الجمهورية الديمقراطية الشعبية الجزائرية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة الشهيد حمه لخضر الوادي

كلية التكنولوجيا

مذكرة تخرج لنيل شهادة

ماستـر أكاديمـي

ميـدان: العلوم والتكنولوجيا

شعبـــة: هندسة ميكانيكية

تخصـــص: طاقات متجددة في الميكانيك

من اعـداد الطلبـة:

1- بن نونة نافع

2- عرعار عبد السميع

الموضـــوع

تحسين اداء مجفف شمسي مباشر باستعمال مواد تخزين الحرارة

نوقشت في: 2025/06/22

أمام لجنة المناقشة:

البروفيسور: غربي محمد الطاهر	رئيسا	جامعة الوادي.
الدكتور دغوم خليل	مناقشا	جامعة الوادي.
الدكتور زين علي	مشرفا	جامعة الوادي.

الموسم الجامعي: 2025/2024

الملخص

يُعد هذا العمل مساهمة نظرية وتجريبية مهمة في دراسة فعالية استخدام مادة ثنائية الطور – شمع البارافين – كمخزن حراري في نظام تجفيف شمسي غير مباشر. أُجريت التجارب في وحدة تطوير الطاقات المتجددة بجامعة الوادي يومي 18 و19 ماي 2025، لتقييم أداء المجفف في تجفيف البصل وتحليل سلوك المادة المستخدمة في التخزين الحراري.

أظهرت النتائج التجريبية ما يلي:

- ارتفعت درجة حرارة المجفف إلى 50°C مقارنة بـ 35°C فقط خارج المجفف، بفارق حراري بلغ 15–20°C.
- انخفض المحتوى الرطوبي للبصل من 12.3 كغ/كغ إلى قرابة الصفر خلال 1900 دقيقة، ما يدل على فعالية عالية للتجفيف.
- أظهر شمع البارافين فعالية في تخزين الحرارة نهارًا (بلغت حرارته 70°C) ثم إطلاقها ليلًا (انخفض إلى 45°C)، مما حافظ على استمرار عملية التجفيف بعد غروب الشمس.

تؤكد النتائج نجاح النظام في تحسين كفاءة التجفيف باستخدام الطاقة الشمسية والتخزين الحراري.

الكلمات المفتاحية:

تجفيف – تجفيف البصل – تخزين الطاقة – شمع البارافين

Abstract

This work presents a significant theoretical and experimental contribution to evaluating the effectiveness of using a phase change material — paraffin wax — as a thermal storage medium in an indirect solar drying system. The experiments were conducted at the Renewable Energy Development Unit at the University of El Oued on May 18–19, 2025, to assess the dryer's performance in drying onions and analyze the thermal behavior of the storage material.

The experimental results showed the following:

The dryer's internal temperature reached 50°C, compared to only 35°C outside, with a thermal difference of 15–20°C.

The onion's moisture content dropped from 12.3 kg/kg to nearly zero within 1900 minutes, indicating high drying efficiency.

Paraffin wax proved effective in storing heat during the day (reaching 70°C) and releasing it at night (dropping to 45°C), ensuring the drying process continued after sunset.

These results confirm the system's success in enhancing drying efficiency through the use of solar energy and thermal storage.

Keywords:

Drying – Onion drying – Energy storage – Paraffin wax

الاهداء

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات حمدا كثير طيبا مباركا فيه

كما ينبغي لجلال وجهه وعظيم سلطانه وكما يليق بعظيم نعمته علينا

الحمد لله الذي هدانا إلى طريق العلم والمعرفة

الحمد لله الذي وفقنا لانجاز هذه المذكرة

وإتمام هذا البحث العلمي المتواضع

والذي أهدية إلى:

أمي الحبيبة الغالية والعزيزة على قلبي التي أحاطتني بدعواتها الخالصة

والى أبي الغالي الذي علمني حروفي الأولى وكان قدوتا لي في العمل والمثابرة

أدام الله عليها نعمة الصحة والعافية

الى زوجتي الغالية

إلى إخوتي الأعزاء

وإلى جميع أصدقائي وإلى جميع أقاربي

إلى كل من ساعدني أو دعى لي بظهر الغيب

نافع

الاهداء

بكل حمدٍ وشكر، أحمد الله تعالى الذي تكتمل بنعمته الصالحات،

حمدًا طيبًا كثيرًا مباركًا فيه، كما يليق بجلال وجهه وعظيم سلطانه،

وكما يليق بعظيم نعمه التي أنعم بها علينا.

الحمد لله الذي هدانا إلى طريق العلم والمعرفة،

ووفقنا لإتمام هذه المذكرة وإنجاز هذا البحث العلمي المتواضع.

أهدي هذا العمل إلى:

والدتي الحبيبة، النبع الصافي، التي أحاطتني بدعواتها الصادقة.

والدي العزيز، الذي علّمني أول الحروف، وكان مثالًا يُحتذى به في الجد والاجتهاد،

أطال الله في عمره وباركه في صحته.

زوجتي الغالية، شريكة دربي، سندي ومصدر دعمي.

إخوتي الأعزاء، الذين كانوا دومًا إلى جانبي.

أصدقائي وكل من رافقني في رحلة هذا الإنجاز.

أقاربي الكرام، وكل من قدّم لي يد العون أو خصّني بدعوة صادقة في ظهر الغيب.

جزاكم الله جميعًا خير الجزاء، وبارك فيكم وكتب لكم التوفيق والسداد.

عبد السميع

الشكر والتقدير

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات قال تعالى:

"ربي أوزعني أن أشكر نعمتك التي أنعمت علي وعلى والدي وأن أعمل

صالحا ترضاه وأدخلني برحمتك في عبادك الصالحين"

"سورة النمل " الآية 19

أولا الشكر لله عز وجل اللهم لك الحمد والشكر عدد ذرات الكون في السماوات والأرض وما بينهما وما وراء ذلك، بعدد ما سبح الملائكة الحافين حول عرشك الكريم وبعدد ما سبح من شيء إلا يسبح بحمدك ولا نفقة تسبيحهم، سبحانك اللهم وبحمدك، سبحانك رب العرش العظيم، والحمد لله رب العالمين.

كذلك جزيل الشكر للأستاذ الفاضل الدكتور زين علي على جهوده القيمة واشرافه السديد.

كما نعرب عن امتناننا لجميع أعضاء لجنة المناقشة اللدين وافقوا على قراءة اعمالنا والحكم عليها

وكما نتقدم بالشكر أيضا الى كل الزملاء في هذه الدفعة وكل من ساهم من قريب او بعيد في انجاز هذا العمل.

