



الجمهورية العربية السورية

جامعة دمشق

كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

قسم هندسة الميكانيك العام / هندسة التبريد

" تأثير السطوح الإضافية على الأداء الحراري لخزان جليد حراري "

" The Effect of Additional Surfaces on Thermal Ice Storage Tank Performance "

رسالة أعدت لنيل درجة الماجستير في اختصاص هندسة التبريد

إعداد

م. آلاء ناصر جلال الدين

إشراف

أ.د.م. وجيه محمد خير ناعمة

أستاذ في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية



الجمهورية العربية السورية

جامعة دمشق

كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

قسم هندسة الميكانيك العام / هندسة التبريد

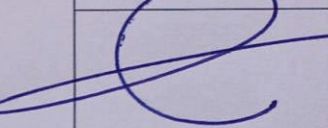
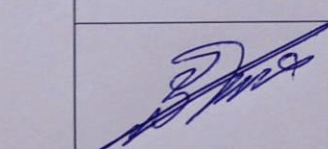
... قرار لجنة حكم ...

دققت هذه الرسالة بعنوان:

" تأثير السطوح الإضافية على الأداء الحراري لخزان جليد حراري "

" The Effect of Additional Surfaces on Thermal Ice Storage Tank Performance "

وأجيزت يوم الإثنين الواقع في 16/12/2024 من قبل السادة أعضاء لجنة الحكم التالية أسمائهم:

الاسم	المرتبة العلمية	الصفة	التوقيع
د. محمد سعيد الجراح	أستاذ في قسم هندسة الميكانيك العام الاختصاص: انتقال الحرارة لسوائل التبريد.	عضواً	
د. وجيه ناعمة	أستاذ في قسم هندسة الميكانيك العام الاختصاص: آلات وأجهزة التبريد وأنظمة تكييف الهواء.	عضواً ومشرفاً	
د. علي سلامي	أستاذ في قسم هندسة الميكانيك العام اختصاص: تحويل الطاقة والقياسات الحرارية.	عضواً	

أجريت التعديلات وأصبحت الرسالة صالحة لمنح درجة الماجستير في هندسة الميكانيك العام/ اختصاص هندسة التبريد.

ﺗﺼﺮﯨﺢ ﺧﻄﻲ

أنا الموقع أدناه أصرح بعلمي وقبولي:

1. أن كل ما ينتج عن هذا البحث والأطروحة هو ملكية فكرية ومالية بالتشارك مع جامعة دمشق، وأنني ألتزم بأخذ موافقة الجامعة في حال رغبتني بنشر البحث أو الأطروحة أو جزء منها نصاً أو مضموناً خارج إطار الجامعة (من دور نشر أو مكنتبات أو مواقع الكترونية وغيرها من وسائل النشر).
2. أنه لا يوجد أي جزء من هذه الأطروحة تم اخذه من عمل آخر أنجز للحصول على شهادة أخرى في جامعة دمشق أو أي جامعة أو معهد تعليمي داخل الجمهورية العربية السورية أو خارجها.

م. آلاء جلال الدين

... بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ ...

بدايةً أتقدم بالشكر الجزيل لمن مد لي يد العون
لعل كلمات الشكر تعبر عن القليل من العرفان الذي
أحمله له

أهدي هذا العمل إلى:

أستاذي الكبير

الأستاذ الدكتور المهندس وجيه محمد خير ناعمة

الذي كان له الفضل بعد الله تعالى في إنجاز هذا
المشروع راجيةً الله سبحانه وتعالى أن يجزيه عني كل
خير.

... الإهداء ...

إلى رمز العطاء

إلى اليد التي أعطت دون تعب أو ملل

إلى بيت العزة والإباء، إلى سيد النبلاء

لك حبي وفخري واعتزازي

والدي الغالي

إلى الوردة التي عطّرت أيامي بأجمل الرياحين

إلى من رسمت ابتسامتها فرحة عمري

إلى العيون التي سهرت لراحتي وسعادتي

إلى من كان دعاؤها سر نجاحي

والدتي الغالية

إلى الوجوه الباسمة والقلوب الصافية

من آنس بذكرهم وأسعد بقربهم

إلى البراعم التي نشأت معها فكانت لي القدوة والعزوة والسند والملجأ

إخوتي

إلى رفاق الدرب

إلى من أضفى على حياتي أروع الذكريات

إلى كل من كان سندي ووقف بجانبني

أصدقائي

فهرس المحتويات

الصفحة

5	فهرس المحتويات
8	فهرس الأشكال
11	فهرس الجداول
12	جدول الرموز والمصطلحات
13	المستخلص
14	الإطار العام للبحث
	الفصل الأول

تخزين الطاقة

18	1. 1. مقدمة
18	1. 2. أنظمة تخزين الطاقة (Energy Storage Systems)
19	1. 2. 1. أنظمة التخزين الميكانيكية
20	1. 2. 2. أنظمة التخزين الكهروكيميائية
20	1. 2. 3. أنظمة تخزين الهيدروجين
20	1. 2. 4. أنظمة التخزين المحسوسة
22	1. 2. 5. أنظمة التخزين الكامنة
24	1. 3. المواد المتغيرة الطور (Phase Change Materials, PCMs)
24	1. 3. 1. عوامل اختيار المواد المتغيرة الطور
24	1. 3. 1. الخصائص الحرارية
24	1. 3. 2. الخصائص الفيزيائية
25	1. 3. 3. الخصائص الحركية
25	1. 3. 4. الخصائص الكيميائية
25	1. 3. 5. الخصائص الاقتصادية
25	1. 3. 2. تصنيف المواد المتغيرة الطور
26	1. 3. 3. تحسين معامل التوصيل الحراري ضمن المواد المتغيرة الطور (PCM)
26	1. 4. أنظمة تخزين الجليد
27	1. 4. 1. أنظمة الذوبان الداخلي

- 29 1. 4. 2. أنظمة الذوبان الخارجي
- 32 1. 5. طرق التحكم بأنظمة تخزين الجليد لتغطية الحمل التبريدي
- 32 1. 5. 1. أنظمة التخزين الكامل
- 33 1. 5. 2. أنظمة التخزين الجزئي
- 34 1. 6. تطبيقات استخدام أنظمة تخزين الجليد

الفصل الثاني

الدراسات المرجعية

- 36 2. 1. الدراسة المرجعية الأولى
- 43 2. 2. الدراسة المرجعية الثانية
- 47 2. 3. الدراسة المرجعية الثالثة
- 49 2. 4. الدراسة المرجعية الرابعة

الفصل الثالث

الدراسة التحليلية

- 54 3. 1. الدراسة التحليلية
- 58 3. 1. 1. تأثير الزمن على تغير موقع السطح الفاصل بين الطورين الصلب والسائل عند درجة حرارة سائل نقل الحرارة HTF [K] 267.15.
- 59 3. 1. 2. تأثير الزمن على تغير موقع السطح الفاصل بين الطورين الصلب والسائل عند درجة حرارة سائل نقل الحرارة HTF [K] 265.15.

الفصل الرابع

الدراسة العددية (المحاكاة الحاسوبية)

- 61 4. 1. مبدأ عمل برنامج ANSYS
- 67 4. 2. عمليات المحاكاة الحاسوبية
- 67 4. 2. 1. المحاكاة الحاسوبية لخزان جليد حراري معزول يحتوي على أنبوب واحد وریشان حيث تكون أبعاد الريشة كالتالي سماكتها (1mm) وطولها (1، 2، 3)cm
- 71 4. 2. 2. المحاكاة الحاسوبية لخزان جليد حراري أسطواني الشكل يحتوي على أنبوب واحد بعدة حالات (قبل إضافة ريش للأنبوب، بعد إضافة ریشان، بعد إضافة 4 ريش)
- 72 4. 2. 2. 1. دراسة الخزان الأسطواني قبل إضافة ريش للأنبوب (النموذج A)
- 76 4. 2. 2. 2. دراسة الخزان الأسطواني بعد إضافة ریشان للأنبوب (النموذج B)

81	4. 2. 2. 3. دراسة الخزان الأسطواني بعد إضافة أربع ريش للأنيوب (النموذج C)
86	4. 2. 3. دراسة خزان أسطواني يحتوي 7 أنابيب مريشة
91	4. 3. مقارنة النتائج

الفصل الخامس

النتائج والتوصيات

96	5. 1. النتائج
97	5. 2. التوصيات
98	المراجع
100	Abstract
	موافقة نشر

فهرس الأشكال

- الشكل (1 - 1) التخزين المحسوس. 22
- الشكل (2 - 1) التخزين الكامن. 22
- الشكل (3 - 1) نظام الذوبان الداخلي. 27
- الشكل (4 - 1) الدارة البسيطة لأنظمة تخزين الجليد (نظام الذوبان الداخلي). 28
- الشكل (5 - 1) نظام الذوبان الخارجي. 30
- الشكل (6 - 1) الدارة البسيطة لأنظمة تخزين الجليد (نظام الذوبان الخارجي). 31
- الشكل (7 - 1) نظام التخزين الكامل. 32
- الشكل (8 - 1) نظام التخزين الجزئي. 33
- الشكل (1 - 2) مخطط التجربة المنفذة. 37
- الشكل (2 - 2) تأثير تغير درجة حرارة دخول سائل نقل الحرارة (HTF) على الطاقة المخزنة الكلية خلال الزمن. 38
- الشكل (3 - 2) تغير قيمة الطاقة المخزنة مع الزمن عند قيم مختلفة لدرجة حرارة دخول سائل نقل الحرارة (HTF) وقيم مختلفة لمعدل تدفقه. 39
- الشكل (4 - 2) تغير ΔT مع الزمن عند قيم مختلفة لدرجة حرارة دخول سائل نقل الحرارة (HTF) وقيم مختلفة لمعدل تدفقه في نظام الذوبان الداخلي. 40
- الشكل (5 - 2) تغير درجة حرارة دخول وخروج سائل نقل الحرارة (HTF) مع الزمن عند تطبيق عدة أحمال حرارية ثابتة وعدة معدلات تدفق لنظام الذوبان الداخلي. 41
- الشكل (6 - 2) تغير الطاقة المطروحة من النظام مع الزمن عند تطبيق عدة أحمال حرارية ثابتة وعدة معدلات تدفق لنظام الذوبان الداخلي. 42
- الشكل (7 - 2) مخطط التجربة المنفذة. 43
- الشكل (8 - 2) الوشيعية الموجودة داخل الخزان الحراري: (a) عند استخدام الأنابيب دون أي إضافات، (b) عند استخدام عدة حلقات متداخلة بين الأنابيب، (c) عند استخدام زعانف حلقيّة متجاورة. 44
- الشكل (9 - 2) (a) كمية الجليد المتشكل مع الزمن، (b) توزيع درجات الحرارة مع الزمن، (c) عند سماكة 0.25mm، (d) 0.5mm، (e) 1mm، (f) 2mm، (g) 3mm. 45

- الشكل (2 - 10) معامل الكسر الكتلي عند مسافات مختلفة بين الريش (a) 20mm، (b) 30mm، (c) 40mm، (d) 50mm، (e) 60mm، (f) 70mm. 46
- الشكل (2 - 11) نموذج الخزان الحراري المستخدم. 48
- الشكل (2 - 12) النماذج الهندسية للأبعاد المدروسة. 48
- الشكل (2 - 13) منظور الخزان الحراري المستخدم. 50
- الشكل (2 - 14) العلاقة بين سماكة الطور الصلب المتشكل مع الزمن باستخدام طرق الحل الثلاث. 50
- الشكل (3 - 1) مخطط توضيحياً للدارة المدروسة. 54
- الشكل (3 - 2) مقطع عرضي للأنبوب الأسطواناني ضمن الخزان محاط بـ PCM. 54
- الشكل (3 - 3) علاقة موقع السطح الفاصل بين الطور السائل والطور الصلب مع الزمن عند $T_{\infty} = 267.15 K$. 58
- الشكل (3 - 4) علاقة موقع السطح الفاصل بين الطور السائل والطور الصلب مع الزمن عند $T_{\infty} = 265.15 K$. 59
- الشكل (4 - 1) النموذج الهندسي للخزان. 63
- الشكل (4 - 2) الشبكة المختارة لأحد النماذج المدروسة. 64
- الشكل (4 - 3) مقطع عرضي ضمن الخزان للنماذج المستخدمة (a,b,c). 67
- الشكل (4 - 4) توزيع درجات الحرارة ومعامل كسر السائل للنماذج الثلاثة. 68
- الشكل (4 - 5) العلاقة بين حجم الجليد المتشكل مع مساحة سطح التبادل الحراري للنماذج الثلاثة. 69
- الشكل (4 - 6) مقارنة نسبة الزيادة في حجم الجليد المتشكل مع الزمن بالنسبة لمساحة سطح التبادل الحراري للنماذج الثلاثة. 70
- الشكل (4 - 7) النماذج الهندسية المستخدمة في عملية المحاكاة. 71
- الشكل (4 - 8) شكل موجة الجليد المتشكل خلال ثمان ساعات للنموذج A. 73
- الشكل (4 - 9) توزيع درجات الحرارة خلال ثمان ساعات للنموذج A. 74
- الشكل (4 - 10) شكل موجة الجليد المتشكل خلال ثمان ساعات للنموذج B. 77
- الشكل (4 - 11) توزيع درجات الحرارة خلال ثمان ساعات للنموذج B. 78
- الشكل (4 - 12) توضع الحساسات ضمن الخزان لكل من النموذجين. 79
- الشكل (4 - 13) قراءة الحساسات قبل إضافة ريش للأنبوب النموذج A. 80
- الشكل (4 - 14) قراءة الحساسات بعد إضافة ريشتان للأنبوب النموذج B. 80
- الشكل (4 - 15) شكل موجة الجليد المتشكل خلال ثمان ساعات عمل للنموذج C. 82

- الشكل (4-16) توزيع درجات الحرارة خلال ثمان ساعات للنموذج C. 84
- الشكل (4-17) حجم الجليد المتشكل مع الزمن للنماذج A,B,C. 84
- الشكل (4-18) نموذج الخزان الحراري. 86
- الشكل (4-19) توزيع درجات الحرارة ضمن الخزان خلال 6 ساعات عمل. 88
- الشكل (4-20) شكل موجة الجليد المتشكل ضمن الخزان خلال 6 ساعات عمل. 90
- الشكل (4-21) مقارنة بين الدراسة التحليلية والحل العددي للنموذج (A). 91
- الشكل (4-22) توزيع درجات الحرارة ضمن الخزان بعد 8 ساعات عمل. [4] 93
- الشكل (4-23) مقارنة بين الدراسة العددية والدراسة المرجعية. 94

فهرس الجداول

29	الجدول (1 - 1) استراتيجيات تشغيل النظام الموضح بالشكل (1-4).
31	الجدول (2 - 1) استراتيجيات تشغيل النظام الموضح بالشكل (1-6).
38	الجدول (1 - 2) البارامترات التجريبية لعملية الشحن والتفريغ.
49	الجدول (2 - 2) سماكة الطور الصلب المتشكل مع الزمن [3].
57	الجدول (1 - 3) البارامترات المستخدمة لحل المعادلة (3-8).
59	الجدول (2 - 3) علاقة نصف قطر موجة التجمد (السطح الفاصل) مع الزمن.
63	الجدول (1 - 4) الأبعاد الهندسية للنموذج الهندسي المدروس.
65	الجدول (2 - 4) شروط مرحلة الشبكة Mesh.
66	الجدول (3 - 4) الكود المستخدم ضمن برنامج المحاكاة.
69	الجدول (4 - 4) العلاقة بين مساحة سطح التبادل الحراري وحجم الجليد المتشكل في الخزان لكل من النماذج (a, b, c).
71	الجدول (5 - 4) الأبعاد الهندسية.
75	الجدول (6 - 4) نصف قطر موجة التجمد (السطح الفاصل بين الطورين) مع الزمن.
75	الجدول (7 - 4) العلاقة بين حجم الجليد المتشكل مع الزمن للنموذج (A).
79	الجدول (8 - 4) العلاقة بين حجم الجليد المتشكل مع الزمن للنموذج (B).
84	الجدول (9 - 4) العلاقة بين حجم الجليد المتشكل مع الزمن للنموذج (C).
90	الجدول (10 - 4) العلاقة بين حجم الجليد المتشكل ضمن الخزان مع الزمن.
93	الجدول (11 - 4) العلاقة بين سماكة الطور الصلب المتشكل مع الزمن [4].
94	الجدول (12 - 4) حجم الجليد المتشكل ضمن الخزان مع الزمن.

جدول الرموز والمصطلحات

المصطلح	المعنى	الوحدة
Q	الطاقة الحرارية المخزنة	[W]
C_p	السعة الحرارية بثبات الضغط	[kJ/kg.K]
ΔH	الحرارة الكامنة للانصهار في الحالة (صلب-سائل)	[J/kg]
R_{sol}	المقاومة الحرارية للطور الصلب	[K/W]
K_{sol}	معامل التوصيل الحراري للجليد	[W/m.K]
ρ	الكثافة	[kg/m ³]
T_f	درجة حرارة التحول الطوري	[K]
T_{∞}	درجة حرارة HTF	[K]
T	درجة الحرارة الابتدائية للمادة المتحولة الطور	[K]
ΔT	تغير درجة الحرارة	[K]
D	قطر الخزان	[mm]
L	ارتفاع الخزان	[mm]
V	حجم الخزان	[m ³]
d	القطر الخارجي الأنبوب	[mm]
t	الزمن	[s]
h	ارتفاع الريشة	[mm]
δ	سماكة الريشة	[mm]
n	عدد الريش	-
m	كتلة وسيط التخزين	[kg]
C	السعة الحرارية	[kJ/ K]
β	معامل الكسر الكتلي	-

المُستخلص

1. خلفية البحث:

تُستخدم أنظمة تخزين الجليد في تطبيقات التبريد وقد أثبتت هذه الأنظمة كفاءتها، حيث يتم إزاحة الأحمال الكهربائية المرتفعة لأنظمة التبريد من ساعات الذروة حيث تكون تكاليف الطاقة الكهربائية مرتفعة إلى خارج ساعات الذروة حيث تكون الطاقة الكهربائية أكثر وفرة وأقل تكلفة.

2. هدف البحث:

إضافة سطوح للأنابيب الموجودة في خزان جليد حراري طوري بغاية التحسين من أداء الخزان.

3. المواد والطرائق:

أُجريت دراسة عددية حيث تم تصميم خزان جليد حراري طوري، وإجراء العديد من عمليات المحاكاة ثم تم تحصيل النتائج وجرت المقارنة فيما بينها إضافة لمقارنة النتائج مع نتائج الدراسات السابقة.

4. النتائج العملية:

تُشير نتائج المحاكاة الحاسوبية إلى أنه عند درجة حرارة سائل نقل الحرارة (267.15k)، وبعد (6 ساعات) عمل كانت نسبة الجليد المتشكل عند نهاية التجربة (97%) من حجم المادة المتغيرة الطور ضمن الخزان أي تم الحصول على تجمد كامل تقريباً.

5. الاستنتاجات من وجهة نظر الباحث:

أظهرت الدراسة فعالية إضافة الريش إلى أنابيب المبادل الحراري ضمن خزان الجليد الحراري الطوري. حيث أدت إضافة الريش إلى تعزيز انتقال الحرارة ضمن PCM ووصول موجة التجمد إلى نقاط أبعد عن سطح التبريد وبزمن أقل، بالتالي زيادة الطاقة المخزنة.

6. الكلمات المفتاحية:

أنظمة تخزين الجليد، التخزين الكامن، المواد المتغيرة الطور، CFD نمذجة ومحاكاة.

الإطار العام للبحث

1. مقدمة:

أصبحت مصادر الطاقة المتجددة مثل الطاقة الشمسية الكهروضوئية وطاقة الرياح أكثر شعبية وبأسعار معقولة. في حين أن هذه الأشكال من الطاقة نظيفة وغير محدودة، إلا أنها متقطعة بطبيعتها وتتطلب شكل من أشكال تخزين الطاقة لزيادة فعاليتها. لذلك فإن البحث والتطوير في مجال تخزين الطاقة لا يقل أهمية عن تطوير أساليب استخدام الطاقة المتجددة. يعتبر التخزين الكامن أحد أهم أشكال تخزين الطاقة، حيث يعتمد على مبدأ تخزين الطاقة الحرارية في المادة المتغيرة الطور وذلك عندما يكون إمداد الطاقة مرتفعاً والطلب منخفضاً، والاستفادة من الطاقة المخزنة عندما يكون الطلب مرتفعاً. وبالتالي موازنة الأحمال الكهربائية. يعتبر تخزين الجليد أهم الأمثلة على التخزين الكامن حيث تم دمج خزانات الجليد في العديد من أنظمة التبريد والتكييف العاملة حول العالم مثل المدارس والمباني التجارية والجامعات. والتي أثبتت كفاءتها مما دفع الباحثين للسعي في تطوير هذه الخزانات.

2. الدراسات السابقة:

أشارت الدراسات السابقة إلى أهمية التخزين الكامن وضرورة دمج خزانات الجليد بأنظمة التكييف والتبريد للتخفيف من الاستهلاك الكهربائي في ساعات الذروة وإزاحة هذه الأحمال خارج ساعات الذروة. لكن انخفاض الموصلية الحرارية للمواد المتغيرة الطور دفع الباحثين للسعي لتحسين أداء هذه الخزانات للحصول على أكبر كمية من الطاقة المخزنة إما بتعديل شكل المبادل الحراري ضمن الخزان كاستخدام مبادل حلزوني، أو باستخدام سطوح معدنية تصل بين أنابيب المبادل. خُصص الفصل الثاني من البحث لاستعراض الدراسات المرجعية ذات الصلة بموضوع البحث والتي تدعم ضرورة البحث والتطوير في أنظمة تخزين الجليد.

3. مشكلة البحث:

إن تخزين الطاقة الكامنة يعتمد على الطاقة الممتصة أو المطروحة من المواد المتحولة الطور (PCM) أثناء مرورها بمرحلة التحول الطوري خلال عملية التجمد والانصهار (الشحن-التفريغ)، لكن المشكلة في هذه المواد هي انخفاض الموصلية الحرارية لها والتي تؤدي إلى انخفاض معدل التصلب والانصهار للمادة وفي أنظمة تخزين الجليد وخاصة التي تعمل بنظام الذوبان الداخلي تقتصر مساحة سطح التبادل الحراري على مساحة سطح الأنبوب الذي يمر من خلاله سائل نقل الحرارة.

4. الهدف من البحث:

اختبار خزان جليد طوري يحتوي على مبادل حراري وذلك بعد إضافة ريش على أنابيب المبادل لزيادة مساحة سطح التبادل الحراري بهدف زيادة نسبة الطور الصلب المتشكل ضمن الخزان، بالتالي الحصول على أكبر قدر من الطاقة المخزنة.

5. أهمية البحث:

لفت الانتباه إلى أهمية دمج أنظمة التخزين الكامن في أنظمة التبريد والتكييف. واستغلال الطاقة المخزنة للمساهمة في تخفيض الضغط على الشبكة الكهربائية في ساعات الذروة من خلال موازنة الأحمال الكهربائية. حيث تُعد أنظمة التبريد والتكييف المدمجة من أهم التقنيات المستخدمة حالياً حول العالم لهذا الغرض وذلك نظراً لتغيرات المناخ وعدم قدرة الأنظمة التقليدية على تغطية الأحمال المطلوبة.

6. مسوغات البحث:

- الكلفة العالية لإنتاج الطاقة الكهربائية في ساعات الذروة إضافة إلى ارتفاع أسعار الوقود وصعوبة تأمينه.
- الحاجة في بعض التطبيقات للوصول لدرجات حرارة أقل من درجة الحرارة التي يتم الحصول عليها من مبردات المياه التقليدية (الشيلرات).

○ السعي لتحسين أداء خزانات الجليد المستخدمة في أنظمة الذوبان الداخلية.

7. حدود البحث:

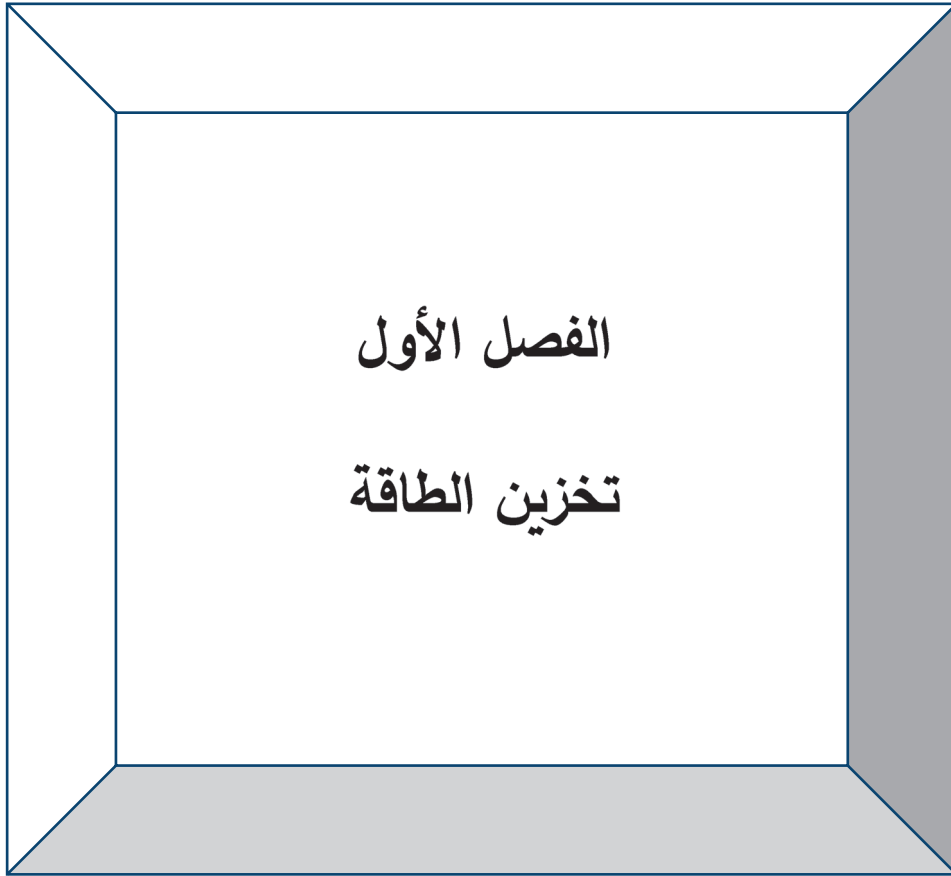
يتطرق هذا البحث إلى دراسة خزان جليد يعمل وفق نظام الذوبان الداخلي خلال دورة الشحن، المادة المتغيرة الطور هي الماء بدرجة حرارة الوسط المحيط، يحتوي الخزان على مبادل حراري نحاسي. تمت الدراسة بإضافة ريش على طول هذا المبادل بأبعاد، أعداد مختلفة واختبار أداء هذا الخزان مع الزمن.

8. منهج البحث وأدواته:

أُجريت دراسة عددية انطلاقاً من المعادلات الرياضية الناعمة لعملية التحول الطوري-عملية تشكل الجليد- حيث استُخدمت البرامج الحاسوبية المخصصة لدراسة المسائل الهندسية المختلفة ANSYS للحصول على قيم ومنحنيات بيانية وصور حرارية توضح النتائج التي وصلنا إليها في البحث. ثم تم تحليل ومناقشة هذه النتائج ومقارنتها مع نتائج الدراسات السابقة.

9. هيكل الرسالة:

نُظمت الدراسة في خمسة فصول بحيث تضمّن الفصل الأول مقدمة عن تخزين الطاقة والمواد المتغيرة الطور وأنظمة تخزين الجليد. ثمّ تمّ استعراض أهم ما توصلت إليه الدراسات المرجعية السابقة في الفصل الثاني. أمّا الفصل الثالث فقد تضمن الدراسة التحليلية المستخدمة لحل مسألة التحول الطوري وانتشار موجة التجمد. ومن ثمّ تم إجراء الدراسة العددية (المحاكاة الحاسوبية) في الفصل الرابع. وأخيراً عُرِضت النتائج والتوصيات في الفصل الخامس، ومن ثمّ ذُيلت الرسالة بالمراجع المستخدمة في هذا البحث.



الفصل الأول

تخزين الطاقة

Energy storage

1.1. مقدمة:

يشهد مجال تخزين الطاقة اهتماماً عالمياً واسعاً لما له من فوائد على صعيد التخفيض من التكاليف الأولية للمعدات من ناحية والمواءمة بين فترات ذروة الطلب وذروة الإنتاج من ناحية أخرى. يعد التخزين الكامن للحرارة (Latent Heat Storage) من أكثر أنواع التخزين الحراري كفاءةً، ويمثل العمل ضمنه مجالاً واعداً للبحث والتطوير، حيث يعتمد التخزين الكامن للحرارة على الطاقة الممتصة أو المطروحة من المواد المخزنة أثناء مرورها بمرحلة التحول الطوري من صلب إلى سائل أو من سائل إلى غاز أو العكس. كما تمتلك أنظمة التبريد المدمجة بنظام تخزين كامن (خزانات جليد) ميزات كبيرة مقارنة مع نظام التبريد التقليدي الذي يعتمد على (Chiller) فقط، وذلك لقدرتها على تخزين كميات كبيرة من الطاقة واستخدامها في أوقات تكون كلفة الطاقة الكهربائية أقل إما باستخدام التخزين الكامل أو الجزئي.

1.2. أنظمة تخزين الطاقة (Energy Storage Systems):

يتوفر العديد من أنظمة تخزين الطاقة وأهمها:

1.1.2. أنظمة تخزين ميكانيكية.

1.2.2. أنظمة تخزين كهروكيميائية.

1.3.2. أنظمة تخزين الهيدروجين.

1.4.2. أنظمة التخزين المحسوسة.

1.5.2. أنظمة التخزين الكامنة.

1. 1.2. أنظمة التخزين الميكانيكية:

وتقسم هذه الأنظمة إلى:

- أنظمة التخزين المائية تعتبر هذه الأنظمة من أقدم وسائل تخزين الطاقة حيث تستفيد هذه الأنظمة من الجاذبية الأرضية في توليد الطاقة، فالطاقة الكامنة المخزنة في الماء تولد طاقة كهربائية لدى سقوطها من خزان علوي إلى خزان سفلي وتخزن طاقة لدى رفعها. ففي الأوقات التي يكون فيها الطلب على الطاقة عالياً كأوقات الذروة، ينتقل الماء من الحوض العلوي إلى الحوض السفلي مروراً بالعنفة لتوليد الطاقة الكهربائية التي يتم تحويلها للشبكة. أما في الأوقات التي يكون فيها الطلب على الطاقة منخفضاً مثل ساعات الليل، يجري رفع الماء من الحوض السفلي إلى الحوض العلوي باستخدام المضخات العاملة على الطاقة الكهربائية التقليدية أو المولدة من مصادر طاقات متجددة.
- أنظمة تخزين الهواء المضغوط، يقوم على مبدأ تخزين الطاقة الكهربائية في شكل هواء مضغوط، حيث أصبح بالإمكان استخدام الهواء ليكون وسيطاً لتخزين الطاقة من خلال تحويل الطاقة الكهربائية المقدمة له إلى فعل ضغط ميكانيكي وبالتالي عندما يكون إمداد الكهرباء مرتفع والطلب منخفض يتم استخدام الطاقة الكهربائية لضغط الهواء وتخزينه ضمن وعاء التخزين (أوعية معينة أو كهوف جوفية تحت الأرض). أما عند الحاجة لاستعادة الطاقة المخزنة فيتم تحرير هذا الهواء المضغوط إلى توربين لتوليد الطاقة الكهربائية.
- أنظمة تخزين الطاقة بدولاب العطالة وقد ظهرت عام 1970م لأول مرة فكرة استخدام دولاب العطالة كوسيلة لتخزين الطاقة في المركبات الكهربائية، حيث تعتمد هذه الأنظمة على تخزين الطاقة الكهربائية على شكل حركة دورانية وذلك في ظل ضياعات احتكاك منخفضة، إن دولاب العطالة كأى عنصر دوار بإمكانه تبادل الطاقة بالاتجاهين استقبالياً أو إعطاء عبر محور دورانه.

