي $(-15^{\circ}\text{C} = 15\text{ K})$ وهي ثابتة على طول الأنبوب.
- الخزان الحراري بقطر (100 cm) وارتفاع (150 cm) ويحتوي على 37 أنبوب نحاسي والبعد بين مركزي أنبوبين ضمن الخزان هو (13.6 cm) .

- عملية التفريغ خارجية وليست داخلية.
- الاستطاعة التبريدية الاسمية هي 10 طن تبريدي أو ما يعادل 35 كيلوواط كهربائي لتغطية الأحمال المحسوسة والكامنة ضمن الخزان بحسب العلاقة:
- يجب العمل على تحسين الموديل الرياضي لتوصيف حركة موجة التجمد حيث النتائج التحليلية بعيدة عن النتائج العددية بمقدار 50%. هذه النتائج غير مفاجئة كون عملية التحول الطوري معقدة وتحتاج إلى توصيف أدق.

- قطر الأنبوب ونوعية مادة الأنبوب لا علاقة لهما بسماكة الطبقة المتحولة طورياً كما بينت الدراسة العددية.
- السماكة العظمى تابعة لدرجة حرارة السطح الأسطواني.

بين مركزي أنبوبين ضمن الخزان هو (13.6 cm) بوجود فراغ بين كل أنبوبين بمقدار (4 cm) . هذه الأبعاد الحقيقية التي سيتم اعتمادها لاحقاً في الإجراء التجريبي لمقارنة النتائج التي تم الحصول عليها في كل من الإجراء التحليلي والحاسوبي والتجريبي.



الشكل (11) توزيع درجات الحرارة على الموضع القطري حول الأنابيب بعد ثماني ساعات عمل في حال الذوبان الخارجي.

3- الاستنتاجات ونتائج الدراسة:

قمنا في هذا البحث على دراسة تحليلية وحاسوبية لخزان حراري كامن حيث تم اختيار مجموعة من البارامترات التي سنقوم على اعتمادها في الإجراء التجريبي. يمكننا وضع مجموعة من الاستنتاجات توضح خلاصة البحث والتي يمكن الاستفادة منها لاحقاً، وهي:

- الماء الصناعي هو المادة المتحولة الطور الموجودة في الخزان وبدرجة حرارة ابتدائية $(T_{liquid} = 298\text{ K})$.
- سماكة الطور الصلب المتشكل على الأنبوب هي (3.7 cm) في حال وجود مجموعة من الأنابيب النحاسية ضمن الخزان.
- زمن التشغيل هو 8 ساعات مساءً بعيد عن الذروة.
- وسيط نقل الحرارة هو إيثيلين غليكول نسبة 40% ضمن الأنابيب النحاسية بقطر خارجي (2.2 cm) وقطر داخلي (2 cm) .
- سرعة وسيط نقل الحرارة ضمن الأنبوب النحاسي هي (0.5 m/sec) .

REFERENCES

- [1] Dincer, I. and Rosen M., 2002, "Thermal Energy Storage Systems and Applications," John Wiley and Sons, ISBN 0-471-49573-5.
- [2] Zalba B., Marin J.M., Cabeza L.F., Mehling H., 2003, "Review on Thermal Energy Storage with Phase Change: Materials, Heat Transfer Analysis and Applications," Applied Thermal Engineering 23, 251–283.
- [3] Farid M.M., Khudhai A.M., Razack S.A.K., Al-Hallaj S., 2005, "A Review on Phase Change Energy Storage: Materials and Applications," Energy Conversion and Management 45, 1597–1615.
- [4] Evapco, 2007, "Thermal Ice Storage, Application & Design Guide," Evapco Inc.
- [5] Shi W., Wang B., Li X., 2005, "A Measurement Method of Ice Layer Thickness Based on Resistance-Capacitance Circuit for Closed Loop External Melt Ice Storage Tank," Applied Thermal Engineering 25, 1697–1707.
- [6] EZAN, M. E., ÇETİN, L., EREK, A., 2011, "Ice Thickness Measurement Method for Thermal Energy Storage Unit," J. of Thermal Science and Technology, 31, 1, 1-10.
- [7] Faghri, A., Zhang, Y., Howell, J., 2010, "Advanced Heat and Mass Transfer," Global Digital Press, ISBN 978-0-9842760-0-4.
- [8] Eiloush, F., 2014, "Experimental Investigation on Solidification Phenomena of Phase Change Materials (PCMs) based on Stefan Problem," MS. Thesis, Damascus University, Syria.
- [9] Awad, A. "Analysing the Moving Boundary Condition (solidification phenomena) of PCMs around cylindrical surface numerically and experimentally," M.S. Thesis 2017.

Received	2020/07/16	إيداع البحث
Accepted for Publ.	2020/10/15	قبول البحث للنشر