نافع، عبد السميع

جدول المحتويات

جدول المحتويات I

قائمة الجداول IV

قائمة الاشكال V

قائمة الرموز والاختصارات VII

مقدمة ..... أ

الفصل I التجفيف الشمسي 3

I تمهيد 2

1.I تعريف التجفيف 2

2.I مبدأ عمل التجفيف 2

3.I.أنواع المجففات الشمسية على حسب طريقة تسخين الهواء 3

1.3.I. مجففات شمسية مباشرة: 3

1.1.3.I إيجابيات وسلبيات المجففات الشمسية المباشرة : 3

2.3.I. مجففات شمسية غير مباشرة: 4

1.2.3.I إيجابيات و سلبيات المجففات الشمسية الغير مباشرة 5

3.3.I مجففات شمسية متعددة الأنظمة (مختلط): 5

4.3.I مجففات شمسية هجينة : 6

1.4.3.I إيجابيات وسلبيات المجففات الشمسية الهجينة 6

4.I. التجفيف الشمسي في الجزائر 7

5.I خلاصة: 9

الفصل II التخزين الحراري والعتاد التجريبي 10

1.II تمهيد 11

2.II. التخزين الحراري 12

1.2.II. لمحة عن التخزين الحراري 12

3.II. انواع التخزين الحراري 14

1.3.II. التخزين الحسي.....14
2.3.II تخزين الحرارة الكامنة.....15
3.3.II التخزين الكيميائي الحراري.....16
4.II. المواد ثنائية الطور 17
1.4.II تعريف المواد ثنائية الطور.....17
2.4.II. معايير اختيارها 18
5.II. مميزات المواد ثنائية الطور:..... 19
1.5.II. الخواص الحرارية.....19
2.5.II الخواص الفيزيائية.....19
3.5.II الخواص الكيميائية.....19
4.5.II. الخواص الاقتصادية.....20
6.II. عيوب مواد ثنائية الطور 20
7.II أنواع المواد ثنائية الطور 20
8.II العتاد التجريبي..... 22
1.8.II تصميم وبناء نظام تجفيف البيوت الزجاجية الشمسية..... 22
3.II إعداد التجربة، الأجهزة المستخدمة، والظروف البيئية: 26
9.II تجارب التجفيف..... 31
1.9.II محتوى الرطوبة 31
2.9.II نمذجة حركيات التجفيف:..... 31
10.II معامل انتشار الرطوبة أثناء عملية التجفيف 33
11.II طريقة تحضير قوالب الشمع (بارافين) 34
12.II خلاصة 35
الفصل III النتائج والمناقشات..... 36
1.III مقدمة:..... 37
2.III تغير الاشعاع الشمسي على مدار الزمن 37
3.III فعالية وأداء المجفف الشمسي:..... 38
1.3.III تغير درجة الحرارة وسط المجفف بدلالة الزمن 38

2.3.III تغير درجة الحرارة مخرج المجفف بدلالة الزمن..... 39
3.3.III تغير درجة الحرارة عنصر ماص بدلالة الزمن..... 40
4.III حركية التجفيف: 41
1.4.III المحتوى الرطوبي بدلالة الزمن 41
5.III منحنى الحرارة ثنائية الطور 42
6.III خلاصة الفصل: 43
خاتمة 45
قائمة المراجع..... 47

قائمة الجداول

الرقم	الجدول	الصفحة
01	مزايا وعيوب أنواع تغير الطور	**18**
02	الخصائص الجغرافية والمناخية، ومعلمات التجربة	**27**
03	الأجهزة المستخدمة وأخطائها	**30**
04	النماذج الرياضية للتجفيف في الطبقات الرقيقة	**31**

قائمة الاشكال

الرقم	الشكل	الصفحة
01	المجفف الشمسي المباشر	4
02	المجفف الشمسي غير المباشر	5
03	المجفف الشمسي الهجين	7
04	أوضاع التخزين الحراري المختلفة وفقا لدرجات حرارتها	13
05	التحولات المختلفة الموجودة	15
06	معايير اختيار المواد ثنائية الطور	18
07	نطاق المحتوى الحراري للانصهار ودرجة حرارة الانصهار لمواد ثنائية الطور الشائعة	21
08	خطوات تصنيع المجفف الشمسي الجديد	24
09	تصميم مجفف الدفيئة الجديد: أ) مخطط ثلاثي الأبعاد، ب) مخطط مقطعي، ج) صورة للمجفف بعد الإنشاء	25
10	صورة ومخطط توضيحي للمجفف الشمسي التقليدي للمقارنة	25
11	أبعاد المجففين الاثنين	26
12	قوالب الشمع	34
13	قوالب الشمع داخل المجفف	34
14	تغير الاشعاع الشمسي على مدار الزمن	37
15	تغير درجة الحرارة وسط المجفف بدلالة الزمن	38
16	تغير درجة الحرارة مخرج المجفف بدلالة الزمن	39

17	تغير درجة الحرارة عنصر ماص بدلالة الزمن	**40**
18	المحتوى الرطوبي بدلالة الزمن	**41**
19	عينة البصل قبل التجفيف	**41**
20	عينة البصل بعد التجفيف	**41**
21	منحنى الحرارة ثنائية الطور بدلالة الزمن	**42**

قائمة الرموز والاختصارات

الرمز	الوصف
X_C	المحتوى الرطوبي الأولي للبصل على أساس رطب
X_0	الكتلة الأولية للبصل
X_f	الكتلة النهائية للبصل
XR	نسبة الرطوبة
Xt	المحتوى الرطوبي (على أساس جاف) في الزمن t
X_e	المحتوى الرطوبي (على أساس جاف) عند حالة التوازن
X_0	المحتوى الرطوبي (على أساس جاف) عند $t = 0$
D_{eff}	معامل الانتشار الفعال
C_{ac}	التكلفة الاستثمارية السنوية
C_a	التكلفة السنوية للمجفف
C_m	تكلفة الصيانة السنوية
V_a	القيمة السنوية المتبقية
F_s	معامل تمويل القيمة المتبقية
M_y	الكمية المجففة سنوياً
M_d	الكمية المجففة لكل دفعة
D	عدد الأيام المشمسة في السنة
D_d	عدد الأيام لكل دفعة
C_s	تكلفة التجفيف لكل كيلوغرام من المنتج المجفف
C_{re}	تكلفة الكهرباء السنوية للمراوح
C_{ds}	تكلفة كيلوغرام واحد من المنتج المجفف
C_{dp}	تكلفة المنتج الطازج
C_s	التوفير لكل كيلوغرام من المنتج المجفف
S_{kg}	التوفير لكل دفعة
S_b	التوفير اليومي
S_d	التوفير السنوي
S_j	فترة الاسترداد
N	زمن استرداد الطاقة
EPBT	الطاقة المضمنة
E_{in}	الطاقة المنتجة سنوياً
E_{out}	المجفف التقليدي ذو البيت الزجاجي
CGHD	المجفف الجديد ذو البيت الزجاجي
PCM	مادة تغيير الطور

مقدمة

يتعرض عالمنا اليوم إلى أزمة اقتصادية مستمرة نتيجة لارتفاع أسعار الطاقة وزيادة الطلب عليها وذلك لارتباطها بالوقود الأحفوري أو التقليدي (النفط والغاز والفحم أضف إلى ذلك ما يتعرض له كوكب الأرض من تلوث بيني نتيجة لانبعاث غاز ثاني أكسيد الكربون والغازات الأخرى والتي أدت إلى الاحتباس الحراري وقد أدى هذا الاحتراز إلى ذوبان القمم الجليدية القطبية والاحتراق المحيطات ، مما أدى إلى ارتفاع مستوى سطح البحر بما يقارب 15 سم في نفس الوقت . [1]

ومن أهم الاستغلاليات لطاقة الشمسية هي عملية التجفيف، هي أحد طرق الحفظ المستعملة في المحاصيل الزراعية و من بين طرق الأخرى الحفظ بالتبريد و المعالجة الوراثية، لكن هذه التقنيات تتطلب تكلفة باهظة وتقنيات عالية، و المعالجة الوراثية بالعديد من الأمراض. أما فيما يخص التبريد فيتميز بإستهلاكه للطاقة هذا ما ينعكس على تكلفة الكلية للمحصول.