1. 2.2. أنظمة التخزين الكهروكيميائية:

وهي تقنية تخزين الطاقة الأكثر استخداماً، تعتمد هذه الأنظمة على تخزين الطاقة في البطاريات وتعرف البطارية بأنها عنصر كهروكيميائي يعتمد على تخزين الطاقة الكهربائية بصورة كيميائية والتي يمكن تحويلها مرة أخرى لطاقة كهربائية عند الحاجة، وذلك بواسطة تفاعلات الأكسدة والإرجاع. تتناسب كمية الطاقة الكهربائية المخزنة بالبطارية مع السعة والتي تحددها مواد البطارية وبنيتها وتصميمها. إن استخدام البطاريات مناسب لتطبيقات الطاقة التي تتطلب طاقة عالية لمدة طويلة، مثل السيارات الكهربائية والأجهزة المحمولة وغيرها. أحد الأمثلة على هذه البطاريات هي بطاريات الرصاص، بطاريات النيكل والكاديوم وبطاريات الليثيوم.

1. 3.2. أنظمة تخزين الهيدروجين:

يعتبر الهيدروجين من أفضل وسائط تخزين الطاقة ويعمل الباحثون حالياً على تطوير تقنيات عالية الكفاءة لاستغلال مصادر الطاقة المتجددة لإنتاج الهيدروجين، وذلك نظراً لخواصه الكيميائية والفيزيائية، بالإضافة لتوفره بنسبة كبيرة حيث يدخل في تركيب جميع المصادر المائية ولا ينتج عن حرقه أي انبعاثات ملوثة أو ضارة. يتم تخزين الهيدروجين حالياً على شكل غاز مضغوط، سائل مبرد أو هيدريدات معادن. إضافة لكونه وسيطاً ممتازاً وواعداً لتخزين الطاقة فهو يستخدم في الصناعات الغذائية، البتروكيميائية كتنكرير النفط، الكيميائية، الالكترونية، كما يستخدم وقوداً للمركبات الفضائية وغيرها من الاستخدامات الأخرى.

1. 4.2. أنظمة التخزين المحسوسة:

تعتمد هذه الأنظمة على استعمال مواد سائلة أو صلبة فقط في تخزين الطاقة من دون حدوث أي تحول طوري في المادة أي أن المادة تبقى بشكل طور واحد حيث يتم تخزين الطاقة المحسوسة بتغيير درجة الحرارة المكتسبة أو المفقودة. أما الغازات فلا تستعمل في التخزين المحسوس لأنها ذات حرارة نوعية حجمية صغيرة. بالنسبة للمواد السائلة المستخدمة فيعد الماء المادة الشائعة الأكثر استخداماً في تخزين الطاقة المحسوسة، وهناك مواد أخرى تستخدم لهذا الغرض (الزيت، السوائل الكحولية...). أما بالنسبة للمواد الصلبة

المستخدمة لهذا الغرض فهي عبارة عن (الصخور، الرمل، مادة اسمنتية، أحجار قرميدية، حديد ...) وتعد الصخور ومادة الرمل أفضل المواد المستخدمة وذلك لسعتهما الحرارية المقبولة ورخص ثمنها.

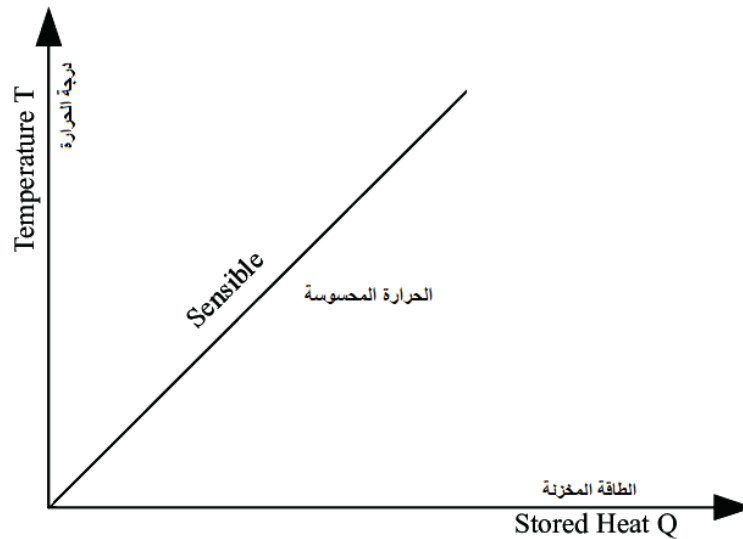
يفضل استخدام المواد السائلة عند درجات الحرارة المنخفضة والمتوسطة واستخدام المواد الصلبة في التطبيقات التي تتطلب درجات حرارة عالية مثل تدفئة الأبنية والتطبيقات الشمسية، حيث تتراوح درجة الحرارة التي تعمل عندها المواد الصلبة بين $(40 \div 75^\circ\text{C})$ للأحجار والأسمنت، و (150°C) للمواد المعدنية. [1]

تنتقل الحرارة المراد تخزينها (Q) إلى المادة المخزنة للطاقة بفعل فرق درجات الحرارة بين الوسيطين كما هو موضح بالشكل (1-1).

$$Q_{\text{sens}} = C.\Delta T = m.c.\Delta T = \rho.V.c.\Delta T \quad [\text{kJ}] \quad (1-1)$$

حيث:

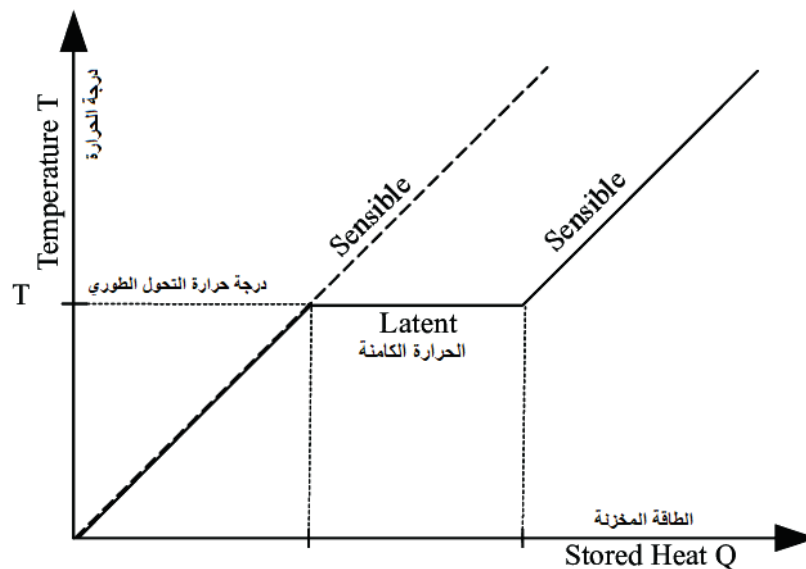
m	كتلة وسيط التخزين.	[kg]
V	حجم وسيط التخزين.	[m ³]
ρ	كثافة وسيط التخزين.	[kg/m ³]
ΔT	تغير درجة الحرارة.	[K]
C	السعة الحرارية.	[kJ/ K]
c	الحرارة النوعية لوسيط التخزين.	[kJ/kg.K]



الشكل (1-1) التخزين المحسوس.

5.2.1. أنظمة التخزين الكامنة:

تعتمد هذه الأنظمة في تخزين الطاقة الحرارية على خاصية التحول الطوري للمواد بامتصاص أو طرح الحرارة عند درجة حرارة ثابتة كما يوضح الشكل (2-1). وتسمى المواد المستخدمة في عملية التخزين الكامن بالمواد المتغيرة الطور (Phase Change Materials) PCMs.



الشكل (2-1) التخزين الكامن.

كمية الحرارة المخزنة أو المطروحة في أنظمة تخزين الطاقة الكامنة تعطى بالعلاقة:

$$Q_{\text{latent}} = m \cdot \Delta h \quad [\text{kJ}] \quad (2-1)$$

حيث:

m كتلة وسيط التخزين. $[\text{kg}]$

Δh انتالبي التحول الطوري لوسيط التخزين. $[\text{kJ}]$

وهناك ثلاث حالات يمكن استخدامها لتخزين وتفريغ الطاقة هي:

- التغيير من الحالة السائلة إلى الحالة الصلبة وبالعكس.
- التغيير من الحالة السائلة إلى الحالة الغازية وبالعكس.
- التغيير من حالة صلبة إلى حالة صلبة أخرى وبالعكس.

إن المواد التي يتغير طورها من الحالة السائلة إلى الحالة الصلبة، وبالعكس (موضوع البحث). هي المستخدمة في معظم التطبيقات وذلك لكون التغيير من الحالة السائلة إلى الغازية يحتاج إلى حجوم كبيرة، وبالتالي ستكون كلفة المنظومة عالية. وكذلك فإن التغيير من حالة صلبة إلى حالة صلبة أخرى ينتج كمية حرارة قليلة مقارنة ببقية الطرق.

إن المواد التي يتغير طورها في مجال درجات حرارة مناسبة وذات كمية حرارة انصهار كبيرة مع بقاء مواصفاتها ثابتة بعد عدة دورات من الشحن والتفريغ (الانصهار والتجمد) هي المواد المناسبة لهذا النوع من التخزين، وذلك كونها ستساهم في تقليل الحجم والكلفة.

1.3. المواد المتغيرة الطور (Phase Change Materials, PCMs):

المواد المتغيرة الطور هي مواد قادرة على تخزين كميات كبيرة من الطاقة وذلك من خلال امتصاص الحرارة أو طرحها عندما تتحول هذه المواد من طور إلى آخر.

1.3.1. عوامل اختيار المواد المتغيرة الطور:

1.1.3.1. الخصائص الحرارية:

- درجة حرارة التحول الطوري: وهي درجة الحرارة التي يتم عندها التحول من طور إلى آخر وهي الأكثر أهمية في اختيار المادة المتغيرة الطور ويجب أن تكون درجة حرارة التحول الطوري مناسبة للتطبيق المستخدم.
- انتالبي التحول الطوري بالنسبة لواحدة الحجم: وهو يحدد كمية الطاقة المخزنة، يجب أن يكون انتالبي التحول الطوري للمادة المتحولة الطور أكبر ما يمكن لكي تكون كمية الطاقة المخزنة أعظم ما يمكن.
- معامل التوصيل الحراري: يمكن زيادة معامل التوصيل الحراري بإضافة ريش على سطح التبادل الحراري ضمن المادة المتحولة الطور لزيادة سطوح التماس وتعزيز انتقال الحرارة، أو إضافة جزيئات نانوية ضمن PCM كما يمكن خلط ال PCM بمواد أخرى تؤدي لزيادة معامل التوصيل الحراري لها.

2.1.3.1. الخصائص الفيزيائية:

- الاستقرار الدوري: وهو قدرة المادة المتحولة الطور على تخزين وطرح الطاقة لعدة دورات تشغيل مع بقاء مواصفاتها الفيزيائية والكيميائية ثابتة، حيث تبدأ دورة التشغيل عند انصهار المادة الصلبة وتحولها بشكل كامل إلى الحالة السائلة ثم تحولها مرة أخرى إلى الحالة الأولى وهي المادة الصلبة.

- التغير الحجمي في المواد المتغيرة الطور: أن يكون التغير الحجمي في حالة التحول الطوري (من الطور الصلب إلى الطور السائل) أو العكس صغير جداً ويمكن إهماله في أغلب الأحيان، مثال: التغير الحجمي للماء هو 9.1% فقط.[1]

3.1.3.1. الخصائص الحركية:

- تأثير ظاهرة التبريد الدوني على عملية التخزين: ظاهرة التبريد الدوني وتعني وصول درجة حرارة المادة المتحولة الطور إلى درجة حرارة التحول الطوري دون الانتقال للطور الصلب.
- وجود نسبة تبلور كافية.

4.1.3.1. الخصائص الكيميائية:

- الاستقرار الكيميائي على المدى الطويل.
- أن تكون المواد المستخدمة غير سامة وغير قابلة للاحتراق.
- تأثير المواد المخزنة للطاقة على نوعية معدن الخزان الحراري: إن التطابق الكيميائي بين المواد المتحولة الطور والمواد التي تصنع منها الخزانات الخاصة بها يساعد على زيادة فترة استخدامها.

5.1.3.1. الخصائص الاقتصادية:

- رخيصة الثمن.
- متوفرة في الأسواق.

2.3.1. تصنيف المواد المتغيرة الطور:

تصنف المواد المتغيرة الطور بشكل عام إلى نوعين أساسيين:

- المواد العضوية: مثل البارافينات.
- المواد اللاعضوية: مثل الأملاح المهدرجة.

3.3.1. تحسين معامل التوصيل الحراري ضمن المواد المتغيرة الطور (PCM):

من أهم الطرق المستخدمة لتحسين معامل التوصيل الحراري هو زيادة مساحة سطح التبادل الحراري عن طريق إضافة الريش أو الرقائق المعدنية، وتعتبر الريش أكثر صلابة وسماكة من الرقائق المعدنية التي تكون سماكتها أقل من (1mm) حيث تعتبر هذه الرقائق ضعيفة البنية مما يضعف إمكانية زيادة طولها وذلك نتيجة السماكة الصغيرة لها مما يزيد من إمكانية تأكلها (إضافة الريش هي الطريقة المعتمدة ضمن هذا البحث). عند تصميم واختيار الريش يجب أن نأخذ بعين الاعتبار ما يلي:

- معامل التوصيل الحراري لمادة الريشة يجب أن يكون أكبر ما يمكن، لذلك فإن الريش تصنع من المواد المعدنية وخاصة النحاس، الألومنيوم، الحديد (وقد اخترنا النحاس ضمن هذا البحث بسبب الموصلية الحرارية العالية له).
- نسبة محيط الريشة إلى مساحة مقطعها العرضي يجب أن تكون أكبر ما يمكن، ويتحقق هذا الأمر في حالة الريش المستطيلة الرقيقة، أو الدائرية الرفيعة (حيث اخترنا الريش المستطيلة الرقيقة ضمن هذا البحث).

4.1. أنظمة تخزين الجليد:

تستخدم أنظمة تخزين الجليد في تطبيقات التبريد وقد أثبتت هذه الأنظمة كفاءتها، حيث يتم إزاحة الأحمال الكهربائية المرتفعة لأنظمة التبريد من ساعات الذروة حيث تكون تكاليف الطاقة الكهربائية مرتفعة إلى خارج ساعات الذروة حيث تكون الطاقة الكهربائية أكثر وفرة وأقل تكلفة، وتقسّم هذه الأنظمة حسب أسلوب الانصهار أثناء عملية التفريغ إلى:

1.4.1. أنظمة الذوبان الداخلي.

2.4.1. أنظمة الذوبان الخارجي.

1.4.1. أنظمة الذوبان الداخلي:

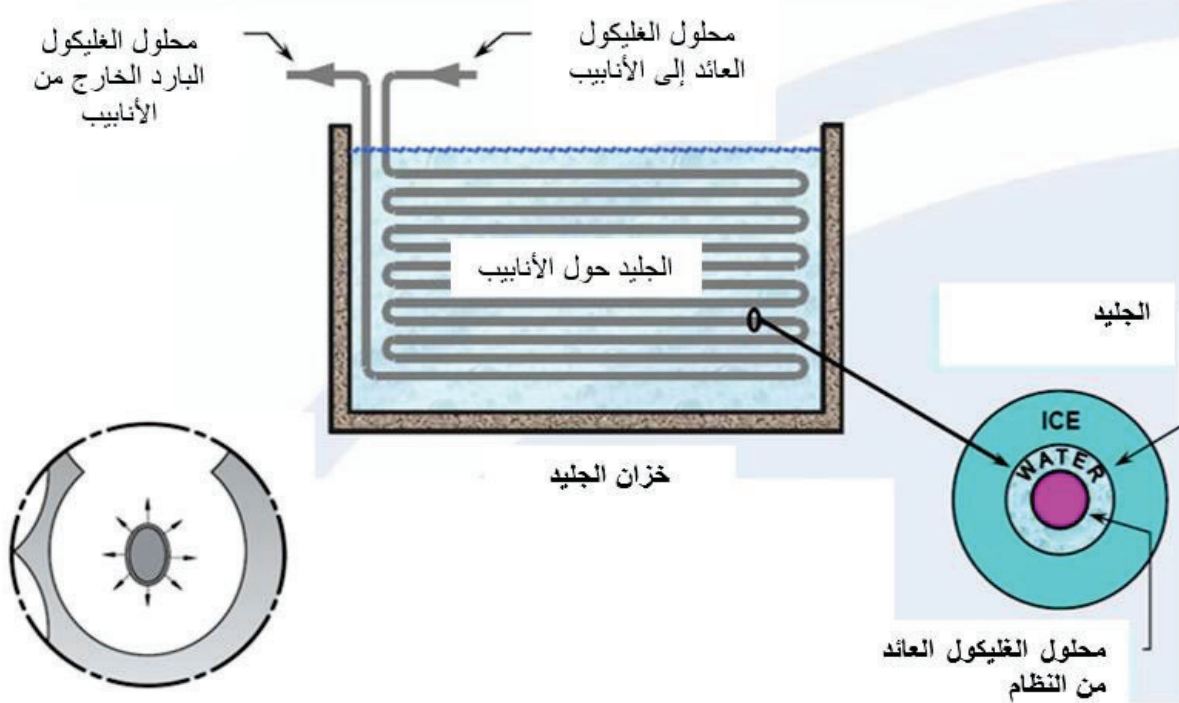
• آلية عمل النظام:

○ دورة الشحن:

حيث يتم تشكيل الجليد من خلال جريان الغليكول البارد والقادم من المبردات عبر أنابيب الوشيعية الموجودة ضمن الخزان.

○ دورة التفريغ:

يتدفق محلول الغليكول (العائد من المبادل الحراري الخاص بالنظام المستخدم) ضمن أنابيب الوشيعية الموجودة في خزان الجليد، ونتيجة عملية التبادل الحراري يبدأ الجليد بالذوبان من داخل حلقة الجليد نحو الخارج كما يوضح الشكل (3-1) ولذلك سمي بنظام الذوبان الداخلي.



الشكل (3-1) نظام الذوبان الداخلي.

• مميزات نظام الدوبان الداخلي:

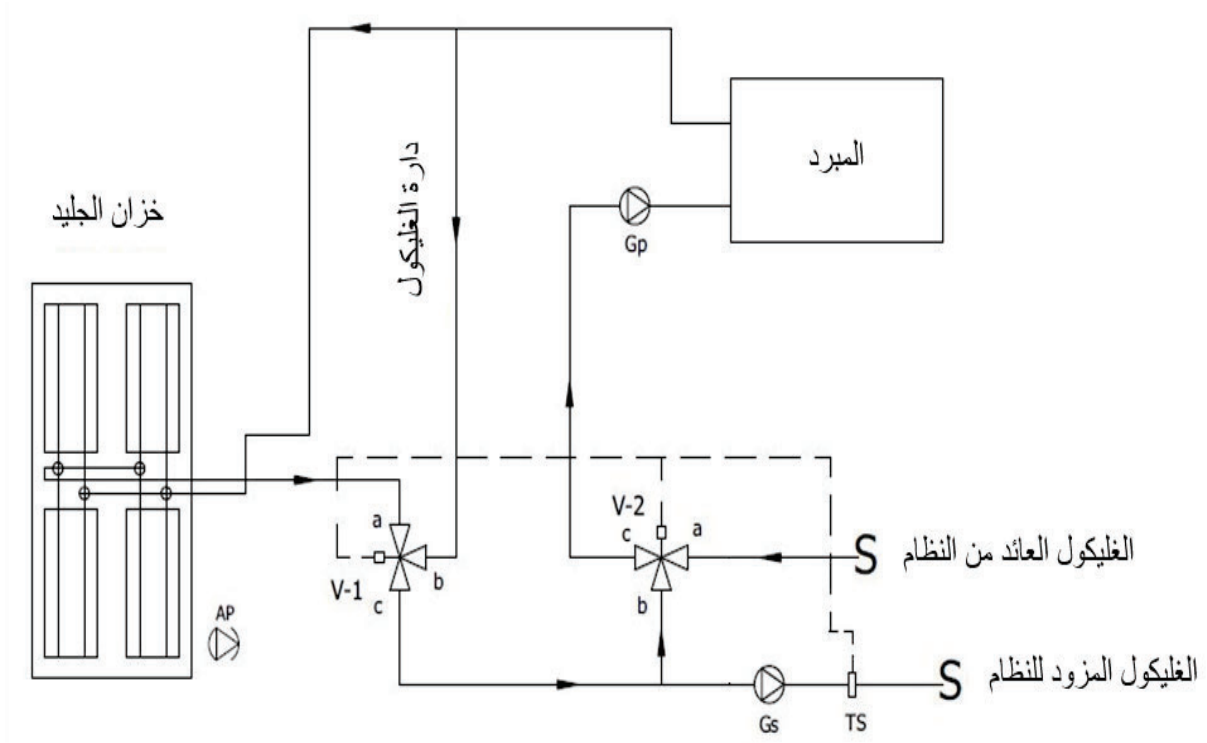
❖ درجة حرارة محلول الغليكول المزود للنظام أثناء عملية التفريغ (3°C). [8]

❖ التحكم بالنظام بسيط وذلك كونها دائرة مغلقة.

• مساوئ نظام الدوبان الداخلي:

❖ لا يمكن للنظام تتبع تقلبات حمولة التبريد السريعة.

يوضح الشكل (4-1) الدارة البسيطة لأنظمة تخزين الجليد بنظام الدوبان الداخلي.



Gp: مضخة لدارة الغليكول، V-1 & V-2: صمام تحكم ثلاثي، Gs: مضخة ثانوية لدارة الغليكول، TS: حساس حراري
Ap: مضخة هواء.

الشكل (4-1) الدارة البسيطة لأنظمة تخزين الجليد (نظام الدوبان الداخلي).

الجدول (1-1) استراتيجيات تشغيل النظام الموضح بالشكل (1-4).

دائرة الغليكول							
حساس حراري	الصمامات		المضخات			المبرد	وضعية التشغيل
TS	V-2	V-1	Ap	Gs	Gp		
x	b-c	a-c	on	off	on	on	حالة تخزين الجليد
on	a-c	b-c	off	on	on	on	التبريد بالمبرد فقط
on	a-c	a-b/c	on	on	on	on	التبريد اعتماداً على المبرد وخزانات الجليد معاً
on	a-c	a-b/c	on	on	on	off	التبريد اعتماداً على خزانات الجليد فقط
on	a-b/c	a-c	on	on	on	on	حالة التبريد بالإضافة لتخزين الجليد

2.4.1. أنظمة الذوبان الخارجي:

• آلية عمل النظام:

○ دورة الشحن:

حيث يتم تشكل الجليد من خلال جريان الغليكول البارد والقادم من المبردات عبر أنابيب الوشيعية الموجودة

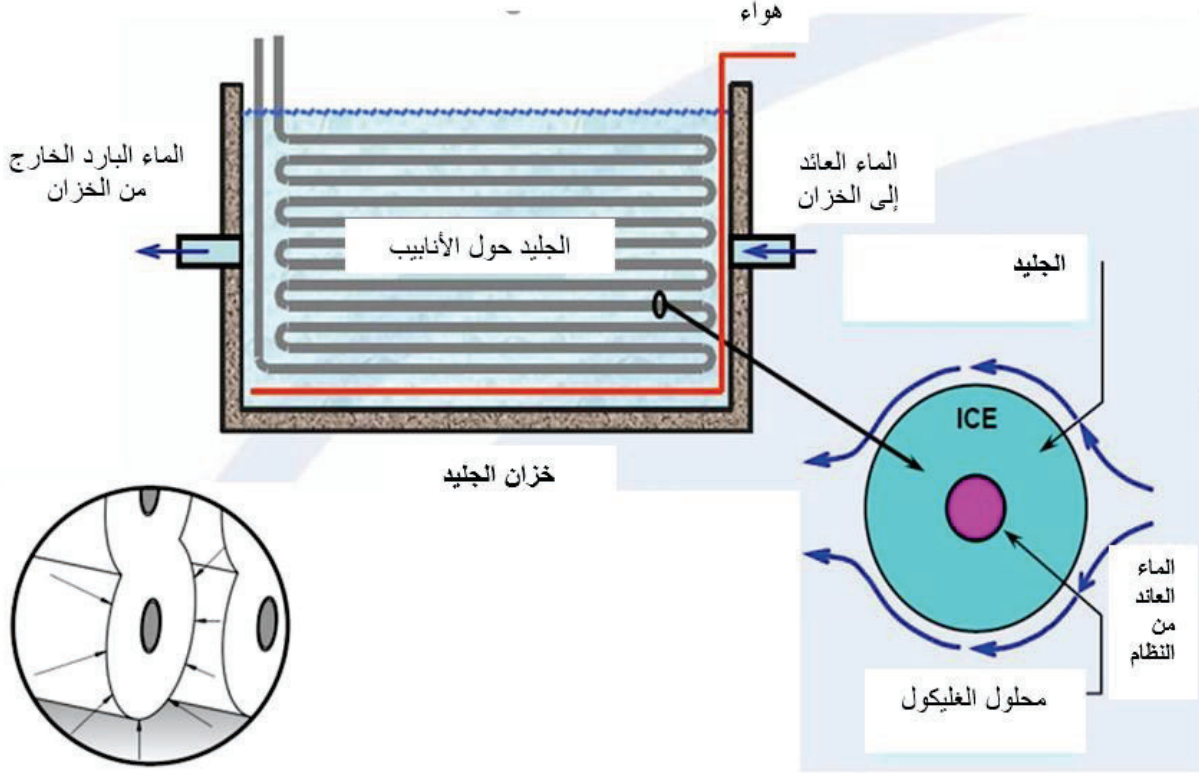
ضمن الخزان.

○ دورة التفريغ:

يتدفق الماء الموجود في الخزان ضمن وشائع المبادل الحراري للنظام المستخدم للتغلب على الحمل الحراري

مما يؤدي لذوبان الجليد المتشكل حول أنابيب الوشيعية ضمن الخزان من خارج حلقة الجليد نحو الداخل

كما يوضح الشكل (1-5) ولذلك سمي بنظام الذوبان الخارجي.



الشكل (1-5) نظام الذوبان الخارجي.

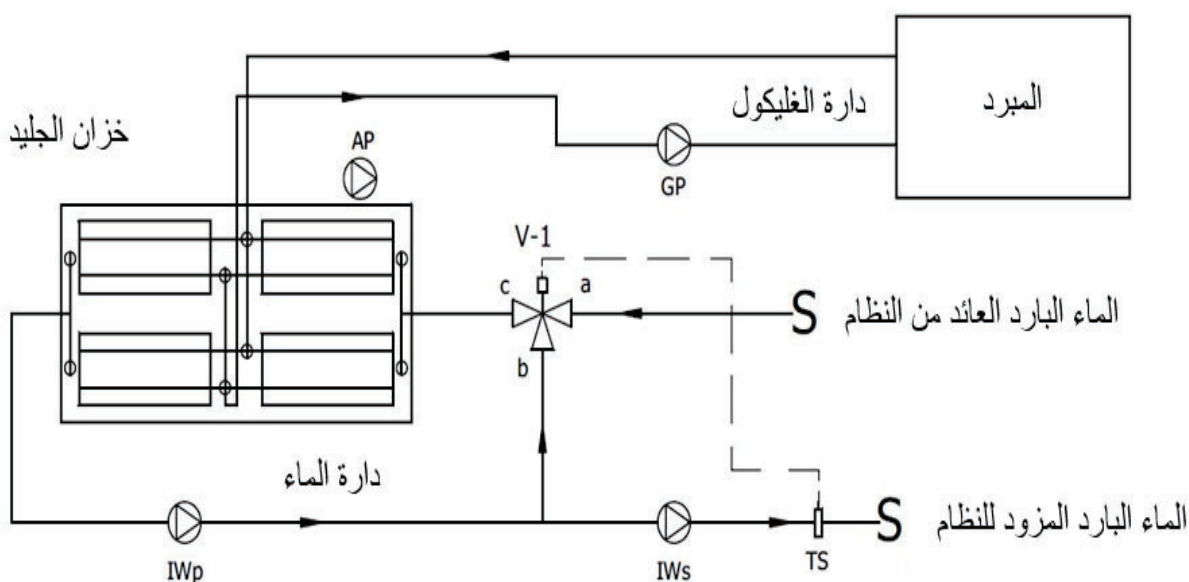
• مميزات نظام الذوبان الخارجي:

- ❖ درجة حرارة الماء البارد المزود للنظام (1.1°C) أو أقل. [8]
- ❖ التجاوب السريع مع الحمل التبريدي لتلبية متطلبات التبريد لتكييف الهواء أو التطبيقات العملية وذلك بتغيير تدفق الماء البارد ضمن الدارة والذي يؤدي إلى تغيير معدل ذوبان الجليد.

• مساوئ نظام الذوبان الخارجي:

- ❖ يؤدي وجود دارتين للعمل (دارة الغليكوّل أثناء الشحن، دارة الماء أثناء التفريغ) إلى وجود تجهيزات ومكونات تحكم أكثر مقارنة مع نظام الذوبان الداخلي.

يوضح الشكل (1-6) الدارة البسيطة لأنظمة تخزين الجليد بنظام الذوبان الخارجي.



GP: مضخة لدائرة الغليكول، V-1: صمام تحكم ثلاثي، IWp: مضخة لدائرة الماء، TS: حساس حراري
 Ap: مضخة هواء، IWs: مضخة ثانوية لدائرة الماء.

الشكل (6-1) الدارة البسيطة لأنظمة تخزين الجليد (نظام الذوبان الخارجي).

الجدول (2-1) استراتيجيات تشغيل النظام الموضح بالشكل (6-1).

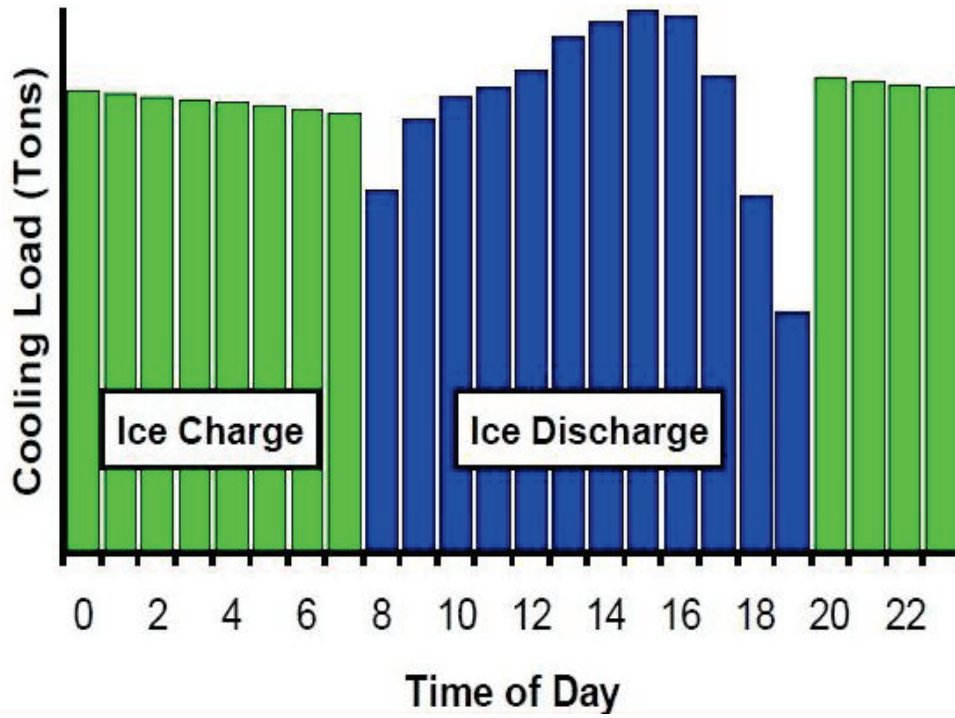
دائرة الماء البارد		دائرة الغليكول				المبرد	وضعية التشغيل
حساس حراري	الصمام	المضخات		Ap	Gp		
TS	V-1	IWs	IWp	Ap	Gp		
x	-	off	off	on	on	on	حالة تخزين الجليد
on	a-b/c	on	on	on	off	off	التبريد اعتماداً على خزانات الجليد فقط

5.1. طرق التحكم بأنظمة تخزين الجليد لتغطية الحمل التبريدي:

1.5.1. أنظمة التخزين الكامل:

يعتمد هذا النظام على تغطية كامل الحمل التبريدي عن طريق نظام تخزين الجليد، حيث يعمل المبرد التقليدي خارج ساعات الذروة لتخزين كمية الجليد المطلوبة ضمن الخزانات، وفي أوقات الذروة يتم إطفاء المبرد التقليدي واستعمال الجليد الذي تم تخزينه لتغطية كامل الحمل التبريدي كما يوضح الشكل (7-1).

