



جامعة دمشق
كلية الهندسة الميكانيكية و الكهربائية
قسم هندسة الميكانيك العام
شعبة الطاقات المتجددة

قياس ظاهرة إنتشار موجة التجمد في المواد المتغيرة الطور بحسب معادلة ستيفان تجريبياً

دراسة أعدت لنيل درجة الماجستير في الهندسة الميكانيكية

إعداد

م. فراس محمد بديع إيلوش

إشراف

د.م. بسام بدران

للعام 2014

كلمة الشكر والإهداء

بدايةً الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات

الحمد لله الذي وفقني لإتمام هذا العمل

ومن ثم.....

أهدي هذا العمل

إلى من كانا سر سعادتي، ونبض قلبي، وعينيَّ اللتين أبصر بهما، والجناحين اللذين أطير بهما.
"أبي وأمي"

إلى من شاركني أفراحي وهمومي، إلى أخي الوحيد، وصديقي الأول.
"عبد الله"

إلى من قضيت معهم أجمل الأوقات، ومعهم أدركت معنى التعاون.
"أصدقائي"

كلمة شكر

تسع سنين مرت في مخابرها و قاعاتها...

بين كتبها و محاضراتها و طلابها

و اساتذتها الأكارم الذين ما بذلوا بعلم ... ولا بجهد...

إلى كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية بدمشق وطاقمها العلمي الكريم

شكر خاص

إلى المُشرف على هذا العمل، إلى من كان خير موجهٍ وناصحٍ وأستاذ

إلى الدكتور المهندس: بسام بدران

أهدي هذا المشروع عربون شكرٍ وتقدير

لعلمك وإخلاصك وجهدك.....



د.م. بسام بدران

م. فراس ايلوش

شكر خاص

إلى مجموعة الحافظ للتبريد بإدارة

المهندس أمين الحافظ

على كل ما بذلوه من جهد وتفاني لإنجاح هذا العمل مع تمنياتي لهم بدوام التقدم والازدهار، وأن يبقوا على الدوام همزة الوصل بين القطاع الصناعي والقطاع الأكاديمي. والشكر موصول لكافة الكوادر العاملة في هذا الصرح التكنولوجي، وأخص بالشكر منهم:

م. مهند سويد.

م. عبد الرحمن دلول.

السيد ماهر أحمد قاسم.

السيد ياسين خوجة.

السيد أحمد عبد الله.

شكر خاص

إلى اللذين شاركتاني وسانداني بكل جهدهم لإنجاح هذا العمل إلى الصديقين الغاليين والمهندسين اللامعين

م. يوسف النجدي

م. وسام حيدر

أعضاء لجنة الحكم والقرار الناظم بذلك

بناءً على القرار رقم /1485/ الذي اتخذته مجلس البحث العلمي والدراسات العليا في جلسته رقم /10/ التي انعقدت بتاريخ 2014/2/24 في شأن تأليف لجنة الحكم على رسالة الماجستير للطالب فراس ايلوش.

قرر مجلس البحث العلمي والدراسات العليا مايلي:

الموافقة على تأليف لجنة الحكم على رسالة الماجستير في قسم هندسة الميكانيك العام التي أعدها الطالب فراس ايلوش بعنوان: ((قياس ظاهرة انتشار موجة التجمد في المواد المتغيرة الطور بحسب معادلة ستيفان تجريبياً)) بكلية الهندسة الميكانيكة والكهربائية من السادة الأساتذة:

د. محمد سعيد الجراح	الأساتذ في قسم هندسة الميكانيك العام	كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية
جامعة دمشق	الاختصاص: هندسة التبريد والتكييف	عضواً
د. عاطف عامر	المدرس في قسم هندسة الميكانيك العام	كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية
جامعة دمشق	الاختصاص: الآلات وأجهزة وأنظمة تكييف الهواء	عضواً
د. بسام بدران	المدرس في قسم هندسة الميكانيك العام	كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية
جامعة دمشق	الاختصاص: العلوم الحرارية	عضواً مشرفاً

فهرس المحتويات

الفصل الأول: تمهيد للمشروع

2	1-1	مقدمة
3	2-1	لمحة تاريخية عن مسألة ستيفان (مسألة الشروط الحدية المتحركة)
3	1-2-1	تاريخ مسألة الشروط الحدية المتحركة ما قبل ستيفان
4	2-2-1	نبذة عن حياة جوزيف ستيفان
5	3-2-1	تاريخ مسألة الشروط الحدية المتحركة مع ستيفان
7	3-1	توصيف المسألة التي سَتُعالجها الأطروحة
8	1-3-1	شروط ستيفان (Stefan Condition) للتحويل الطوري سائل/ صلب
9	2-3-1	الإسقاط العملي لشروط ستيفان
10	3-3-1	عبارات موجزة في توصيف المسألة التي سَتُعالجها الأطروحة
11	4-1	أهداف المشروع
11	5-1	أهمية المشروع وتطبيقاته
11	1-5-1	التطبيقات بعيداً عن مجال الطاقات المتجددة
12	2-5-1	التطبيقات ضمن مجال الطاقات المتجددة
15	6-1	الأبحاث المنشورة حول التحولات الطورية ومسألة ستيفان

الفصل الثاني: المواد المتغيرة الطور

25	1-2	مقدمة عن المواد المتغيرة الطور
26	2-2	خواص المواد المتغيرة الطور
27	1-3-2	الخصائص الحرارية
27	2-3-2	الخصائص الفيزيائية
28	3-3-2	الخصائص الحركية (Kinetic Properties)
28	4-3-2	الخصائص الكيميائية
28	5-3-2	الخصائص الاقتصادية
28	3-2	تصنيفات المواد المتغيرة الطور
30	1-3-2	المواد المتغيرة الطور ذات الأساس العضوي
35	2-3-2	المواد المتغيرة الطور ذات الأساس الغير العضوي
40	3-3-2	المواد المتغيرة الطور السهلة الانصهار (Eutectics)
42	4-2	كيفية اختيار المواد المتغيرة الطور المناسبة لتطبيقات التخزين الحراري والتطبيقات الشمسية
44	5-2	بعض الأمثلة عن استخدام المواد المتغيرة الطور في تطبيقات التخزين الحراري والتطبيقات الشمسية

الفصل الثالث: الحل التحليلي

46	1-3	مقدمة نظرية
50	2-3	تجمد وانصهار المواد النقية
54	3-3	الدراسة التحليلية لتجمد الماء النقي وفق شروط ستيفان
57	4-3	دراسة تأثير درجة حرارة سطح التبريد
58	5-3	دراسة تأثير درجة حرارة الماء الابتدائية

60	6-3	الطريقة البيانية (طريقة جديدة) لمعرفة الزمن اللازم للتجمد
		الفصل الرابع: المُحاكاة الحاسوبية

63	1-4	نبذة عن برنامج ANSYS
64	1-1-4	مرحلة الـ Geometry
64	2-1-4	مرحلة الـ Mesh
64	3-1-4	مرحلة الـ Setup & Solution
65	4-1-4	مرحلة الـ Results
65	2-4	تحديد النسبة بين أبعاد الخزان
69	3-4	تحديد درجة حرارة سطح التبريد
73	4-4	تحديد المنحني الذي يربط موقع السطح الفاصل مع الزمن

الفصل الخامس: الإجراء التجريبي

78	1-5	الهدف من الإجراء التجريبي
78	2-5	الأجزاء التفصيلية لجهاز التجربة
78	1-2-5	جسم الخزان الرئيسي
82	2-2-5	دائرة التبريد
83	3-2-5	دائرة الحساسات
88	3-5	نتائج الإجراء التجريبي
91	1-3-5	من أجل درجة حرارة سطح تبريد $^{\circ}\text{C}-8$
104	2-3-5	من أجل درجة حرارة سطح تبريد $^{\circ}\text{C}-12$
108	3-3-5	من أجل درجة حرارة سطح تبريد $^{\circ}\text{C}-18$
111	4-3-5	أبرز النتائج التي حصلنا عليها من الإجراء

التجريبي

الفصل السادس: نتائج المشروع

114	1-6	مقارنة النتائج باستخدام طرق الحل الثلاث
-----	-----	---

117	2-6	الربط بين النتائج النظرية والنتائج العملية واستنتاج مُعامل التصحيح التجريبي
119	3-6	خُلاصة المشروع وأهم إسقاطاته

الملاحق

الكود (Code) المُستخدم ضمن برنامج EES 2012	الملحق الأول:
الكود (Code) المُستخدم ضمن برنامج MathCad 14	الملحق الثاني:
المُخططات الهندسية المُستخدمة لتصنيع الجهاز التجريبي	الملحق الثالث:
المواصفات الثيرموفيزيائية (الفيزياحرارية) لمادة الـ Plexi	الملحق الرابع:
المواصفات الثيرموفيزيائية (الفيزياحرارية) للماء النقي	الملحق الخامس:
مواصفات الثيرموكبل (Thermocouple) نوع K	الملحق السادس:
الكود (Code) المُستخدم ضمن برنامج ANSYS 13	الملحق السابع:

فهرس الأشكال

7	مُقارنة بين النتائج النظرية والعملية لسماكة الجليد المُتشكل في خليج بوثيا	الشكل (1-1)
8	مُخطط توضيحي لشروط ستيفان	الشكل (1-2)
9	رسم توضيحي للنموذج التجريبي	الشكل (1-3)
13	مُخطط صندوقي للخوارزمية المُتبعة أثناء تصميم خزان حراري طوري	الشكل (1-4)
14	استخدام المواد المتغيرة الطور PCMs مع سخانات المياه الشمسي	الشكل (1-5)
25	استخدام المواد المتغيرة الطور PCMs مع أنظمة التدفئة الأرضية	الشكل (1-6)
20	النتائج التي تم الحصول عليها وفق البحث 1-6-2	الشكل (1-7)
21	الربط بين النتائج التي تم الحصول عليها وفق البحث 1-6-2	الشكل (1-8)
23	التجهيزات المُستخدمة في البحث 1-6-3	الشكل (1-9)
24	المُنحنيات المُسجلة من حساسات الحرارة أثناء الإجراء التجريبي ومقارنتها مع باقي الطرق ضمن البحث 1-6-3	الشكل (1-10)
29	تصنيف المواد المتغيرة الطور PCMs	الشكل (2-1)
41	العلاقة بين درجة انصهار مزيج مكون من مادتي الـ Hexadecane والـ Tetradecane مع نسبة مادة الـ Tetradecane ضمنه	الشكل (2-2)
48	منحني الأطوار صلب/ سائل لمزيج ثنائي	الشكل (3-1)
51	التجميد بالتوصيل لجسم سائل نصف لانهائي الطول	الشكل (3-2)

- الشكل (3-3) منحني تغير الزمن اللازم لتشكيل الجليد مع سماكة الجليد المتشكل 56
- الشكل (3-4) المنحني الناتج عن الحل التحليلي والذي يُمثل تغير سماكة الجليد مع الزمن خلال 24 ساعة 57
- الشكل (3-5) منحني تغير سماكة الجليد المتشكل مع درجة حرارة سطح التبريد 58
- الشكل (3-6) منحني تغير سماكة الجليد المتشكل مع درجة الحرارة الابتدائية للماء السائل 59
- الشكل (3-7) المنحني الذي يُمثل العلاقة $\lambda = f(Ste_s, T_i)$ 61
- الشكل (4-1) شكل موجة التجمد من أجل نسبة 2/5 بين أبعاد الخزان 66
- الشكل (4-2) شكل موجة التجمد من أجل نسبة 1/5 بين أبعاد الخزان 67
- الشكل (4-3) شكل موجة التجمد من أجل نسبة 1/10 بين أبعاد الخزان 68
- الشكل (4-4) شكل موجة التجمد من أجل درجة حرارة 270 k لسطح التبريد 69
- الشكل (4-5) شكل موجة التجمد من أجل درجة حرارة 265 k لسطح التبريد 70
- الشكل (4-6) شكل موجة التجمد من أجل درجة حرارة 260 k لسطح التبريد 70
- الشكل (4-7) شكل موجة التجمد من أجل درجة حرارة 255 k لسطح التبريد 71
- الشكل (4-8) شكل موجة التجمد من أجل درجة حرارة 250 k لسطح التبريد 71
- الشكل (4-9) شكل موجة التجمد من أجل درجة حرارة 230 k لسطح التبريد 72
- الشكل (4-10) شكل موجة التجمد من أجل درجة حرارة 200 k للسطح 72

76	الشكل (4-11)	أبعد نقطة يصل إليها السطح الفاصل عند كل ساعة من الساعات الـ 24
76	الشكل (4-12)	منحني تغيير موقع السطح الفاصل مع الزمن خلال 24 باستخدام المحاكاة الحاسوبية
79	الشكل (5-1)	الأقسام الرئيسة لجهاز التجربة
81	الشكل (5-2)	جهاز التجربة بعد التصنيع
88	الشكل (5-3)	أماكن توزيع حساسات الحرارة عند القيام بالتجارب
91	الشكل (أ-4-5)	قراءة حساسات الحرارة من أجل درجة حرارة سطح تبريد -8°C
102	الشكل (ط-4-5)	الجليد المتشكل بعد الوصول لحالة الاستقرار من أجل درجة حرارة سطح تبريد -8°C
104	الشكل (أ-5-5)	قراءة حساسات الحرارة من أجل درجة حرارة سطح تبريد -12°C
107	الشكل (ب-5-5)	الجليد المتشكل بعد الوصول لحالة الاستقرار من أجل درجة حرارة سطح تبريد -12°C
108	الشكل (أ-6-5)	قراءة حساسات الحرارة من أجل درجة حرارة سطح تبريد -18°C
110	الشكل (ب-5-5)	الجليد المتشكل بعد الوصول لحالة الاستقرار من أجل درجة حرارة سطح تبريد -18°C
114	الشكل (6-1)	العلاقة بين موقع السطح الفاصل (سماكة الجليد المتشكل) والزمن باستخدام طرق الحل الثلاث
116	الشكل (6-2)	صور حرارية توضح بعض أسباب الفرق بين الحالة العملية والحالة النظرية
118	الشكل (6-3)	العلاقة بين درجة حرارة سطح التبريد ومعامل التصحيح

فهرس الجداول

- الجدول (1-1) العدد الوسطي للأبحاث المنشورة سنوياً حول مسألة ستيفان 16
خلال عدة فترات زمنية
- الجدول (1-2) موقع السطح الفاصل لعدة لحظات زمنية وفق نتائج البحث 17
1-6-1
- الجدول (1-3) التدرج الحراري لكامل الوسط عند اللحظة $t=49.98794\text{ s}$ 18
وفق نتائج البحث 1-6-1
- الجدول (1-4) مواصفات البارفيين المُستخدم في البحث 1-6-3 22
- الجدول (2-1) الخواص الحرارية لبعض البارافينات التقنية 31
- الجدول (2-2) الخواص الحرارية للبارافينات تبعاً لعدد ذرات الكربون 31
فيها
- الجدول (2-3) الخواص الحرارية لبعض المواد العضوية الغير بارافينية 33
- الجدول (2-4) الخواص الحرارية لبعض المواد الحموض الدهنية (Fatty Acids) 35
- الجدول (2-5) الخواص الحرارية لبعض الأملاح المائية (Salt Hydrate) 38
- الجدول (2-6) الخواص الحرارية لبعض المواد المتغيرة الطور ذات 40
الأساس المعدني (Metallics)
- الجدول (2-7) الخواص الحرارية لبعض المزائج السهلة الانصهار 42
(eutectic) بعضها ذات أساس عضوي والأخرى ذات
أساس غير عضوي
- الجدول (3-1) المواصفات الثيرموفيزيائية للماء النقي 55

- الجدول (5-1) مقارنة بين التجارب الثلاث من أجل عدة درجات حرارة
لسطح التبريد 112
- الجدول (6-1) جدول المقارنة بين الزمن المطلوب لتشكل عدة سماكات
من الجليد باستخدام طريقتين للحل 117

مصطلحات البحث (Glossary)

المصطلح	معناه
α_l	انتشارية الطور السائل
α_s	انتشارية الطور الصلب
C_s	السعة الحرارية للطور الصلب
ε	مُعامل التصحيح التجريبي
erf	تابع الخطأ
erfc	مُكمل تابع الخطأ
h_{sl}	انتالبي التحول الطوري
k_s	الموصلية الحرارية للطور الصلب
λ	ثابت ناتج عن المُكاملة
ρ	الكثافة
Ste	عدد ستيفان اللابُعدي
Ste_s	عدد ستيفان اللابُعدي للطور الصلب
T_f	درجة حرارة التحول الطوري
T_i	درجة الحرارة الابتدائية للسائل
$T_l(x, t)$	درجة حرارة في الطور السائل تبعاً للبعد عن سطح التبريد والزمن
T_o	درجة حرارة سطح التبريد
$T_s(x, t)$	درجة حرارة في الطور الصلب تبعاً للبعد عن سطح التبريد والزمن
$X(t)$	بُعد موقع السطح الفاصل عن سطح التبريد (سماكة الطور الصلب المُتشكل)
t	الزمن

التعاريف الأساسية

1. **مسألة ستيفان:** تُعد ظاهرة (مسألة) ستيفان Stefan Problem في الرياضيات على أنها شروط حدية boundary value problem لحل معادلات جزئية تفاضلية (PDE). تظهر هذه المسألة في: ميكانيك الأجسام الصلبة Solid Mechanics، إنتقال الحرارة بالتوصيل Heat Conduction، إمتزاج العناصر Molecul Diffusion. إن ظاهرة ستيفان العامة تهدف إلى وصف توزيع الحرارة في وسيط متجانس يتم فيه تحول طوري مثل ماء (سائل) متحولاً إلى ثلج (صلب)، تسمى هذه الظاهرة أيضاً بظاهرة تحرك الشروط الحدية Moving Boundary Problem في المواد المتغيرة الطور لأن توضع السطح الفاصل بين الطورين يتغير مع الزمن.
2. **شروط ستيفان:** هي الشروط التي قام بوضعها عالم الفيزياء النمساوي جوزيف ستيفان عند دراسته لتشكل الجليد، وأصبحت هذه الشروط مُعتمدة عند دراسة الموديل الرياضي (مسألة ستيفان) لحالات التحول الطوري صلب/ سائل.
3. **الـ PCMs:** المواد المتغيرة الطور (Phase Change Materials) هي مواد تتصف بأنّها ذات قيمة عالية لإنتالبي الانصهار، وهي تنصهر وتتجمد عند درجة حرارة مُعينة إضافةً إلى قدرتها على تخزين وتحرير كمية كبيرة من الحرارة حيث تمتص الطاقة عند التحول من الطور الصلب إلى الطور السائل وتُحررها عند التحول بالاتجاه العكسي، لذلك تُصنف هذه المواد على أنّها وحدات لتخزين الحرارة الكامنة LHS (Latent Heat Storage).
4. **عدد ستيفان:** هو عدد لا بُعدي يُمثل النسبة بين الحرارة المحسوسة والحرارة الكامنة.
5. **الانتشار أحادي البعد:** نقول عن انتشار موجة التجمد بأنّه أحادي البعد عندما تكون سرعة التجمد باتجاه ما أبداً بكثير من الاتجاهيين الباقيين.
6. **مسألة ستيفان ثنائية الطور:** هي مسألة التحول الطوري المدروسة وفق شروط ستيفان والتي تكون فيها درجة حرارة الطور السائل عند بداية الزمن أكبر من درجة حرارة التحول الطوري.
7. **السطح الفاصل أثناء التحول الطوري:** هو السطح الذي يفصل بين الطورين الصلب والسائل أثناء نمو (تشكل) الطور الصلب ضمن الطور السائل، وهو ذو أبعاد فيزيائية صغيرة يحتاج قياسها إلى تقانات عالية لذلك يصعب التعامل معه، ولكن يُمكن تتبعه من خلال مقاييس درجة الحرارة على اعتباره سطح إيزوتيرمي.

يشهد مجال تخزين الطاقة الحرارية اهتماماً عالمياً واسعاً لما له من فوائد على صعيد التخفيض من التكاليف الأساسية للمعدات من ناحية والمواءمة بين فترات ذروة الطلب وذروة الإنتاج من ناحية أخرى. يُعد التخزين الكامن للحرارة (Latent Heat Storage) LHS من أكثر أنواع التخزين الحراري كفاءةً، ويمثل العمل ضمنه مجالاً واعداً للبحث والتطوير، ولعل المحور الأساسي لتطوير التخزين الكامن للحرارة هو تحسين مواصفات المواد المتغيرة الطور PCMs (Phase Change Materials) حيث تُمثل هذه المواد العمود الفقري لأي خزان حراري طوري، ومن أجل تحسين مواصفات الـ PCMs وفهم آلية عملها كان لابداً من الدراسة المُعمقة للبارامترات النازمة لأداء هذه المواد أثناء التحول الطوري، وهنا تكمن أهمية هذا البحث والهدف الأساسي من القيام به، حيث سنقوم من خلاله بدراسة وتحديد الزمن اللازم لإنجاز التحول الطوري سائل/ صلب (التجمد) انطلاقاً من الموديل الرياضي الذي وضعه العالم جوزيف ستيفان، وبناءً عليه سنقوم بدراسة ظاهرة انتشار موجة التجمد للماء -باعتباره أحد المواد المتغيرة الطور PCMs- وحساب القيم باستخدام ثلاث طرق مختلفة:

الحل التحليلي (الرياضي) - المحاكاة الحاسوبية - الإجراء التجريبي
وبذلك نكون قد نقلنا مسألة ستيفان من الموديل الرياضي إلى الواقع التجريبي، حيث سنقوم في هذا البحث بتصنيع جهاز اختبار يُراعي شروط ستيفان ومن خلال هذا الجهاز سنأخذ قيمة عملية للزمن اللازم للتجمد وفق شروط ستيفان ونقارنها مع الحلول العددية والموديلات الرياضية النازمة لهذه المسألة.

وفي الختام تُمثل القيم التي سنلاحظها في هذا المشروع الخطوة الأولى نحو تصميم خزان حراري طوري، لأنّه عند الشروع بتصميم الخزان الحراري الطوري لابداً بدايةً من معرفة زمن شحن وتفريغ الخزان (زمن التحول الطوري)، قيمة هذا الزمن وآلية الحصول عليها تمثل ثمرة المشروع والخلاصة التي تم الحصول عليها.

م. فراس إيلوش

Project Summary

Thermal Heat storage (THS) systems have been given lots of attention in the recent years due to their benefits in reducing the initial cost and their abilities in storing large amounts of energy on the other hand. Latent Heat Storage (LHS) systems are one of the most potential concepts in storing energy using Phase Change Materials (PCMs). Improving the thermo-physical properties of these materials is the core heart of this technology. In order to do that, we need to understand and investigate the crucial parameters governing the phase change process for which this research is solely based.

In this research, we have studied the moving boundary conditions based on Stefan's condition mathematically and identified the time function of the moving front experimentally.

In order to define the time function, we have obtained the solution of Stefan's equation mathematically and defined the dimensions of the storage tank that we are going to use in the experiment by using the simulation software (ANSYS 13). We have fabricated the tank based on the simulation results, ran the experiment using pure water as a phase change material and compared the results with the results obtained from the mathematical modelling of Stefan's problem.

The data, we have gathered, were in good match and can be used in different projects as a corner stone in building latent heat storage system.

Eng. Feras Eloush

الفصل الأول:

تمهيد للمشروع

تمهيد للمشروع

Project Introduction

1-1 مقدمة:

مع تزايد النمو السكاني والتطور الصناعي والتكنولوجي الذي نشهده، ازداد الطلب على الطاقة وتوسع بوتيرة عالية الأمر الذي أوجب البحث عن حلول لردم الهوة بين تنامي الطلب على الطاقة من ناحية وإنتاجها وتأمينها على المدى البعيد من ناحية أخرى، ولأجل هذه الغاية طُرِحَ العديد من الحلول منها:

1. إيجاد منابع متجددة للطاقة.
 2. تخفيض الاستهلاك للحدود الدنيا.
 3. المواءمة بين منحنى الإنتاج ومنحنى الاستهلاك، وهنا تبرز أهمية تخزين الطاقة.
- وبما أنَّ الوقود الأحفوري شارب على النفاذ كما أن له مضار كثيرة على البيئة، أصبح البحث عن مصادر بديلة للطاقة أمر حتمي. يجب على هذه المصادر أن تكون رخيصة، نظيفة، ودائمة. تُعتبر الطاقة الشمسية واحدة من أهم هذه المصادر البديلة والتي تحقق الشروط السابقة، ولكن شدة الإشعاع الشمسي غير ثابتة فهي تتغير تبعاً لـ: الفصل - الطقس - الليل والنهار، وعليه ومن أجل تقويم هذا التذبذب في القيمة كان لا بد من استخدام أنظمة التخزين الحراري. حيث تعتمد فكرة خزانات الطاقة على الاستفادة من فترات ذروة إنتاج الطاقة فتخزنها وتتيح استخدامها في فترات ذروة الطلب، الأمر الذي يؤدي إلى ارتفاع نسبة الاستفادة من الطاقة المتوفرة إلى الحدود العليا، وتخفيض الهدر في الطاقة إلى حدوده الدنيا. بشكل عام يوجد ثلاث طرق مختلفة لتخزين الحرارة:

- 1- تخزين كيميائي.
- 2- تخزين محسوس.
- 3- تخزين كامن.

يمتاز التخزين الكيميائي للحرارة بالقدرة على تخزين أعلى كمية من الحرارة بين الطرق الثلاث، ولكن ما يُعيب هذه الطريقة هو الزمن الكبير اللازم لاسترجاع الحرارة المُخزنة كما أن فعالية الاسترجاع منخفضة نسبياً.

أما التخزين المحسوس للحرارة فيمتاز ببساطته - رخصه - كما أن الأبحاث في هذا المجال قطعت مراحل كبيرة ووصلت لمرحلة عالية من النضج التكنولوجي والمُكاملة مع الأنظمة الموجودة، وبالمقابل يُعيب هذه الطريقة أن الكمية المُخزنة من الحرارة بواسطتها هي الأقل بين الطرق الثلاث وبالتالي فإن خزان الحرارة سيكون أكبر من نظرائه في باقي الطرق كما أن القدرة على تقويم التذبذب في قيمة الإشعاع الشمسي ستكون ضعيفة.

بالنسبة للتخزين الكامن للحرارة فهو يمتاز بالقدرة على تخزين كمية أكبر من الحرارة بالمقارنة مع التخزين المحسوس، كما أن عمليات الشحن والتفريغ أبسط منها في التخزين الكيميائي ولكن تكمن الصعوبة في هذه الطريقة باختيار المواد المتغيرة الطور Phase Change Materials (PCMs) المناسبة للتطبيق المدروس حيث أن عمليات الشحن والتفريغ ستتم عند درجة حرارة التحول الطوري والتي يجب أن تتطابق مع درجة الحرارة المطلوب الحفاظ عليها.

إنَّ هذا المشروع يُخَدَّم المحور الأخير (التخزين الكامن للحرارة)، حيث تُعتبر معرفة الزمن اللازم لإنجاز التحول الطوري (زمن شحن وتفريغ الخزان) الخطوة الأولى لتصميم خزان حراري طوري، ولأجل هذه الغاية -حساب زمن التحول الطوري- يجب علينا فرض شروط مُحددة نستطيع من خلالها حل المعادلات التفاضلية النازمة للمسألة المدروسة ولأجل التأكد من القيم النظرية الناتجة سوف نستعين بجهاز تجريبي يُحاكي المسألة المدروسة ونقارن القيم العملية بالقيم النظرية ونلاحظ مدى تأثير الشروط المفروضة على دقة الحل.

إنَّ الشروط التي تم اعتمادها هي شروط ستيفان (Stefan Condition) وتُدعى المسألة أو الظاهرة التي تُراعي هذه الشروط بـ (Stefan Problem) والتي سيتم تناولها بشيء من التفصيل في الفقرات التالية.

1-2 لمحة تاريخية عن مسألة ستيفان (مسألة الشروط الحدية المتحركة):

1-2-1 تاريخ مسألة الشروط الحدية المتحركة ما قبل ستيفان:

غالباً ما يُطلق على مسائل الشروط الحدية المتحركة (Moving Boundary Problems) مسائل ستيفان نسبةً إلى العمل الذي قام به العالم النمساوي جوزيف ستيفان Joseph Stefan (1835-1893) حول التحول الطوري سائل/ صلب حيث قام بنشر ست أبحاث بين عامي (1889-1891) حول هذه الأعمال التي قام بها. ولكن قصة التحول الطوري سائل/ صلب بدأت قبل ذلك مع الطبيب والفيزيائي والكيميائي الاسكتلندي جوزيف بلاك Joseph Black (1728-1799) الذي قام بسلسلة من التجارب في جامعة غلاسكو (Glasgow) باستخدام الماء والتلج بين عامي 1758-1762، أفضت هذه التجارب إلى أن عملية الانتقال من الطور السائل إلى الطور الصلب سوف لن تُبَرَّر من المنظور الحراري باستخدام مفهوم الحرارة المحسوسة فقط، وكنتيجةً لذلك قام بطرح مفهوم الحرارة الكامنة.

وفي عام 1822 قام عالم الرياضيات والفيزياء الفرنسي جوزيف فورييه Joseph Fourier (1768-1830) بنشر البحث الذي حدد فيه الشكل الفيزيائي والعلاقة الرياضية النازمة لانتقال الحرارة بالتوصيل هذا البحث كان بعنوان " La Théorie Analytique de la Chaleur " .

أما فكرة الدمج بين الحرارة الكامنة ومعادلات انتقال الحرارة بالتوصيل فقد ذُكرت في مقالة نُشِرت عام 1831 بقلم الفيزيائي غابرييل لام Gabriel Lamé (1795-1850) ومهندس الميكانيك إيميل كلايرون Emile Clapeyrone (1799-1864)، هذه المقالة شكلت امتداداً لعمل سابق قام به Fourier والذي حاول من خلالها تخمين الزمن الذي لَزِمَ لتبريد الأرض منذ اللحظة التي كانت فيها على شكل مصهور ولكنّه -Fourier- لم يأخذ بعين الاعتبار الزمن اللازم لعملية التجمد (الزمن اللازم للتحول الطوري). إضافةً إلى ذلك قام فرانز نومن Franz Neumann (1798-1895) بحل مسألة مُشابهة في أوائل الستينيات من القرن التاسع عشر.

1-2-2 نبذة عن حياة جوزيف ستيفان:

ولد جوزيف ستيفان Joseph Stefan في سانت بيتر St. Peter بالقرب من Klagenfurt في النمسا في 24 آذار عام 1835 وتوفي في 7 كانون الثاني عام 1893، دخل جامعة فيينا عام 1853 وحصل على الدكتوراة في الرياضيات والفيزياء المتقدمة عام 1863 وبعدها بثلاث سنوات عُيِّنَ مديراً لمعهد الفيزياء التطبيقية الذي أنشأه دوبر (Doppler) عام 1850. تميَّز ستيفان على الجانبين التطبيقي والتدريسي على حدٍّ سواء فكان مدرساً واسع القبول والاستحسان إضافةً إلى تألقه على الصعيد التجريبي.

أهم الأعمال البحثية لستيفان تلك المتعلقة بانتقال الحرارة بالإشعاع (1879)، حيث اكتشف أنَّ كمية الحرارة المنتقلة بالإشعاع تتناسب مع درجة الحرارة المطلقة مرفوعةً للأس أربعة، والذي برهنَ على هذه النتيجة نظرياً بولتزمان (Boltzmann) عام 1884 الأمر الذي أفضى إلى القانون المعروف حالياً باسم قانون ستيفان - بولتزمان للإشعاع.

كل الأعمال النظرية والتجريبية التالية - لقانون انتقال الحرارة بالإشعاع - والتي نشر عنها ستيفان كانت حول النشاط الحركي للحرارة (kinetic theory of heat) فنشر حول:

- انتقال الحرارة بالتوصيل في السوائل [Stefan, 1889^a].
- الانتشارية في السوائل [Stefan, 1889^b].
- تشكل الجليد [Stefan, 1889^c] (حيث تصب الأطلوحة وهذا البحث في بوتقة واحدة).
- التبخر [Stefan, 1889^d].

في كل الأبحاث السابقة أعطى ستيفان تصوراً للموديل الرياضي الناظم للمشكلة الفيزيائية المدروسة؛ فمثلاً: توصل ستيفان من خلال البحث الثالث [Stefan, 1889^c] إلى تصور للعلاقة التي تربط موقع السطح الفاصل بين الماء والجليد مع الزمن (والذي هو مَعْرَضُ الحديث في هذه الأطلوحة) ولأنَّ ستيفان (ومن خلال هذا البحث) كان أول من قام بدراسة تفصيلية وأوجدَ حلاً لمسألة الشروط الحدية المتحركة (moving boundary problems) أصبحت تُعرف بعده باسم مسألة ستيفان، وسنتطرق لتاريخ ستيفان مع هذه المسألة في الفقرة التالية.

1-2-3 تاريخ مسألة الشروط الحدية المتحركة مع ستيفان:

في البداية سنقوم بتوصيف المشكلة الفيزيائية التي قام ستيفان بدراستها عام 1891، حيث قام ستيفان بتأمل مياه البحر التي تتبرد إلى أقل من درجة حرارة التجمد متحولةً إلى جليد (في منطقة قريبة من القطب)، افترض ستيفان أن درجة حرارة الهواء -التي سببت هذا التجمد- بعد مدة مُعينة انخفضت إلى الدرجة (T_0) - ما دون درجة حرارة التجمد - وبقيت ثابتة بعدها، عندها بدأ الجليد بالتشكل عند السطح الفاصل بين الهواء وماء البحر وبالنتيجة أخذت سماكة طبقة الجليد بالازدياد كتابع بالنسبة للزمن، كما وجد أنَّ سماكة طبقة الجليد $X(t)$ تتناسب طردياً مع الجذر التربيعي للزمن t ، هذه النتيجة توصل إليها ستيفان مُستنداً إلى الموديل الرياضي الذي وضعه للمسألة والذي سنقوم بشرحه.

افترض ستيفان أنَّ انتقال الحرارة في الجليد يتم بسرعة الأمر الذي يُفضي إلى أنَّ بروفيل التوزيع الحراري ضمن الجليد سيكون خطي، كما افترض ستيفان أنَّ درجة حرارة السطح الفاصل بين الهواء والجليد هي T_0 ما درجة حرارة السطح الفاصل بين الجليد والماء هي T_f (درجة حرارة تجمد الماء)، كل هذه الفرضيات السابقة تؤدي إلى أنَّ كمية الحرارة المنزوعة من الجليد خلال فترة زمنية dt تساوي:

$$q = \frac{K_s * T_0}{X(t)} * dt \quad (1 - 1)$$

حيث: K_s : معامل انتقال الحرارة بالتوصيل للجليد $[w/m.k]$. T_0 : درجة حرارة الهواء البارد $[k]$. $X(t)$: سماكة طبقة الجليد عند اللحظة t $[m]$.

وبالمقابل عند تجمد أي كمية من الماء بسماكة $dX(t)$ فإنها تُنتج كمية من الحرارة تساوي:

$$q = h_{sl} * m_{water} * dX(t) \quad (1 - 2)$$

حيث: h_{sl} : الحرارة الكامنة للتحويل الطوري (انتالبي التحويل الطوري) $[j/kg]$. m_{water} : الكتلة النوعية للماء المتجمد $[kg/m^3]$.

إنَّ المعادلتين السابقتين تقوداننا إلى المعادلة التفاضلية التالية:

$$h_{sl} * m_{water} * dX(t) = \frac{K_s * T_0}{X(t)} \quad (1 - 3)$$

وبالمكاملة نجد:

$$X^2(t) = \frac{2K_s * T_o}{h_{sl} * m_{water}} t \quad (1 - 4)$$

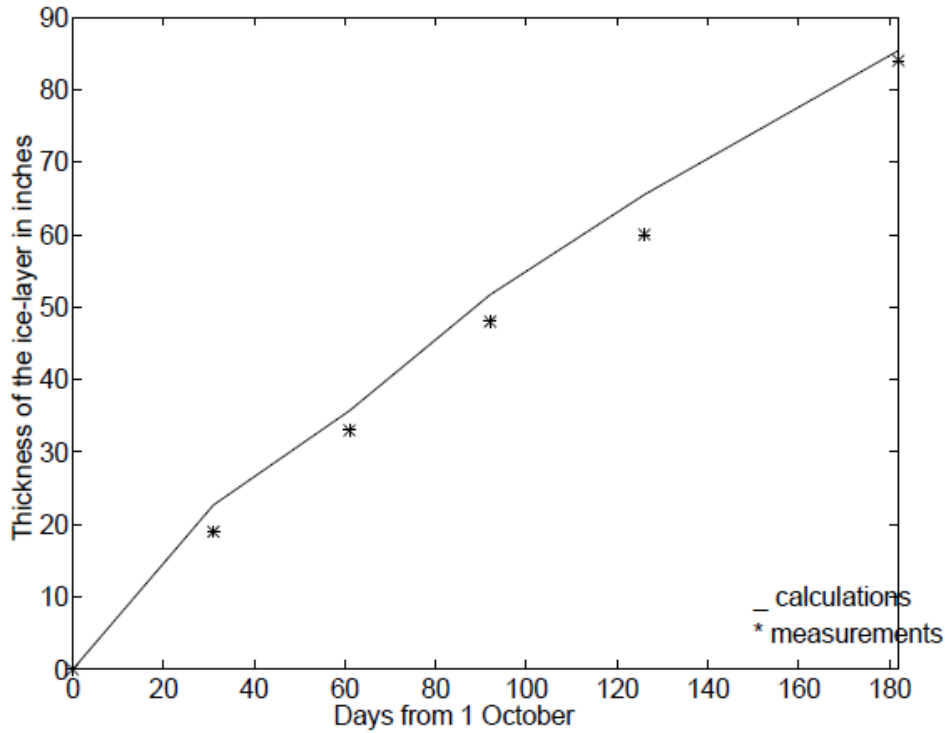
رأى ستيفان أنَّ فرضية البروفيل الخطي لتوزع درجة الحرارة مقبول في هذه الحالة وذلك لأنَّ قيمة السعة الحرارية للجليد أصغر بكثير من قيمة الموصلية للجليد، ولكن ومن الناحية الأخرى فإنَّ هذ الفرضية لابد أن ينتج عنها بعض الأخطاء في تحديد زمن التجمد.

لاحظ ستيفان أنَّ الحالة الفيزيائية في الواقع أكثر تعقيداً من تلك الفرضيات التي وضعها. أولاً: درجة حرارة الهواء ليست ثابتة. ثانياً: فرضية كون انتقال الحرارة ضمن الجليد يتم بسرعة ثابتة، ليست دائماً صحيحة فمن أجل طبقة جليد ذات سماكة قليلة تُقبل بكثير من الدقة، ولكن ومع ازدياد سماكة هذه الطبقة تُصبح سرعة انتقال الحرارة ضمنها بطيئة لدرجة أنَّ الزمن اللازم لاجتيازها يجب أخذه بعين الاعتبار.

قام ستيفان بإجراء مقارنة بين النتائج النظرية التي توصل إليها مع قياسات عملية للجليد المُتشكل في خليج بوثيا (Gulf of Boothia) الواقع في كندا بالقرب من القطب الشمالي وكانت النتائج كما هي موضحة في الشكل (1-1).

إنَّ الاختلاف الموجود بين القيم النظرية والقيم العملية عزاه ستيفان لعدة أسباب منها:

- ☒ وجود الثلج على سطح الجليد يُعيق عملية انتقال الحرارة.
- ☒ وجود جريان للماء الدافئ (ذو درجة حرارة أعلى من درجة حرارة التجمد) يجعل سماكة الجليد المُتشكل أقل من المُتوقع.



الشكل (1-1) مقارنة بين النتائج النظرية والعملية لسماكة الجليد المتشكل في خليج بوثيا (من المرجع 1)

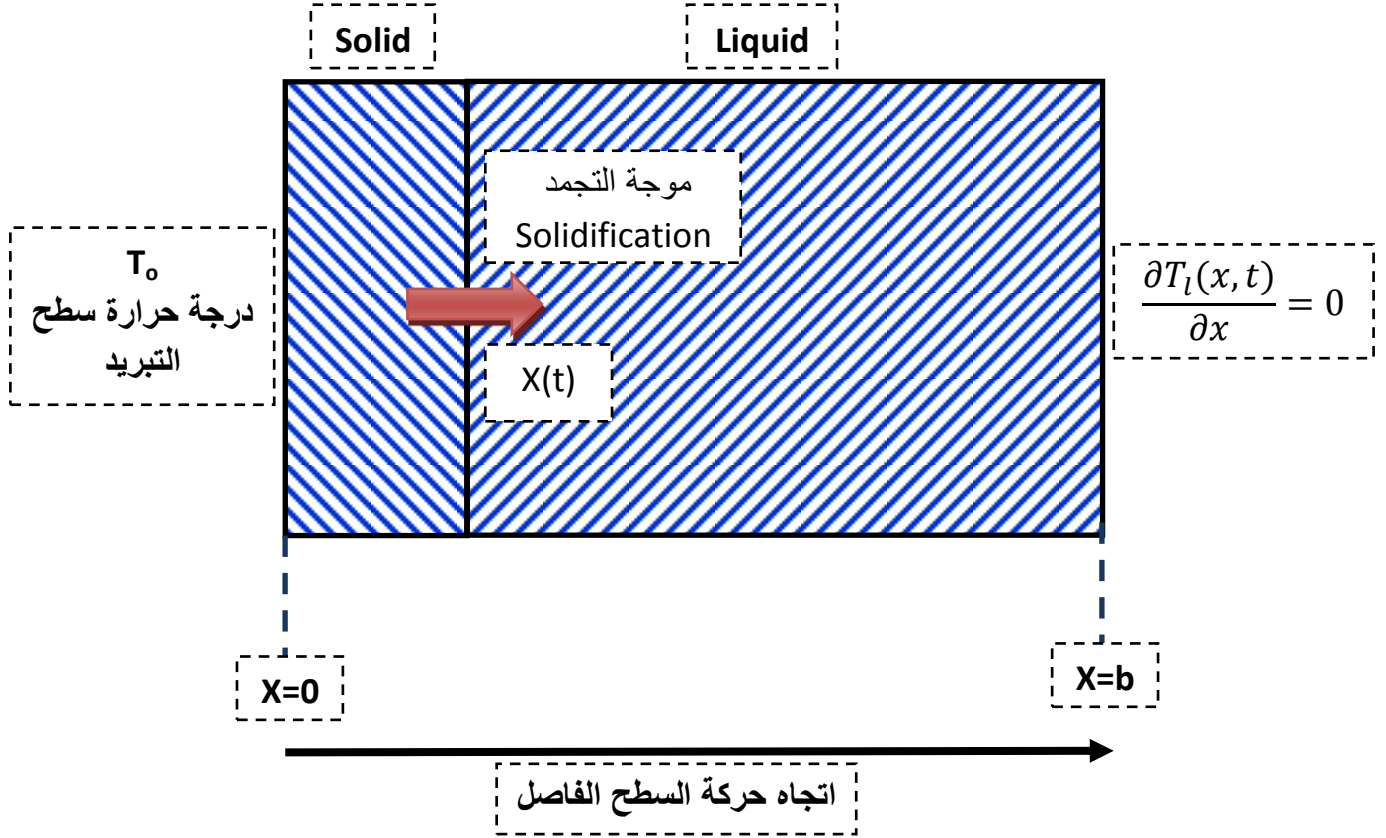
وكننتيجةً لهذه الأبحاث والتجارب التي قام بها ستيفان نشر أربع مقالات عام 1889 حول النتائج التي توصل لها، هذه الأبحاث حول تشكل الجليد في مياه القطب أُعيد طباعتها عام 1891 حيث لاقت اهتماماً واسعاً ضمن أواسط المجتمع العلمي آنذاك.

1-3 توصيف المسألة التي ستُعالجها الأطروحة:

إن عدد كبير من حالات انتقال الحرارة والكتلة تظهر فيها مشكلة الشروط الحدية المتحركة (Moving Boundary Problem) هذه المشكلة نجدها حاضرة عند التحول من الطور الصلب إلى الطور السائل أو بالعكس، فعندما يتشكل طور أو ينمو على حساب الطور الآخر يكون السطح الفاصل بين الطورين متحركاً كتابع بالنسبة للزمن، وعليه ومن أجل سطح فاصل غير ثابت يُعتبر موقع هذا السطح الفاصل جزء من الحل لذلك تصبح المسألة أكثر تعقيداً. وكما ذكرنا في الفقرة (1-1) يجب علينا فرض عدة شروط نعتمد عليها لإيجاد حل للمعادلات الرياضية النازمة للحالة المدروسة، تم اعتماد شروط ستيفان (Stefan Condition) للتحول الطوري سائل/صلب في هذه الأطروحة وذلك لأنّ لهذه الشروط العديد من التطبيقات خصوصاً في مجال التخزين الحراري الطوري كما سنرى لك لاحقاً.

1-3-1 شروط ستيفان (Stefan Condition) للتحويل الطوري سائل/صلب:

يمثل الشكل (1-2) مُخططاً توضيحياً لشروط ستيفان.



الشكل (1-2) مُخطط توضيحي لشروط ستيفان

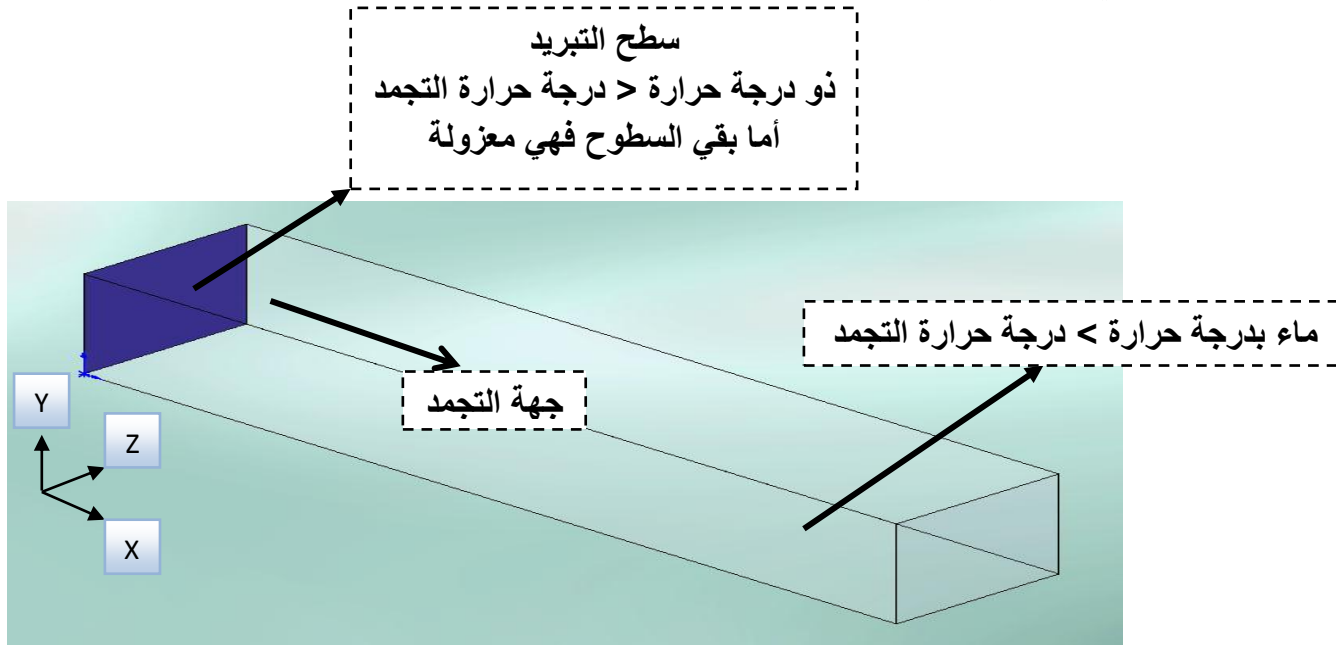
إنَّ شروط ستيفان للتحويل الطوري سائل/صلب يُمكن تلخيصها في النقاط التالية:

1. انتقال الحرارة بالتوصيل فقط (الحمل والإشعاع مهمين).
2. بناءً على البند السابق فإننا نُهمل تأثير الجريان الناتج عن حدوث فرق في الكثافة نتيجة تغير درجة الحرارة أثناء التبريد.
3. انتشار موجة التجمد أحادي البُعد، أي أنَّ سرعة التجمد باتجاه كل من Y و Z أكبر بكثير من سرعة التجمد باتجاه X (وإذا كانت سرعة التجمد باتجاه Y أو Z بطيئة -قريبة نسبياً- من قيمة سرعة التجمد باتجاه X -أصبح الانتشار ثنائي البُعد، وفي حال كانت سرعة التجمد باتجاه المحاور الثلاث ذات قيم متقاربة -لا يوجد واحدة أكبر بكثير من الباقيتين- أصبح الانتشار ثلاثي البُعد).

4. درجة حرارة سطح التبريد ثابتة (أصغر من درجة حرارة التجمد).
5. درجة حرارة الطور السائل في بداية التجربة قريبة جداً أو تساوي درجة حرارة التحول الطوري، عند تحقق هذا الشرط يُطلق على المسألة المدروسة One Phase Stefan Problem وإذا لم يتحقق (كانت درجة حرارة الطور السائل عند بداية التجربة أكبر من درجة حرارة التحول الطوري) يُطلق على المسألة المدروسة Two Phase Stefan Problem، قام ستيفان بوضع هذا الشرط لتحديد دور الانتقال المحسوس للحرارة ضمن الطور السائل والتركيز على التحول الطوري؛ ولكن الاستخدام العملي قليل جداً لحالة الـ One Phase Stefan Problem.

1-3-2 الإسقاط العملي لشروط ستيفان:

بما أنَّ الإجراء التجريبي هو الجزء الأساسي من هذه الأطروحة فقد قمنا ببناء النموذج المخبري الذي يحقق شروط ستيفان آنفة الذكر، هذا النموذج هو عبارة عن خزان على شكل متوازي مستطيلات وجوهره الخمسة معزولة (أديباتية) والوجه السادس يمثل سطح التبريد كما هو موضح في الشكل (1-3).



الشكل (1-3) رسم توضيحي للنموذج التجريبي

نلاحظ في الشكل (3-1) أنَّ بُعد الخزان باتجاه المحور X أكبر بكثير من بُعده باتجاه المحورين الآخرين وهذا من أجل تحقيق الشرط الثالث من شروط ستيفان (الانتشار أحادي البُعد لموجة التجمد، هذا الشرط سنناقشه بالتفصيل في الفصل الرابع).

وعليه وبشكل مُختصر فإنَّ المسألة التي سيتم تناولها في هذه الأطروحة هي تبريد (شحن بالبرودة أو تجميد) خزان حراري أحادي البُعد على شكل متوازي مستطيلات حيث تتم عملية التبريد من خلال خفض درجة حرارة أحد وجوهه - (سطح التبريد) حيث يجب أن يكون هذا الوجه عامودي على محور الانتشار الأحادي لموجة التجمد في الشكل (3-1) عامودي على المحور $-X$ إلى مادون درجة حرارة التجمد (قيمة هذا الخفض سنناقشها بالتفصيل في الفصل الرابع) أما باقي وجوه الخزان فهي معزولة، الخزان مملوء بماء ذي درجة حرارة ابتدائية أعلى من درجة حرارة التحول الطوري.

1-3-3 عبارات موجزة في توصيف المسألة التي ستُعالجها الأطروحة:

فيما يلي بعض العبارات الموجزة في توصيف المسألة التي ستُعالجها الأطروحة:

(1) المحور العلمي الذي سيتم تسليط الضوء عليه خلال المشروع هو:

“انتقال الحرارة بالتوصيل في الحالة غير المستقرة بوجود تحول طوري”

"Transient Heat Conduction With Phase Change"

(2) تصنيف المسألة المدروسة وفق شروط ستيفان:

“مسألة ستيفان أحادية البُعد ثنائية الطور”

"One Dimension- Tow Phase Stefan Problem"

(3) تُمثل النتائج التي سنحصل عليها بعد حل هذه المسألة:

“الخطوة الأولى في تصميم الخزان الحراري الطوري”

"The First Step In Design Latent Thermal Energy Storage"

وهذا ما سنتحدث عنه في فقرة أهداف المشروع.

1-4 أهداف المشروع:

كما سلف وذكرنا فإنَّ هذا المشروع يُخدَم محور التحول الطوري وبالأخص المواد المتغيرة الطور Phase Change Materials (هذه المواد سنتناولها بشيءٍ من التفصيل في الفصل الثاني) والتي تُمثِّل جوهر الخزان الحراري الطوري، وعليه سنسعى في هذا المشروع إلى وضع الطرق أو المعادلات التي تُساعدنا في تحديد بعض البارامترات الهندسية للمواد المتغيرة الطور، وبناءً على ما سبق يمكن تحديد أهداف المشروع في النقاط التالية:

1. قياس الزمن اللازم لإتمام عملية التجمد للمادة المتغيرة الطور (PCM).
2. قياس سرعة انتشار وانتظام موجة التجمد للمادة المتغيرة الطور (PCM).
3. مقارنة نتائج القياس مع الحلول العددية (Numerical Solutions) للمعادلات الرياضية النازمة للمسألة المطروحة.
4. استخدام برنامج ANSYS في محاكاة (simulate) التجربة العملية ومقارنة نتائج المحاكاة مع النتائج المحصول عليها عن طريق القياس وعن طريق حل المعادلات الرياضية.
5. إيجاد علاقة تجريبية لتحديد موقع السطح الفاصل بدلالة الزمن في المواد المتغيرة الطور.

1-5 أهمية المشروع وتطبيقاته:

إنَّ لـ Stefan Problem أهمية كبيرة في العديد من التطبيقات التي تكون على تماس مباشر مع حالات تغير الطور (وبالنسبة لهذا المشروع يأتي الخزان الحراري الطوري وتصميمه على رأسها) كما أنَّها تصف العديد من الظواهر الطبيعية والعلمية ومنها:

1-5-1 التطبيقات بعيداً عن مجال الطاقات المتجددة:

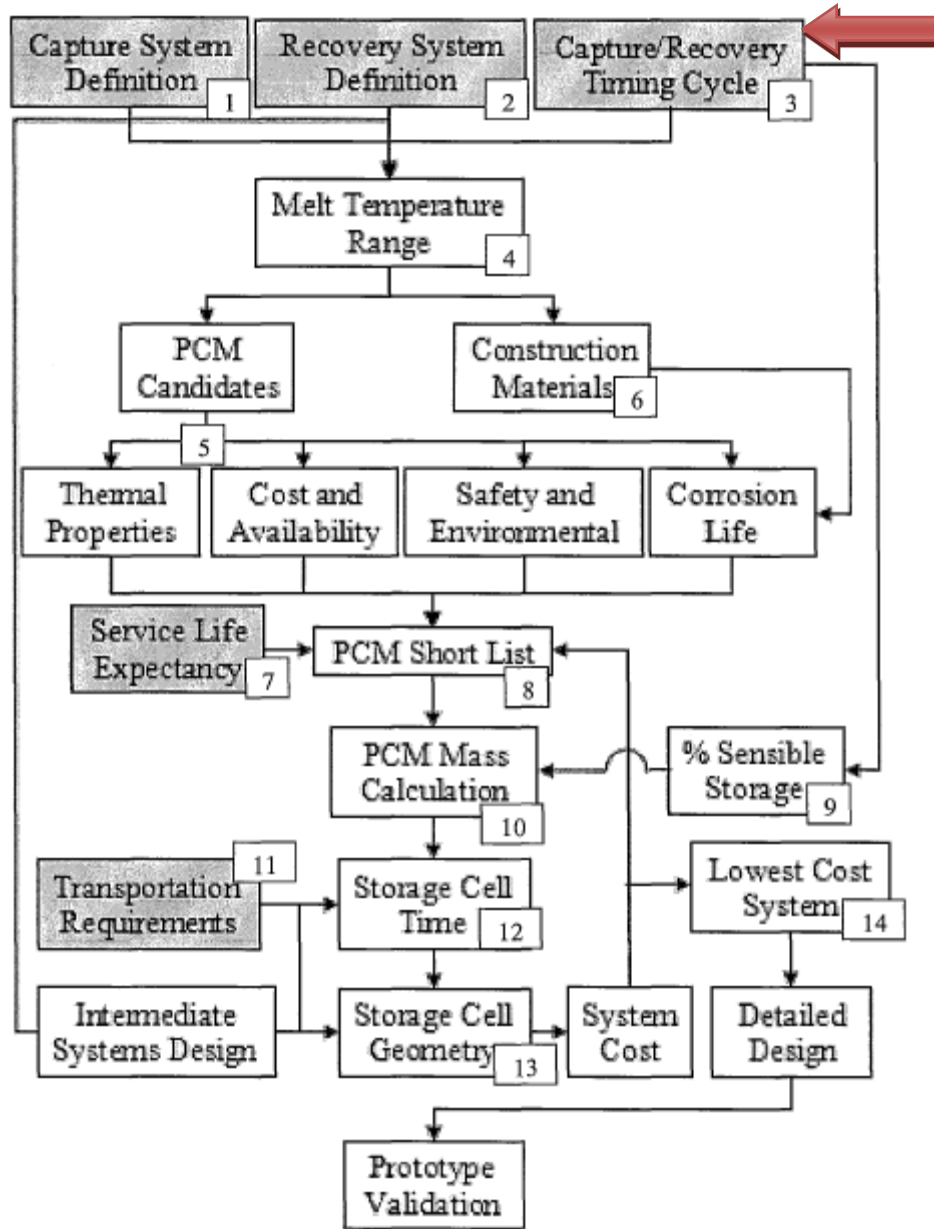
- ❖ ذوبان جليد القطب التي كانت الظاهرة المدروسة من قبل ستيفان.
- ❖ المسبوكات المعدنية حيث يُعتبر زمن تجمد السبيكة من العوامل الهامة في عملية السباكة.
- ❖ دراسة الأوعية الدموية المصابة بجلطات.

- ❖ تطبيقات التحول الطوري في الجراحة الباردة (Cryosurgery) حيث تم اكتشاف هذه الطريقة عام 1961 وهي تستخدم دورات تجميد/تسخين لتدمير الخلايا المراد إتلافها كالخلايا السرطانية.
- ❖ تشكل الجليد على أجنحة الطيارات.
- ❖ في مجال الفيزياء الفلكي، مثل تخمين عمر الأرض باعتبار أن الأرض بدأت على شكل مصهور صخري (Magma) ثم أخذت بالتجمد، وبعرفة الزمن الذي لزم لعملية التبريد هذه نستطيع تخمين عمر الأرض والذي لا يمكن أن يتجاوز 700 مليون سنة وفق هذه الآلية ومعرفة هذا الرقم مفيد جداً لعلماء الجيولوجيا من أجل معرفة آلية تشكل الجبال والبراكين والنشاطات الزلزالية.
- ❖ وأيضاً في مجال الفيزياء الفلكي فإن إحدى التطبيقات هي دراسة الأجسام (النيازك) التي تخترق الأرض.

1-5-2 التطبيقات ضمن مجال الطاقات المتجددة:

كما ذكرنا في مرات سابقة عديدة إنَّ التطبيق الرئيسي الذي يُخدمه هذا المشروع هو تصميم خزان حراري طوري، حيث يُعتبر تحديد الزمن اللازم لعمليتي الشحن والتفريغ من أوائل المهام الواجب إنجازها عند تصميم الخزان الحراري الطوري، يوضح الشكل (4-1) الخوارزمية المُتبعة أثناء تصميم خزان حراري طوري.

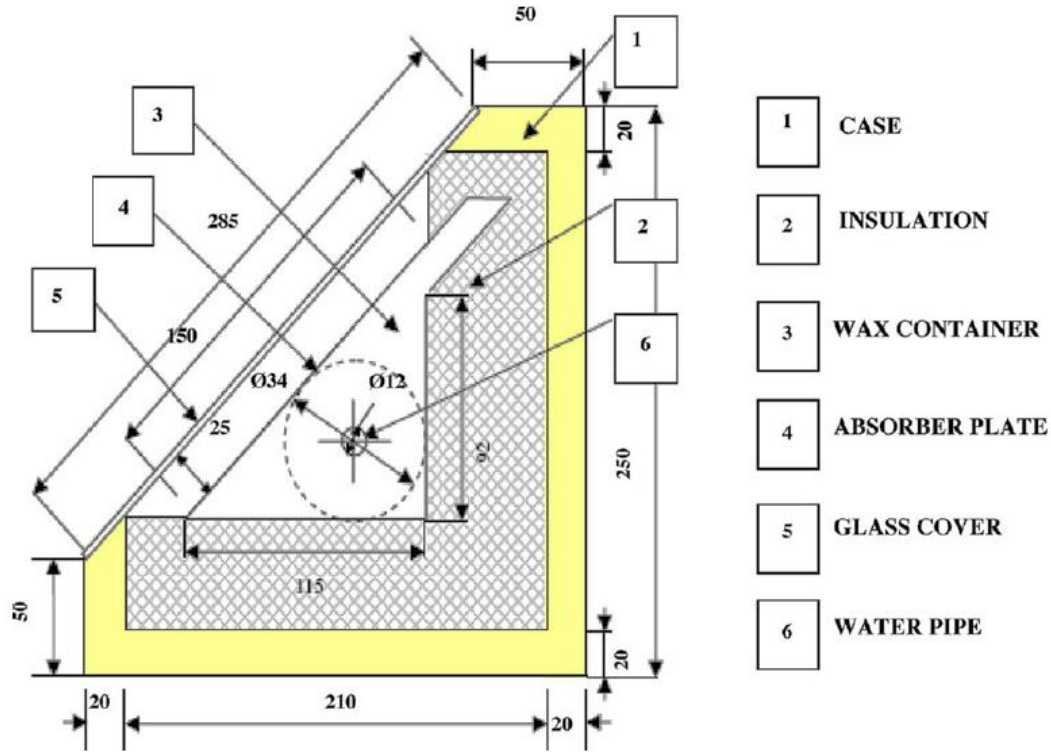
تُمثل الخطوة رقم 3 في الشكل (4-1) النقطة التي نتحدث عنها (تحديد الزمن اللازم لعملتي الشحن والتفريغ).