الإنتاج على نطاق واسع يحد من الاستخدام للطريقة التقليدية للتجفيف، تعاني هذه الطريقة من التجفيف للعديد من المشاكل من بينها عدم القدرة على التحكم في عملية التجفيف بشكل صحيح، وعدم اليقين من وقت التجفيف، وارتفاع تكلفة اليد العاملة، الحاجة إلى مناطق واسعة والعدوى من الحشرات وغيرها. [2]

في هذا الإطار، يأتي هذا البحث ليسهم في سد الفجوة المعرفية والعملية في مجال تطوير أنظمة التجفيف الشمسي المدمجة مع تقنيات التخزين الحراري. من خلال الجمع بين التحليل النظري العميق والدراسة التطبيقية، يسعى البحث إلى تقديم إطار متكامل يمكن البناء عليه لتطوير حلول تقنية تلبي الاحتياجات المحلية مع مراعاة الخصائص المناخية والاقتصادية للمنطقة. على الرغم من المزايا العديدة للتجفيف الشمسي، إلا أن هناك تحديات تواجه كفاءة هذه العملية، خاصة في ظل التقلبات الجوية وعدم استقرار الإشعاع الشمسي. ومن هنا تظهر الحاجة إلى تطوير أنظمة

تجفيف متقدمة قادرة على تخزين الطاقة الحرارية لاستخدامها خلال فترات انخفاض الإشعاع، مما يعزز كفاءة العملية ويضمن استمراريتها

تشهد السنوات الأخيرة تطورات متسارعة في مجال مواد تغيير الطور (PCMs) التي تتيح فرصًا واعدة لتحسين أداء أنظمة التجفيف الشمسي.

تهدف درستنا الى تحسين مجفف شمسي باستعمال مواد ثنائية الطور (الشمع (بارافين)) حيث أجريت التجارب في وحدة تطوير الطاقات المتجددة الوادي 19/18 ماي 2025 تنقسم هذه المذكرة الى أربعة فصول:

الفصل الأول يتطرق الى تعريف التجفيف ومبدأ عمله وأنواع المجففات الشمسية

الفصل الثاني: مفهوم التخزين الحراري وانواعه، مع تقديم مواد ثنائية الطور

الفصل الثالث تضمن تصميم مجفف شمسي مع مواد ثنائية الطور – الشمع (بارافين)

الفصل الرابع: دراسة نتائج ومناقشات

الفصل I

التجفيف الشمسي

I تمهيد

يتطرق هذا الفصـــل الدراســـة حول عملية التجفيف من خلال تعريف التجفيف ومكونات المجفف و مبدأ عمل المجفف و أنواعه و مراحل عملية التجفيف و كذلك شـــكل توزيع الماء داخل المنتجات و كذلك العوامل المأثرة في سرعة التجفيف

1.I تعريف التجفيف

التحفيف هو عملية داخلية الهدف منها نزع السـائل المتشـرب من طرف جسـم صـلب أو سـائل (غالبا ما يكون الماء) كليا أو جزئيا، في هذه العملية نلاحظ نوعين من الظواهر الانتقال الكتلي (الســـائل الموجود داخل المادة الصلبة يتحول إلى بخار والانتقال الحراري (كمية الحرارة تسمح بانتقال السائل إلى غاز)

2.I مبدأ عمل التجفيف

يشـــتمل التجفيف على مجموعة من العمليات الفنية التي تهدف إلى التخلص من الماء الحر الموجود في المادة الغذائية بشـكل تام و بالتالي إزالة الماء اللازم لنمو الأحياء الدقيقة و الإنزيمات المسـئولة عن تلف الغداء، ومن ميزاته تركيز المادة الغذائية ضـمن وحدة الوزن مما يسـهل نقلها و تخزينها وتعبئتها, وتوفيرها في غير موسمها . و من ميزات الطريقة أيضا عدم الحاجة إلى استخدام مواد حافظة للتثبيت فيها.

و يمكن تجفيف الغذاء في المجفف الشمسي المباشر او الغير المباشر او باستخدام فرن عادي.

حيث تعمل آلية المجفف الشـمســي على إدخال الهواء ضـمن المجرى بتدفق مقدر فبمرور الهواء ضـمن مدخنة سحب الهواء يتلامس بشكل مباشر مع سطح الماص الساخن الخاص باللواقط الشمسية, و يقوم بسحب الحرارة منها أي يقوم بدور الوسيط الحراري لامتصاص الحرارة الشمسية وهو الوسيط الحراري نفسه للتجفيف حيث يمرر من خلال المادة المجففة بشـكل منتظم و متسـاوي في المقطع العرضـي و الطولي للمنتج المراد تجفيفه المعلق بشكل عمودي على المناشير و يمرر هنا الهواء بالقسم العلوي من المجفف,

ثم حول المادة المجففة في القسم السفلي للتجفيف ليقوم بعملية التجفيف المطلوبة حيث تحدث ظاهرتين فيزيائيتين وهما :

- **الانتقال الحراري:** وهي كمية الحرارة المتبادلة بين الهواء و المنتج المراد تجفيف حيث يقوم الهواء الساخن برفع درجة حرارة المنتج
- **الانتقال الكتلي:** وهي كمية بخار الماء المنتقل من المنتج إلى هواء التجفيف.

عندما يصبح الهواء مشبعا بالرطوبة بخر الماء, يتم طرد قسم منه إلى الخارج بواسطة مدخنة طرد, مما يؤدي إلى خفض الضغط داخل في المجفف, و بالتالي سيدخل هواء جديد بديل من مدخنة السحب للهواء المستخدم والمجهزة أيضا لضبط الهواء الجديد ليتم دفعه من جديد ليتلامس مباشرة مع السطح الماص مرة أخرى وهكذا حتى يتم تجفيف المنتج بالكامل. [3]

I.3. أنواع المجففات الشمسية على حسب طريقة تسخين الهواء

يمكن تصنيف المجففات الشمسية على حسب طريقة تسخين الهواء إلى:

I.3.1. مجففات شمسية مباشرة:

المجفف الشمسي المباشر ذو تجهيز بسيط وسهل، يتكون من جزء واحد يلعب دور مجمع الأشعة الشمسية وفي نفس الوقت غرفة تحفيف، مغطى من أعلى بطبقة من الزجاج تسمح بمرور الأشعة الشمسية ومن الأسفل بصفيحة معدنية (غالبا ما تكون من الألمنيوم مطلية بالأسود).

I.3.1.1 إيجابيات وسلبيات المجففات الشمسية المباشرة :

للمجففات الشمسية المباشرة عدة مزايا مقارنة بالمجففات التقليدية من ناحية النوعية والمجففات الصناعية من ناحية الطاقة المستخدمة:

- قصر مدة التجفيف مقارنه بالتجفيف التقليدي.
- حماية جيدة للمنتج ضد الغبار، الحشرات الحيوانات و المطر مقارنة بالتحفيف التقليدي.
- سهل التركيب وغير مكلف كثيرا.