تؤمن أنظمة التخزين الكامل أكبر قدر من التوفير في تكاليف الطاقة، لكن التكلفة الأولية لهذه الأنظمة مرتفعة وذلك نظراً للحاجة لمعدات تخزين كبيرة.

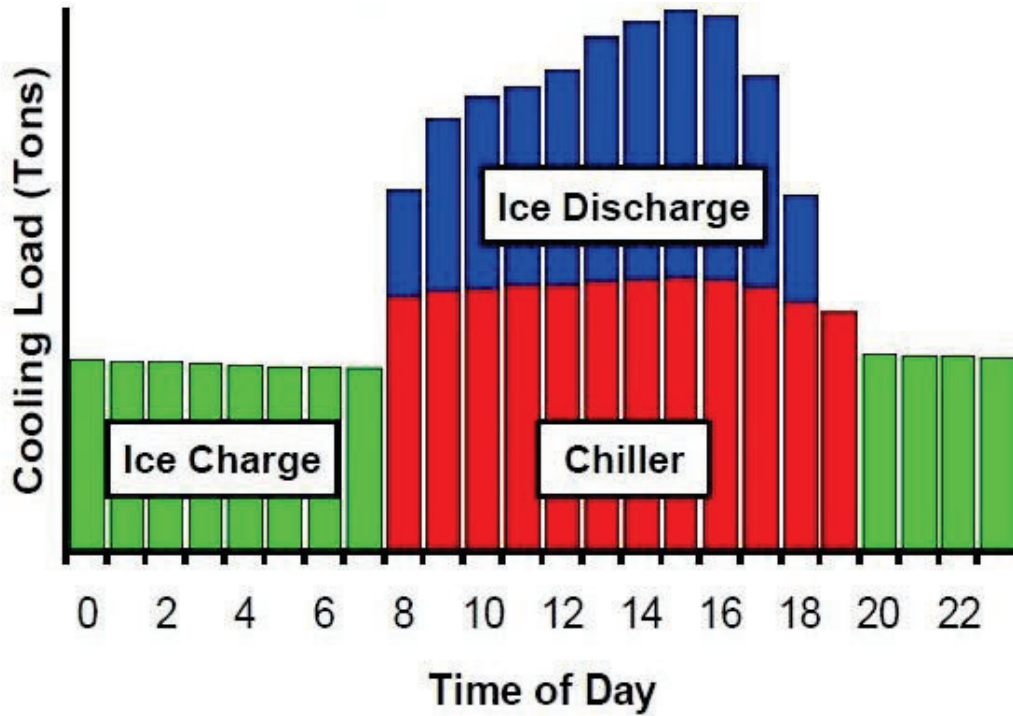


الشكل (7-1) نظام التخزين الكامل.

2.5.1. أنظمة التخزين الجزئي:

يعتمد هذا النظام على تغطية جزء من الحمل التبريدي عن طريق نظام تخزين الجليد، حيث يعمل المبرد التقليدي خارج ساعات الذروة لتخزين كمية الجليد المطلوبة ضمن الخزانات، وفي أوقات الذروة يعمل كل من المبرد التقليدي وخزانات الجليد لتغطية الحمل التبريدي كما يوضح الشكل (8-1).

إن استطاعة المبرد التقليدي (Chiller) المطلوب لهذا النظام ما يقارب 60% من الاستطاعة اللازمة لنظام التبريد التقليدي. [8]



الشكل (8-1) نظام التخزين الجزئي.

6.1. تطبيقات استخدام أنظمة تخزين الجليد:

إن أي نظام تبريد ماء يمكن أن يكون تطبيق جيد لاستخدام تخزين الجليد، تعتبر أنظمة تكييف الهواء الأكثر شيوعاً لاستخدام تخزين الطاقة الحرارية وذلك نتيجة التفاوت الكبير الحاصل لأشكال الأحمال الحرارية النهارية في العديد من التطبيقات كما في (المدارس، الجامعات، المؤسسات الحكومية، المطاعم، المكتبات...) حيث تتمثل هذه الأماكن بوجود ساعات محددة فقط لحدوث الحمل الأقصى خلال النهار. تم استخدام تقنية خزن الطاقة الحرارية (خزانات الجليد) والتي تستخدم معدات تقوم بإنتاج الجليد خارج ساعات إشغال هذه الأبنية (مساءً)، وصهره في فترة الإشغال (نهاراً) لتغطية الأحمال الحرارية لهذه الأبنية بشكل كامل أو جزئي.

ليس هناك استطاعة محددة لنظام التخزين، مع ذلك بالنسبة للأنظمة الصغيرة أقل من 100 طن تبريدي قد يكون استخدام نظام تخزين الجليد غير مبرر اقتصادياً. [8]

كما تستخدم هذه الأنظمة لعمليات التبريد في مختلف التطبيقات كمراكز البيانات، الصناعات الغذائية، الدوائية وغيرها.

بالإضافة إلى أن استخدام التخزين الحراري يعتبر مكملاً مثالياً للأنظمة العاملة على مصادر الطاقة المتجددة (الطاقة الشمسية الكهروضوئية وطاقة الرياح) في حين أن هذه الأشكال من الطاقة نظيفة وغير محدودة، إلا أنها متقطعة بطبيعتها وذلك نظراً لاعتمادها على الظروف الجوية والتي تسبب تقلبات في تدفق الطاقة. إن دمج خزانات الجليد في هذه الأنظمة للتغلب على الأحمال الحرارية سيساهم في تحسين أداء هذه الأنظمة.

الفصل الثاني

الدراسات المرجعية

الفصل الثاني

الدراسات المرجعية

1.2. الدراسة المرجعية الأولى: [9]

في هذه الدراسة قام الباحثون بتصميم خزان حراري طوري بقطر 1m وارتفاع 1.6m، يحتوي على وشيعة لولبية الشكل، القطر الداخلي لأنابيب الوشيعة 12mm والقطر الخارجي 16mm بطول وسطي 10m مصنوع من مادة Polyethylene، الخطوة الشاقولية 45mm والأفقية 60mm.

حيث:

PCM (Phase Change Material): الماء وهو موجود في الخزان.

HTF (Heat Transfer Fluid): محلول (إيثيلين غليكول/ ماء) بتركيز حجمي 40% وهو سائل نقل الحرارة

الذي يتدفق داخل أنابيب الوشيعة. الخزان موصول مع شيلر، مضخة، مبادل حراري (سخان) من نوع shell and tube، دائرة تحكم.

عند إجراء عملية الشحن (التجمد) يتم تشغيل المبرد (chiller)، أما في عملية التفريغ (الذوبان) يتم إطفاء المبرد (chiller) وإغلاق الصمام ثم تشغيل السخان ويتم التحكم بهذه العمليات بواسطة دائرة تحكم.

لدينا ثلاثة أنظمة عمل لهذا النموذج:

1. عملية الشحن (التجمد):

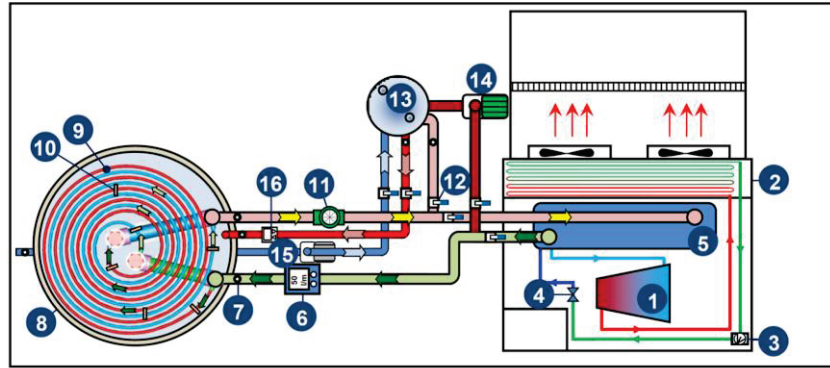
يتدفق محلول الغليكول الذي تم تبريده في المبرد (chiller) عبر أنابيب الوشيعة ضمن الخزان ويبدأ تشكيل الجليد، في هذه العملية يكون المبادل الحراري (السخان) مطفأ والصمامات الخاصة به مغلقة.

2. عملية التفريغ (الذوبان - نظام الذوبان الداخلي):

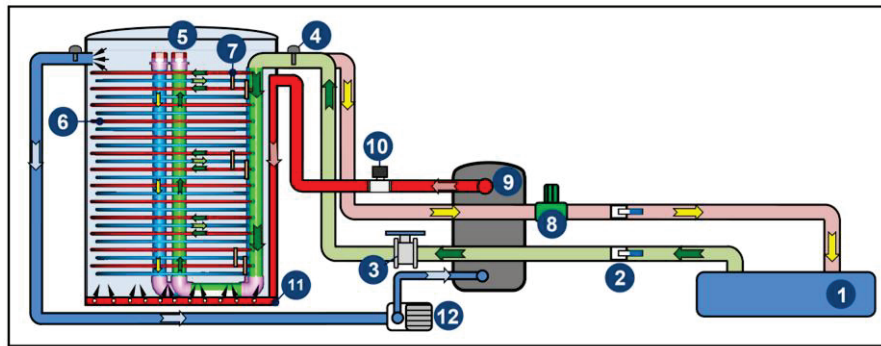
يتدفق محلول الغليكول الذي تم رفع درجة حرارته في المبادل الحراري (السخان) عبر أنابيب الوشيعية في الخزان ويبدأ ذوبان الجليد من داخل حلقة الجليد نحو الخارج، في هذه العملية يكون المبرد (chiller) مطفاً والصمامات الخاصة به مغلقة.

3. عملية التفريغ (الذوبان - نظام الذوبان الخارجي):

يتدفق الماء الموجود في الخزان عبر المبادل الحراري (السخان) ويبدأ ذوبان الجليد من خارج حلقة الجليد نحو الداخل، في هذه العملية يكون المبرد (chiller) مطفاً والصمامات الخاصة به مغلقة.



(1) مضخة ، (2) صمام تمدد ، (3) مقاييس تدفق (R404A) ، (4) مكثف ، (5) ضاغط ،
حساسات القياس (6) ، وشيعة (7) ، مخزن الجليد (8) ، مقاييس تدفق (غليكول) (9) ،
مقياس تدفق (الماء) (10) ، مضخة (ماء) (11) ، صمامات (12) ، سخان (13) ، مضخة (غليكول) (14) ،
مقياس تدفق (الماء) (15) ، مضخة (ماء) (16) ، مسقط علوي (a)



(1) مضخة ، (2) صمامات (3) ، مقاييس تدفق (غليكول) (4) ، Pt-100 (5) ، مخزن الجليد (6) ، وشيعة (7) ،
مقياس تدفق (الماء) (8) ، سخان (9) ، مضخة (غليكول) (10) ، حساسات القياس (11) ،
مضخة (ماء) (12) ، ناشر (ماء) (13) ، مسقط أممي (b)

الشكل (1-2) مخطط التجربة المنفذة.

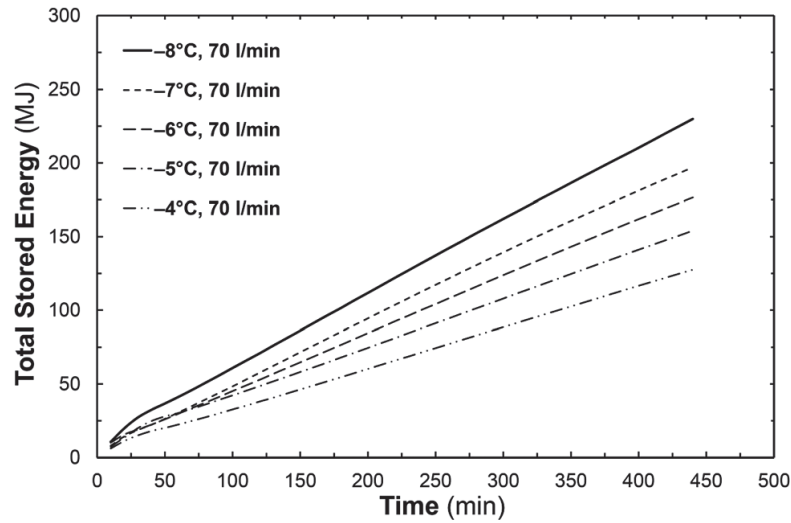
وقد جرت التجارب على الخزان بتغيير عدد من البارامترات، كما يوضح الجدول (1-2).

الجدول (1-2) البارامترات التجريبية لعملية الشحن والتفريغ.

Case	Flow rate (l/min)	Inlet temperature (°C)
Solidification (charging)	70	-8, -7, -6, -5, -4
	50	-8, -6
	40	-8
	30	-8, -6
Melting (discharging)	Internal	Flow rate (l/min)
		Inlet temperature (°C)
	Internal	50
		+10, +12
	Internal	75
		+8, +10, +12
	Internal	Flow rate (l/min)
		Heat load (kW)
	External	60, 70
	External	50, 70
	External	7, 9
	External	7, 9

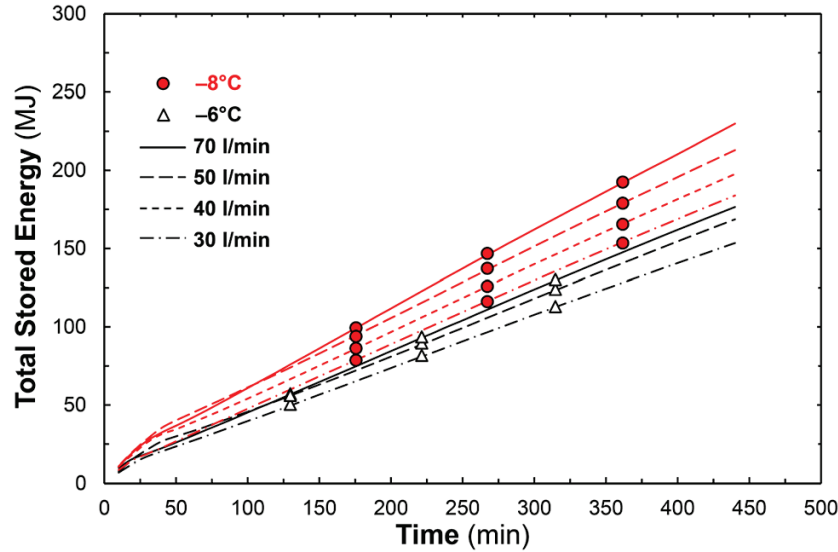
قام الباحثون بإجراء عدة تجارب عند تدفق ثابت (70 l/min) ودرجات حرارة دخول مختلفة لسائل نقل الحرارة

(HTF) ويوضح الشكل (2-2) نتائج تغيير هذه البارامترات على الطاقة المخزنة الكلية خلال الزمن.



الشكل (2-2) تأثير تغيير درجة حرارة دخول سائل نقل الحرارة (HTF) على الطاقة المخزنة الكلية خلال الزمن.

نلاحظ من الشكل (2-2) أن العلاقة بين الطاقة المخزنة ودرجة حرارة دخول سائل نقل الحرارة (HTF) هي علاقة عكسية. كما قام الباحثون بتغيير درجة حرارة دخول سائل نقل الحرارة (HTF) ومعدل تدفقه لمعرفة تأثير هذه البارامترات على الطاقة المخزنة الكلية.



الشكل (2-3) تغيير قيمة الطاقة المخزنة مع الزمن عند قيم مختلفة لدرجة حرارة دخول سائل نقل الحرارة (HTF) وقيم مختلفة لمعدل تدفقه.

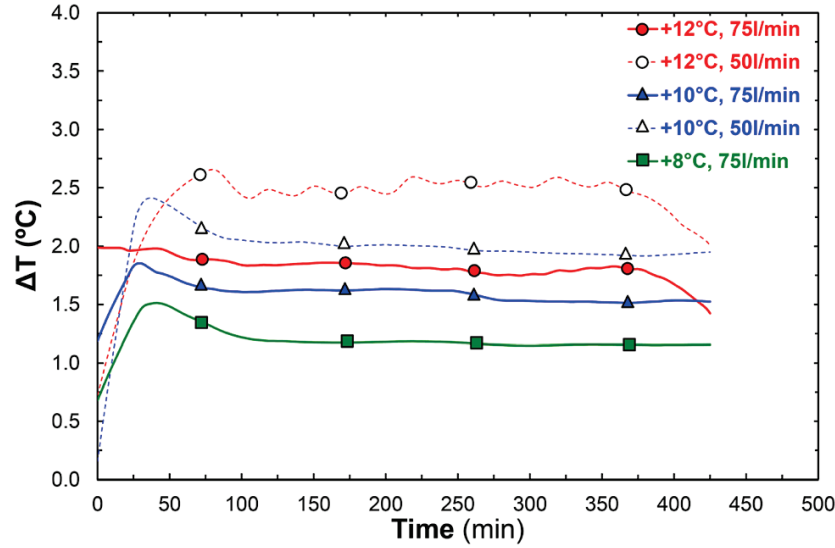
نلاحظ من الشكل (2-3) أنه مع انخفاض درجة حرارة دخول سائل نقل الحرارة (HTF) وزيادة معدل تدفقه تزداد الطاقة المخزنة الكلية. بالإضافة إلى أنه عند درجة حرارة منخفضة نسبياً لسائل نقل الحرارة (HTF) (-8 °C) يكون لمعدل التدفق تأثير أكبر بالمقارنة مع درجة حرارة أعلى (-6 °C).

أما أثناء عملية التفريغ (الذوبان لنظام الذوبان الداخلي) هناك حالتان:

1. عند درجة حرارة دخول ثابتة لسائل نقل الحرارة (HTF):

فقد بينت التجارب تغيير ΔT (الفرق بين درجة حرارة دخول وخروج سائل نقل الحرارة (HTF) مع الزمن عند

معدلات تدفق (50, 75 l/min) ودرجات حرارة دخول مختلفة لسائل نقل الحرارة (HTF) (+8, +10, +12 °C) وكانت النتائج كما يلي:



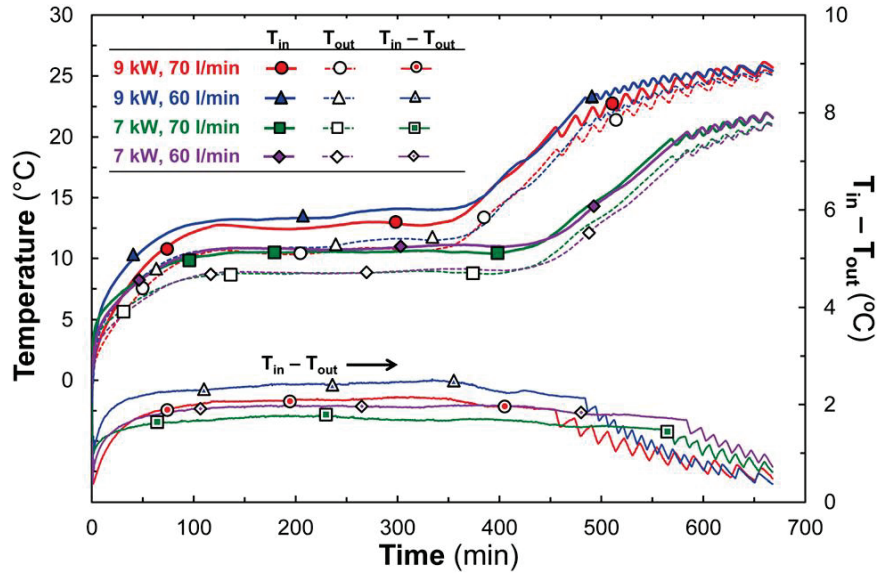
الشكل (2-4) تغير ΔT مع الزمن عند قيم مختلفة لدرجة حرارة دخول سائل نقل الحرارة (HTF) وقيم مختلفة لمعدل تدفقه في نظام الدوبان الداخلي.

نلاحظ من الشكل أن:

- ΔT تزداد عند رفع درجة حرارة دخول سائل نقل الحرارة (HTF) أو انقاص معدل تدفقه.
 - ΔT تتراوح بين $(1.3 \div 2.5 \text{ } ^\circ\text{C})$.
 - إن هذا النظام يزودنا بفرق درجة الحرارة السابق ما يقرب (400 min) أما بالنسبة لدرجة حرارة دخول (+12 $^\circ\text{C}$) فإن ΔT يبدأ بالتناقص عند (375 min).
 - مع زيادة درجة حرارة دخول سائل نقل الحرارة يكون لمعدل التدفق تأثيراً أكبر.
2. عند تطبيق حمل حراري ثابت:

يبين الشكل (2-5) تغير درجة حرارة دخول وخروج سائل نقل الحرارة (HTF) مع الزمن عند تطبيق عدة

أحمال حرارية ثابتة (7,9 kW) وعدة معدلات تدفق (60,70 l/min).

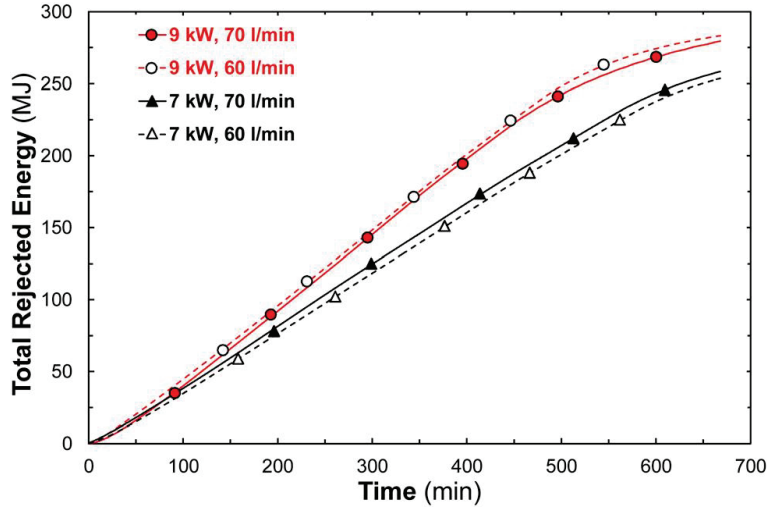


الشكل (2-5) تغير درجة حرارة دخول وخروج سائل نقل الحرارة (HTF) مع الزمن عند تطبيق عدة أحمال حرارية ثابتة وعدة معدلات تدفق لنظام الدوبان الداخلي.

نلاحظ من الشكل:

- أن كلاً من ΔT و درجة حرارة دخول سائل نقل الحرارة (HTF) ترتفع مع زيادة الحمل الحراري المطبق وخفض معدل التدفق.
- النظام يعطينا درجة حرارة خروج ثابتة تقريباً لمدة (350 min) عند حمل حراري (9 kW)، و (450 min) عند حمل حراري (7 kW).

كما تم إيجاد تأثير تغير الحمل الحراري المطبق ومعدل التدفق على كمية الطاقة المطروحة خلال الزمن عند تطبيق عدة أحمال حرارية ثابتة (7, 9 kW) وعدة معدلات تدفق (60, 70 l/min) كما يبين الشكل (2-6).



الشكل (2-6) تغير الطاقة المطروحة من النظام مع الزمن عند تطبيق عدة أحمال حرارية ثابتة وعدة معدلات تدفق لنظام الذوبان الداخلي.

نلاحظ من الشكل أن:

- كمية الطاقة المطروحة تزداد بزيادة الحمل الحراري المطبق.
- لا تتأثر كمية الطاقة المطروحة بتغير معدل التدفق عند نفس الحمل الحراري المطبق.

خلاصة الدراسة:

- تشير النتائج إلى أن معدل تدفق ودرجة حرارة دخول سائل نقل الحرارة (HTF) له تأثير كبير على كفاءة النظام، حيث عند إنقاص درجة حرارة دخول سائل نقل الحرارة (HTF) وزيادة معدل تدفقه تزداد الطاقة المخزنة، ويكون لمعدل التدفق تأثير أكبر عند درجات حرارة منخفضة نسبياً.
- تجريبياً تبين أن نظام الذوبان الخارجي يزود المنظومة بدرجات حرارة منخفضة أكثر عن نظام الذوبان الداخلي.

2.2. الدراسة المرجعية الثانية: [12]

في هذه الدراسة قام الباحثون بتصميم خزان حراري طوري أبعاده (150cm X 25cm X 30cm) مصنوع من البلاستيك بسماكة 2mm، يحتوي على وشيعة تشكل حرف U ثلاث مرات متتالية، القطر الخارجي للأنبوب 3/4inch، مصنوع من مادة النحاس Copper.

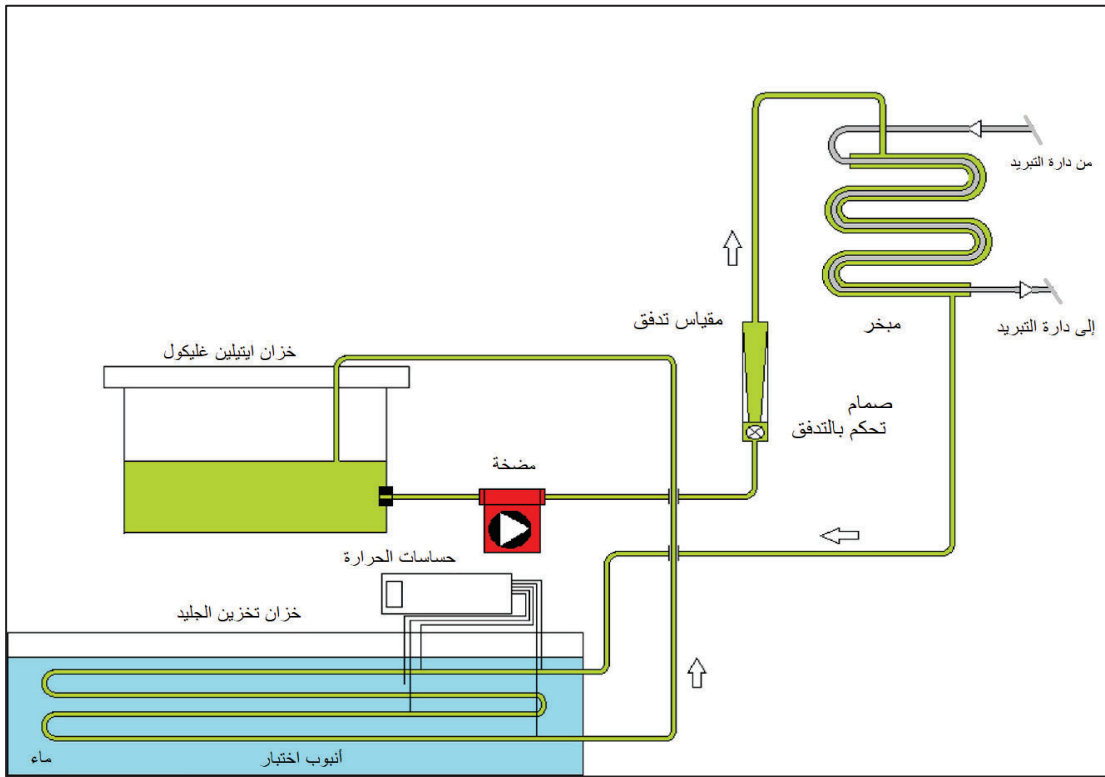
حيث :

PCM (Phase Change Material) : الماء وهو موجود في الخزان.

HTF (Heat Transfer Fluid) : محلول (إيثيلين غليكول/ ماء) بتركيز جملي 30% غليكول، 70% ماء،

وهو سائل نقل الحرارة الذي يتدفق داخل أنابيب الوشيعة بمعدل 0.03 l/s ودرجة حرارة 268.15 K.

الخزان موصول مع شيلر، مضخة، دائرة تحكم، كما هو موضح بالشكل (2-7).



الشكل (2-7) مخطط التجربة المنفذة.

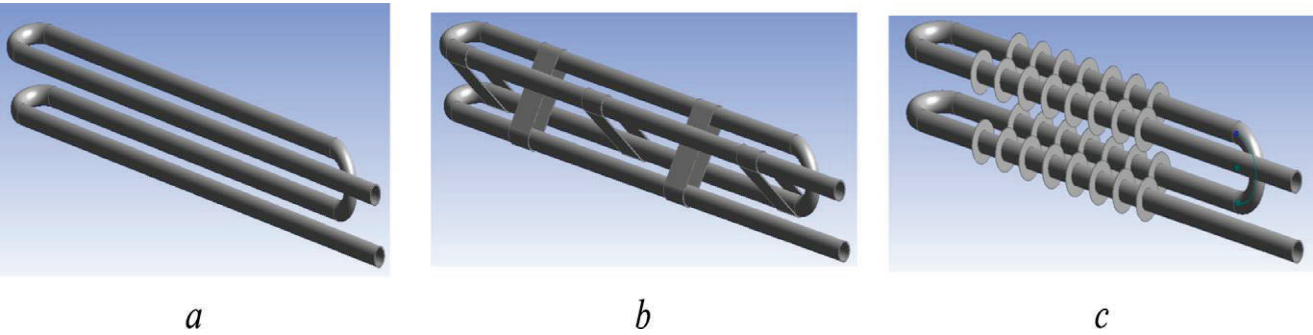
قام الباحثون بإجراء ثلاثة تجارب على هذا الخزان أثناء عملية الشحن فقط (التجمد):

a. عند عدم استخدام ريش على الأنابيب.

b. عند استخدام عدة حلقات متداخلة بين الأنابيب.

c. عند استخدام زعانف حلقية متجاورة.