الشكل (4-1) مخطط صندوقي للخوارزمية المتبعة أثناء تصميم خزان حراري طوري (من المرجع 4)

إضافةً إلى تصميم الخزان الحراري الطوري فإنّ هذا المشروع يُخدّم العديد من التطبيقات ضمن مجال الطاقات المتجددة حيث يتم استعمال المواد المتغيرة الطور PCMs ضمن هذه التطبيقات وعليه تكون على صلة مباشرة بالمشروع، ومن هذه التطبيقات (الأرقام الموجودة ضمن هذه التطبيقات مأخوذة عن أبحاث عملية قام بها عدد من الباحثين تفصيل هذه الأبحاث موجود في المرجع رقم 5):

❖ استخدام المواد المتغيرة الطور في أنظمة تسخين المياه باستخدام الطاقة الشمسية (Solar Water- Heating Sysytem): يوضح الشكل (1-5) آلية استخدام الـ PCMs ضمن سخانات المياه الشمسية:

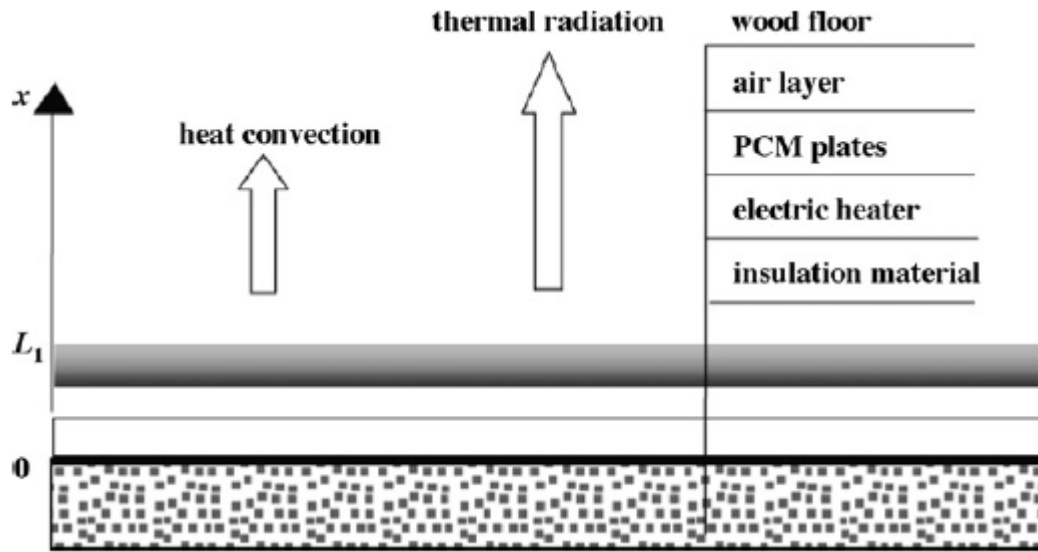


الشكل (1-5) استخدام المواد المتغيرة الطور PCMs مع سخانات المياه الشمسي (من المرجع 5)

في هذا التطبيق تم استخدام 17.5 كغ من البارافين (والذي ينصهر عند درجة حرارة 54°C) هذا التعديل على السخان الشمسي مكثنا من الحصول على نفس كمية الطاقة باستخدام خمس المساحة الفعالة السابقة (دون استخدام الـ PCMs) أي توفير كبير بالمساحة المطلوبة للاقط وهو أمر جوهري بالنسبة للطاقة الشمسية.

❖ استخدام المواد المتغيرة الطور في أنظمة تسخين الهواء باستخدام الطاقة الشمسية (Solar Air- Heating Sysytem): كمثال على هذا التطبيق أجريت دراسة على منزل في بكين حيث تم استخدام صفائح من مادة متغيرة الطور نوع SSPCM (shape-stabilized phase change material) وضعت داخل الجدران فكانت النتيجة الحصول على وفر في الطاقة بنسبة 12% في فصل الشتاء وبنسبة 47% بشكل عام.

❖ استخدام المواد المتغيرة الطور مع أنظمة التدفئة الأرضية: يوضح الشكل (6-1) أحد الأمثلة لاستخدام الـ PCMs مع أنظمة التدفئة الأرضية:



الشكل (6-1) استخدام المواد المتغيرة الطور PCMs مع أنظمة التدفئة الأرضية (من المرجع 5)

إنَّ استخدام المواد المتغيرة الطور في هذا التطبيق تُفيد في اختزان الإشعاع الشمسي وفي هذا المثال تم وضع طبقة من الـ gypcrete (عبارة عن مزيج من الجبس و الإسمنت) بسماكة 3cm، هذه الطبقة تُفيد في اختزان الإشعاع الشمسي مما يؤدي إلى خفض الاستهلاك (من الوقود أو الكهرباء) حيث وصلت نسبة خفض في الاستهلاك في هذا المثال إلى 30%.

❖ استخدام المواد المتغيرة الطور على شكل ألواح ضمن السقوف: يمتاز هذا التطبيق بأنَّ المساحة المُتاحة كبيرة، كما بينت الدراسات أنَّه يُحقق وفر في الطاقة المُهدرة بنسبة تتراوح بين 17-36% من إجمالي الطاقة المُهدرة.

1-6 بعض الأبحاث المنشورة حول التحولات الطورية ومسألة ستيفان:

تُلاقي مسألة ستيفان اهتماماً واسعاً ومتزايداً وذلك بسبب اتصالها بالعديد من العلوم (خصوصاً فيما يتعلق بالتحول الطوري سائل/صلب من ناحية وكونها تُشكل تحدي للرياضيين لحل المعادلات التفاضلية ذات الشروط الحدية المتحركة من ناحية أخرى) إضافةً إلى الطيف الواسع من التطبيقات التي تكون على تماس مباشر مع مسألة ستيفان (كما مر معنا في الفقرة السابقة)؛

كل تلك الأسباب آنفة الذكر جعلت نشر الأبحاث حول مسألة ستيفان يزداد بويطرة متسارعة، والجدول (1-1) يبين العدد الوسطي للأبحاث المنشورة سنوياً حول مسألة ستيفان خلال فترات زمنية عديدة.

الجدول (1-1) العدد الوسطي للأبحاث المنشورة سنوياً حول مسألة ستيفان خلال عدة فترات زمنية

الفترة	1931 1940	1941 1950	1951 1960	1961 1970	1971 1980	1981 <u>1982</u>
العدد الوسطي للأبحاث المنشورة سنوياً	0.1	1.8	4	7.8	23.3	<u>55</u>

على الرغم من ازدياد الأبحاث المنشورة حول مسألة ستيفان إلا أن العدد الأكبر منها كان يُركز على الطرق التحليلية والعديدية لحل هذه المسألة، والنسبة القليلة اعتنت بالجانب العملي (لذلك حاولت التركيز على الجانب العملي ومقارنته مع الطرق الأخرى ضمن هذه الأطروحة)؛ وفيمايلي عرض موجز للبعض من هذه الأبحاث:

1-6-1 An alternative fixed grid method for solution of the classical one-phase Stefan problem:

By: A.K. Verma, Sanjay Chandra, B.K. Dhindaw

في هذا البحث قام الباحثون بدراسة عملية الانصهار، حيث قاموا بتحديد موقع السطح الفاصل لأجل عدة لحظات زمنية كما قاموا بتحديد التدرج الحراري على كامل الوسط عند لحظة زمنية معينة. تم الحصول على النتائج بثلاث طرق مختلفة ومقارنتها ببعضها البعض:

الطريقة الأولى: طريقة عددية تعتمد على نظرية Fixed Grid Method.

الطريقة الثانية: طريقة عددية أيضاً وهي تعديل على النظرية السابقة (وهي القيمة المضافة لهذا البحث) وتدعى:

" Modification of the fixed grid (Murray and Landis) method"

الطريقة الثالثة: طريقة تحليلية وقد استخرجت بواسطة Neumann وهو عالم قام بوضع حل تحليلي لمسألة ستيفان وأصبح هذا الحل يُعرف باسمه.

الوسيط المفروض في هذا البحث كان الماء، حيث كانت الحالة البدائية للماء هي الحالة الصلبة (جليد) بدرجة حرارة 0°C درجة مئوية لكامل الوسط، ومن ثم تم رفع درجة حرارة السطح إلى 80°C درجة مئوية وبقيت ثابتة بعدها طوال فترة التجربة.

1-1-6-1 النتائج التي تم الحصول عليها:

(1) تحديد موقع السطح الفاصل باستخدام الطرق الثلاث لأجل عدة لحظات زمنية:

الجدول (1-2) موقع السطح الفاصل لعدة لحظات زمنية وفق نتائج البحث 1-6-1 (من المرجع 6)

Location of the interface by various methods

Time elapse (s)	Exact solu- tion location (cm)	Murray-Landis explicit		Alternative method explicit	
		Location (cm)	Error%	Location (cm)	Error%
10.000000	0.143581318	0.143581318	0.000000000	0.143581318	0.000000000
19.996985	0.203039344	0.203183339	0.070869462	0.203183339	0.070869462
29.993971	0.248665147	0.248862435	0.079275784	0.248862435	0.079275784
39.990956	0.287130172	0.287356716	0.078837520	0.287356716	0.078837520
49.987941	0.321018871	0.321264859	0.076568598	0.321264859	0.076568598
59.984927	0.351656787	0.351917339	0.074037765	0.351917339	0.074037765
69.981912	0.379831378	0.380103494	0.071589974	0.380103494	0.071589974
79.978898	0.406055730	0.406336563	0.069113309	0.406336563	0.069113309
89.975883	0.430686239	0.430973421	0.066635842	0.430973421	0.066635842
99.972868	0.453982396	0.454276179	0.064670448	0.454276179	0.064670448

(2) تحديد التدرج الحراري لكامل الوسط عند اللحظة الزمنية $t=49.98794$ s

الجدول (1-3) التدرج الحراري لكامل الوسط عند اللحظة $t=49.98794$ s وفق نتائج البحث 1-6-1

(من المرجع 6)

Temperature distribution in water after 49.98794 s

Distance from the sur- face (cm)	Exact solution temp. (°C)	Murray-Landis explicit		Alternative method explicit	
		Temp. (°C)	Error	Temp. (°C)	Error
0.000000	80.000000000	80.000000000	0.000000000	80.000000000	0.000000000
0.015794	75.551008448	75.553480305	0.002471857	75.553480305	0.002471857
0.031588	71.110382492	71.115308741	0.004926249	71.115308741	0.004926249
0.047382	66.686415538	66.693786399	0.007370861	66.693786399	0.007370861
0.063176	62.287310690	62.297120738	0.009810049	62.297120738	0.009810049
0.078970	57.921134160	57.933379868	0.012245708	57.933379868	0.012245708
0.094764	53.595770256	53.610448137	0.014677881	53.610448137	0.014677881
0.110558	49.318878211	49.335983439	0.017105228	49.335983439	0.017105228
0.126352	45.097851211	45.117376609	0.019525398	45.117376609	0.019525398
0.142146	40.939777966	40.961713284	0.021935318	40.961713284	0.021935318
0.157939	36.851407135	36.875738542	0.024331407	36.875738542	0.024331407
0.173733	32.839114867	32.865824610	0.026709743	32.865824610	0.026709743
0.189527	28.908875718	28.937941900	0.029066181	28.937941900	0.029066181
0.205321	25.066237127	25.097633577	0.031396450	25.097633577	0.031396450
0.221115	21.316297612	21.349993840	0.033696228	21.349993840	0.033696228
0.236909	17.663688817	17.699650037	0.035961220	17.699650037	0.035961220
0.252703	14.112561447	14.150748713	0.038187267	14.150748713	0.038187267
0.268497	10.666575159	10.706945652	0.040370493	10.706945652	0.040370493
0.284291	07.328892362	07.371399918	0.042507555	07.371399918	0.042507555
0.300085	04.102175881	04.146771874	0.044595993	04.146771874	0.044595993
0.315879	00.988590381	01.033387925	0.044797544	01.033387925	0.044797544

2-1-6-1 خلاصة هذا البحث:

إن الهدف الأساسي لهذا البحث كان تطوير نظرية Fixed Grid Method وإزالة ثغرة أساسية بها وهي أنه أثناء الحل باستخدام هذه الطريقة يجب أن نفرض درجة حرارة وهمية للنقطة المجاورة للسطح الفاصل وهذا يُعيب هذه الطريقة وقد تم تجاوز هذا الأمر باستخدام التعديل على هذه النظرية ولم يؤثر هذا التعديل على النتائج كما لاحظنا في الجدول السابق.

أما ما هو على تماس مباشر مع بحثنا فإننا نستطيع ومن خلال النتائج المنشورة تقدير سرعة انتشار موجة الطور السائل ضمن الطور الصلب (والتي تشابه انتشار موجة الطور الصلب ضمن الطور السائل).

1-6-2 A comparison of numerical models for one-dimensional Stefan problems:

By: E. Javierre, C. Vuik, F.J. Vermolen, S. van der Zwaag

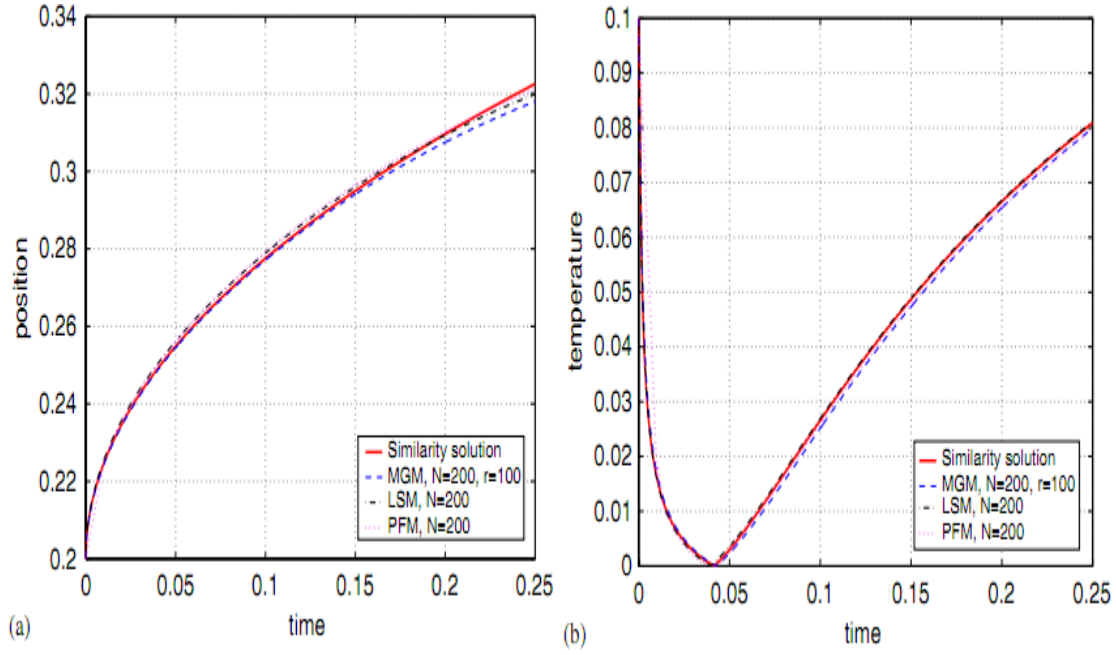
في هذا البحث قام الباحثون بدراسة عملية انصهار الماء، فحددوا موقع السطح الفاصل كتابع للزمن كما انتقوا نقطة من الوسط وسجلوا التغير في درجة الحرارة عندها كتابع للزمن أيضاً. المميز في هذا البحث أن الدراسة كانت خلال فترة زمنية قصيرة نسبياً $t=0.25s$ (أي أنها راعت التغيرات الدقيقة بدرجة الحرارة وبموقع السطح الفاصل)، تم الحصول على النتائج بأربع طرق مختلفة ومقارنتها ببعضها هذه الطرق كانت ثلاثة عددي باستخدام النظريات:

The phase field method–The level set method–The moving grid method

والرابعة تحليلية استُخرجت بواسطة Hill.

1-2-6-1 النتائج التي تم الحصول عليها:

كما ذكرنا تتمثل النتائج بمنحني تغير موقع السطح الفاصل مع الزمن، ومنحني تغيير درجة الحرارة مع الزمن لنقطة معينة ($x = 0.25$)، وكانا هذان المنحنيان على الشكل التالي:



الشكل (1-7) النتائج التي تم الحصول عليها وفق البحث 1-6-2 (من المرجع 7)

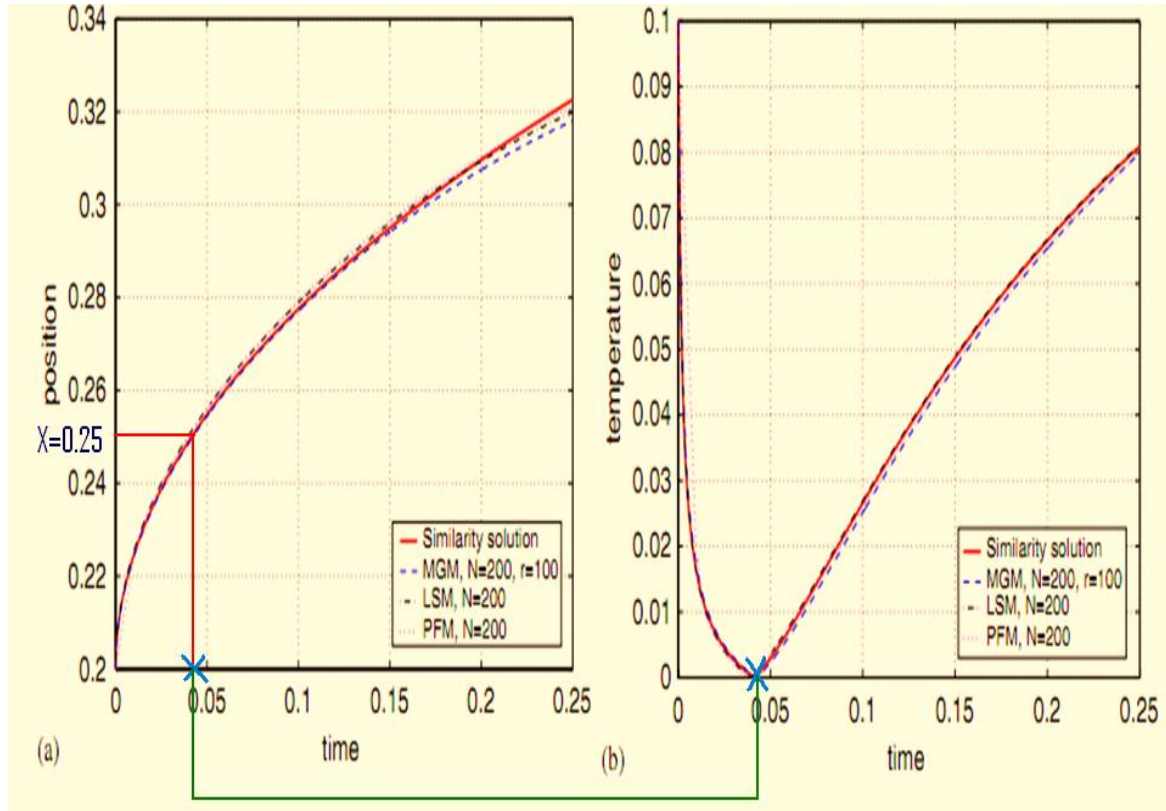
(a) منحنى تغير موقع السطح الفاصل مع الزمن

(b) منحنى تغير درجة الحرارة مع الزمن من أجل موقع $x=0.25$

1-6-2-2 ملاحظات هامة يمكن استقراءها من هذا البحث:

(1) من منحنى تغير درجة الحرارة مع الزمن للنقطة $x = 0.25$ نلاحظ أن درجة الحرارة تنخفض بشكل كبير خلال فترة زمنية صغيرة نسبياً (أي أن تناقص التابع في هذا المجال كان كبيراً) ثم تعود لترتفع بعد نقطة معينة، ومع أن التحول الطوري هو انصهار حدث انخفاض (لحظي) في درجة الحرارة وباستقراء مشابه فإنه وأثناء عملية التجمد سيحدث ارتفاع (لحظي) في درجة الحرارة (ولكن نعود لنذكر أن هذه الظواهر لا يمكن ملاحظتها إلا في حال تمكنا من رصد التغيرات خلال فترات زمنية صغيرة من رتبة 0.05 ثانية) وسبب وجود هذه الظواهر هو التغير في البنية الجزيئية للمادة أثناء التحول الطوري.

(2) بالمقارنة بين المنحنى المحدد لموقع السطح الفاصل والمنحنى المحدد لتغير درجة الحرارة عند $x = 0.25$ (حيث كليهما تابع للزمن) نلاحظ أن أخفض قيمة لدرجة الحرارة توافق مرور السطح الفاصل عند تلك اللحظة كما هو موضح في الشكل التالي:



الشكل (1-8) الربط بين النتائج التي تم الحصول عليها وفق البحث 1-6-2

1-6-3 Numerical and experimental investigation of melting and freezing processes in phase change material storage:

By: Piia Lamberg, Reijo Lehtiniemi, Anna-Maria Henell

في هذا البحث قام الباحثون بدراسة عملية الانصهار والتجمد لمادة متغيرة الطور وهي البارافين المتوضع ضمن خزان مصنوع من الألمنيوم ومعزول عن الوسط الخارجي. تم الحصول على النتائج بثلاث طرق، اثنتان عددية باستخدام النظريتين: Effective Heat Capacity Method و Enthalpy Method، والثالثة: عملية.

قام الباحثون بتجهيز خزان من الألمنيوم (AlSi1MgT6) والمادة المدروسة بداخله هي البارافين ذات المواصفات التالية:

الجدول (1-4) مواصفات البارفين المستخدم في البحث 3-6-1 (من المرجع 8)

	Paraffin
Density solid/liquid 15/70 °C (ρ) $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	789/750
Heat conductivity solid/liquid (k) $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	0.18/0.19
Heat capacity solid/liquid (c_p) $\text{KJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	1.8/2.4
Volume expansion at $\Delta T = 20^\circ\text{C}$, %	4.9
Heat storage capacity melting $\Delta T = 30^\circ\text{C}$, $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$	175 066
Heat storage capacity solidification $\Delta T = 30^\circ\text{C}$, $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$	187 698

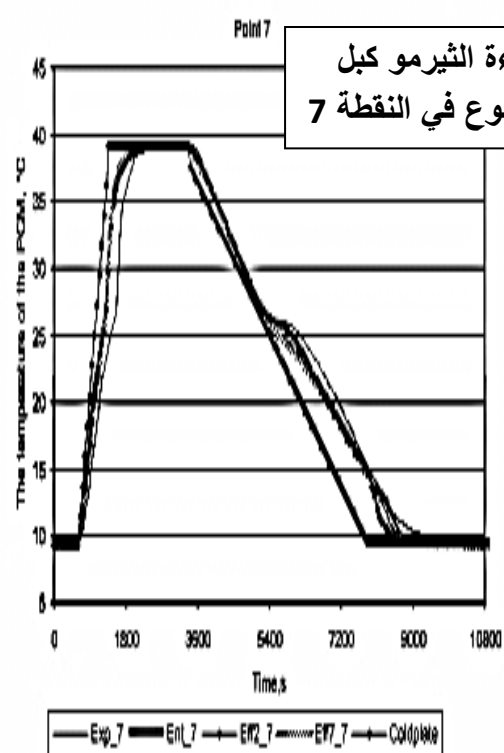
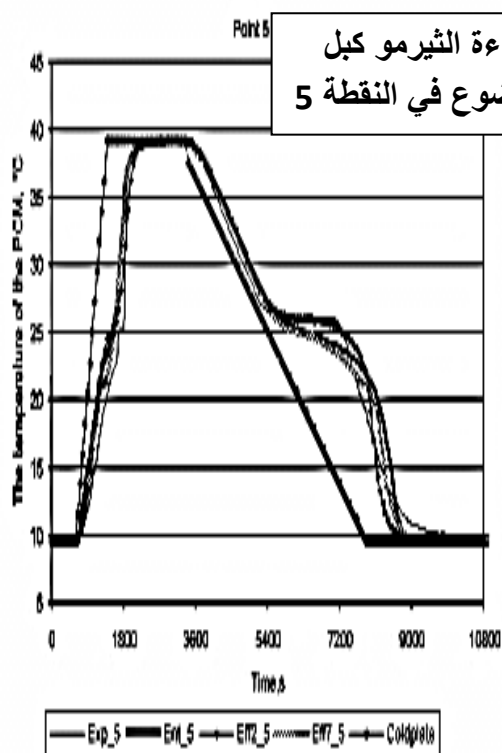
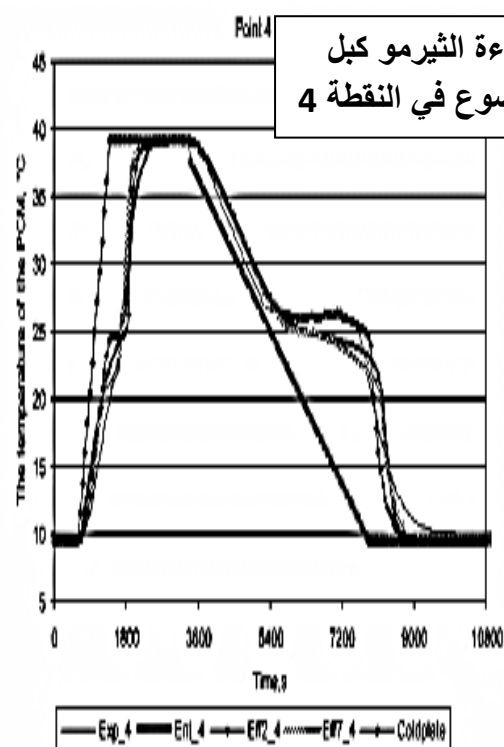
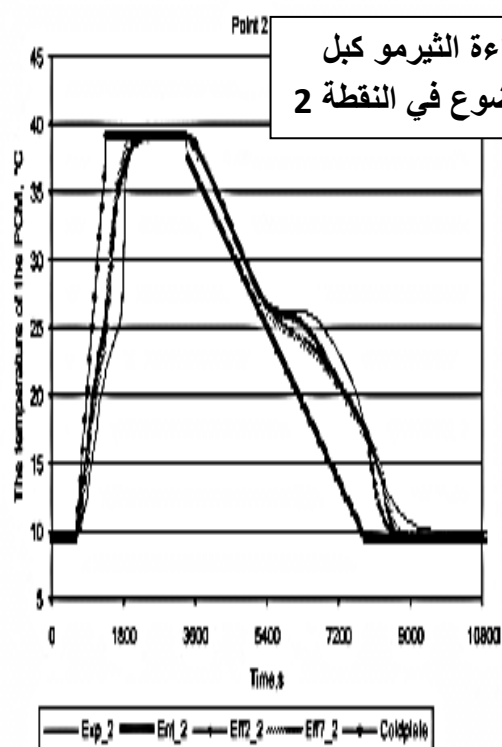
كما زُود الخزان بعدد من حساسات الحرارة thermocouples من النوع K أماكن توضعها هي كالتالي:

Storage 2 Thermocouple	x [mm]	y [mm]
1	2.238	8.123
2	4.598	11.185
3	6.382	14.16
4	8.577	18.16
5	11.312	21.261
6	13.663	23.961
7	15.579	27.75
8	17.12	31.844
9	1.956	40.238
10	4.599	41.731
11	6.536	44.198
12	8.565	46.391
13	9.693	48.342
14	12.078	51.444
15	14.629	53.647
16	16.531	55.821

وكذلك وضع صفيحتان على طرفي الخزان مصنوعة من الألمنيوم من نوع 6063-T5 Aluminium ليتم التسخين والتبريد من خلالهما والشكل (9-1) يوضح هذه التجهيزات.



أثناء عملية القياس تم إمرار الماء بدرجة حرارة 10 درجة مئوية في الصفحتين حتى أصبحت درجة الحرارة المستقرة لكامل الوسط، ومن ثم رُفعت درجة الحرارة داخل الصفحتين إلى 40 درجة مئوية فأدى ذلك إلى انصهار كامل البارافين بعد حوالي 15 دقيقة وعندها تكون قد تمت عملية الانصهار ومن ثم تُعاد درجة الحرارة داخل الصفحتين إلى 10 درجة مئوية لتبدأ عملية التجمد والتي تستغرق حوالي 80 دقيقة حتى تمام تجمد كل البارافين، وفيما يلي النتائج التي تم الحصول عليها:



الشكل (10-1) المُنحنيات المُسجلة من حساسات الحرارة أثناء الإجراء التجريبي ومقارنتها مع باقي الطرق
ضمن البحث 3-6-1 (من المرجع 8)

وبعد أن قمنا في هذا الفصل بشرح فكرة المشروع، سنقوم في الفصل التالي بالحديث عن الـ PCM

الفصل الثاني:

المواد المتغيرة الطور

الفصل الثاني: المواد المتغيرة الطور

Phase Change Materials (PCMs)

1-2 مقدمة عن المواد المتغيرة الطور:

تقوم المواد المتغيرة الطور على استخدام خاصية حرارة الانصهار Latent Heat of Fusion في تخزين الطاقة الحرارية. عندما تتصهر هذه المواد أو تتجمد فإنها تمتص أو تُطلق كمية معينة من الحرارة نتيجة هذا التحول الطوري يُستخدم لتخزين الحرارة.

من أشهر المواد المتغيرة الطور هي ماء/جليد، الأملاح المائية (الأملاح الهيدرية) والبوليميرات. وبما أن كثافة الطاقة (كمية الحرارة المُمكن تخزينها في كتلة مُعينة) في أنظمة التخزين الحراري الطوري Latent Heat أعلى من نظيرتها في أنظمة التخزين المحسوس Sensible Heat فإنّ الأولى (التخزين الطوري) تمتاز بصغر الحجم والوزن بالتالي قلة الضياعات عن نظيرتها في الثانية (التخزين المحسوس).

إنّ مواد مثل الماء/جليد والأملاح سهلة الانصهار (Eutectic Salts) كانت قد أُستخدمت في التخزين منذ عشرات السنين، ولعل أقدم تطبيق أُستخدمت فيه المواد المتغيرة الطور للتخزين الحراري Thermal Energy Storage (TES) هو تدفئة المقاعد داخل عربات القطار البريطاني خلال أيام الشتاء في أواخر القرن الثامن عشر حيث تمت تعبئة هذه المادة في حقائب مطاطية أو معدنية، وتم استخدام مادة "ماءات ثيوسلفات الصوديوم الخماسية، Sodium Thiosulfate Penta Hydrate ذات درجة حرارة تحول طوري 44.5°C لهذا التطبيق. ومن التطبيقات الأولى لـ PCMs هو استخدام صفائح تحوي على مواد سهلة الانصهار (يوتيكتكية) (Eutectic Plates) لتخزين البرودة أثناء النقل باستخدام الشاحنات والقطارات في حال كانت البضاعة المنقولة تتطلب المحافظة عليها في جو بارد. والتطبيق الأكثر شهرة هو استخدام الـ PCMs في مجال علوم الفضاء، حيث قامت وكالة ناسا الأمريكية (NASA) National Aeronautics and Space Administration برعاية (تمويل) مشروع يُستخدم فيه المواد المتغيرة الطور للتحكم الحراري بالحزم الإلكتروني

(Thermal Control Of Electronic Packages). إنَّ التطبيق التجريبي الأول الذي أُستخدم فيه الـ PCMs لتخزين البرودة ظهر في أوائل السبعينات من القرن الماضي في كلية تابعة- لجامعة Delaware (جامعة في شرق الولايات المتحدة الأمريكية) تدرس عمليات تحويل الطاقة حيث تولت تصميم وإنشاء مخبر للطاقة الشمسية والذي أصبح يُعرف باسم " Solar One" وهو موجود في مدينة Newarke التابعة لولاية Delaware وقد أُختيرت الدكتور Dr. Maria Telkes -الرائدة في مجال البحث والتطوير للأملح سهلة الانصهار (Eutectic Salts)- كمسؤول مباشر عن برنامج الطاقة الشمسية. إنَّ تصميم Solar One بُني على أساس استخدام عدة أنواع من أنظمة التخزين الحراري التي تعتمد كلها على الماء أو المحاليل المائية حيث تم استخدام محلول ملحي يُسمى خليط غلوبر الملحي (Glauber's Salt Mixture)- والذي ينصهر ويتجمد (يتحول طورياً) عند درجة الحرارة 12.7°C - ضمن التجارب.

وفي أواخر السبعينات والثمانينات من القرن الماضي قامت العديد من الهيئات بعرض مُنتجات تُستخدم المواد المتغيرة الطور للتخزين الحراري الشمسي. فمثلاً، قامت شركة Dow للكيمياويات بتطوير مُنتج ينصهر ويتجمد عند درجة الحرارة 27.2°C ، حيث سُوِّقَ هذا المُنتج وأُستخدم في الصناعات الشمسية في ثمانينيات القرن الماضي. وفي عام 1982 قامت شركة Tranphase System بتشديد أول خزان للبرودة يستخدم الأملاح سهلة الانصهار (Eutectic Salt) للأغراض التجارية أو الصناعية باسم "Asmes 1989".

2-2 خواص المواد المتغيرة الطور (PCMs):

إنَّ المواد المتغيرة الطور (PCMs) يجب أن تتسم بخصائص مُعينة حتى نستطيع استخدامها في التخزين الحراري هذه الخصائص هي:

2-2-1 الخصائص الحرارية:

(1) مجال درجات الحرارة عند التحول الطوري مناسب للتطبيق.

(2) الحرارة الكامنة للتحول الطوري (انتالبي التحول الطوري) ذو قيمة عالية.

(3) موصلية عالية (مقاومة حرارية مُنخفضة) وبالتالي أداء جيد أثناء نقل الحرارة.

إنَّ اختيار الـ PCMs يتم حسب التطبيق المدروس بحيث تكون درجة الحرارة العاملة ضمن مجال التحول الطوري للـ PCMs المُختارة. يجب السعي لكون الانتالبي الحجمي (kI/m^3) للتحول الطوري أكبر مايمكن وذلك من أجل تصغير الأبعاد الهندسية للخران الحراري إلى الحدود الدنيا، كما أنَّ الموصلية الحرارية العالية تُساعد في إنجاز عمليتي الشحن والتفريغ.

2-2-2 الخصائص الفيزيائية:

(1) استقرارية أثناء التحول الطوري.

(2) كثافة عالية.

(3) تغير صغير في الحجم.

(4) ضغط تبخر منخفض.

إنَّ الاستقرارية أثناء التحول الطوري تُساعد في عملية التخزين الحراري، كما أنَّ الكثافة العالية تسمح لنا بتصغير حجم الخزان. أما بالنسبة لصغر تغير الحجم أثناء التحول الطوري و انخفاض قيمة ضغط التبخر عند درجة الحرارة العاملة (درجة حرارة التحول الطوري) فهتان الصفتان تُساعداننا على التقليل من مشاكل الاحتواء (بقاء المادة المتغيرة الطور PCMs ضمن الخزان).

2-2-3 الخصائص الحركية (Kinetic Properties):

(1) عدم حدوث تبريد زائد (Super Cooling).

(2) وجود نسبة تبلور كافية.

إنَّ التبريد الزائد من المشاكل المُزعجة عند التعامل مع الـ PCMs ولا سيما عند استخدام الأملاح المائية (Hydrate Salts). عند حدوث تبريد زائد لبضع درجات فإنَّ ذلك سيُعيق عملية استرجاع الحرارة المُخزنة وعند حدوثه بقيمة حوالي 10°C قد يُعيق عملية الاسترجاع بشكل كامل.

2-2-4 الخصائص الكيميائية:

- (1) مستقر كيميائياً على المدى البعيد.
- (2) متوافق مع المادة المصنوع منها الخزان (لايوجد تفاعل كيميائي مع مادة الخزان).
- (3) غير سامة.
- (4) لا يُوجد خطورة من الحريق.

قد تتغير خواص الـ PCMs مع الزمن بسبب فقدانه للماء أو بسبب تفاعله مع مادة الخزان لذلك يجب الانتباه لهاتين الصفتين (الاستقرارية- التوافق مع مادة الخزان) أثناء اختيار الـ PCMs، ويجب مُراعاة كون المادة غير سامة وغير قابلة للانفجار أو الاشتعال من أجل الحفاظ على السلامة.

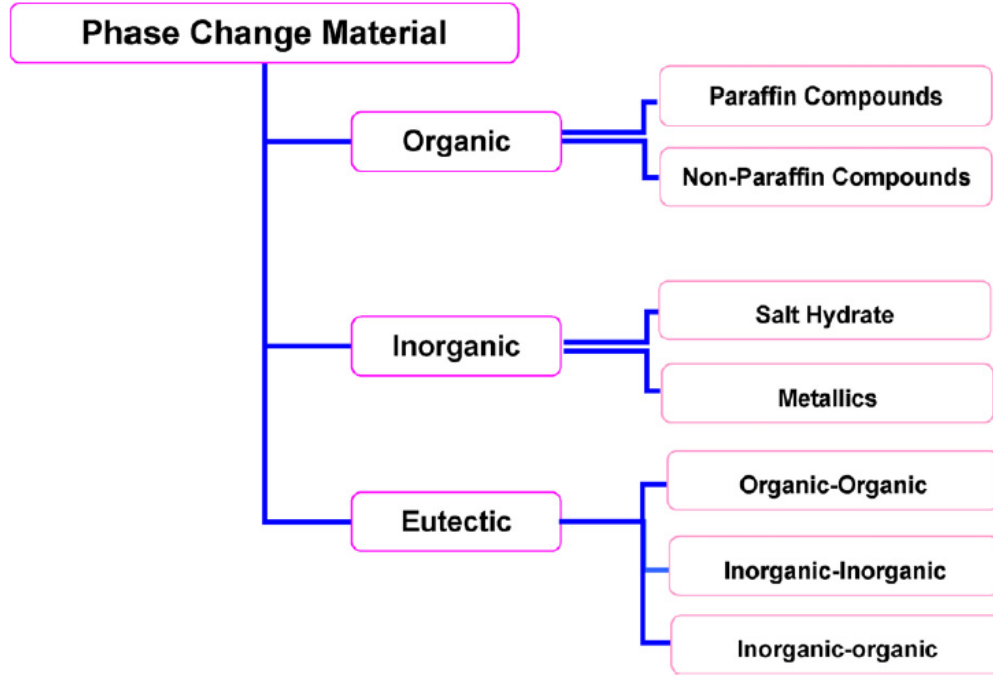
2-2-5 الخصائص الاقتصادية:

- (1) أن تكون المادة متوفرة.
 - (2) قليلة التكلفة.
- إن توفر المادة المُختارة ورخصها تُعد من أهم الصفات التي يجب أن تتمتع بها الـ PCMs من أجل دخولها حيز التطبيق.

2-3 تصنيفات الـ PCMs:

يوجد عدد كبير من المواد المتغيرة الطور PCMs (عضوية، غير عضوية، يوتكتيكية (eutectic)) والتي من الممكن استخدامها حسب درجة الحرارة المطلوبة للتطبيق المدروس.

إنَّ تصنيف الـ PCMs موضح في الشكل (1-2).



الشكل (2-1) يوضح تصنيف المواد المتغيرة الطور PCMs (من المرجع 5)

إنَّ عدد كبير من المواد الكيميائية العضوية وغير العضوية يمكن تعريفها كمواضع متغيرة الطور وفقاً لدرجة حرارة انصهارها (درجة حرارة التحول الطوري) ولكمية حرارة الانصهار (انتالبي التحول الطوري)، ولكن - وباستثناء نقطة التحول الطوري (درجة حرارة التحول الطوري) - فإنَّ معظم المواد المتغيرة طورياً لا تُحقّق المواصفات المثالية المطلوبة التي ذكرناها في الفقرة السابقة (2-1-2)، لذلك لا يوجد مادة واحدة تمتلك مواصفات المادة المثالية كوسيط للتخزين الحراري الطوري، وعليه وعند اختيار مادة للتخزين الطوري ننتقي الأنسب والأصلح لتطبيقنا ثم نحاول تحسين المواصفات السيئة لديها بإضافة مادة أخرى حيث تعمل المادة المضافة على إصلاح هذا الضعف، فعلى سبيل المثال يمكن إضافة البُرادة المعدنية لتحسين الموصلية في مادة متغيرة الطور في حال كانت موصليتها ضعيفة.

بشكل عام يوجد تباين واضح في المواصفات الثيرموفيزيائية (الفيزيائية الحرارية) بين المركبات العضوية والمركبات اللاعضوية الأمر الذي ينعكس على تصميم الخزان الحراري الطوري. وسنناقش هذا الاختلاف بشيء من التفصيل في الفقرات التالية.

2-3-1 المواد المتغيرة الطور ذات الأساس العضوي:

Organic Phase Change Materials

إنَّ المواد المتغيرة الطور ذو الأساس العضوي تُقسم إلى:

بارافينية (Paraffin) - غير بارافينية (Non Paraffin)

2-1-3-2 البارفينات (Paraffin):

إنَّ الشموع البارافينية تتكون في الأغلب من سلاسل طويلة من الألكانات $\text{CH}_3-(\text{CH}_2)-\text{CH}_3$ ، إنَّ تبلور سلاسل الـ $(\text{CH}_3)-$ يُحرّر كمية كبيرة من الحرارة الكامنة، وإنَّ كلاً من كمية الحرارة ودرجة حرارة التحول الطوري تزداد مع زيادة طول السلسلة، كما أنَّ التحول الطوري للبارفينات يتم ضمن مجال كبير -نسبياً- من درجات الحرارة لذلك لا يُستخدم في مجال التخزين الحراري الطوري إلا البارفينات التقنية (Technical Paraffin) والتي يكون فيها مجال درجات حرارة التحول الطوري مُحدد بعناية. تمتاز البارفينات بأنها:

أمنة- ذات وثوقية عالية- قليلة التكلفة- لا تسبب التآكل- تُعتبر خاملة كيميائياً ومستقرة عند درجات حرارة أقل من 500°C - تغير الحجم لها صغير جداً عند التحول الطوري- نسبة التبخر عند التحول الطوري قليلة.

بسبب كل الميزات السابقة فإنَّ الأنظمة التي تستخدم البارفينات كوسيط تخزين تمتاز عادةً بدورات تجمد/ انصهار طويلة جداً (أي طول عمر وسيط التخزين). الجدول (1-2) يوضح الخواص الحرارية لبعض البارفينات التقنية، هذه البارفينات تمتاز بأنَّها خليط من عدة بارافينات نقية تماماً من الزيوت.

الجدول (2-1) يوضح الخواص الحرارية لبعض البارافينات التقنية (من المرجع 5)

Paraffin	Freezing point/ range (°C)	Heat of fusion (kJ/kg)
6106	42-44	189
P116	45-48	210
5838	48-50	189
6035	58-60	189
6403	62-64	189
6499	66-68	189

إنَّ درجة حرارة التحول الطوري للبارافينات تزداد مع زيادة عدد ذرات الكربون فيها والجدول (2-2) يوضح الخواص الحراري للبارافينات تبعاً لعدد ذرات الكربون فيها.

الجدول (2-2) الخواص الحرارية للبارافينات تبعاً لعدد ذرات الكربون فيها (من المرجع 5)

No. of carbon atoms	Melting point (°C)	Latent heat of fusion (kJ/kg)
14	5.5	228
15	10	205
16	16.7	237.1
17	21.7	213
18	28.0	244
19	32.0	222
20	36.7	246
21	40.2	200
22	44.0	249
23	47.5	232
24	50.6	255
25	49.4	238
26	56.3	256
27	58.8	236
28	61.6	253
29	63.4	240
30	65.4	251
31	68.0	242
32	69.5	170
33	73.9	268
34	75.9	269

مما سبق نلاحظ أنَّ للبارافينات العديد من الخواص الجيدة مثل: ملائمة درجة حرارة التحول الطوري لها للعديد من التطبيقات، ومن الناحية الأخرى فإنَّ لها بعض السلبيات أهمها:

✗ انخفاض الموصلية الحرارية.

✗ لا يمكن وضعها في أوعية بلاستيكية.

✗ قابليتها للاشتعال.

2-1-3-2 الـ PCMs ذات الأساس العضوي الغير بارافينية (Non Paraffin):

إنَّ المواد العضوية الغير بارافينية هي أكثر مواد الـ PCMs انتشاراً وأكثرها تنوعاً بالخصائص، كل من هذه المواد لها خصائص مُميزة عن الأخرى على عكس البارافينات التي لجميعها خصائص متشابهة. يمكن أن تُقسَّم المواد العضوية الغير بارافينية المناسبة للتخزين الحراري إلى

❖ استيريات (Esters).

❖ حموض دهنية (Fatty Acids).

❖ كحوليات (Alcohol's).

❖ غلوجيلات (Glycol's).

كما يمكننا تقسيمهم بشكل أقل تفصيلاً إلى:

✓ حموض دهنية.

✓ باقي المواد العضوية الغير بارافينية.

تتصف هذه المواد الأخيرة (المواد العضوية الغير بارافينية عدا الحموض الدهنية) بأنها:

• ذات كمية حرارة تحول طوري كبيرة.

• موصليتها ضعيفة.

• ذات سُمية عالية.

• قابلة للاشتعال.

يوضح الجدول (2-3) مواصفات بعض من هذه المواد.

الجدول (2-3) الخواص الحرارية لبعض المواد العضوية الغير بارافينية (من المرجع 5)

Material	Melting point (°C)	Latent heat (kJ/kg)
Formic acid	7.8	247
Caprilic acid	16.3	149
Glycerin	17.9	198
D-Lactic acid	26	184
Methyl palmitate	29	205
Camphenilone	39	205
Docosyl bromide	40	201
Caprylone	40	259
Phenol	41	120
Heptadecanone	41	201
1-Cyclohexyloctadecane	41	218
4-Heptadecanone	41	197
p-Joluidine	43.3	167
Cyanamide	44	209
Methyl eicosanate	45	230
3-Heptadecanone	48	218
2-Heptadecanone	48	218
Hydrocinnamic acid	48.0	118
Cetyl alcohol	49.3	141
α-Nephthylamine	50.0	93
Camphene	50	238
O-Nitroaniline	50.0	93
9-Heptadecanone	51	213
Thymol	51.5	115
Methyl behenate	52	234
Diphenyl amine	52.9	107
p-Dichlorobenzene	53.1	121
Oxolate	54.3	178
Hypophosphoric acid	55	213
O-Xylene dichloride	55.0	121
β-Chloroacetic acid	56.0	147
Chloroacetic acid	56	130
Nitro naphthalene	56.7	103
Trimyristin	33-57	201-213
Heptaudecanoic acid	60.6	189
α-Chloroacetic acid	61.2	130
Bee wax	61.8	177
Bees wax	61.8	177
Glyolic acid	63.0	109
Glycolic acid	63	109
p-Bromophenol	63.5	86
Azobenzene	67.1	121

Acrylic acid	68.0	115
Dinto toluent (2,4)	70.0	111
Phenylacetic acid	76.7	102
Thiosinamine	77.0	140
Bromcamphor	77	174
Durene	79.3	156
Benzylamine	78.0	174
Methyl brombrenzoate	81	126
Alpha naphthol	96	163
Glautaric acid	97.5	156
<i>p</i> -Xylene dichloride	100	138.7
Catechol	104.3	207
Quinone	115	171
Acetanilide	118.9	222
Succinic anhydride	119	204
Benzoic acid	121.7	142.8
Stibene	124	167
Benzamide	127.2	169.4

أما الحموض الدهنية فإنها تتصف بـ:

- قيمة كمية حرارة التحول الطوري لها أكبر من قيمتها في البارافينات.
- القدرة على إنجاز عدد كبير من دورات التجمد/ انصهار بشكل مستقر.
- إضافة إلى أن عملية التجمد فيها تتم دون تبريد زائد.

إنَّ الصيغة العامة التي تصف جميع الحموض الدهنية هي: $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{2n}\text{COOH}$ وهي تُصنَّف ضمن خانة المواد المتغيرة الطور الجيدة، ولكن ومن الناحية الأخرى فإنَّ تكلفتها أكبر بـ $2.5 \div 2$ مرة من البارافينات التقنية (Technical Paraffin) كما أنَّها تُسبب التآكل. يوضح الجدول (2-4) المواصفات الحرارية لبعض الحموض الدهنية.

الجدول (2-4) الخواص الحرارية لبعض المواد الحموض الدهنية (Fatty Acids) (من المرجع 5)

Material	Formula	Melting point (°C)	Latent heat (kJ/kg)
Acetic acid	CH ₃ COOH	16.7	184
Polyethylene glycol 600	H(OC ₂ H ₂) _n -OH	20-25	146
Capric acid	CH ₃ (CH ₂) ₈ -COOH	36	152
Eladic acid	C ₈ H ₇ C ₉ H ₁₆ -COOH	47	218
Lauric acid	CH ₃ (CH ₂) ₁₀ -COOH	49	178
Pentadecanoic acid	CH ₃ (CH ₂) ₁₃ -COOH	52.5	178
Tristearin	(C ₁₇ H ₃₅ COO)C ₃ H ₅	56	191
Myristic acid	CH ₃ (CH ₂) ₁₂ -COOH	58	199
Palmitic acid	CH ₃ (CH ₂) ₁₄ -COOH	55	163
Stearic acid	CH ₃ (CH ₂) ₁₆ -COOH	69.4	199
Acetamide	CH ₃ CONH ₂	81	241
Methyl fumarate	(CHCO ₂ NH ₃) ₂	102	242

2-3-2 المواد المتغيرة الطور ذات الأساس الغير عضوي:

إنَّ المواد المتغيرة الطور ذو الأساس الغير عضوي تُقسم إلى:

❖ أملاح مائية (Salt Hydrate).

❖ معادن (Metallics).

2-3-2-1 الأملاح المائية (Salt Hydrate):

إنَّ الأملاح المائية هي عبارة عن خليط من أملاح غير عضوية مع الماء وينتج عن هذا الخليط

تشكل بلورات (كريستالات) صلبة نموذجية تُعطى صيغتها العامة بالشكل: AB.nH₂O

إنَّ التحول الطوري صلب/ سائل للأملاح المائية هو بالحقيقة عبارة عن عملية طرح الماء

(الهيدرات Hydration) من الملح أو بعبارة أخرى عملية إمالة، وعلى الرغم من ذلك يوجد

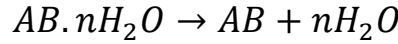
تماثل ثيرموديناميكي بين الإمالة وعملية الانصهار أو التجمد (التحول الطوري).

عادةً عندما تنصهر الأملاح المائية فإنها تتحول إلى نوع آخر من الأملاح المائية وتطرح عدد

من مولات الماء، بمعنى آخر:



وتُكتب الصيغة دون ماء:



وعند نقطة الانصهار (التحول الطوري) تتهدم أو تتفكك البلورات المائية (جزيئات الملح المائي) متحوّلةً إلى أملاح لأمائية وماء أو تتحول إلى أملاح مائية - أخرى تكون عدد جزيئات الماء فيها أقل منها قبل التحول - وماء.

إحدى المشاكل الموجودة عند معظم الأملاح المائية هي أنه عند عملية الانصهار (الإماهة أو طرح الماء) فإن كمية الماء الناتجة لا تكفي لحل البلورات الجديدة المُتشكلة، الأمر الذي يؤدي إلى حدوث تغير في الكثافة بين المركبين (الملح المائي الأصلي والملح المائي الناتج عن عملية الإماهة) مما يؤدي إلى ترسب الملح الناتج عن عملية الإماهة في أسفل الوعاء. كما أن معظم الأملاح المائية تتصف بحدوث تبريد زائد فيها قبل التبلور، ويمكن حل هذه المشكلة بإضافة مواد تُساعد على حدوث التبلور دون حدوث تبريد زائد، كما يوجد إمكانية أخرى لحل هذه المشكلة من خلال الحفاظ على بعض البلورات (الكريستالات) في منطقة باردة لتشكل بذور تبلور للمرحلة التالية. إن الأملاح المائية تُشكل المجموعة الأهم من المواد المتغيرة الطور PCMs، والتي حظيت بالحصة الأكبر من الدراسات في مجال التخزين الحراري الطوري، والخصائص الأكثر جاذبية لهذه المواد و التي جعلتها موضع هذا الاهتمام الكبير هي:

- (1) كمية حرارة التحول الطوري الكبيرة.
- (2) موصليتها العالية نسبياً (حتى أنها تصل لضعف ما هي عليه في البارافينات).
- (3) التغير الحجمي الضئيل أثناء التحول الطوري.
- (4) لآسبب التآكل بشكل كبير.
- (5) إمكانية وضعها ضمن أوعية بلاستيكية دون حدوث أي مشاكل.
- (6) سُمّيتها ضعيفة.
- (7) إضافةً إلى أنها رخيصة كفاية لاستخدامها في التخزين.

يمكن أن تُعرف ثلاث أنواع لسلوك الملح المصهور:

[1] متجانس (Congruent).

[2] غير متجانس (Incongruent).

[3] نصف مناسب (Semi-Congruent).

[1] متجانس (Congruent): يظهر عندما ينحل الملح اللامائي (anhydrous salt) الناتج عن عملية الإماهة- بشكل كامل في الماء عند درجة حرارة الانصهار.

[2] غير مناسب (Incongruent): يظهر عندما لا ينحل الملح الناتج بشكل كامل في الماء عند درجة حرارة الانصهار.

[3] نصف مناسب (Semi-Congruent): تظهر هذه الحالة عندما يخسر الملح المائي بعض جزيئات الماء متحولاً إلى ملح مائي آخر فيه عدد جزيئات الماء أقل من الملح المائي الأولي (ولكن لا يتحول إلى ملح لامائي أي أنه لا يخسر جميع جزيئات الماء) وفي المرحلة الانتقالية وريثما تنتهي عملية التحول يكون لدينا ملحان:

أ- الملح المائي الأصلي. ب- الملح المائي الناتج (ذو عدد جزيئات ماء أقل).

وعليه فإنَّ الملح سوف ينحل بشكل كامل والآخر لا ينحل قيبقى طوران في المحلول سائل وصلب.

أحد المشاكل الأساسي التي تُعاني منها عند استخدام الأملاح المائية (Salt hydrates) في التخزين الحراري كمواحد متغيرة الطور PCMs هو ظهور الحالة الثانية (الانصهار غير المناسب Incongruent) فعند وجود n مول من الماء الغير كافية لحل مول واحد من الملح ينتج عن ذلك محلول غير مشبع عند درجة حرارة الانصهار، والملح الصلب- وبسبب كثافته العالية- يهبط إلى أسفل الوعاء ويصبح غير صالح للاتحاد مع الماء عند العملية العكسية أي عند التجمد. وكنيتجة لعملية الانصهار/ تجمد هذه- الغير عكوسة (Irreversible)- فإنَّ كمية الأملاح المائية في الدارة ستنقص بعد كل عملية شحن وتفريغ.

يمكن حل هذه المشكلة (الانصهار غير المناسب Incongruent Melting) بعدة طرق منها:

(1) باستخدام رجاج ميكانيكي.

(2) بوضع المادة المتغيرة الطور PCMs ضمن كبسولات (Encapsulating) لتقليل من عملية الانفصال.

(3) باستخدام ماء إضافي لصهر الكريستالات الناتجة وعدم السماح بتشكيل محلول مشبع.

(4) إجراء تعديل كيميائي على مكونات المنظومة وتحويل المادة التي تتصهر بشكل غير مناسب (Incongruent) إلى مادة تتصهر بشكل مناسب (Congruent).

يوضح الجدول 2-5 المواصفات الحرارية لبعض الأملاح المائية (Salt Hydrate).

الجدول (2-5) الخواص الحرارية لبعض الأملاح المائية (Salt Hydrate) (من المرجع 5)

Material	Melting point (°C)	Latent heat (kJ/kg)
K ₂ HPO ₄ ·6H ₂ O	14.0	109
FeBr ₃ ·6H ₂ O	21.0	105
Mn(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	25.5	148
FeBr ₃ ·6H ₂ O	27.0	105
CaCl ₂ ·12H ₂ O	29.8	174
LiNO ₃ ·2H ₂ O	30.0	296
LiNO ₃ ·3H ₂ O	30	189
Na ₂ CO ₃ ·10H ₂ O	32.0	267
Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O	32.4	241
KFe(SO ₄) ₂ ·12H ₂ O	33	173
CaBr ₂ ·6H ₂ O	34	138
LiBr ₂ ·2H ₂ O	34	124
Zn(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	36.1	134
FeCl ₃ ·6H ₂ O	37.0	223
Mn(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	37.1	115
Na ₂ HPO ₄ ·12H ₂ O	40.0	279
CoSO ₄ ·7H ₂ O	40.7	170
KF·2H ₂ O	42	162
MgI ₂ ·8H ₂ O	42	133
CaI ₂ ·6H ₂ O	42	162
K ₂ HPO ₄ ·7H ₂ O	45.0	145
Zn(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	45	110
Mg(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	47.0	142
Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	47.0	153
Fe(NO ₃) ₃ ·9H ₂ O	47	155
Na ₂ SiO ₃ ·4H ₂ O	48	168

$K_2HPO_4 \cdot 3H_2O$	48	99
$Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$	48.5	210
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	48.5	202
$Ca(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$	51	104
$Zn(NO_3)_2 \cdot 2H_2O$	55	68
$FeCl_3 \cdot 2H_2O$	56	90
$Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	57.0	169
$MnCl_2 \cdot 4H_2O$	58.0	151
$MgCl_2 \cdot 4H_2O$	58.0	178
$CH_3COONa \cdot 3H_2O$	58.0	265
$Fe(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	60.5	126
$NaAl(SO_4)_2 \cdot 10H_2O$	61.0	181
$NaOH \cdot H_2O$	64.3	273
$Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$	65.0	190
$LiCH_3COO \cdot 2H_2O$	70	150
$Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$	72	155
$Ba(OH)_2 \cdot 8H_2O$	78	265
$Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	89.9	167
$KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$	91	184
$MgCl_2 \cdot 6H_2O$	117	167

2-3-2-1 المعادن (Metallics):

هذا النوع يحتوي على معادن ذات درجة حرارة انصهار منخفضة وعلى معادن سهلة الانصهار (Eutectic Metal). إنَّ هذا النوع لم يأخذ بعد حيز هام ضمن المواد المتغيرة الطور PCMs وذلك بسبب وزنه الكبير، ولكن وعندما يكون الحجم المُتاح للتخزين صغير يصبح هذا النوع من أبرز المرشحين لأنه يمتلك قيمة عالية للحرارة الكامنة للانصهار على واحدة الحجم، إضافةً إلى أنه يتمتع بموصلية عالية جداً مقارنةً مع باقي الأنواع وهذه المواصفة الترموفيزيائية (الفيزيائية الحرارية) تُشكل العلامة الفارقة لهذا النوع.

يوضح الجدول 6-2 المواصفات لحرارية لبعض المواد المتغيرة الطور ذات الأساس المعدني.