ولكن للمجففات الشمسية المباشرة سلبيات تضر بنوعية المنتج وسلبيات أخرى نذكر منها :

- انخفاض النوعية وتغير في اللون بسبب تعرض المنتج مباشرة لأشعة الشمس، مما يتلف الفيتامينات خاصة A و C.
- سهولة كسر الزجاج وهذا ما يحتم تبديله كلما اقتضى الأمر.
- حرارة عالية مما يضر بالقيمة الغذائية للمنتج.

الشكل 1.I: المجفف الشمسي المباشر (دراسة الكفاءة الطاقوية للمجفف الشمسي)

2.3.I. مجففات شمسية غير مباشرة:

هذا النوع من المجففات يتكون من جزئيين مجمع الأشعة الشمسية مغطى بطبقة من أعلى بالزجاج، ومن الأسفل بصفيحة معدنية (غالبا ما تكون من الألمنيوم) مطلية بالأسود، تسمح بتزويد غرفة التجفيف التي يحتوي بداخلها المنتج بالحرارة اللازمة للتحفيف.

1.2.3.I إيجابيات و سلبيات المجففات الشمسية الغير مباشرة

للمجففات الشمسية الغير مباشرة مزايا مقارنة بالمجففات الشمسية المباشرة منها:

- المنتج غير معرض مباشرة لأشعة الشمس مما يحافظ على اللون والقيمة الغذائية.
- تسييره لا يتطلب أي مصدر آخر للطاقة (طاقة كهربائية، فحم، وقود.....)

ولكن لهذا النوع عدة سلبيات من ناحية التركيب وسير عملية التجفيف نذكر منها: [4]

- تكلفة التركيب والإنشاء باهظة.
- سرعة التجفيف متغيرة حسب أحوال الجو من غيوم، مطر ورياح ... الخ .
- كذلك مثل المجفف الشمسي المباشر ضعف مقاومة الزجاج وهذا ما يحتم تبديله دوريا.

الشكل 2.I: المجفف الشمسي غير المباشر (دراسة الكفاءة الطاقوية للمجفف الشمسي)

3.3.I مجففات شمسية متعددة الأنظمة (مختلط):

هذا التركيب عبارة مجفف مباشر وغير مباشر في نفس الوقت، فالهواء يسخن بواسطة المجمع الشمسي وعندما يدخل غرفة التجفيف يزداد ســـخونة، فهو يمكن أن يزيد في درجة الهواء بالنســـبة للمجفف الغير

مباشر ولكنه له نفس السلبيات كالمجفف المباشر لتحرض المنتج الإشعاعات الشمسية المباشرة التي توثر على القيمة الغذائية.

4.3.I مجففات شمسية هجينة :

في هذا النوع من المجففات يتدخل مصدر ثانوي للطاقة إما طاقة كهربائية أو طاقة احتراق الفحم أو الغاز وهذا لغرضين مختلفين:

- الطاقة الثانوية تســـتعمل للحفاظ على حرارة ثابتة داخل غرفة التجفيف ، فيكون هنا تدخل الطاقة الثانوية لإكمال الفارق والوصول إلى الدرجة المثلى للتجفيف.
- الطاقة الثانوية تستعمل لتحريك الهواء في مجففات الحمل القسري، وتبقى الطاقة الشمسية مصدر أساسي ووحيد التسخين الهواء.

1.4.3.Iإيجابيات وسلبيات المجففات الشمسية الهجينة

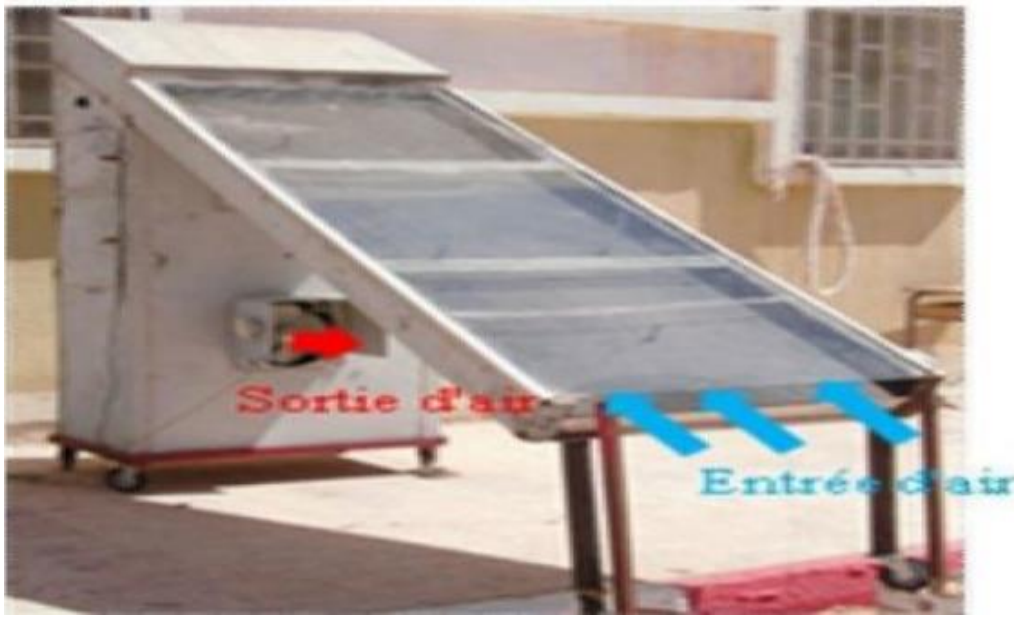
لهذا النوع من المجففات العديد من المزايا مقارنة بالمجففات الشمسية والمجففات الصناعية نذكر منها:

- التحكم جيد في درجة الحرارة وسرعة التجفيف داخل المجفف والتحرر من التبعية للعوامل المناخية المتبدلة.
- إنتاج مرتفع بالنسبة للمجففات السابقة، وإمكانية التجفيف ليلا والفصول الممطرة حسب الحاجة.
- استهلاك طاقة منخفضة مقارنة بالمجففات الصناعية.

ولكن مثل المجففات الأخرى له بضعة سلبيات في التركيب والتسيير لا في المردود الطاقوي منها:

- تكلفة التركيب والإنشاء جد باهظة مقارنة بالمجففات السابقة.
- ضـــرورة قربها من الشـــبكة الكهربائية أو تخزين الطاقة الثانوية كالغاز والوقود وهذا ما يزيد من التكلفة الباهظة.

- يد عاملة مؤهلة للتسيير والصيانة.