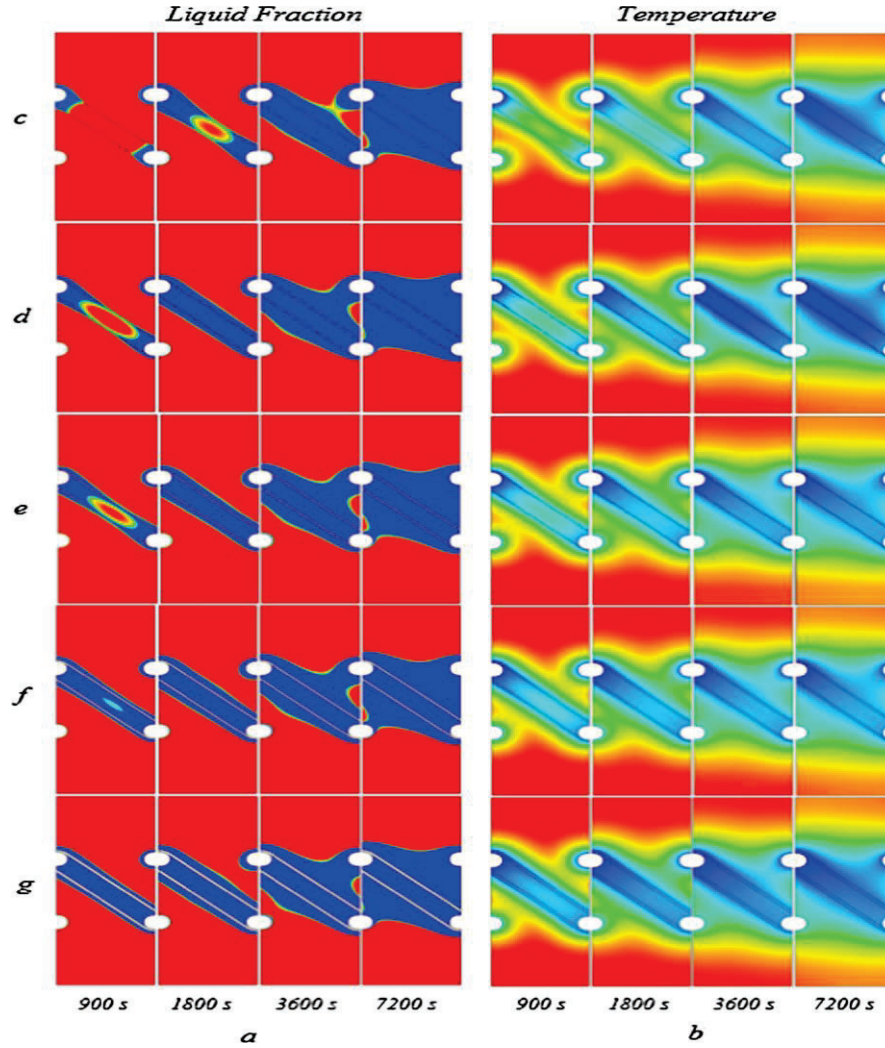
يبين الشكل (8-2) هذه الحالات.



الشكل (8-2) الوشيعة الموجودة داخل الخزان الحراري: (a) عند استخدام الأنابيب دون أي إضافات، (b) عند استخدام عدة حلقات متداخلة بين الأنابيب، (c) عند استخدام زعانف حلقية متجاورة.

قام الباحثون بإجراء عملية المحاكاة:

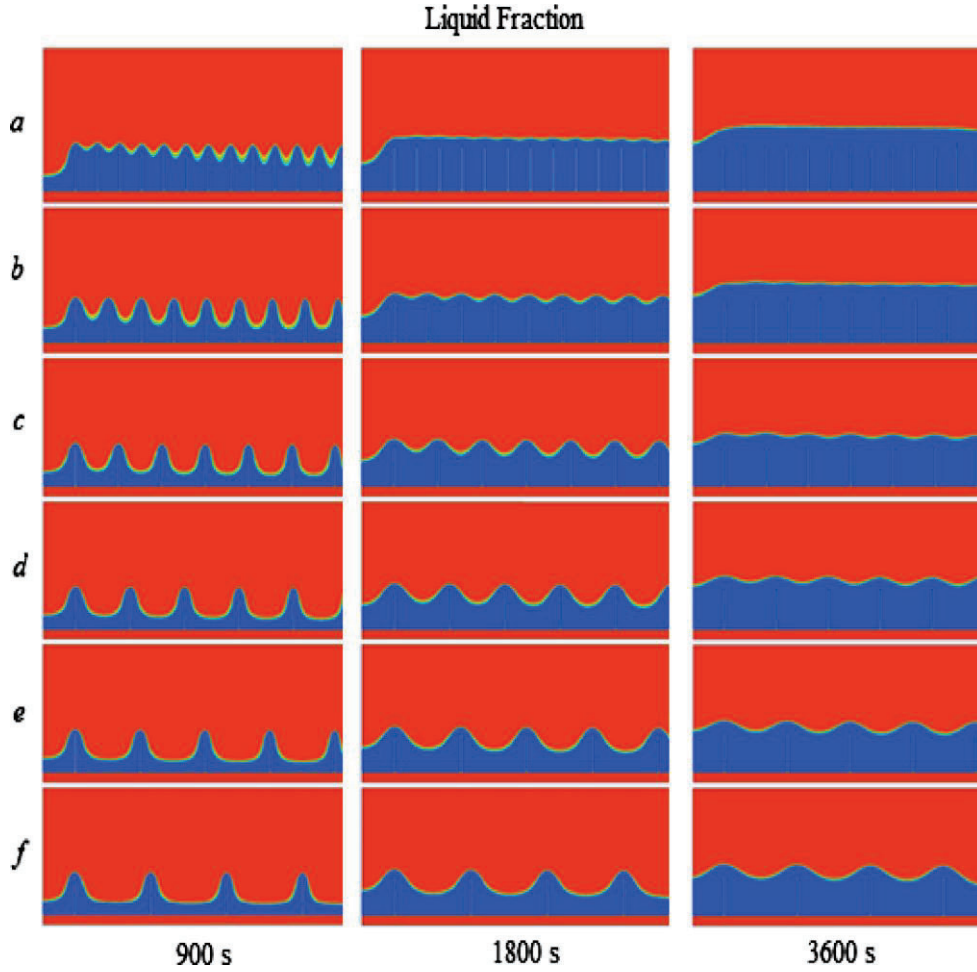
- لاختيار السماكة الأفضل للحلقات المتداخلة بين الأنابيب وتمت المحاكاة عند عدة سماكات لهذه الحلقة (0.25, 0.5, 1, 2, 3)mm والمقارنة من حيث كمية الجليد المتشكل وتوزع درجات الحرارة مع الزمن كما يبين الشكل (9-2).



الشكل (9-2) (a) كمية الجليد المتشكل مع الزمن، (b) توزيع درجات الحرارة مع الزمن، (c) عند سماكة 0.25mm (d)، 0.5mm (e)، 1mm (f)، 2mm (g)، 3mm.

يوضح الشكل (9-2) أنه في البداية كان معدل تشكل الجليد أكثر عند سماكة 3mm ولكن أفضل سماكة على طول مجال العمل مقارنة مع السماكات الأخرى كانت 1mm.

- لتحديد المسافة الأفضل بين الزعانف الحلقية المتجاورة قام الباحثون بالمحاكاة الحاسوبية عند مسافات مختلفة بين الزعانف (20, 30, 40, 50, 60, 70)mm والمقارنة من حيث كمية الجليد المتشكل وتوزيع درجات الحرارة مع الزمن كما يبين الشكل (10-2).



الشكل (10-2) معامل الكسر الكتلي عند مسافات مختلفة بين الريش (a) 20mm، (b) 30mm، (c) 40mm، (d) 50mm، (e) 60mm، (f) 70mm.

يوضح الشكل (10-2) معامل الكسر الكتلي للمسافات المختلفة بين الزعانف، حيث أنه خلال جريان سائل نقل الحرارة HTF داخل الأنبوب فإنه يكتسب حرارة، لذا فإن سطح الأنبوب والزعانف عند مدخل الأنبوب ستكون أكثر برودة من منطقة المخرج، لذلك عند مدخل الأنبوب سيكون الجليد أكثر ثخانة. بمرور الوقت، يزيد سمك الثلج على أسطح الأنابيب والزعانف ويمنع الاتصال المباشر بين الماء وسطح التبادل الحراري، وبالتالي فإنه يعمل كمقاومة حرارية ويقلل من معدل التجمد.

خلاصة الدراسة:

- في حال استخدام الزعانف الحلقية وفق النموذج (c) كانت كمية الجليد المتشكلة أعلى بـ 21% عن الأنبوب المستخدم بدون إضافات (a).
- في حال استخدام الحلقات المتداخلة وفق النموذج (b) كانت كمية الجليد المتشكلة أعلى بـ 34% عن الأنبوب المستخدم بدون إضافات (a).

3.2. الدراسة المرجعية الثالثة: [3]

في هذه الدراسة قام الباحثون بتصميم خزان حراري طوري بشكل أسطواني مصنوع من الستانلس ستيل بقطر 32cm وارتفاع 40cm مزود بمدخل للتعبئة والتفريغ، يحتوي الخزان على مبادل نحاسي حلزوني الشكل بين سائل نقل الحرارة والمادة المتغيرة الطور، القطر الداخلي للأنبوب 2cm، السماكة 1mm، قطر اللفة 19.7cm، خطوة الأنبوب 8.2cm، عدد اللفات 4.

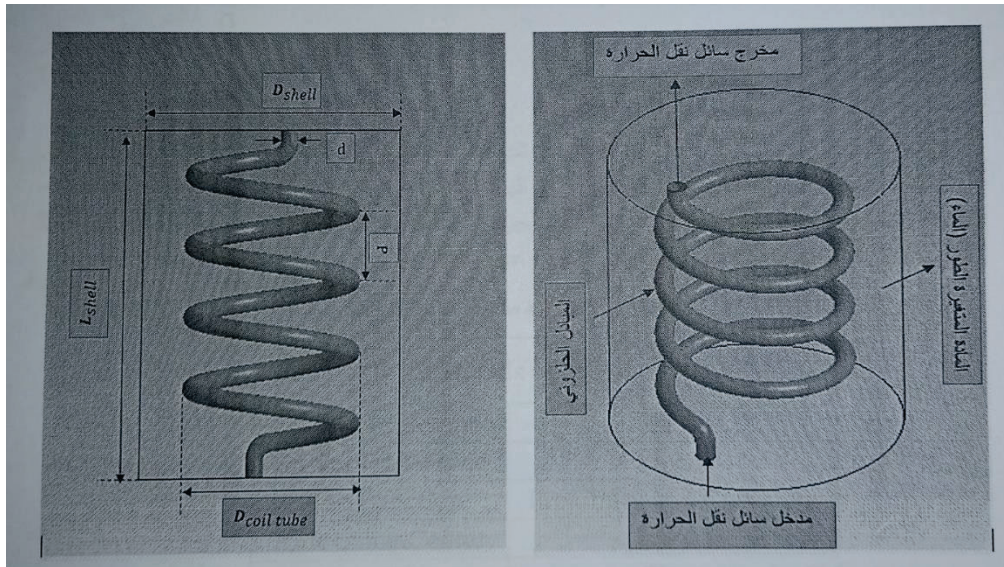
حيث:

PCM (Phase Change Material): الماء وهو موجود في الخزان.

HTF (Heat Transfer Fluid): محلول (إيثيلين غليكول/ ماء) وهو سائل نقل الحرارة الذي يتدفق داخل

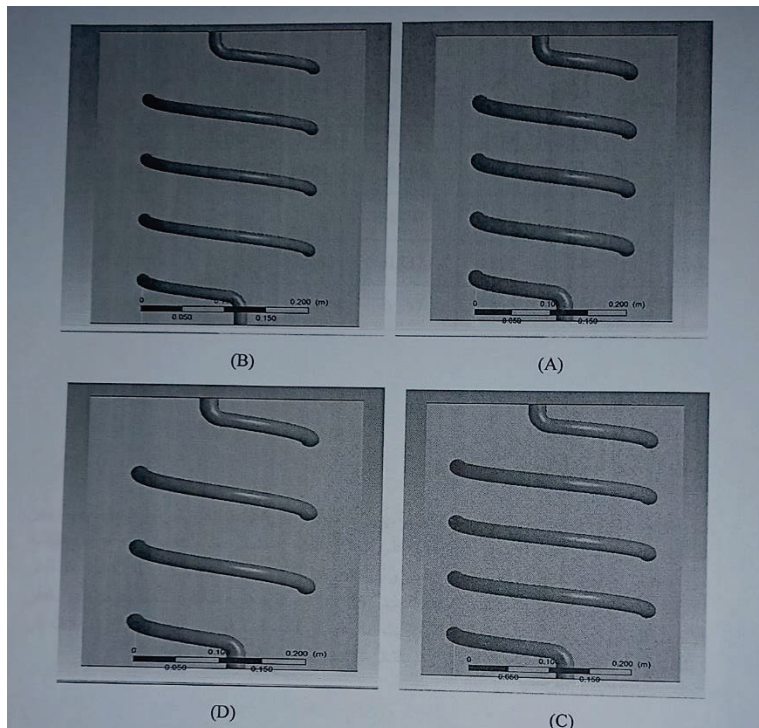
المبادل الحلزوني.

الخزان موصول مع دائرة تبريد تؤمن درجة حرارة التبريد المطلوبة. يوضح الشكل (2-11) نموذج الخزان الحراري المستخدم.



الشكل (2-11) نموذج الخزان الحراري المستخدم.

قام الباحثون بإجراء دراسة عددية باستخدام برنامج ANSYS، لدراسة تأثير كل من درجة حرارة سائل نقل الحرارة، درجة حرارة الماء الابتدائية، الأبعاد الهندسة للمبادل الحراري على سماكة الجليد المتشكل مع الزمن.



الشكل (2-12) النماذج الهندسية للأبعاد المدروسة.

ثم إجراء دراسة تجريبية وقياس سماكة الجليد المتشكل مع الزمن خلال 6 ساعات عمل وكانت النتائج كما يوضح الجدول (2-2).

الجدول (2-2) سماكة الطور الصلب المتشكل مع الزمن. [3]

الزمن (ساعة)	2	4	6
سماكة الطور الصلب (cm)	0.9	1.85	2.7

4.2. الدراسة المرجعية الرابعة: [4]

في هذه الدراسة قام الباحثون بتصميم خزان حراري طوري بشكل أسطواني بقطر 32cm وارتفاع 40cm مزود بمدخل للتعبئة والتفريغ، يحتوي الخزان على 7 أنابيب من النحاس القطر الداخلي للأنبوب 2cm، وسماكته 1mm.

حيث:

PCM (Phase Change Material): الماء وهو موجود في الخزان.

HTF (Heat Transfer Fluid): محلول (إيثيلين غليكول/ ماء) وهو سائل نقل الحرارة الذي يتدفق داخل الأنابيب.

الخزان موصول مع دائرة تبريد تؤمن درجة حرارة التبريد المطلوبة.

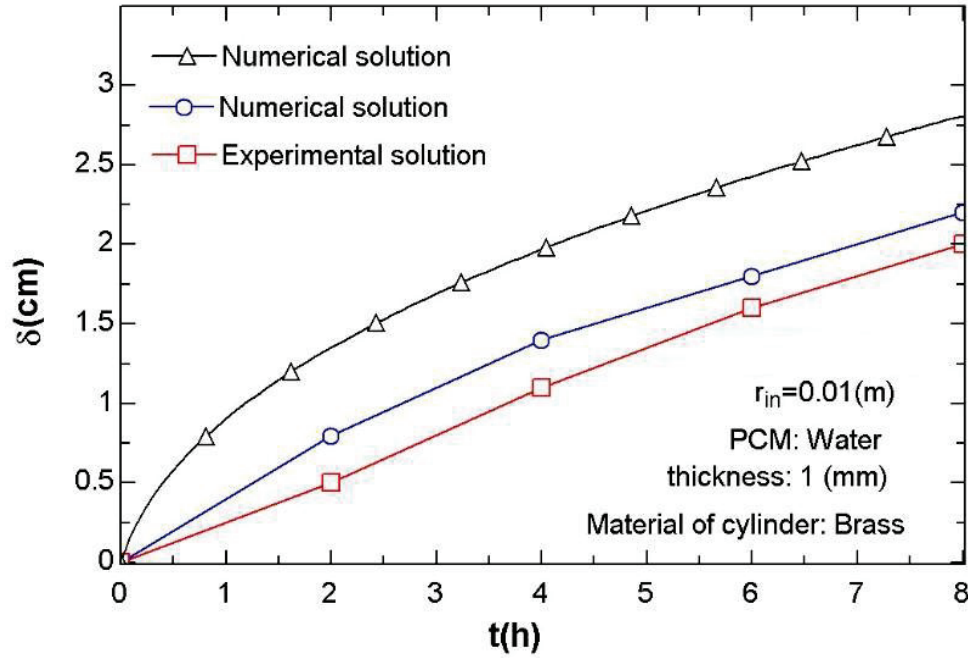


الشكل (2-13) منظور الخزان الحراري المستخدم.

تم إجراء دراسة تحليلية لدراسة تأثير عدة بارامترات على سماكة الطور الصلب المتشكل (الزمن، درجة حرارة سائل نقل الحرارة، سرعة جريان سائل نقل الحرارة، نصف قطر الأنبوب، معامل التوصيل الحراري لمادة الأنبوب).

كما تم إجراء دراسة عددية باستخدام برنامج ANSYS، وإيجاد العلاقة بين سماكة الجليد المتشكل مع الزمن عند قيم مختلفة لسائل نقل الحرارة.

ثم إجراء دراسة تجريبية وقياس سماكة الجليد المتشكل مع الزمن، ومقارنة النتائج التحليلية والعددية والتجريبية كما يوضح الشكل (2-12).



الشكل (2-14) العلاقة بين سماكة الطور الصلب المتشكل مع الزمن باستخدام طرق الحل الثلاث .

خلاصة الدراسة:

سماكة الطور الصلب المتشكل بعد 8 ساعات عمل في كل من الدراسة التحليلية والعددية والتجريبية مساوية إلى (2, 2.2, 2.8) cm على التوالي.

الخلاصة:

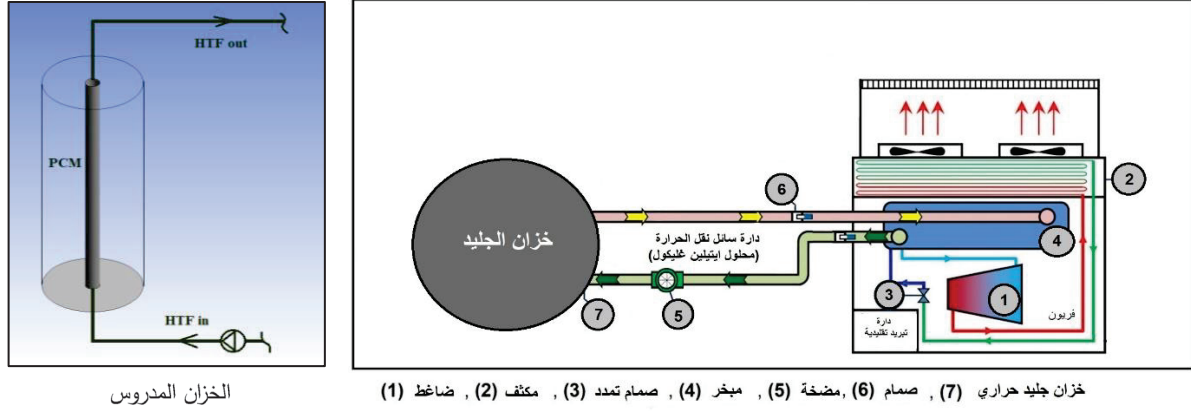
تشير الأبحاث السابقة إلى سعي الباحثين لتطوير خزانات الجليد من خلال تحسين أداء هذه الخزانات للحصول على أكبر كمية من الطاقة المخزنة إما بتعديل شكل المبادل الحراري ضمن الخزان كاستخدام مبادل حلزوني، أو باستخدام سطوح معدنية تصل بين أنابيب المبادل. لكن لم تتطرق أي من هذه الأبحاث لإضافة ريش على طول أنابيب المبادل الحراري ضمن خزان جليد شاقولي. لذا سيتم في هذا البحث دراسة تأثير إضافة السطوح الإضافية على أداء خزان حراري شاقولي ضمن أنظمة التخزين الكامن عددياً ومقارنة النتائج العددية مع نتائج الدراسات المرجعية عند نفس شروط العمل.



الفصل الثالث الدراسة التحليلية

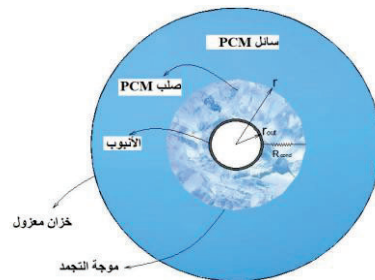
1.3. الدراسة التحليلية:

المسألة المدروسة:



الشكل (1-3) مخطط توضيحياً للدائرة المدروسة

يوضح الشكل (1-3) مخطط توضيحياً للدائرة المدروسة، خزان طوروي يحتوي على أنبوب معدني ذو مقطع دائري محاط بمادة متغيرة الطور PCM في طورها السائل درجة حرارتها مساوية لدرجة حرارة الوسط المحيط، يجري ضمن الأنبوب سائل نقل الحرارة (HTF) والمبرد بواسطة دائرة تبريد انضغاطية تقليدية لدرجة حرارة أقل من درجة حرارة التحول الطوري لل PCM، مما يؤدي إلى تبادل الحرارة بينه وبين PCM بشكل محسوس حتى الوصول لدرجة حرارة التحول الطوري بعد ذلك ومع استمرار تدفق سائل نقل الحرارة تبدأ موجة التجمد بالتشكل على شكل أسطوانة متحدة المركز ابتداء من السطح الخارجي للأنبوب.



الشكل (2-3) مقطع عرضي للأنبوب الأسطواني ضمن الخزان محاط ب PCM.

يوضح الشكل (2-3) مقطع عرضي للأنبوب الأسطوانى محاط بمادة متغيرة الطور PCM الماء (طور صلب- سائل)، ضمن خزان حراري طوري معزول، ودرجة حرارة التحول الطوري T_f ، سطح التبريد (سطح التبادل الحراري) هو سطح الأنبوب الأسطوانى ذو نصف قطر خارجي r_{out} والذي يتدفق من خلاله سائل نقل الحرارة (HTF) بدرجة حرارة T_{∞} .

الفرضيات:

- عملية انتقال الحرارة تتم بالتوصيل وبالاتجاه القطري فقط. (إهمال المقاومة الحرارية بالحمل على السطح الداخلى لجدار الأنبوب، إهمال المقاومة الحرارية بالتوصيل ضمن الأنبوب).
- المواصفات الفيزيائية للمادة ثابتة.
- درجة الحرارة HTF ثابتة وتساوي درجة حرارة السطح الخارجى للأنبوب الأسطوانى خلال الزمن.
- كثافة الطورين الصلب والسائل متساويتان كون المادة نقية (ماء).

لحل مسائل عملية التحول الطوري وانطلاقاً من معادلة تحرك الشروط الحدية للسطح الفاصل بين الطورين والمقاومة الحرارية لتشكّل الطور السائل مع الدارة الحرارية المكافئة نحصل على المعادلة التي تربط تغيير موقع السطح الفاصل بين الطورين (السائل-الصلب) مع الزمن.

كمية الطاقة الناتجة عن عملية التحول الطوري:

$$Q = \rho * \Delta H * \frac{dV}{dt} \quad (1-3)$$

$$Q = \rho * \Delta H * 2\pi * L * r * \frac{dr}{dt}$$

المقاومة الحرارية للتوصيل للطور الصلب للمادة المتحولة الطور:

$$R_{sol} = \frac{\ln\left(\frac{r}{r_{out}}\right)}{2\pi * L * K_{sol}} \quad (2-3)$$

من الدارة الحرارية المكافئة نحصل على (معادلة التوصيل الحراري):

$$Q_{cond} = \frac{T_f - T_{\infty}}{R_{sol}} \quad (3-3)$$

$$Q_{cond} = \frac{T_f - T_{\infty}}{\frac{\ln\left(\frac{r}{r_{out}}\right)}{2\pi * L * K_{sol}}} = \frac{T_f - T_{\infty}}{\ln\left(\frac{r}{r_{out}}\right)} * 2\pi * L * K_{sol}$$

بالمساواة بين $Q = Q_{cond}$

$$\rho * \Delta H * 2\pi * L * r * \frac{dr}{dt} = \frac{T_f - T_{\infty}}{\ln\left(\frac{r}{r_{out}}\right)} * 2\pi * L * K_{sol} \quad (4-3)$$

$$\rho * \Delta H * r * \frac{dr}{dt} = \frac{T_f - T_{\infty}}{\ln\left(\frac{r}{r_{out}}\right)} * K_{sol}$$

$$\rho * \Delta H * \ln\left(\frac{r}{r_{out}}\right) * r * dr = (T_f - T_{\infty}) * dt * K_{sol}$$

$$\ln\left(\frac{r}{r_{out}}\right) * r * dr = \frac{(T_f - T_{\infty}) * dt * K_{sol}}{\rho * \Delta H} \quad (5-3)$$

بالمكاملة:

$$\left. \begin{aligned} u * v - \int u' * v \\ u = \ln\left(\frac{r}{r_{out}}\right) \Rightarrow du = \frac{\frac{dr}{r_{out}}}{\frac{r}{r_{out}}} = \frac{dr}{r} \\ dv = r * dr \Rightarrow v = \frac{r^2}{2} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \quad (6-3)$$

$$\ln\left(\frac{r}{r_{out}}\right) * \frac{r^2}{2} - \int \frac{r^2}{2} * \frac{dr}{r}$$

$$\ln\left(\frac{r}{r_{out}}\right) * \frac{r^2}{2} - \int \frac{r}{2} * dr = \ln\left(\frac{r}{r_{out}}\right) * \frac{r^2}{2} - \frac{r^2}{4}$$

نعوض في المعادلة (5-3):

$$\xRightarrow{\text{نعوض}} r^2 * \left[\frac{\ln\left(\frac{r}{r_{out}}\right)}{2} - \frac{1}{4} \right] = \frac{(T_f - T_{\infty}) * t * K_{sol}}{\rho * \Delta H} + c$$

لإيجاد C نطبق الشرط الزماني:

$$t = 0 \Rightarrow r = r_{out} \quad (7-3)$$

$$r_{out}^2 * \left[-\frac{1}{4} \right] = [0] + c \Rightarrow c = -\frac{r_{out}^2}{4}$$

$$r^2 * \left[\frac{\ln\left(\frac{r}{r_{out}}\right)}{2} - \frac{1}{4} \right] = \frac{(T_f - T_{\infty}) * t * K_{sol}}{\rho * \Delta H} - \frac{r_{out}^2}{4} \quad (8-3)$$

وهي المعادلة التي تربط تغيير موقع السطح الفاصل بين الطورين (السائل-الصلب) مع الزمن.

تم حل المعادلة باستخدام برنامج EES ويبين الجدول التالي (1-3) البارامترات التي قمنا باستخدامها لحل

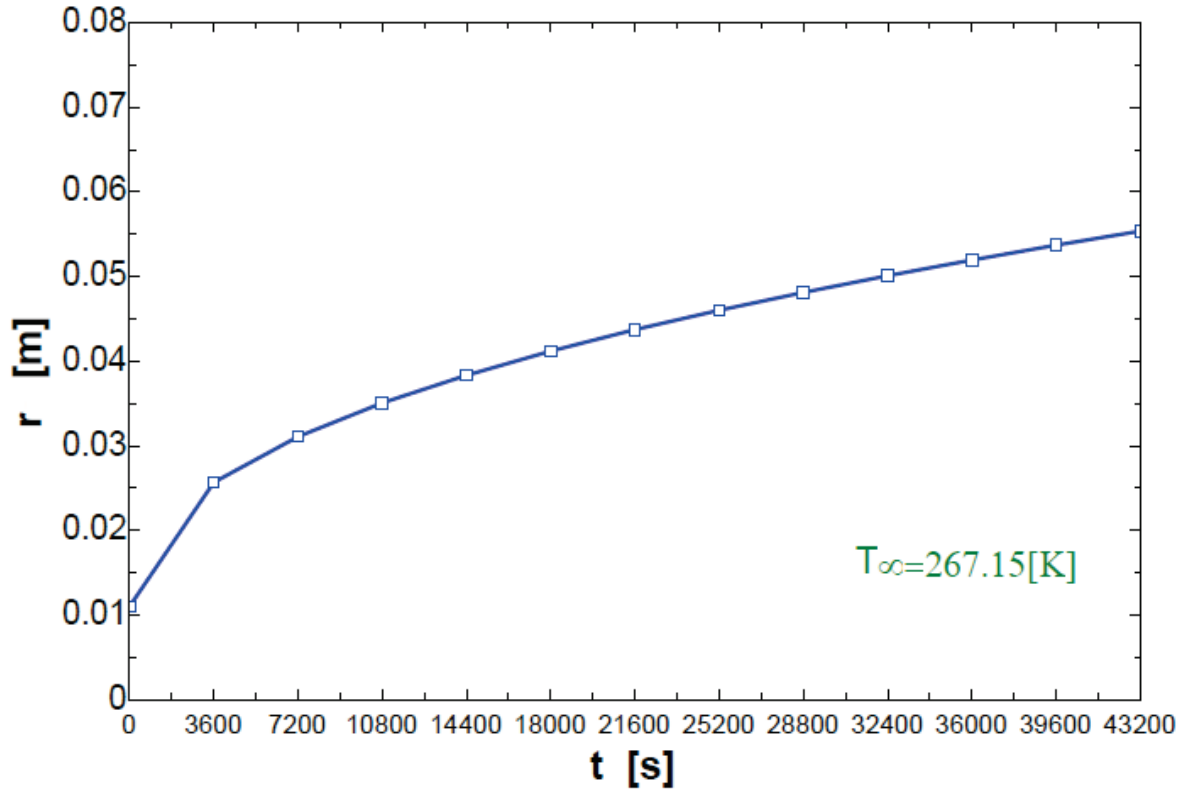
هذه المعادلة.

الجدول (1-3) البارامترات المستخدمة لحل المعادلة (8-3).

r		الموضع القطري للسطح الفاصل
r_{out}	1.1 cm	نصف القطر الخارجي للأنبوب
K_{sol}	$2.24 \left[\frac{W}{m * K} \right]$	معامل التوصيل الحراري للجليد
T_f	273.15 [K]	درجة حرارة التحول الطوري
T_{∞}	265.15/267.15 [K]	درجة حرارة سائل نقل الحرارة HTF (إيتيلين غليكول)
ρ	1000 kg/m ³	كثافة PCM (الماء)
ΔH	334000 [J/kg]	الحرارة الكامنة للانصهار

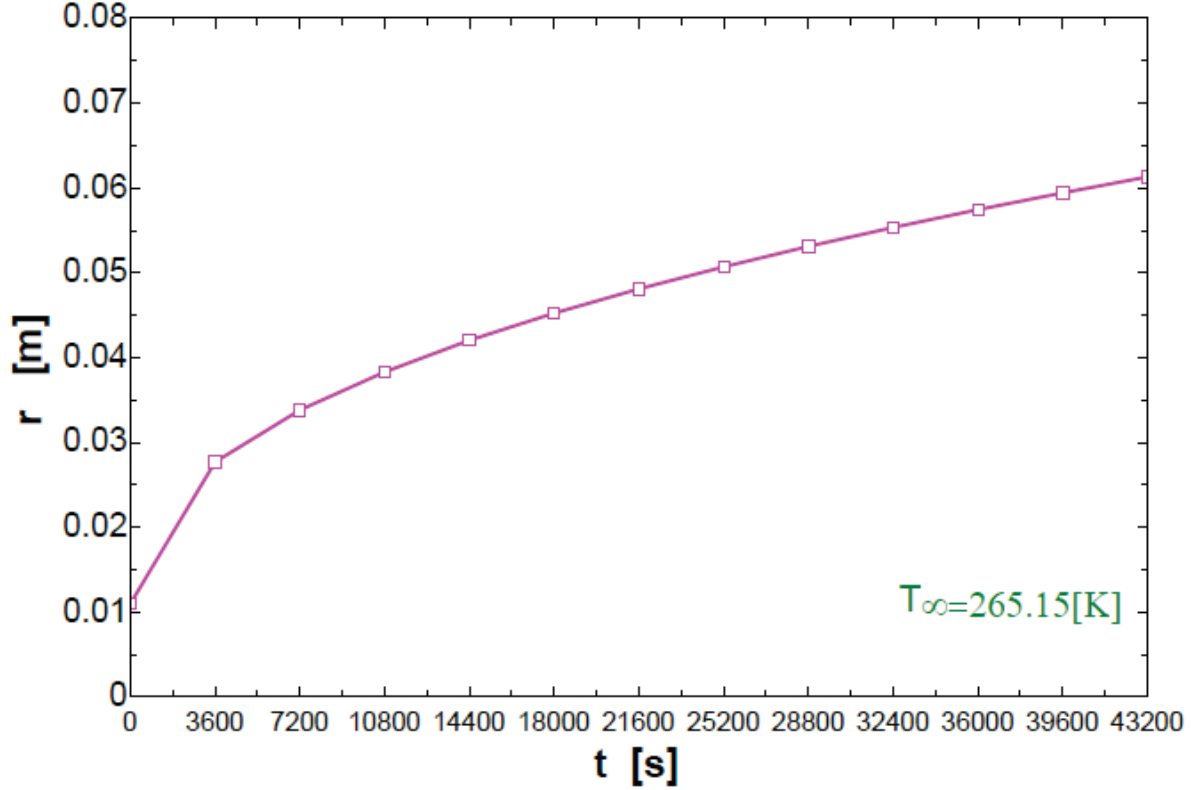
1.1.3. تأثير الزمن على تغير موقع السطح الفاصل بين الطورين الصلب والسائل عند درجة حرارة سائل نقل الحرارة HTF $267.15[K]$.