الجدول (2-6) الخواص الحرارية لبعض المواد المتغيرة الطور ذات الأساس المعدني (Metallics)
(من المرجع 5)

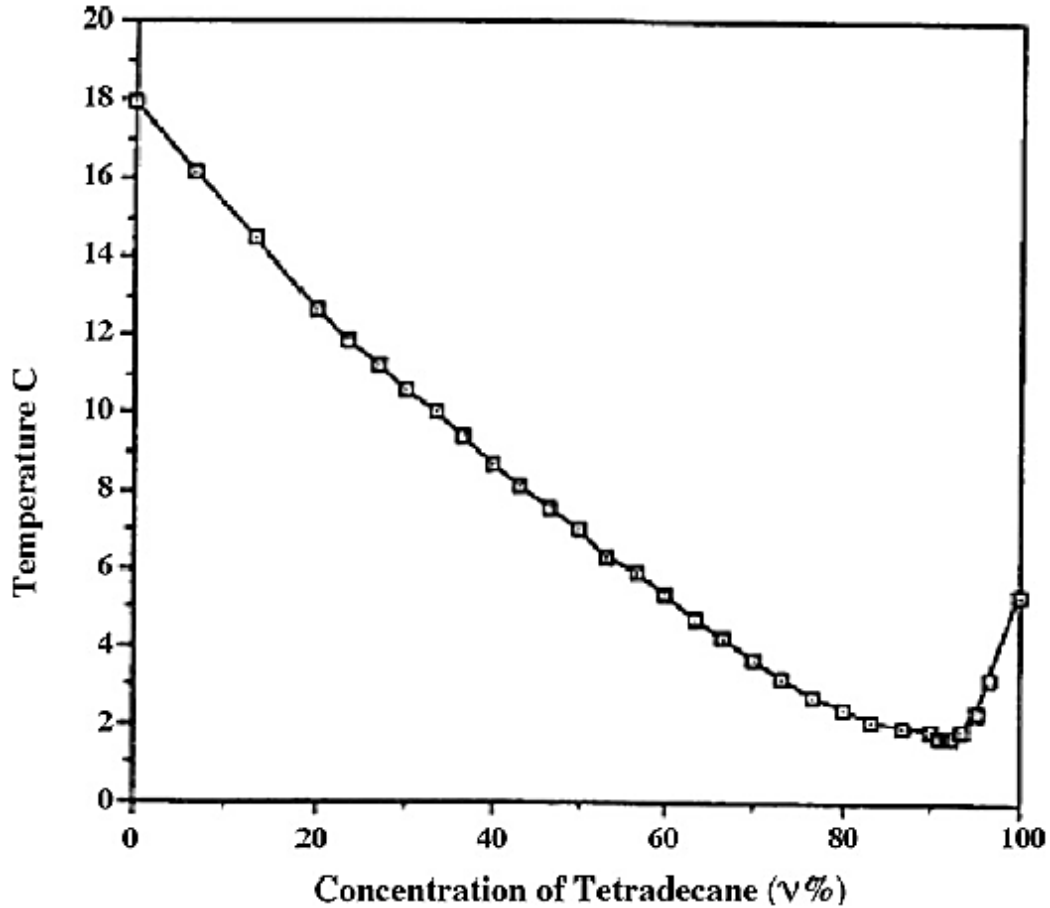
Material	Melting point (°C)	Latent heat (kJ/kg)
Gallium-gallium antimony eutectic	29.8	–
Gallium	30.0	80.3
Cerrolow eutectic	58	90.9
Bi-Cd-In eutectic	61	25
Cerrobend eutectic	70	32.6
Bi-Pb-In eutectic	70	29
Bi-In eutectic	72	25
Bi-Pb-tin eutectic	96	–
Bi-Pb eutectic	125	–

2-3-3 المواد المتغيرة الطور السهلة الانصهار (Eutectics):

هذه المواد هي عبارة عن مزيج من مادتين أو أكثر لا تتفصلان عن بعضهما عند التجمد أو الانصهار ونسب المواد ضمن هذا المزيج تحقق أخفض درجة انصهار.

ملاحظة: سيتم الشرح بشكل تفصيلي عن المواد الـ eutectic باستخدام مُخطط الأطوار في الفصل الثالث.

وكمثال على هذا المزيج عند مزج مادتي الـ Tetradecane (وهي إحدى الألكانات صيغتها $C_{14}H_{30}$ وهي تنصهر عند درجة الحرارة $5.3^{\circ}C$) مع مادة الـ Hexadecane (وهي أيضاً واحدة من الألكانات صيغتها $C_{16}H_{34}$ وهي تنصهر عند درجة الحرارة $17.9^{\circ}C$) يكون المنحني الذي يُعبر درجة حرارة انصهار المزيج تبعاً لنسبة مادة الـ Tetradecane ضمنه كما هو موضح في الشكل 2-2:



الشكل (2-2) العلاقة بين درجة انصهار مزيج مكون من مادتي الـ Hexadecane والـ Tetradecane مع نسبة مادة الـ Tetradecane ضمنه (من المرجع 5)

نلاحظ من الشكل السابق أنه من أجل قيمة معينة لنسبة الـ Tetradecane ضمن المزيج بحوالي 91.67% - حيث تم تحديد هذه القيمة مخبرياً - تكون درجة حرارة انصهار المزيج 1.7°C وهي أقل قيمة لدرجة حرارة الانصهار لهذا المزيج (وهي أقل من درجة حرارة الانصهار لمادتي الـ Tetradecane والـ Hexadecane) وعليه فإن المزيج المكون من 8.33% من الـ Hexadecane و 91.67% من الـ Tetradecane يدعى بالمزيج سهل الانصهار أو المزيج الـ eutectic.

يوضح الجدول (2-7) المواصفات الحرارية لبعض المزائج السهلة الانصهار (eutectic) بعضها عضوي والآخر غير عضوي.

الجدول (7-2) الذي يوضح الخواص الحرارية لبعض المزائج السهلة الانصهار (eutectic) بعضها ذات أساس عضوي والأخرى ذات أساس غير عضوي (من المرجع 5)

Material	Composition (wt.%)	Melting point (°C)	Latent heat (kJ/kg)
CaCl ₂ ·6H ₂ O + CaBr ₂ ·6H ₂ O	45 + 55	14.7	140
Triethylolethane + water + urea	38.5 + 31.5 + 30	13.4	160
C ₁₄ H ₂₈ O ₂ + C ₁₀ H ₂₀ O ₂	34 + 66	24	147.7
CaCl ₂ + MgCl ₂ ·6H ₂ O	50 + 50	25	95
CH ₃ CONH ₂ + NH ₂ CONH ₂	50 + 50	27	163
Triethylolethane + urea	62.5 + 37.5	29.8	218
Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O + Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	47 + 53	30	136
CH ₃ COONa·3H ₂ O + NH ₂ CONH ₂	40 + 60	30	200.5
NH ₂ CONH ₂ + NH ₄ NO ₃	53 + 47	46	95
Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O + NH ₄ NO ₃	61.5 + 38.5	52	125.5
Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O + MgCl ₂ ·6H ₂ O	58.7 + 41.3	59	132.2
Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O + MgCl ₂ ·6H ₂ O	50 + 50	59.1	144
Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O + Al(NO ₃) ₃ ·9H ₂ O	53 + 47	61	148
CH ₃ CONH ₂ + C ₁₇ H ₃₅ COOH	50 + 50	65	218
Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O + MgBr ₂ ·6H ₂ O	59 + 41	66	168
Napthalene + benzoic acid	67.1 + 32.9	67	123.4
NH ₂ CONH ₂ + NH ₄ Br	66.6 + 33.4	76	151
LiNO ₃ + NH ₄ NO ₃ + NaNO ₃	25 + 65 + 10	80.5	113
LiNO ₃ + NH ₄ NO ₃ + KNO ₃	26.4 + 58.7 + 14.9	81.5	116
LiNO ₃ + NH ₄ NO ₃ + NH ₄ Cl	27 + 68 + 5	81.6	108

2-4 كيفية اختيار الـ PCMs المناسب لتطبيقات التخزين الحراري

والتطبيقات الشمسية:

لا يوجد مادة تمتلك جميع الخواص المثالية كمادة متغيرة الطور PCMs، واختيار الـ PCMs يتناسب مع التطبيق بحد ذاته ويحقق أفضل ما يمكن من الخواص المطلوبة بعبارة أخرى نبدأ بتحديد التطبيق المطلوب ثم نسعى لاختيار الـ PCM الأكثر ملائمة لهذا التطبيق (والذي من الممكن أن يكون غير مناسب على الإطلاق لتطبيق آخر)، وبعد اختيار الـ PCM المناسبة لتطبيقنا لا بُد من التعامل مع بعض الخواص السلبية التي تتسم بها المادة المختارة وذلك -وكما

ذكرنا سابقاً- لعدم وجود PCM كاملة من حيث الخواص؛ فمثلاً: تمتلك مادة ثلاثي خلات الصوديوم المائي قيمة عالية للحرارة الكامنة للانصهار وتبلغ (264-289 KJ/Kg) ودرجة حرارة الانصهار لهذه المادة ($58-58.4^{\circ}\text{C}$)، ولكن ومن الناحية الأخرى تُعاني هذه المادة من التبريد الزائد عند التحول الطوري وهذه الصفة تمنع استخدام هذه المادة في التطبيقات الكبيرة الحجم، ومع ذلك يجري حالياً العمل في هذه المادة (ثلاثي خلات الصوديوم) على التخلص من هذه الصفة السلبية أو التقليل من أثرها.

إنَّ أهم البارامترات الواجب مُراعاتها عند اختيار الـ PCM المناسب لتطبيقات التخزين الحراري والتطبيقات الشمسية هي درجة حرارة التحول الطوري؛ فعلى سبيل المثال: عند إجراء محاكاة لجدار يحوي PCM يُستخدم في تخزين الحرارة (ضمن بناء) من الشمس مباشرةً (PCM wall as a TES in a passive direct gain solar) أفضت هذه المحاكاة إلى أنَّ درجة حرارة التحول الطوري المُثلى يجب أن تُحدَّد تبعاً لدرجة حرارة الوسط المحيط وذلك لتحقيق أعلى أداء لنظام التخزين هذا، وأي ابتعاد عن درجة حرارة التحول الطوري المُثلى سيؤدي إلى إنقاص سعة التخزين الحراري الطوري (latent heat storage capacity)، رقمياً: في هذا المثال عند الابتعاد عن درجة حرارة التحول الطوري المُثلى بمقدار 3°C سيؤدي ذلك إلى إنقاص سعة التخزين (أو إلى حدوث ضياعات) بمقدار 50%.

إنَّ البارامترات العملية الأخرى المهمة أثناء اختيار الـ PCM من أجل تطبيقات التخزين الحراري والتطبيقات الشمسية هي الموصفات الثيرموفيزيائية (الفيزيائية) للـ PCM المُختارة مثل:

- ✓ الحرارة الكامنة للتحول الطوري.
- ✓ السعة الحرارية للطورين الصلب والسائل.
- ✓ الموصلية الحرارية للطورين الصلب والسائل.
- ✓ الكثافة للطورين الصلب والسائل.

و من العوامل المهمة أثناء اختيار الـ PCM الانتباه إلى وجود مشاكل التبريد الزائد (Supercooling) أو تشكل الأنوية (Nucleation) في الـ PCM المُختارة؛ إنَّ العديد من المواد المتغيرة الطور PCMs تُعاني من مشكلة التبريد الزائد وفي هذه المواد عندما تسعى المادة

إلى التحول للطور الصلب (التجمد) فإن درجة الحرارة ستهبط إلى ما دون درجة حرارة التحول الطوري (أو درجة حرارة الانصهار) قبل أن تبدأ المادة بالتجمد، وعند الشروع بالعملية العكسية (الانصهار) فإن درجة الحرارة ستصل إلى درجة حرارة التحول الطوري (درجة حرارة الانصهار) وسيبقى جزء من المادة بالحالة الصلبة (ما زالت متجمدة ولم تنصهر)، وبعبارة أبسط فإن المواد التي تُعاني من مشكلة التبريد الزائد غير مرغوب فيها في تطبيقات التخزين الحراري الطوري (Latent TES) لأنها تمنع استرداد الحرارة المخزنة فيها، وعليه يُفضل استخدام المواد التي تُعاني من مشكلة تشكل الأنوية (Nucleation) على المواد التي تُعاني من مشكلة التبريد الزائد (Supercooling) - من أجل تطبيقات التخزين الحراري الطوري (Latent TES) - إذا كان لا بُد من الاختيار بينهما.

ملاحظة: جميع الأرقام الواردة في الفقرات السابقة مأخوذة من المرجع (5).

2-5 بعض الأمثلة عن استخدام الـ PCMs في تطبيقات التخزين

الحراري والتطبيقات الشمسية:

يوجد العديد من النظريات المختلفة لاستخدام أنظمة التخزين مع الـ PCMs من أجل تدفئة أو تكييف المباني هذه النظريات تشرحها المفاهيم التالية:

- تُستخدم الـ PCMs التي تنصهر (تتحول طورياً) عند درجات حرارة ($5 \div 15^\circ\text{C}$) من أجل تخزين البرودة، حيث نقوم بتجميد هذه المواد ليلاً (عندما تكون أسعار الكهرباء بالحدود الدنيا بسبب الابتعاد عن فترة ذروة الطلب) ثم نُعيد صهرها أثناء النهار لتبريد المبنى.
- تُستخدم الـ PCMs التي تنصهر (تتحول طورياً) عند درجات حرارة قريبة من درجة حرارة الغرفة (مثل مادة $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ التي تنصهر عند درجة حرارة 27°C) بشكل مُدمج مع عناصر البناء من أجل تعديل التأرجح في درجة حرارة الغرفة الناجم عن تقلبات درجة حرارة الوسط المحيط.

- إنَّ الأنظمة الشمسية لتسخين الهواء تستخدم الـ PCMs التي تنصهر عند درجات حرارة $25 \div 30^\circ\text{C}$ (مثل مادة $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ التي تنصهر عند درجة حرارة 27°C) لتأمين التسخين في الليل وتأمين تسخين أولي في النهار.
- أيضاً الأنظمة الشمسية لتسخين الهواء تستخدم الـ PCMs التي تنصهر عند درجات حرارة $40 \div 60^\circ\text{C}$ (مثل eutectic $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} - \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ والذي ينصهر عند درجة حرارة 58°C - وطبعاً هي أقل درجة حرارة انصهار لهذا المزيج لأننا نختار المزيج سهل الانصهار (eutectic) أي أننا نختار نسبة للمزج توافق أقل درجة حرارة انصهار كما تم الشرح في الفقرة 2-3-3) لتأمين التسخين في الليل والنهار.
- يمكن استخدام الـ PCMs من أجل تأمين تسخين أولي لمياه الاستخدام المنزلي (Domestic hot water) من خلال خزان مملوء بكبسولات (encapsulated) من الـ PCMs والتي تنصهر عند درجات حرارة $55 \div 70^\circ\text{C}$ (مثل eutectic $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} - \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ والذي ينصهر عند درجة حرارة 58°C).
- الأنظمة الشمسية لتسخين المياه يمكن أن نستخدم ضمن غلافها من الداخل أو ضمن قاعدتها من الداخل أيضاً مواد PCMs والتي تنصهر عند درجات حرارة $60 \div 95^\circ\text{C}$ (مثل $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ والذي ينصهر عند درجة حرارة 89°C).
- المركّزات الشمسية يمكن أن تستخدم الـ PCMs التي تنصهر عند درجات حرارة $100 \div 175^\circ\text{C}$ (مثل $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ والذي ينصهر عند درجة حرارة 117°C - وهنا استخدمنا نفس المادة في التطبيق السابق ولكن بنسب مزج مختلفة لذلك حصلنا على درجة حرارة انصهار مختلفة-) هذه المركّزات تُستخدم لقيادة دارة امتصاصية لتكييف الهواء.
- يُمكن استخدام الـ PCMs التي تنصهر عند درجات حرارة أعلى من 25°C من أجل تسخين المباني في فترات ذروة استهلاك الكهرباء بعد أن يتم شحن الـ PCMs في الفترات الأخرى (الفترات المُغايرة لفترة ذروة الاستهلاك).

الفصل الثالث:

الحل التحليلي

الفصل الثالث: الحل التحليلي

Analytical Solution

3-1 مقدمة نظرية:

إن ظاهرتا التجمد والانصهار تترافقان عادةً في الطبيعة مع الظواهر الثلجية (البرد-هطول الثلج-تشكل الجليد على أجنحة الطائرات) أو في المسطحات المائية أو في القطبين وقمم الجبال، كما أن هاتين الظاهرتين (التجمد والانصهار) يظهران في العديد من التقانات مثل: حفظ الأطعمة (ASHRAE,1990,1993)، التبريد، التكييف، آلات تكوين الثلج للترزج، حفظ الأعضاء الحية، التطبيقات الصناعية (مثل: السباكة، صناعة القوالب، الطلاءات، اللحام، القص والتشكيل بالأشعة، إنماء الكريستالات) (Tanasa Waand Liori 1992, Chenge and Ski) وكذلك في التخزين الحراري الذي يستخدم التحول الطوري (1991, Flemings 1974)، وكذلك في التخزين الحراري الذي يستخدم التحول الطوري سائل/ صلب للمواد متغيرة الطور (PCMs) (Dewinter 1990).

في الأنظمة الثيرموديناميكية البسيطة (مثل الأنظمة الخالية من: الحقول الخارجية، أو التوتر السطحي، أو.....الخ) للمواد النقية يظهر التجمد والانصهار عند درجة حرارة وضغط معينين (لكل ضغط درجة حرارة مرافقة). وبشكل عام يكون تأثير الضغط أقل أهمية من درجة الحرارة (بما أن معظم الحالات المدروسة تكون عند ضغط ثابت (الضغط الجوي)) لذلك تُستخدم عادةً درجة الحرارة للتعبير عن هذا التحول الطوري.

أما في المواد غير النقية يُضاف إلى درجة الحرارة والضغط تأثير تركيب هذه المواد (حيث يُصبح هناك اختلاف بين درجة حرارة التجمد ودرجة حرارة الانصهار).

كما أن ظاهرتا التجمد والانصهار حساستين جداً للتأثيرات الخارجية كالحقول الكهربائية والمغناطيسية ووجود هكذا تأثيرات تجعل الأنظمة الثيرموديناميكية المدروسة بالغة التعقيد.

إن بارمترات التوازن الثيرموديناميكي للمنظومة أثناء التحول الطوري يمكن حسابها من معرفة أن: [طاقة جيبس الحرة (المولية الجزيئية) أو الطاقة الكيميائية الكامنة لكل مكون في الطورين يجب أن تكون متساوية].

واحدة من أهم النتائج لاستخدام هذا المبدأ في المنظومات البسيطة المكونة من مادة واحدة هي معادلة كلايرون التي تعطي العلاقة بين درجة الحرارة والضغط أثناء التحول الطوري وهي:

$$\frac{dp}{dT} = \frac{h_{sl}}{T\Delta v} \quad (3 - 1)$$

حيث: h_{sl} : انتالبي التحول الطوري من الطور A إلى الطور B (يساوي $h_B - h_A$).

Δv : الاختلاف في الحجم النوعي بين الطور A والطور B $(v_B - v_A)$.

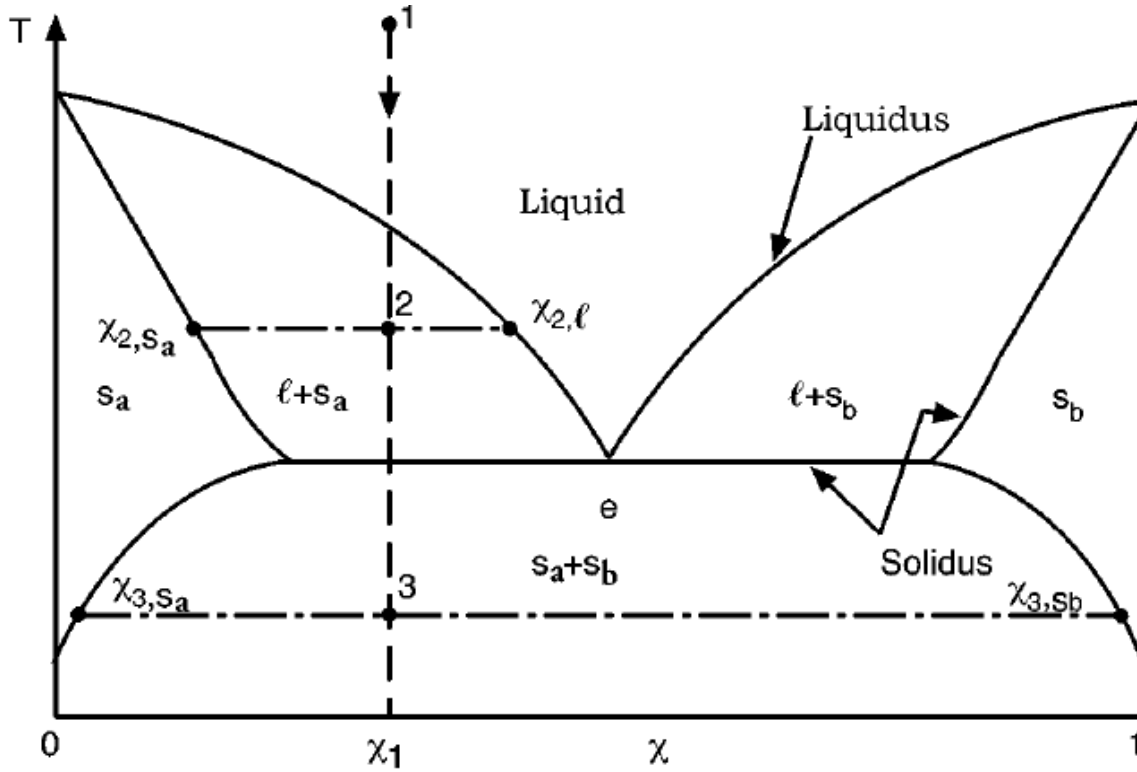
إذا افترضنا أن الطور A هو الطور الصلب والطور B هو الطور السائل تكون قيمة h_{sl} موجبة.

وبدراسة المعادلة (3 - 1) نلاحظ أنه عند زيادة الضغط تزداد درجة حرارة الانصهار إذا كان الـ $\Delta v > 0$ (أي عندما يكون الحجم النوعي للطور السائل أكبر منه للطور الصلب كما هو الحال في مادة القصدير مثلاً)؛ ولكن إذا كان الـ $\Delta v < 0$ فإن زيادة الضغط ستؤدي إلى نقصان درجة حرارة الانصهار (كما هو الحال من أجل الماء).

في بعض المواد التي تُدعى بالمواد الزجاجية (glassy) يُرافق التحول الطوري سائل/ صلب تغيير تدريجي بالمواصفات الفيزيائية من الطور الأول إلى الطور الثاني ففي هذه المواد وعند التحول من الطور السائل إلى الطور الصلب نلاحظ أن اللزوجة تزداد بشكل تدريجي.

ومن الناحية الأخرى هناك مواد مثل المواد النقية والجليد والخلائط سهلة الانصهار تمتلك حدوداً واضحة بين الطور الصلب والطور السائل وعند حدوث التحول الطوري في هذه المواد تحدث قفزة في قيم الخواص الفيزيائية لها، هذه الحالة أسهل في الدراسة و التحليل لذلك فهي مطروقة ومتناولة بشكل أكبر في الأدبيات (الأبحاث النظرية الأساسية)، أما التحول التدريجي غالباً ما يظهر في الخلائط (مزيج من عدة مواد).

بتأمل منحني الأطوار الواضح في الشكل (3-1) والذي يصف منحني الأطوار لمزيج مكون من مادتين a و b.



الشكل (3-1) منحني الأطوار صلب/ سائل لمزيج ثنائي (من المرجع 11)

χ : تمثل تركيز المادة b في الخليط، الرمز السفلي L يشير إلى الطور السائل، و S يشير إلى الطور الصلب.

S_a : يدل على طور صلب مؤلف من بناء شبكي من المادة a ولكن يتضمن بعض الجزيئات من المادة b، وكذلك S_b : يدل على طور صلب مؤلف من بناء شبكي من المادة b ولكن يتضمن بعض الجزيئات من المادة a.

- خط الإسالة (Liquidus) يشير إلى الخط الذي تقع فوقه منطقة السائل النقي أي المنطقة التي يوجد فيها طور سائل فقط مكون من المادتين a و b.
- خط التصلب (Solidus) هو الخط الذي يفصل منطقة الطور الصلب النهائي (وهو الطور الصلب المكون من المادتين a و b) عن باقي المناطق، هذه المناطق هي:
- منطقة مزيج صلب/ سائل.

- منطقة طور صلب مكون من المادة a فقط (S_a).
- منطقة طور صلب مكون من المادة b فقط (S_b).

لمزيد من التوضيح، نفرض نقطة (1) في منطقة الخليط السائل المتجانس والموصوفة بنسبة تركيز χ_1 ودرجة حرارة T_1 (كما هو موضح في الشكل 3-1)، وتُبرد (نتبع الخط المتقطع نزولاً) مع الحفاظ على نسبة تركيز ثابتة (χ_1). عندما تهبط الحرارة لأدنى من خط الإسالة، يبدأ التجمد، ويتولد مزيج من السائل والطور الصلب للمادة a (S_a).

كل مزيج مكون من طورين يُدعى **منطقة هلامية (Mushy Zone)**.

عند النقطة (2) في تلك المنطقة حصة الطور الصلب هي $\chi_{2,sa}$ من المادة a، وحصة الطور السائل هي $\chi_{2,L}$ من المادة b. النسبة الكتلية للطور الصلب S_a إلى الطور السائل تُحدد باستخدام قاعدة الأطوار وتكون عند النقطة (2):

$$\frac{\chi_{2,L} - \chi_2}{\chi_2 - \chi_{2,sa}}$$

وإذا تابعتنا التبريد إلى أسفل خط التجمد. فرضاً للنقطة (3). نحصل على خليط صلب (أو سبيكة alloy) من S_a و S_b ، يحتوي على $\chi_{3,sa}$ من المادة a و $\chi_{3,sb}$ من المادة b، والنسبة الكتلية من الطور S_a إلى الطور S_b تُحدد مجدداً بقاعدة الأطوار وقيمتها عند النقطة (3):

$$\frac{\chi_{3,sb} - \chi_3}{\chi_3 - \chi_{3,sa}}$$

نلاحظ على المخطط وجود نقطة مميزة وهي النقطة (e) وهي توافق التركيز χ_e يتميز المزيج ذو تركيز χ_e بأنه يتحول من الطور السائل إلى الطور الصلب دون المرور بحالة هلامية (Mushy Zone) يُدعى هذا التركيز بالتركيز سهل الانصهار (Eutectic Concentration) والمزيج الصلب (السبيكة) الناتج عنه يُدعى بـ السبيكة سهلة الانصهار (Eutectic).

إنَّ وجود منطقة فيها مزيج من طورين وتبعيتها لدرجة الحرارة والتركيز وحصة كل طور في المزيج يجعل من تحليل انتقال الحرارة ضمن هذه الشروط مسألة بالغة التعقيد، ويتطلب حلاً متزامناً (Simultaneous) لمعادلات انتقال الحرارة والكتلة. علاوةً على ذلك، فإن تجمد السائل لا يتم عادةً على شكل سطح مستوي.

إنَّ تبلور الطور الصلب يتم في بعض المناطق المميزة في السائل، أو على السطوح الباردة، أو أثناء عملية التجمد تنمو الكريستالات بأشكال معقدة تُدعى التغصنات (Dendrites).

كل هذه الأسباب سابقة الذكر تجعل الشكل الهندسي المدروس بالغ التعقيد وتحديد الموديل الرياضي الناظم له عملية غاية في الصعوبة.

إنَّ لجريان الطور السائل دور كبير في بداية وأثناء عمليتي الانصهار والتجمد. يمكن أن يكون هذا الجريان قسري، مثل تجمد السائل المتدفق عبر أنابيب باردة، ويمكن أن يكون الجريان طبيعي عند حدوث فرق في كثافة السائل بسبب درجة الحرارة أو عند حدوث فرق في التركيز.

من الجدير بالملاحظة أنَّ التحول الطوري يؤثر على الجريان الأصلي مثل تجمد السائل أثناء مروره ضمن أنابيب باردة الأمر الذي يؤدي إلى حدوث اختناق للسائل أثناء جريانه. إنَّ التعامل مع المسألة ضمن هذه الظروف يولد ارتباطاً قوياً بين علم انتقال الحرارة وعلم آلات الجريان بالإضافة إلى علم انتقال الكتلة في حال وجود أكثر من مادة، ومعالجة مثل هذه الحالات يجب أن تتم من خلال الموديل المناسب الذي يُراعى ضمنه قوانين:

الاستمرارية - انحفاظ كمية الحركة - انحفاظ الطاقة - انحفاظ الكتلة - معادلات الحالة.

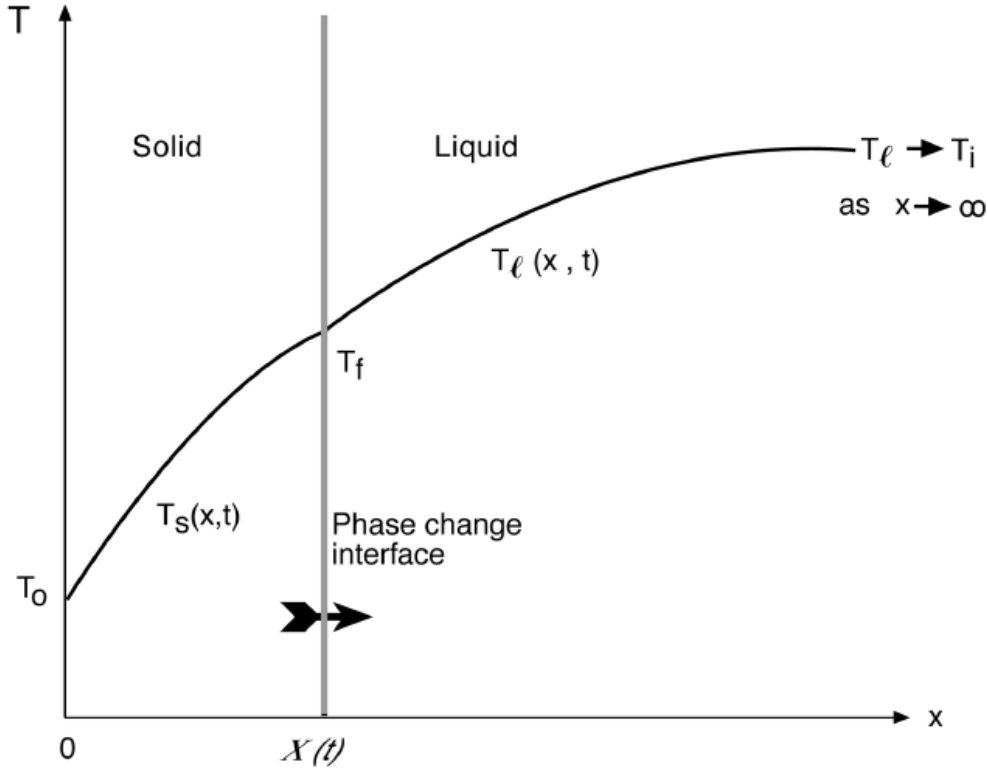
والتي يجب أن تُحل بشكل مُتزامن (Simultaneously).

3-2 تجمد وانصهار المواد النقية:

إنَّ الهدف من هذه الفقرة هو إيجاد حل رياضي (تحليلي) لظاهرة التجمد (الانصهار) ولكن ومن أجل تبسيط هذا الحل سنفترض أنَّ المسألة أحادية البُعد و التعامل سيكون مع مادة نقية ودون وجود أثر للجريان (انتقال الحرارة بالحمل مُهمَل) (حيث تمثل الفرضيات السابقة شروط ستيفان) وذلك من أجل التعمق في ظاهرة التجمد وإيجاد البارامترات المفتاحية وكذلك إيجاد الحل التحليلي لهذه المسألة.

في نموذج التجمد الموضح في الشكل (3-2) لدينا جسم نصف لانهائي الطول مكون من مادة نقية وهو في البداية بالحالة السائلة وذي درجة حرارة T_i حيث: $T_f < T_i$ درجة حرارة التجمد.

عند زمن $t = 0$ درجة حرارة السطح عند $x = 0$ (سطح التبريد) تنخفض فجأة إلى $T_f > T_0$ حيث: T_0 تمثل درجة حرارة سطح التبريد وتبقى قيمة T_0 ثابتة مع مرور الزمن، وعليه سيبدأ السائل بالتجمد عند $x = 0$ ويتحرك سطح التجمد هذا مع مرور الزمن:



الشكل (3-2) تجميد جسم سائل نصف لانهازي الطول من خلال انتقال الحرارة بالتوصيل في كلا الطورين (من المرجع 11)

نلاحظ في هذا الشكل أن الطور الصلب (المُتجمد) يقع على يسار السطح الفاصل والطور السائل يقع على يمين السطح الفاصل كما أن السطح الفاصل نفسه يتحرك مع مرور الزمن باتجاه اليمين (باتجاه الموجب للمحور x)، وكما ذكرنا سابقاً ومن أجل التبسيط فإن انتقال الحرارة المدروس فقط بالتوصيل (الحمل والإشعاع مهملين).

في الطور السائل: معادلة انتقال الحرارة العابرة بالتوصيل هي :

$$\frac{\partial T_L(x, t)}{\partial t} = \alpha_L \frac{\partial^2 T_L(x, t)}{\partial x^2} \quad \text{in } X(t) < x < \infty \quad \text{for } t > 0 \quad (3-2)$$

$$T_L(x, t) = T_i \quad \text{in } x > 0, \quad \text{at } t = 0 \quad (3-3)$$

حيث α_L : الانتشارية الحرارية للطور السائل، والشروط الحدية والابتدائية هي:

$$T_L(x \rightarrow \infty, t) \rightarrow T_i \quad \text{for } t > 0 \quad (3-4)$$

في الطور الصلب: معادلة انتقال الحرارة العابر بالتوصيل هي :

$$\frac{\partial T_s(x, t)}{\partial t} = \alpha_s \frac{\partial^2 T_s(x, t)}{\partial x^2} \quad \text{in } 0 < x < X(t) \quad \text{for } t > 0 \quad (3-5)$$

حيث α_s : الانتشارية الحرارية للطور الصلب، والشروط الحدية هي:

$$T_s(0, t) = T_o \quad \text{for } t > 0 \quad (3-6)$$

بالحفاظ على الشروط الحدية والأخذ بعين الاعتبار استمرارية درجة الحرارة عند السطح الفاصل وبعد تطبيق معادلة التوازن الحراري (الطاقي) على السطح الفاصل نجد:

$$T_L[X(t)] = T_s[X(t)] = T_f \quad \text{for } t > 0 \quad (3-7)$$

$$K_s \left(\frac{\partial T_s}{\partial x} \right)_{[X(t)]} - K_L \left(\frac{\partial T_L}{\partial x} \right)_{[X(t)]} = \rho h_{sl} \frac{dX(t)}{dt} \quad \text{for } t > 0 \quad (3-8)$$

حيث: K_L, K_s : هي الموصلية الحرارية للطورين الصلب والسائل على التوالي، ρ : الكثافة (وقد فُرضت هنا نفسها للطورين الصلب والسائل من أجل التبسيط)، h_{sl} : انتالبي التحول الطوري (انتالبي التجمد).

في المعادلة (3-8) نلاحظ في الطرف الأيسر وجود حدين يمثلان التدفق الحراري الذي يتم بالتوصيل عبر السطح الفاصل من الطور السائل إلى الطور الصلب، وإنَّ مصونية الطاقة (مبدأ حفظ الطاقة) عند السطح الفاصل تقضي بأنَّ مجموع التدفقات الحرارية التي تُغادر السطح الفاصل يجب أن تساوي كمية الحرارة المتولدة عن التحول الطوري (الحرارة الكامنة) هذه الكمية مُعبَّر عنها في المعادلة (3-8) بالطرف الأيمن.

إنَّ الحل التحليلي للمعادلات من (2 - 3) إلى (8 - 3) يقودنا للحصول على التوزيع الحراري في كلا الطورين الصلب والسائل:

$$T_L(x, t) = T_i - (T_i - T_f) \frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha_L t}}\right)}{\operatorname{erfc}(\lambda\sqrt{\alpha_s/\alpha_L})} \quad (3 - 9)$$

$$T_s(x, t) = T_o + (T_f - T_o) \frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha_s t}}\right)}{\operatorname{erf}\lambda} \quad (3 - 10)$$

حيث: erfc , erf : هما تابع الخطأ ومتمم تابع الخطأ على التوالي.

أما λ : فهو ثابت يُحسب من المعادلة التالية:

$$\frac{e^{\lambda^2}}{\operatorname{erf}\lambda} - \frac{K_L}{K_s} \sqrt{\frac{\alpha_s}{\alpha_L}} \frac{T_i - T_f}{T_f - T_o} \frac{e^{(\alpha_s/\alpha_L)\lambda^2}}{\operatorname{erfc}\left(\lambda\sqrt{\frac{\alpha_s}{\alpha_L}}\right)} = \frac{\lambda\sqrt{\pi}}{Ste_s} \quad (3 - 11)$$

حيث: Ste_s : هو عدد ستيفان وهو عدد لا بُدعي يُمثل النسبة بين الحرارة المحسوسة والحرارة الكامنة وهو يُعطى بالعلاقة:

$$Ste_s = \frac{c_s(T_f - T_o)}{h_{sl}} \quad (3 - 12)$$

وفي المعادلة السابقة c_s : السعة الحرارية للطور الصلب.

إنَّ المعادلة (11 - 3) موجودة في الكثير من المراجع وتغطي العديد من الحالات وحل هذه المعادلة يتم بواسطة العديد من البرمجيات الشهيرة (سنقوم في هذه الأطروحة باستخدام برنامج Math Cad 14 لحل هذه المعادلة).

إنَّ حل المعادلات من (2 - 3) إلى (8 - 3) يُعطينا أيضاً العلاقة الرياضية التي تُحدد موقع السطح الفاصل في كل لحظة زمنية وهي:

$$X(t) = 2\lambda(\alpha_s t)^{1/2} \quad (3 - 13)$$

حيث λ : كما ذكرنا سابقاً تُحسب من العلاقة (11 - 3)، إنَّ العلاقة (13 - 3) تُفيد أيضاً في حساب مُعدل التجمد أي سرعة حركة السطح الفاصل (سرعة انتشار الطور الصلب ضمن الطور السائل) وذلك بعد اشتقاق العلاقة (11 - 3) بالنسبة للزمن فنجد:

$$\frac{dX(t)}{dt} = \lambda \alpha_s^{1/2} t^{-1/2} \quad (3 - 14)$$

ملاحظة: جميع المعادلات السابقة مأخوذة من المرجع (9)

3-3 الدراسة التحليلية لتجمد الماء النقي وفق شروط ستيفان:

تهدف الدراسة التحليلية إلى تحديد الزمن اللازم لإتمام عملية التجمد وتحديد سرعة انتشار الطور الصلب ضمن الطور السائل وذلك باستخدام المعادلات الرياضية النازمة لهذه الظاهرة وفق الشروط المفروضة، وكما ذكرنا في الفقرة 3-2 فإن المعادلات الرياضية المطلوبة (وفق شروط ستيفان) هي المعادلات من 3-11 إلى 3-14، حيث نقوم في البداية بحساب عدد ستيفان باستخدام المعادلة 3-12 ثم نحسب قيمة الثابت λ باستخدام المعادلة 3-11 وبعدها نعوض في المعادلة 3-13 لحساب الزمن اللازم لتجمد سماكة معينة من الخزان حيث تؤول هذه المعادلة إلى الشكل:

$$t = \frac{1}{4\alpha_s} \frac{x^2}{\lambda^2} \quad (3 - 15)$$

وقد تم تحويل المعادلة إلى هذا الشكل لأنَّ المطلوب لدينا في هذه المسألة (ومن أجل تطبيقات التخزين الحراري الطوري) معرفة الزمن اللازم للحصول على سماكة معينة من الجليد، وبعد إنجاز هذه المرحلة نقوم بحساب سرعة الانتشار (أو تحديد تابع السرعة بدلالة الزمن) باستخدام المعادلة 3-14.

والجدول التالي يوضح المواصفات التيرموفيزيائية (الفيزيا حرارية) للماء النقي والبارمترات التي سنعوضها في المعادلات آنفة الذكر لإيجاد الحل المطلوب (المعادلات من 3-11 إلى 3-15):

الجدول (3-1) المواصفات الثيرموفيزيائية للماء النقي والبارامترات المطلوبة لحل المعادلات السابقة

الرمز	دلالتة	قيمتة
K_L	الموصلية الحرارية للماء السائل	0.6 W/m.K
K_S	الموصلية الحرارية للجليد	2.22 W/m.K
α_L	الانتشارية الحراري للماء السائل	$0.14 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{S}$
α_S	الانتشارية الحراري للجليد	$1.2 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{S}$
T_i	درجة الحرارة الابتدائية للماء	300 K
T_f	درجة حرارة التجمد	273.15 K
T_o	درجة حرارة سطح التبريد	265 K (سيتم شرح اختيارها في الفقرة التالية)
c_s	السعة الحرارية للجليد	4180 J/kg.K
h_{sl}	انتالبية التحول الطوري	334000 J/kg.K

وبعد الحل والتعويض نجد (حيث تم الحل باستخدام برنامج EES 2012 وباستخدام برنامج Math Cad 14 والكود (Code) المستخدم في كلا البرنامجين موجودين في الملحق (1) والملحق (2) على الترتيب) وكانت النتائج:

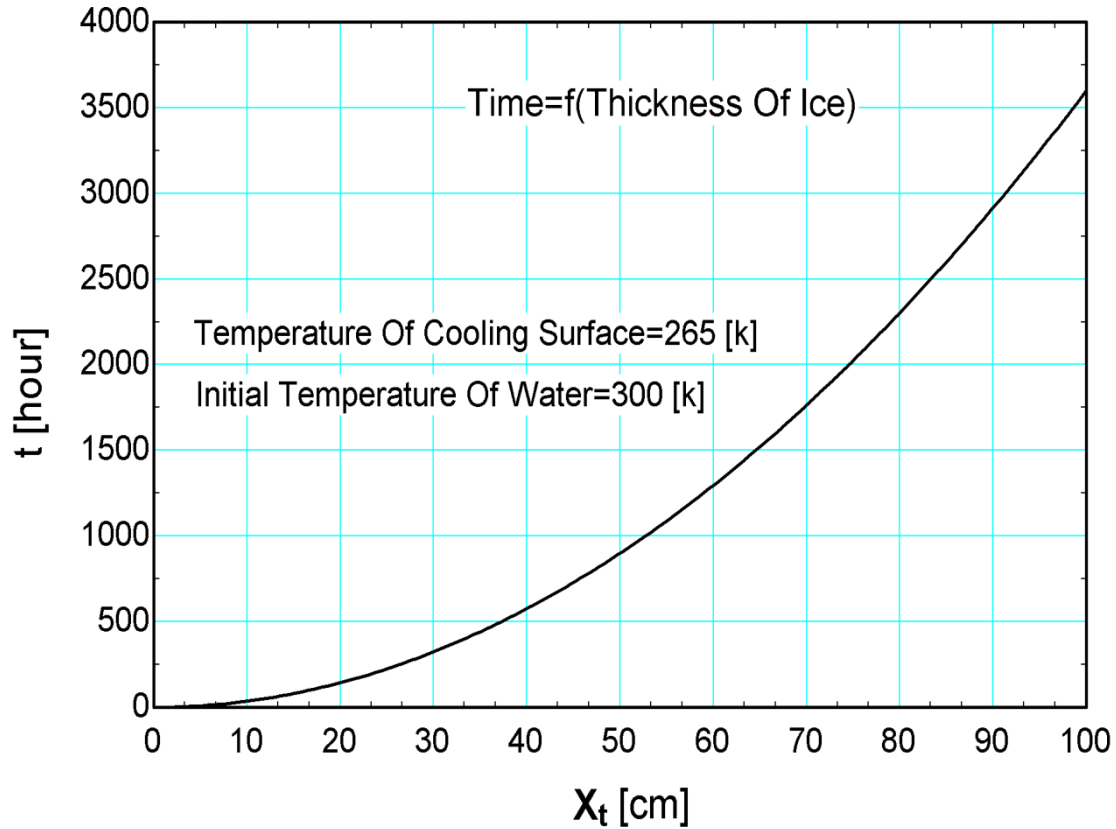
باستخدام برنامج EES 2012	باستخدام برنامج Math Cad 14
$\lambda = 0.1264$	$\lambda = 0.1268$

وينتج لدينا المنحني الموضح في الشكل (3-3) الذي يُعبّر عن العلاقة بين سماكة طبقة الجليد المُتشكلة والزمن اللازم لتشكيلها.

وبعد معرفة قيمة الثابت λ يكون شكل تابع السرعة بالنسبة للزمن:

$$\frac{dX(t)}{dt} = 1.365 \times 10^{-4} t^{-1/2} \text{ [m/s]}$$

نلاحظ من شكل هذا التابع أن حركة السطح الفاصل هي حركة مُتباطئة بانتظام وبسبب هذا التباطؤ هي المقاومة الحرارية الناتجة عن الجليد المُتشكل حيث تزداد هذه المقاومة مع مرور الزمن بسبب زيادة سماكة الجليد المُتشكل.



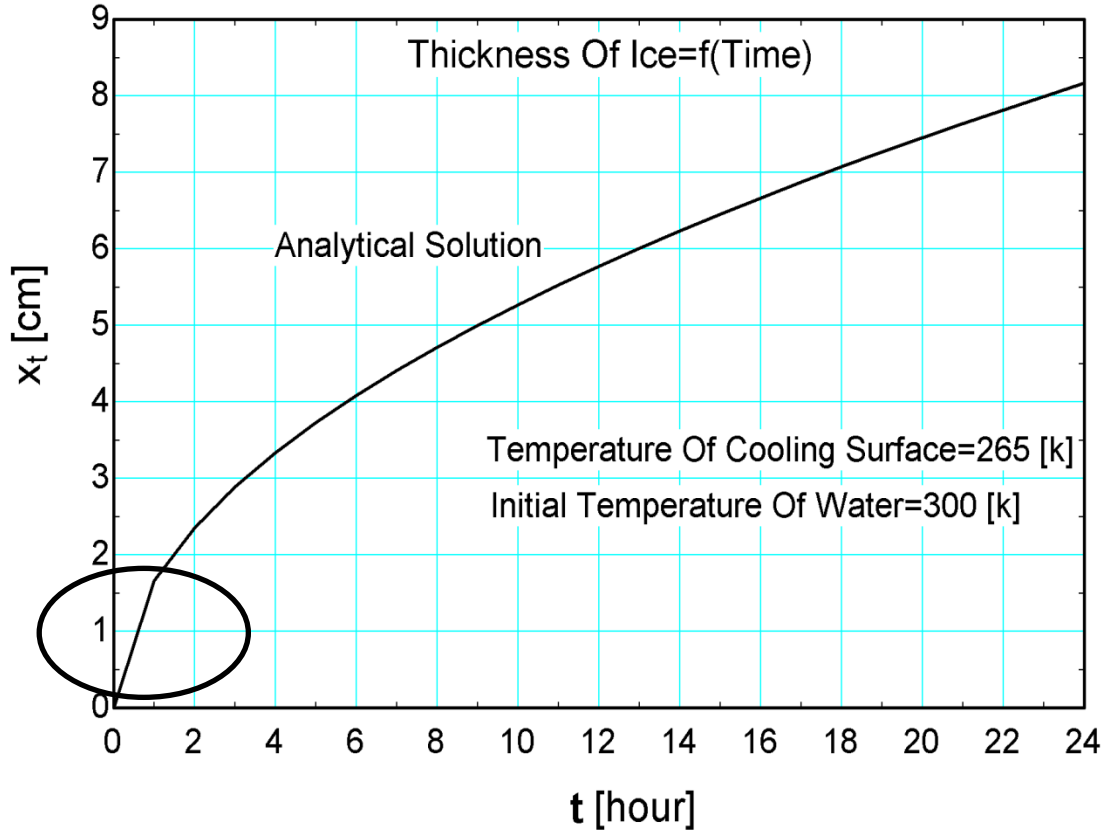
الشكل (3-3) منحنى تغير الزمن اللازم لتشكل الجليد مع سماكة الجليد المتشكل

في هذا المنحنى أخذنا قيم لسماكة الجليد حتى 100 cm حيث تمثل هذه القيمة طول الخزان الذي سنجري عليه التجارب، وعليه كان لدينا السماكة مُحددة ومطلوب معرفة الزمن اللازم للوصول إليها لذلك كان الزمن (t) هو التابع وسماكة الجليد المتشكل $X(t)$ هو المتحول على عكس الحالات الاعتيادية التي يكون فيها الزمن هو المتحول.

نلاحظ في هذا المنحنى أنه ومع بداية التجمد تكون عملية تشكل الجليد سريعة نسبياً ثم تأخذ في البطء، وذلك -وكما ذكرنا آنفاً- يعود إلى أن الجليد المتشكل يُمثل مقاومة حرارية إضافية وكلما زادت سماكة الجليد المتشكل زادت معها هذه المقاومة وبالتالي لَزِمَ زمن أكبر لنمو الجليد.

وفيما يلي الشكل (3-4) الذي يُمثل منحنى تغير سماكة الجليد مع الزمن خلال 24 ساعة، في هذا المنحنى المتحول هو الزمن (كما هي الحالة الاعتيادية)، حيث سنستفيد من هذا المنحنى لاحقاً في مقارنة النتائج التي سنحصل عليها باستخدام ثلاث طرق للحل هي:

[الحل التحليلي - الحل باستخدام المحاكاة الحاسوبية - الحل الناتج عن الإجراء التجريبي]



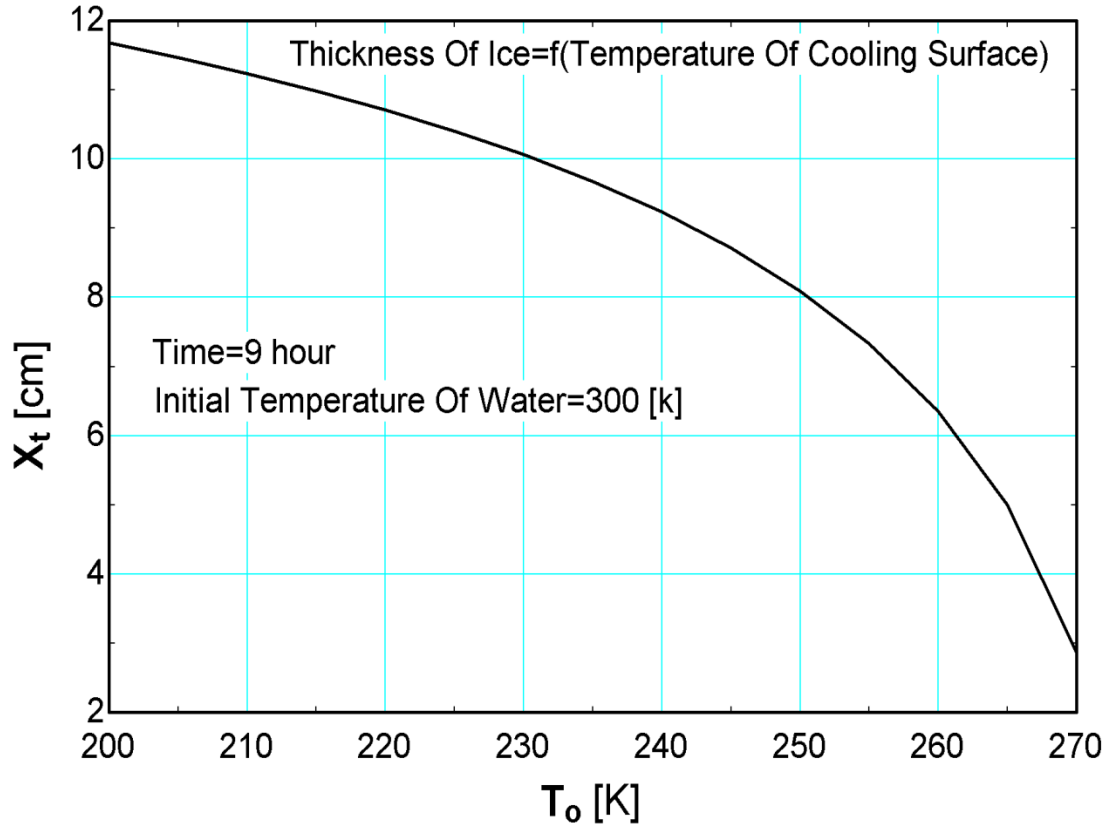
الشكل (3-4) المنحني الناتج عن الحل التحليلي والذي يُمثل تغير سماكة الجليد مع الزمن خلال 24 ساعة

نلاحظ في الشكل السابق أنَّ المنحني في الساعة الأولى أقرب مايكون للخط المستقيم وهذا دليل على سرعة تشكل الجليد بدايةً وتناقصها مع مرور الزمن وهذا ماسنلاحظه في المحاكاة والإجراء التجريبي.

3-4 دراسة تأثير درجة حرارة سطح التبريد:

إنَّ لدرجة حرارة سطح التبريد أثر كبير على الزمن اللازم للتجمد، وبالطبع كلما انخفضت درجة حرارة سطح التبريد زادت سرعة التجمد أو انخفض الزمن المطلوب للتجمد لأنَّه ومع انخفاض درجة حرارة سطح التبريد تزداد القدرة على التغلب على المقاومة الحرارية الناتجة عن الجليد المُتشكل، ولكن ومن الناحية الأخرى كلما انخفضت درجة حرارة سطح التبريد ازداد تشوه السطح الفاصل (وهذا ماسنراه بشكل واضح في الفصل التالي من خلال المحاكاة الحاسوبية) الأمر الذي سيؤدي في مرحلة معينة إلى فقدان صفة الانتشار الأحادي البُعد (وهو من أحد شروط ستيفان للحالة المدروسة)، وبذلك نتسم تحديد درجة الحرارة المثلى (Optimization) لسطح التبريد

بالصعوبة والتعقيد، وإذا ما أغفلنا موضوع تشوه شكل السطح الفاصل تكون العلاقة بين درجة حرارة سطح التبريد وسماكة الجليد المُتشكل خلال زمن مُعين كما هي موضحة في المنحني التالي (حيث افترضنا أن الزمن هو 9 ساعات، ودرجة الحرارة الابتدائية للماء 300K):



الشكل (3-5) منحنى تغير سماكة الجليد المُتشكل مع درجة حرارة سطح التبريد

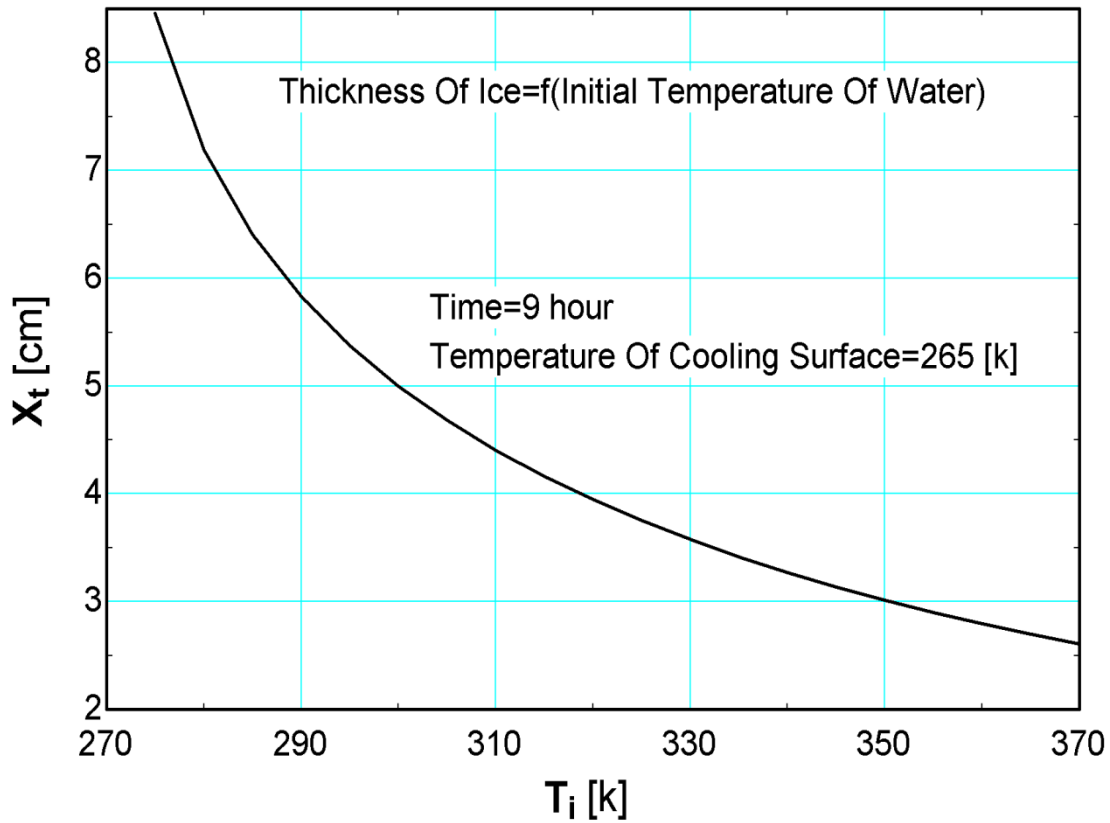
ملاحظة: سيتم التوسع في شرح اختيار درجة حرارة سطح التبريد في الفصل التالي.

3-5 دراسة تأثير درجة حرارة الماء الابتدائية:

سبق وذكرنا في الفصل الأول (الفقرة 1-3-1) أن الحالة المدروسة هي مسألة ستيفان أحادي البُعد ثنائية الطور، أي أن درجة الحرارة البدائية للسائل المدروس (الماء) أكبر من درجة حرارة التحول الطوري ($T_i > T_f$)، أما لو كانت درجة الحرارة البدائية للسائل تساوي أو أكبر بقليل من درجة حرارة التحول الطوري كانت المسألة أحادي الطور، وتأخذ مسألة ستيفان أحادي البُعد منحى نظري وتبتعد كل البُعد عن المنحى التطبيقي لأنه من الصعب أن يوجد السائل بدرجة حرارة قريبة من درجة حرارة التحول الطوري إلا إذا تعمّدنا ذلك مخبرياً، وبما أن هذا المشروع

يُخدم بالأساس تطبيقات التخزين الحراري كان من الأنسب دراسة مسألة ستيفان ثنائية الطور لأنها تتطابق مع حالات التخزين الحراري الطوري حيث توجد عملية تخزين محسوس قبل بداية التخزين الطوري.

في المنحنيات السابقة فرضت درجة حرارة الماء الابتدائية 300K وهي درجة قريبة من درجة حرارة الوسط المحيط داخل الغرفة (المخبر)، ولكن وفي هذه الفقرة سنرى مدى تأثير درجة الحرارة الابتدائية للماء على سماكة الجليد المتشكل من أجل زمن مُعين حيث يُوضح المنحني المُبين في الشكل (3-6) هذه العلاقة.



الشكل (3-6) منحنى تغير سماكة الجليد المتشكل مع درجة الحرارة الابتدائية للماء السائل

نلاحظ في هذا المنحني أنه ولأجل قيم لدرجة حرارة الماء الابتدائية 273.5K (درجة قريبة جداً من درجة حرارة التحول الطوري)، 300K (درجة الحرارة المعتمدة للماء السائل)، 370K (درجة حرارة قريبة من درجة حرارة الغليان للماء عند الضغط الجوي النظامي) كانت سماكة الجليد المتشكل بعد 9 ساعات كالتالي:

370K	300K	273.5K	درجة حرارة الماء الابتدائية
2.6 cm	5 cm	8.5 cm	سماعة الجليد المتشكل

نلاحظ من القيم السابقة مدى تأثير درجة الحرارة الابتدائية للماء على سماعة الجليد المتشكل، وسبب هذا التأثير أنه مع ازدياد درجة الحرارة الابتدائية للماء تزداد كمية الحرارة المحسوسة الواجب التخلص منها قبل البدء بالتحويل الطوري.