الشكل 3.I: المجفف الشمسي الهجين (دراسة الكفاءة الطاقوية للمجفف الشمسي)

4.I. التجفيف الشمسي في الجزائر

تتنوع المنتجات التي يمكن تجفيفها باستخدام الطاقة الشمسية في الجزائر، وتشمل الفواكه والخضروات والأعشـــاب الطبية والعطرية. تُعد التمور من أهم المنتجات الزراعية في الجزائر التي يتم تجفيفها شـمسـياً. وتشـتهر الجزائر بشـكل خاص بتمور دقلة نور عالية الجودة، والتي يتم اسـتخدام تقنيات التجفيف الشـمسـي غير المباشـر لتحسـين جودتها. وتُعتبر دقلة نور من أكثر أنواع التمور شـيوعًا في منطقة شمال إفريقيا، وتتميز بلونها العنبري وطعمها الحلو الذي يشبه المكسرات والكراميل. بالإضـافة إلى التمور، من المحتمل أن يتم تجفيف فواكه أخرى مثل المشـمش والتين والعنب باسـتخدام الطاقة الشـمسـية في الجزائر. ويُعد تجفيف التين بالطرق الشـمسـية تقليدًا شـائعًا للحفاظ عليه وإطالة عمره الافتراضي. [5]

تشمل الخضروات التي يمكن تجفيفها شمسياً في الجزائر الطماطم والفلفل والبقوليات. وقد أظهرت الدراسات أن التجفيف الشمسي الحراري يمكن أن يحافظ على الخصائص الفيزيائية والكيميائية للفلفل الحار الذي يتم حصاده في الجزائر. كما تم استخدام التجفيف الشمسي لتجفيف رقائق الطماطم والفول العريض وبالإضافة إلى ذلك، يمكن تجفيف أوراق السبانخ شمسياً باستخدام مجففات شمسية حرارية. [6]

يُعد التجفيف الشمسي طريقة مهمة للحفاظ على الأعشاب الطبية والعطرية في الجزائر. وقد حقق الباحثون في الجزائر في تجفيف العديد من الأعشاب مثل الحناء وأوراق النعناع باستخدام الطاقة الشمسية. كما تم تجفيف نبات المورينغا والنعناع بنجاح باستخدام مجففات شمسية مباشرة وغير مباشرة مصنوعة من الطين كمادة جديدة ومنخفضة التكلفة. وتشير الدراسات إلى أن التجفيف الشمسي للنباتات الطبية يجب أن يتم في درجات حرارة لا تتجاوز 50 درجة مئوية للحفاظ على خصائصها الطبية .

5.I خلاصة:

في ختام هذا الفصـــل، يتبيّن أن عملية التجفيف تُعد من أهم الوســـائل التقنية للحفاظ على جودة المنتجات الزراعية والغذائية، خاصـة في الدول ذات المناخ المشـمس مثل الجزائر. وقد تناول الفصـل المفاهيم الأسـاسـية للتجفيف، ومكوناته، وآلية عمله، إلى جانب اسـتعراض تفصـيلي لأنواع المجففات الشـمسـية ومزاياها وعيوبها. كما تطرق إلى مراحل عملية التجفيف والعوامل المؤثرة فيها، مما يعكس أهمية التحكم الدقيق في ظروف التجفيف لتحقيق أفضـل النتائج. ويبرز التجفيف الشـمســي كخيار فعّال واقتصـادي ومسـتدام، خاصـة في الجزائر التي تملك إمكانيات كبيرة لاسـتثماره، لا سـيما في تجفيف منتجات مثل التمور التي تُعد ثروة وطنية.

الفصل II

التخزين الحراري والعتاد التجريبي

1.II تمهيد

السباق العالمي على الطاقة كبير جدا بسبب الطلب العالمي على الطاقة إلى جانب وجود استعداد لخفض انبعاث غازات الدفيئة.

الفترة الحالية هي فترة انتقالية للطاقة تتمحور حول تنويع مصـــادر الطاقة، حيث توفر الطاقة واســـتقرار الشبكات هي شرط لا غنى عنه لميزان النظام الكهربائي. أي بصيغة أخرى مفهوم المرونة أو الموازنة بين الإنتاج والاستهلاك ضروري أيضا لتغطية الاحتياجات في الوقت الحالي.

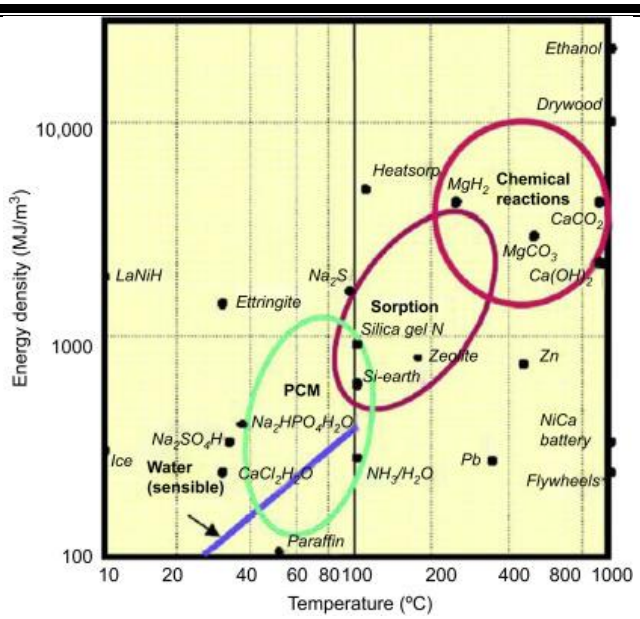
ونظرا إلى الاســـتنزاف الســـريع الموارد الطاقة الأحفورية والطلب الزائد للطاقة، بدأت الكثير من الأبحاث حول العالم توجيه النظر والاهتمام بالطاقات المتجددة وأنظمة تخزين الطاقة. بشـــكل عام، تخزين الطاقة هو وضـع الطاقة في مكان محدد خلال فترات الوفرة بالزيادة أو الأقل تكلفة (طاقة الشمس ومعدلات الليل ...) لاســـتخدامها لفترة الطلب أو أكثر تكلفة، وإذا تكلمنا عن تخزين الطاقة عموما، فانه يمكن تخزين الطاقة بأشـــكال مختلفة أهمها: تخزين على شـــكل طاقة ميكانيكية، طاقة كيميائية، طاقة كهربائية وطاقة حرارية.

2.II. التخزين الحراري

1.2.II. لمحة عن التخزين الحراري

يستخدم التخزين الحراري حاليا في مجموعة متنوعة من التطبيقات مثل محطات الطاقة الشمسية الحرارية ومحطات الطاقة الشمسية المركزة والتطبيقات الحرارية الشمسية ذات درجات الحرارة المنخفضة مثل التجفيف. التخزين الحراري موجود جدا في التطبيقات التي تستخدم الطاقة الشمسية كمصدر للحرارة. وبالتالي يتم استخدام تخزين الحرارة للتعويض عن الطبيعة المتقطعة لهذا المصدر من أجل الحد من ذروة الاستهلاك، ولكن أيضا للاستفادة من مراحل الإنتاج الزائد. يعد عالم الصناعة أيضا مرشحا مهما في مجال التخزين الحراري، لا سيما لاستعادة ما يسمى بالطاقة المهدرة (الطاقة من النفايات الصناعية) ، والتي يمكن إعادة استخدامها في عمليات الدفعات أو نقلها لتطبيقات أخرى. في الواقع، هناك مصدر كبير للحرارة المهدرة في العالم، والذي للأسف لا يزال غير مستغل بشكل كاف.