بعد حل المعادلة (3-8) باستخدام برنامج EES وفقاً للبارامترات المحددة في الجدول (3-1) تم الحصول على المنحني البياني الذي يوضح علاقة انتشار موجة التجمد وتغير موقع السطح الفاصل بين الطور الصلب والطور السائل مع الزمن.



الشكل (3-3) علاقة تغير موقع السطح الفاصل بين الطور السائل والطور الصلب مع الزمن عند $T_{\infty} = 267.15 K$.

2.1.3. تأثير الزمن على تغير موقع السطح الفاصل بين الطورين الصلب والسائل عند درجة حرارة سائل نقل الحرارة HTF 265.15[K].



الشكل (3-4) علاقة تغير الموضع القطري للسطح الفاصل بين الطور السائل والطور الصلب مع الزمن عند $T_{\infty} = 265.15 K$.

الجدول (3-2) علاقة نصف قطر موجة التجمد (السطح الفاصل) مع الزمن.

نصف قطر موجة التجمد (السطح الفاصل) [cm]									
T_{∞}		$t [h]$							
[k]	[C]	1	2	3	4	5	6	7	8
267.15	-6	2.6	3	3.5	3.8	4.1	4.4	4.6	4.8
265.15	-8	2.8	3.4	3.8	4.2	4.5	4.8	5.1	5.3

نلاحظ أن نصف قطر موجة التجمد بعد 8 ساعات عمل 4.8cm عند درجة حرارة 267.15K، و 5.3cm

عند درجة حرارة 265.15K. تم اختيار درجة حرارة سائل نقل الحرارة 267.15K لإجراء الدراسة العددية

في الفصل التالي.

الفصل الرابع
الدراسة العددية
(المحاكاة الحاسوبية)

الفصل الرابع

المحاكاة الحاسوبية

COMPUTER SIMULATION

تمثل المحاكاة الحاسوبية مرحلة وسطية بين الدراسة النظرية (الحل التحليلي) من جهة والإجراء التجريبي (النتائج العملية) من جهة أخرى، حيث تقيّدنا هذه المحاكاة بإجراء عدة تجارب على الحاسب قبل الشروع في التصنيع الأمر الذي يؤدي إلى توفير الجهد والمال، كما تقيّدنا في تحديد نقطة عمل لنبدأ منها الإجراء التجريبي وذلك باختبار عدة نماذج للدراسة واختيار النموذج الأفضل قبل الشروع بالتجربة العملية، ولكن يجب التنويه إلى أن النتائج التي نحصل عليها من عملية المحاكاة هي نتائج تقريبية وذلك لأن برامج المحاكاة تعتمد الطرق العددية للوصول إلى الحل، بالمقابل فإن هذه النتائج التقريبية التي نحصل عليها يمكن أن تصل في مرحلة من المراحل إلى حد التطابق مع النتائج الحقيقية وهذا يعتمد على درجة تعقيد المسألة المدروسة.

تمت عملية المحاكاة في هذا البحث باستخدام برنامج ANSYS 16.0.

1.4. مبدأ عمل برنامج ANSYS:

يعد برنامج ANSYS واحد من أهم وأشهر برامج المحاكاة على مستوى العالم، ويمكن من خلاله إجراء المحاكاة لمختلف المسائل المطروحة سواء بمجال انتقال الحرارة، الهيدروليك، الكهرباء، الأجسام الصلبة.

يعتمد برنامج ANSYS أثناء الحل على نظرية العناصر المنتهية (Finite Element Method) وهي إحدى الطرق الرياضية العددية لإيجاد حل المعادلات التفاضلية المطلوبة وبالتالي الوصول للنتائج التي نبحث

عنها. ومع الإصدار العاشر لهذا البرنامج ظهرت بيئة Workbench والتي تمتاز بسهولة في التعامل وتمتاز أيضاً بإمكانية إجراء أكثر من دراسة للمسألة الواحدة وربط النتائج مع بعضها.

سوف نتعامل مع أحد تطبيقاته وهو Computational Fluid Dynamics (CFD) وسيتم العمل على برنامج Fluent ضمن منصة عمل ANSYS 16.0.

تتكون خوارزمية العمل ضمن برنامج ANSYS من أربع مراحل أساسية:

1- مرحلة التخطيط الهندسي Geometry.

2- مرحلة الشبكة (تجزئة المخطط إلى عناصر صغيرة) Mesh.

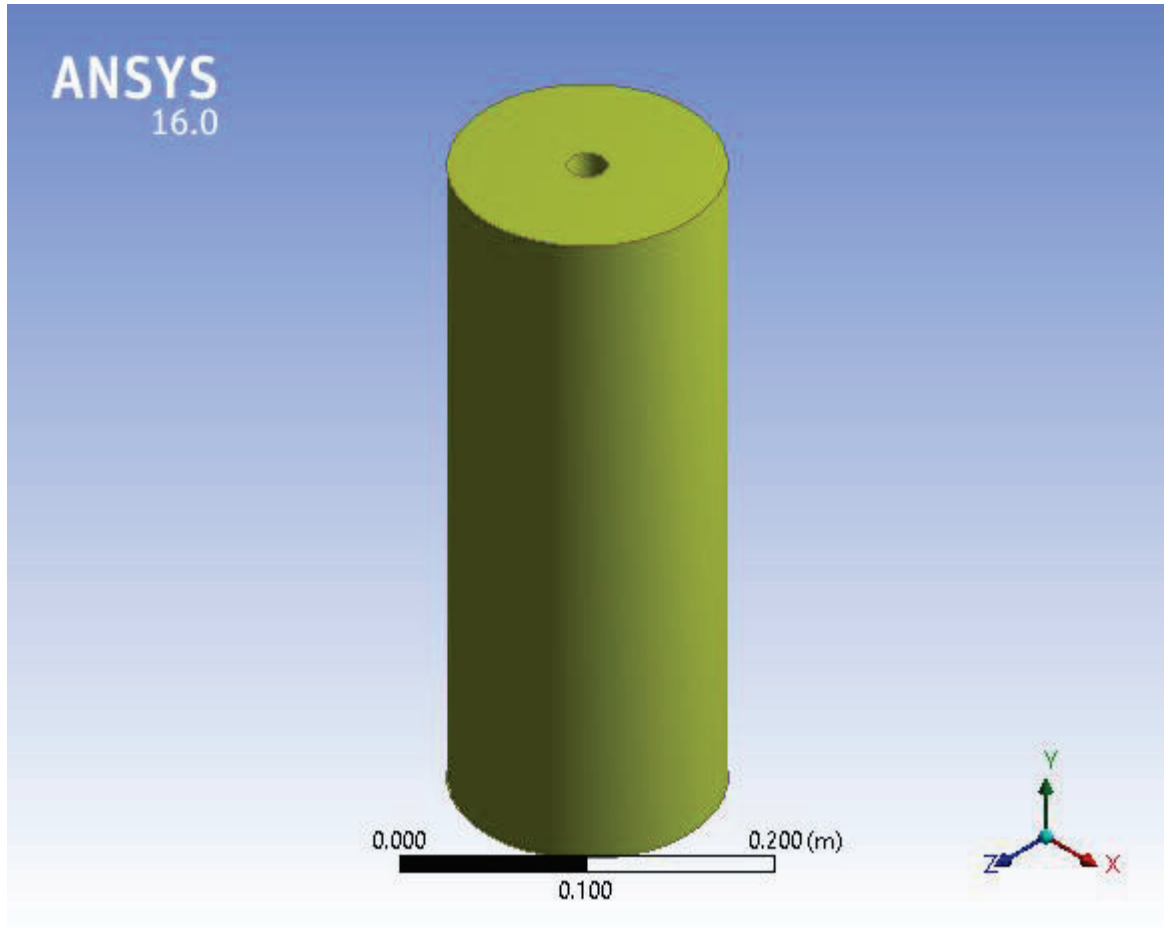
3- مرحلة الحل Setup & Solution.

4- مرحلة النتائج Result.

1- مرحلة التخطيط الهندسي Geometry:

نقوم ضمن هذه المرحلة برسم وتصميم الأجسام المراد إجراء المحاكاة عليها حيث يوجد ضمن برنامج ANSYS برنامج للرسم هو Design Modular كما يمكننا تصميم الجسم المطلوب باستخدام أحد برامج التصميم (Solid Works, Inventor,...) ومن ثم استيرادها ضمن برنامج ANSYS.

تم في هذه المرحلة إنشاء الخزان الأسطواني المراد دراسته ويوضح الشكل (1-4) أحد النماذج المدروسة وفقاً للأبعاد الهندسية الموضحة في الجدول (1-4).



الشكل (1-4) النموذج الهندسي للخرزان.

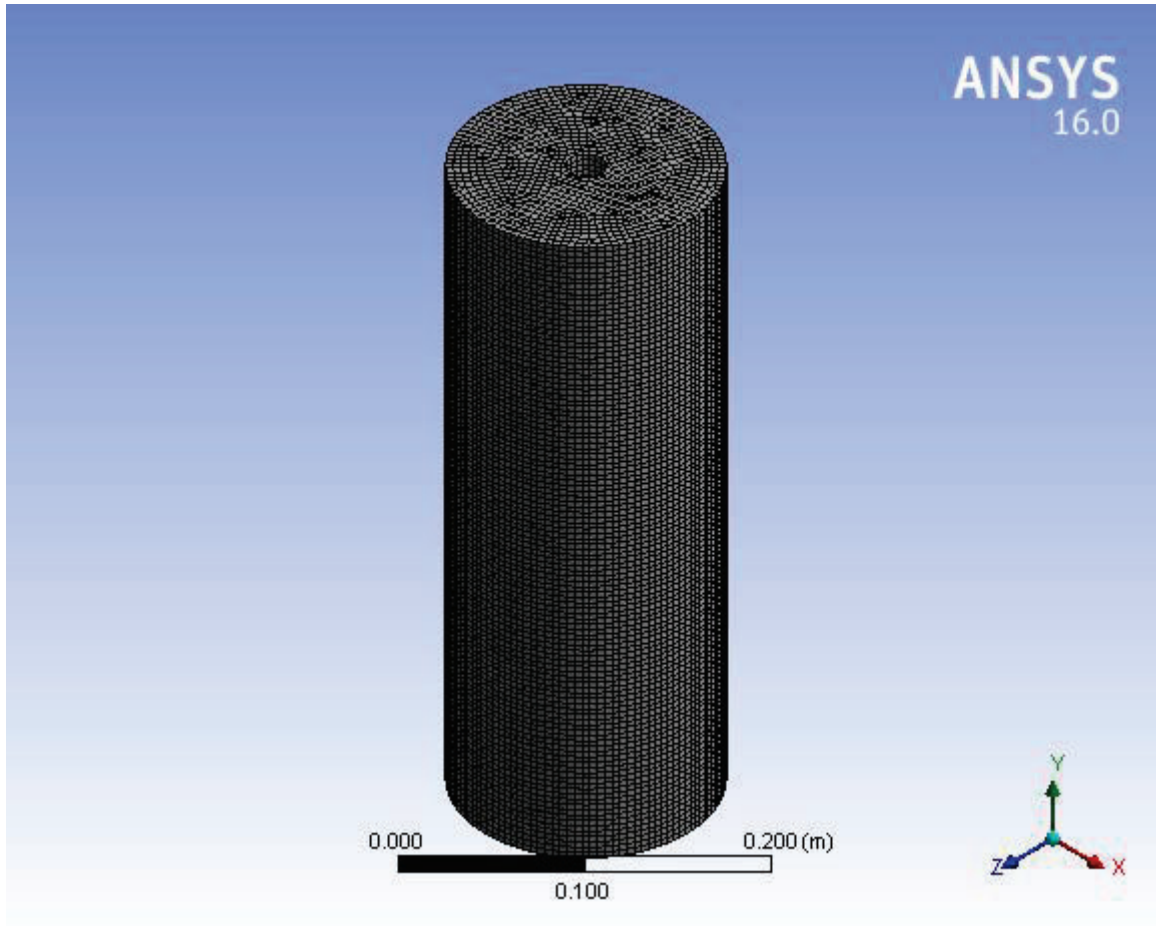
الجدول (1-4) الأبعاد الهندسية للنموذج الهندسي المدروس.

الرمز	الدلالة	القيمة
D	قطر الخزان الأسطواني	15 cm
L	ارتفاع الخزان الأسطواني	40 cm
d	القطر الخارجي للأنبوب	2.2 cm
	سماكة الأنبوب	1 mm

2- مرحلة الشبكة Mesh:

في هذه المرحلة يتم تقسيم الجسم المدروس إلى شبكة من العناصر الصغيرة، حيث يقوم البرنامج في المرحلة التالية بحل المعادلات الرياضية النازمة للمسألة المدروسة على كل عنصر من العناصر ومن ثم دمج الحل على كامل الجسم.

تم في هذه المرحلة إنشاء شبكة على جسم الخزان الأسطواني المراد دراسته والموضحة في الشكل (2-4) وفقاً للمواصفات الموضحة في الجدول (2-4).



الشكل (2-4) الشبكة المختارة لأحد النماذج المدروسة.

الجدول (2-4) شروط مرحلة الشبكة Mesh.

Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
Size Function	Curvature
Relevance Center	Fine
Smoothing	High
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
Nodes	148132
Elements	139035

3- مرحلة الحل Setup & Solution:

يتم ضمن هذه المرحلة توصيف المسألة المدروسة من ناحية اختيار الموديل الذي سيعتمده البرنامج أثناء الحل وتعيين الشروط الابتدائية والشروط الحدية للمسألة المدروسة، وفي حال كانت الحالة المدروسة عابرة (متغيرة مع الزمن) فيجب تحديد الخطوة الزمنية المطلوبة أثناء الحل. تعتبر هذه المرحلة الأهم بين المراحل الأربعة والأكثر صعوبة وحساسية لأن الاختيارات الصحيحة ضمن هذه المرحلة تجعل المحاكاة أقرب ما تكون للواقع والعكس صحيح، لأجل ذلك فقد أتاحت الشركة المنتجة لبرنامج ANSYS التعامل مع العديد من Solver ونذكر من أهمها لحل مسائل انتقال الحرارة ومسائل الهيدروليك CFX-Fluent-Polyflow.

الجدول (3-4) الكود المستخدم ضمن برنامج المحاكاة.

General	Solver Type	Pressure-Based
	Velocity Formulation	Absolute
	Time	Transient
	Gravity	$Y=-9.81 \text{ m/s}^2$
Models	Energy	On
	Viscous Model	Standard K-e
	Solidification&Melting	On
Materials	Water-Liquid	
	Copper	
	Steel	
Cell Zone Conditions	Fluid/Water	
Boundary Conditions	Pipe-Wall	$T=267.15 \text{ K}$
	Tank Wall-Wall	Heat Flux=0
Run Calculation	Time Step Size	300
	Number Of Time Step	96
	Max Iteration/Time Step	20

4- مرحلة النتائج Result:

يتم ضمن هذه المرحلة إظهار النتائج على شكل بيانات، منحنيات، صور، مقاطع فيديو... الخ.

الفرضيات المتبعة في عملية المحاكاة الحاسوبية:

تم تحديد عدد من الشروط الابتدائية والشروط الحدية لإنجاز عملية المحاكاة الحاسوبية وهي:

- درجة حرارة سطح التبريد 267.15K خلال فترة الشحن.
- درجة حرارة الماء الابتدائية 300.15K درجة حرارة الوسط المحيط.
- الخزان معزول بشكل كامل من جميع الأوجه.
- تم إلغاء تأثير الحمل الحراري ضمن الخزان.
- النقل بالتوصيل الحراري هو الفعل المسيطر في عملية الشحن.

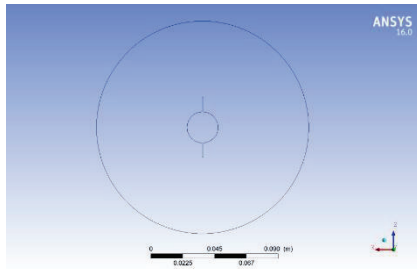
سنقوم بعملية المحاكاة على الخزان الحاوي على المادة المتغيرة الطور (PCM) وهي الماء، ووسط التبادل الحراري هو سطح الأنبوب وفي حال استخدم الريش يصبح سطح التبادل الحراري هو سطح الأنبوب مضافاً له الريش، جسم الأنبوب والريش من معدن النحاس بمعامل توصيل (110 W/m.K) حيث تم إجراء العديد من عمليات المحاكاة الحاسوبية لتحديد تأثير إضافة الريش على عملية تشكل الجليد.

2.4. عمليات المحاكاة الحاسوبية:

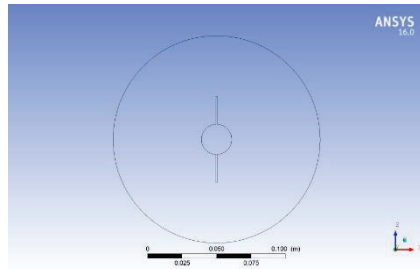
1.2.4. المحاكاة الحاسوبية لخزان جليد حراري معزول يحتوي على أنبوب واحد وريشتان حيث تكون أبعاد الريشة كالتالي سماكتها (1mm) وطولها ($3, 2, 1\text{cm}$):

تم إجراء المحاكاة الحاسوبية على مقطع من الخزان قطره (15cm) يحتوي على أنبوب من النحاس بقطر خارجي (2.2cm) بعد إضافة ريشتان من النحاس على طول الأنبوب بشكل متناظر حيث تكون أبعاد الريشة كالتالي سماكتها (1mm) وطولها ($3, 2, 1\text{cm}$) وفق النماذج (a, b, c) على الترتيب كما يوضح الشكل (3-4)، درجة حرارة سائل نقل الحرارة 267.15K .

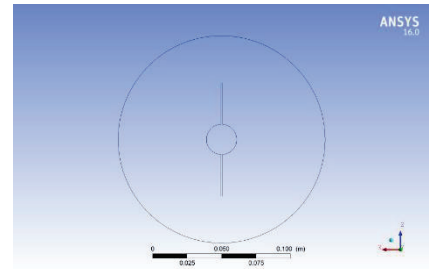
وفي هذه الحالة يصبح (سطح التبادل الحراري) هو سطح الأنبوب مضافاً له الريش.



a



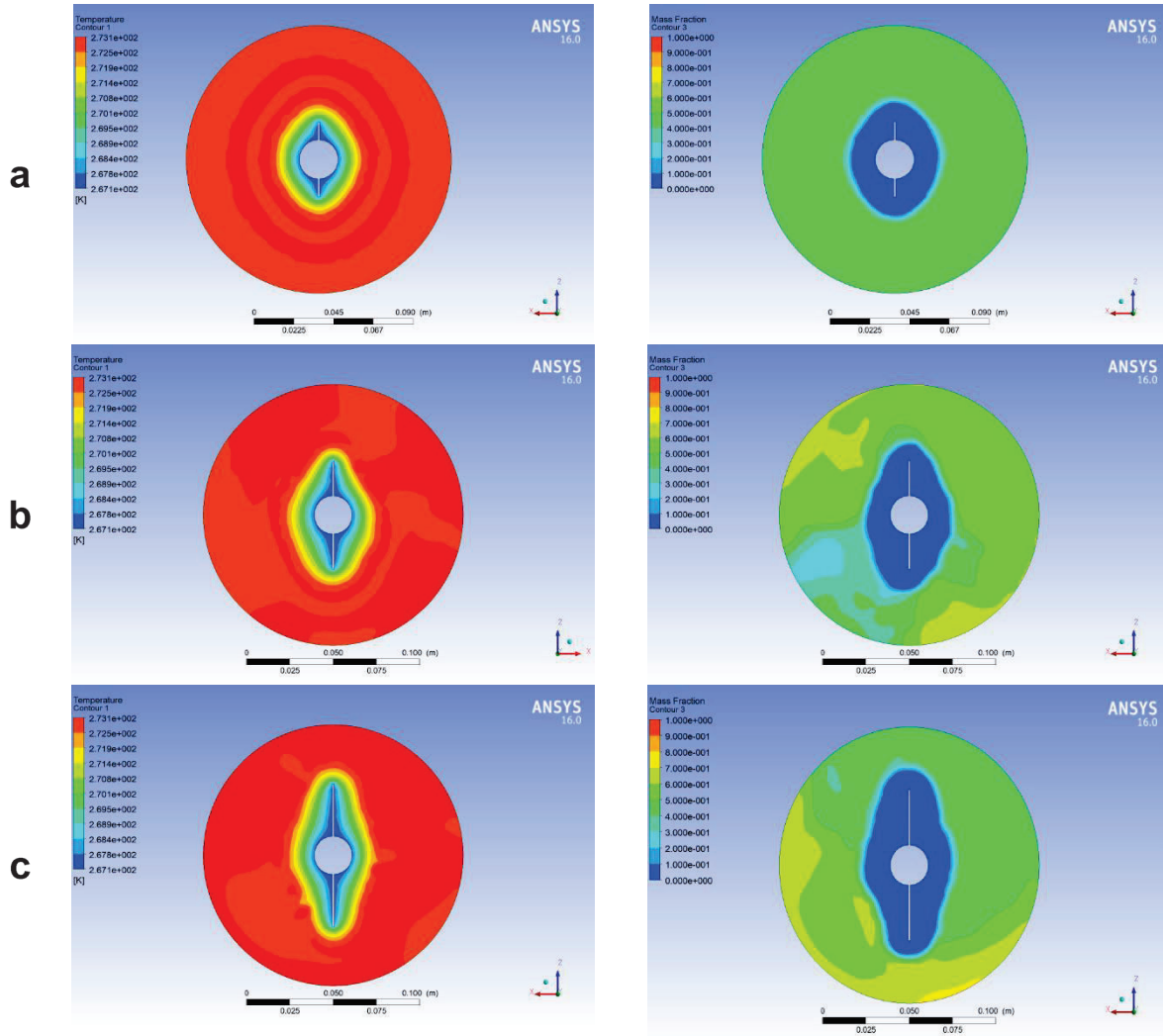
b



c

الشكل (3-4) مقطع عرضي ضمن الخزان للنماذج المستخدمة (a,b,c).

يوضح الشكل (4-4) توزيع درجات الحرارة ومعامل كسر السائل للنماذج الثلاثة بعد نهاية التجربة.



توزيع درجات الحرارة

معامل كسر السائل

الشكل (4-4) توزيع درجات الحرارة ومعامل كسر السائل للنماذج الثلاثة.

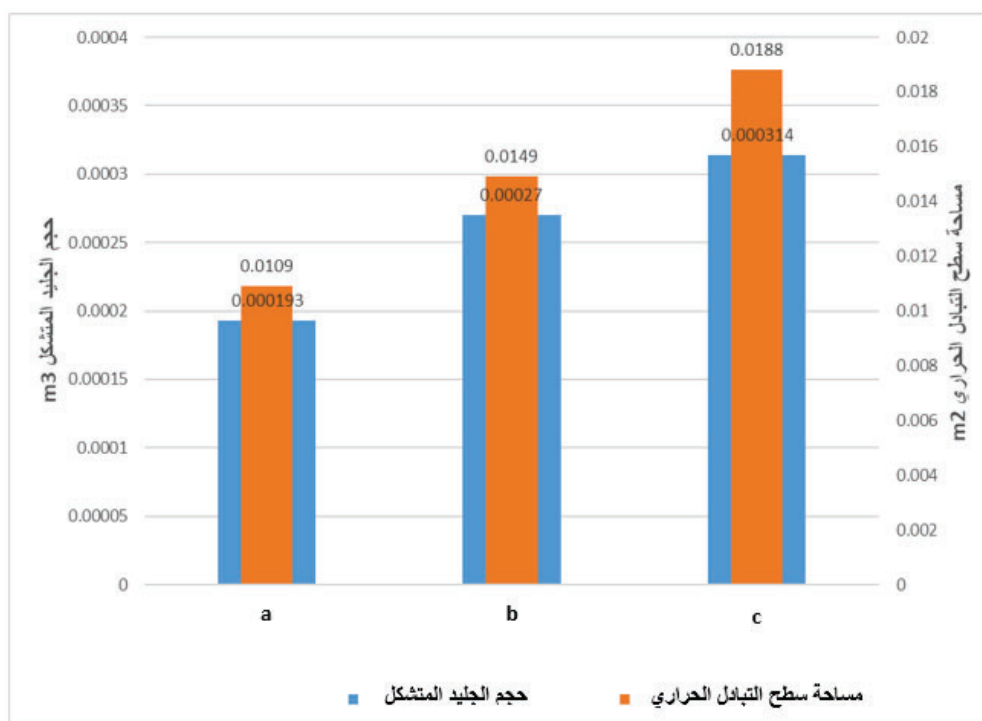
يبين الجدول (4-4) مساحة سطح التبادل الحراري لكل من النماذج (a, b, c)، والقيم التي حصلنا عليها عند نهاية التجربة لحجم الجليد المتشكل في الخزان.

الجدول (4-4) العلاقة بين مساحة سطح التبادل الحراري وحجم الجليد المتشكل في الخزان لكل من النماذج (a,b,c).

النموذج		a	b	c
حجم الجليد المتشكل في الخزان	[m ³]	0.000193	0.00027	0.000314
مساحة سطح التبادل الحراري	[m ²]	0.0109	0.0149	0.0188

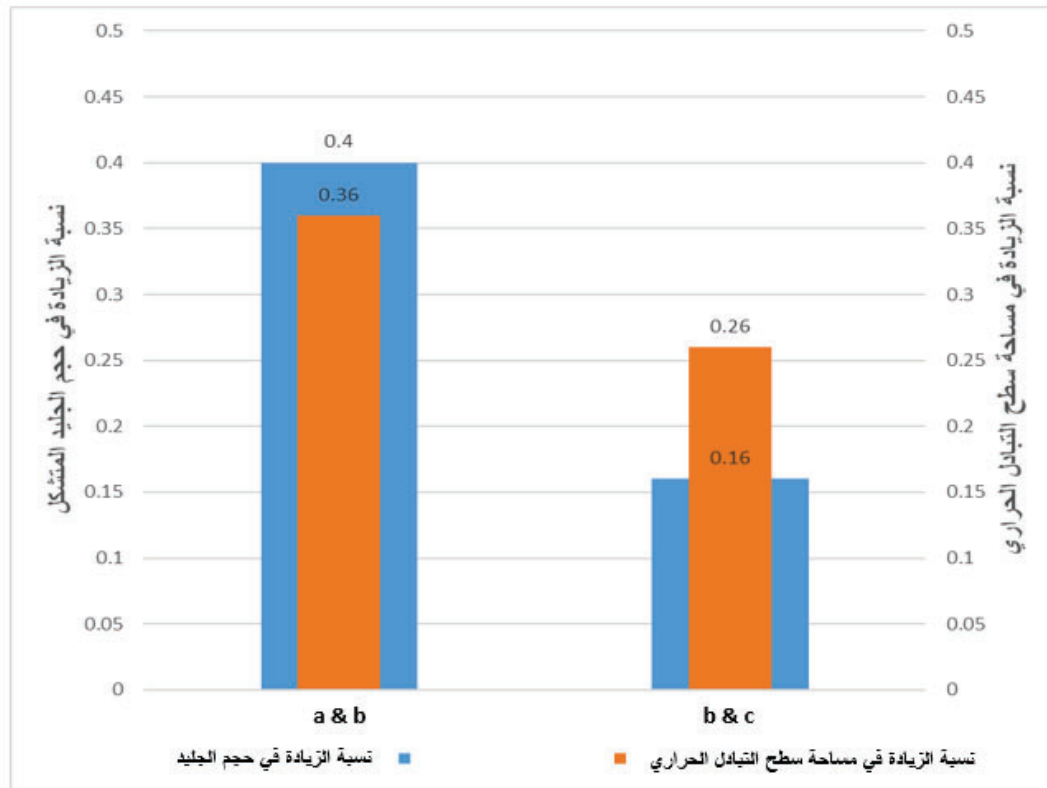
حيث نلاحظ زيادة انتشار الطور الصلب ضمن الخزان وبالتالي زيادة كتلة الجليد المتشكل في الخزان مع زيادة مساحة سطح التبادل الحراري.

قمنا بإجراء مقارنة بين النماذج الثلاثة من حيث حجم الجليد المتشكل بالخزان عند نهاية التجربة مع الزيادة في مساحة سطح التبادل الحراري.



الشكل (4-5) العلاقة بين حجم الجليد المتشكل مع مساحة سطح التبادل الحراري للنماذج الثلاثة.

نستنتج من الشكل السابق عند نهاية التجربة في حالة النموذج (b) كانت نسبة الزيادة في حجم الجليد المتشكل (40%) ونسبة الزيادة في مساحة سطح التبادل الحراري (36%) عن النموذج (a)، وكانت نسبة الزيادة في حجم الجليد المتشكل (16%) ونسبة الزيادة في مساحة سطح التبادل الحراري (26%) في النموذج (c) عن النموذج (b) كما يوضح المنحني البياني في الشكل (4-6).

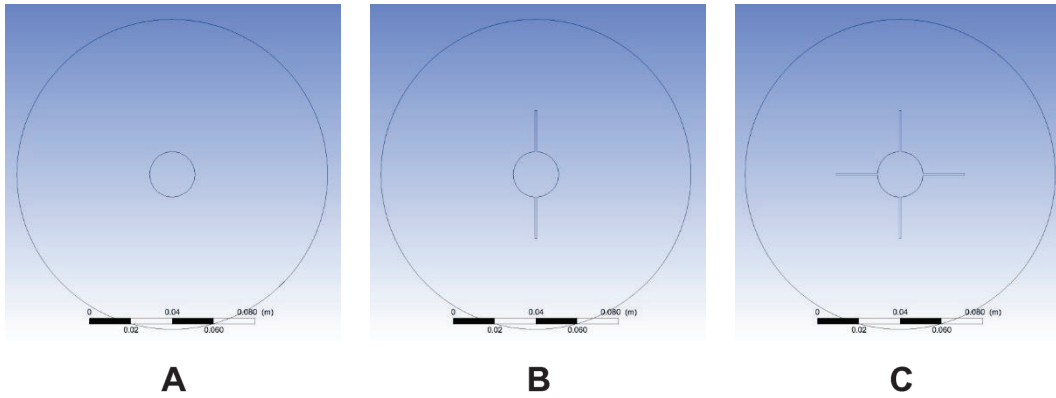


الشكل (4-6) مقارنة نسبة الزيادة في حجم الجليد المتشكل مع الزمن بالنسبة لمساحة سطح التبادل الحراري للنماذج الثلاثة.

وبالتالي فإن نسبة الزيادة في حجم الجليد المتشكل مع الزمن بالنسبة لمساحة سطح التبادل الحراري كانت للنموذج (b) هي الأفضل.

2.2.4. المحاكاة الحاسوبية لخزان جليد حراري أسطواني الشكل يحتوي على أنبوب واحد بعدة حالات (قبل إضافة ريش للأنبوب، بعد إضافة ريشتان، بعد إضافة 4 ريش):

تم إجراء المحاكاة الحاسوبية على خزان أسطواني الشكل قطره (15cm) وارتفاعه (40cm) يحتوي على أنبوب من النحاس بقطر خارجي (2.2cm) بعدة حالات (قبل إضافة ريش للأنبوب، بعد إضافة ريشتان، بعد إضافة 4 ريش) كما يوضح الشكل (4-7) حيث سماكة الريشة (1mm) وطولها (2cm)، حيث تم اعتبار (النموذج A) نموذجاً مرجعياً ومقارنة النماذج الأخرى معه.