3-6 الطريقة البيانية (طريقة جديدة) لمعرفة الزمن اللازم للتجمد:

مر معنا في الفقرة 3-3 أنه ولأجل تحديد الزمن اللازم لتجمد سماعة معينة من الجليد وفق شروط ستيفان أحادية البعد ثنائية الطور كنا نستعين بالمعادلة (3-15):

$$t = \frac{1}{4\alpha_s} \frac{x^2}{\lambda^2} \quad (3-15)$$

تكمن المشكلة في هذه المعادلة بتحديد قيمة λ ، ومر معنا في الفقرة 2-3 أنه ولأجل معرفة قيمة λ كان لابد بدايةً من حساب رقم ستيفان اللابُعدي باستخدام المعادلة (3-12):

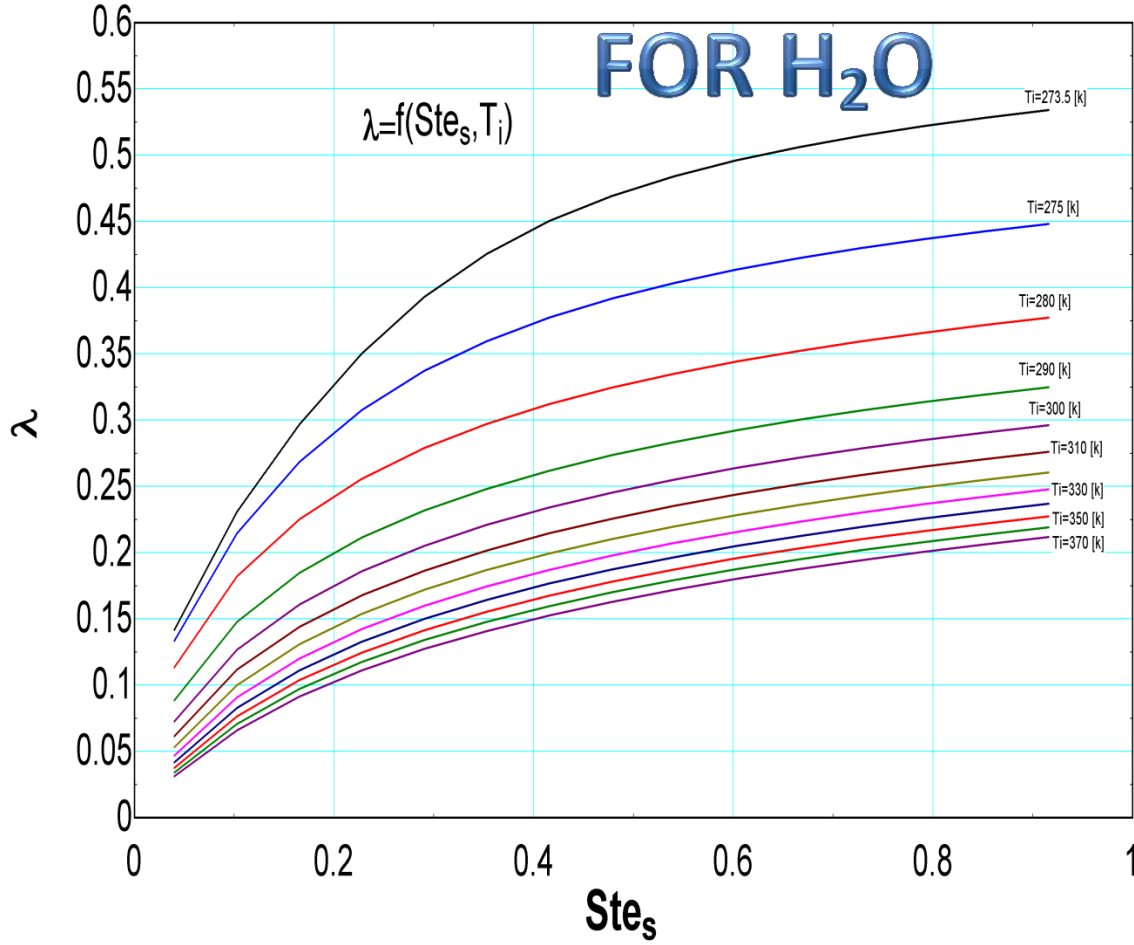
$$Ste_s = \frac{c_s(T_f - T_o)}{h_{sl}} \quad (3-12)$$

ومن ثم تعويضه في المعادلة (3-11) لإيجاد قيمة λ :

$$\frac{e^{\lambda^2}}{erf\lambda} - \frac{K_L}{K_s} \sqrt{\frac{\alpha_s}{\alpha_L}} \frac{T_i - T_f}{T_f - T_o} \frac{e^{(\alpha_s/\alpha_L)\lambda^2}}{erfc\left(\lambda \sqrt{\frac{\alpha_s}{\alpha_L}}\right)} = \frac{\lambda\sqrt{\pi}}{Ste_s} \quad (3-11)$$

والمشكلة في التعامل مع المعادلة (3-11) أنها وكما نلاحظ تحتاج إلى برامج حاسوبية لحلها؟! وإذا تأملنا في المعادلتين (3-11) و (3-12) نلاحظ أن جميع المتغيرات عبارة عن ثوابت ثيرموفيزيائية (فيزيائية) للماء (موصلية الماء، موصلية الجليد..... إلخ) ما عدا درجة حرارة سطح التبريد (T_o) ودرجة الحرارة الابتدائية للماء (T_i)، وعليه تم رسم المخطط البياني الذي يُمثل العلاقة $\lambda = f(Ste_s, T_i)$ (باعتبار أن درجة حرارة سطح التبريد موجودة ضمناً في

رقم ستيفان اللائعي Ste_s (انظر المعادلة (3-12))، والمخطط البياني سابق الذكر مُوضح في الشكل (3-7):



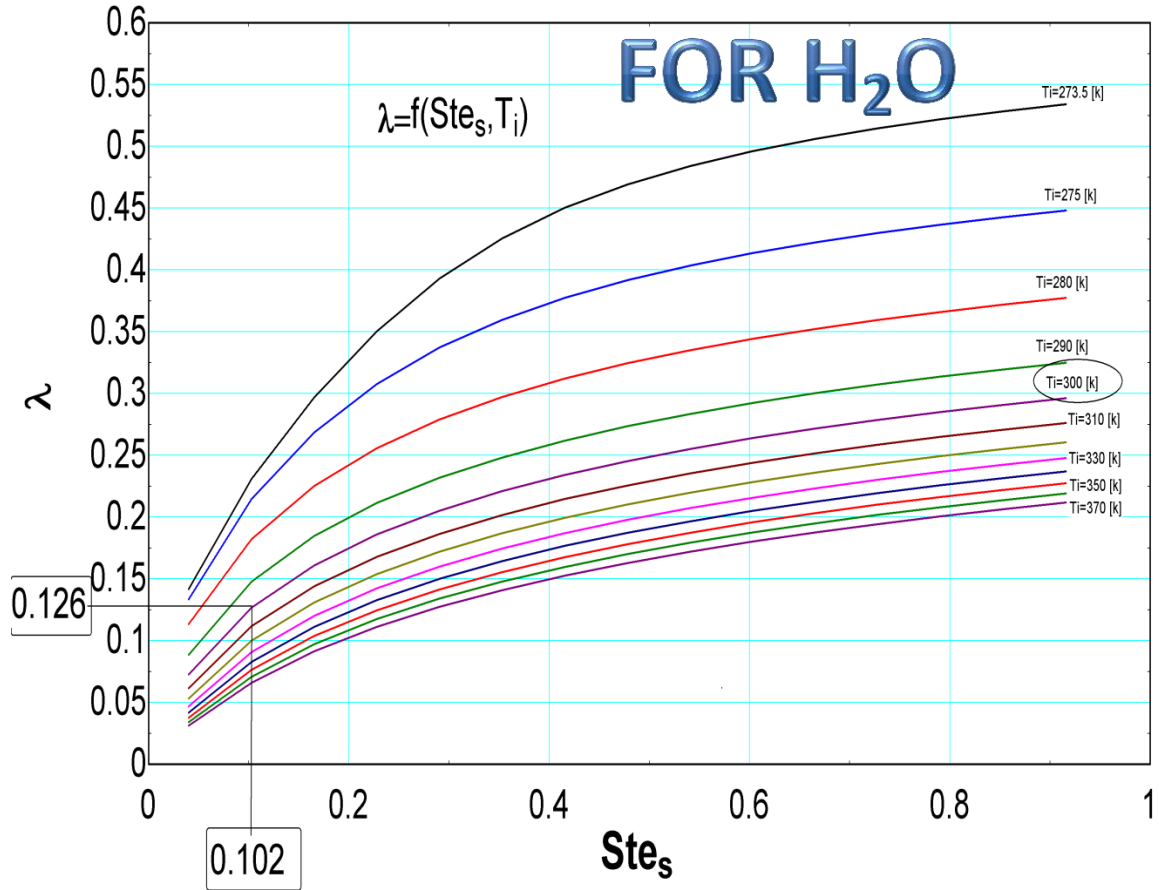
الشكل (3-7) المنحني الذي يُمثل العلاقة $\lambda = f(Ste_s, T_i)$

ولأجل حساب قيمة λ باستخدام المخطط السابق نقوم أولاً بحساب رقم ستيفان من المعادلة (3-12) ثم نُحدد درجة حرارة الماء الابتدائية فنحصل مباشرة على قيمة λ من المحور (Y).

مثال: إذا أردنا حساب قيمة λ لأجل درج حرارة سطح التبريد $T_o = 265K$ ، ودرجة حرارة الماء الابتدائية $T_i = 300K$ ، يكون الحل كالتالي:

$$Ste_s = \frac{c_s(T_f - T_o)}{h_{sl}} = \frac{4180 * (273.15 - 265)}{334000} = 0.102$$

وعليه وباستخدام المنحني السابق تكون قيمة λ :



وبهذا نكون قد حصلنا على قيمة λ دون الحاجة لحل المعادلة (3-11).

ملاحظة: هذا المنحني يُستخدم من أجل الماء فقط، وهو غير مأخوذ من أي مرجع حيث قمنا بحل المعادلة (3-11) من أجل عدة قيم لدرجة حرارة الماء الابتدائية وعند كل حل تم رسم العلاقة $\lambda = f(Ste_s)$ ، لذلك ومن أجل استخدام نفس الطريقة (الطريقة البيانية) لمادة متغيرة الطور PCM غير الماء يجب إعداد المنحني سلفاً.

الفصل الرابع:

المُحاكاة الحاسوبية

الفصل الرابع: المحاكاة الحاسوبية

Computer Simulation

كما ذكرنا في الفصل الأول فإنّ من أحد شروط ستيفان أن يكون انتشار موجة التجمد أحادي البعد، ومن أجل تحقيق هذا الشرط يجب تحديد النسبة المناسبة بين أبعاد الخزان (الطول- العرض-العمق) ويجب أيضاً تحديد درجة الحرارة المناسبة لسطح التبريد، ولذلك لجأنا إلى المحاكاة الحاسوبية (Simulation) من أجل أمثلة (Optimization) هذين البارمتريين.

تمثل المحاكاة الحاسوبية مرحلة وسيطية بين الدراسة النظرية (الحل التحليلي) من جهة والإجراء التجريبي (النتائج العملية) من جهة أخرى، حيث تُفيدنا هذه المحاكاة بإجراء عدة تجارب على الحاسب قبل الشروع في التصنيع الأمر الذي يؤدي إلى توفير المال والجهد، كما تُفيدنا في تحديد نقطة عمل للبدء منها في الإجراء التجريبي، ولكن يجب أن ننوه إلى أن النتائج التي نحصل عليها من هذه المحاكاة هي نتائج تقريبية وذلك لأنّ برامج المحاكاة تعتمد الطرق العددية للوصول إلى الحل (وهذه الطرق بالأساس في الرياضيات هي طرق تقريبية)، وبالمقابل فإنّ هذه النتائج التقريبية التي نحصل عليها يمكن أن تصل في مرحلة من المراحل إلى حد التطابق مع النتائج الحقيقية وهذا يعتمد بالأساس على خبرة الشخص الذي يقوم بالمحاكاة وعلى درجة تعقيد المسألة المدروسة.

تمت هذه المحاكاة باستخدام برنامج ANSYS-13 وفيما يلي تعريف بسيط بهذا البرنامج وخوارزمية العمل ضمنه.

4-1 نبذة عن برنامج ANSYS:

يُعد برنامج ANSYS واحد من أهم وأشهر برامج المحاكاة على مستوى العالم، ويمكن من خلاله إجراء المحاكاة لمختلف الظواهر الفيزيائية و الإنشائية و الهيدروليكية و الحرارية..... إلخ. يعتمد برنامج ANSYS أثناء الحل (العددي) على نظرية العناصر المنتهية (Finite Element Method) وهي إحدى الطرق الرياضية العددية لإيجاد حل للمعادلات التفاضلية المطلوبة

وبالتالي الوصول للنتائج التي نبحث عنها. ومع الإصدار العاشر لهذا البرنامج ظهرت بيئة الـ Workbench والتي تمتاز بسهولة في التعامل (بالمقارنة مع البيئة التقليدية لـ ANSYS حيث كانت واجهة هذه البيئة التقليدية تعمل Under Dos) وتمتاز أيضاً بإمكانية إجراء أكثر من دراسة للمسألة الواحدة وربط النتائج ببعضها (كإجراء دراسة إنشائية وحرارية لنفس المسألة).

تتكون خوارزمية العمل ضمن برنامج ANSYS من أربعة مراحل أساسية وهي:

1- Geometry. 2- Mesh. 3- Setup& Solution. 4- Results.

وبحسب الحالة المدروسة (إنشائية، حرارية، فيزيائية إلخ) يمكن أن يسبق المرحلة الأولى مرحلة: Engineering Data.

4-1-1 مرحلة الـ Geometry: نقوم ضمن هذه المرحلة برسم الأجسام المراد إجراء المحاكاة عليها على الحاسب ويوجد ضمن برنامج الـ ANSYS برنامج للرسم هو الـ DesignModular كما يمكننا أن نقوم برسم الجسم المطلوب باستخدام أحد برامج الرسم (مثل: Solid Works, Inventor, Unigraphics..... إلخ) ومن ثم تصديرها إلى الـ ANSYS.

4-1-2 مرحلة الـ Mesh: نقوم ضمن هذه المرحلة بتقسيم الجسم المرسوم إلى عناصر صغيرة حيث يقوم البرنامج في المرحلة التالية بحل المعادلات الرياضية الناطمة للمسألة على كل عنصر من العناصر ومن ثم دمج الحل على كامل الجسم.

4-1-3 مرحلة الـ Setup& Solution: نقوم ضمن هذه المرحلة بتوصيف المسألة من ناحية اختيار الموديل الذي سيعتمده البرنامج أثناء الحل وتعيين الشروط الابتدائية والشروط الحدية للمسألة وإذا كانت الحالة المدروسة عابرة (Transient متغيرة مع الزمن) فيجب تحديد الخطوة الزمنية المطلوبة أثناء الحل. تُعتبر هذه المرحلة الأهم بين المراحل الأربع والأكثر صعوبة وحساسية لأن الاختيارات الصحيحة ضمن هذه المرحلة تجعل المحاكاة أقرب ما تكون للواقع والعكس صحيح، ولأجل ذلك فقد أتاحت الشركة المُنتجة لبرنامج ANSYS التعامل مع العديد من الـ (Solver) ونذكر من أهمها حل مسائل انتقال الحرارة ومسائل الهيدروليك: CFX- Fluent- Ployflow.

4-1-4 مرحلة الـ Results: نقوم ضمن هذه المرحلة بترئية أو إظهار النتائج المطلوبة، حيث يتيح لنا البرنامج إظهار النتائج على شكل: بيانات (أرقام)، منحنيات، صور، أو مقاطع فيديو، ويوجد العديد من الخيارات للإظهار (كإظهار سطوح ثبات الضغط أو سطوح ثبات درجة الحرارة.....إلخ).

بالنسبة لمرحلة الـ Engineering Data توجد بشكل مستقل أو ضمن مرحلة الـ Setup & Solution بحسب نوع الـ Solver المختار حيث نقوم ضمن هذه المرحلة بتعريف المواد المراد التعامل معها وتحديد مواصفاتها الفيزيائية أو الحرارية أو الثيرموفيزيائية بحسب الحالة المدروسة مع العلم أنه يوجد ضمن البرنامج مكتبة واسعة تشمل معظم المواد الممكن التعامل معها حيث يمكننا استدعائها من المكتبة دون الحاجة لتعريفها وتحديد خواصها.

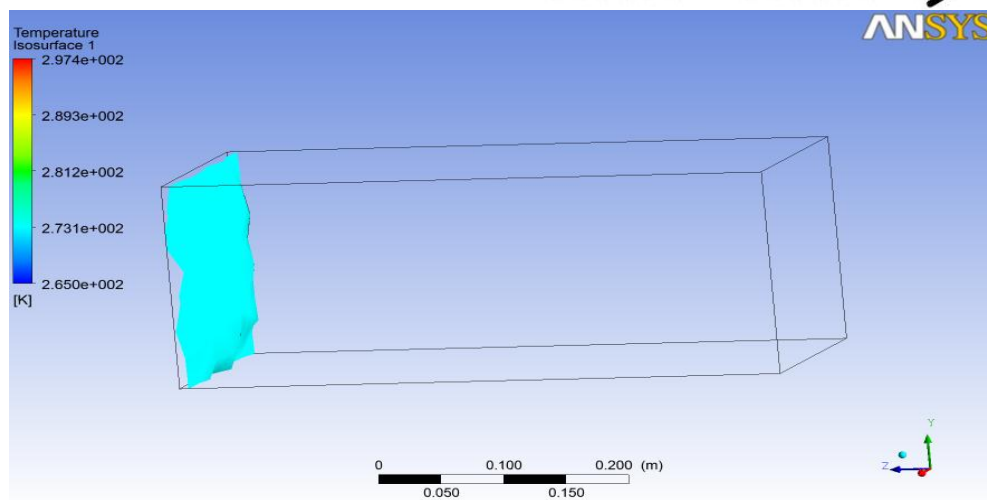
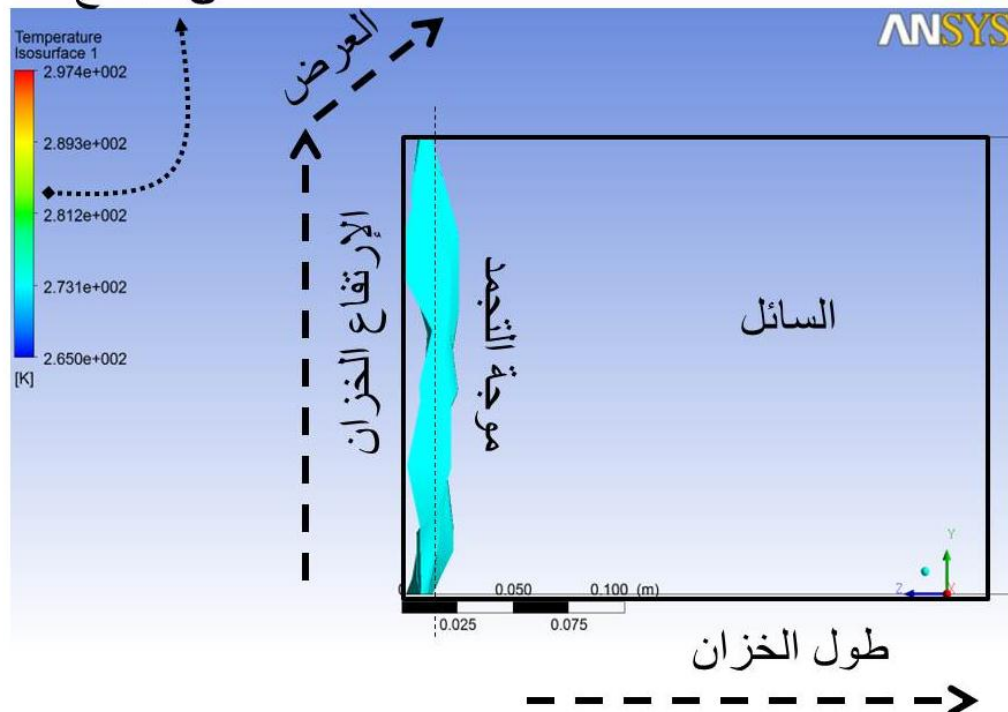
كما ذكرنا سابقاً فإن الهدف الأساسي من المحاكاة هو التحديد الأمثل لنسبة الأبعاد بين الخزان ودرجة حرارة سطح التبريد بحيث نضمن انتشار أحادي البعد لموجة التجمد، وقد استخدمت لذلك ANSYS 13 واعتمدت الـ Solver $\leq$ Fluent (الكود (Code) المستخدم ضمنه موجود في المُلحق (7)) وتم الرسم (المرحلة الأولى Geometry) باستخدام برنامج Solid Works 2013.

4-2 تحديد النسبة بين أبعاد الخزان:

حتى يكون انتشار الموجة أحادي البعد، يجب أن تكون سرعة الانتشار باتجاه أقل بكثير من سرعة الانتشار بالاتجاهيين الآخرين بحيث نأخذ الانتشار بالاتجاه الأبطأ بعين الاعتبار ونهمله في الاتجاهيين الآخرين وعندها تُطلق صفة أحادي البعد على الانتشار المدروس، ولتحقيق ذلك يجب أن يكون الخزان جسم نصف لانهائي الطول، ولكن عملياً يوجد نسبة بين أبعاد الخزان تحقق هذا الشرط دون أن يمتد الخزان إلى اللانهاية ومن أجل ذلك قمت بتجريب عدة نسب وكانت النتائج كالتالي:

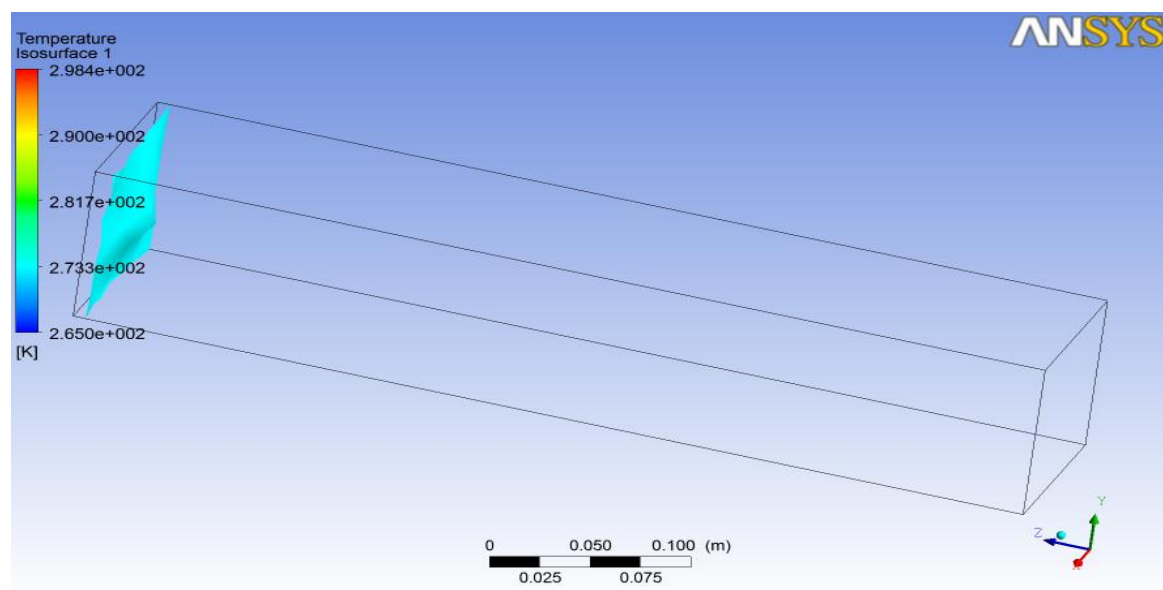
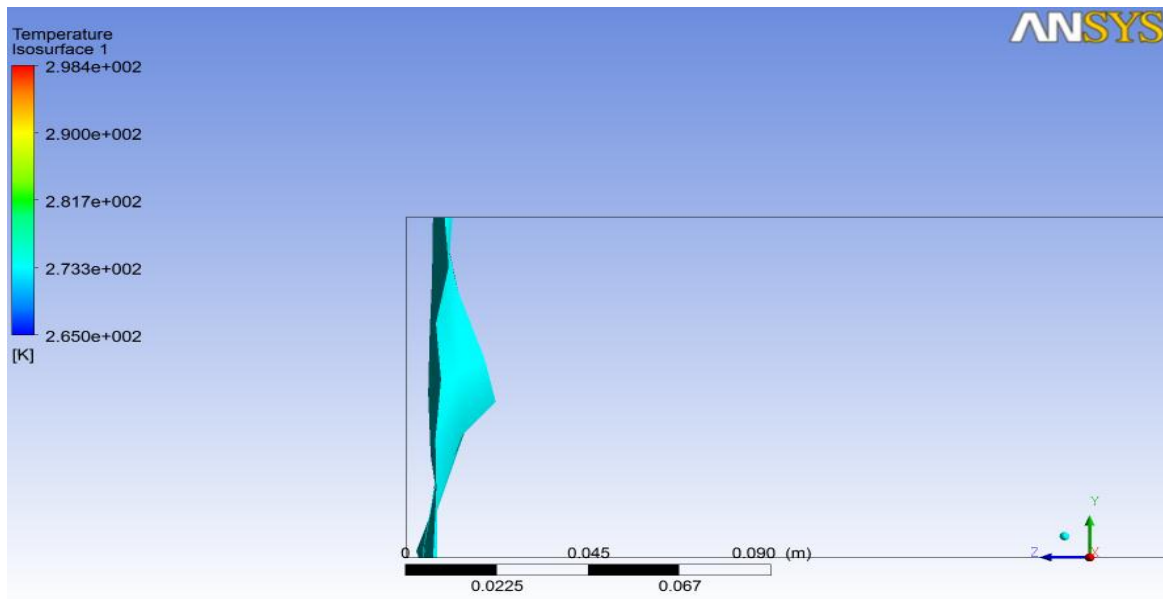
4-2-1 من أجل نسبة 2/5 بين الطول و الارتفاع (حيث الارتفاع=العرض):

تدرجات درجة الحرارة
على السطح



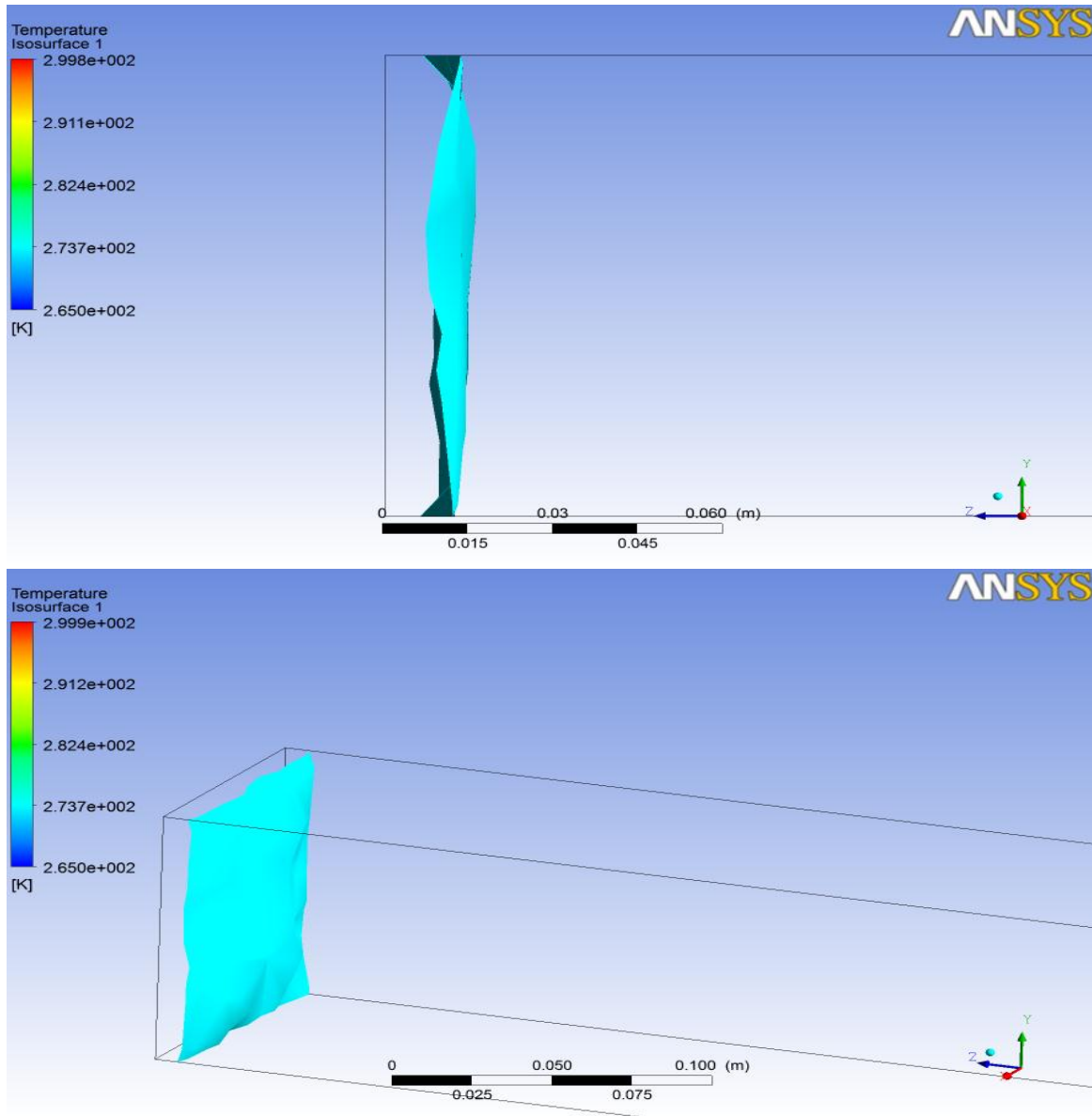
الشكل (4-1) شكل موجة التجمد من أجل نسبة 2/5 بين أبعاد الخزان

2-2-4 من أجل نسبة 1/5:



الشكل (4-2) شكل موجة التجمد من أجل نسبة 1/5 بين أبعاد الخزان

3-2-4 من أجل نسبة 1/10:



الشكل (3-4) شكل موجة التجمد من أجل نسبة 1/10 بين أبعاد الخزان

نلاحظ من الأشكال السابقة بأن النسبتين $2/5$ و $1/5$ أدتا إلى انتشار غير أحادي البعد (بسبب التشوه الكبير في موجة التجمد)، أما النسبة $1/10$ فيمكن اعتبار الانتشار عندها أحادي البعد، وعليه تم اعتماد النسبة $1/10$.

3-4 تحديد درجة حرارة سطح التبريد:

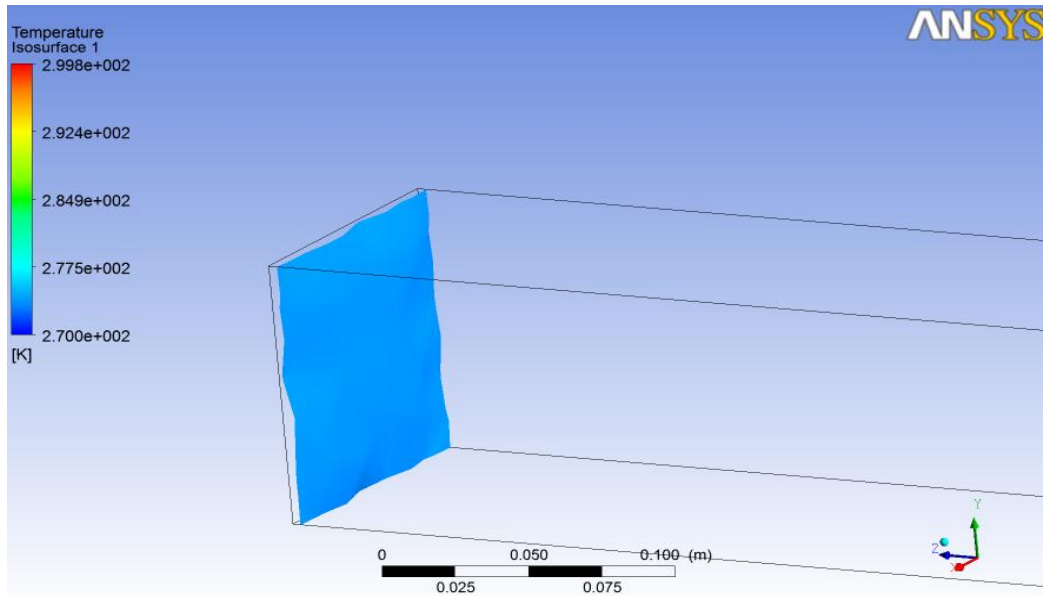
إن لتحديد درجة الحرارة -الثابتة- التي سيُحافظ عليها سطح التبريد أثناء التجربة أهمية كبيرة وذلك للأسباب التالية:

✓ التغلب على المقاومة الحرارية للجليد المتشكل لضمان وصول موجة التجمد لآخر الخزان.

✓ الابتعاد عن التبريد الزائد لضمان حصول التجربة بالقرب من درجة حرارة التحول الطوري وعدم التأثير على الانتشار أحادي البعد (عدم حصول تشوه في الموجة).

ولذلك أُجريت المحاكاة بتطبيق عدة درجات حرارة لسطح التبريد وكانت النتائج كالتالي:

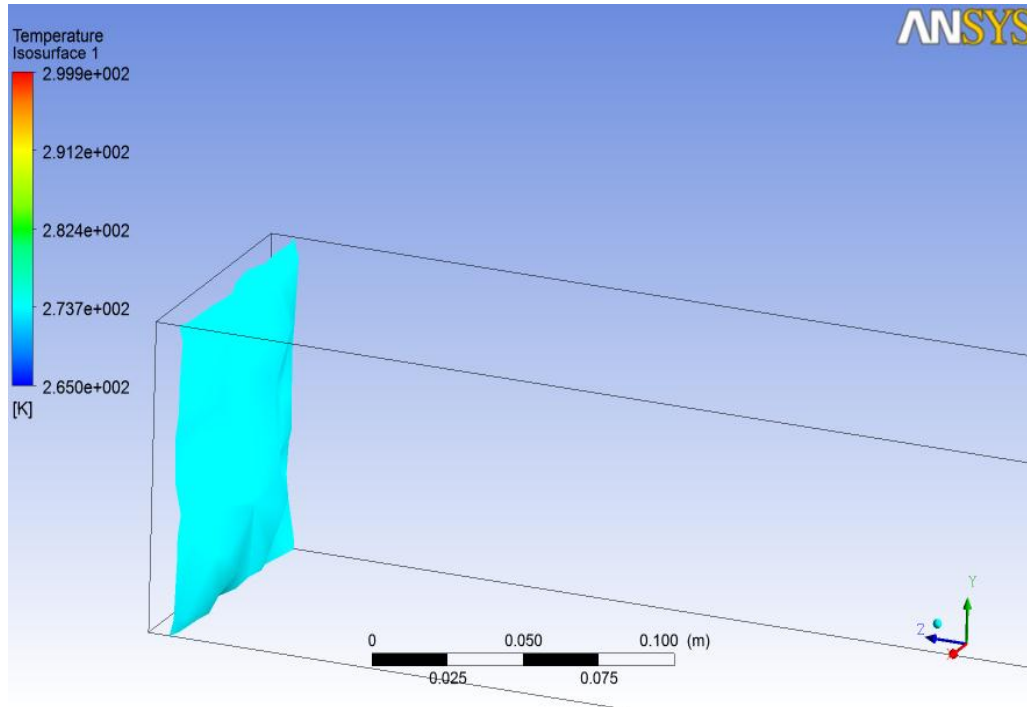
1-3-4 درجة حرارة سطح التبريد 270 k:



الشكل (4-4) شكل موجة التجمد من أجل درجة حرارة 270 k لسطح التبريد

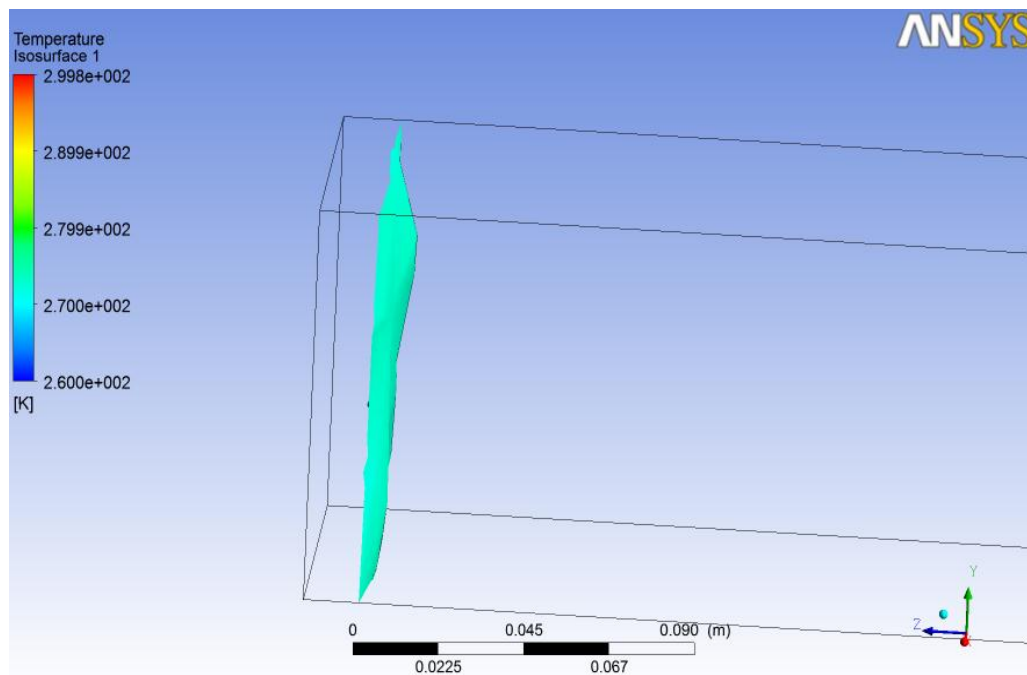
نلاحظ في الشكل السابق أن شكل موجة التجمد غير مشوه (حافظ على شرط أحادية البعد) ولكن سرعة الانتشار بطيئة جداً، وعند إجراء المحاكاة من أجل درجة حرارة 265K لسطح التبريد بقي الشكل كما هو ولكن زادت سرعة الانتشار كما هو موضح في الشكل التالي:

2-3-4 درجة حرارة سطح التبريد 265 k:



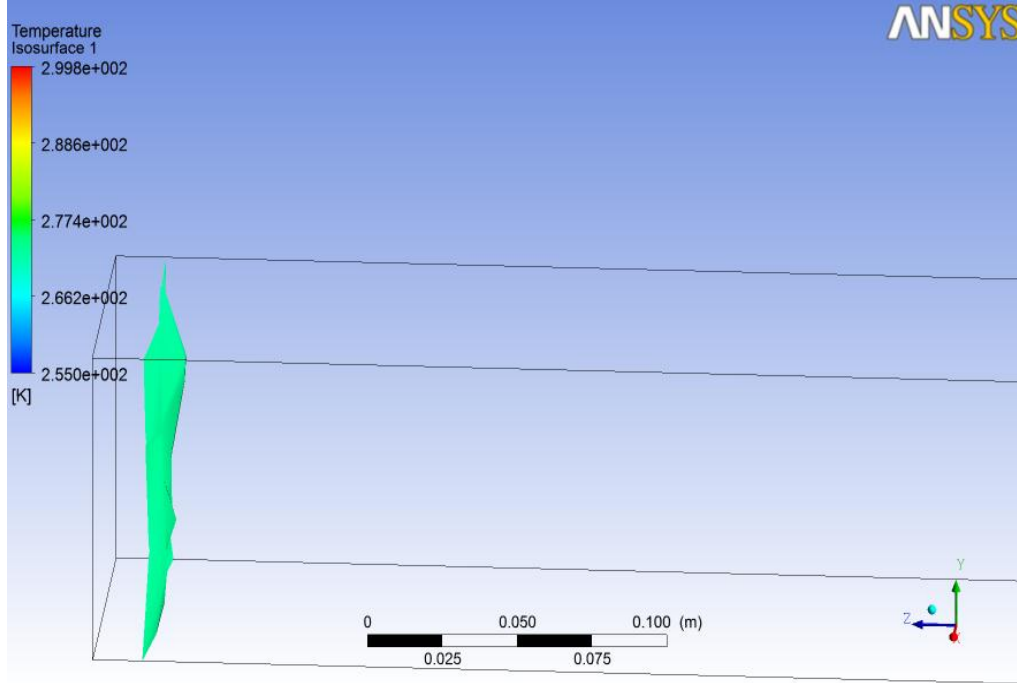
الشكل (4-5) شكل موجة التجمد من أجل درجة حرارة 265 k لسطح التبريد

3-3-4 درجة حرارة سطح التبريد 260 k:



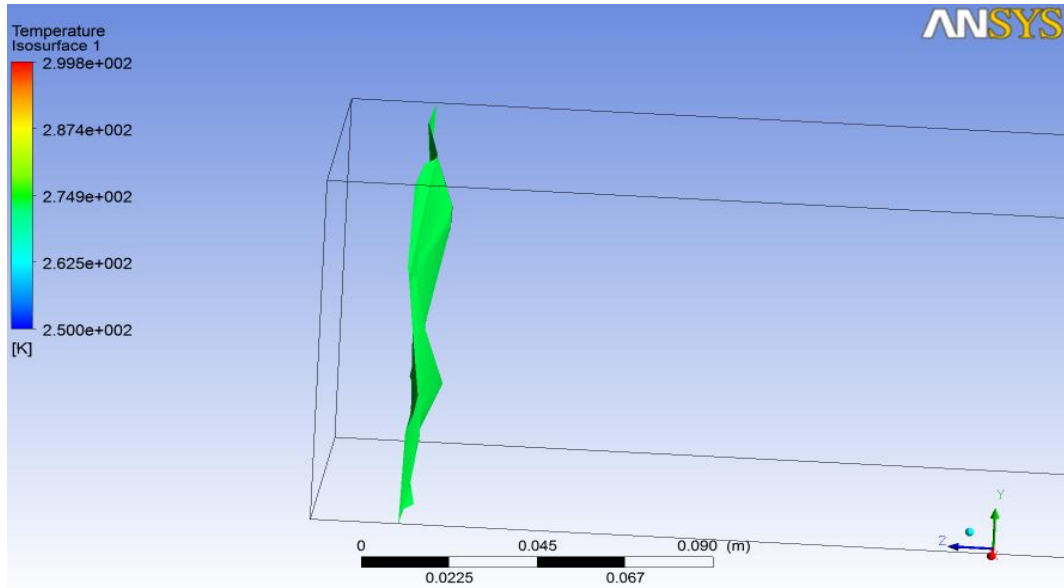
الشكل (4-6) شكل موجة التجمد من أجل درجة حرارة 260 k لسطح التبريد

4-3-4 درجة حرارة سطح التبريد 255 k:



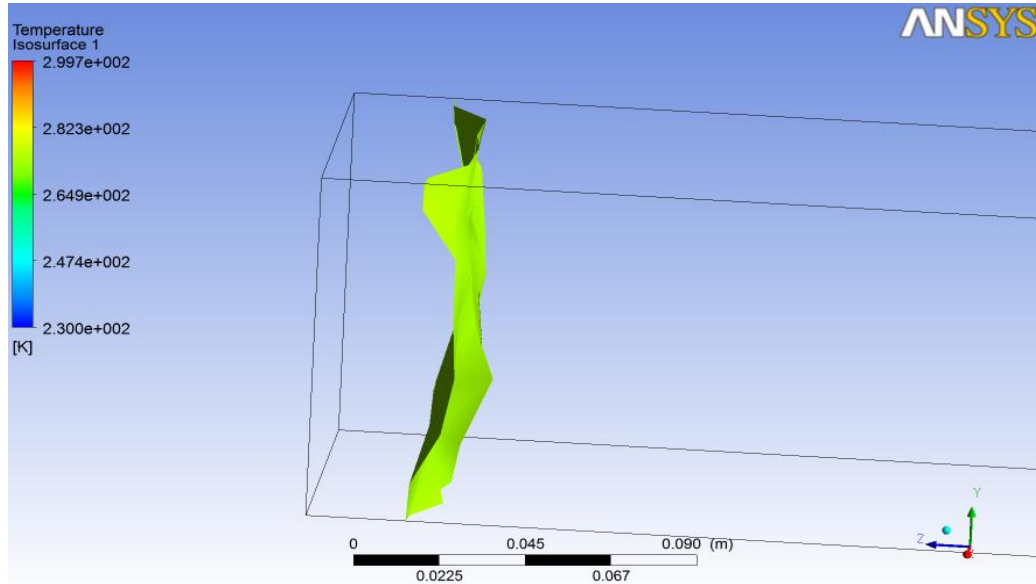
الشكل (4-7) شكل موجة التجمد من أجل درجة حرارة 255 k لسطح التبريد

4-3-5 درجة حرارة سطح التبريد 250 k:



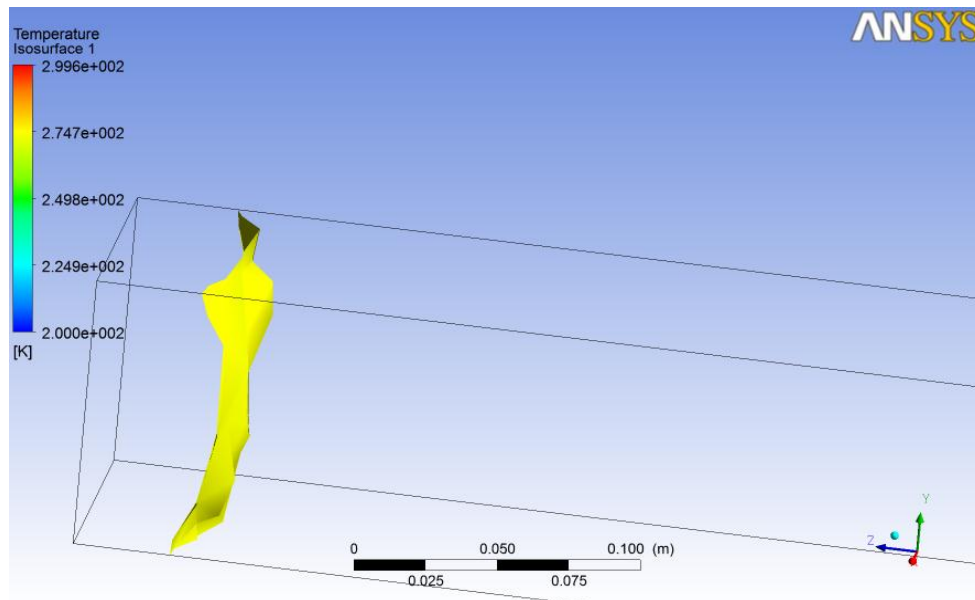
الشكل (4-8) شكل موجة التجمد من أجل درجة حرارة 250 k لسطح التبريد

6-3-4 درجة حرارة سطح التبريد 230 k:



الشكل (4-9) شكل موجة التجمد من أجل درجة حرارة 230 k لسطح التبريد

7-3-4 درجة حرارة سطح التبريد 200 k:

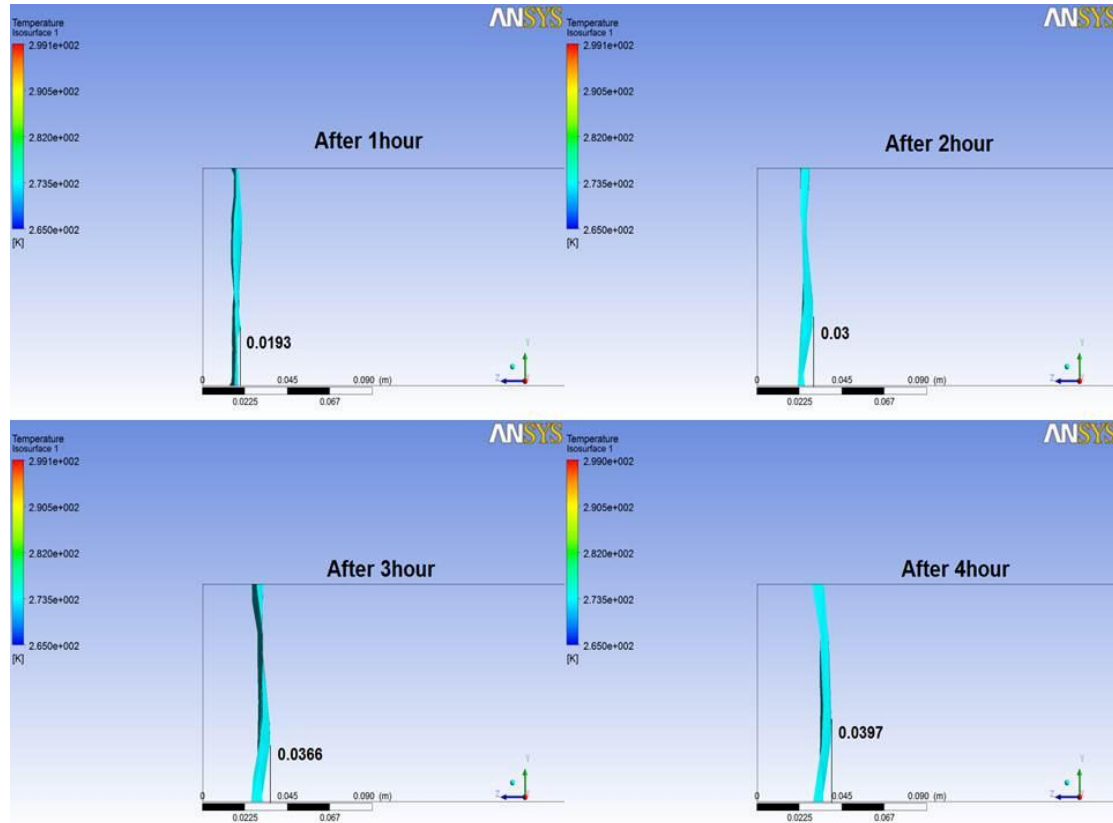


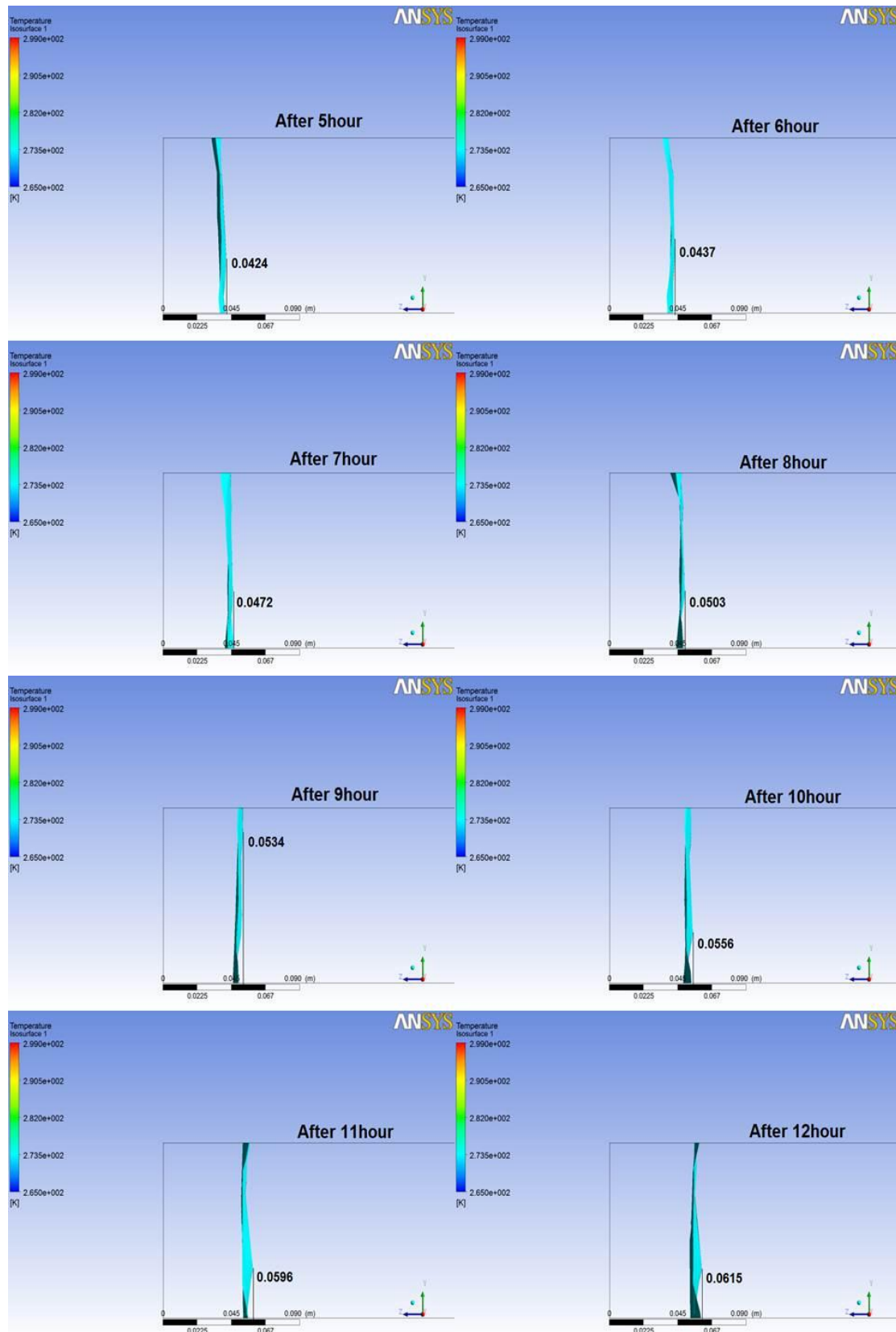
الشكل (4-10) شكل موجة التجمد من أجل درجة حرارة 200 k لسطح التبريد

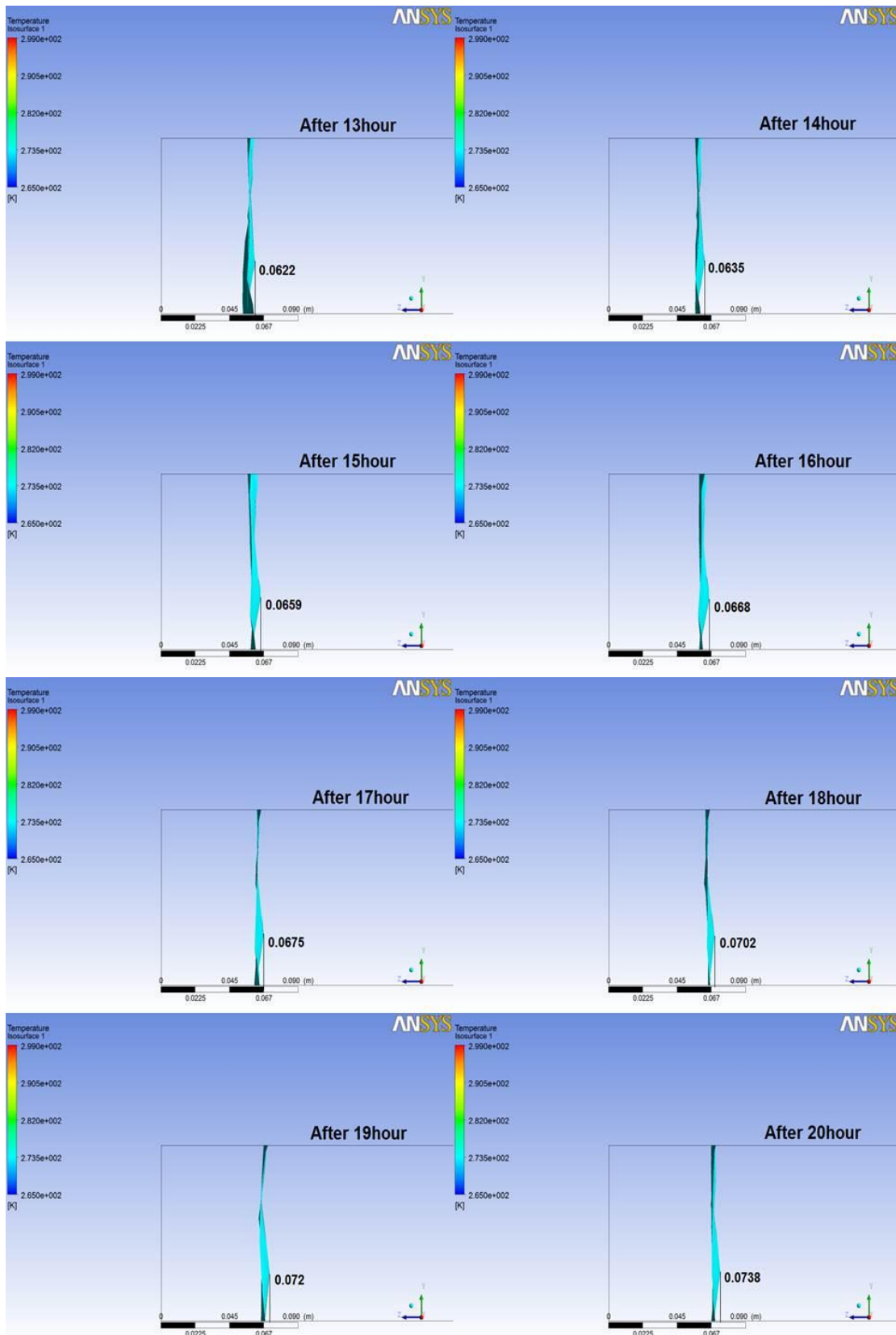
نلاحظ من الأشكال السابقة أنه كلما انخفضت درجة حرارة سطح التبريد زاد تشوه موجة التجمد وبالتالي ابتعدنا عن الانتشار أحادي البُعد وعليه أفضل درجة حرارة هي الأقرب لدرجة حرارة التحول الطوري (الأعلى قيمة)، ولكن بالمقابل فإن درجة الحرارة المرتفعة نسبياً تؤدي إلى بطأ شديد في حركة موجة التجمد وبعد إجراء الموازنة بين هذين المعيارين تم اختيار درجة الحرارة 265 k لتكون درجة حرارة سطح التبريد.

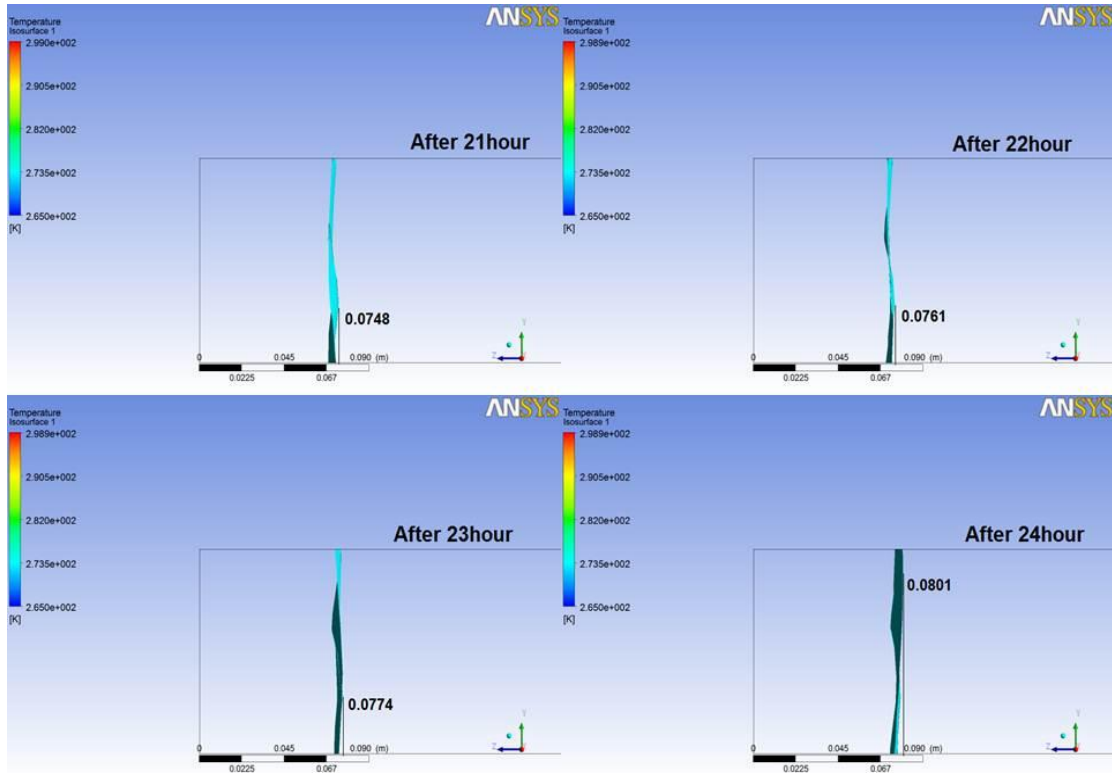
4-4 تحديد المنحني الذي يربط موقع السطح الفاصل مع الزمن :

بعد أن قمنا بتحديد النسبة بين أبعاد الخزان ودرجة حرارة سطح التبريد التي تُحقق شروط ستيفان أحادي البُعد ثنائية الطور، سنقوم في هذه الفقرة برسم المنحني الذي يُمثل العلاقة بين موقع السطح الفاصل (سماكة الجليد المُتشكل) مع الزمن خلال 24 ساعة، حيث قمنا بإجراء عدة تجارب باستخدام ANSYS وتسجيل أبعاد نقطة يصل إليها السطح الفاصل عند كل ساعة من الساعات الـ 24 (بُعد النقطة هنا مأخوذ بالمتري) وكانت النتائج كما هي موضحة في الشكل (4-11):





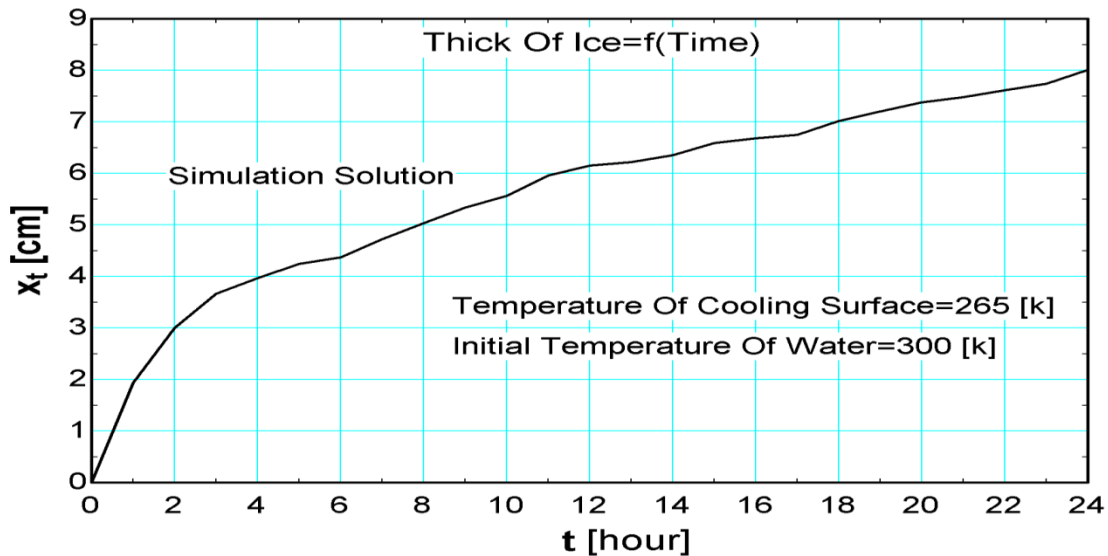




الشكل (4-11) أبعد نقطة يصل إليها السطح الفاصل عند كل ساعة من الساعات الـ 24

أبرز مايمكن ملاحظته في الصور السابقة أن أبعد نقطة تصل إليها موجة التجمد تقع غالباً في المنطقة القريبة من منتصف الخزان، وبناءاً على النتائج أعلاه يكون المنحني الذي يُمثل تغيير موقع السطح الفاصل (سماكة الجليد المُتشكل) مع الزمن خلال 24 باستخدام المُحاكاة الحاسوبية

كما هو موضح في الشكل (4-12):



الشكل (4-12) منحنى تغيير موقع السطح الفاصل مع الزمن خلال 24 باستخدام المُحاكاة الحاسوبية

الفصل الخامس:

الإجراء التجريبي

الفصل الخامس: الإجراء التجريبي

Experimental Test

1-5 الهدف من الإجراء التجريبي:

إنَّ الهدف من هذا الإجراء:

- بيان الحدود العملية لشروط ستيفان.
- مقارنة النتائج العملية (بعد العمل على نقل شروط ستيفان إلى أرض الواقع) مع النتائج النظرية بشقيها التحليلي والمحاكاة (واللذان يأخذان شروط ستيفان بحالتها المثالية).
- بعد تحديد النسبة بين أبعاد الخزان ودرجة حرارة سطح التبريد (وذلك بعد الاعتماد على نتائج المحاكاة) تم اختيار أبعاد الخزان 10x10x100 CM، أما بقية عناصر هذا الإجراء فهي موضحة بالشكل (1-5) (حيث تم تصميم القطع الميكانيكية وتخريج مخططاتها باستخدام برنامج Solid Works 2013، ومخططات القطع المُصنعة موجودة في الملحق (3)).