هناك طرق مختلفة لتخزين الطاقة على شكل حرارة. يتم تصنيفها بشكل عام إلى مجموعات مختلفة التخزين بالحرارة المعقولة أو الحرارة الكامنة أو الامتصاص أو التفاعلات الكيميائية الحرارية. وترد أوضاع التخزين المختلفة هذه في الشكل 4 وفقا لدرجات حرارة تطبيقها وكمية الطاقة المخزنة لكل وحدة حجم. يمكن ملاحظة أن كل طريقة تتوافق مع مجموعة من درجات حرارة التطبيق وأن كثافة الطاقة لكل محلول ترتبط خطيا عالميا بدرجة الحرارة هذه.



الشكل *4.II*: أوضاع التخزين الحراري المختلفة وفقا لدرجات حرارتها

إن مفهوم تخزين الحرارة هو توفير المرونة وتعزيز موثوقية أنظمة الطاقة. يتعلق الأمر بموازنة إنتاج الطاقة مع الطلب عليها. هناك العديد من تقنيات تخزين الحرارة بأشـــكال مختلفة مثل الطاقة الميكانيكية والطاقة الكهربائية والطاقة الحرارية. يمكن تخزين الطاقة الحرارية في الســـوائل أو المواد الصـــلبة بثلاث أنواع:

- كامنة
- محسوسة
- كيميائية حرارية

يمكن تصنيف أنظمة تخزين الحرارة بالطرق المذكورة أعلاه إلى أنظمة نشطة أو سلبية. تتضمن الأنظمة النشطة آليات للتحكم في شحن وتفريغ الحرارة. تعمل الأنظمة السلبية بدون مكونات ميكانيكية. المعلمات المهمة لنظام التخزين هي:

- مدة التخزين

- كثافة الطاقة (أو الطاقة النوعية).
- خصائص الشحن والتفريغ (التخزين والاسترداد).

تحدد كثافة الطاقة حجم نظام التخزين. تظهر الأنواع المختلفة لتخزين الحرارة. تختلف أنواع تخزين الحرارة الحالية حسب التطبيق المستخدم ولكن أيضًا حسب التفاعلات الفيزيائية والكيميائية والحرارية الديناميكية التي تحدث فيها.

3.II. انواع التخزين الحراري

1.3.II. التخزين الحسي

يمكن تحقيق تخزين الطاقة ببساطة عن طريق رفع أو خفض درجة حرارة مادة (صلبة، سائلة، غازية)؛ وهذا ما يُسمى بالتخزين الحسي. يحدث إطلاق الطاقة عند ملامسة المادة لوسط ذي درجة حرارة أقل أو أعلى. تُفضل الأطوار الصلبة أو السائلة لارتفاع كثافة طاقتها نتيجةً لارتفاع سعتها الحرارية (Cp) وكثافتها (p). وبالتالي، عند ثبات الضغط، تُحسب الطاقة المخزنة بواسطة المادة من خلال تغير المحتوى الحراري لها.

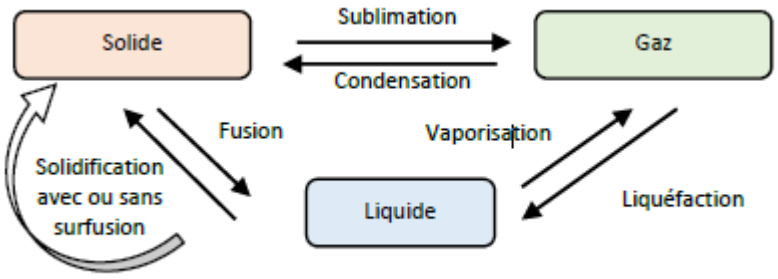
$$H2 - H1 = \int_{T1}^{T2} mCP(T)dT$$

حيث يمثل H2 وH1 المحتوى الحراري للمادة عند درجتي الحرارة T2 وT1، وm كتلة المادة المعنية وCp سعتها الحرارية. تعتمد المعادلة (1) فقط على السعة الحرارية وكتلة المادة المختارة، وبالتالي على الحجم الذي تشغله هذه الكتلة. وبالتالي، يتم الاختيار بين المواد المختلفة وفقًا لمعايير مرتبطة بالكثافة والحرارة النوعية للمواد، حيث يُعطي حاصل ضرب هذين الحدين ما يُسمى كثافة الطاقة لكل كلفن. الخصائص الحرارية الفيزيائية للمواد المختلفة المستخدمة في التخزين الحسي، مُصنفة حسب كثافة الطاقة المتزايدة.

نظرًا لكثافته وحرارته النوعية العالية. يوضـــح هذا الجدول أيضًـــا الحاجة إلى مادة لتخزين الطاقة تتمتع بكثافة وسعة حرارية جيدتين. على سبيل المثال، الحديد، صاحب أعلى كثافة، يحتل المرتبة الخامسة فقط في اختيار المواد نظرًا لانخفاض سعته الحرارية.

2.3.II تخزين الحرارة الكامنة

تتميز الحرارة المحسـوسـة بقدرتها على تخزين سـائل نقل الحرارة مباشـرةً بحجم كبير. أما لتخزين الحرارة المحسوسة بشكل غير مباشر، فيتطلب الأمر تدرجًا حراريًا قويًا. أحد الحلول لتوفير المساحة وتقليل نطاق درجة حرارة التخزين هو استخدام الحرارة الكامنة. تُخزن الحرارة في نطاق درجة حرارة يقارب نقطة انصهار أو تبخر مادة تُسـمى مادة تغيير الطور (PCM). كلما صـغر نطاق درجة الحرارة، زادت الطاقة المخزنة بتغير الحالة. يكون التخزين فعالًا بشـرط أن تتغير حالة المادة بأكملها. تشـير الدراسـات إلى أن أنظمة تخزين الحرارة الكامنة واســـعة النطاق وعالية الحرارة غير موجودة أو معدومة. غالبًا ما تكون مواد تغيير الطور مواد باهظة الثمن (الجدول II.2) وغير متوفرة على نطاق واســـع. لذا، نظرًا لقلة الكمية المطلوبة لحماية المُســتقبِل، يُعد تخزين الحرارة الكامنة مفيدًا في حالتنا. يوضـــح الشـــكل II.3 التحولات المختلفة الموجودة. يحدث كل تحويل عند درجة حرارة ثابتة.



الشكل *II.5*: التحولات المختلفة الموجودة

هناك أنواع مختلفة من مواد تغيير الطور ودرجات الحرارة لجميع التطبيقات. تُعبَّر الطاقة اللازمة لتحويل الحالة كما يلي:

$$\mathbf{E}\,\text{transformation (à } \mathbf{T} = \text{T transformation)} = \mathbf{m} \times \mathbf{\Delta h}\text{transformation}$$

مع Δh، يكون المحتوى الحراري النوعي لتغير الحالة أكبر بحوالي 100 مرة من السعة الحرارية المستخدمة في التخزين الحسي. بمعنى آخر، يُمكّن تغير الحالة من تجنب ارتفاع درجة الحرارة بمقدار 100 درجة مئوية أو الاستفادة من كتلة أقل بمقدار 100 مرة. وبالتالي، يُمكننا فهم أهمية مواد تغيير الطور للحماية الحرارية لمستقبل الطاقة الشمسية، يجمع متوسط الخصائص الحرارية الفيزيائية للفئات الرئيسية لمواد تغيير الطور. من الممكن استخدام معدن، أو صخر، أو ماء، أو بارافينات، أو مواد تُصنف على أنها عضوية (مصنوعة من كائنات حية) أو غير عضوية.