الشكل (4-7) النماذج الهندسية المستخدمة في عملية المحاكاة.

يوضح الجدول (4-5) الأبعاد الهندسية لجميع النماذج التي تمت المقارنة فيما بينها.

الجدول (4-5) الأبعاد الهندسية.

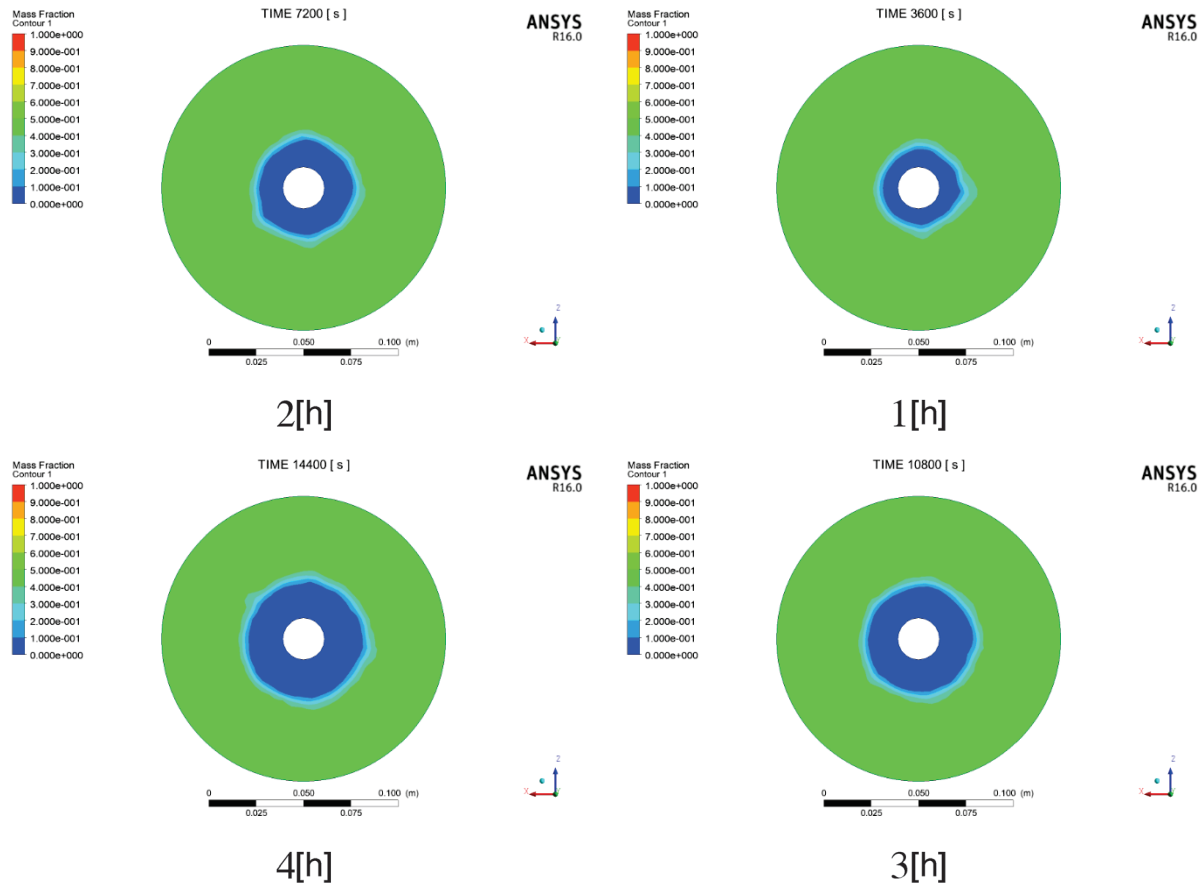
النموذج				
C	B	A		
0.15	0.15	0.15	D[m]	قطر الخزان
0.4	0.4	0.4	L[m]	ارتفاع الخزان
0.022	0.022	0.022	d[m]	القطر الخارجي للأنبوب
4	2	–	n	عدد الريش
0.001	0.001	–	δ [m]	سماكة الريشة
0.02	0.02	–	h[m]	طول الريشة

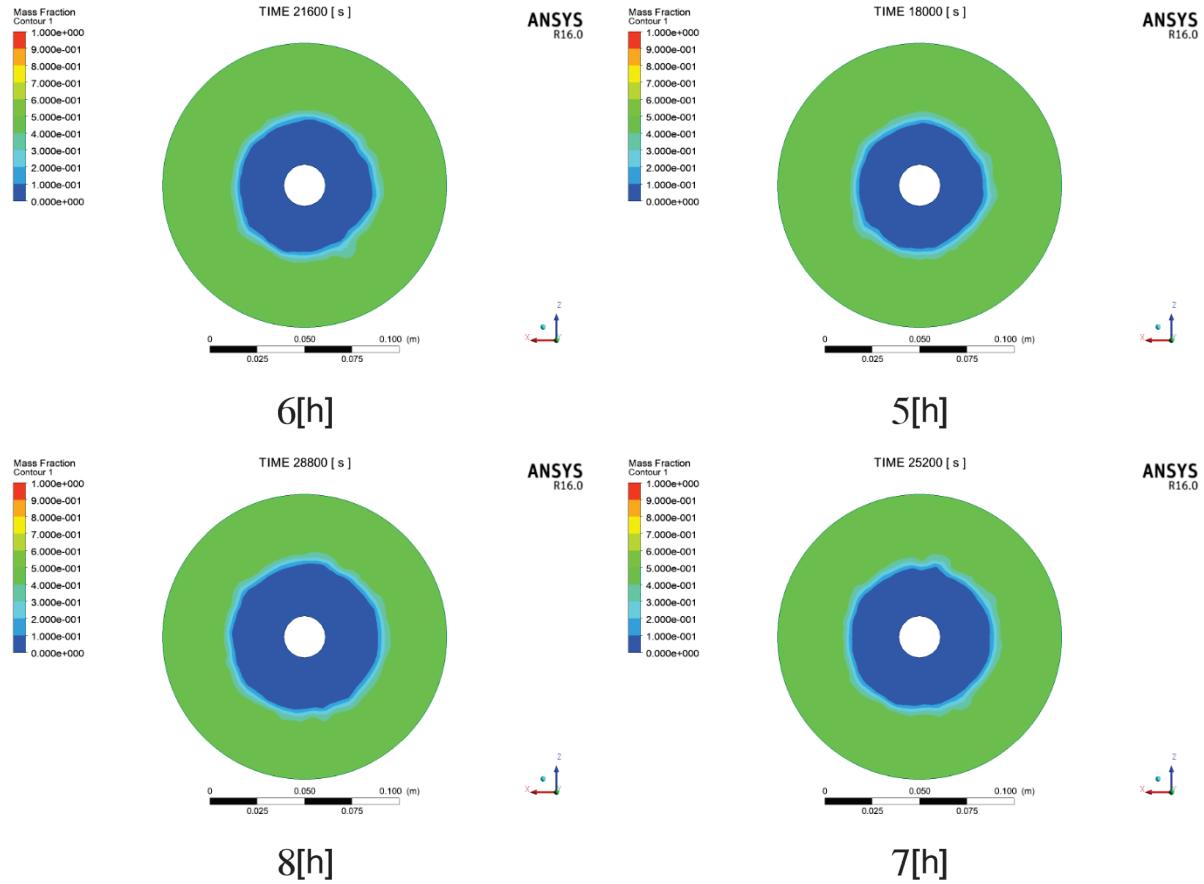
1.2.2.4. دراسة الخزان الأسطواني قبل إضافة ريش للأنبوب (النموذج A):

تمت عملية المحاكاة الحاسوبية على خزان أسطواني قطره (15cm) وارتفاعه (40cm) يحتوي على أنبوب من النحاس بقطر (2.2cm) متوضع في منتصف الخزان، درجة حرارة سائل نقل الحرارة 267.15K، وفي هذه الحالة يكون سطح التبريد (سطح التبادل الحراري) هو سطح الأنبوب، تمت التجربة خلال 8 ساعات عمل.

0.00691554	m ³	حجم (PCM) الماء ضمن الخزان
0.0275324	m ²	مساحة سطح التبادل الحراري

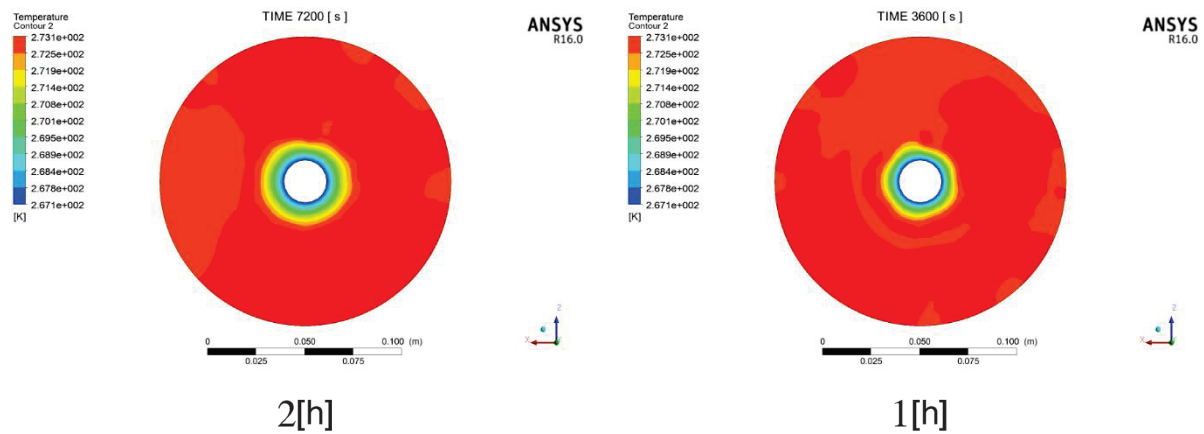
وفيما يلي نتائج عملية المحاكاة كل ساعة تبين كمية المادة المتحولة الطور PCM التي تحولت للحالة الصلبة (المتجمدة) المشكلة حلول الأنبوب مع الزمن.

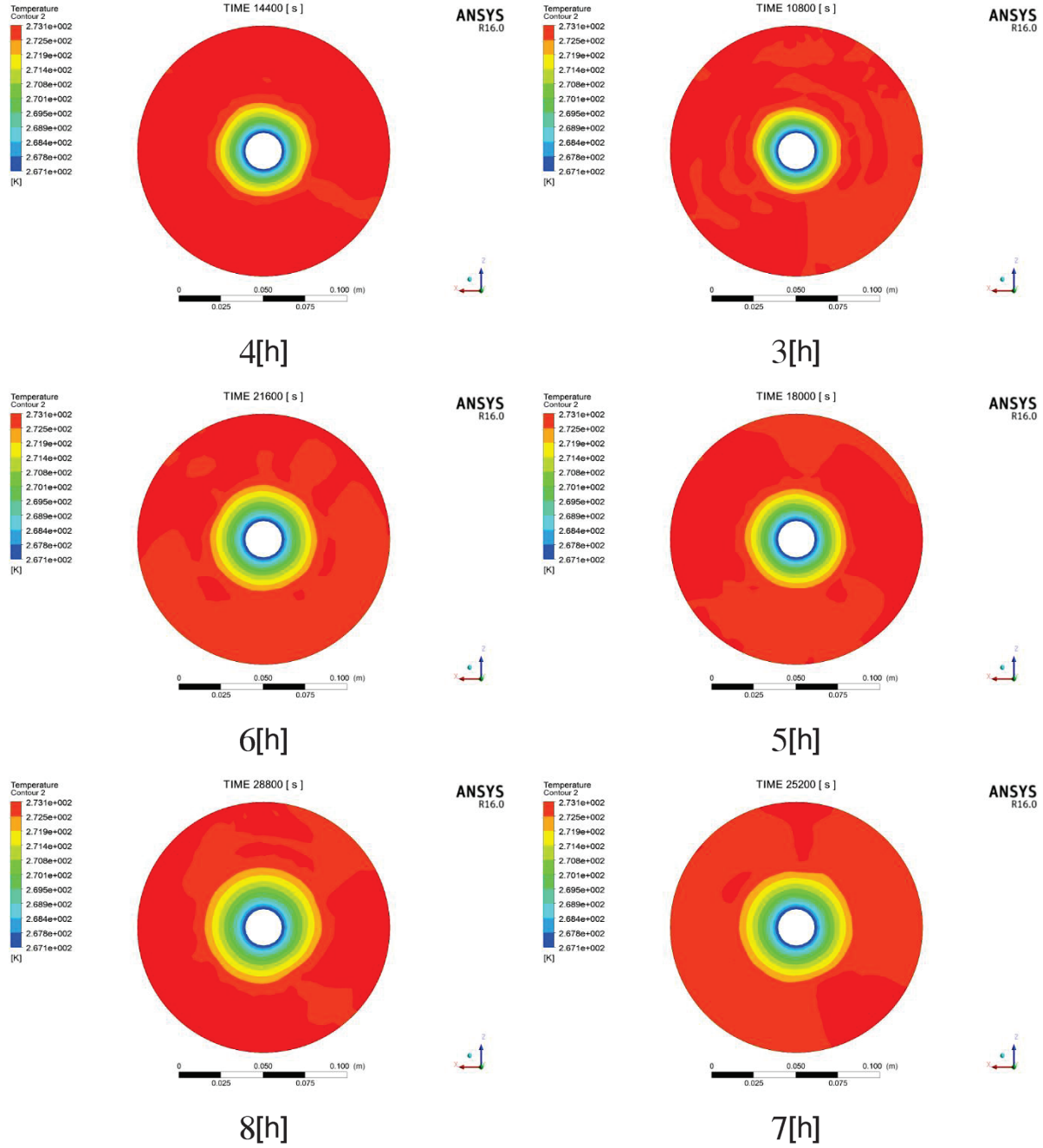




الشكل (4-8) شكل موجة الجليد المتشكل خلال ثمان ساعات للنموذج A.

كامل يوضح الشكل (4-9) توزيع درجات الحرارة حول الأنبوب مع الزمن حيث تشير تدرجات الألوان من اللون الأزرق حتى اللون البرتقالي الفاتح إلى PCM في الحالة الصلبة بدرجات حرارة مختلفة، وتمثل باقي التدرجات في PCM في الحالة السائلة والتي ستدخل في مرحلة التحول الطوري.





الشكل (4-9) توزيع درجات الحرارة خلال ثمان ساعات للنموذج A.

بدايةً تنخفض درجة حرارة الـ PCM في الحالة السائلة من درجة الحرارة الابتدائية (300.15K) حتى درجة حرارة التحول الطوري -عملية تبريد محسوس للسائل-، ثم تبدأ عملية تحول طوري للـ PCM من الطور السائل إلى الطور الصلب -تشكل الجليد- ثم خفض درجة حرارة الجليد المتشكل ونقلها للسائل المحيط.

يتم قياس سماكة الطور الصلب (الجليد) المتشكلة ضمن PCM عن طريق معامل الكسر الكتلي (Mass Fraction):

$$\beta = \frac{T - T_{solidus}}{T_{liquidus} - T_{solidus}}$$

حيث:

$\beta = 0$ الجليد.

$\beta = 1$ الماء السائل.

يوضح الجدول (6-4) القيم التي حصلنا عليها لنصف قطر موجة التجمد (السطح الفاصل بين الطور الصلب والطور السائل) حول الأنبوب مع الزمن.

الجدول (6-4) نصف قطر موجة التجمد (السطح الفاصل بين الطورين) مع الزمن.

نصف قطر موجة التجمد (السطح الفاصل بين الطورين) مع الزمن [cm]					
T_{∞}		$t [h]$			
[k]	[C]	2	4	6	8
267.15	-6	2.45	3.05	3.47	3.87

نلاحظ بداية زيادة سريعة في تشكل موجة التجمد لكن مع الزمن تشكل سماكة طبقة الجليد مقاومة حرارية تعيق عملية تشكل الجليد.

فيما يلي القيم التي حصلنا عليها لحجم الجليد المتشكل ضمن الخزان مع الزمن.

الجدول (7-4) العلاقة بين حجم الجليد المتشكل مع الزمن للنموذج (A).

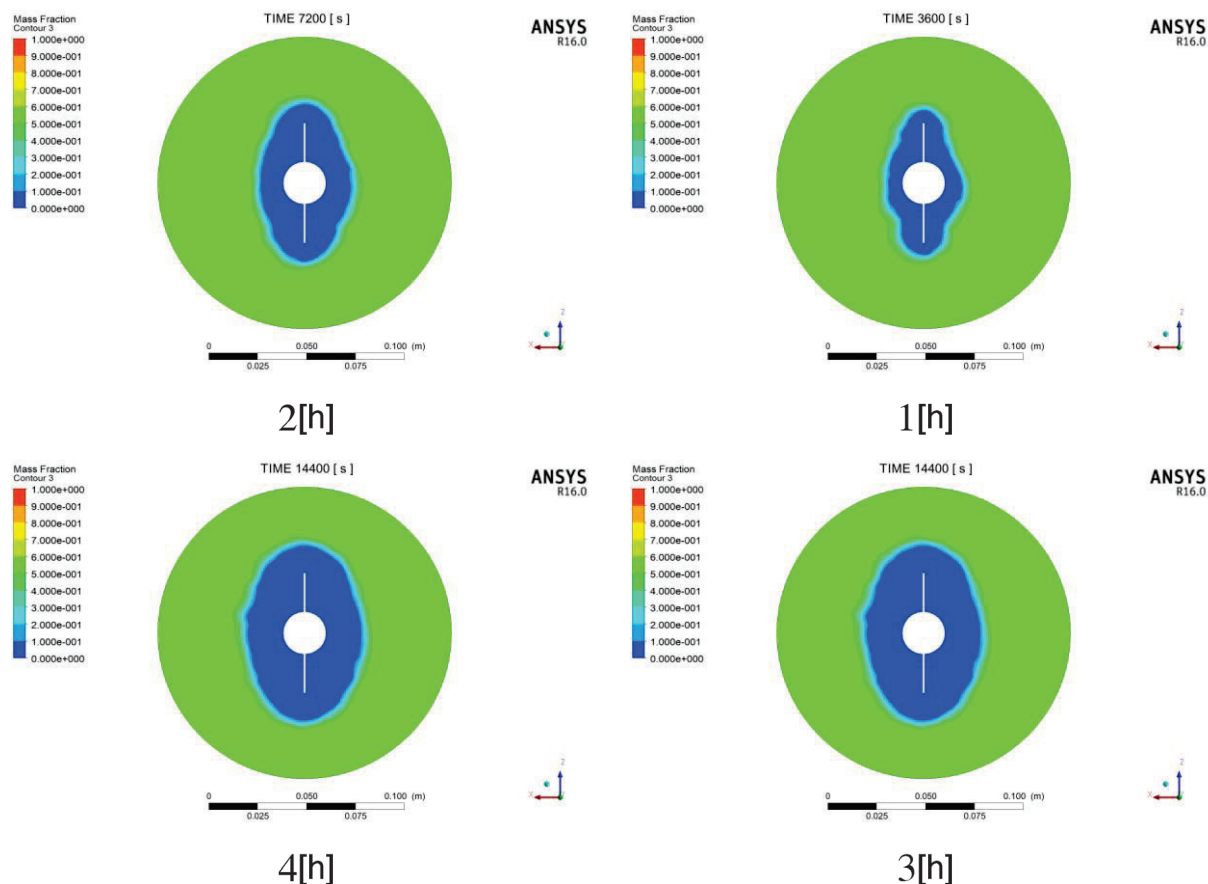
t	[h]	2	4	6	8
حجم الجليد	m ³	0.000576647	0.00100383	0.0013485	0.00169958

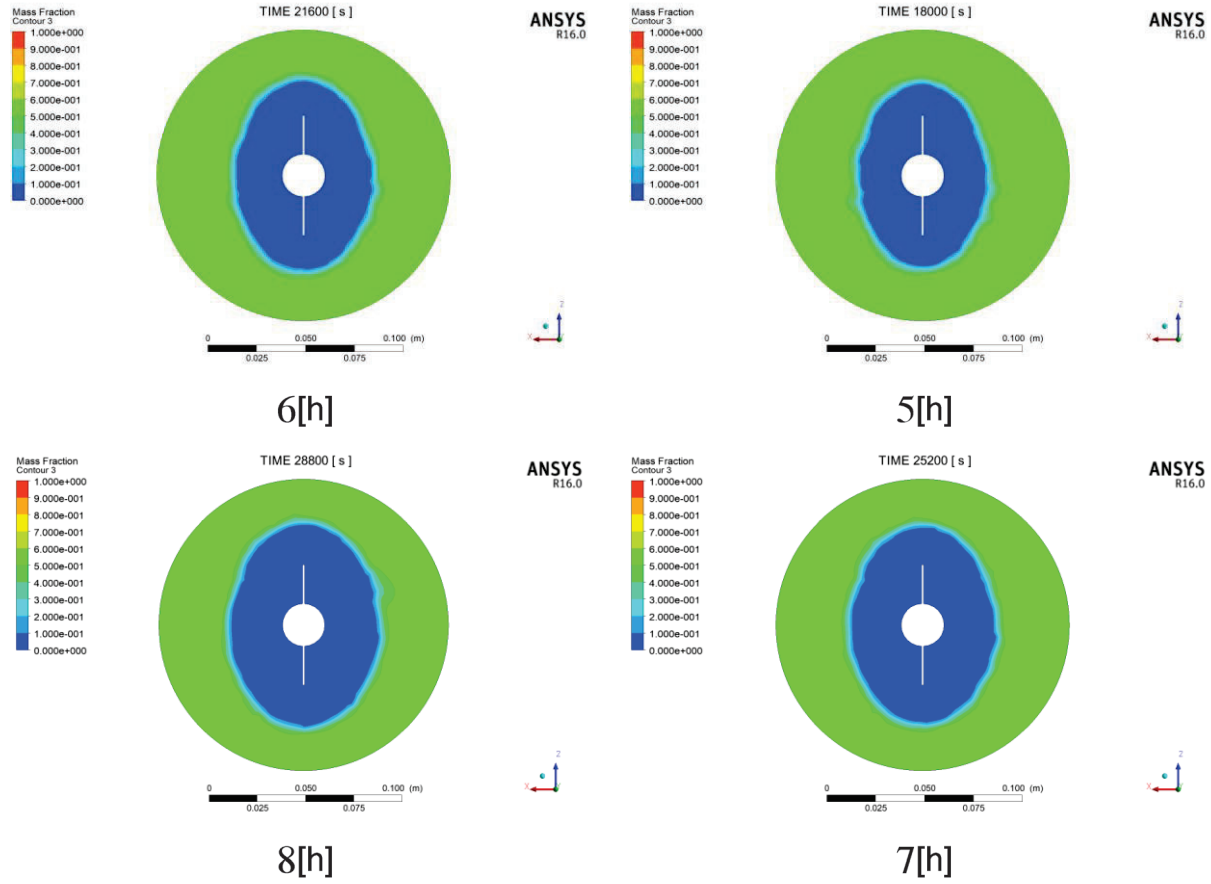
2.2.2.4. دراسة الخزان الأسطواني بعد إضافة ريشتان للأنبوب (النموذج B):

تمت عملية المحاكاة الحاسوبية على خزان أسطواني قطره (15cm) وارتفاعه (40cm) يحتوي على أنبوب من النحاس بقطر خارجي (2.2cm) متوضع في منتصف الخزان وتمت إضافة ريشتان على طول الأنبوب بشكل متناظر حيث أبعاد الريشة بطول (2cm) وسماكة (1mm)، درجة حرارة سائل نقل الحرارة 267.15K، وفي هذه الحالة يصبح سطح التبادل الحراري هو سطح الأنبوب مضافاً له الريش، تمت التجربة خلال 8 ساعات عمل.

0.00689958	m ³	حجم الماء ضمن الخزان (PCM)
0.0595917	m ²	مساحة سطح التبادل الحراري

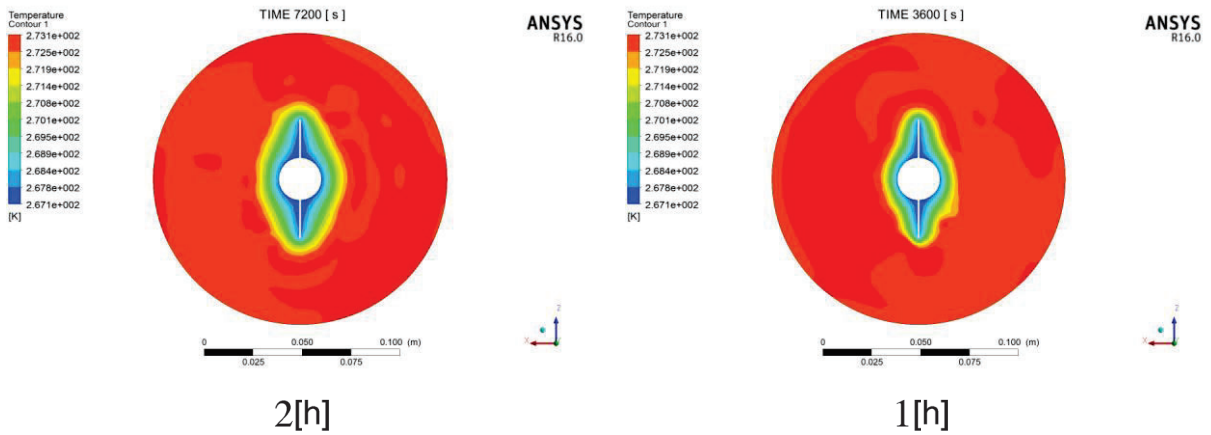
وفيما يلي نتائج عملية المحاكاة كل ساعة تبين كمية الجليد المتشكل حول الأنبوب والريش مع الزمن.

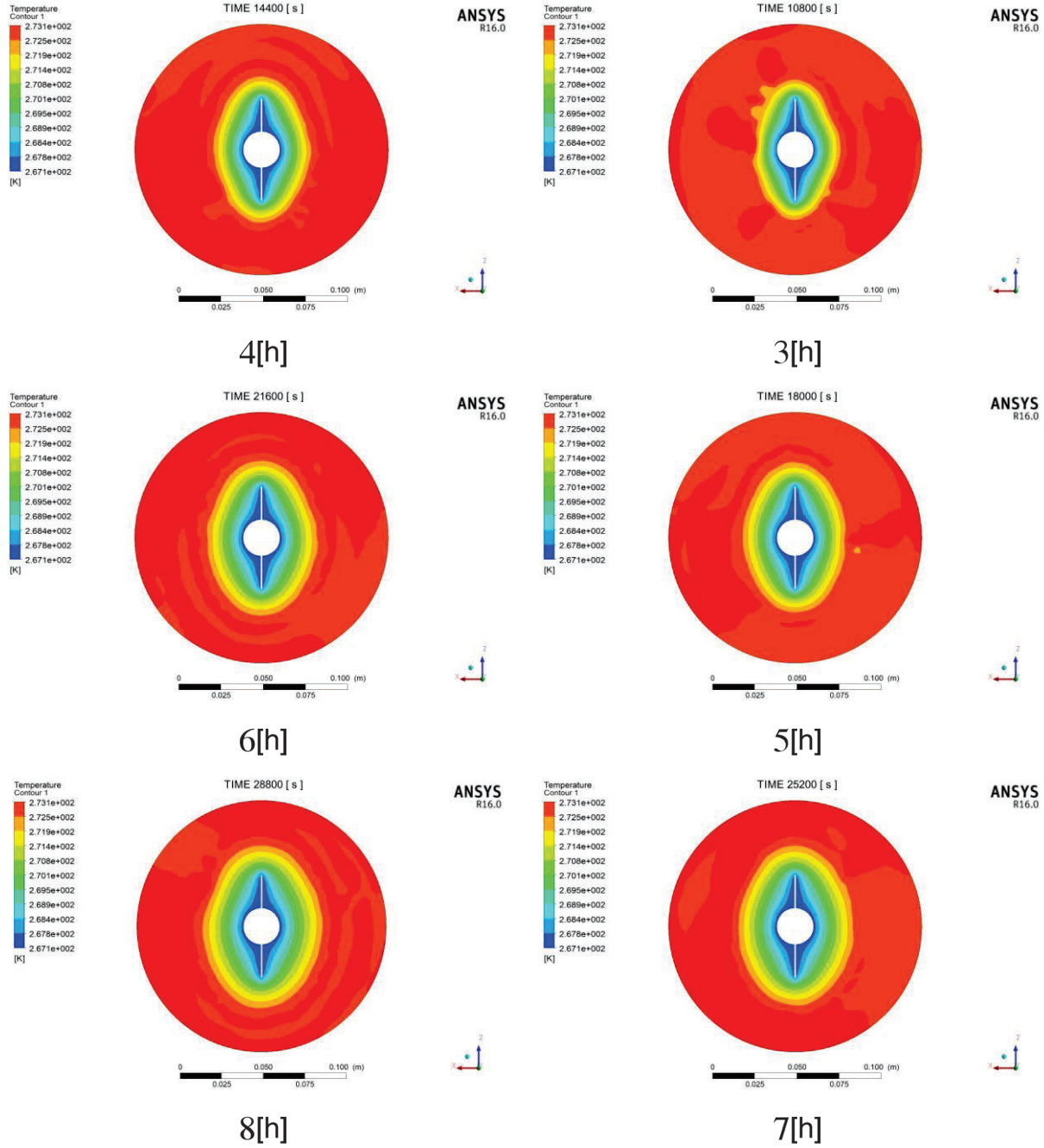




الشكل (4-10) شكل موجة الجليد المتشكل خلال ثمان ساعات للنموذج B.

كما يوضح الشكل (4-11) توزيع درجات الحرارة حول الأنبوب والریش مع الزمن.





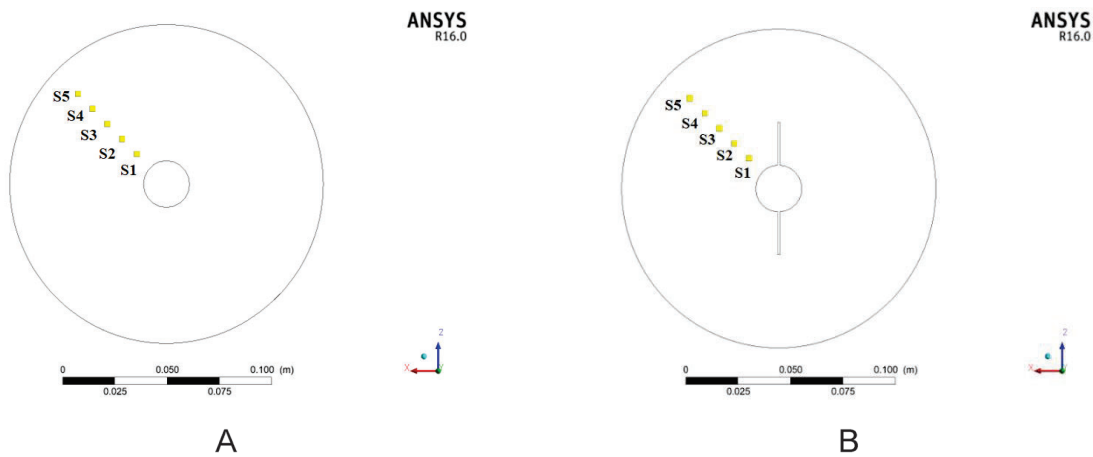
الشكل (4-11) توزيع درجات الحرارة خلال ثمان ساعات للنموذج B.

فيما يلي القيم التي حصلنا عليها لحجم الجليد المتشكل ضمن الخزان مع الزمن.