2-5 الأجزاء التفصيلية لجهاز التجربة:

يتكون الجهاز الموضح في الشكل (1-5) من الأقسام الرئيسة التالية:

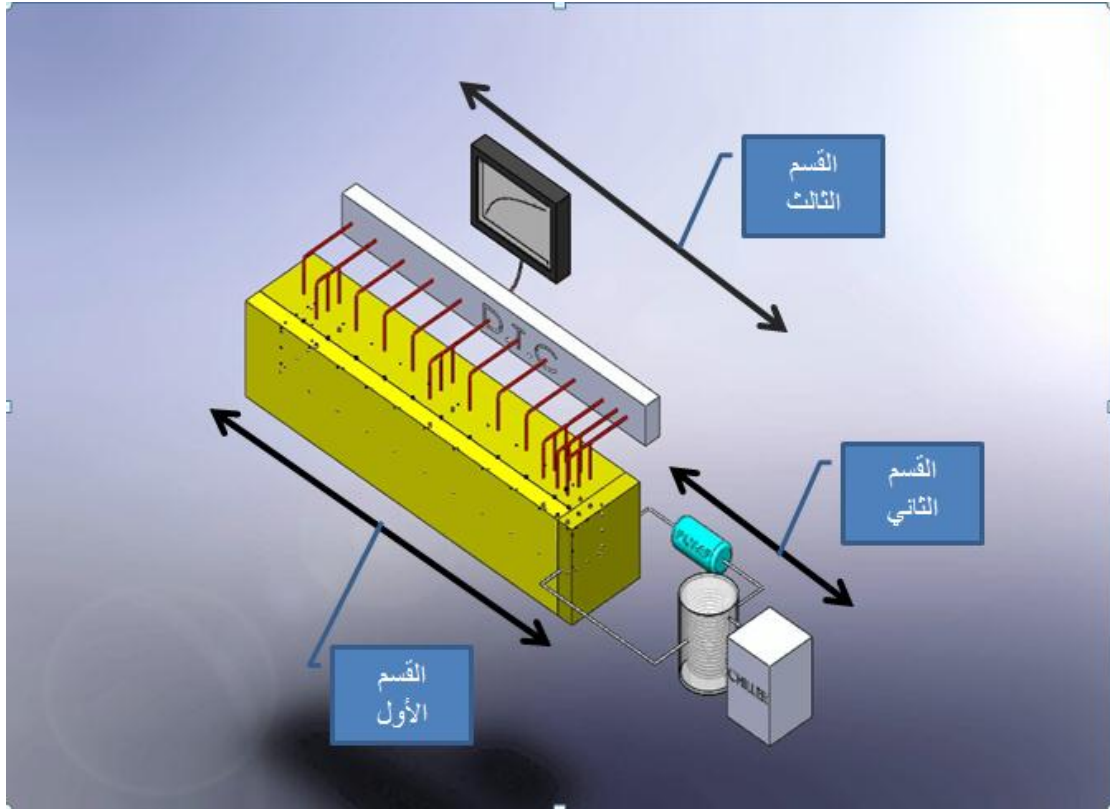
1-2-5 جسم الخزان الرئيسي:

وهذا القسم هو القسم الرئيسي للتجربة وتعتبر باقي الأقسام مُخدمة له وهو يتألف من:

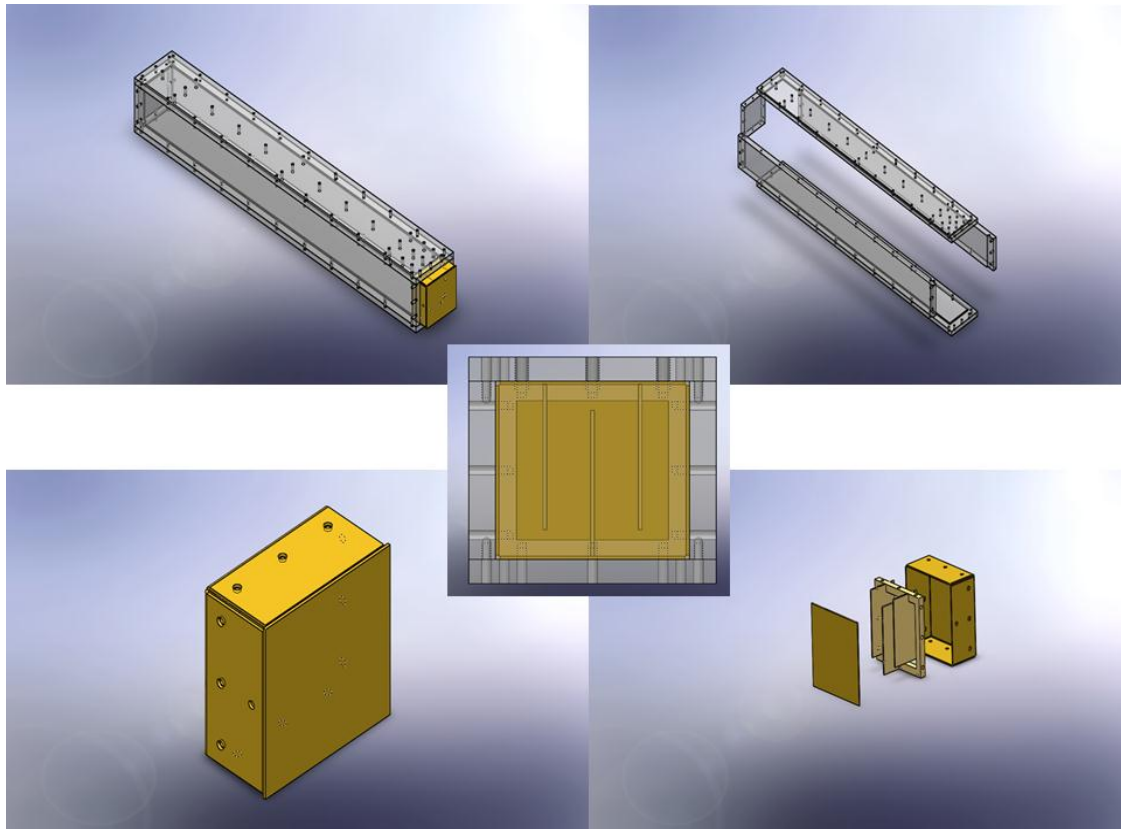
- (1) خزان حراري على شكل متوازي مستطيلات مصنوع من مادة البليكسي (Plexi) مواصفات هذه المادة موجودة في الملحق (4) سماكة 2cm وأبعاده 100x10x10cm، مُزوّد بمدخل ومخرج للتعبئة والتفريغ. تم صنع كل وجه من وجوه الخزان بشكل منفصل ثم جمع هذه القطع باستخدام مجاري (تفريزات) موجودة في كل قطعة حيث تم ربط القطع باستخدام براغي M5 ووضعت مادة سيليكونية من نوع

خاص لضمان الإحكام، إنّ الهدف من طريقة التجميع هذه ضمان عدم تعرض الخزان لأي إجهاد ناتج عن التمدد والتقلص (بما أنّ التجربة ستستمر لفترات طويلة بدرجات حرارة منخفضة) حيث تمتص المادة السيليكونية جميع الإجهادات الناتجة عن التمدد والتقلص، إضافة إلى أنّ التفريزات الموجودة سمحت لنا بتركيب سطح التبريد بثباتية عالية مع الجهاز دون حدوث تسريب وبضمان تماس حراري ممتاز بين سطح التبريد والسائل الموجود ضمن الخزان (الماء المُقطر) .

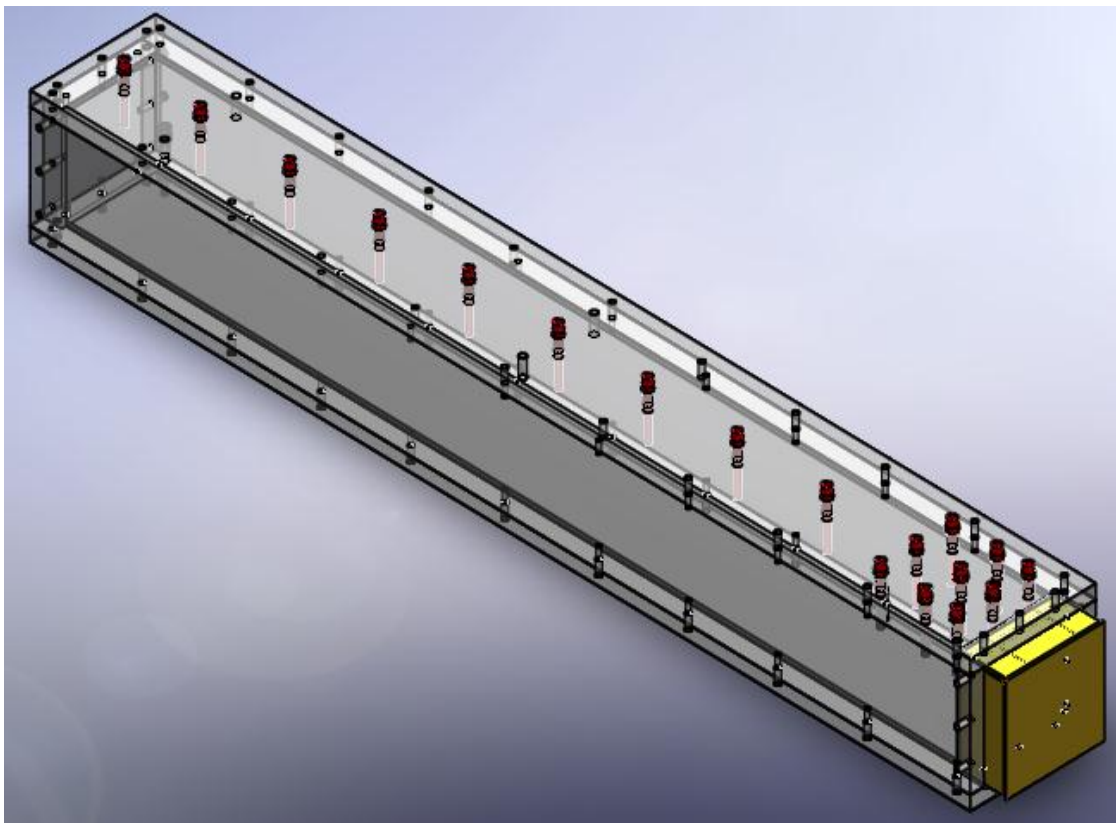
(2) سطح التبريد وهو عبارة عن متوازي مستطيلات مصنوع من النحاس (موضح في الشكل (ب-5-1)).



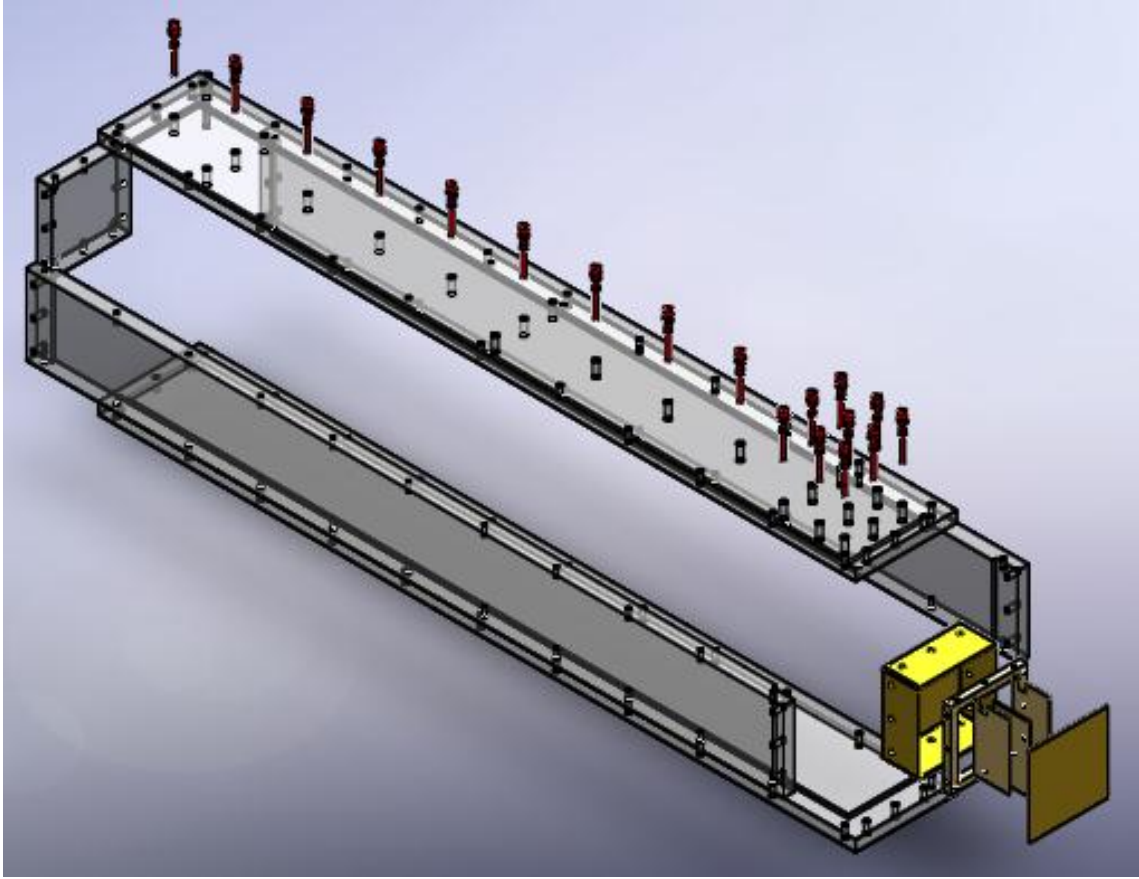
الشكل (أ-5-1) الأقسام الرئيسية لجهاز التجربة



الشكل (ب-1-5) جسم الخزان الرئيسي مع سطح التبريد



الشكل (ج-1-5) جسم الخزان الرئيسي مع سطح التبريد ومواضع الحساسات بشكل تجميعي



الشكل (د-1-5) جسم الخزان الرئيسي مع سطح التبريد ومواضع الحساسات بشكل مُفكك

نلاحظ من الشكل (ب-1-5) أنَّ سطح التبريد يحتوي بداخله على حواجز تُجبر مُزيج الماء /مانع التجمد- الذي سيمر بداخله- على سلوك طريق مُحدد، الهدف من هذا الإجراء منع تشكل مناطق ركود عند زوايا سطح التبريد، ومن أجل تركيب هذه الحواجز داخل متوازي المستطيلات النحاسي قمنا بتصنيع إطار من مادة نحاسية مربعة الشكل (1×1 cm) وربطه مع الجسم الأساسي ببراعي ومن ثم قمنا بلحام الحواجز النحاسي عليه ومن ثم لحام الإطار من الخارج بشكل كامل لضمان عدم حدوث أي تسريب.

3) عازل مُحيط بالخزان من جميع جوانبه هذا العازل هو الستيريبيور بسماكة 10cm، حيث قمنا بتصنيع خمس قطع من هذا العازل (قطعة لكل وجه من وجوه الخزان عدا الوجه من جهة سطح التبريد) حيث نقوم بربط هذه القطعة مع بعضها باستخدام براغي M5 طويلة وصامولات مركبة ضمن قطع العازل، سبب استخدام هذه الطريقة (المُعقدة نسبياً مقارنةً مع الطرق التي تعتمد مبدأ الحقن) هو الحاجة لفك وتركيب العازل بشكل متكرر من أجل مشاهدة

السطح الفاصل (سطح الجليد/ ماء) وتصويره وقياسه، أما بالنسبة لوجه الخزان المقابل لسطح التبريد فقد تم عزله باستخدام تقنية حقن الفوم عالي الكثافة وذلك لأن العازل من هذه الجهة لا يوجد ضرورة أن يكون متحركاً إضافةً إلى أن الضياع الحراري من جهة سطح التبريد عالي لأن السطح مصنوع من النحاس وسيمر به سائل التبريد (ماء/ مانع تجمد) ذو درجة الحرارة المنخفضة، وبعد تركيب العوازل أنفة الذكر أصبحت الجملة المدروسة (الماء المقطر داخل الخزان) بأقرب حالة للحالة النظرية باعتبار وجود خمس وجوه أديباتية ووجه آيزوتيرمي (سطح التبريد) بقيمة الآيزوتيرم نُحدها وفق درجة الحرارة المُراد لسطح التبريد (T_0) .

5-2-2-2 دائرة التبريد:

تتألف دائرة التبريد من كتلتين رئيسيتين هما:

5-2-2-2-1 دائرة التبريد الرئيسية:

وهي تتألف من الأجزاء التقليدية لدارات التبريد: [ضاغط- مكثف- مبخر- صمام خنق- مروحة المكثف]، وتم تجربة عدة ضواغط واختيار الضاغط الأنسب (ذو الاستطاعة الملائمة) والذي يؤمن درجة التبريد المطلوبة مع الاستقرارية طوال فترة التجربة حيث تم ضبط الفارق بين إقلاع الضاغط وتوقفه $0.5C^{\circ}$ ، وبعد تركيب دائرة التبريد تم التأكد من أدائها باستخدام التصوير الحراري كما هو موضح في الشكل (2-5-د)، إنَّ المهمة الرئيسية لهذه الدارة تأمين القدرة التبريدية اللازمة لخفض درجة حرارة سطح التبريد إلى الدرجة المُراد الدراسة عندها (T_0) .

5-2-2-2-2 دائرة التبريد الثانوية (دائرة التبريد غير المباشر):

وهي عبارة عن مبادل حراري جسمه الخارجي مصنوع من مادة البليكسي (Plexi) سماكة 10cm ومعزول بـ ستيريوبور سماكة 2cm، ومبخر دائرة التبريد الرئيسية موجود بداخله وهذا المبادل مملوء بمزيج من الماء مع مانع تجمد (Ethylene Glycol) حيث قمنا بمزج الـ Ethylene Glycol ذو التركيز 90% مع الماء المقطر بنسبة (1/1) أي أصبح التركيب النسبي للمزيج ككل 45% Ethylene Glycol و 55% ماء مقطر حيث تصل درجة حرارة تجمد هذا المزيج إلى $-30C^{\circ}$ ؛ بالإضافة إلى وجود مضخة تسريع تعمل على ضخ المزيج آنف

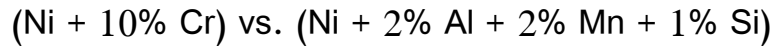
الذكر إلى سطح التبريد، هذه الأجزاء موضحة في الشكل (ج-2-5)، إنَّ الهدف من دائرة التبريد الثانوية تأمين ثباتية لدرجة حرارة سطح التبريد طوال فترة التجربة بما يتوافق مع شروط ستيفان (الشرط الرابع الوارد في الفقرة 3-1-3) لأنَّ دائرة التبريد الرئيسية تحتوي على فترات عمل وتوقف (إقلاع/ فصل الضاغط) ومع أنَّنا خفضنا الفرق بين مرحلة الفصل والوصل للضاغط إلى أقل فارق ممكن لكنه لا يزال موجود لذلك استعنا بدائرة التبريد الثانوية للتغلب على هذه الحالة.

3-2-5 دائرة الحساسات:

تتألف هذه الدارة من مجموعة من حساسات الحرارة (Thermocouples) نوع K وهذه الحساسات بدورها موصلة على دائرة تحصيل بيانات والدائرة الأخيرة توصل على الحاسب أو شاشة عرض لإظهار قراءات الثيرموكبل (Thermocouples) خلال فترة التجربة.

1-3-2-5 لمحة عن حساس الحرارة (Thermocouples) نوع K:

إنَّ المعادن التي يُصنع منها هذا النوع من الحساسات هي:



حيث يُمثّل الكروم (Cr) في هذا النوع من الحساسات العنصر الحراري الموجب (positive thermoelements) ويمثّل الألمنيوم (Al) العنصر الحراري السالب (negative thermoelements) مجال عمل هذا النوع من حساسات الحرارة هو $[-270^{\circ}C \div 1372^{\circ}C]$ ودقة القياس له 0.75% من أجل درجات الحرارة الموجبة، و 2% من أجل درجات الحرارة السالبة. يوجد في الملحق رقم (6) تفاصيل إضافية عن هذا النوع من الحساسات.

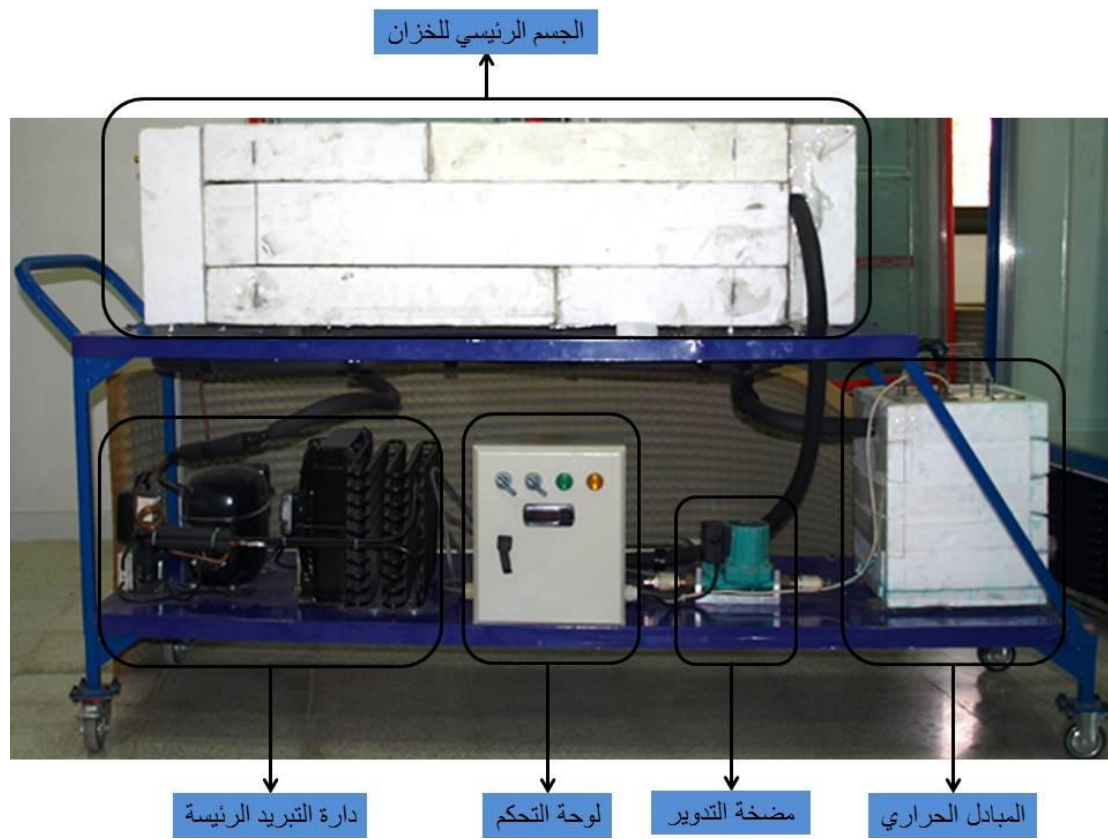
وفيما يلي بعض الصور الفوتوغرافية للجهاز المُصنّع لإجراء التجارب.



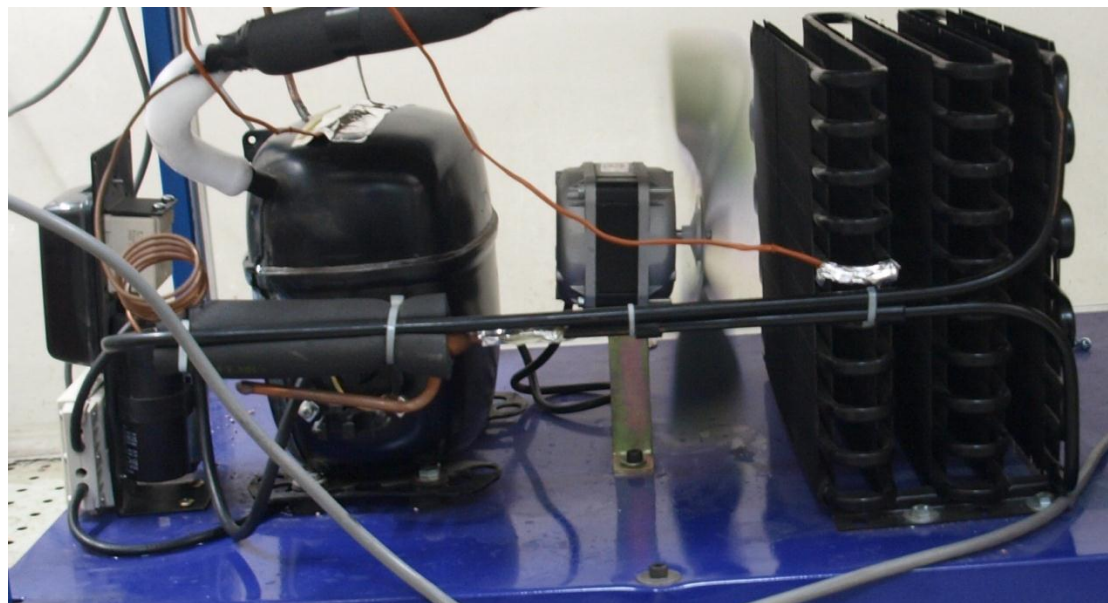
الشكل (أ-2-5) جهاز التجربة بعد التصنيع ضمن المرحلة الأولى



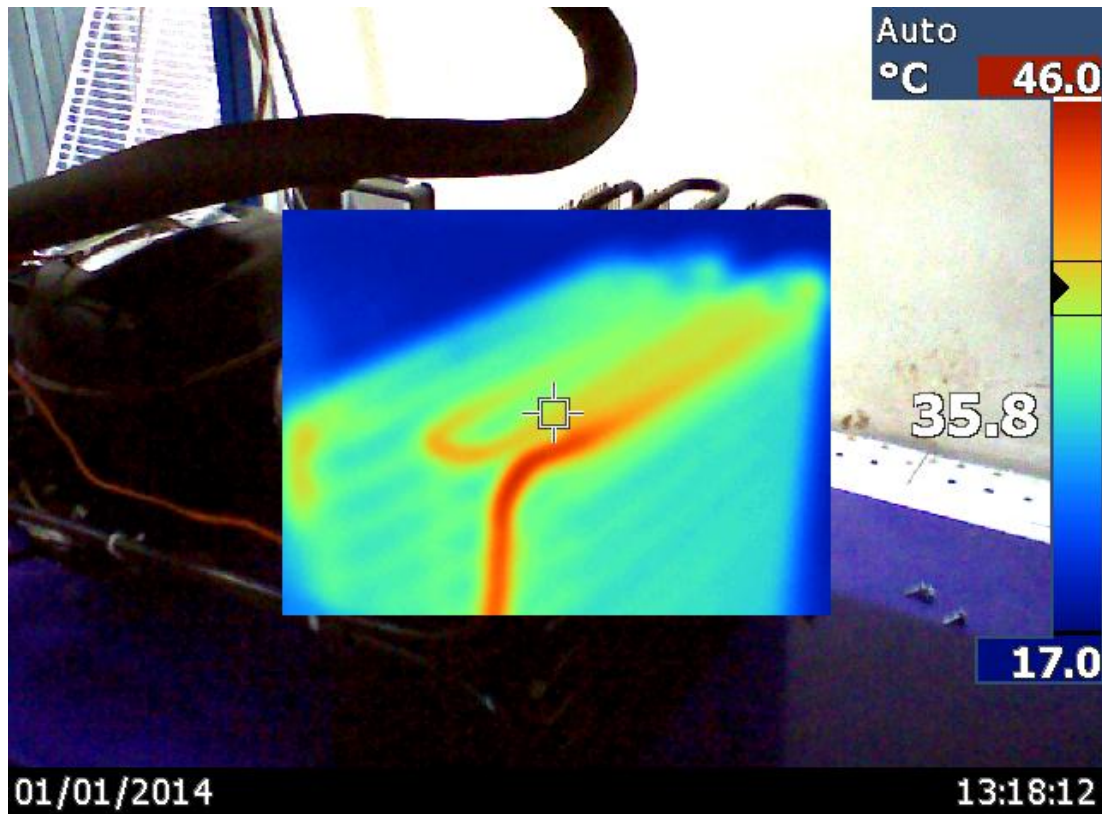
الشكل (ب-2-5) جهاز التجربة بعد انتهاء التصنيع وأثناء التجارب



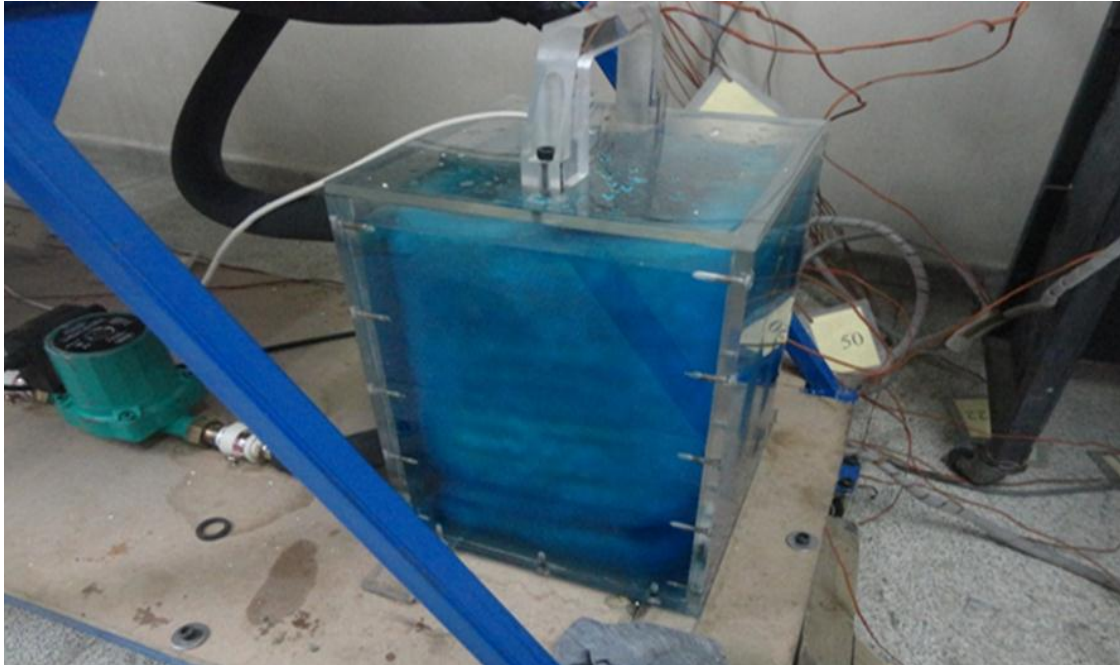
الشكل (ج-2-5) جهاز التجربة بصورته النهائية



الشكل (د-2-5) دارة التبريد الرئيسية بعد التصنيع

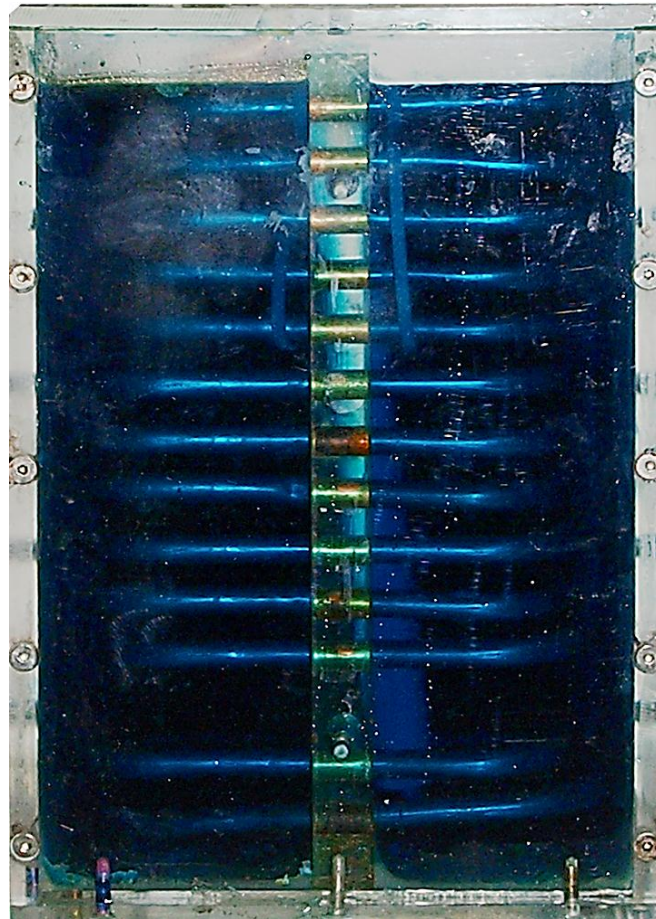


الشكل (ط-2-5) صورة حرارية للمكثف في دورة التبريد الرئيسية أثناء عمل الدارة

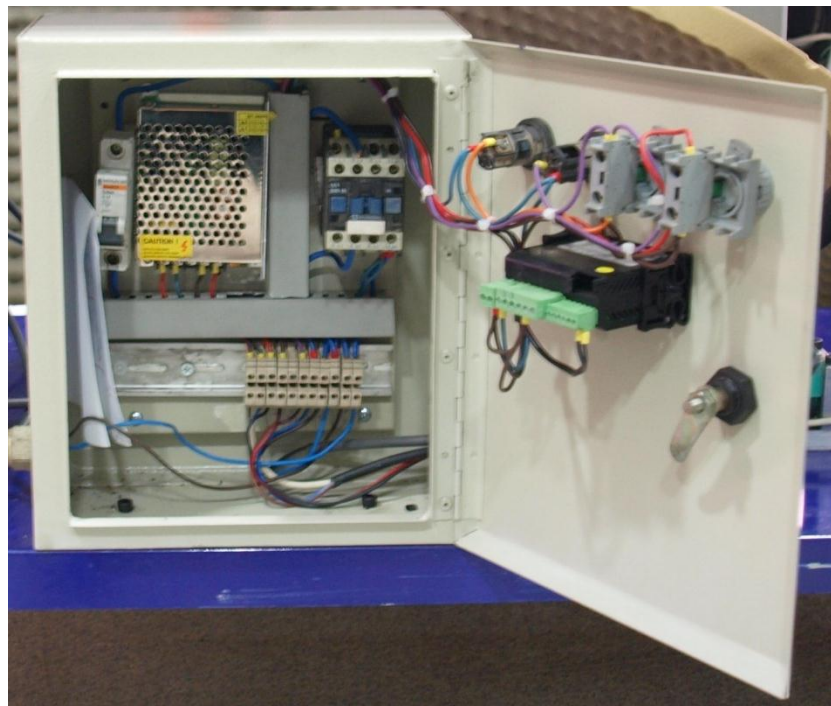


الشكل (هـ-2-5) دورة التبريد الثانوية بعد التصنيع

يمثل الشكل (ط-2-5) صورة حرارية للمكثف أثناء عمل الضاغط لتأمين درجة حرارة -8°C مع العلم أنه يستطيع تأمين درجة حرارة -18°C لتجارب لاحقة (سنأتي على شرحها).

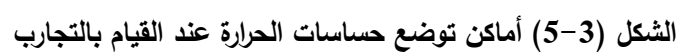


الشكل (و-2-5) صورة توضح المبادل الحراري وكيفية توضع مبخر دراة التبريد الرئيسة بداخله



الشكل (ي-2-5) صورة توضح الأجزاء الداخلية للوحة التحكم

باستخدام الجهاز الموضح آنفاً قمنا بعدة تجارب من أجل أكثر من درجة حرارة لسطح التبريد، حيث تم وضع الحساسات (Thermocouples) وتسميتها كما هو موضح في الشكل (3-5):



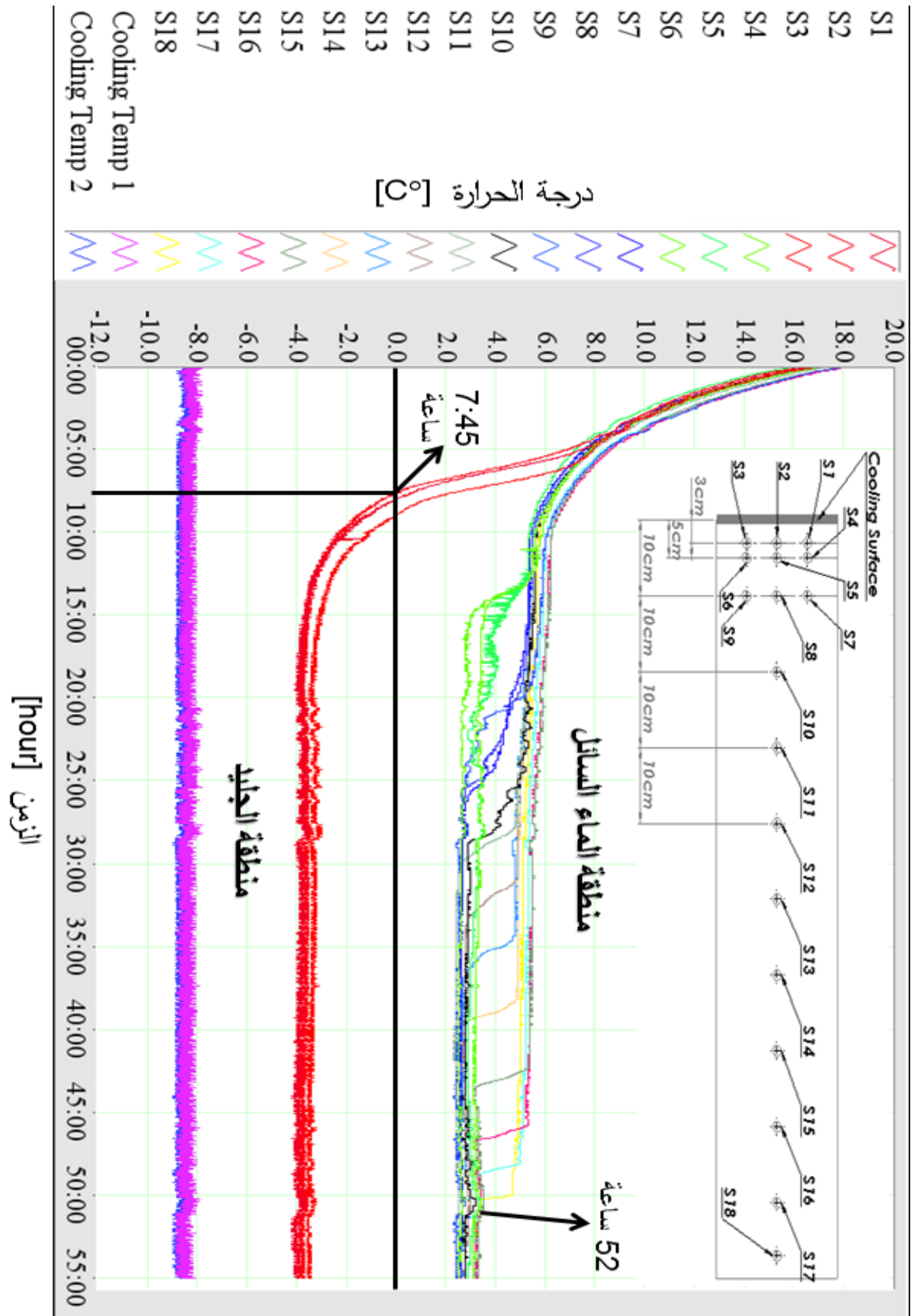
نلاحظ في الشكل (3-5) أنه تم وضع عدد كبير من حساسات الحرارة في المنطقة القريبة من سطح التبريد وذلك لأن سرعة تشكل الجليد في البداية تكون كبيرة وتتناقص هذه السرعة كلما ابتعدنا عن سطح التبريد وقد تم توقع ذلك سلفاً باستخدام المحاكاة الحاسوبية وقد تحقق هذا التوقع بعد القيام بالتجارب العملية (وهذا ما سنلاحظه لاحقاً)، إضافة إلى الحساسات الموضحة في الشكل (3-5) تم وضع حساسي حرارة ضمن المبادل الحراري الثانوي من أجل قياس درجة حرارة مزيج الماء/ مانع تجمد والتي هي -وبتقريب مقبول- درجة حرارة سطح التبريد، أما سبب وضع حساسين فمن أجل ملاحظة أثر التطبيق الحراري داخل المبادل الحراري الثانوي حيث تم وضع هذين الحساسيين في مستويين شاقوليين مختلفين (مع العلم أن المبادل الحراري الثانوي يمكن اعتباره من نمط خزان حراري كامل المزج بسبب حركة السائل داخله الناتج عن مضخة التدوير)، وقد تم وصل واحد من الحساسيين السابقين مع مقياس لدرجة الحرارة ومع الضاغط من أجل إعطاء أمر إقلاع وتوقف الضغط وفق درجة الحرارة التي نضبط عندها مقياس الحرارة (درجة حرارة سطح التبريد المطلوبة T_0).

جميع الحساسات السابقة تقوم بعملية المسح (Scanning) وتسجيل القراءات كل دقيقة، إن الهدف من تصغير الخطوة بين القراءات المتتالية هو السعي لرصد التغيرات (لحظة التحول الطوري) بأكبر دقة ممكنة، يتم تسجيل القراءات على ملف Excel ويتم تسجيل المنحنيات الموافقة على برنامج LabView حيث يتيح هذا البرنامج العديد من الخيارات للتحكم بالنتائج المراد عرضها كعرض قراءات بعض الحساسات دون غيرها حيث سنستفيد من هذه الميزة لدراسة السلوك الحراري لكل مستوي من الخزان وفق بعده عن سطح التبريد وهذا ماسنرها لاحقاً.

أبرز النتائج التي أفضت إليها التجارب العملية أنه ولأجل درجة حرارة معينة لسطح التبريد تتشكل سماكة جليد معينة تصل عندها التجربة لحالة الاستقرار، أي يتوقف عندها نمو الطور الصلب، ولأجل هذه النتيجة الهامة التي توصلنا إليها لم نكتفي بإجراء التجارب من أجل درجة حرارة سطح تبريد وحيدة ($T_0 = -8^\circ\text{C}$) درجة حرارة سطح التبريد الناتجة عن الدراسة النظرية)، ولكن قمنا باختبار ثلاث درجات حرارة لسطح التبريد، وتسجيل قراءات حساسات الحرارة (Thermocouples) خلال كامل مدة التجارب حتى الوصول لحالة الاستقرار، والمنحنيات التالية توضح بروفيل التوزيع الحراري خلال مدة التجربة، حيث يمثل المحور (X) الزمن مقدراً

بالساعات والمحور (Y) درجة الحرارة المسجلة مقدرةً بالسيليسوس وكل منحني يُعبر عن قراءة حساس الحرارة (Thermocouple) الموافق حيث يُبين الشكل التوضيحي الموجود في الأعلى موضع كل حساس والاسم المُعطى له، كما قمنا بتلوين المنحنيات الناتجة كل صف من الحساسات بلون مُختلف لتمييز السلوك الحراري لنقاط الخزان أثناء التجربة تبعاً لُبعد النقطة عن سطح التبريد.

5-3-1 من أجل درجة حرارة سطح تبريد -8°C :



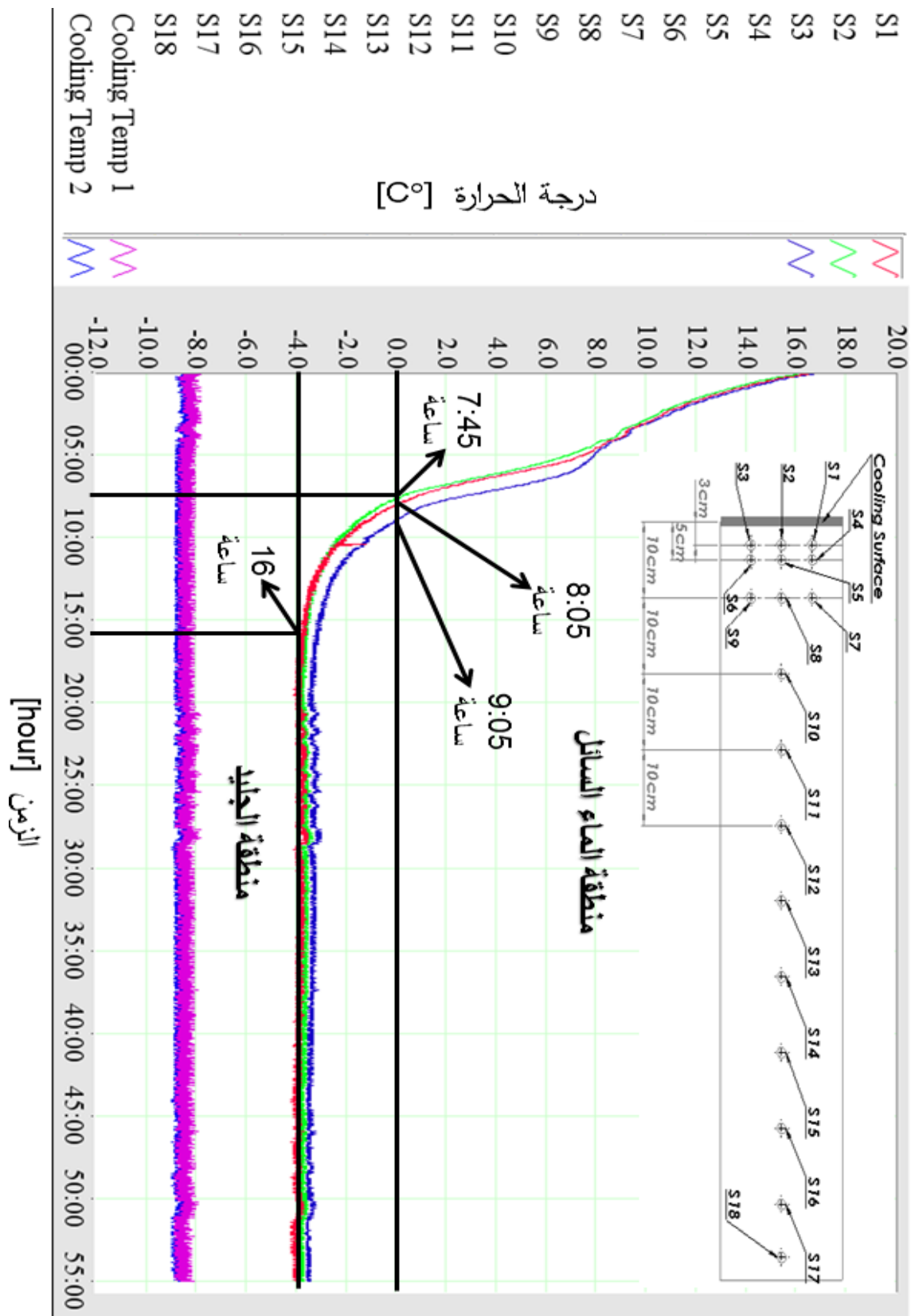
الشكل (أ-4-5) قراءة حساسات الحرارة من أجل درجة حرارة سطح تبريد -8°C

نلاحظ من المنحني الموضح في الشكل (أ-4-5) أنه وفي بداية التجربة كانت جميع حساسات الحرارة تهبط مع بعضها حتى الوصول لدرجة حرارة حوالي 7°C وبعدها بدأ الصف الأول من الحساسات بالهبوط بشكل أسرع من باقي الحساسات ليصل إلى مرحلة التجمد (الطور الصلب/ 0°C) بعد حوالي 7:45 ساعة، كما نلاحظ أنه وبعد 52 ساعة وصلت التجربة لحالة الاستقرار حيث ظلت قراءات جميع الحساسات بعدها ثابتة دون تغيير.

المنحنيات في الأسفل ذات اللون الأزرق والزهري تمثل قراءات حساسات الحرارة الموضوعة ضمن المبادل الحراري الثانوي والتي تُعبر عن درجة حرارة سطح التبريد، نلاحظ من خلال هذين المنحنيين الاستقرار العالية لدرجة حرارة سطح التبريد طوال فترة التجربة مع وجود تأرجح بسيط ناتج عن عملية فصل وإقلاع الضاغط وهذا التأرجح ذو أثر محدود جداً لأنَّ المبادل الحراري الثانوي -كما سبق وذكرنا- يُعتبر في حالتنا المدروسة خزان حراري كامل المزج.

وبعد إلقاء نظرة عامة على النتائج المُسجلة لجميع الحساسات سنقوم بدراسة السلوك الحراري المُسجل عند كل صف من الحساسات على حدى (حسب بعده عن سطح التبريد) ونناقش النتائج التي تم الوصول إليها.

أولاً: الصف الأول الذي يبعد 3cm عن سطح التبريد:



الشكل (ب-4-5) قراءة حساسات الحرارة على بُعد 3cm من سطح التبريد ذي درجة الحرارة -8°C

نلاحظ في المنحني السابق النقاط المميزة التالية:

- الحساس الذي وصلت إليه موجة التجمد أولاً هو الحساس (S2) حيث وصلت إليه موجة التجمد بعد 7:45 ساعة من بدأ التجربة.
- بعدها وصلت موجة التجمد إلى الحساس (S1) بعد 8:05 ساعة من بدأ التجربة.
- أخيراً وصلت موجة التجمد إلى الحساس (S3) بعد 9:05 ساعة من بدأ التجربة.

نلاحظ من القيم السابقة أنَّ موجة التجمد بدأت أولاً من منتصف الخزان وهذا يوافق ما لوحظ في المحاكاة، أما بالنسبة للفارق الزمني بين الحساس الأيمن (S1) والأيسر (S3) فيعود إلى تصميم سطح التبريد والحواجز الموضوعة بداخله حيث يقع الحساس (S1) بالقرب من مدخل سائل التبريد (مزيج الماء/ مانع التجمد) إلى سطح التبريد.

- بعد 16 ساعة من التجربة دخلت جميع حساسات الصف الأول بمرحلة الاستقرار حيث لم نعد نلاحظ تغيراً في درجات الحرارة المُسجلة ولكن أصبحت جميع الحساسات تُعطي قيمة ثابتة قريبة من -4°C مع العلم أنَّ زمن الاستقرار للتجربة ككل (الجميع الحساسات) وكما لاحظنا في المنحني العام (الشكل أ-4-5) هو 52 ساعة، ويعود تفسير هذه الظاهرة إلى أنَّ الجليد المُتكون وبعد إنجازه التحول الطوري أصبح يُشكل مقاومة حرارية ثابتة، فهو يكسب البرودة من جهة سطح التبريد ويخسرهما من جهة الطور السائل ودرجة حرارة سطح التبريد المدروسة ($T_o = -8^{\circ}\text{C}$) لم تعد تكفي للتغلب على هذه المقاومة وهذا ما سنلاحظه عند دراسة السلوك الحراري المُسجل من باقي الحساسات.

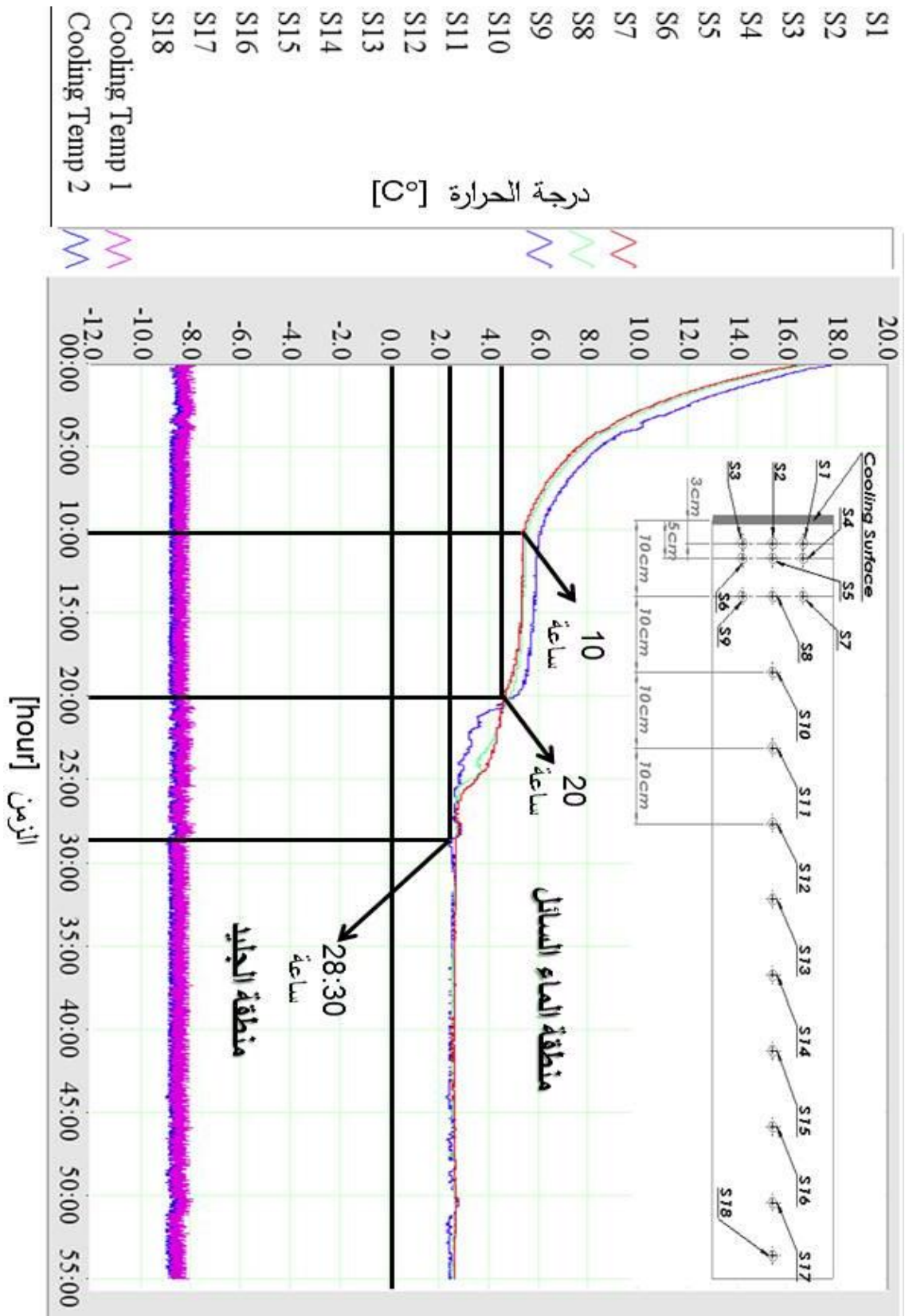
Figure 1 is a line graph showing the temperature distribution of the cooling surface and the surrounding air during the cooling process. The y-axis represents temperature in degrees Celsius (°C), ranging from -12.0 to 20.0. The x-axis represents time in hours, ranging from 00:00 to 55:00. The graph shows two main regions: 'منطقة الماء السائل' (Liquid Water Region) and 'منطقة الجليد' (Ice Region). The 'منطقة الماء السائل' region is characterized by a sharp drop in temperature around 13:00, followed by a gradual decrease. The 'منطقة الجليد' region is characterized by a sharp drop in temperature around 14:45, followed by a gradual decrease. The graph also includes a schematic diagram of the cooling surface and the surrounding air, showing the locations of the sensors S1 through S18.

الشكل (ج-4-5) قراءة حساسات الحرارة على بُعد 5cm من سطح التبريد ذي درجة الحرارة -8°C

نلاحظ في المنحني السابق النقاط المميزة التالية:

- مع بداية التجربة أخذت درجات الحرارة بالهبوط بشكل متسارع ثم تباطأت قليلاً (لأنه في البداية كان الفرق بين درجات الحرارة كبير ثم قل هذا الفرق فتباطأ الهبوط بدرجات الحرارة وهذا منطقي)، ولكن وبعد مرور 13 ساعة على بدء التجربة حدث هبوط بوتيرة متسارعة عند درجة الحرارة حوالي 5.5°C ، حيث هبطت درجة الحرارة إلى الدرجة 3.5°C خلال 1:75 ساعة (مع العلم أن الهبوط من الدرجة 8°C إلى الدرجة 6°C استغرق حوالي 3:30 ساعة) يمكن أن نُعلل هذه الظاهرة بأنّ المواصفات الثيرموفيزيائية (الفيزيائية الحرارية) للماء ضمن مجال درجات الحرارة ($5^{\circ}\text{C} \div 0^{\circ}\text{C}$) تسلك سلوكاً مميزاً (مثلاً أعلى كثافة للماء تكون عند الدرجة 4°C).
- نلاحظ أيضاً في المنحني السابق أنه وبعد وصول درجة الحرارة إلى حوالي 3.5°C دخلت جميع الحساسات في مرحلة الاستقرار ولم يعد هناك تغير ملحوظ في قراءة هذه الحساسات، ومن الجدير بالذكر هنا أنّ موجة التجمد لم تصل إلى هذا الصف من الحساسات أي أنّ الطاقة التبريدية التي يملكها سطح تبريد ذي درجة حرارة -8°C غير كافية للتغلب على المقاومة الحرارية للجليد المتشكل حتى تصل موجة التجمد لبعد 5cm ضمن هذه الظروف، وهذا ما سنلاحظه بعد عرض صورة الجليد المتشكل عند نهاية التجربة (بعد وصولها لحالة الاستقرار).