نجد بانتظام العامل 100 بين Cp والحرارة الكامنة (هنا الانصهار). بالنظر إلى العمود الأخير، ودون التطرق إلى درجة حرارة الانصهار، نلاحظ أن المواد العضوية وغير العضوية والبارافينات تُعدّ خيارات جيدة من حيث الكتلة اللازمة لتخزين نفس كمية الطاقة. قبل أن نحدد بدقة أي مادة ثنائية الطور سنستخدمها لحماية جهاز الاستقبال، دعونا نتعرف على استراتيجية التطوير التي يجب اتباعها.

3.3.II التخزين الكيميائي الحراري

يعتمد التخزين الكيميائي الحراري على ظاهرة فيزيائية كيميائية عكسية. تعتمد طريقة التخزين هذه على استخدام الامتصاص الكيميائي بين الغاز والجسم الصلب، أو الامتصاص أو الامتزاز الفيزيائي للغاز بواسطة سائل أو جسم صلب. يمكن وصف آلية عملية التخزين الحراري بالامتصاص أو بالوسائل الكيميائية الحرارية بالمعادلة:

$$AB + dH \leftrightarrow A + B$$

خلال هذه العملية، تُفكك الحرارة المُزودة لزوج الامتصـاص AB عن طريق امتصـاص الحرارة، مما يُنتج مركبين A وB يُمكن تخزينهما بشـكل منفصـل: هذه هي الظاهرة الماصـة للحرارة. عند تلامس هذين الناتجين، تحدث الظاهرة الطاردة للحرارة لتكوين المركب AB مرة أخرى عن طريق إطلاق الحرارة.

4.II. المواد ثنائية الطور

1.4.II تعريف المواد ثنائية الطور

مادة تغيير الطور هي أي مادة قادرة على تغيير حالتها الفيزيائية ضـمن نطاق ضـيق من درجات الحرارة، يتراوح تقريبًا بين 10 و80 درجة. وفي هذا النطاق، يكون التغير الطوري السائد هو الانصـهار/التصـلب. هذه الدرجات الحرارية متوفرة بشكل طبيعي، وهي شائعة في حياتنا اليومية (درجة حرارة الغرفة في المنزل، درجة حرارة جسم الإنسان، درجة حرارة الماء الساخن المنزلي، إلخ).

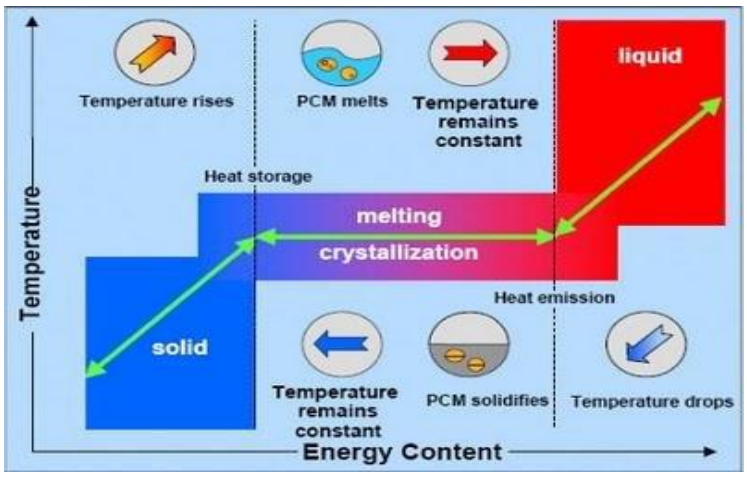
تتميز مواد تغيير الطور بقدرتها الفريدة على تخزين الطاقة على شـكل حرارة كامنة. ويمكن تحقيق تخزين الحرارة الكامنة لمواد تغيير الطور من خلال تغيرات الطور: صـلب–صـلب، صـلب–سـائل، صـلب–غاز، وسائل–غاز. ومع ذلك، فإن تغير الطور الوحيد المستخدم في مواد تغيير الطور هو تغير الطور: صلب–سـائل. لا يُعد تغير الطور: سـائل–غاز عمليًا للاسـتخدام في التخزين الحراري نظرًا لكبر حجمه أو ضـغوطه اللازمة لتخزين المواد في حالتها الغازية. تتميز انتقالات السـائل–الغاز بحرارة تحول أعلى من انتقالات الصـلب–السـائل. وعادةً ما تكون تغيرات الطور: صـلب–صـلب بطيئة جدًا ودرجة حرارة تحولها منخفضة نسبيًا. يلخص الجدول التالي مزايا وعيوب أنواع تغير الطور.

جدول رقم 01: مزايا وعيوب أنواع تغير الطور

تغير الطور	المميزات	العيوب
سائل/غاز	ارتفاع قيمة الحرارة الكامنة	تغير كبير في الحجم
صلب/صلب	تغيير الحجم المنخفض لا يوجد تكوين للسوائل.	قيمة الحرارة الكامنة منخفضة.
صلب/سائل	تغيير الحجم المنخفض	القيمة المتوسطة للحرارة الكامنة.
صلب/غازي	ارتفاع قيمة الحرارة الكامنة	تغير كبير في الحجم

II.4.2. معايير اختيارها

تستخدم مواد تغيير الطور الحرارة الكامنة لتغير الطور للتحكم في درجة الحرارة ضمن نطاق محدد. عندما تتجاوز درجة الحرارة نقطة معينة، تبدأ الروابط الكيميائية في المادة بالانهيار وتمتص المادة الحرارة في عملية ماصة للحرارة حيث تتحول من الحالة الصلبة إلى الحالة السائلة. مع انخفاض درجة الحرارة، تطلق المادة الطاقة وتعود إلى الحالة الصلبة



الشكل *II.6*: معايير اختيار المواد ثنائية الطور

II.5. مميزات المواد ثنائية الطور:

II.5.1. الخواص الحرارية

- درجة حرارة مناسبة لتغير الطور
- سعة حرارية نوعية عالية
- حرارة كامنة عالية أثناء تغير الطور
- موصلية حرارية عالية في الطورين السائل والصلب

II.5.2 الخواص الفيزيائية

- كثافة عالية
- تأثير تبريد فرعي مهمل
- ضغط بخار منخفض
- تغير حجمي صغير
- معدل تبلور كافٍ

II.5.3 الخواص الكيميائية

- ثبات كيميائي ممتد
- توافق مع مواد العبوات
- غير سام، غير قابل للاشتعال، وغير قابل للانفجار
- لا يوجد فصل طوري