الجدول (4-8) العلاقة بين حجم الجليد المتشكل مع الزمن للنموذج (B).

t	$[h]$	2	4	6	8
حجم الجليد	m^3	0.000941989	0.00169093	0.00227766	0.00276046

نضيف حساسات في كل من الخزائين كما يوضح الشكل لقراءة البارامترات ضمن PCM وفق الإحداثيات التالية:



الشكل (4-12) توضع الحساسات ضمن الخزان لكل من النموذجين.

(X,Y,Z)

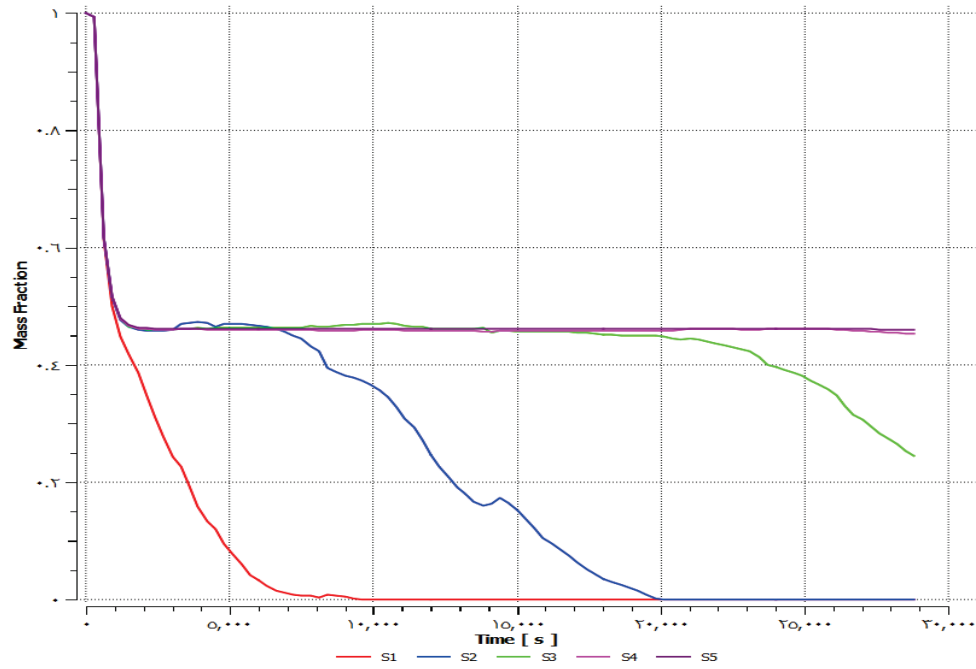
S_1 (0.0151421,0,0.0151421)

S_2 (0.0222132,0,0.0222132)

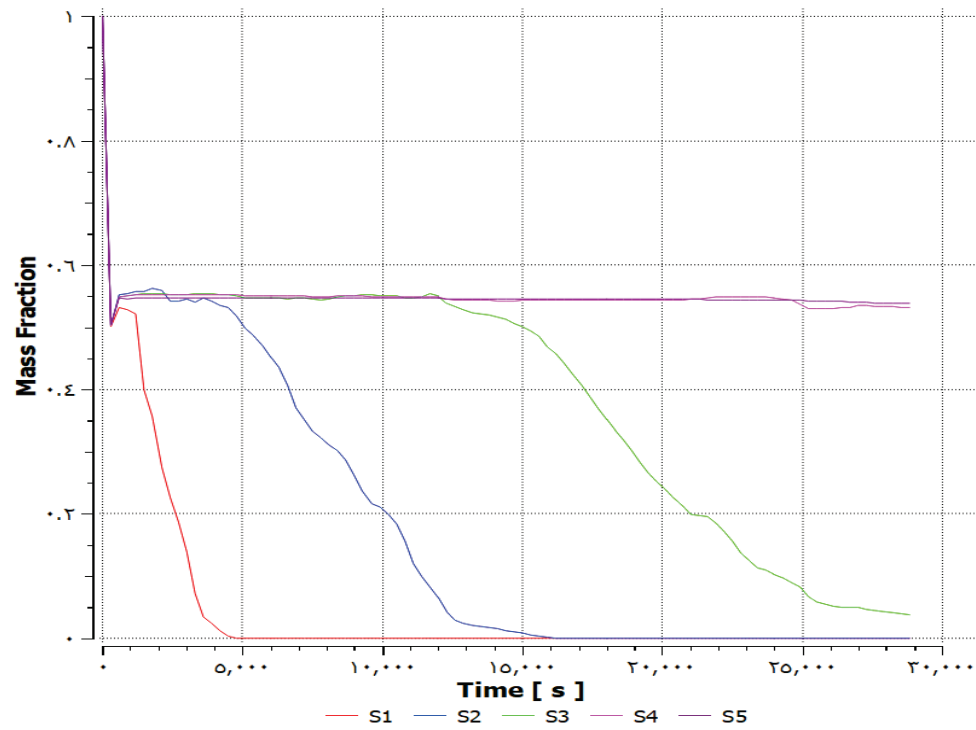
S_3 (0.0292843,0,0.0292843)

S_4 (0.0363553,0,0.0363553)

S_5 (0.0434264,0,0.0434264)



الشكل (4-13) قراءة الحساسات قبل إضافة ريش للأنبوب النموذج A.



الشكل (4-14) قراءة الحساسات بعد إضافة ريشتان للأنبوب النموذج B.

نلاحظ من الشكل (4-13) والشكل (4-14) أنه قبل إضافة ريش للأنبوب وصلت موجة التجمد للحساس الأول S_1 بعد (6500s) وللحساس الثاني S_2 بعد (19500s) بينما لم تصل موجة التجمد لباقي الحساسات.

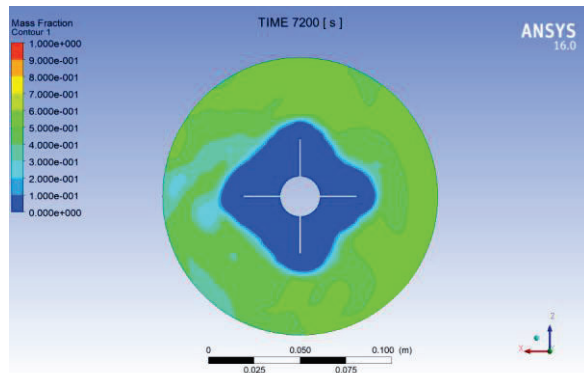
أما بعد إضافة ريش للأنبوب وصلت موجة التجمد للحساس الأول S_1 بعد (4200s) وللحساس الثاني S_2 بعد (15000s) واقترب موجة التجمد من الوصول للحساس الثالث S_3 بينما لم تصل موجة التجمد لباقي الحساسات. بالتالي: إن إضافة الريش على سطح الأنبوب أدى لتعزيز انتقال الحرارة ضمن الـ PCM ووصول موجة التجمد لنقاط أبعد عن سطح التبريد وبزمن أقل.

3.2.2.4. دراسة الخزان الأسطواني بعد إضافة أربع ريش للأنبوب (النموذج C):

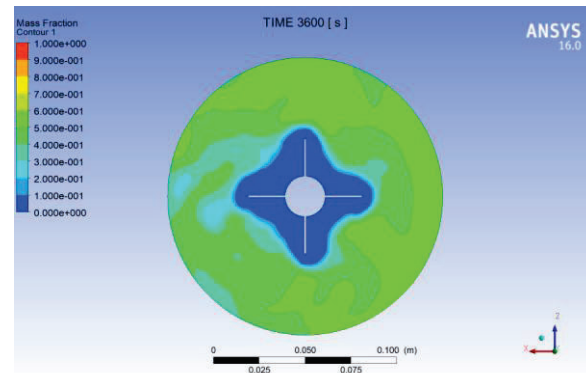
تمت عملية المحاكاة الحاسوبية على خزان أسطواني قطره (15cm) وارتفاعه (40cm) يحتوي على أنبوب من النحاس بقطر خارجي (2.2cm) متوضع في منتصف الخزان وتم إضافة أربع ريش على الأنبوب بطول (2cm) وسماكة (1mm)، درجة حرارة سائل نقل الحرارة 267.15K، وفي هذه الحالة يصبح سطح التبادل الحراري هو سطح الأنبوب مضافاً له الريش، تمت التجربة خلال 8 ساعات عمل.

0.00688344	m ³	حجم (PCM) الماء ضمن الخزان
0.0916158	m ²	مساحة سطح التبادل الحراري

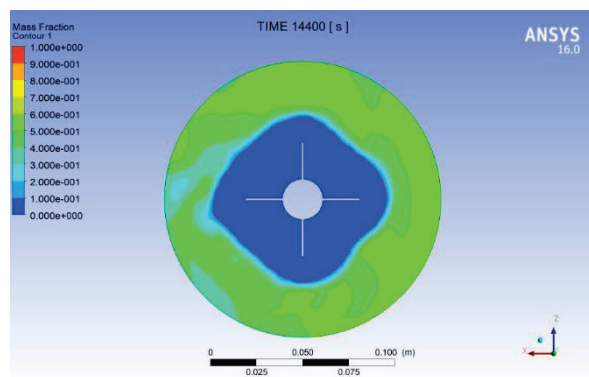
وفيما يلي نتائج عملية المحاكاة كل ساعة تبين كمية الجليد المتشكل حول الأنبوب والريش مع الزمن.



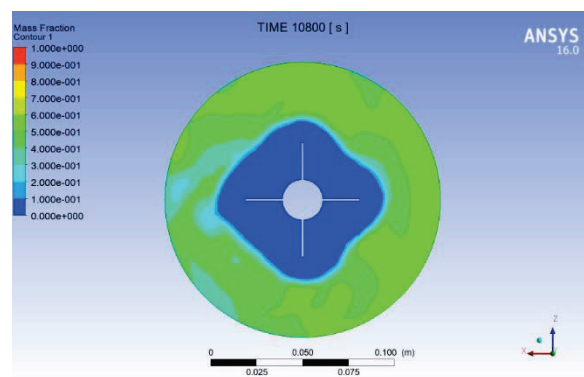
2[h]



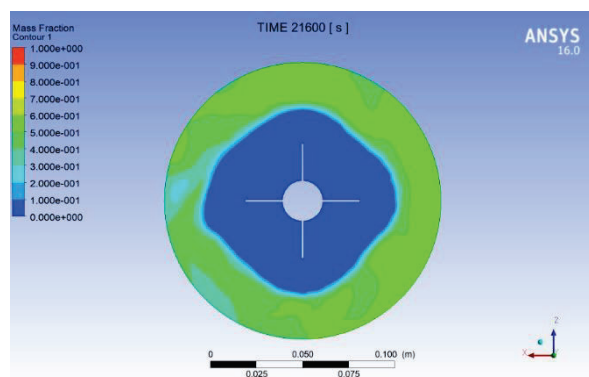
1[h]



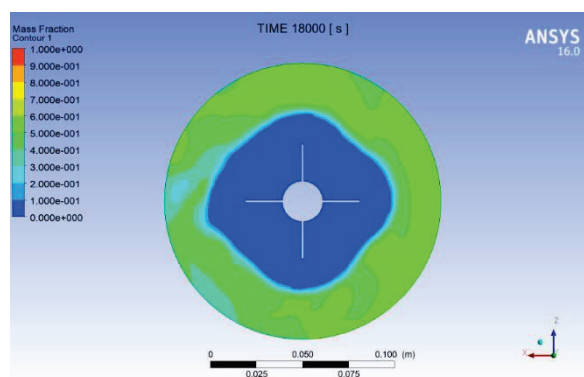
4[h]



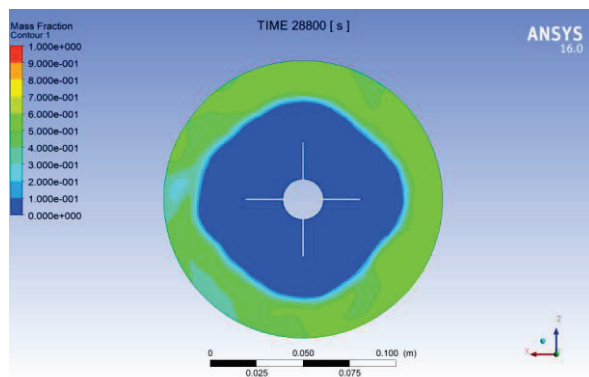
3[h]



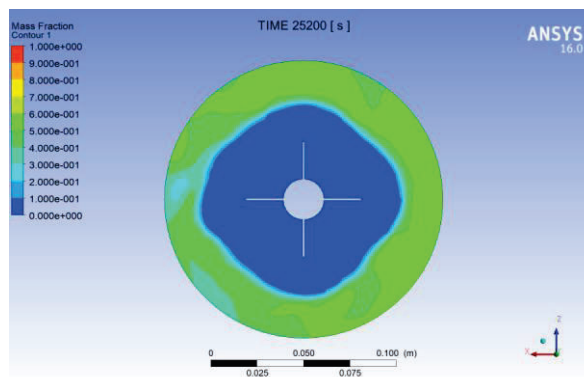
6[h]



5[h]



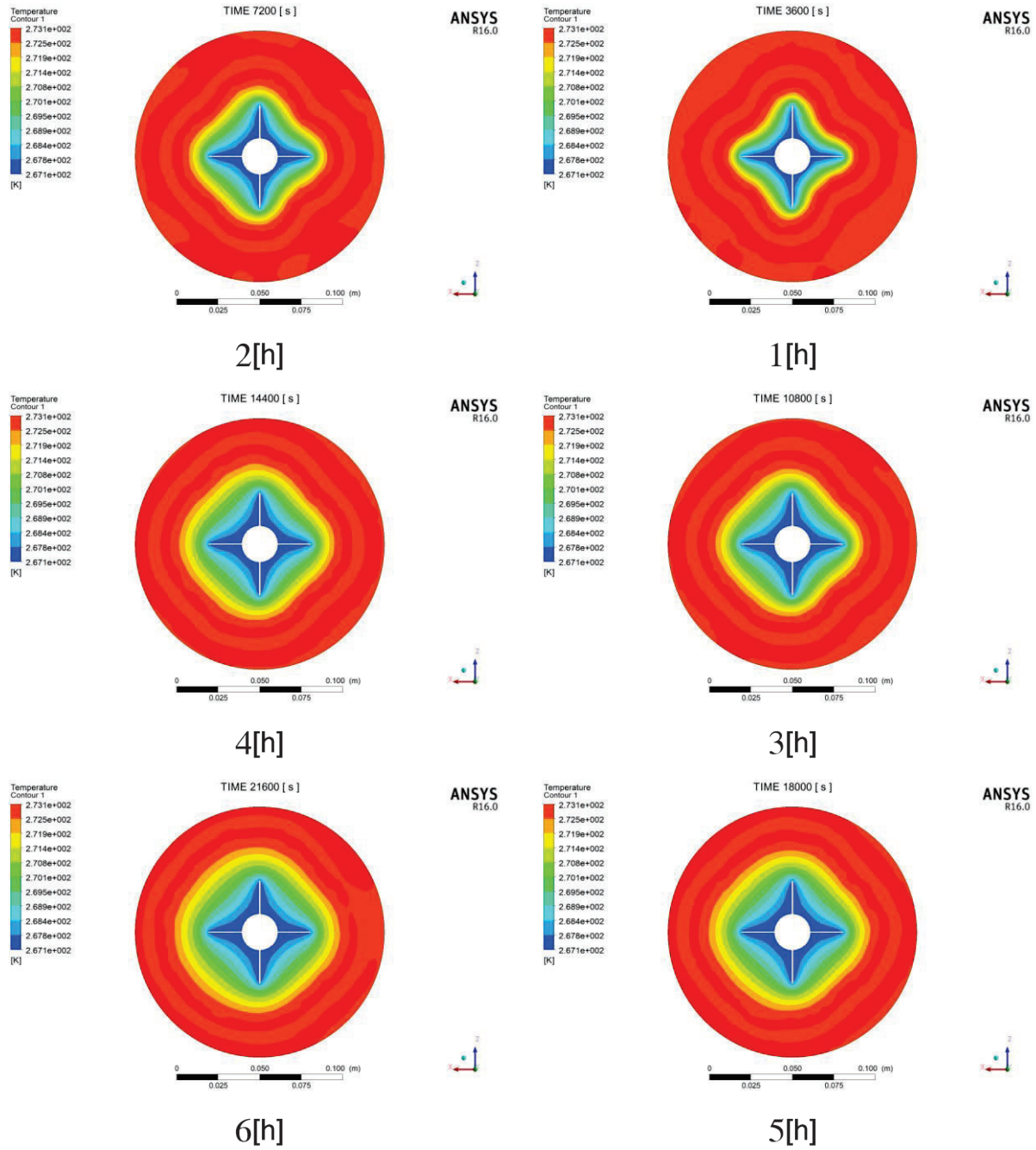
8[h]

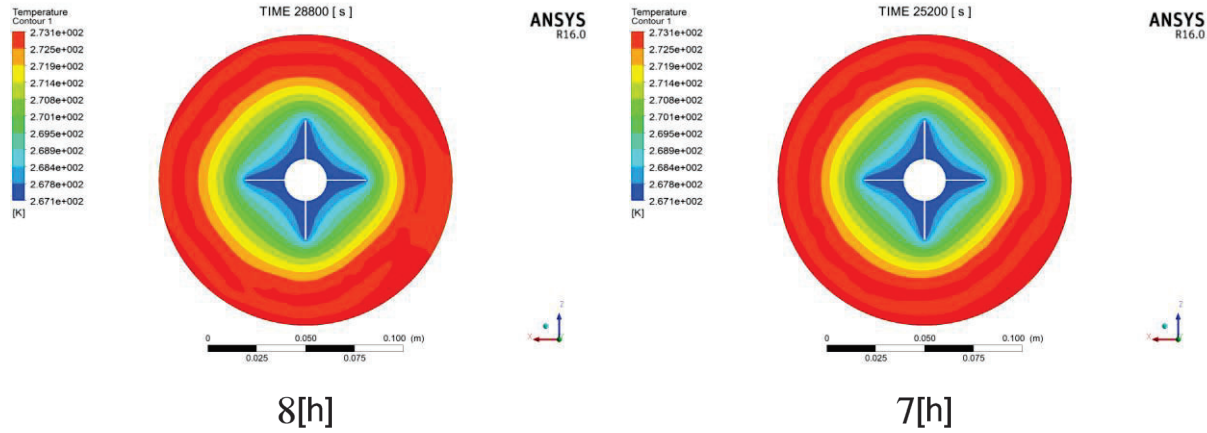


7[h]

الشكل (4-15) شكل موجة الجليد المتشكل خلال ثمان ساعات عمل للنموذج C.

كما يوضح الشكل (4-16) توزيع درجات الحرارة حول الأنبوب والريش مع الزمن.



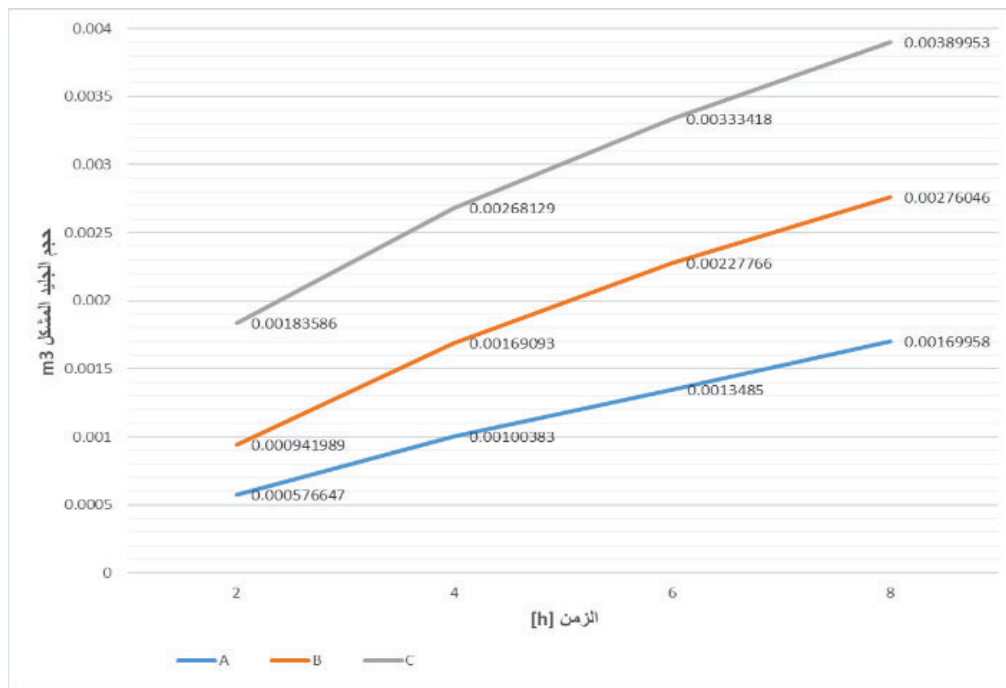


الشكل (4-16) توزيع درجات الحرارة خلال ثمان ساعات للنموذج C.

فيما يلي القيم التي حصلنا عليها لحجم الجليد المتشكل ضمن الخزان مع الزمن.

الجدول (4-9) العلاقة بين حجم الجليد المتشكل مع الزمن للنموذج (C).

t	$[h]$	2	4	6	8
حجم الجليد	m^3	0.00183586	0.00268129	0.00333418	0.00389953



الشكل (4-17) حجم الجليد المتشكل مع الزمن للنماذج A, B, C.

بالمقارنة بين النماذج الثلاثة (A,B,C) عند نهاية التجربة نلاحظ زيادة حجم الجليد المتشكل في الخزان مع زيادة عدد الريش، حيث كانت زيادة حجم الجليد للنموذج B هي 63% عن النموذج A، وبمقدار 41% للنموذج C عن النموذج B، وبمقدار 129% للنموذج C عن النموذج A.

وكانت نسبة الطور الصلب (الجليد المتشكل) عند نهاية التجربة من كامل حجم PCM السائل ضمن الخزان:

النموذج A 25%

النموذج B 40%

النموذج C 57%

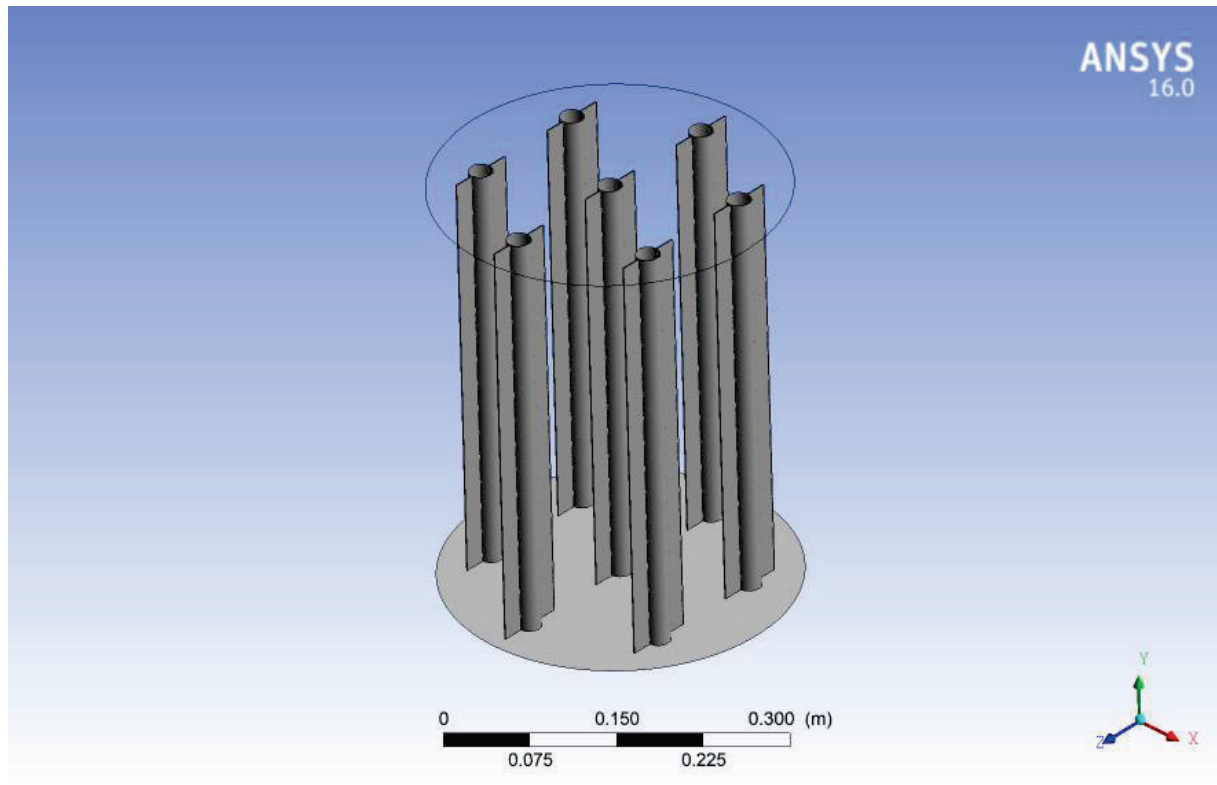
مع زيادة عدد الريش تزداد مساحة سطح التبادل الحراري مما يؤدي إلى ارتفاع معدل انتقال الحرارة ضمن PCM ولكن من الناحية الاقتصادية فإن زيادة عدد الريش على طول الأنبوب يزيد من التكاليف الأولية للنظام، بالإضافة إلى أنه بزيادة عدد الريش سيتم استبدال جزء من PCM الموجود في الخزان بالكتلة المعدنية للريش، ومن الناحية العملية وجود كمية إضافية من المعدن الواجب تبريده عند نفس الاستطاعة تتطلب زمن أطول للوصول لدرجات حرارة منخفضة. لذا سنقوم بإضافة ريشتان فقط في عملية المحاكاة التالية.

3.2.4. دراسة خزان أسطواني يحتوي 7 أنابيب مريشة:

تمت عملية المحاكاة الحاسوبية على خزان أسطواني قطره (32cm) وارتفاعه (40cm) يحتوي على 7 أنابيب من النحاس بقطر خارجي (2.2cm) درجة حرارة سائل نقل الحرارة 267.15K وتم إضافة ريشتان وفق أبعاد النموذج (b) على طول الأنبوب حيث سماكة الريشة (1mm) وطولها (2cm) لكل منها، وفي هذه الحالة يصبح سطح التبادل الحراري هو سطح الأنبوب مضافاً له الريش، تمت التجربة خلال 6 ساعات عمل.

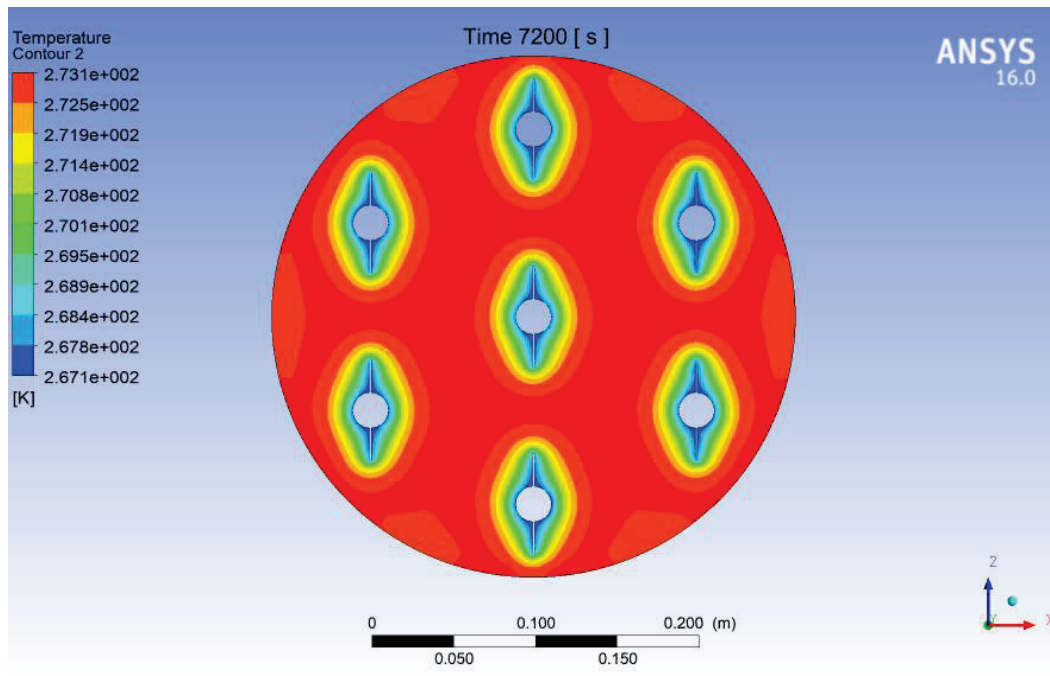
0.031006	m ³	حجم (PCM) الماء ضمن الخزان
0.416919	m ²	مساحة سطح التبادل الحراري

يوضح الشكل (4-18) نموذج الخزان المستخدم.

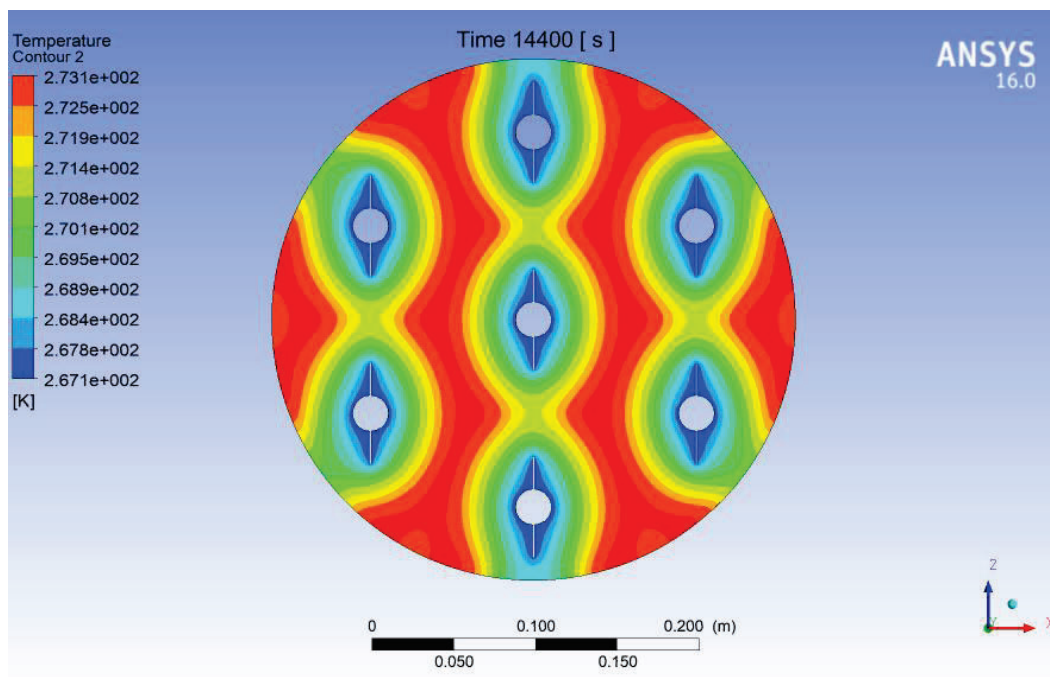


الشكل (4-18) نموذج الخزان الحراري.