ثالثاً: الصف الثالث الذي يبعد 10cm عن سطح التبريد:

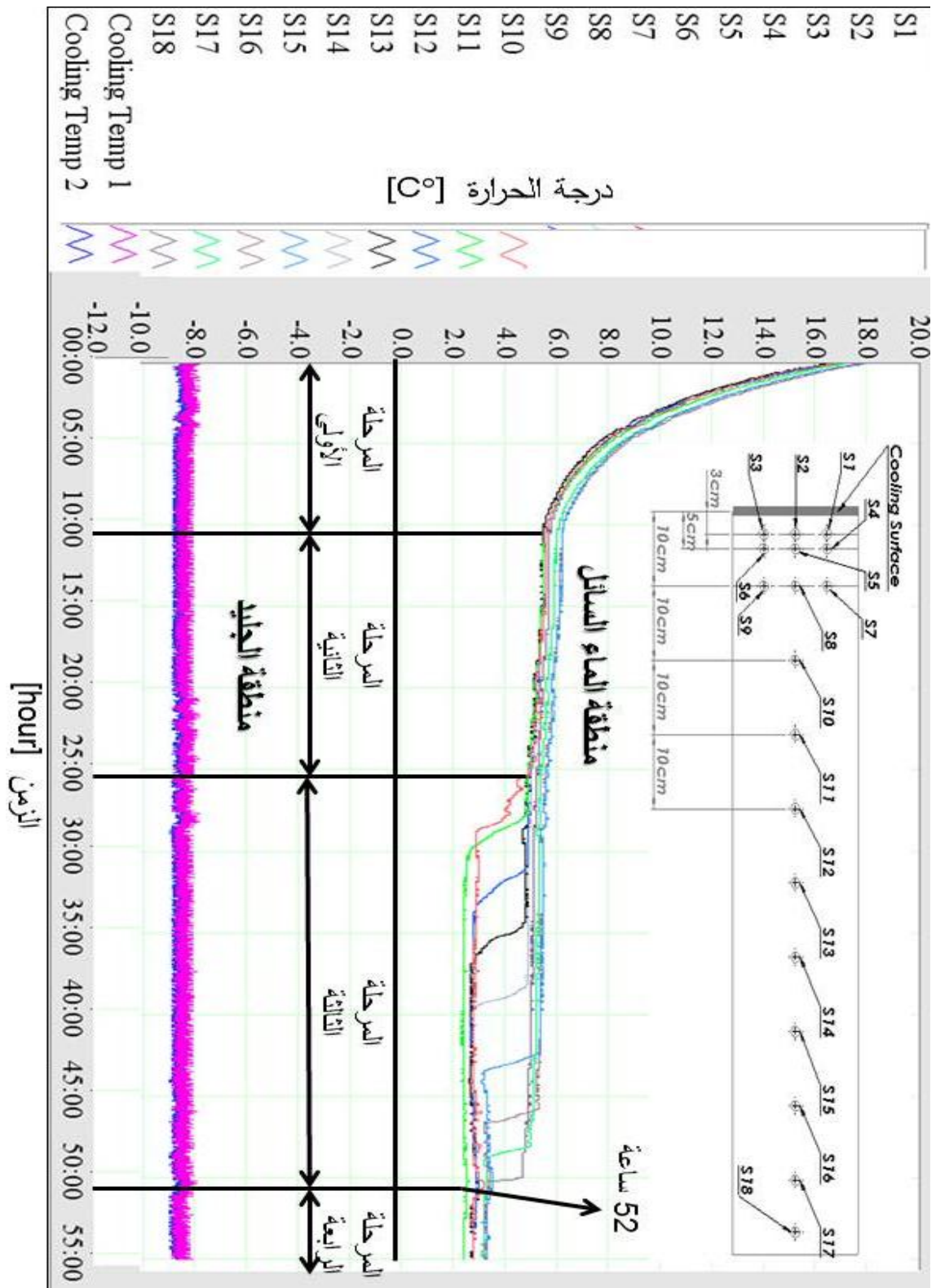


الشكل (د-4-5) قراءة حساسات الحرارة على بُعد 10cm من سطح التبريد ذي درجة الحرارة -8°C

نلاحظ في المنحني السابق النقاط المميزة التالية:

- أيضاً هنا في بداية التجربة أخذت درجات الحرارة بالهبوط بشكل متسارع ثم تباطئت قليلاً حتى الوصول إلى الزمن 10 ساعات دخلت الحساسات بحالة تشبه حالة الاستقرار استمرت هذه الحالة إلى الزمن 20 ساعة (بقيت 10 ساعات) عندها حدث ما يشبه القفزة في قراءة الحساسات لتهبط درجة الحرارة من حوالي 4.5°C إلى حوالي 2.5°C ، وكما ذكرنا في الفقرة السابقة فإنّ هذا السلوك يُعَلَّل بالاقتراب من درجة الحرارة الموافقة لأعلى كثافة 4°C ، وكذلك الاقتراب من درجة حرارة التحول الطوري 0°C .
- نلاحظ أيضاً أنّه وبعد مرور 28.5 ساعة على بدء التجربة دخلت الحساسات في حالة الاستقرار، مسجلة نفس درجة الحرارة (حوالي 2°C) لـ 27 ساعة التالية.

رابعاً: باقي الحساسات الموزعة على طول الخزان:



الشكل (هـ-4-5) قراءة حساسات الحرارة على بُعد من 20cm حتى 95cm من سطح التبريد ذي درجة الحرارة -8°C

نلاحظ في المنحني السابق:

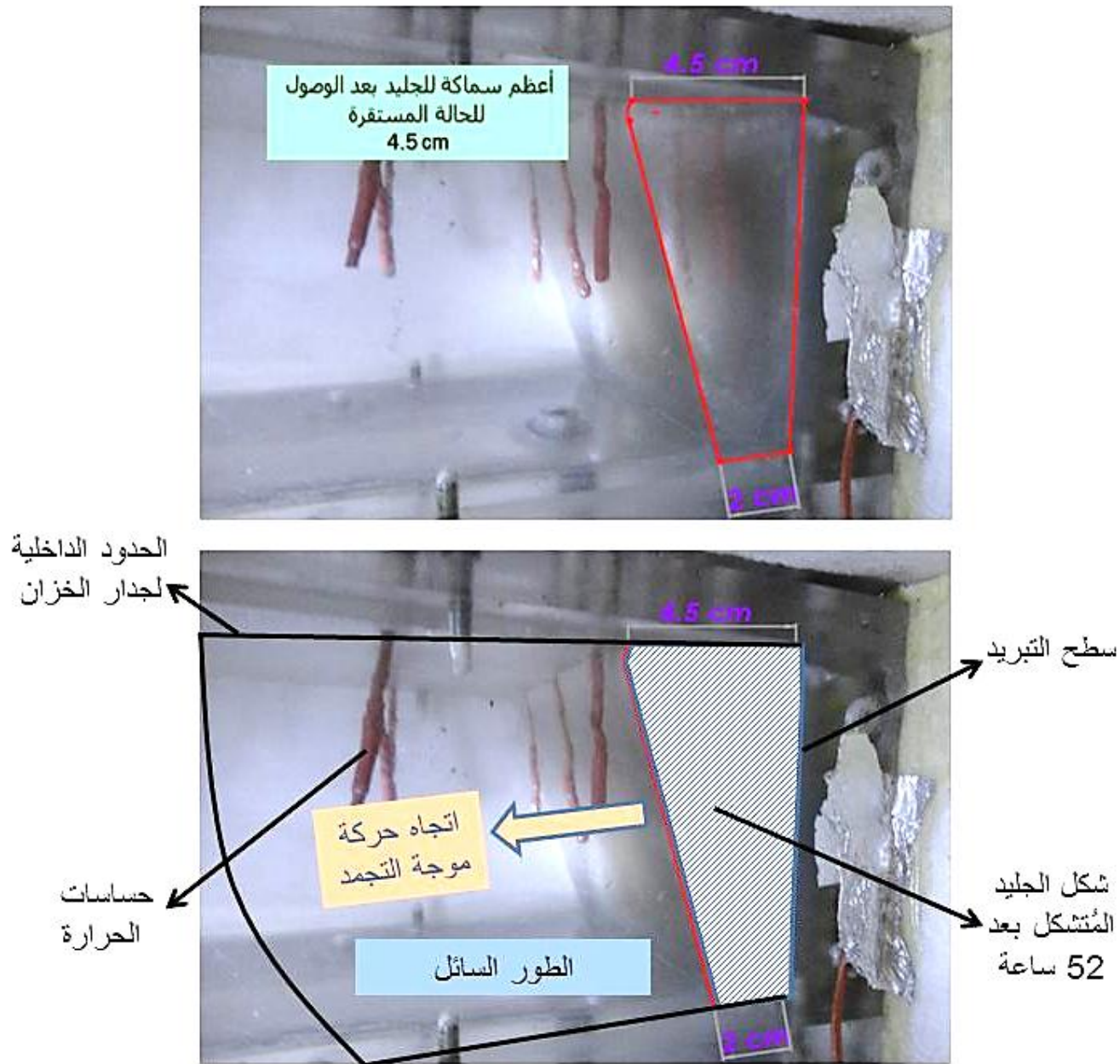
أنَّ جميع الحساسات تسلك سلوكاً متشابهاً يمكن تقسيم هذا السلوك إلى أربعة مراحل حيث يمر كل من الحساسات بهذه المراحل مع وجود إزاحة زمنية (Shifting)، هذه المراحل هي:

- المرحلة الاولى: تهبط فيها درجة الحرارة بشكل تدريجي يتباطأ مع مرور الزمن بسبب انخفاض الفرق بين درجة حرارة سطح التبريد ودرجة الحرارة التي يُسجلها الحساس.
- المرحلة الثانية: تدخل فيها الحساسات إلى مايشبه حالة الاستقرار حيث تبقى درجة الحرارة ثابتة دون أي تغيير يُذكر، وتختلف مدة هذه المرحلة حسب البُعد عن سطح التبريد حيث تزداد هذه المدة بازدياد البُعد عن سطح التبريد.
- المرحلة الثالثة: في هذه المرحلة تُنجز درجات الحرارة المُسجلة قفزة من درجة الحرارة $5C^{\circ}$ إلى درجة الحرارة $2.5C^{\circ}$ وكما ذكرنا سابقاً يُمثل هذا المجال من درجات الحرارة مجالاً مميزاً بالنسبة للمواصفات الثيرموفيزيائية للماء.
- المرحلة الرابعة: وهي مرحلة الاستقرار، فبعد أن تتم القفزة آنفة الذكر تثبت درجة الحرارة ولايحدث أي تغيير في القيمة المُسجلة، ومع وصول آخر حساس (على بُعد 95cm من سطح التبريد) إلى هذه الحالة (حالة الاستقرار) تنتهي التجربة.

وكما ذكرنا سابقاً فإنَّ حساسات كانت تُسجل القيم ضمن برنامج Excel وبما أنَّ التسجيل كان يتم كل دقيقة والتجربة استمرت لمدة 55 ساعة فقد تم تسجيل 3300 قراءة لعششرين حساس وفيمايلي بعض هذه القيم المُسجلة للنقاط المميزة التي تحدثنا عنها سابقاً:

101

وكان الجليد المُتشكل بعد الوصول إلى حالة الاستقرار (بعد 52 ساعة) كما هو موضح في الشكل (ط-4-5).

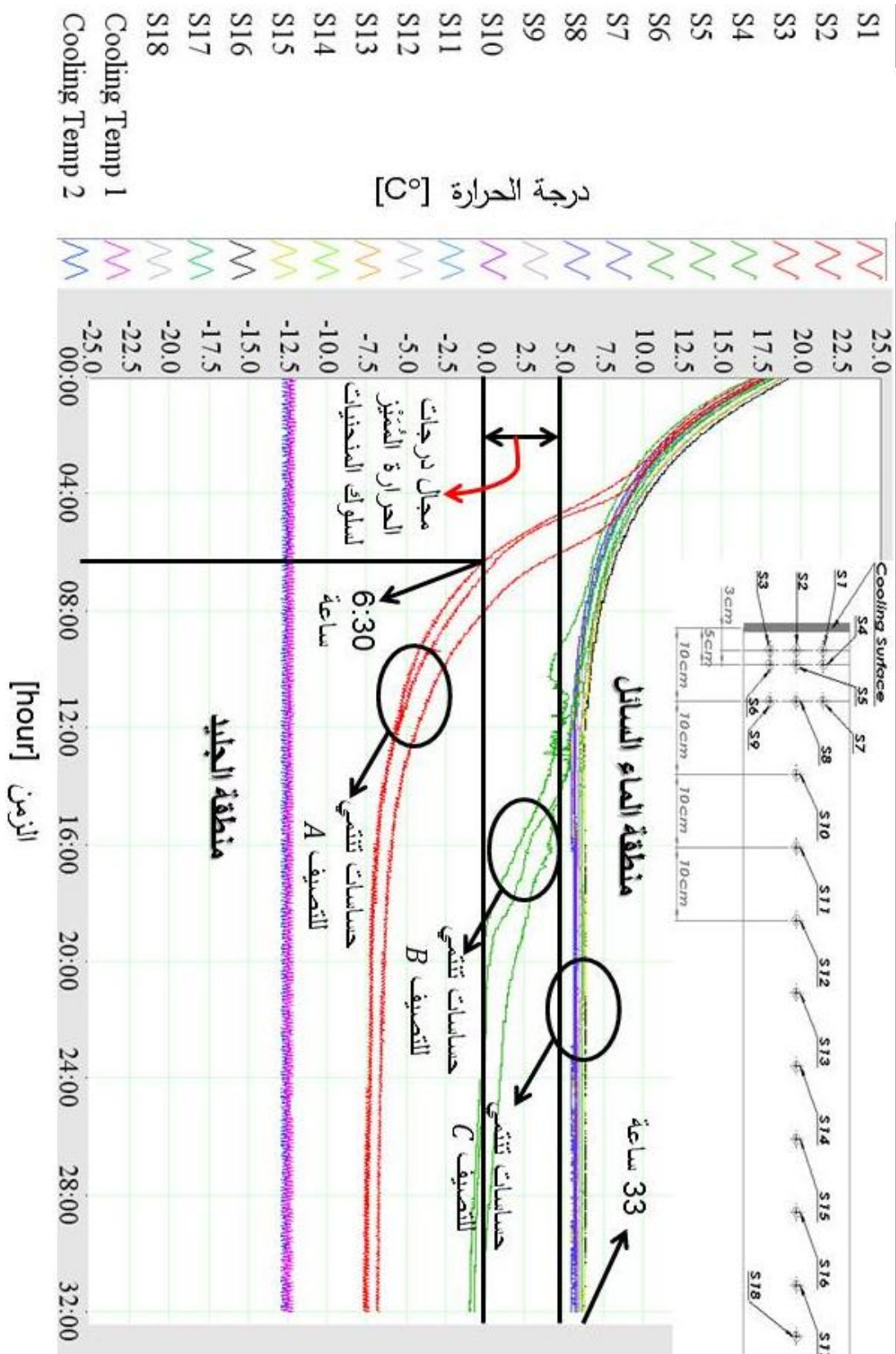


الشكل (ط-4-5) الجليد المُتشكل بعد الوصول لحالة الاستقرار من أجل درجة حرارة سطح تبريد -8°C

نلاحظ من الشكل السابق أنَّ سماكة الجليدة من الأعلى أكبر منها في الأسفل (عكس تأثير الجاذبية)، ويمكن ان نعزو ذلك لعدة أسباب منها: تصميم سطح التبريد حيث يتم دخول سائل التبريد من الأعلى، كذلك وجود حساسات الحرارة في الأعلى والتي يمكن أن تُشكل بذور تبلور.

إنَّ درجة الحرارة التصميمية لسطح التبريد هي -8°C وهي درجة الحرارة التي صُمِّمَ الجهاز ليعمل عندها، ولكن وبعد النتائج التي تم التوصل إليها: زمن الاستقرار وسماكة الجليد المُتشكل عندها، وكذلك السلوك الحراري الذي تم رصده باستخدام الحساسات آنفة الذكر، قمنا بإجراء تجارب أُخرى باستخدام درجة مُختلفة لسطح التبريد للتأكد من هذه الاستنتاجات، وكانت النتائج على النحو التالي:

5-3-2 من أجل درجة حرارة سطح تبريد -12°C :



الشكل (أ-5-5) قراءة حساسات الحرارة من أجل درجة حرارة سطح تبريد -12°C

أبرز النقاط التي يُمكن استقراءها من المنحني السابق:

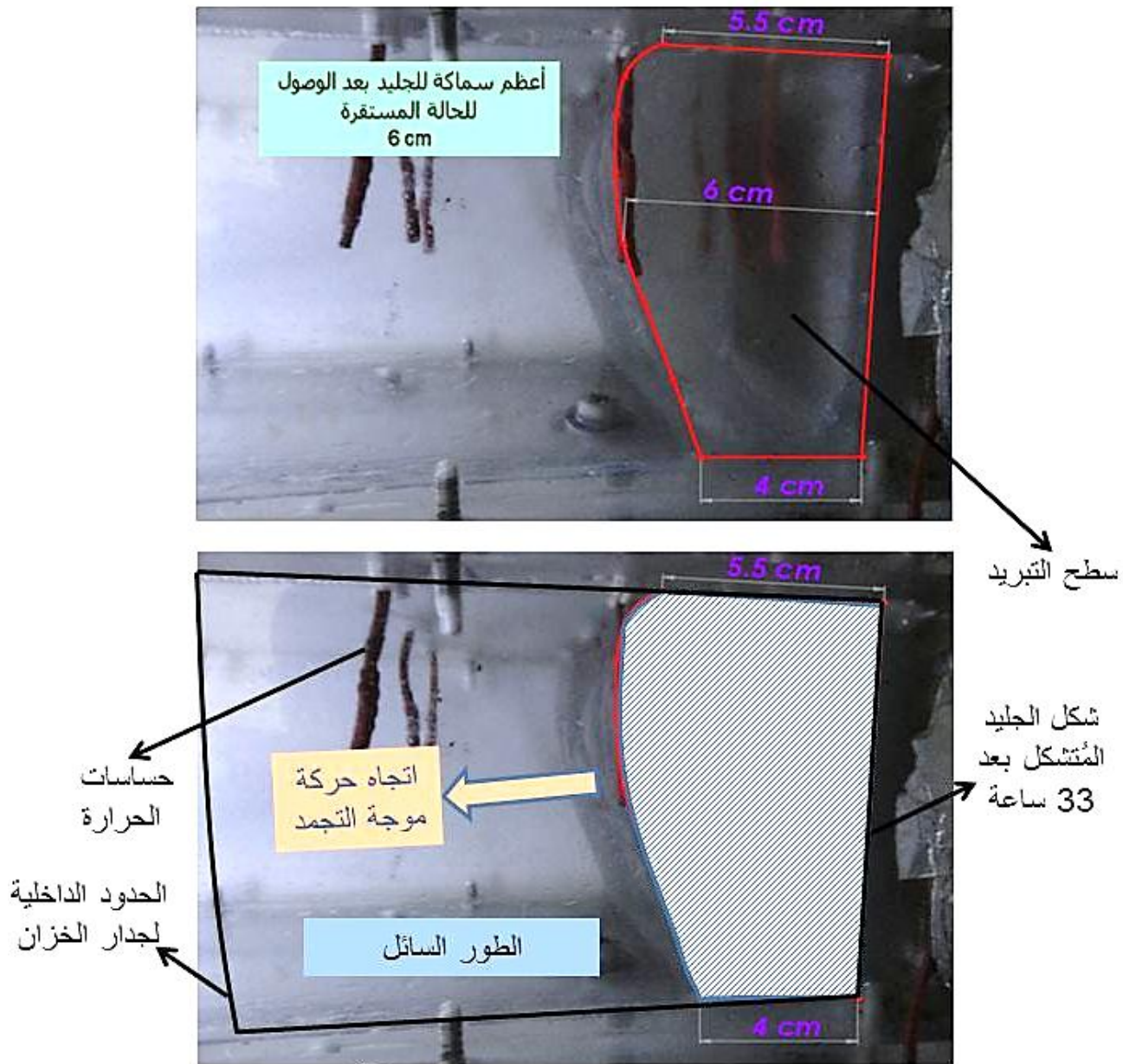
- بالنسبة للسلوك الحراري الذي سجلته حساسات الحرارة، نلاحظ في البداية أخذت درجات الحرارة لجميع النقاط بالهبوط بشكل تدريجي وجميع المنحنيات كانت تسير مع بعضها في هذه المرحلة، ولكن وعند الاقتراب من الدرجة $5C^{\circ}$ ظهر تمايز في سلوك المنحنيات المُسجلة باستخدام حساسات الحرارة، يمكن تصنيف هذا السلوك إلى ثلاث حالات:

i. سلوك المنحني وفق التصنيف A: يندرج تحت هذا التصنيف الحساسات التي وصلت إليها موجة التجمد، وبعد تشكل الجليد هبطت درجة الحرارة عندها مبتعدةً عن درجة حرارة التحول الطوري ($0C^{\circ}$)، نلاحظ في هذه المنحنيات أنه وعند الدرجة $5C^{\circ}$ تبدأ بسلوك منحى مُختلف عن باقي الحساسات ولكن لا يوجد حركة غير منتظمة (أو لا يوجد قفزات ظاهرة) عند مجال درجات الحرارة ($5C^{\circ} \div 0C^{\circ}$) بل على العكس لا يظهر أي شيء مُميز في سلوك المنحني في هذا المجال، وبعد وصولها لدرجة حرارة مُعينة (أقل من درجة حرارة التحول الطوري) تدخل مرحلة الاستقرار.

ii. سلوك المنحني وفق التصنيف B: يندرج تحت هذا التصنيف الحساسات التي تجاوزت درجة الحرارة $5C^{\circ}$ (هبوطاً) ولكنها لم تتجاوز درجة حرارة التحول الطوري ($0C^{\circ}$) أو بقيت قريبة منها، ما يُميز هذه المنحنيات هو التمايز الواضح في سلوكها (من حركة غير منتظمة أو قفزات) عند دخولها لمجال درجات الحرارة ($5C^{\circ} \div 0C^{\circ}$)، وبعد هذا السلوك (المُميز)، تدخل مرحلة الاستقرار عند درجة حرارة قريبة من درجة حرارة التحول الطوري ($0C^{\circ}$).

iii. سلوك المنحني وفق التصنيف C: يندرج تحت هذا التصنيف الحساسات التي لم تتجاوز درجة الحرارة $5C^{\circ}$ ، حيث لا نلاحظ في سلوك هذه المنحنيات أي شيء مُميز، بل على العكس تهبط درجات الحرارة المُسجلة وفقاً لهذه المنحنيات بشكل انسيابي لتستقر عند درجة حرارة أعلى من $5C^{\circ}$.

- إضافةً إلى سلوك المنحنيات وفق التصنيفات السابقة، نلاحظ أنَّ الزمن الذي لَزِمَ للوصول إلى حالة الاستقرار هو 33 ساعة، حيث كانت الحساسات ذات التصنيف B لسلوك منحنيها هي آخر من وصل إلى حالة الاستقرار.
- أخيراً، نلاحظ أنَّ الزمن الذي لَزِمَ للوصول موجة التجمد إلى الصف الأول من الحساسات (على بُعد 3cm من سطح التبريد) هو 6:30 ساعة هذا الرقم مأخوذ للحساس S2 وهو أول حساس في الصف الأول وصلت إليه موجة التجمد، بمعنى أنَّ موجة التجمد وصلت إلى منتصف الخزان قبل الأطراف وهو ماسيظهر بشكل واضح في الصورة التالية التي توضح الجليد المُتشكل بعد الوصول لحالة الاستقرار (بعد 33 ساعة).

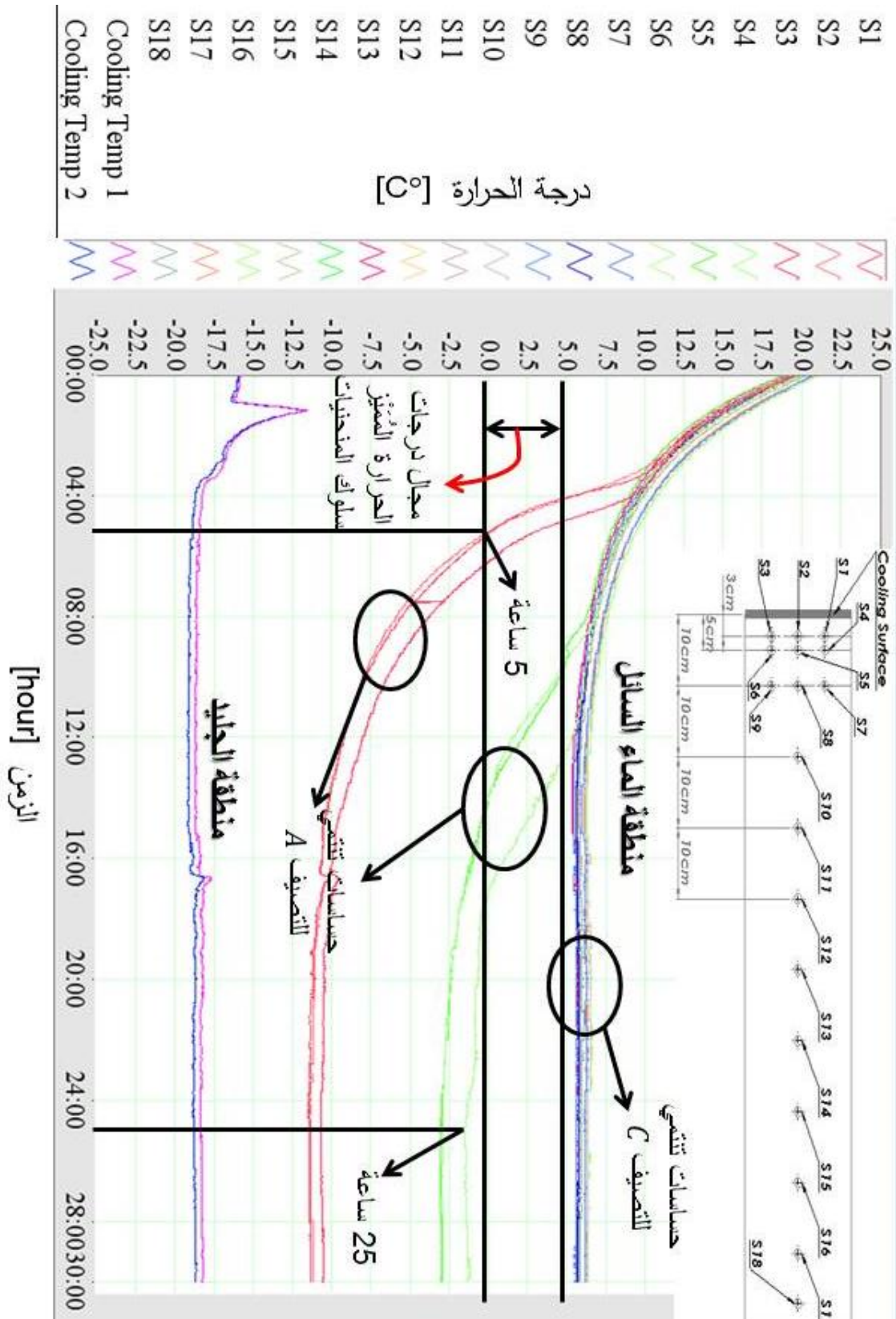


الشكل (ب-5-5) الجليد المتشكل بعد الوصول لحالة الاستقرار من أجل درجة حرارة سطح تبريد -12°C

نلاحظ في الصور السابقة أنَّ أكبر سماكة للجليد المتشكل تقع في المنتصف مع وجود فارق في السماكة بين الأعلى والأسفل، هذا الفارق بقي موجود عند تجربة سطح التبريد ذي درجة حرارة -12°C ولكن فرق السماكات بين الأعلى والأسفل انخفض عما كان عليه في تجربة -8°C .

وبعد بيان سلوك منحنيات حساسات الحرارة، وتصنيفها ضمن ثلاث تصنيفات مختلفة، قمنا بإجراء تجربة من أجل درجة حرارة -18°C لسطح التبريد وكانت النتائج كالتالي:

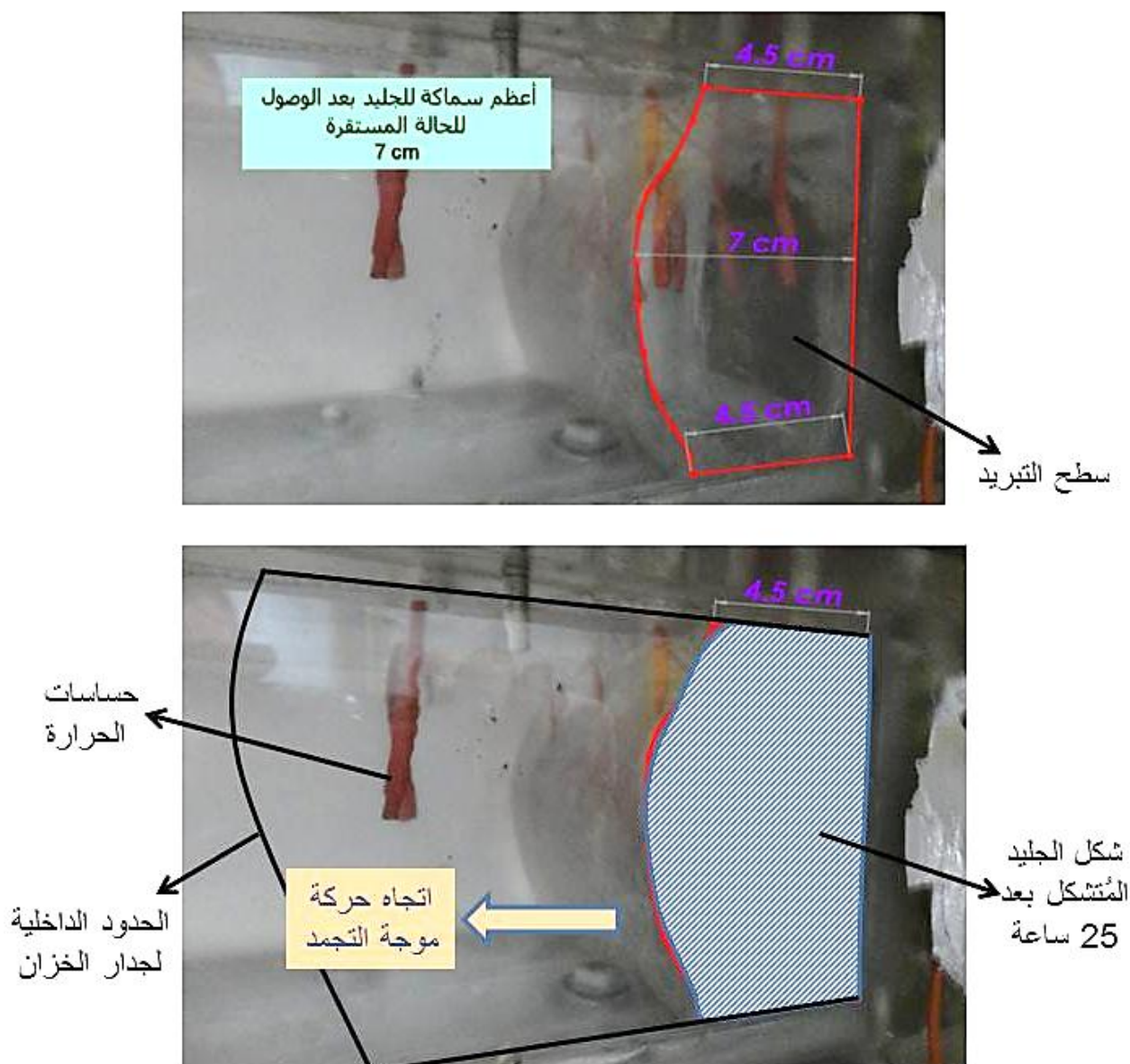
3-3-5 من أجل درجة حرارة سطح تبريد -18°C :



الشكل (أ-5-6) قراءة حساسات الحرارة من أجل درجة حرارة سطح تبريد -18°C

نلاحظ في المنحني السابق:

- لم تظهر في هذه التجربة المنحنيات ذات السلوك B، فالمنحنيات الناتجة عن الصف الأول من الحساسات (على بُعد 3cm من سطح التبريد) وكذلك المنحنيات الناتجة عن الصف الثاني من الحساسات (على بُعد 6cm من سطح التبريد) يمكن أن يُصنف سلوكها وفق التصنيف A، أما باقي الحساسات فهي تنتمي للتصنيف C.
 - إنَّ الزمن الذي لَزِمَ للوصول موجة التجمد لأول صف من الحساسات هو 5 ساعات، وفي هذه التجربة أول حساس سجل الدرجة $0C^{\circ}$ هو الحساس S2 الواقع في المنتصف.
 - إنَّ الزمن الذي لَزِمَ للوصول التجربة إلى حالة الاستقرار هو 25 ساعة، حيث كانت حساسات الصف الثاني هي آخر الحساسات وصولاً لحالة الاستقرار.
- وبعد الوصول لحالة الاستقرار كان شكل الجليد المتشكل كما هو موضح في الشكل (ب-5-5).



الشكل (ب-5-5) الجليد المتشكل بعد الوصول لحالة الاستقرار من أجل درجة حرارة سطح تبريد -18°C

نلاحظ في الشكل السابق أنَّ التقعر في المنتصف ظاهر بشكل واضح، وهذا يوافق الحالة النظرية التي تم التوصل إليها باستخدام المحاكاة، كما أنَّ سماكة الجليد من الأعلى تساوي سماكة الجليد من الأسفل، يمكن أن نعزو تقارب الحالة النظرية من الحالة العملية في هذه التجربة أكثر من سابقتها أنَّه وعند نقصان درجة حرارة سطح التبريد تزداد القدرة التبريدية والتي بدورها تُقلل من أثر الضياعات المختلفة الأمر الذي يؤدي إلى هذا التقارب بين الشكل المتوقع نظرياً وشكل الجليد الناتج عملياً.

5-3-4 أبرز النتائج التي حصلنا عليها تجريبياً:

✓ دراسة السلوك الحراري لنقاط الخزان بحسب بعدها عن سطح التبريد، ومن أجل عدة درجات حرارة لسطح التبريد، وأبرز ماتوصلنا إليه بعد دراسة السلوك الحراري أن الماء وضمن مجال درجات الحرارة ($5C^{\circ} \div 0C^{\circ}$) يتمتع بسلوك حراري مُميز يظهر ضمن شروط مُحددة، لذلك قمنا بتصنيف السلوك الحراري ضمن ثلاثة تصنيفات مُختلفة [A,B,C] (حيث تم شرح هذه التصنيفات في الفقرة 5-3-2)، وبعد ملاحظة المنحنيات الواردة في الأشكال [الشكل (أ-4-5) ، الشكل (أ-5-5) ، الشكل (أ-6-5)] نجد:

عند درجة حرارة سطح التبريد $-8C^{\circ}$	عند درجة حرارة سطح التبريد $-12C^{\circ}$	عند درجة حرارة سطح التبريد $-18C^{\circ}$
ظهر السلوك الحراري A,B	ظهر السلوك الحراري A,B,C	ظهر السلوك الحراري A,C

وكما ذكرنا سابقاً يُعتبر المجال الحراري ($5C^{\circ} \div 0C^{\circ}$) مجالاً مُميزاً المواصفات الثيرموفيزيائية (الفيزياحرارية) للماء وهذا ما سنلاحظه في الملحق (5).

✓ أفضت التجارب العملية إلى ظهور حالة الاستقرار (الحالة التي تقف عندها موجة التجمد عن الحركة ولا يطرأ بعد الوصول إلى هذه الحالة أي تغيير على درجات الحرارة مع مرور الزمن)، وهذه الحالة لم يتم تسليط الضوء عليها بشكل كافي في الدراسات النظرية، وبعد إجراء التجارب لاحظنا أنه ولأجل كل درجة حرارة لسطح التبريد يوجد زمن لازم للوصول لحالة الاستقرار، وكلما انخفضت درجة حرارة سطح التبريد نُقص الزمن اللازم للوصول للحالة المستقرة وازدادت سماكة الجليد المُتشكل عندها.

✓ أخيراً لاحظنا من خلال التجارب العملية التناسب بين درجة حرارة سطح التبريد والزمن اللازم للوصول موجة التجمد إلى بُعد 3cm عن سطح التبريد (مكان وجود أول صف من حساسات الحرارة) وبما أنه أصبح لدينا أرقام عملية للمسافة التي تقطعها موجة التجمد والزمن اللازم لقطع هذه المسافة يُمكننا مستقبلاً استنتاج علاقة (ذات أساس تجريبي) لسرعة انتشار الطور الصلب ضمن الطور السائل للماء.

وفيما يلي جدول يُلخص أهم الأرقام التي تم الحصول عليها.

الجدول (1-5) مقارنة بين التجارب الثلاث من أجل عدة درجات حرارة لسطح التبريد

الزمن الذي لزم لوصول موجه التجمد لأول حساس (على بُعد 3cm من سطح التبريد)	أعظم سماكة للجليد بعد الوصول للحالة المستقرة	الزمن الذي لزم للوصول إلى الحالة المستقرة	درجة حرارة سطح التبريد
7:45 ساعة	4.5 cm	52 ساعة	-8 C°
6:30 ساعة	6 cm	33 ساعة	-12 C°
5 ساعة	7 cm	25 ساعة	-20 C°

الفصل السادس:

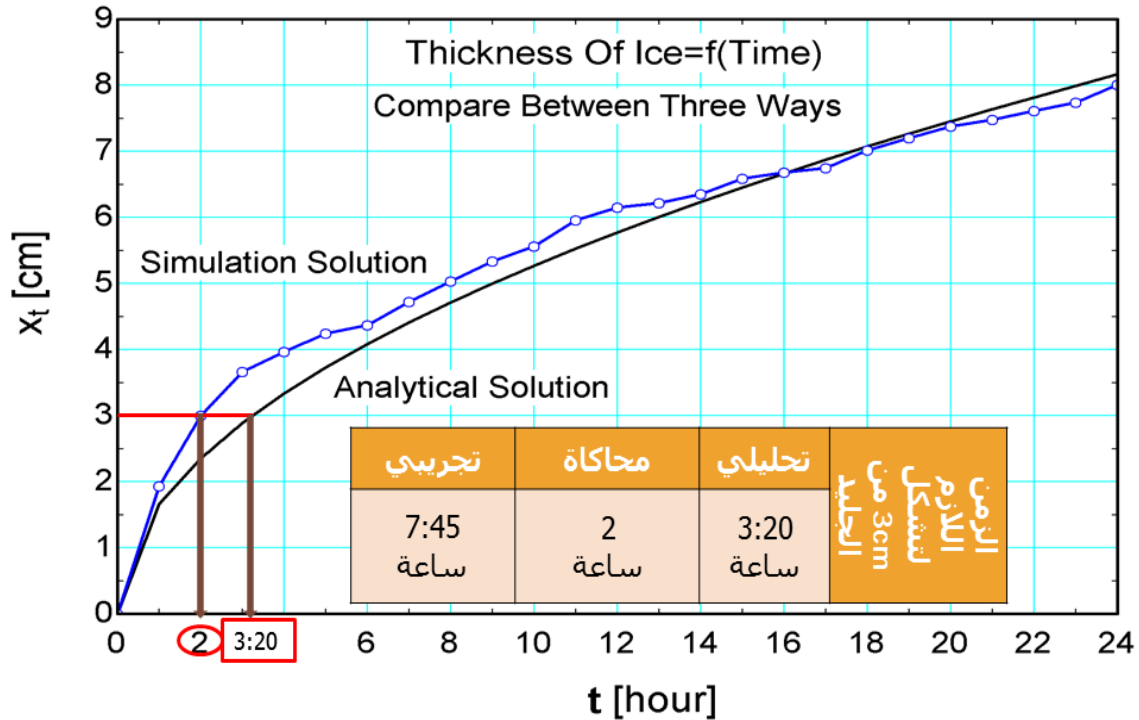
نتائج المشروع

الفصل السادس: نتائج المشروع

Project Results

6-1 مقارنة النتائج باستخدام طرق الحل الثلاث:

لاحظنا في الفصل الثالث استخدام الحل التحليلي للحصول على النتائج المطلوبة، وأهمها العلاقة التي تربط بين موقع السطح الفاصل (سمكة الجليد) والزمن، وفي الفصل الرابع تم استخدام المحاكاة الحاسوبية (بواسطة برنامج ANSYS 13) للحصول على نفس النتائج، وفي الفصل الخامس قمنا بإجراء تجارب عملية لمعرفة الزمن الذي لزم لتشكيل عدة سماكات من الجليد (3cm, 5cm) وهي أماكن توضع أول صفيين من حساسات الحرارة)، وعليه فقد تم الحصول على النتائج باستخدام ثلاث طرق مختلفة. والشكل (6-1) يوضح المقارنة بين نتائج الطرق الثلاث.



الشكل (6-1) العلاقة بين موقع السطح الفاصل (سمكة الجليد المُتشكل) والزمن باستخدام طرق الحل الثلاث

نلاحظ من الشكل السابق أنَّ الأرقام الناتجة عن الحل التحليلي والمحاكاة متقاربة بشكل نسبي ويزداد هذا التقارب مع زيادة الزمن (وسبب هذا الفرق يعود إلى أسلوب الحل ففي الحل التحليلي نقوم بإجراء المكاملة للمعادلات التفاضلية النازمة للمسألة للحصول على النتائج أما في المحاكاة فنعتمد على طريقة عددية (طريقة العناصر المنتهية للحصول على النتائج) وكلا هذين الحليين هو حل نظري)، أما بالنسبة لنتائج التجربة فتحتوي على فرق واضح عن الطريقتين والسبب يعود في ذلك لعدة أسباب تعود بمجملها إلى الشروط المثالية التي نفرضها ونعتمد عليها أثناء الحلول النظرية والتي لايمكن الوصول إليها على أرض الواقع حيث تعترضنا صعوبات تُبعدنا عن الحالة المثالية وهذه الصعوبات ناتجة عن عدة أسباب، وبعض هذه الأسباب للحالة المدروسة (الجهاز الذي تم بواسطته الحصول على النتائج العملية):

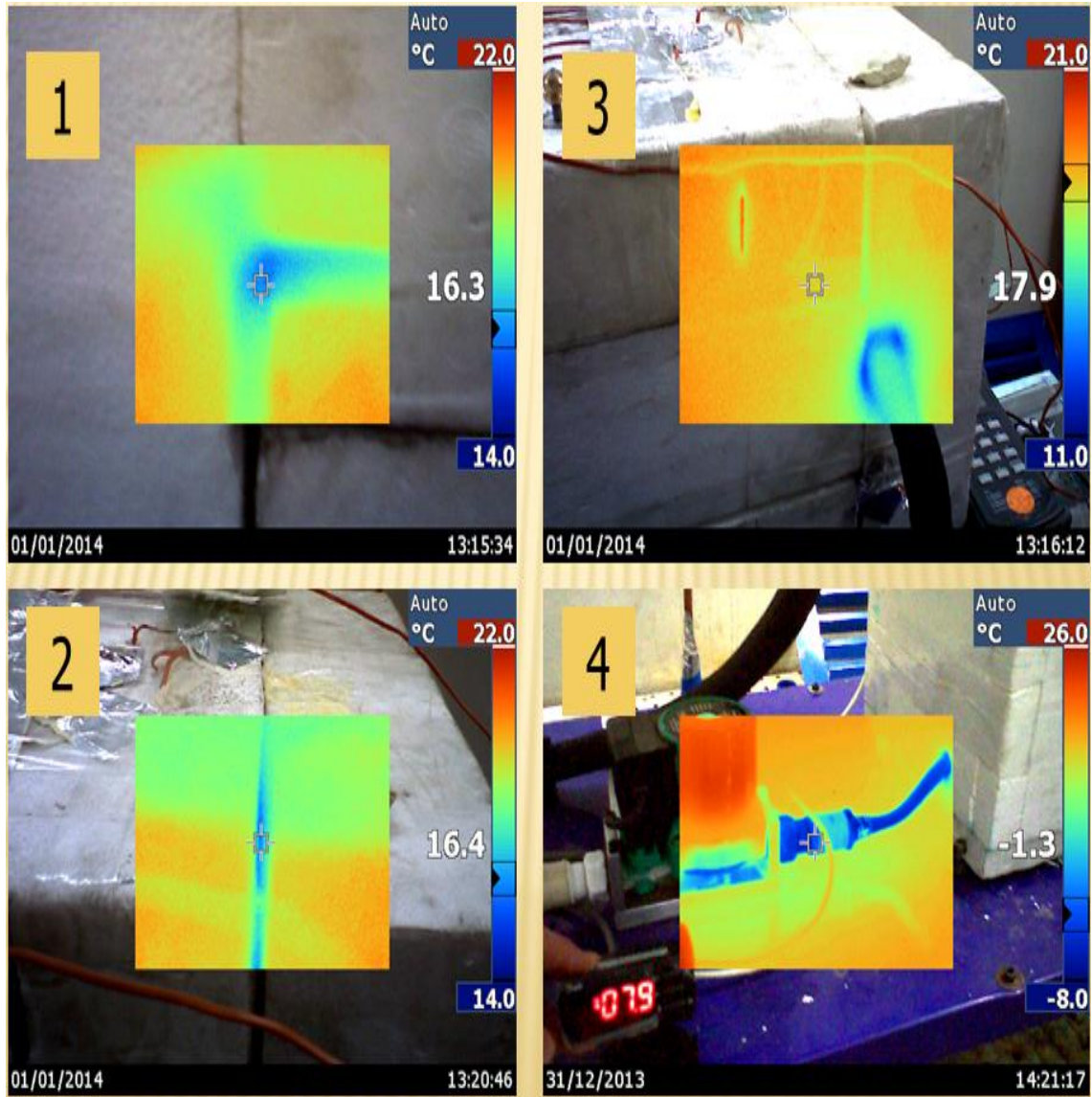
(1) فرضية أن سطوح الخزان أدبياتية لا يمكن تحقيقها عملياً حتى لو زادت سماكة العازل فلا بُد من وجود ضياعات للوسط المحيط.

(2) وجود جسور حرارية ناتجة عن الحاجة لفك وتركيب العازل لمراقبة موجة التجمد.

(3) وجود تسريب حراري في بعض المناطق.

(4) موصلية الـ Plexi تساوي 0.19 w/m.k وموصلية الماء العازل 0.6 w/m.k أي أن جزء من الحرارة ينتقل عبر الـ Plexi وهذا يُخالف شروط ستييفان، ولذلك وجدنا من أجل درجة سطح تبريد 20°C - كان شكل سطح التبريد أقرب مايكون في المحاكاة لأنّه ومع زيادة القدرة التبريدية ينخفض أثر الظواهر السابقة (من ناحية شكل موجة التجمد وليس من ناحية زمن التشكّل).

والشكل (2-6) يوضح بعض من هذه الأسباب (الظواهر).



الشكل (2-6) صور حرارية توضح بعض أسباب الفرق بين الحالة العملية والحالة النظرية

إنَّ الشكل السابق يُمثِّل صوراً مأخوذة استخدام كاميرا حرارية (إطار الصورة هو صورة عادية فوتوغرافية) أما المنتصف فهو عبارة عن صورة حرارية، وفي هذا الشكل الصورتين [1،2] توضحان الجسور الحرارية أما الصورتين [3،4] فتوضحان بعض الأماكن التي فيها تسريب حراري.

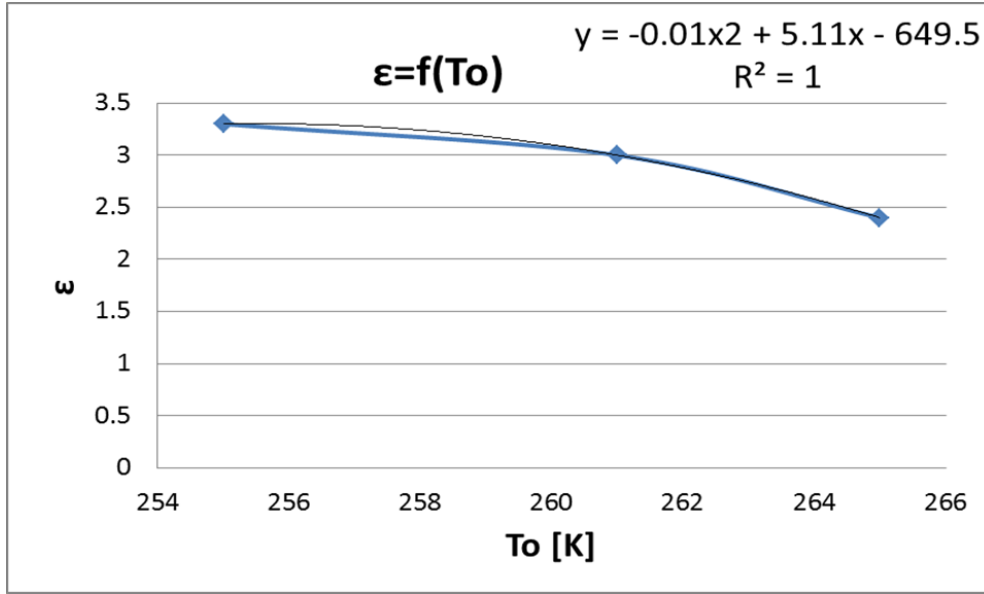
6-2 الربط بين النتائج النظرية والنتائج العملية واستنتاج مُعامل التصحيح التجريبي:

كما مر معنا في الفقرة السابقة وجود اختلاف بين النتائج النظرية والنتائج العملية للأسباب آفة الذكر، وبعبارة أخرى يمكننا القول أنَّ النتائج النظرية تُمثل حالة مثالية لا يمكن الوصول إليها ولكن يمكن تحسين الواقع التجريبي قدر الإمكان للاقترب من الحالة النظرية هذا الاقتراب يختلف قمية ونسبته من جهاز (حالة) لآخر، والجدول التالي يوضح مقارنة بين الزمن اللازم لتشكيل أكثر من سماكة للجليد باستخدام الحل البياني (حل نظري) والإجراء التجريبي (حل عملي وفق الجهاز المُستخدم).

الجدول (6-1) جدول المقارنة بين الزمن المطلوب لتشكيل عدة سماكات من الجليد باستخدام طريقتين للحل

سماكة 5cm		سماكة 3cm		درجة حرارة سطح التبريد [K]
تجريبياً (ساعة)	بيانياً (ساعة)	تجريبياً (ساعة)	بيانياً (ساعة)	
—	—	7.9	3.25	(-8 C°) 265
19	6.6	6.6	2.2	(-12 C°) 261
14.1	4.24	5.1	1.55	(-18 C°) 255

وبمراعاة النتائج في الجدول السابق ونتائج التجارب بشكل عام والحلول النظري الموافقة لها تم استنتاج علاقة تربط بين درجة حرارة سطح التبريد ومعامل تصحيح تجريبي (ε) حيث يُمثل هذا العامل النسبة بين الزمن الناتج تجريبياً والزمن المحسوب بيانياً هذ العلاقة موضحة في الشكل (6-1).



الشكل (3-6) العلاقة بين درجة حرارة سطح التبريد ومعامل التصحيح التجريبي

أبرز مايمكن ملاحظته من المنحني السابق:

(1) ذكرنا سابقاً أنّ: $\varepsilon = \frac{\text{الزمن الناتج تجريبياً}}{\text{الزمن المحسوب ببيانياً}}$ أي كلما زادت قيمة ε ازداد الفرق بين القيمة النظرية والقيمة العملية.

(2) نلاحظ في المنحني السابق أنّه مع انخفاض درجة حرارة سطح التبريد تزداد قيمة ε (يزداد الفارق بين القيمة النظرية والقيمة العملية)، وهذا منطقي لأنّه مع ازدياد البرودة (انخفاض درجة حرارة سطح التبريد) تزداد الضياعات للوسط المحيط.

(3) إنّ الضياعات إلى الوسط المحيط (إضافةً إلى شروط أخرى) غير مأخوذة بعين الاعتبار في الحالة المثالية (النظرية) لذلك يُشكل الزمن (اللازم لتشكيل سماكة معينة من الجليد) الناتج عن الحالة النظرية أصغر زمن يمكن الحصول عليه (ولن نستطيع تحقيقه لأنّه حالة نظرية) وكلما كانت الحالة العملية ذات مواصفات جيدة كلما اقترب الزمن التجريبي من الزمن النظري، بعبارة أخرى يُشكل الزمن الناتج عن الحالة النظرية الهدف الذي يسعى أي جهاز تجريبي إلى تحقيقه في الحالة العملية -ولن يحققه- (مثل دورة كارنو العكسية بالنسبة لدورات التبريد).

4) بناءً على البند السابق يُفِيد المنحني الموضح في الشكل (3-6) في استنتاج قيمة مُعامل التصحيح التجريبي للجهاز المُستخدم في تجربتنا فقط أي بمعنى آخر يُمثل هذا المنحني منحني مُعايرة للجهاز التجريبي المُستخدم.

3-6 خلاصة المشروع وأهم إسقاطاته:

1- تم التطرق من خلال هذا المشروع إلى دراسة انتقال الحرارة بالتوصيل في الحالة العابرة مع وجود تحول طور (سائل/ صلب)، ويُعتبر تناول هذه الحالة قليل بشكل عام وخصوصاً ضمن المراجع العربية.

2- تلقى المواد المتغيرة الطور (PCMs) Phase Change Materials - والتي تعتمد على التحول الطوري سائل/صلب- اهتماماً عالمياً واسعاً، لعدد التطبيقات الممكن استثمارها فيها ولأنَّ أفق التطوير فيها واسع ولا يزال في طور النمو، حاولنا في هذا المشروع التعمق في بارمتر أساسي للمواد المتغيرة الطور وهو زمن التحول الطوري وعليه كان:

"المحور الأساسي للمشروع تحديد الزمن اللازم لنمو الطور الصلب ضمن الطور السائل"

3- تم الوصول لطريقة بيانية تُحقق المطلوب دون الحاجة لحل معادلات مُعقدة نسبياً، مع وجود معامل تصحيح تجريبي.

4- التطبيقات ذات الصلة المباشرة مع القيم الناتجة عديدة منها:

✓ التخزين الحراري مثال: تخزين البرودة (CTES) كالتخزين باستخدام الثلج.

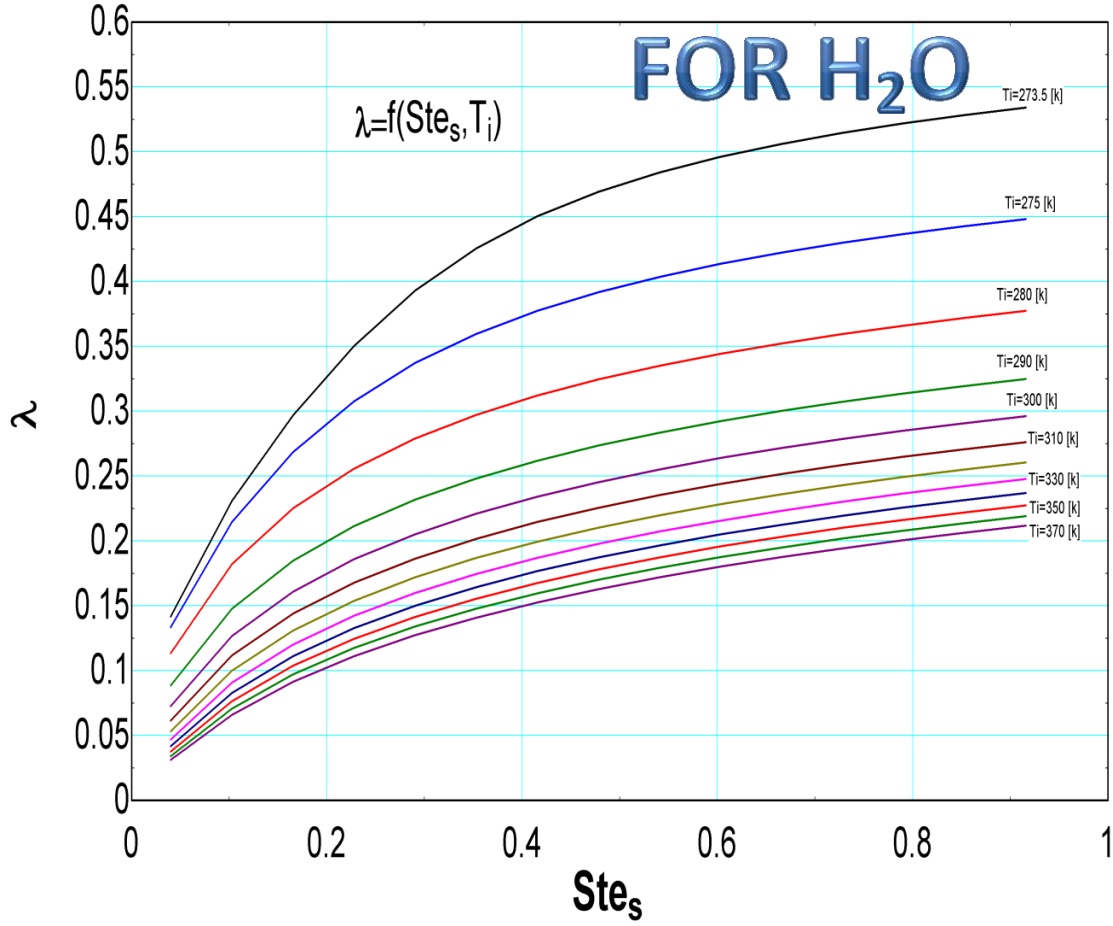
✓ استخدامها ضمن البرادات (بطارية تبريد) حيث يعتمد هذا التطبيق على شحن الكتلة التي تُخزن البرودة (البطارية) أثناء فترة عمل الضاغط ويُستفاد من هذه الكتلة المشحونة بتأمين القدرة التبريدية عند الحاجة إليها دون أن يعمل الضاغط فنكون بذلك قللنا من عدد مرات إقلاع الضاغط أو في حال عدم توفر الكهرباء حافظنا على السوية التبريدية المطلوبة لمدة أطول .

✓ التعامل مع ظواهر تشكل وانصهار جليد القطب.

ختماً: يمكن أن نوجز الثمرة الأساسية لهذا المشروع بمايلي:

من أجل حساب الزمن اللازم لتشكل سماكة معينة من الجليد ضمن شروط ستيغان أحادية البعد ثنائية الطور يكفي معرفة درجة الحرارة الابتدائية للماء السائل (T_i) ودرجة حرارة سطح التبريد (T_o) وبعدها نتبع الخطوات التالية:

1. نحسب قيمة الثابت λ باستخدام المخطط الوارد ضمن الشكل (3-7):



حيث:

$$Ste_s = \frac{c_s(T_f - T_o)}{h_{sl}}$$

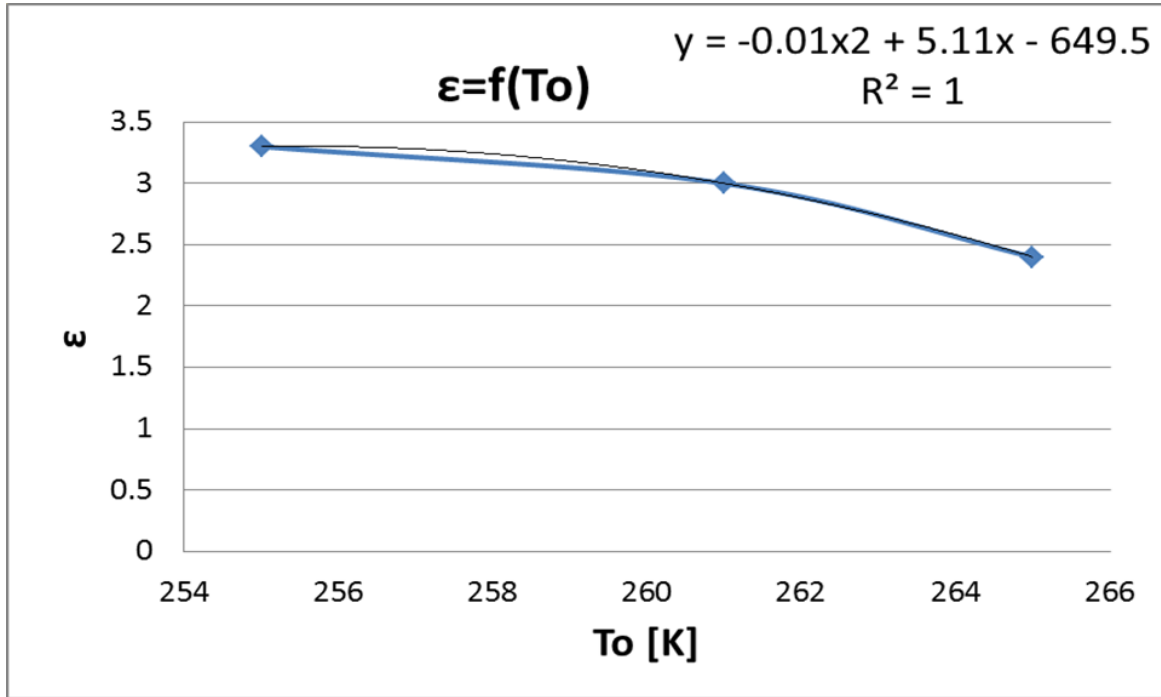
2. نعوض في المعادلة (3-15):

$$t = \frac{1}{4\alpha_s} \frac{x^2}{\lambda^2}$$

فينتج لدينا الزمن نظرياً .

3. باستخدام المخطط الوارد ضمن الشكل (6-3) نحسب قيمة معامل التصحيح

التجريبي ε :



حيث $\varepsilon = \frac{\text{الزمن الناتج تجريبياً}}{\text{الزمن المحسوب بيانياً}}$ ومنه نحسب الزمن تجريبياً.

مع العلم أن خوارزمية العمل وجميع البرنامج المستخدمة مؤتمتة بشكل يسمح بحساب الزمن اللازم للتجمد من أجل أي مادة أخرى غير الماء.

REFERENCES

- 1) C. Vuik, **Some historical notes on the Stefan problem**, Faculty of Electrical Engineering, Mathematics and Computer Science, Delft University of Technology, Mekelweg 4, 2628 CD Delft, The Netherlands.
- 2) Harald Mehling, Luisa F.Cabeza, Dieter Mewes, Franz Mayinger, 2008, **heat and cold storage pcm book**, Spring.
- 3) Anahita Ayasoufi, December 2004, **NUMERICAL SIMULATION OF HEAT CONDUCTION WITH MELTING AND/OR FREEZING BY SPACE-TIME CONSERVATION ELEMENT AND SOLUTION ELEMENT METHOD**, Submitted as partial fulfillment of the requirements for the Doctor of Philosophy in Engineering Science, The University of Toledo.
- 4) Joanne M. Bailey, January 2010, **MODELLING PHASE CHANGE MATERIAL THERMAL STORAGE SYSTEMS**, A Thesis Submitted to the School of Graduate Studies in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Master of Applied Science, McMaster University, Hamilton, Ontario, Canada.
- 5) Atul Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen, D. Buddhi, 9 October 2007, **Review on thermal energy storage with phase change materials and applications**, Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009) 318–345, ScienceDirect.
- 6) A.K. Verma , Sanjay Chandra, B.K. Dhindaw, 2003, **An alternative fixed grid method for solution of the**

- classical one-phase Stefan problem**, Applied Mathematics and Computation 158 (2004) 573–584, ScienceDirect.
- 7) E. Javierre, C. Vuik, F.J. Vermolen, S. van der Zwaag, 11 August 2004, **A comparison of numerical models for one-dimensional Stefan problems**, Journal of Computational and Applied Mathematics 192 (2006) 445–459, ScienceDirect.
 - 8) Piia Lamberg , Reijo Lehtiniemi , Anna–Maria Henell, 2 July 2003, **Numerical and experimental investigation of melting and freezing processes in phase change material storage**, International Journal of Thermal Sciences 43 (2004) 277–287, ScienceDirect.
 - 9) Noam Lior, 1999, **Heat and Mass Transfer (Melting and Freezing)**, CRC Press LLC.
 - 10) Ibrahim Dincer and Marc A. Rosen, 2011, **THERMAL ENERGY STORAGE SYSTEMS AND APPLICATIONS, SECOND EDITION**, Wiley.
 - 11) A. Esen, S. Kutluay, 2004, **A numerical solution of the Stefan problem with a Neumann-type boundary condition by enthalpy method**, Applied Mathematics and Computation 148 (2004) 321–329, ScienceDirect.
 - 12) Ivaldo L. Ferreira, Jos´e E. Spinelli, Jos´e C. Pires, Amauri Garcia, 14 August 2005, **The effect of melt temperature profile on the transient metal/mold heat transfer coefficient during solidification**, Materials Science and Engineering A 408 (2005) 317–325, ScienceDirect.
 - 13) O.P. Layeni, A.M. Adegoke, 2011, **A novel revision of Goodman’s profile and its application to a one-phase**

Stefan problem, Mechanics Research Communications 38 (2011) 456– 462, ScienceDirect.

- 14) He-Sheng Ren, 28 April 2006, **Application of the heat-balance integral to an inverse Stefan problem**, International Journal of Thermal Sciences 46 (2007) 118–127, ScienceDirect.
- 15) Francis Agyenim, Neil Hewitt, Philip Eames, Mervyn Smyth, 2010, **A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS)**, Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 (2010) 615 – 628 ScienceDirect.
- 16) Prashant Verma, Varun, S.K. Singal, 27 November 2006, **Review of mathematical modeling on latent heat thermal energy storage systems using phase-change material**, Renewable and Sustainable Energy Reviews 12 (2008) 999 – 1031 ScienceDirect.
- 17) Yvan Dutil , Daniel R. Rousse, Nizar Ben Salah, Ste'phane Lassue, Laurent Zalewski, 2011, **A review on phase-change materials: Mathematical modeling and simulations**, Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (2011) 112 – 130, ScienceDirect.
- 18) Wei-Biao Ye , Dong-Sheng Zhu ,*, Nan Wang, 2011, **Numerical simulation on phase-change thermal storage/release in a plate-fin unit**, Applied Thermal Engineering 31 (2011) 3871e3884, ScienceDirect.
- 19) Domingo Alberto Tarzia, **Explicit and Approximated Solutions for Heat and Mass Transfer Problems with a Moving Interface**, CONICET and Universidad Austral, Argentina.

- 20) P. Lamberg, K. Siren, 2003, **Analytical model for melting in a semi-infinite PCM storage with an internal fin**, 2003 Springer-Verlag. Reprinted with permission from Heat and Mass Transfer 39, No. 2, pages 167–176, Springer.
- 21) Chung-Jen Tseng, Tzu-Yu Kao, Chi-Fu Chen, 2011, **Study on the flow and thermal characteristics of a heat storage system**, THE ASIAN SYMPOSIUM ON COMPUTATIONAL HEAT TRANSFER AND FLUID FLOW – 2011, 22–26 SEPTEMBER 2011, KYOTO, JAPAN.
- 22) Scott Richards, John M. Cimbala, and Keith Martin, 18 May 2010, **ANSYS Workbench Tutorial – Boundary Layer on a Flat Plate**, Penn State University.
- 23) Akihiro Uchibori and Hiroyuki Ohshima, 2010, **Numerical Analysis of Melting/Solidification Phenomena Using a Moving Boundary Analysis Method X-FEM**, Japan Atomic Energy Agency, Japan.
- 24) A. Visintin, 28 Novembre 2002, **On the Stefan Problem and Some of its Generalizations**, Trento University, Italy.

الملاحق

APPENDIXES

الملحق رقم (1):
الـ Code المُستخدم
ضمن برنامج
EES 2012

EES code

```
((e**(lambda**2))/(erf(lambda))-k_l/k_s*sqrt(alpha_s/alpha_l)*(T_i-T_f)/(T_f-T_o)*((e**((alpha_s/alpha_l)*lambda**2))
/(erfc(lambda*sqrt(alpha_s/alpha_l))))=(lambda*sqrt(pi)/Ste_s)
Ste_s=(c_s*(T_f-T_o)/h_sl)
X_t=100*2*lambda*(alpha_s*(tau*3600))**0.5
```

$$\frac{e^{\left[\frac{\lambda^2}{\alpha_l}\right]}}{\text{Erf}\left[\frac{\lambda}{\sqrt{\alpha_l}}\right]} - \frac{k_l}{k_s} \cdot \sqrt{\frac{\alpha_s}{\alpha_l}} \cdot \left[\frac{T_i - T_f}{T_f - T_o}\right] \cdot \frac{e^{\left[\frac{\alpha_s}{\alpha_l} \cdot \lambda^2\right]}}{\text{Erfc}\left[\lambda \cdot \sqrt{\frac{\alpha_s}{\alpha_l}}\right]} = \lambda \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{\text{Ste}_s}$$

$$\text{Ste}_s = c_s \cdot \left[\frac{T_f - T_o}{h_{sl}}\right]$$

$$X_t = 100 \cdot 2 \cdot \lambda \cdot \left[\alpha_s \cdot \tau \cdot 3600\right]^{0.5}$$

Parametric Table: Tau=f(X)

	α_l	α_s	c_s	e	h_{sl}	k_l	k_s	λ	Ste_s	τ
Run 1	1.400E-07	1.200E-06	4180	2.718	334000	0.6	2.22	0.1268	0.1026	1.000E-100
Run 2	1.400E-07	1.200E-06	4180	2.718	334000	0.6	2.22	0.1268	0.1026	8.998
Run 3	1.400E-07	1.200E-06	4180	2.718	334000	0.6	2.22	0.1268	0.1026	35.99
Run 4	1.400E-07	1.200E-06	4180	2.718	334000	0.6	2.22	0.1268	0.1026	80.98
Run 5	1.400E-07	1.200E-06	4180	2.718	334000	0.6	2.22	0.1268	0.1026	144
Run 6	1.400E-07	1.200E-06	4180	2.718	334000	0.6	2.22	0.1268	0.1026	225
Run 7	1.400E-07	1.200E-06	4180	2.718	334000	0.6	2.22	0.1268	0.1026	323.9
Run 8	1.400E-07	1.200E-06	4180	2.718	334000	0.6	2.22	0.1268	0.1026	440.9
Run 9	1.400E-07	1.200E-06	4180	2.718	334000	0.6	2.22	0.1268	0.1026	575.9
Run 10	1.400E-07	1.200E-06	4180	2.718	334000	0.6	2.22	0.1268	0.1026	728.9
Run 11	1.400E-07	1.200E-06	4180	2.718	334000	0.6	2.22	0.1268	0.1026	899.8
Run 12	1.400E-07	1.200E-06	4180	2.718	334000	0.6	2.22	0.1268	0.1026	1089
Run 13	1.400E-07	1.200E-06	4180	2.718	334000	0.6	2.22	0.1268	0.1026	1296
Run 14	1.400E-07	1.200E-06	4180	2.718	334000	0.6	2.22	0.1268	0.1026	1521
Run 15	1.400E-07	1.200E-06	4180	2.718	334000	0.6	2.22	0.1268	0.1026	1764
Run 16	1.400E-07	1.200E-06	4180	2.718	334000	0.6	2.22	0.1268	0.1026	2025
Run 17	1.400E-07	1.200E-06	4180	2.718	334000	0.6	2.22	0.1268	0.1026	2304
Run 18	1.400E-07	1.200E-06	4180	2.718	334000	0.6	2.22	0.1268	0.1026	2600
Run 19	1.400E-07	1.200E-06	4180	2.718	334000	0.6	2.22	0.1268	0.1026	2915
Run 20	1.400E-07	1.200E-06	4180	2.718	334000	0.6	2.22	0.1268	0.1026	3248
Run 21	1.400E-07	1.200E-06	4180	2.718	334000	0.6	2.22	0.1268	0.1026	3599

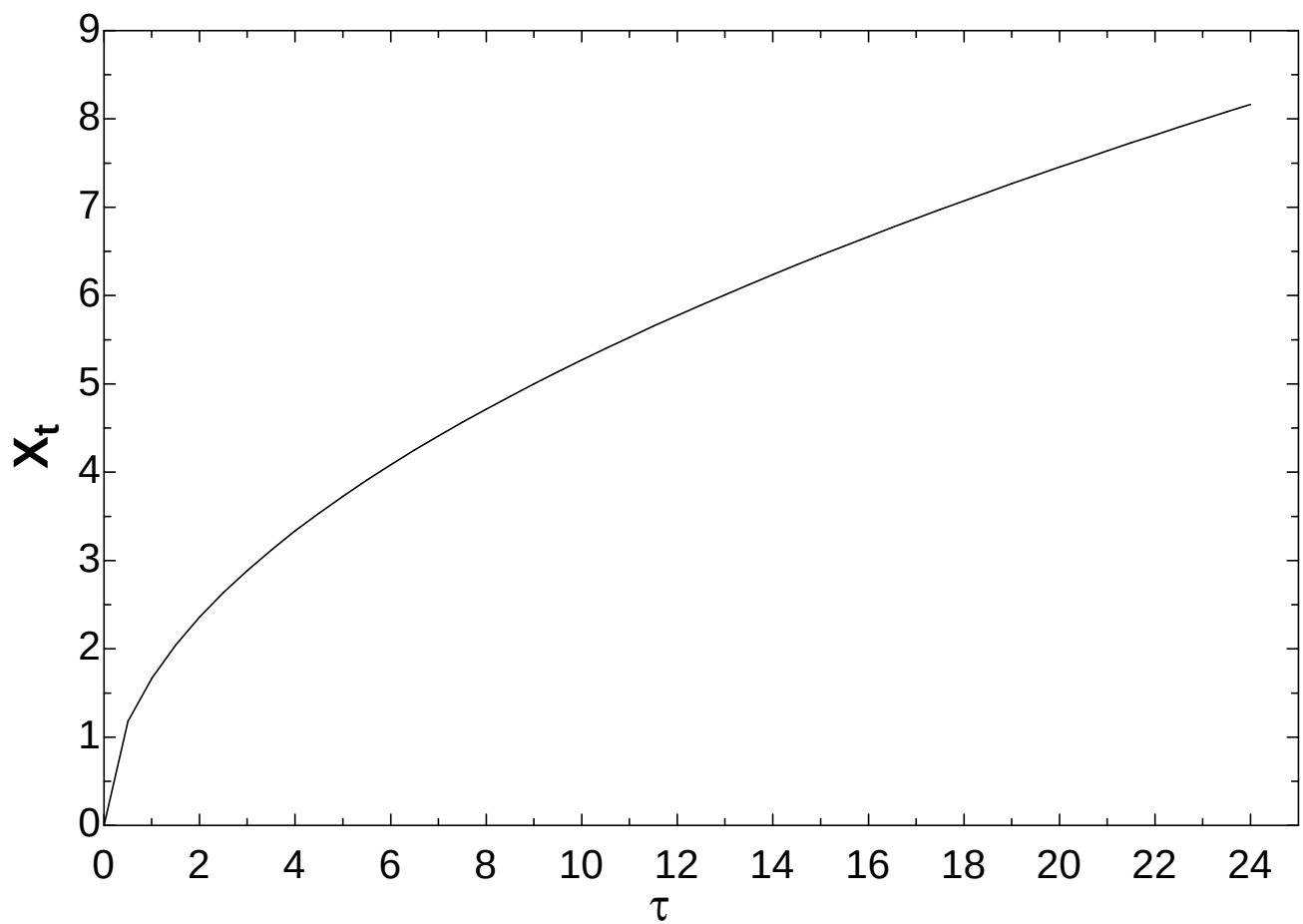
Parametric Table: Tau=f(X)

	T_f	T_i	T_o	X_t
Run 1	273.2	300	265	0
Run 2	273.2	300	265	5
Run 3	273.2	300	265	10
Run 4	273.2	300	265	15
Run 5	273.2	300	265	20
Run 6	273.2	300	265	25
Run 7	273.2	300	265	30
Run 8	273.2	300	265	35
Run 9	273.2	300	265	40
Run 10	273.2	300	265	45
Run 11	273.2	300	265	50
Run 12	273.2	300	265	55

EES code

Parametric Table: $\tau = f(X_t)$

	T_f	T_i	T_o	X_t
Run 13	273.2	300	265	60
Run 14	273.2	300	265	65
Run 15	273.2	300	265	70
Run 16	273.2	300	265	75
Run 17	273.2	300	265	80
Run 18	273.2	300	265	85
Run 19	273.2	300	265	90
Run 20	273.2	300	265	95
Run 21	273.2	300	265	100



الملحق رقم (2):
الـ Code المُستخدم
ضمن برنامج
MathCad 2014

$$kl := 0.6 \quad ks := 2.2 \quad \alpha s := 1.2 \cdot 10^{-6} \quad \alpha l := 0.14 \cdot 10^{-6}$$

$$ti := 300 \quad tf := 273.15 \quad to := 265$$

$$cs := 4180 \quad hsl := 334000$$

$$ste := \frac{cs \cdot (tf - to)}{hsl} \quad \lambda := 0.1264$$

$$a := \frac{2.71 \lambda^2}{\operatorname{erf}(\lambda)} \quad b := \frac{k}{k} \quad c := \sqrt{\frac{\alpha s}{\alpha l}} \quad d := \frac{ti - tf}{tf - to}$$

$$f := 2.71 \left(\frac{\alpha s}{\alpha l} \right) \cdot \lambda^2 := \operatorname{erfc} \left(\left(\lambda \cdot \sqrt{\frac{\alpha s}{\alpha l}} \right) \right)$$

$$i := \frac{f}{h} \quad L1 := a - (b \cdot c \cdot d \cdot i)$$

$$stec := \frac{\lambda \cdot \sqrt{\pi}}{L1} \quad stec = 0.102$$

$$a = 7.162$$

$$b = 0.27$$

$$c = 2.928$$

$$d = 3.294$$

$$f = 1.146$$

$$h = 0.601$$

$$i = 1.908$$

$$L1 = 2.188$$

$$x := 0.0167$$

$$\tau := \frac{x^2}{4 \cdot \lambda^2 \cdot \alpha s \cdot 3600}$$

$$\tau = 1.01$$

τ the time in hour

x the distance of interface in meter

الملحق رقم (3):

المُخططات الهندسية المُستخدمة أثناء

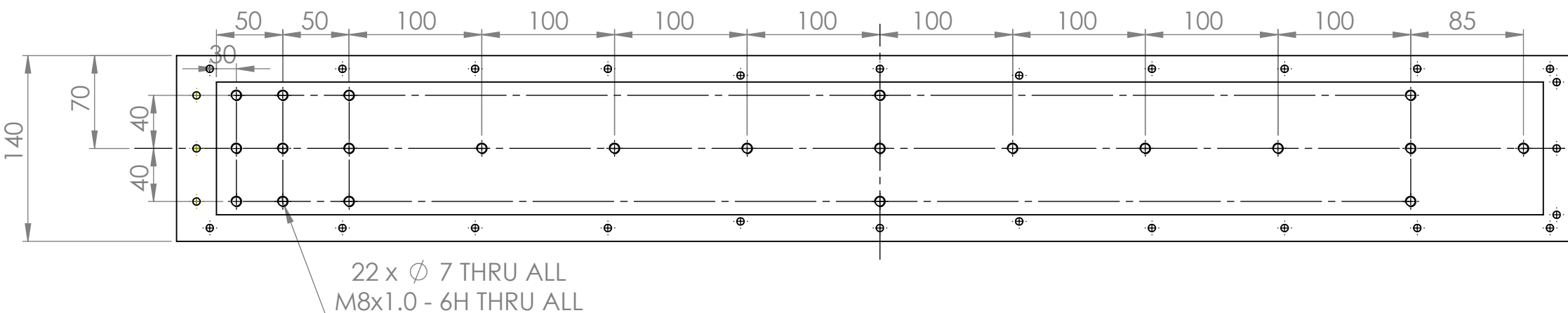
التصنيع والتي تم تخريجها باستخدام

برنامج Solid Works 2013

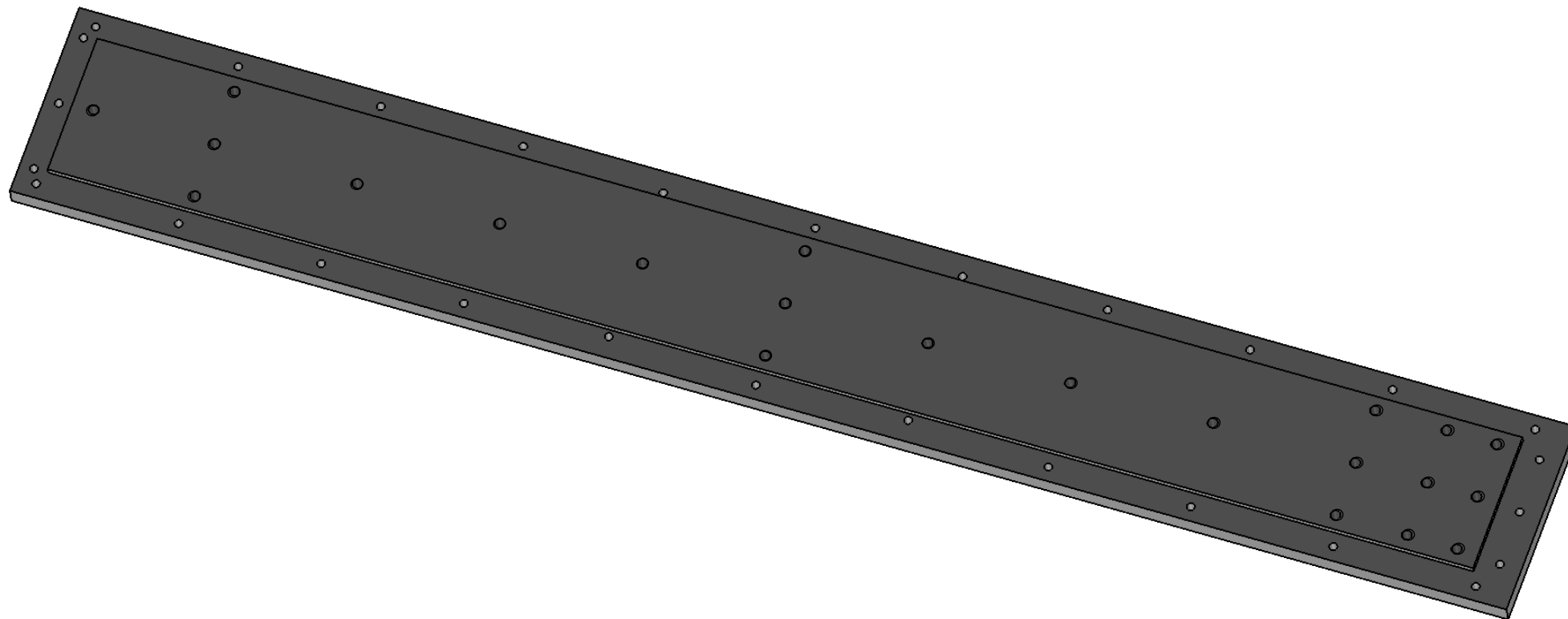
[جميع الأبعاد الموجودة بـ mm ما لم

يُذكر خلاف ذلك]

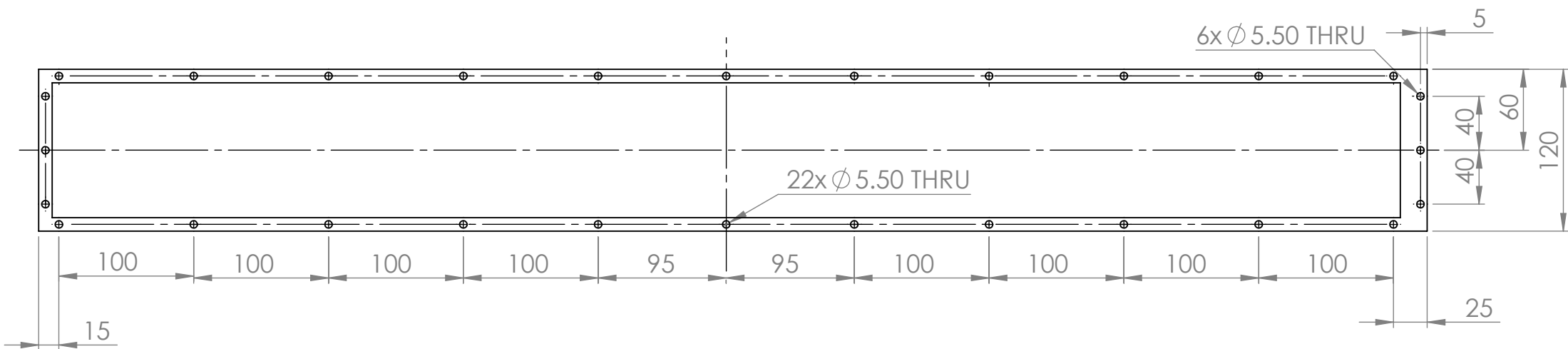
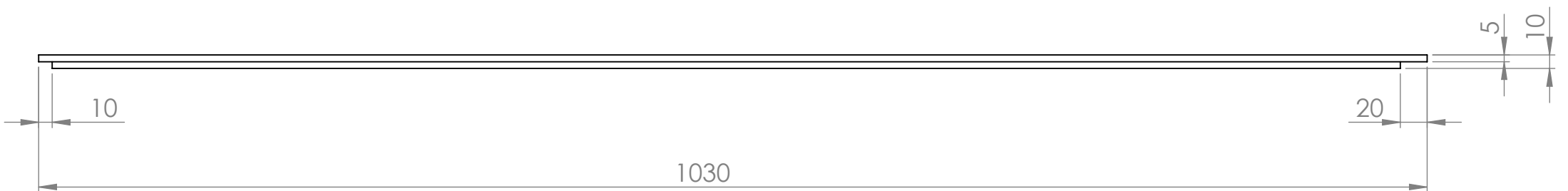
Above Face



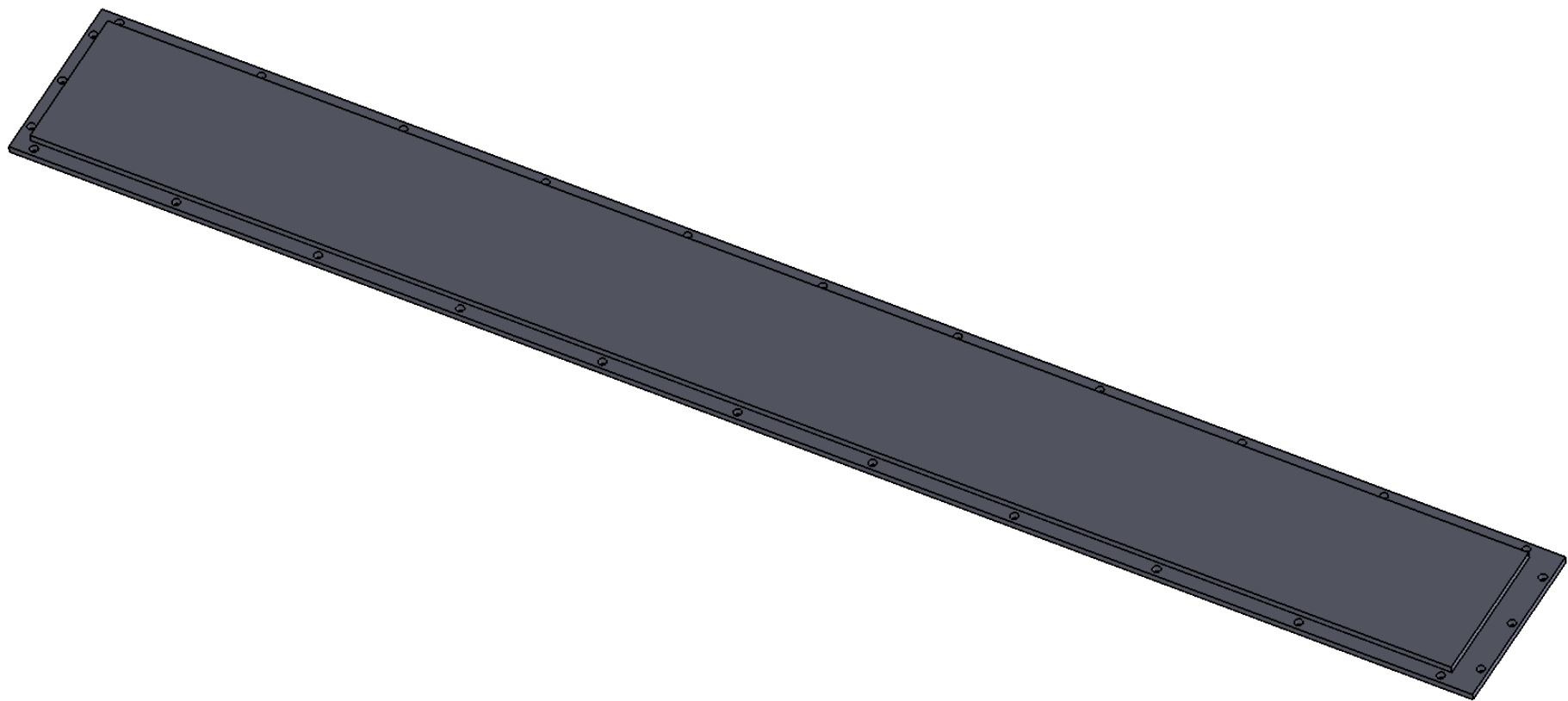
Above Face

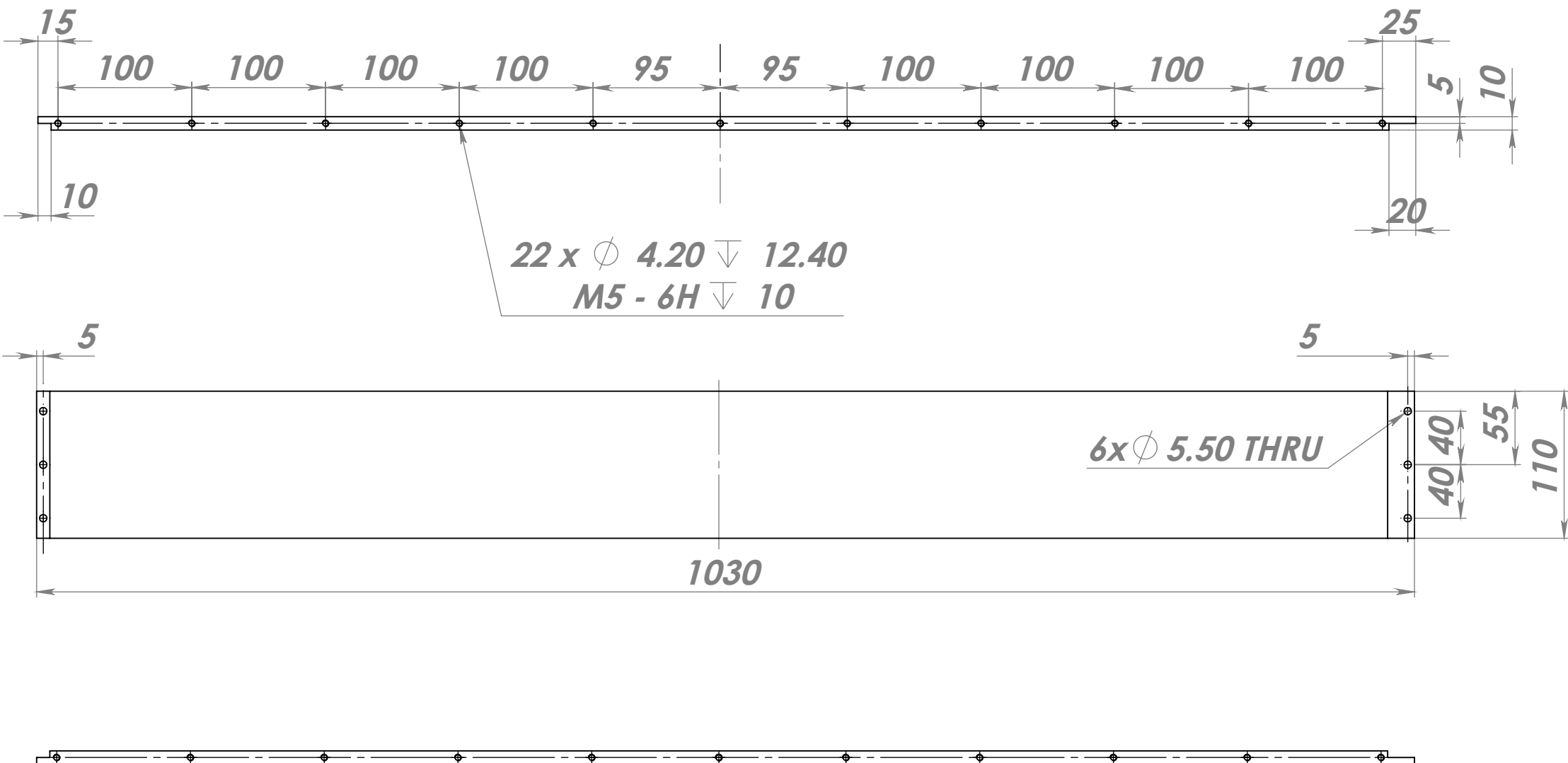


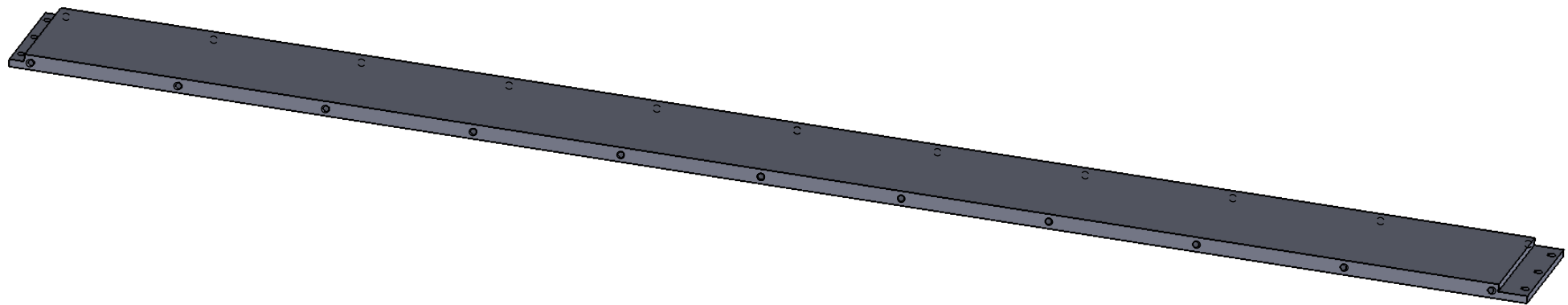
Bottom Face



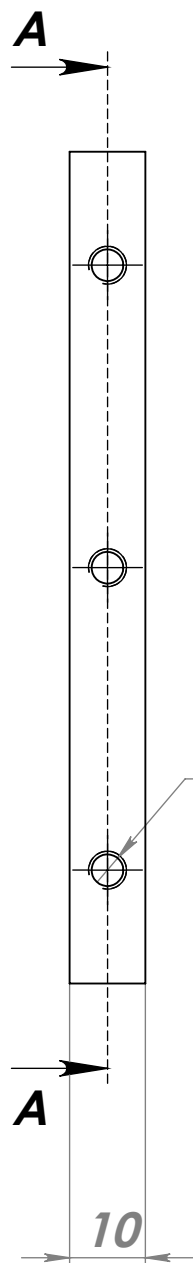
Bottom Face



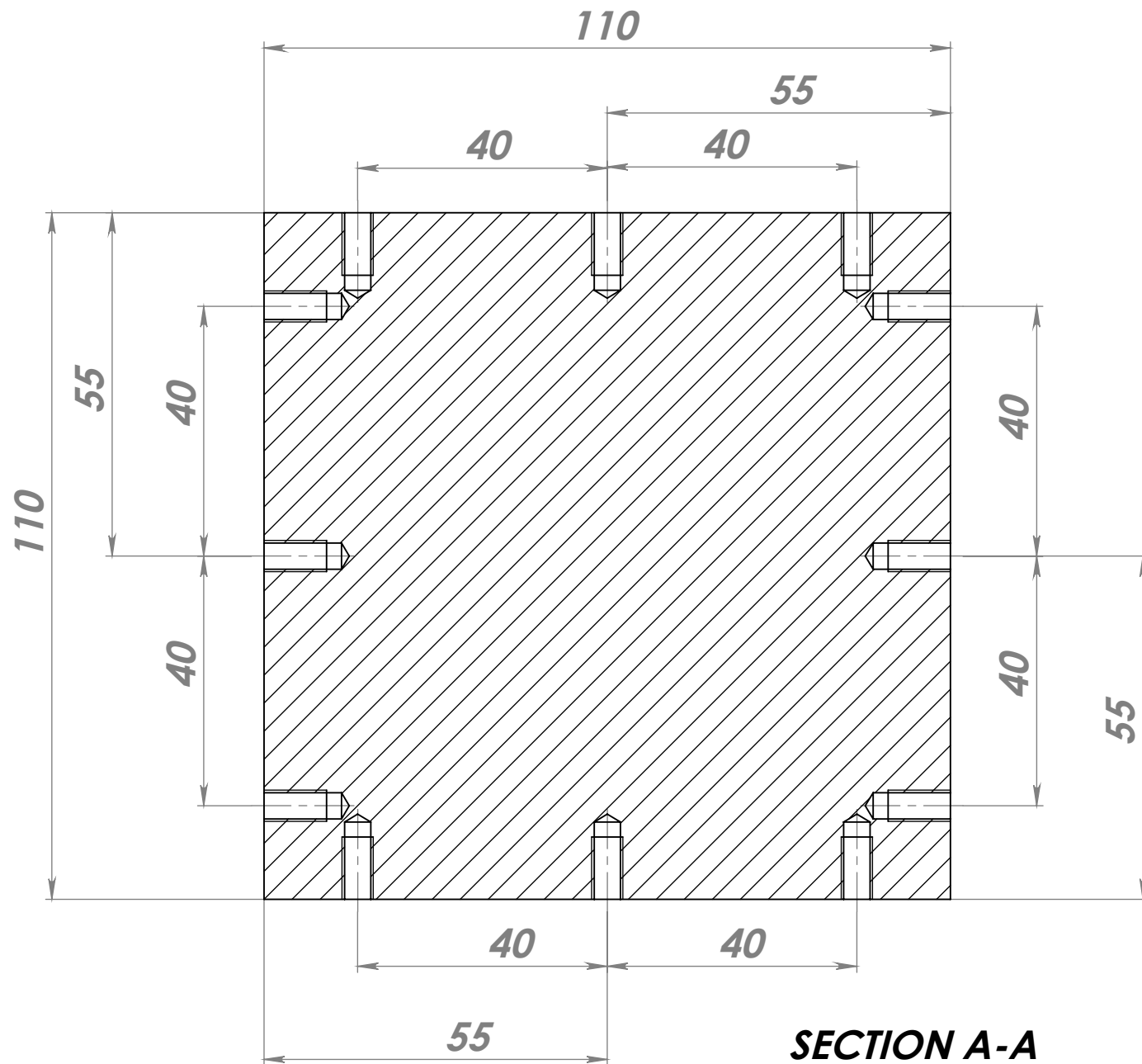




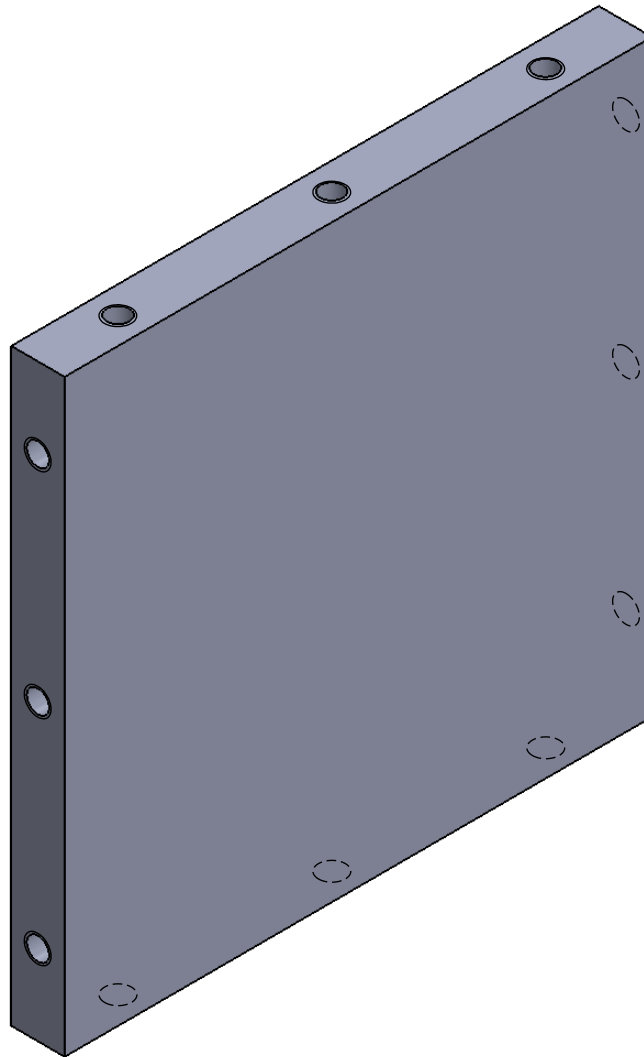
Left Face

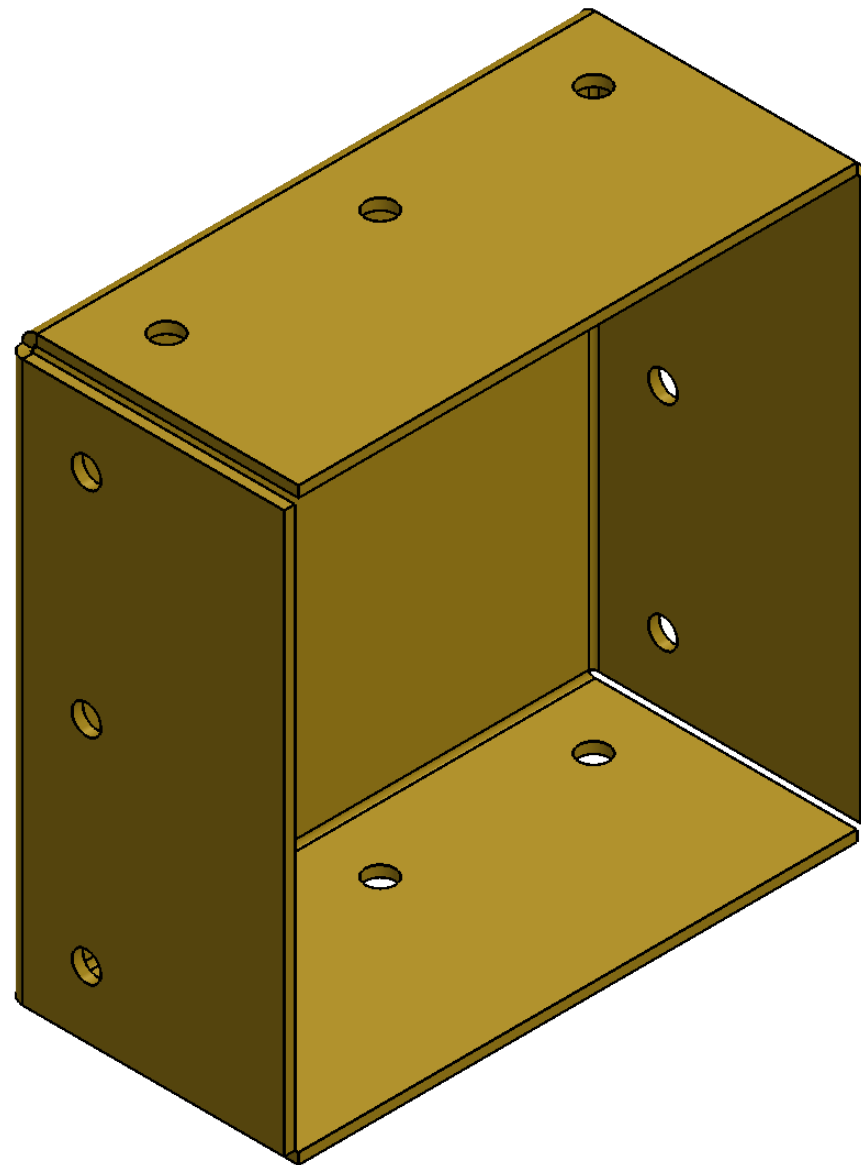


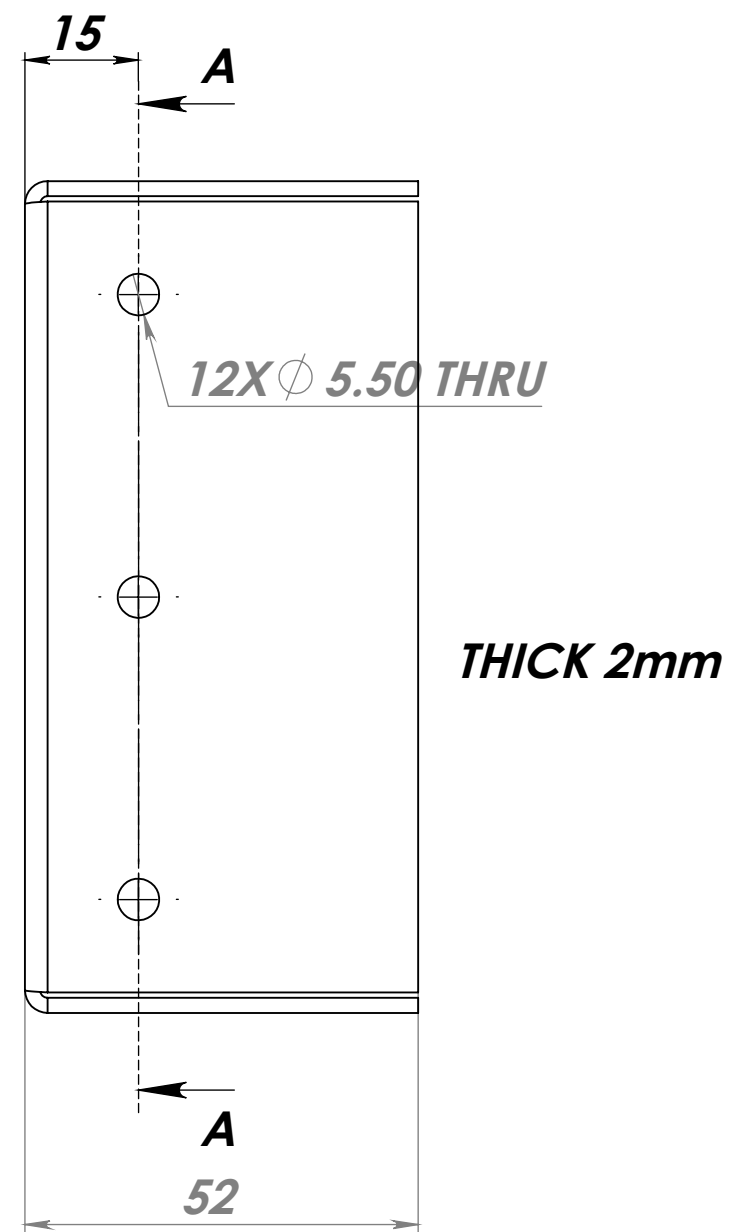
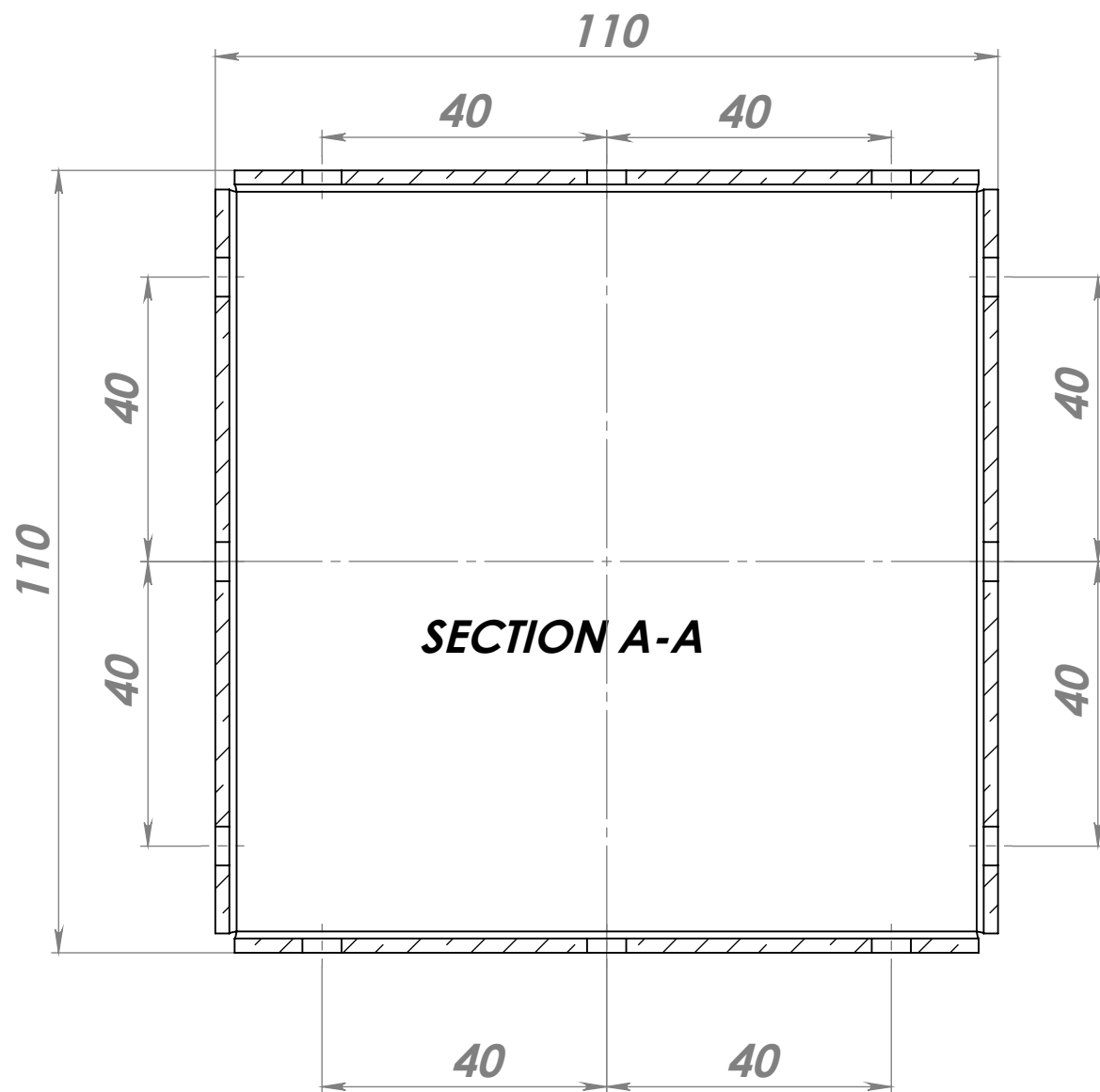
$12 \times \varnothing 4.20 \downarrow 12.40$
 $M5 - 6H \downarrow 10$

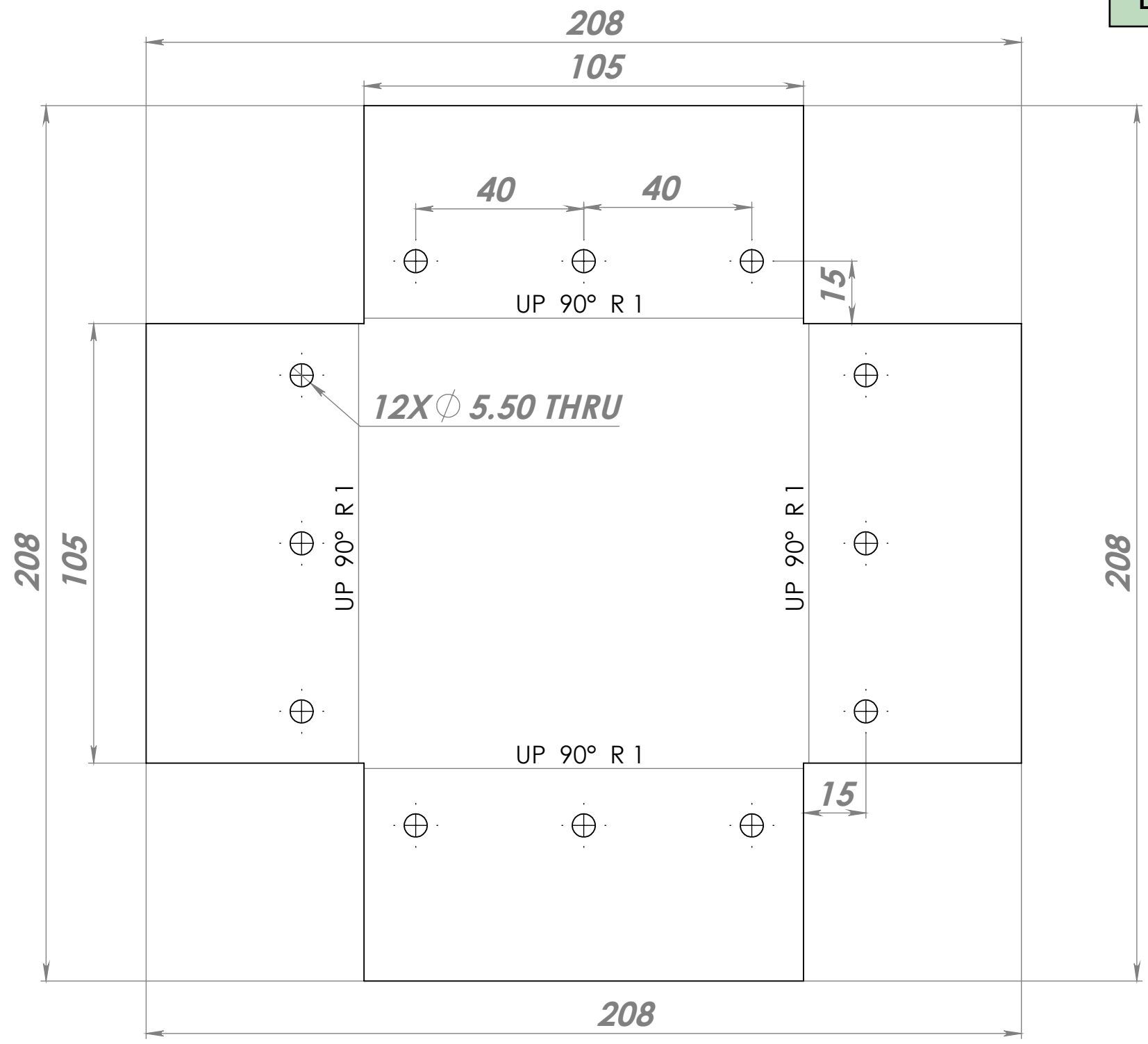


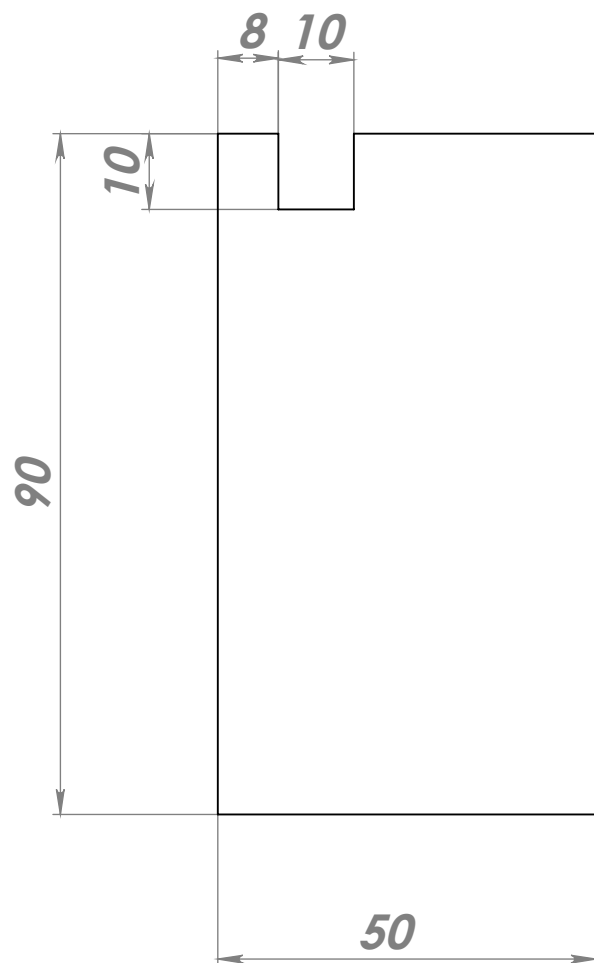
Left Face







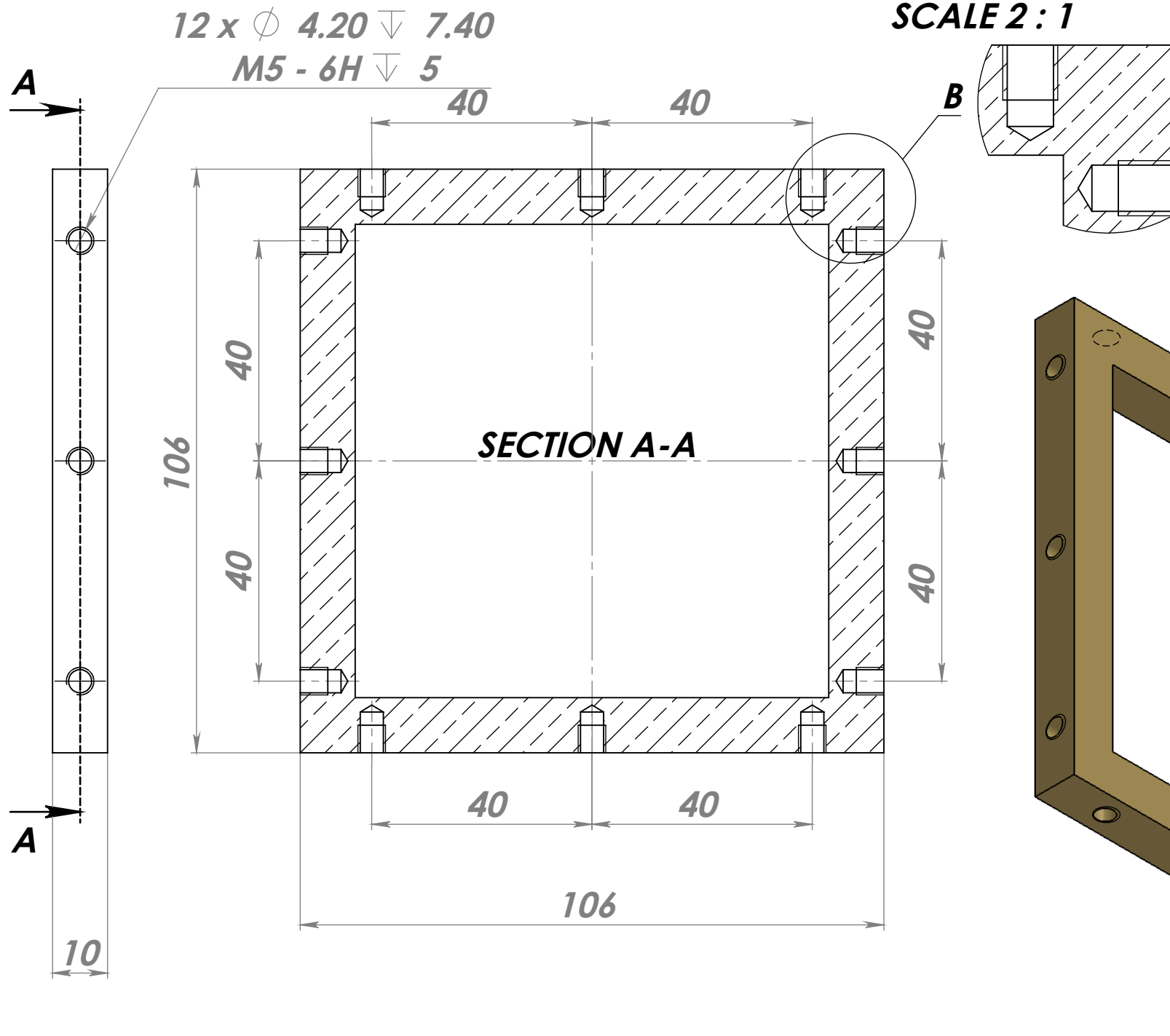


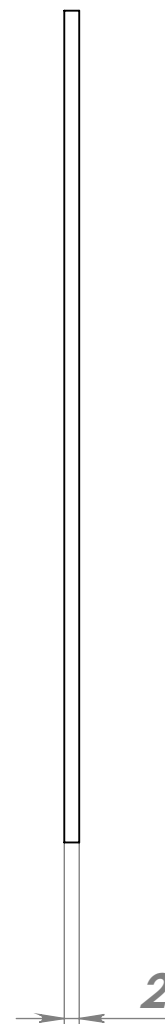
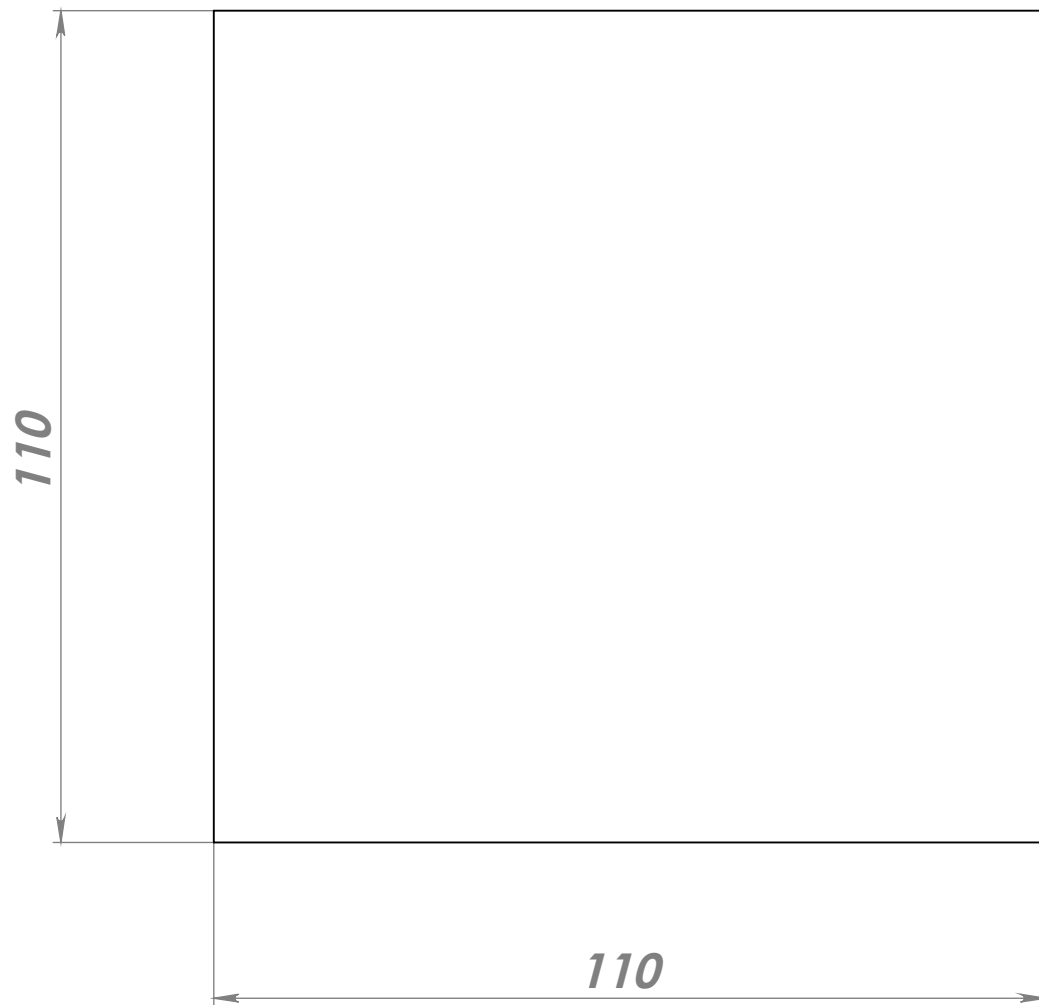