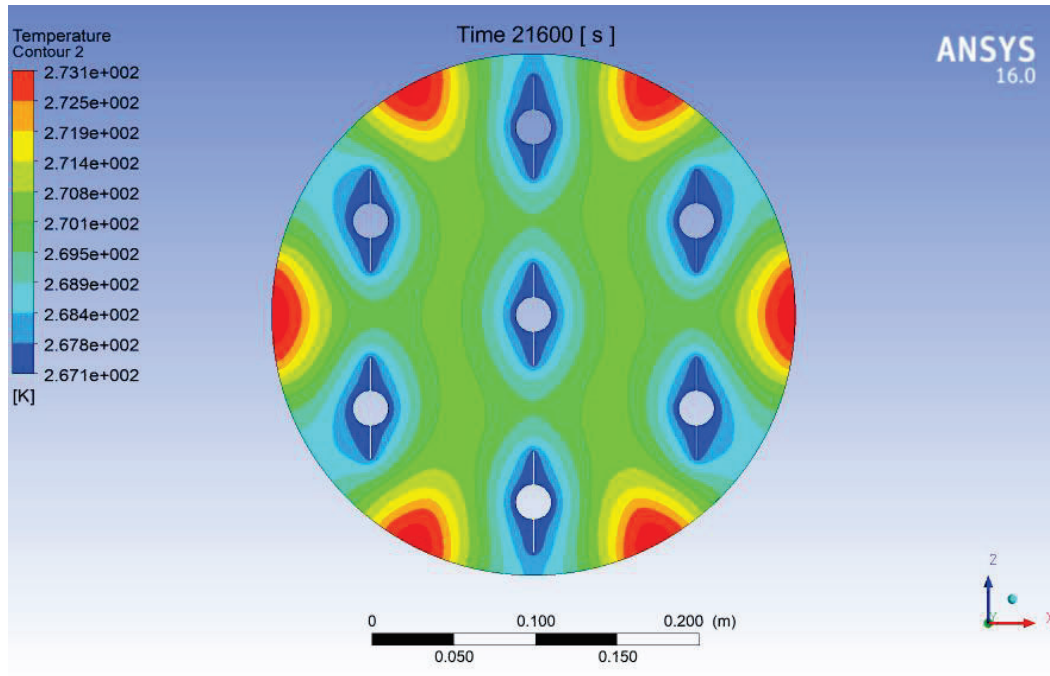
وفيما يلي نتائج عملية المحاكاة كل ساعتين تبين توزيع درجات الحرارة ضمن الخزان مع الزمن.



2[h]



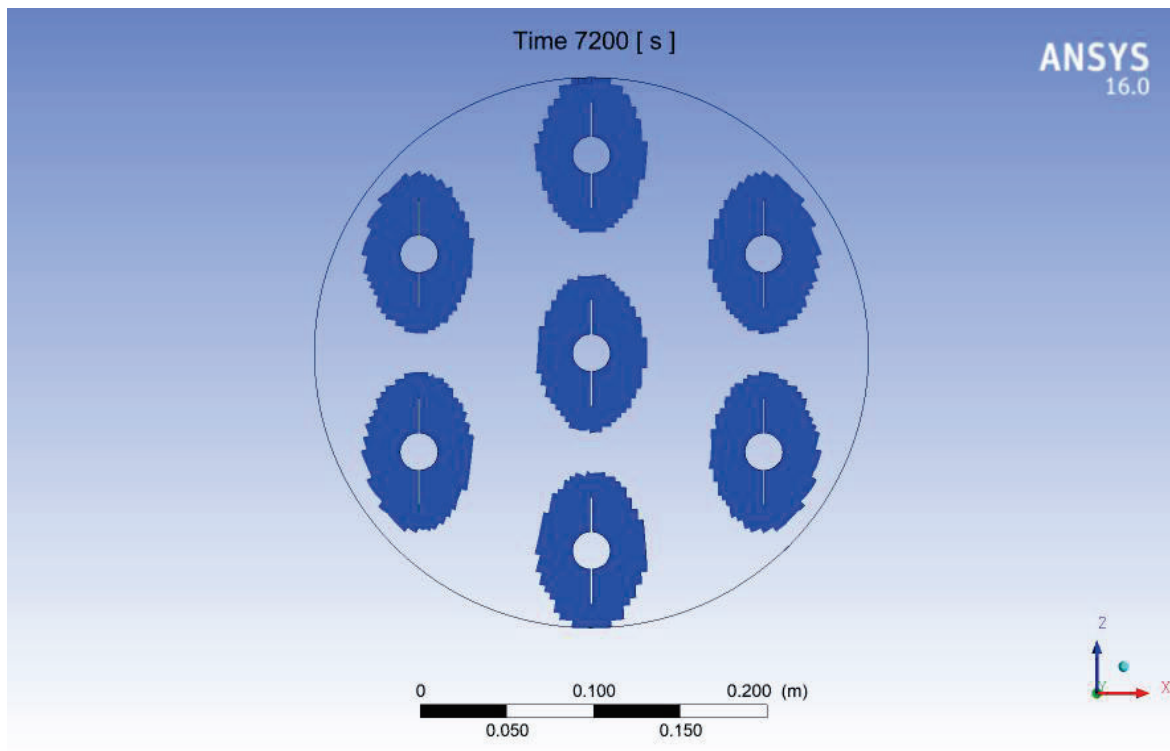
4[h]



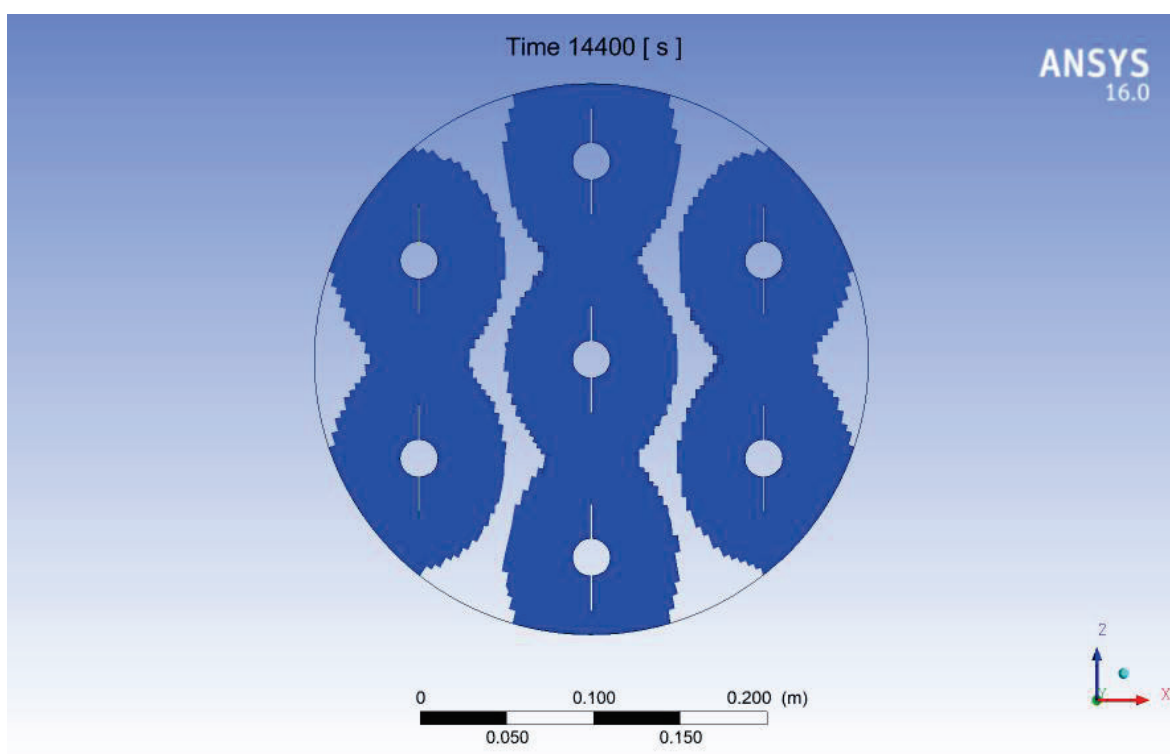
6[h]

الشكل (4-19) توزيع درجات الحرارة ضمن الخزان خلال 6 ساعات عمل.

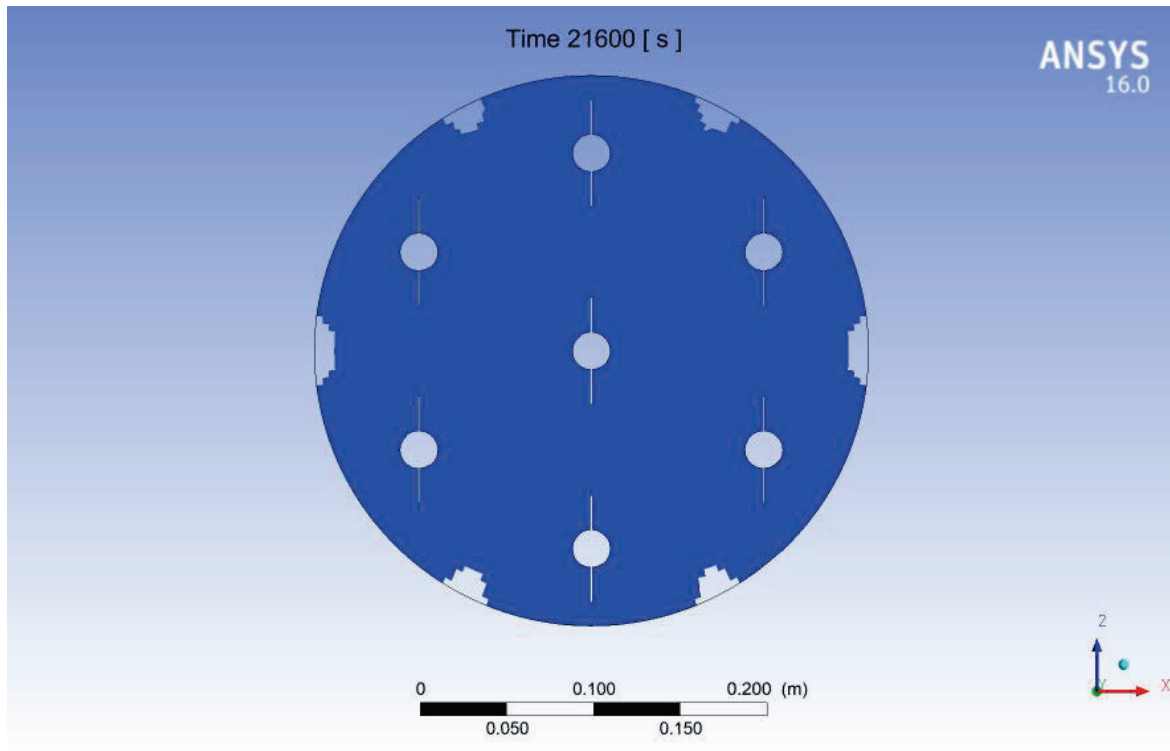
ويوضح الشكل (4-20) نتائج عملية المحاكاة كل ساعتين تبين كمية الجليد المتشكل ضمن الخزان حول الأنابيب والریش مع الزمن.



2[h]



4[h]



6[h]

الشكل (4-20) شكل موجة الجليد المتشكل ضمن الخزان خلال 6 ساعات عمل.

نلاحظ أن كمية الجليد المتشكلة حول الأنبوب المريش مع الزمن ضمن الخزان الذي يحتوي 7 أنابيب مريشة تكون أكبر من الخزان وفق النموذج (B) الذي يحتوي على أنبوب مريش واحد وذلك بسبب تداخل الريش ضمن PCM.

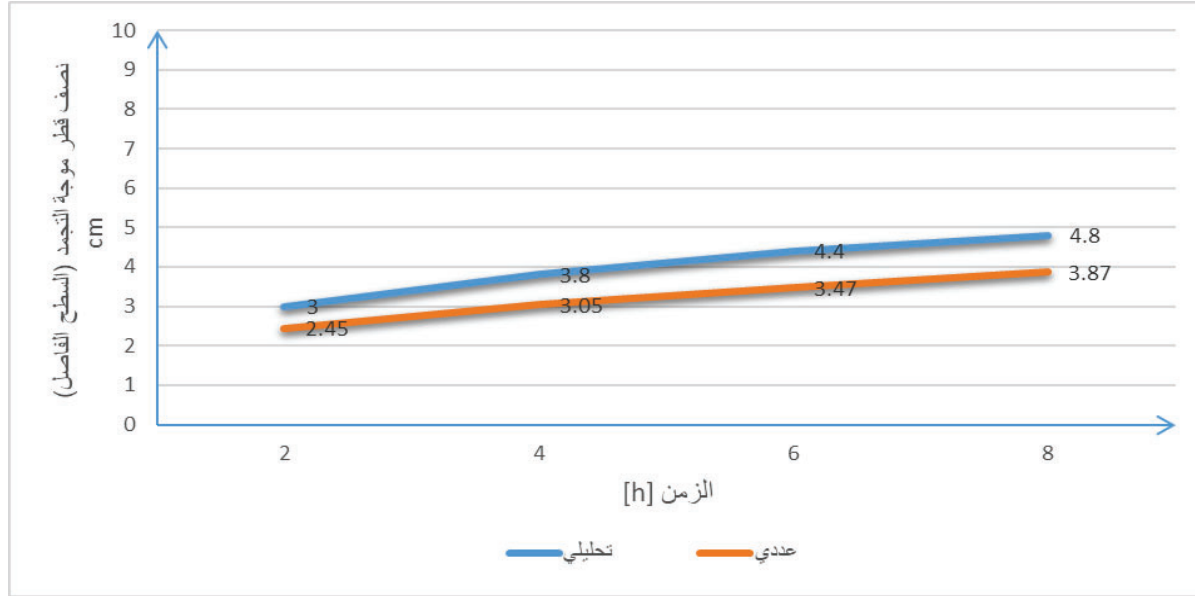
فيما يلي القيم التي حصلنا عليها لحجم الجليد المتشكل ضمن الخزان مع الزمن.

الجدول (4-10) العلاقة بين حجم الجليد المتشكل ضمن الخزان مع الزمن.

t	[h]	2	4	6
حجم الجليد	m^3	0.0110105	0.024338	0.0301815

نلاحظ أنه وبعد 6 ساعات عمل تجمد 97% من حجم الـ (PCM) ضمن الخزان.

3.4. مقارنة النتائج:



الشكل (4-21) مقارنة بين الدراسة التحليلي والحل العددي للنموذج (A).

نلاحظ أنه وبعد 8 ساعات عمل وبالمقارنة بين النتائج التحليلية والنتائج العددية للنموذج (A) فإن القيم التي حصلنا عليها لنصف قطر موجة التجمد -السطح الفاصل بين الطور الصلب والطور السائل- ضمن المادة المتغيرة الطور (PCM) متوافقة بشكل جيد. بالتالي يمكننا التأكد من أن الدراسة العددية تتوافق مع الدراسة التحليلية علماً أن الحل العددي أدق من الحل التحليلي ولكنه بحاجة إلى زمن أطول بالحل وإمكانات أكبر وذلك لكون الحل التحليلي لا يأخذ بالاعتبار كافة البارامترات المؤثرة على أداء الخزان.

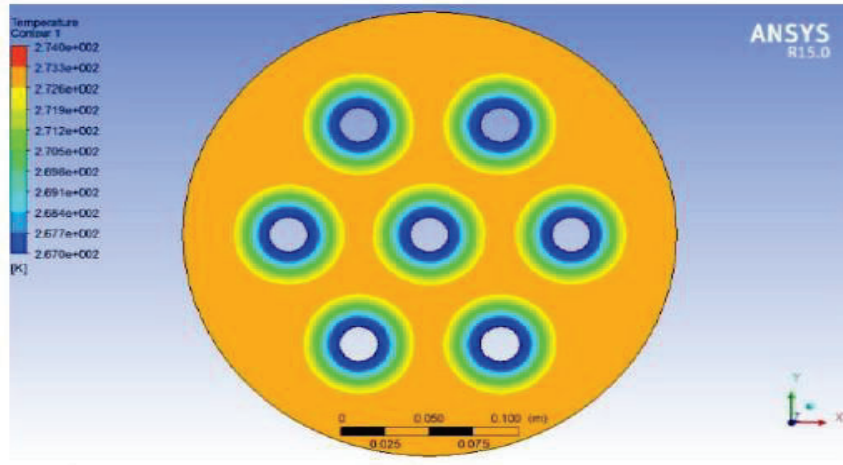
- تمت مقارنة النتائج التي تم الحصول عليها من خلال عملية المحاكاة الحاسوبية ضمن البحث للخزان الأسطواناني الذي يحتوي على 7 أنابيب مريشة مع الدراسة المرجعية الثالثة [3] عند نفس مواصفات الخزان ولكن المبادل الحراري ضمن الخزان عبارة عن مبادل نحاسي حلزوني الشكل حيث نصف القطر الخارجي لأنبوب المبادل (2.2 cm)، عند نفس شروط العمل لكن درجة حرارة سطح المبادل الحلزوني (268K)، ودرجة حرارة الماء الابتدائية (288.15K). وكانت سماكة الجليد المتشكلة بعد 6 ساعات عمل عددياً هي (2.2cm).

لحساب حجم الجليد المتشكل ضمن الخزان بعد نهاية التجربة في الدراسة المرجعية [3]:

$$\begin{aligned} V_{ice} &= V - V_{copp} \\ &= (\pi * 0.033^2 * 2.496) - (\pi * 0.011^2 * 2.496) \\ &= 0.0075905 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

بمقارنة نتائج الدراسة المرجعية [3] مع هذا البحث، في حالة استخدام المبادل الحراري الحلزوني كان حجم الجليد المتشكل ضمن الخزان وبعد 6 ساعات عمل (0.0075905 m^3) وكانت نسبة الجليد المتشكل عند نهاية التجربة 24.3% من حجم المادة المتغيرة الطور (PCM)، علماً أن مساحة سطح التبادل الحراري ضمن الخزان (0.17251 m^2). ونظراً لكون فرق درجة حرارة سطح التبريد درجة واحدة فقط عن درجة الحرارة التي درست في هذا البحث، ودرجة حرارة (PCM) الماء الابتدائية أقل بـ 12°C يمكن القول بأن استخدام الأنابيب المريشة ضمن الخزان أدى لزيادة نسبة الـ PCM التي تحولت للطور الصلب عن استخدام المبادل الحلزوني.

- كما تمت مقارنة النتائج التي تم الحصول عليها من خلال عملية المحاكاة الحاسوبية ضمن البحث للخزان الأسطواناني الذي يحتوي على 7 أنابيب مريشة مع الدراسة المرجعية الرابعة [4] عند نفس مواصفات الخزان ولكن الأنابيب الموجودة ضمن الخزان عبارة عن أنابيب تقليدية دون إضافات، عند نفس شروط العمل ودرجة حرارة سائل نقل الحرارة (267.15K)، يوضح الشكل (4-22) توزيع درجات الحرارة ضمن الخزان المستخدم في الدراسة المرجعية الرابعة [4] بعد 8 ساعات عمل.



بعد 8 ساعة

الشكل (4-22) توزيع درجات الحرارة ضمن الخزان بعد 8 ساعات عمل. [4]

الجدول (4-11) العلاقة بين سماكة الطور الصلب المتشكل مع الزمن. [4]

سماكة الطور الصلب [cm]					
T_{∞}		$t [h]$			
[k]	[C]	2	4	6	8
267.15	-6	0.8	1.4	1.8	2.2

لحساب مساحة سطح التبادل الحراري ضمن الخزان في الدراسة المرجعية [4]:

$$A = 7 * 2 * \pi * r_{out} * H$$

$$= 0.19352 \text{ m}^2$$

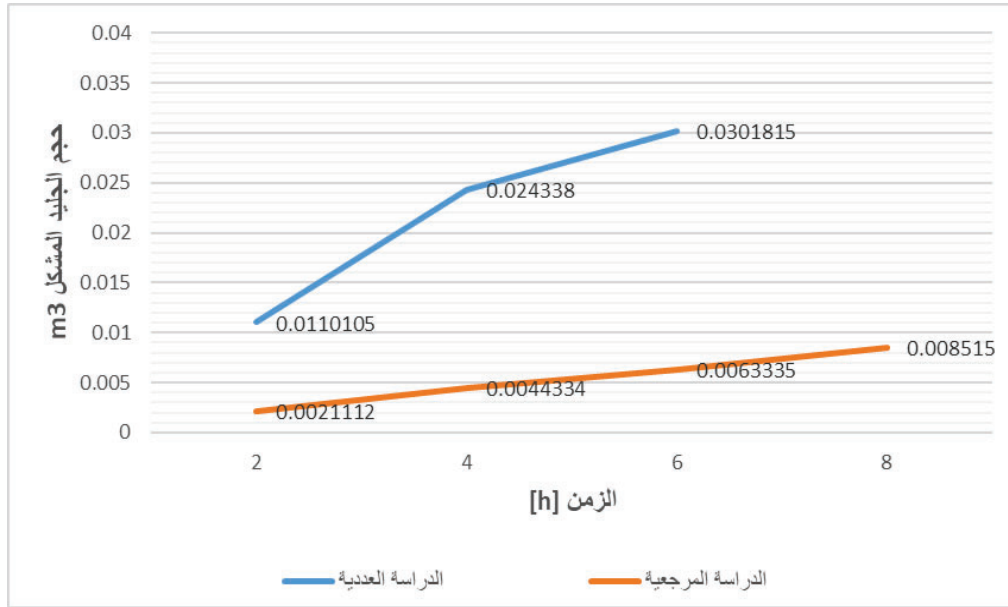
لحساب حجم الجليد المتشكل ضمن الخزان بعد نهاية التجربة 8 ساعات عمل في الدراسة المرجعية [4]:

$$V_{ice} = 7 * \pi * (r^2 - r_{OUT}^2) * H$$

$$= 0.008515 \text{ m}^3$$

الجدول (4-12) حجم الجليد المتشكل ضمن الخزان مع الزمن.

t	$[h]$	2	4	6	8
حجم الجليد	m^3	0.0021112	0.0044334	0.0063335	0.008515



الشكل (4-23) مقارنة بين الدراسة العددية والدراسة المرجعية.

بمقارنة النتائج التي تم التوصل لها من خلال هذا البحث مع نتائج الدراسة المرجعية [4] وبعد 6 ساعات عمل نستنتج أن إضافة ريش للأنايبب الموجودة ضمن الخزان الحراري يسرع من عملية تشكل الجليد بالمقارنة مع الأنبوب التقليدي (بدون ريش)، حيث في حالة الأنايبب قبل إضافة ريش كان حجم الجليد المتشكل ضمن الخزان ($0.0063335 m^3$) وكانت نسبة الجليد المتشكل عند نهاية التجربة 20.2% من حجم المادة المتغيرة الطور (PCM)، علماً أن مساحة سطح التبادل الحراري ضمن الخزان ($0.19352 m^2$). أما في حالة استخدام الأنبوب بعد إضافة الريش فكان حجم الجليد المتشكل ضمن الخزان ($0.0301818 m^3$) وكانت نسبة الجليد المتشكل عند نهاية التجربة 97% من حجم المادة المتغيرة الطور (PCM)، علماً أن مساحة سطح التبادل الحراري ضمن الخزان ($0.416919 m^2$).

الفصل الخامس

النتائج والتوصيات

الفصل الخامس

النتائج والتوصيات

1.5. النتائج:

1. فعالية استخدام الريش ضمن خزان الجليد الحراري وذلك لأن إضافة الريش على سطح الأنبوب (سطح التبادل الحراري) أدى لتعزيز انتقال الحرارة ضمن الـ PCM ووصول موجة التجمد لنقاط أبعد عن سطح التبريد وبزمن أقل.
2. اتضح أنه في حال إضافة ريشتين للأنبوب كانت زيادة حجم الجليد المتشكل ضمن الخزان هي 63% عن الأنبوب بدون إضافات، وفي حال إضافة 4 ريش للأنبوب كانت الزيادة بمقدار 129% عن الأنبوب بدون إضافات.
3. اتضح أنه في حالة (الأنبوب بدون إضافات، عند إضافة ريشتين للأنبوب، عند إضافة أربع ريش) كانت نسبة الجليد المتشكل ضمن الخزان من حجم PCM (الماء) عند بداية التجربة هي (25%, 40%, 56%) على الترتيب.
4. بمقارنة النتائج العددية التي تم الحصول عليها من خلال عملية المحاكاة الحاسوبية ضمن البحث مع نتائج الدراسة المرجعية [3] حيث استخدم الباحثون مبادل حراري حلزوني ضمن الخزان. كان حجم الجليد المتشكل ضمن الخزان وبعد 6 ساعات عمل (0.0075905 m^3) وكانت نسبة الجليد المتشكل عند نهاية التجربة 24.3% من حجم المادة المتغيرة الطور (PCM). ونظراً لكون فارق درجة حرارة سطح التبريد درجة واحدة فقط عند درجة الحرارة التي درست في هذا البحث، ودرجة حرارة (PCM) الماء الابتدائية أقل بـ 12°C يمكن القول بأن استخدام الأنابيب المريشة ضمن الخزان أدى لزيادة نسبة الـ PCM المتجمدة عن استخدام المبادل الحلزوني.

5. بمقارنة النتائج العددية التي تم الحصول عليها عند استخدام الأنابيب المريشة في الدراسة الحالية والأنبوب قبل إضافة ريش في الدراسة المرجعية [4] عند نفس شروط العمل ودرجة حرارة سائل نقل الحرارة (267.15k)، فقد تبين أنه بعد إضافة ريش للأنابيب ضمن الخزان وبعد 6 ساعات عمل كانت نسبة الجليد المتشكل عند نهاية التجربة 97% من حجم المادة المتغيرة الطور (PCM) أي حصلنا تقريباً على تجمد كامل (PCM) بينما في الدراسة المرجعية وبعد 8 ساعات عمل كانت نسبة الجليد المتشكل عند نهاية التجربة 27.4% من حجم المادة المتغيرة الطور (PCM).
6. كمية الجليد المتشكلة حول الأنبوب المريش مع الزمن ضمن الخزان الذي يحتوي 7 أنابيب مريشة تكون أكبر من كمية الجليد ضمن الخزان وفق النموذج (B) والذي يحتوي على أنبوب مريش واحد وذلك بسبب تداخل الريش ضمن PCM.

2.5. التوصيات:

1. الإجراء التجريبي والتأكد من دقة النتائج التي تم الوصول إليها في هذا البحث.
2. دراسة عملية تفريغ الخزان لمعرفة تأثير إضافة الريش على عملية التخزين.

المراجع

- [1] د.بدران، بسام، د.محمود، عيسى. (2017-2018). **تخزين الطاقة الحرارية 2 (أسس التخزين الحراري الكامن)**، جامعة دمشق، دمشق.
- [2] د.أبو الخير، محمد هاشم، د.دياب، ياسر. (2014-2015). **تخزين الطاقة الكهربائية**، جامعة دمشق، دمشق.
- [3] د.ناعمة، وجيه، عامر، م.وائل. (2021). **تحليل ظاهرة انتشار موجة التجمد في المواد المتغيرة الطور حول سطح مبادل حراري حلزوني عددياً وتجريباً**. رسالة مقدمة لنيل درجة الماجستير في هندسة التبريد في جامعة دمشق، دمشق.
- [4] د.بدران، بسام، عواد، م.علاء. (2017). **تحليل ظاهرة انتشار موجة التجمد في المواد المتغيرة الطور حول سطح أسطواني عددياً وتجريباً**. رسالة مقدمة لنيل درجة الماجستير في هندسة التبريد في جامعة دمشق، دمشق.
- [5] د.عبد الله، حسن، د.أنطوان، نزار، علي، محمد. (2007). **دراسة عددية وتجريبية لخزان الثلج في منظومات التكييف**. مجلة الهندسة والتكنولوجيا (المجلد ٢٥، ص 61-75). العراق.
- [6] Dincer, I. & Rosen, M. A., (2011), **THERMAL ENERGY STORAGE SYSTEM AND APPLICATIONS, SECOND EDITION**, Willy.
- [7] Ereke, A., & Ezan, M.A.,(2007). **Experimental and numerical study on charging processes of an ice-on-coil thermal energy storage system**. In International Journal of Energy Research (Vol.31, pp. 158–176). Turkey: Wiley.
- [8] Evapco, Inc., (2007), **Thermal Ice Storage Application & Design Guide**, USA: EVAPCO Company.
- [9] Ezan, M. A. & Ereke, A. (2012). **Solidification and Melting Periods of an Ice-on-Coil Latent Heat Thermal Energy Storage System**. In Journal of heat Transfer (Vol.134,062301, pp.1-10). Turkey: ASME.
- [10] Ezan, M. A., Ozdogan, M., & Ereke, A., (2011). **Experimental Study on Charging and Discharging Periods of Water in a Latent Heat Storage Unit**. In International Journal of Thermal Sciences (Vol.50, pp. 2205–2219). Turkey: ScienceDirect.
- [11] He, A., Qian, H., Hu, Z., & Zhou, F., (2001). **Study of Heat transfer in Ice-storage Tank**. In Journal of Thermal Sciences (Vol.10, No.4, pp. 357–362). China.

- [12] Jannesari, N. & Abdollahi, N. (2017). **Experimental and numerical study of thin ring and annular fin effects on improving the ice formation in ice-on-coil thermal storage systems.**In Applied Energy(Vol.189, pp.369–384).Iran:ScienceDirect.
- [13] Wang, W. W., Wang, L.B., & He, Y. L.,(2016). **Parameter effect of a phase change thermal energy storage unit with one shell and one finned tube on its energy efficiency ratio and heat storage rate.** In Applied Thermal Engineering (Vol.93, pp. 50–60).China: ScienceDirect.
- [14] Eslamnezhad, H., & Rahimi, A. B.,(2016). **Enhance heat transfer for phase change materials in triplex tube heat exchanger with selected arrangement of fins.** In Applied Thermal Engineering.

Abstract

1. Research background:

Ice storage systems are used in cooling applications to reduce electrical consumption by buildings. These systems have proven their efficiency, as the high electrical loads of air conditioning systems are displaced from peak hours periods when electricity costs are high to off-peak hours periods when electrical power is more abundant and less expensive. Using either a full or partial storage method.

2. Research objective:

Enhance the performance of thermal ice storage tank by adding surfaces to the pipes of the heat exchanger.

3. Materials and methods:

A numerical study was conducted in which a phase thermal ice tank was designed. Then the results were collected and compared among themselves in addition to comparing the results with the previous studies' results.

4. Practical results:

The results of computer simulations indicate that at the heat transfer fluid temperature (267.15K), after (6 hours) working. The percentage of ice formed at the end of the experiment was (97%) of the phase change material volume in the tank. Which means we obtained approximately a complete freezing.

5. Keywords:

Ice storage systems, Latent heat storage, Phase change materials, CFD modelling and simulation.



موافقة نشر
research approval

Damascus 27/05/2024

No. 13636

Dear

Eng. Alaa Jalal Al Din
Prof. Wajih Naimeh

We are pleased to inform you that your
research entitled:

«The Effect of Additional
Surfaces on Thermal
Ice Storage Tank Performance»

Sent to us on 13/05/2024

has been accepted by
Damascus University Journal for The
Engineering Sciences

On 27/05/2024

Best regards

Editor in chief Journal
for The Engineering Sciences

Prof. Mohammad Hajem Ismail Alwadi

Director of journal

Prof. Ahed Elias Abou younes

ISSN 1999-7302

دمشق 2024/05/27

رقم البحث: 13636

السادة

م. آلاء جلال الدين

أ. د. وجيه ناعمة

يسرنا إعلامكم أن بحثكم المعنون:

«تأثير السطوح الإضافية على الأداء

الحراري لخزان جليد حراري»

المرسل إلينا بتاريخ 2024/05/13

قد قبل للنشر في

مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية

بتاريخ 2024/05/27

مع فائق الاحترام

رئيس التحرير مجلة العلوم الهندسية

أ. د. محمد هاجم اسماعيل الوادي

مدير المجلات

أ. د. عهد إلياس أبو يونس

ISSN 2789-6854 (online)

Syrian Arab Republic

Damascus University

Faculty of Mechanical & Electrical Engineering

Mechanical Engineering Department

Refrigeration Engineering



" The Effect of Additional Surfaces on Thermal Ice Storage Tank Performance "

A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Refrigeration Engineering

By

Eng. Alaa Naser Jalal Al Din

Supervisor

Prof. Wajih MHD Kair Naimeh

Professor in Faculty of Mechanical & Electrical Engineering