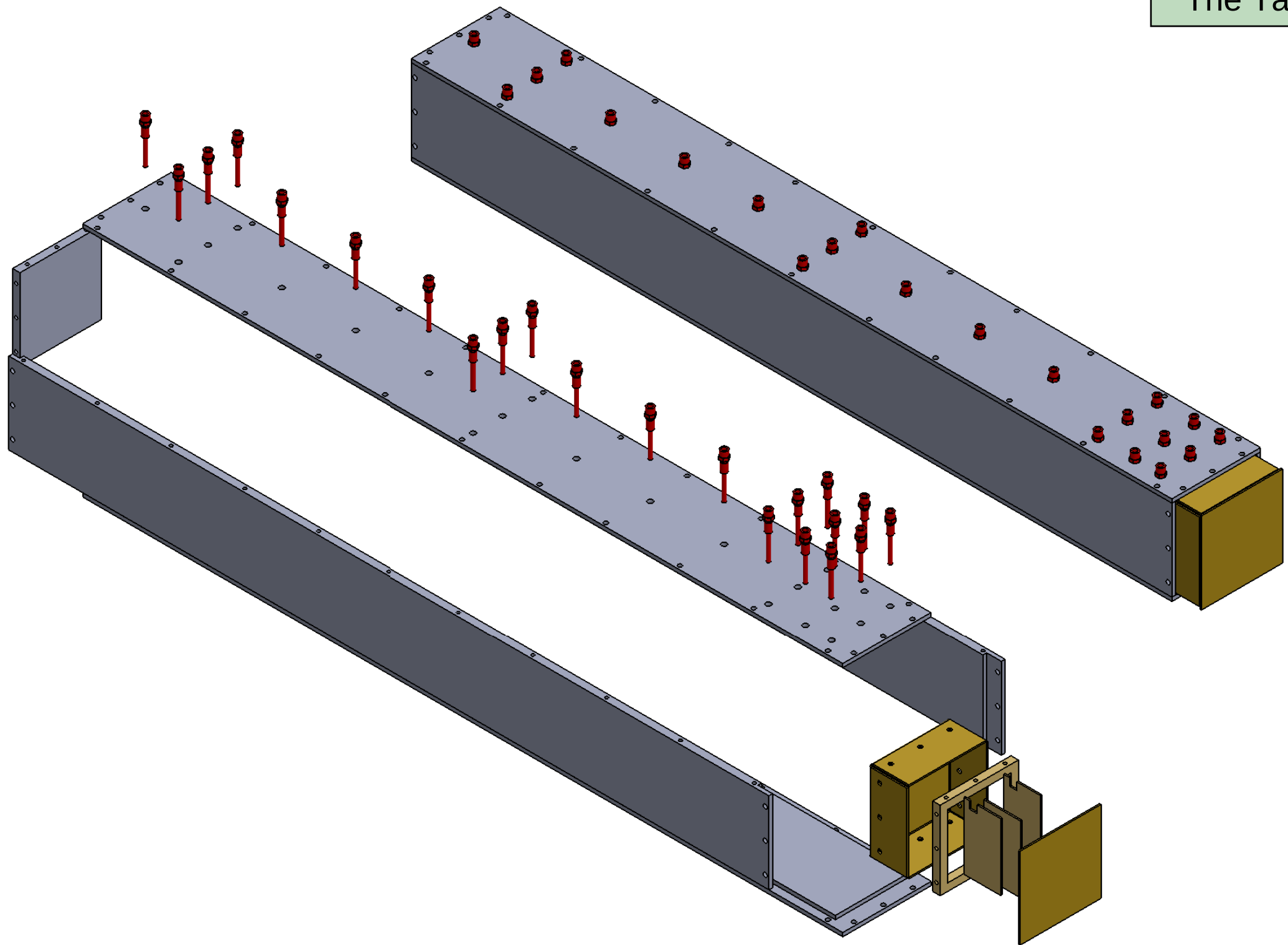
THICK 2mm

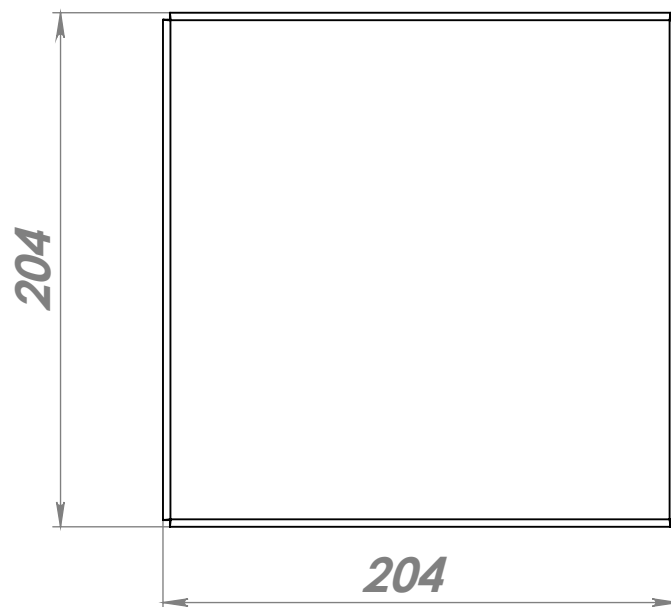
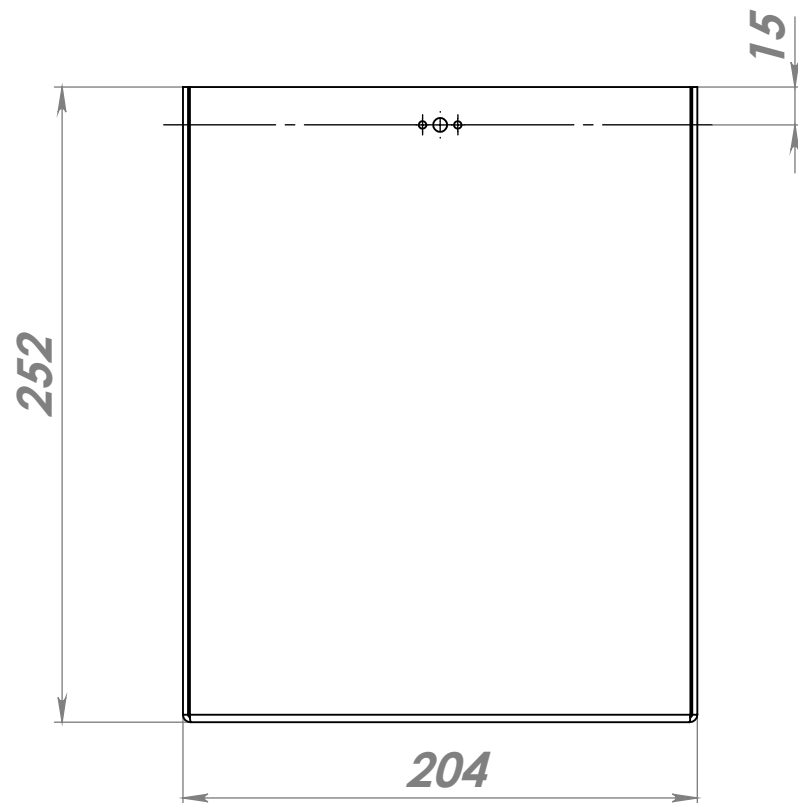


DETAIL B
SCALE 2 : 1

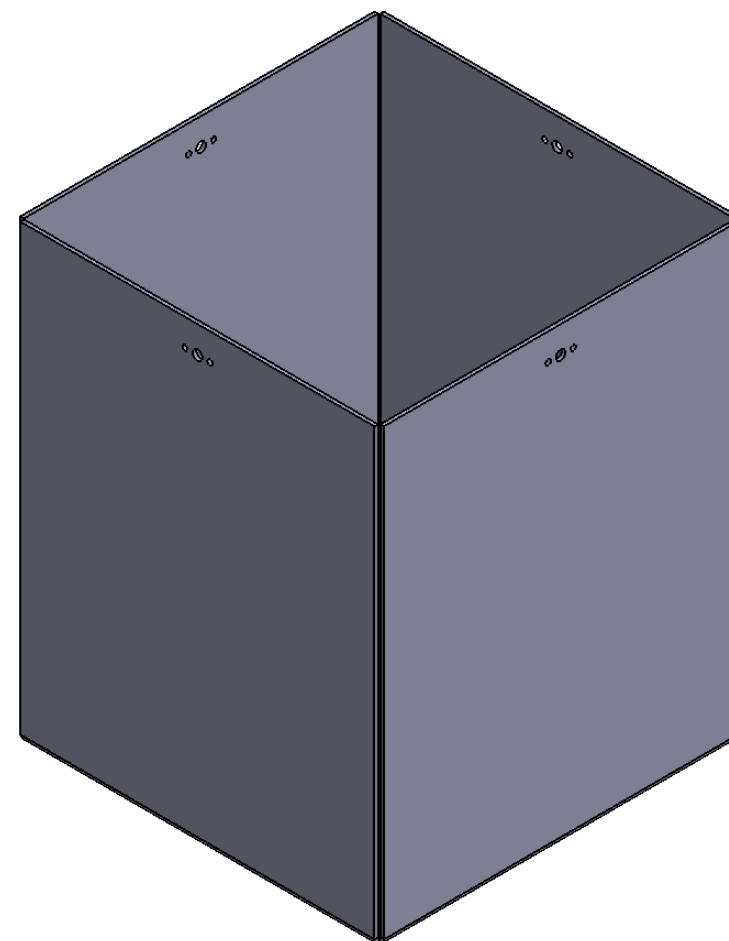


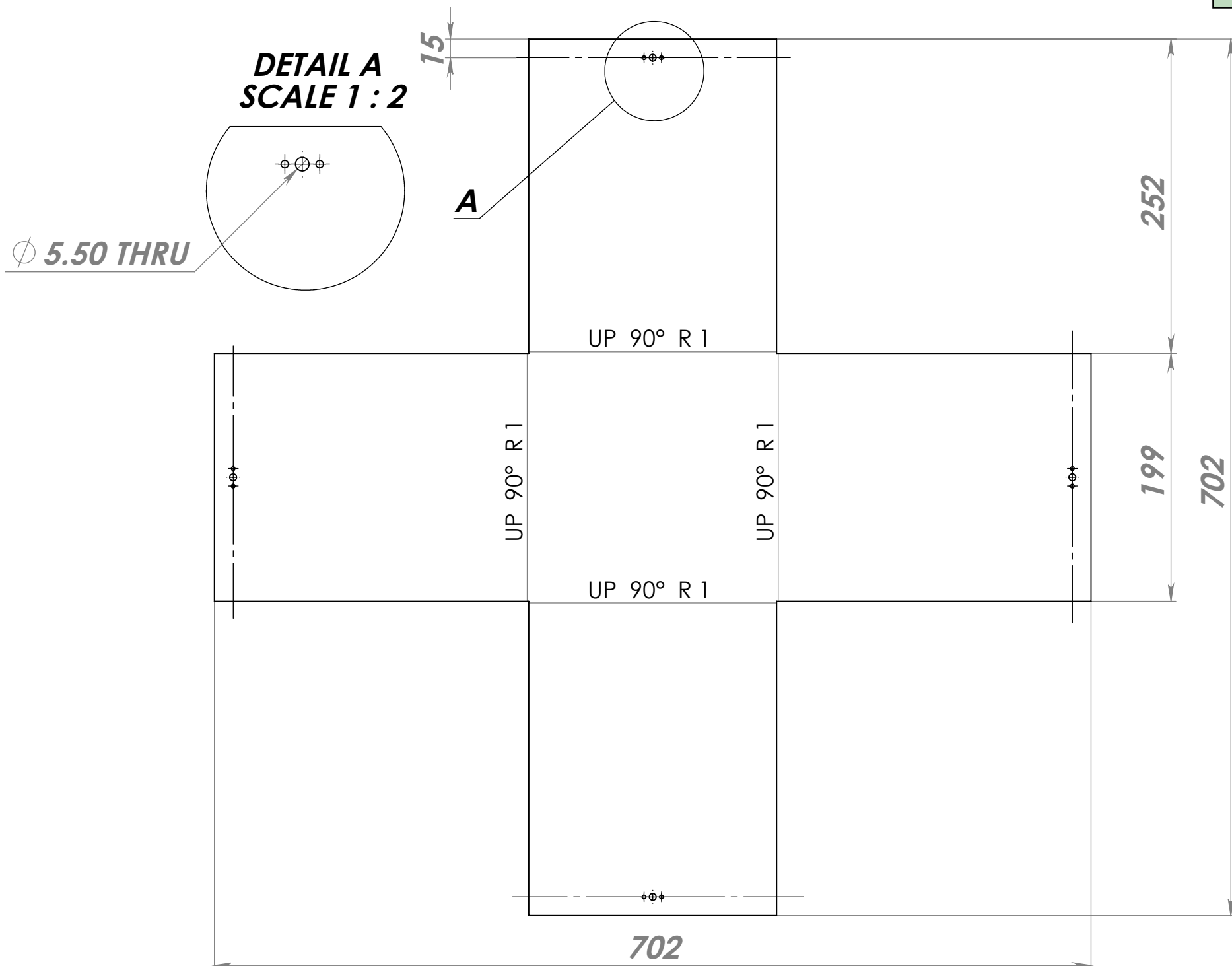


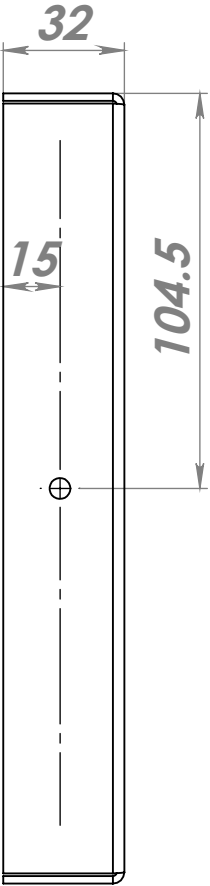




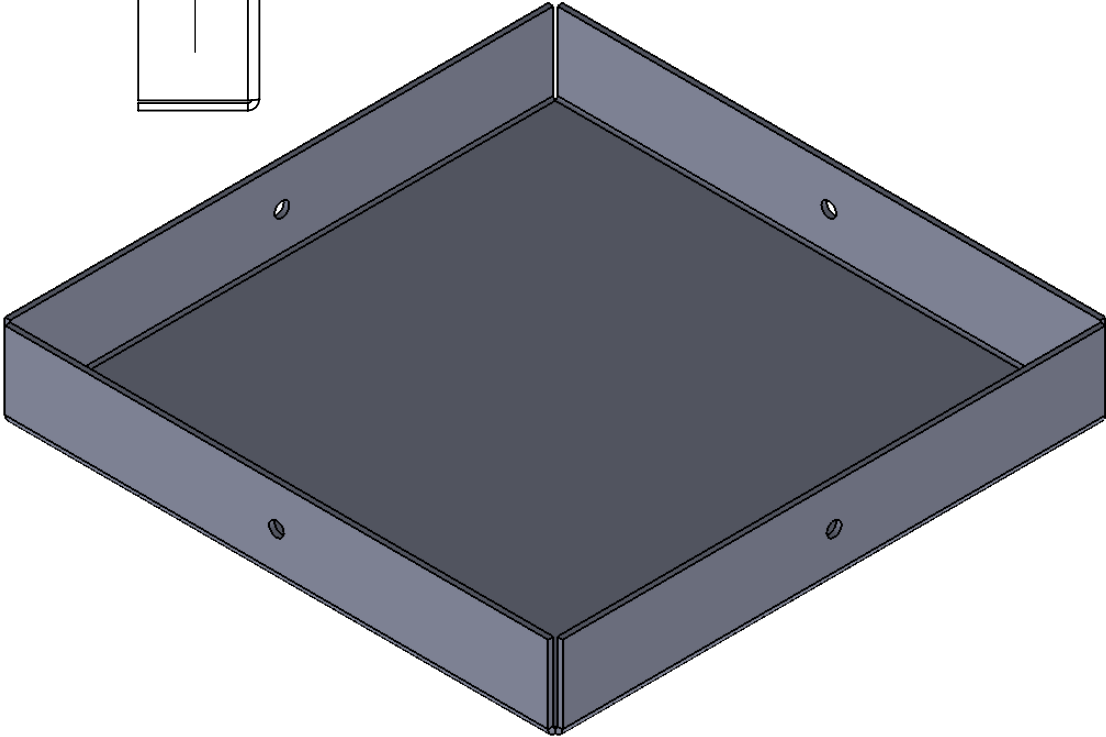
THICK 2mm

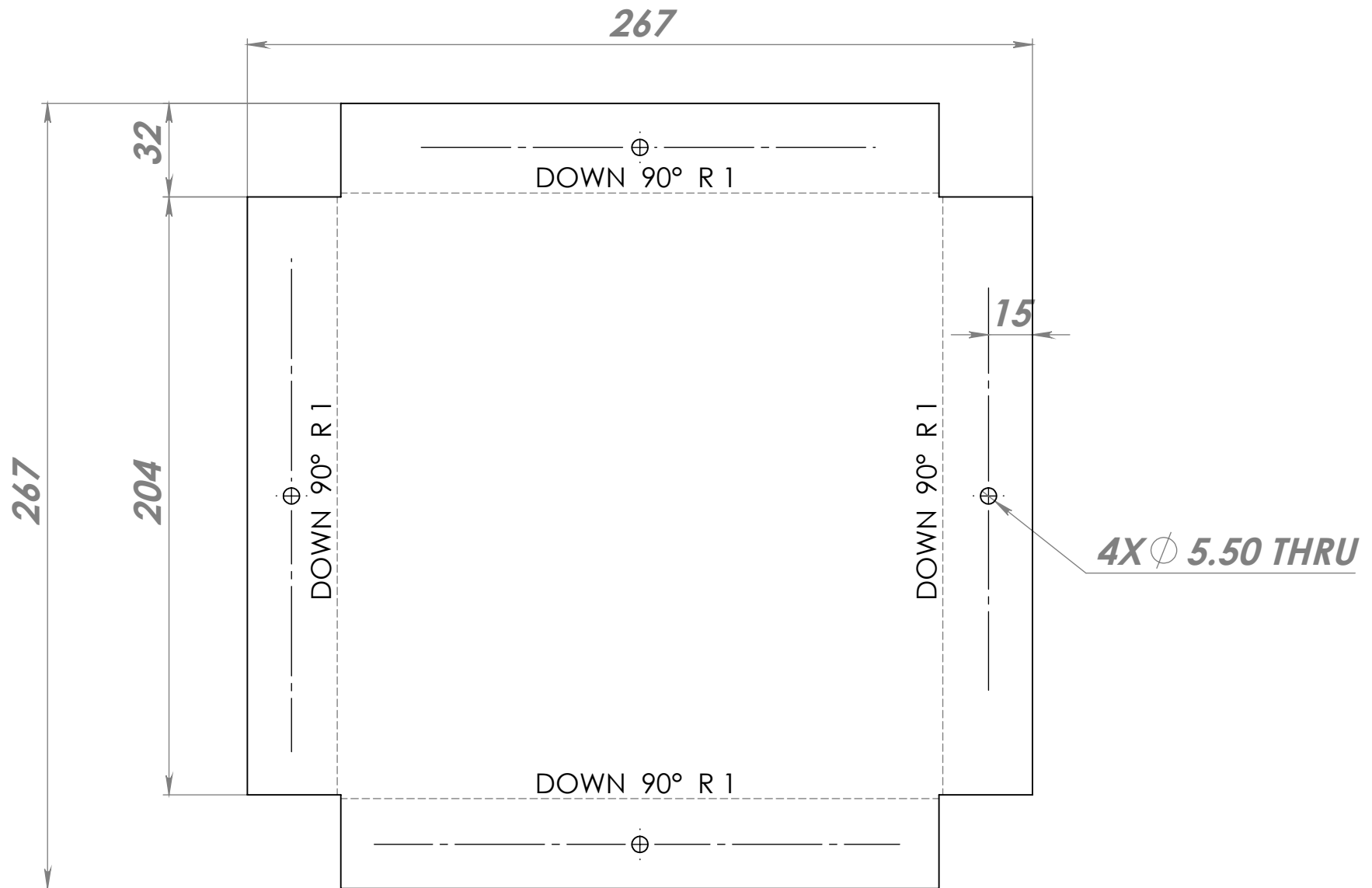


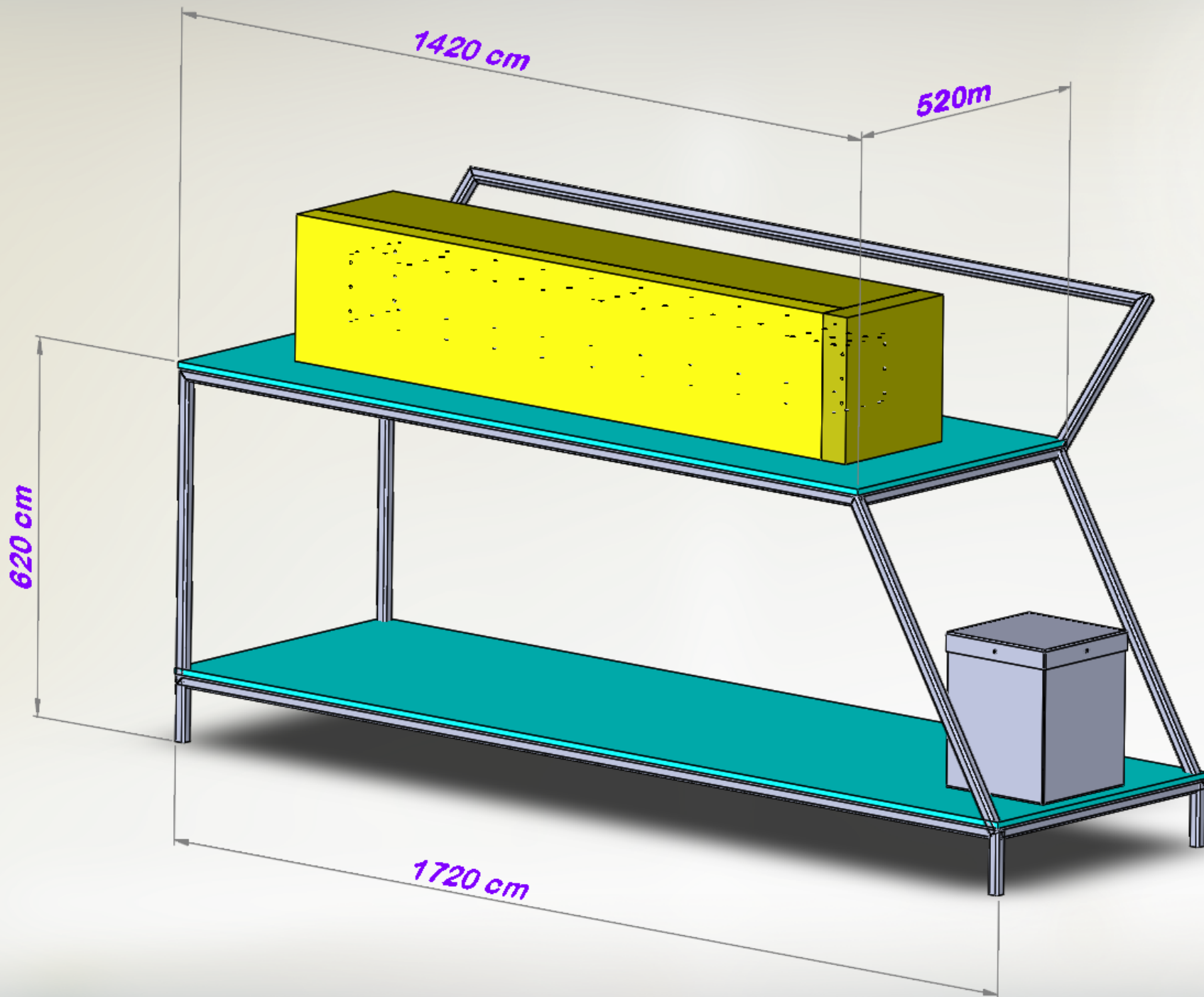




THICK 2mm







الملحق رقم (4):
المواصفات
الثيرموفيزيائية لمادة
الـ Plexi

Application Characteristics of PLEXIGLAS®

PLEXIGLAS® GS	PLEXIGLAS® XT
cast	extruded
absolutely colorless and clear	
break-resistant to impact-resistant (PLEXIGLAS RESIST® HP)	break-resistant to impact-resistant (PLEXIGLAS RESIST® 45 ... 100)
unequalled resistance to weathering and aging	
high-quality surface and planarity; high-gloss, textured or satin (PLEXIGLAS SATINICE® DC/SC)	very good surface; high-gloss, textured or satin (PLEXIGLAS® Crystal Ice)
solid sheets, blocks, tubes, round and square rods	solid sheets, tubes, round rods, multi-skin sheets, corrugated sheets, mirror sheets
2 mm to 160 mm solid sheet/block thickness	1.5 to 25 mm solid sheet thickness, multi-skin sheets 8, 16 and 32 mm thick
tandard sizes up to 3050 x 2030 mm	standard size 3050 x 2050 mm, extra lengths and special sizes on request
over 50 standard color	over 25 standard colors
good resistance to dilute acids and to alkalis limited resistance to organic solvents	
very easy to work, similar to hardwood	easy to work, similar to hardwood
easy to thermoform over a wide range of conditions	very easy to thermoform under optimal, constant conditions
easily and firmly bonded, e.g. with reaction adhesives (e.g. ACRIFIX® 1R 0190, 1R 0192)	very easily bonded, also with solvent adhesives (e.g. ACRIFIX® 1S 0116, 1S 0117)
burns more or less like hardwood; very little smoke generation; combustion gases are non-toxic and non-corrosive	
max. service temperature approx. 80 °C	max. service temperature approx. 70 °C

Typical Property Values (at 23 °C and 50% relative humidity)

Mechanical properties

	PLEXIGLAS® GS 233; 222; 209; (0F00; 0F00; 0Z09)	PLEXIGLAS® XT 20070; 29070 (0A000; 0A070)	PLEXIGLAS RESIST® 45; 65; 75; 100	Unit	Teststandard
Density ρ	1,19	1,19	1,19	g/cm ³	ISO 1183
Impact strength a_{CU} (Charpy)	15	15	45; 65; 75; no break	kJ/m ²	ISO 179/1fu
Notched impact strength a_N (Izod)	1,6	1,6	2,5; 4,5; 6,0; 6,5	kJ/m ²	ISO 180/1 A
Notched impact strength a_{cN} (Charpy)	–	–	3,5; 6,5; 7,5; 8,0	kJ/m ²	ISO 179/1eA
Tensile strength σ_M a) -40 °C b) 23 °C c) 70 °C	110 80 40	100 72 35	– 60; 50; 45; 40 –	MPa	ISO 527-2/1B/5
Elongation at break ϵ_B	5,5	4,5	–	%	ISO 527-2/1B/5
Nominal elongation at break ϵ_{tB}	–	–	10; 15; 20; 25	%	ISO 527-2/1B/50
Flexural strength σ_{bB} , Standard test specimen (80 x 10 x 4 mm ³)	115	105	95; 85; 77; 69	MPa	ISO 178
Compressive yield stress σ_{dF}	110	103	–	MPa	ISO 604
Max. safety stress σ_{max} (up to 40 °C)	5–10	5–10	5–10	MPa	–
Modulus of elasticity E_t (short-term value)	3300	3300	2700; 2200; 2000; 1800	MPa	ISO 527-2/1B/1
Min. cold bending radius	330 x thickness	330 x thickness	270 x thickness; 210 x thickness; 180 x thickness; 150 x thickness	–	–
Dynamic shear modulus G at approx. 10 Hz	1700	1700	–	MPa	ISO 537
Indentation hardness $H_{961/30}$	175	175	145; 130; 120; 100	MPa	ISO 2039-1
Abrasion resistance in Taber abrader test (100 rev.; 5,4 N; CS-10F)	20–30	20–30	20–30; 30–40; 30–40; 30–40;	% haze	ISO 9352
Coefficient of friction μ a) plastic / plastic b) plastic / steel c) steel / plastic	0,8 0,5 0,45	0,8 0,5 0,45	– – –	–	–
Poisson's ratio μ_b (dilatation speed of 5 % per min; up to 2 % dilatation; at 23 °C)	0,37	0,37	0,41; 0,42, 0,41; 0,43	–	ISO 527-1
Resistance to puck impact from thickness (Test Certificate No. from FMPA Stuttgart)	–	12 mm (46/900 549)	–; 6 ¹⁾ ; (6); 6 ²⁾ mm (¹⁾ 46/901 869/Sm/C; ²⁾ 46/901 870/Sm/C)	–	similar to DIN 18 032, Part 3

Acoustical properties

	PLEXIGLAS® GS 233; 222; 209; (0F00; 0F00; 0Z09)	PLEXIGLAS® XT 20070; 29070 (0A000; 0A070)	PLEXIGLAS RESIST® 45; 65; 75; 100	Unit	Teststandard
Sound velocity (at room temperature)	2700–2800	2700–2800	–	m/s	–
Weight sounded reduction index R_w at thickness:					
4 mm	26	26	–		
6 mm	30	30	–		
10 mm	32	32	–	dB	–

Optical properties (of clear grades, at 3 mm thickness)

	PLEXIGLAS® GS 233; 222; 209; (0F00; 0F00; 0Z09)	PLEXIGLAS® XT 20070; 29070 (0A000; 0A070)	PLEXIGLAS RESIST® 45; 65; 75; 100	Unit	Teststandard
Transmittance τ_{D65}	~ 92	~ 92	~ 91	%	DIN 5036, Part 3
UV transmission	no; no; no	no; yes	no; no; no; no	–	–
Reflection loss the visible range (for each surface)	4	4	4	%	–
Total energy transmittance g	85	85	85	%	DIN EN 410
Adsorption in the visible range	< 0,05	< 0,05	< 0,05	%	–
Refractive index n_D^{20}	1,491	1,491	1,491	–	ISO 489

Electrical properties

	PLEXIGLAS® GS 233; 222; 209; (0F00; 0F00; 0Z09)	PLEXIGLAS® XT 20070; 29070 (0A000; 0A070)	PLEXIGLAS RESIST® 45; 65; 75; 100	Unit	Teststandard
Volume resistivity ρ_D	$> 10^{15}$	$> 10^{15}$	$> 10^{14}$	Ohm · cm	DIN VDE 0303, Part 3
Surface resistivity σR_{0A}	$5 \cdot 10^{13}$	$5 \cdot 10^{13}$	$> 10^{14}$	Ohm	DIN VDE 0303, Part 3
Dielectric strength E_d (1 mm specimen thickness)	~ 30	~ 30	–	kV/mm	DIN VDE 0303, Part 2
Dielectric constant ϵ at 50 Hz	3,6	3,7	–	–	DIN VDE 0303, Part 4
at 0,1 MHz	2,7	2,8	–	–	
Dissipation factor $\tan \delta$ at 50 Hz	0,06	0,06	–	–	DIN VDE 0303, Part 4
at 0,1 MHz	0,02	0,03	–	–	
Tracking, CTI-Value	600	600	–	–	DIN VDE 0303, Part 1

Behavior towards water

	PLEXIGLAS® GS 233; 222; 209; (0F00; 0F00; 0Z09)	PLEXIGLAS® XT 20070; 29070 (0A000; 0A070)	PLEXIGLAS RESIST® 45; 65; 75; 100	Unit	Teststandard
Water absorption (24 hrs, 23 °C) from dry state; specimen 60 x 60 x 2 mm ³	41	38	41; 45; 46; 49	mg	ISO 62, Method 1
Max. weight gain during immersion	2,1	2,1	2,1	%	ISO 62, Method 1
Permeability to water vapour	$2,3 \cdot 10^{-10}$	$2,3 \cdot 10^{-10}$	–	$\frac{g \text{ cm}}{cm^2 \text{ h Pa}}$	–
N ₂	$4,5 \cdot 10^{-15}$	$4,5 \cdot 10^{-15}$	–		
O ₂	$2,0 \cdot 10^{-14}$	$2,0 \cdot 10^{-14}$	–		
CO ₂	$1,1 \cdot 10^{-13}$	$1,1 \cdot 10^{-13}$	–		
air	$8,3 \cdot 10^{-15}$	$8,3 \cdot 10^{-15}$	–		

Thermal properties

	PLEXIGLAS® GS 233; 222; 209; (0F00; 0F00; 0Z09)	PLEXIGLAS® XT 20070; 29070 (0A000; 0A070)	PLEXIGLAS RESIST® 45; 65; 75; 100	Unit	Teststandard
Coefficient of linear thermal expansion α for 0–50 °C	$7 \cdot 10^{-5}$ (=0,07)	$7 \cdot 10^{-5}$ (=0,07)	$7 \cdot 10^{-5}$; $8 \cdot 10^{-5}$; $9 \cdot 10^{-5}$; $11 \cdot 10^{-5}$ (0,07; 0,08; 0,09; 0,11)	1/K (mm/m °C)	DIN 53752-A
Possible expansion due to heat and moisture	5	5	5; 6; 6; 8	mm/m	–
Thermal conductivity λ	0,19	0,19	–	W/mK	DIN 52612
U-value, for thickness:					
1 mm	5,8	5,8	5,8		
3 mm	5,6	5,6	5,6		
5 mm	5,3	5,3	5,3		
10 mm	4,4	4,4	4,4	W/m²K	DIN 4701
Specific heat c	1,47	1,47	1,47	J/gK	–
Forming temperature	160–175	150–160	150–160; 140–150; 140–150; 140–150	°C	–
Max. surface temperature (IR radiator)	200	180	–	°C	–
Max. permanent service temperature	80	70	70; 70; 70; 65	°C	–
Reverse forming temperature	> 80; > 80; > 90	> 80; > 80	> 80; > 80; > 75; > 70	°C	–
Ignition temperature	425	430	–	°C	DIN 51794
Smoke gas volume	very little	very little	very little	–	DIN 4102
Smoke gas toxicity	non	non	non	–	DIN 53436
Smoke gas corrosiveness	non	non	non	–	–
Class	B2, Class 3 TP (b)	B2 Class 3 TP (b)	B2 – –	– – –	DIN 4102 BS 476, Part 7 + 6 BS 2782, Method 508 A
Fire rating	E	E	E	–	DIN EN 13501
German building inspectorate test report	P-K017 / 11.06	P-K018 / 02.07	P-K019 / 05.07	–	–
Vicat softening temperature	115	103	102; 100; 100; 97	°C	ISO 306, Method B 50
Heat deflection temperature under load (HDT)					
a) deflection 1,8 MPa	105; 105; 107	95	94; 93; 92; 90		
b) deflection 0,45 MPa	113; 113; 115	100	99; 98; 96; 93	°C	ISO 75

Global Availability

We sell our PLEXIGLAS® products both directly to fabricators and via a closely meshed network of distributors. The extensive and efficient distribution system ensures that products are rapidly available throughout Europe, Asia, Australia and Africa. In the Americas, the business unit has its own production facilities and distribution system. Our range is sold in that part of the world under the ACRYLITE® trademark.

الملحق رقم (5):
المواصفات
التيرموفيزيائية للماء
النقي

Properties Of Water

E.1 Introduction

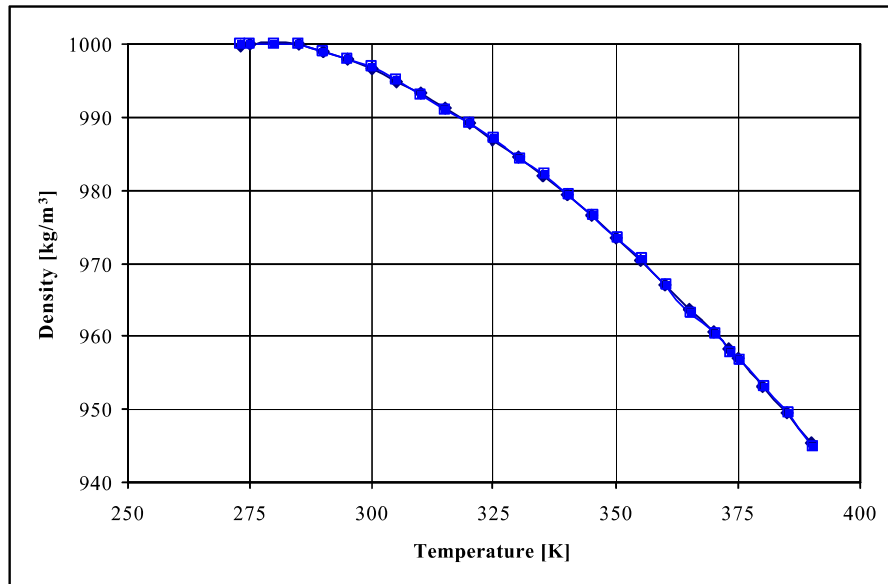
In order to calculate the heat transfer of the water experimentally it is necessary to calculate the properties of water. These properties can be read from tables but since so many properties must be obtained at different conditions an easier method was necessary. It was decided to do a line fit through the property conditions and therefore get an equation for each different property at different conditions.

E.2 Obtaining equations for properties

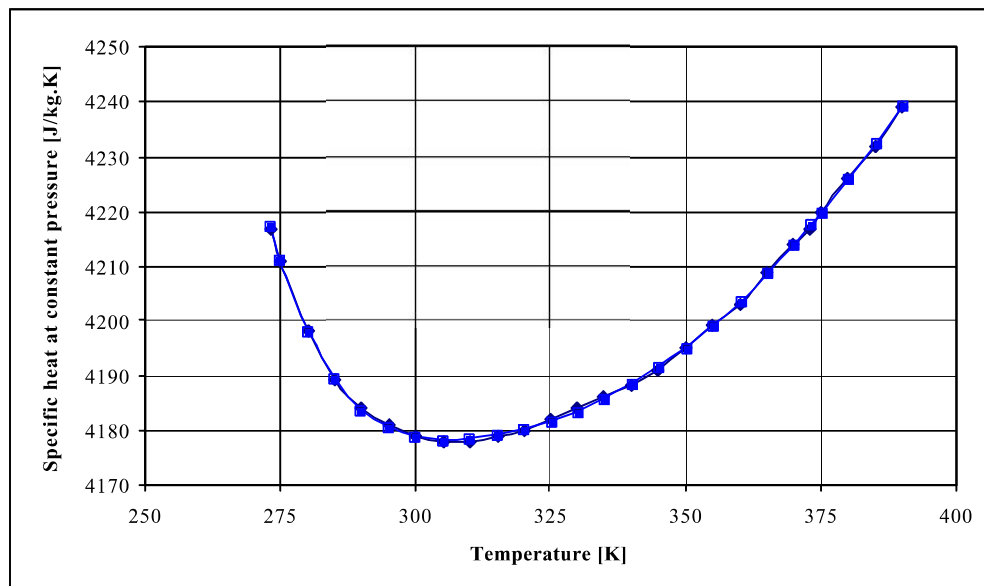
Table E.1 shows the data, which was obtained from Incropera^{E.1} and plotted on graphs.

Table E.1. Properties of water at different temperatures.

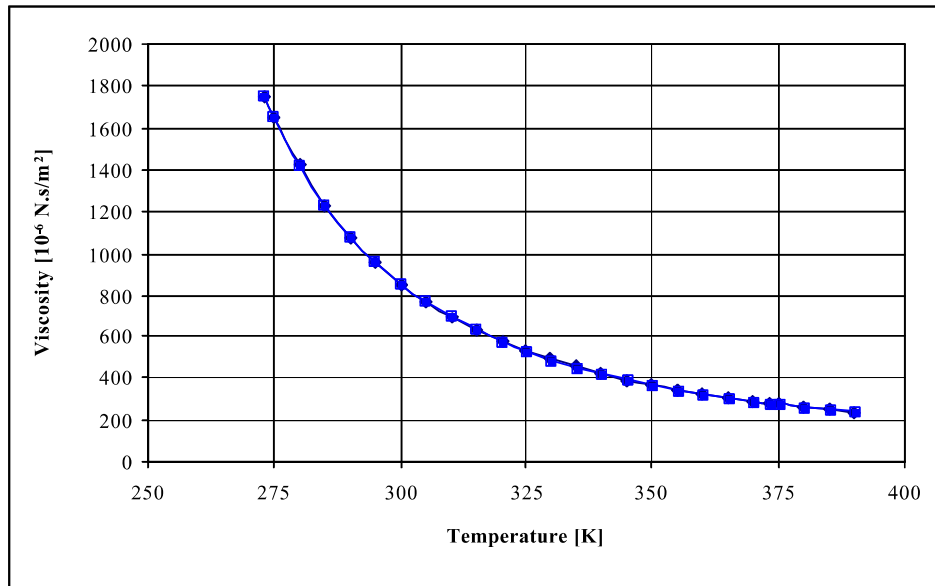
T	ρ	C_p	μ	k	Pr
[K]	[kg/m ³]	[J/kg.K]	[10 ⁻⁶ N.s/m ²]	[10 ⁻³ W/m.K]	[]
273.15	1000.0	4217	1750	569	12.99
275	1000.0	4211	1652	574	12.22
280	1000.0	4198	1422	582	10.26
285	1000.0	4189	1225	590	8.81
290	999.0	4184	1080	598	7.56
295	998.0	4181	959	606	6.62
300	997.0	4179	855	613	5.83
305	995.0	4178	769	620	5.2
310	993.0	4178	695	628	4.62
315	991.1	4179	631	634	4.16
320	989.1	4180	577	640	3.77
325	987.2	4182	528	645	3.42
330	984.3	4184	489	650	3.15
335	982.3	4186	453	656	2.88
340	979.4	4188	420	660	2.66
345	976.6	4191	389	668	2.45
350	973.7	4195	365	668	2.29
355	970.9	4199	343	671	2.14
360	967.1	4203	324	674	2.02
365	963.4	4209	306	677	1.91
370	960.6	4214	289	679	1.8
373.15	957.9	4217	279	680	1.76
375	956.9	4220	274	681	1.7
380	953.3	4226	260	683	1.61
385	949.7	4232	248	685	1.53
390	945.2	4239	237	686	1.47



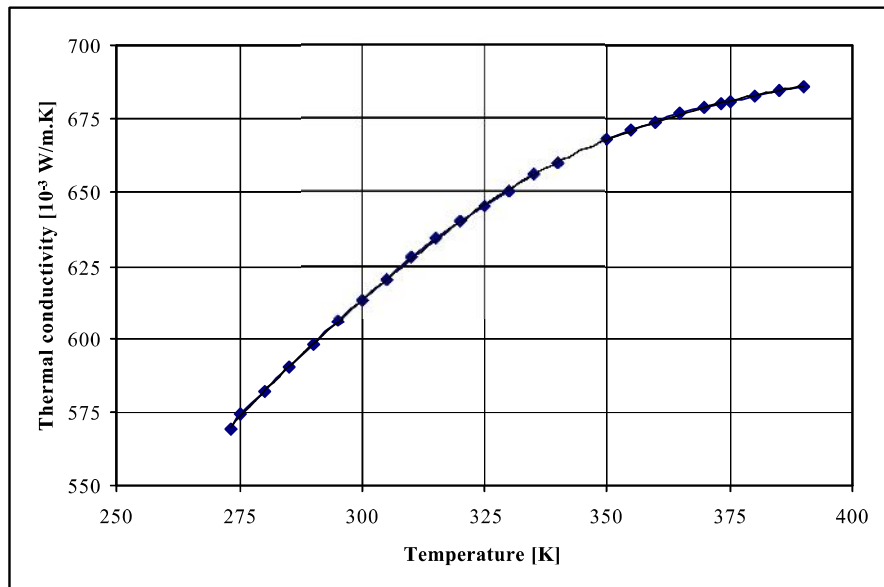
Graph E.1. Density of water at different temperatures.



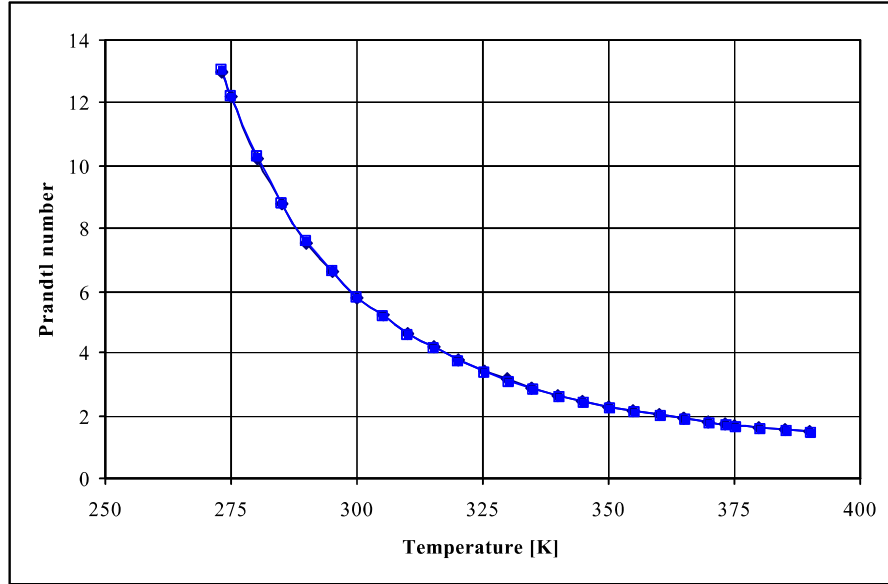
Graph E.2. Specific heat at constant pressure of water at different temperatures.



Graph E.3. Viscosity of water at different temperatures.



Graph E.4. Thermal conductivity of water at different temperatures.



Graph E.5. Prandtl number of water at different temperatures.

Equations for the different properties of water are obtained by fitting trendlines through the different points. The equations obtained are given below in the order of density, specific heat at constant pressure, viscosity, thermal conductivity and Prandtl number. In each case the x represents the temperature and the y the specific property.

$$\begin{aligned}
 y &= -7E-11x^6 + 1E-07x^5 - 0.0001x^4 + 0.0534x^3 - 13.5x^2 + 1818.6x - 100944 \\
 y &= 2E-10x^6 - 5E-07x^5 + 0.0004x^4 - 0.2075x^3 + 54.956x^2 - 7742.6x + 457643 \\
 y &= 2E-09x^6 - 5E-06x^5 + 0.0044x^4 - 2.0519x^3 + 534.05x^2 - 74221x + 4E+06 \\
 y &= -1E-10x^6 + 2E-07x^5 - 0.0002x^4 + 0.078x^3 - 19.804x^2 + 2668.4x - 148849 \\
 y &= 2E-11x^6 - 4E-08x^5 + 4E-05x^4 - 0.0172x^3 + 4.4936x^2 - 626.19x + 36425
 \end{aligned}$$

From the equations above the coefficients are not given very accurately. Therefore another function in Microsoft Excel is needed to obtain these coefficients. The function is LINEST and does the same procedure as the trendline fit but gives more accurate results. The general equation with the coefficients is given in *Eq. E.1* and the results in *Table E.2*.

$$y = C_6x^6 + C_5x^5 + C_4x^4 + C_3x^3 + C_2x^2 + C_1x + C_0 \quad (E.1)$$

Table E.2. Coefficients of trendlines calculated with LINEST function.

	C_6	C_5	C_4	C_3	C_2	C_1	C_0
r	-6.8848E-11	1.4008E-07	-1.1852E-04	5.3376E-02	-1.3500E+01	1.8186E+03	-1.0094E+05
C_p	2.8410E-10	-5.9969E-07	5.2619E-04	-2.4565E-01	6.4368E+01	-8.9769E+03	5.2488E+05
m	2.9875E-09	-6.1708E-06	5.3083E-03	-2.4352E+00	6.2858E+02	-8.6619E+04	4.9827E+06
k	-1.1756E-10	2.4140E-07	-2.0541E-04	9.2716E-02	-2.3422E+01	3.1429E+03	-1.7470E+05
Pr	2.4859E-11	-5.1485E-08	4.4407E-05	-2.0424E-02	5.2852E+00	-7.3000E+02	4.2080E+04

The percentage difference to the properties obtained with the LINEST trendlines and the original tables is obtained by calculating the difference between the calculated value and the tabulated value and divided by the correct tabulated value as a percentage. The average difference as well as the maximum difference is given in *Table E.3*.

Table E.3. Differences between tabulated values and LINEST trendline.

	Average difference	Maximum difference	Temperature where maximum difference occur
	[%]	[%]	[K]
r	0.019%	0.050%	365
C_p	0.006%	0.012%	360
m	0.221%	0.534%	335
k	0.077%	0.477%	345
Pr	0.280%	1.114%	373.15

As a final check the different equations of the properties is used to calculate the Prandtl number according to *Eq. E.2* and compared to the tabulated value. This results in an average difference of 0.353% with a maximum difference of 1.576% at 373.15K.

$$\text{Pr} = \frac{C_p m}{k} \quad (\text{E.2})$$

From literature^{E.2} it was founded that more accurate equations exist since the data used for the calculation was obtained from more accurate and complete internationally accepted steam tables. These equations for the properties of water are listed below (*Eq. E.3. – E.8.*) and the uncertainty of each equation in *Table E.4*. All temperatures in degrees Celsius and not in degrees Kelvin.

$$r = 999.79684 + 0.068317355 \times T - 0.010740248 \times T^2 + 0.00082140905 \times T^{2.5} - 2.3030988 \times 10^{-5} \times T^3 \quad (\text{E.3})$$

$$h = -2.844699 \times 10^{-2} + 4.211925 \times T - 1.017034 \times 10^{-3} \times T^2 + 1.311054 \times 10^{-5} \times T^3 - 6.756469 \times 10^{-8} \times T^4 + 1.724481 \times 10^{-10} \times T^5 \quad (\text{E.4})$$

$$C_p = 4.2174356 - 0.0056181625 \times T + 0.0012992528 \times T^{1.5} - 0.00011535353 \times T^2 + 4.14964 \times 10^{-6} \times T^{2.5} \quad (\text{E.5})$$

$$m = \frac{1}{557.82468 + 19.408782 \times T + 0.1360459 \times T^2 - 3.1160832 \times 10^{-4} \times T^3} \quad (\text{E.6})$$

$$k = 0.5650285 + 0.0026363895 \times T - 0.00012516934 \times T^{1.5} - 1.51549180 \times 10^{-6} \times T^2 - 0.0009412945 \times T^{0.5} \quad (\text{E.7})$$

$$\text{Pr} = \frac{1}{0.074763403 + 0.0029020983 \times T + 2.8606181 \times 10^{-5} \times T^2 - 8.1395537 \times 10^{-8} \times T^3} \quad (\text{E.8})$$

Table E.4. Uncertainties of equations E.3. to E.8.

r	$\pm 0.001\% - \pm 0.003\%$
h	$\pm 0.057\%$
C_p	$\pm 0.04\%$
m	$\pm 1\%$
k	$\pm 2\%$
Pr	$\pm 2.3\%$

Therefore *Eq. E.3. – E.8* are used to calculate the properties of water in the interpretation of the experimental results.

E.3 Nomenclature

C_p	specific heat at constant pressure [$J/kg.K$]
h	enthalpy [kJ/kg]
k	thermal conductivity [$W/m.K$]
Pr	Prandtl number []
x	temperature at which property of water is determined [K]
y	specific property of water

Greek symbols

m	dynamic viscosity [$N.s/m^2$]
r	density [kg/m^3]

E.4 References

- E.1. Incropera FP & DeWitt DP. *Introduction to Heat Transfer*, 3rd ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, USA 1996.
- E.2. Popiel CO & Wojtkowiak J. Simple Formulas for Thermophysical Properties of Liquid Water for Heat Transfer Calculations (from 0°C to 150°C), *Heat Transfer Engineering*, 1998, **19**, 87-101.

الملحق رقم (6):
مواصفات الثيرموكبل
(*Thermocouple*)
نوع K

STANDARD ITS-90 THERMOCOUPLE TABLES

The Instrument Society of America (ISA) has assigned standard letter designations to a number of thermocouple types having specified emf-temperature relations. These designations and the approximate metal compositions which meet the required relations, as well as the useful temperature ranges, are given below:

Type B	(Pt + 30% Rh) vs. (Pt + 6% Rh)	0 to 1820°C
Type E	(Ni + 10% Cr) vs. (Cu + 43% Ni)	-270 to 1000°C
Type J	Fe vs. (Cu + 43% Ni)	-210 to 1200°C
Type K	(Ni + 10% Cr) vs. (Ni + 2% Al + 2% Mn + 1% Si)	-270 to 1372°C
Type N	(Ni + 14% Cr + 1.5% Si) vs. (Ni + 4.5% Si + 0.1% Mg)	-270 to 1300°C
Type R	(Pt + 13% Rh) vs. Pt	-50 to 1768°C
Type S	(Pt + 10% Rh) vs. Pt	-50 to 1768°C
Type T	Cu vs. (Cu + 43% Ni)	-270 to 400°C

The compositions are given in weight percent, and the positive leg is listed first. It should be emphasized that the standard letter designations do not imply a precise composition but rather that the specified emf-temperature relation is satisfied.

The first set of tables below lists, for each thermocouple type, the emf as a function of temperature on the International Temperature Scale of 1990 (ITS-90). The coefficients in the equation used to generate the table are also given. The second set of tables gives the inverse relationships, i.e., the coefficients in the polynomial equation which expresses the temperature as a function of thermocouple emf. The accuracy of these equations is also stated.

Further details and tables at closer intervals may be found in Reference 1.

REFERENCES

1. Burns, G. W., Seroger, M. G., Strouse, G. F., Croarkin, M. C., and Guthrie, W.F., *Temperature-Electromotive Force Reference Functions and Tables for the Letter-Designated Thermocouple Types Based on the ITS-90*, Nat. Inst. Stand. Tech. (U.S.) Monogr. 175, 1993.
2. Schooley, J. F., *Thermometry*, CRC Press, Boca Raton, FL, 1986.

Type K thermocouples: emf-temperature ($^{\circ}\text{C}$) reference table and equations

Thermocouple emf in Millivolts as a Function of Temperature in Degrees Celsius (ITS-90)

Reference Junctions at 0°C

$t/^{\circ}\text{C}$	0	-10	-20	-30	-40	-50	-60	-70	-80	-90	-100
-200	-5.891	-6.035	-6.158	-6.262	-6.344	-6.404	-6.441	-6.458			
-100	-3.554	-3.852	-4.138	-4.411	-4.669	-4.913	-5.141	-5.354	-5.550	-5.730	-5.891
0	0.000	-0.392	-0.778	-1.156	-1.527	-1.889	-2.243	-2.587	-2.920	-3.243	-3.554
$t/^{\circ}\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0	0.000	0.397	0.798	1.203	1.612	2.023	2.436	2.851	3.267	3.682	4.096
100	4.096	4.509	4.920	5.328	5.735	6.138	6.540	6.941	7.340	7.739	8.138
200	8.138	8.539	8.940	9.343	9.747	10.153	10.561	10.971	11.382	11.795	12.209
300	12.209	12.624	13.040	13.457	13.874	14.293	14.713	15.133	15.554	15.975	16.397
400	16.397	16.820	17.243	17.667	18.091	18.516	18.941	19.366	19.792	20.218	20.644
500	20.644	21.071	21.497	21.924	22.350	22.776	23.203	23.629	24.055	24.480	24.905
600	24.905	25.330	25.755	26.179	26.602	27.025	27.447	27.869	28.289	28.710	29.129
700	29.129	29.548	29.965	30.382	30.798	31.213	31.628	32.041	32.453	32.865	33.275
800	33.275	33.685	34.093	34.501	34.908	35.313	35.718	36.121	36.524	36.925	37.326
900	37.326	37.725	38.124	38.522	38.918	39.314	39.708	40.101	40.494	40.885	41.276
1000	41.276	41.665	42.053	42.440	42.826	43.211	43.595	43.978	44.359	44.740	45.119
1100	45.119	45.497	45.873	46.249	46.623	46.995	47.367	47.737	48.105	48.473	48.838
1200	48.838	49.202	49.565	49.926	50.286	50.644	51.000	51.355	51.708	52.060	52.410
1300	52.410	52.759	53.106	53.451	53.795	54.138	54.479	54.819			

Temperature Ranges and Coefficients of Equations Used to Compute the Above Table

The equations are of the form: $E = c_0 + c_1t + c_2t^2 + c_3t^3 + \dots c_nt^n$, where E is the emf in millivolts, t is the temperature in degrees Celsius (ITS-90), and c_0, c_1, c_2, c_3 , etc. are the coefficients. In the 0°C to 1372°C range there is also an exponential term that must be evaluated and added to the equation. The exponential term is of the form: $c_0\exp[c_1(t-126.9686)^2]$, where t is the temperature in °C and c_0 and c_1 are the coefficients. These coefficients are extracted from NIST Monograph 175.

	-270°C to 0°C	0°C to 1372°C	0°C to 1372°C (exponential term)
c_0	= 0.000 000 000 0	-1.760 041 368 6 $\times 10^{-2}$	1.185 976 $\times 10^{-1}$
c_1	= 3.945 012 802 5 $\times 10^{-2}$	3.892 120 497 5 $\times 10^{-2}$	-1.183 432 $\times 10^{-4}$
c_2	= 2.362 237 359 8 $\times 10^{-5}$	1.855 877 003 2 $\times 10^{-5}$	.....
c_3	= -3.285 890 678 4 $\times 10^{-7}$	-9.945 759 287 4 $\times 10^{-8}$	.....
c_4	= -4.990 482 877 7 $\times 10^{-9}$	3.184 094 571 9 $\times 10^{-10}$	.....
c_5	= -6.750 905 917 3 $\times 10^{-11}$	-5.607 284 488 9 $\times 10^{-13}$	.....
c_6	= -5.741 032 742 8 $\times 10^{-13}$	5.607 505 905 9 $\times 10^{-16}$	.....
c_7	= -3.108 887 289 4 $\times 10^{-15}$	-3.202 072 000 3 $\times 10^{-19}$	.....
c_8	= -1.045 160 936 5 $\times 10^{-17}$	9.715 114 715 2 $\times 10^{-23}$	.....
c_9	= -1.988 926 687 8 $\times 10^{-20}$	-1.210 472 127 5 $\times 10^{-26}$	.....
c_{10}	= -1.632 269 748 6 $\times 10^{-23}$	.....	.....

الملحق رقم (7):
الـ Code المُستخدم
ضمن برنامج
ANSYS 13

ANSYS13/Fluent Code

problem setup	General	Solver Type	Pressure - Based	
		Velocity Formulation	Absolute	
		Time	Transient	
		Gravity	Y=9.81 m/S ²	
	Models	Energy	On	
		Viscous Model	Standard K-e	
		Solidification& Melting	On	
			Mushy zone Parmetr	Constant= 0 [pure material]
	Materials	Water-Liquid		
	Cell Zone Conditions	Fluid/ Water Liquid		
Solution Methods	Boundry Condition	Inlet-Wall	Wall	temp= 265 K
		Tank-Wall	Wall	Heat flux=0
	Scheme	simple		
	Gradient	Green-Gauss Cell Based		
	Pressure	Standard		
	Momentum	Second Order Upwind		
	Turbulent Kinetic Energy	Second Order Upwind		
	Turbulent Dissipation Rate	Second Order Upwind		
	Transient Formulation	First Order Implicit		

Solution Controls	Pressure	0.3	Density	1
	Body Forces	1	Momentum	0.7
	Turbulent Kinetic Energy	0.8	Turbulent Dissipation Rate	0.8
	Turbulent Viscosity	1	Liquid Fraction Update	0.9
	Energy	1		
Monitors	Continuity	0.001		
	X-Velocity	0.001		
	y-Velocity	0.001		
	z-Velocity	0.001		
	Energy	1.00E-08		
	K	1.00E-04		
	Epsilon	0.0001		
Run Calculation	Time Step Size	100		
	Number Of Time Steps	864		
	Max Iterations/ Time Step	20		

تم بعونه تعالى

Damascus University
Faculty of Mechanical & Electrical Engineering
Mechanical Engineering Department



Experimental Investigation on Solidification Phenomena of Phase Change Materials (PCMs) Based on Stefan Problem

Graduation Project prepared to obtain a
master of
Mechanical Engineering degree

By

Eng. Feras Eloush

Supervised by

Dr. Bassm Badran

Year
2014