4.5.II. الخواص الاقتصادية

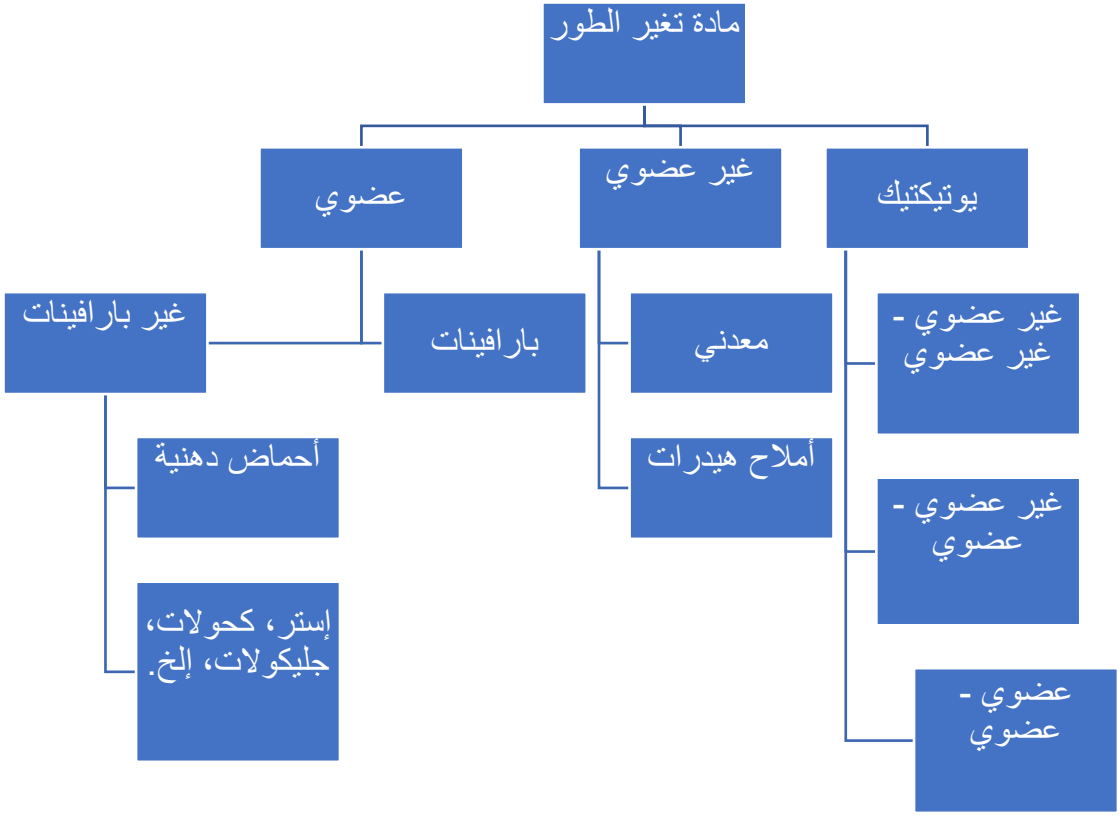
- متوفرة
- تكلفة منخفضة

6.II. عيوب مواد ثنائية الطور

- موصلية حرارية منخفضة، خاصة في الحالة الصلبة.
- احتمال تدهور الخصائص الحرارية بعد عدد كبير من دورات الانصهار والتجمد.
- إمكانية حدوث فصل طوري أو تغير في التركيب بمرور الوقت.
- بعض المواد قد تكون مكلفة أو غير متوفرة بكميات كبيرة.
- الحاجة إلى تقنيات تغليف جيدة لتفادي التسرب أو التفاعل مع العبوة.
- محدودية بعض المواد من حيث الثبات الكيميائي على المدى الطويل.

7.II أنواع المواد ثنائية الطور

في عام 1983 قدم أبهات تصنيفًا للمواد المستخدمة لتخزين الطاقة الحرارية. يوضح (الشكلII.6)هذا التصنيف. يُظهر هذا الشكل أن مواد ثنائية الطور الصلبة–السائلة تنقسم بشكل رئيسي إلى فئتين: مواد عضوية تتكون بشكل رئيسي من الأحماض الدهنية والبارافينات، ومواد غير عضوية تتكون بشكل رئيسي من هيدرات الملح. لكل مجموعة نطاقها الخاص من درجة حرارة الانصهار والحرارة الكامنة، والتي تعتمد على التأثيرات الجزيئية من حيث الرابطة الكيميائية. يوضح (الشكلII.7)نطاق المحتوى الحراري للانصهار ودرجة حرارة الانصهار لمواد ثنائية الطور الشائعة.



الشكل *II.7*: نطاق المحتوى الحراري للانصهار ودرجة حرارة الانصهار لمواد ثنائية الطور الشائعة.

8.II العتاد التجريبي

1.8.II تصميم وبناء نظام تجفيف البيوت الزجاجية الشمسية

صُـــمم مجفف البيوت الزجاجية الجديد ليجمع بين مزايا المجففات غير المباشـــرة (جودة المنتج العالية) ومجففات البيوت الزجاجية (سعة التخزين الكبيرة). وتضمنت عملية البناء الخطوات التالية:

أ- بناء الهيكل:

صُنع هيكل فولاذي لتوفير المتانة والقوة. وتم إمالة الجانب الجنوبي من الهيكل بزوايا مختلفة، بحيث بلغت أقصى زاوية ميل 32 درجة، لتحسين التعرض لأشعة الشمس طوال اليوم. بلغت أبعاد الجزء المائل 1.7 متر × 2.6 متر (الشكل 8 أ).

ب- تركيب غرفة التجفيف:

صُنعت غرفة التجفيف، بأبعاد 2 متر × 1.7 متر × متر واحد، باستخدام ألواح ساندويتش بسمك 4 سم، مما يوفر عزلًا حراريًا ممتازًا ويســـاعد في الحفاظ على الحرارة. ووُضـــعت غرفة التجفيف داخل المجفف لتوجيه الحرارة بفعالية إلى المنتجات (الشكل 8 ب).

ج- ماص المجفف:

يُستخدم السطح الخارجي لغرفة التجفيف، المطلي باللون الأسود لتعزيز امتصاص الإشعاع الشمسي، كممتص. تساهم جميع الجوانب الخارجية في امتصاص الحرارة لضمان تجفيف فعال (الشكل 8ج).

د- تركيب قنوات التهوية:

رُكبت قنوات من الحديد المجلفن بقطر 200 مم لتوجيه الهواء الســـاخن من أعلى المجفف إلى غرفة التجفيف، مما يُحسّن دوران الهواء وأداء التجفيف (الشكل 8ج).

هـ- تركيب الغطاء الشفاف:

يُستخدم لوح من البولي كربونات بسمك 0.6 مم كغطاء شفاف، يسمح بمرور ضوء الشمس مع تقليل فقدان الحرارة. كما يوفر أغطية البولي كربونات، الموضوعة على ارتفاع 30 سم فوق الماص، حماية من العوامل الخارجية (الشكل 8ج، الشكل 9أ).

و- فتحات التهوية:

تقع فتحات التهوية بقطر 200 مم في أسفل المجفف من الجهة الجنوبية، مما يسمح بدخول الهواء البارد، مما يعزز تدفق الهواء ويحسن كفاءة التجفيف (الشكل 8د، الشكل 9أ، 9د).

ز- تركيب الزوايا المعدنية:

ثُبّتت زوايا حديدية على حواف المجفف لتعزيز ثباته الهيكلي وتقليل تسرب الحرارة، مما يضمن بقاء الحرارة داخل النظام (الشكل 8د).

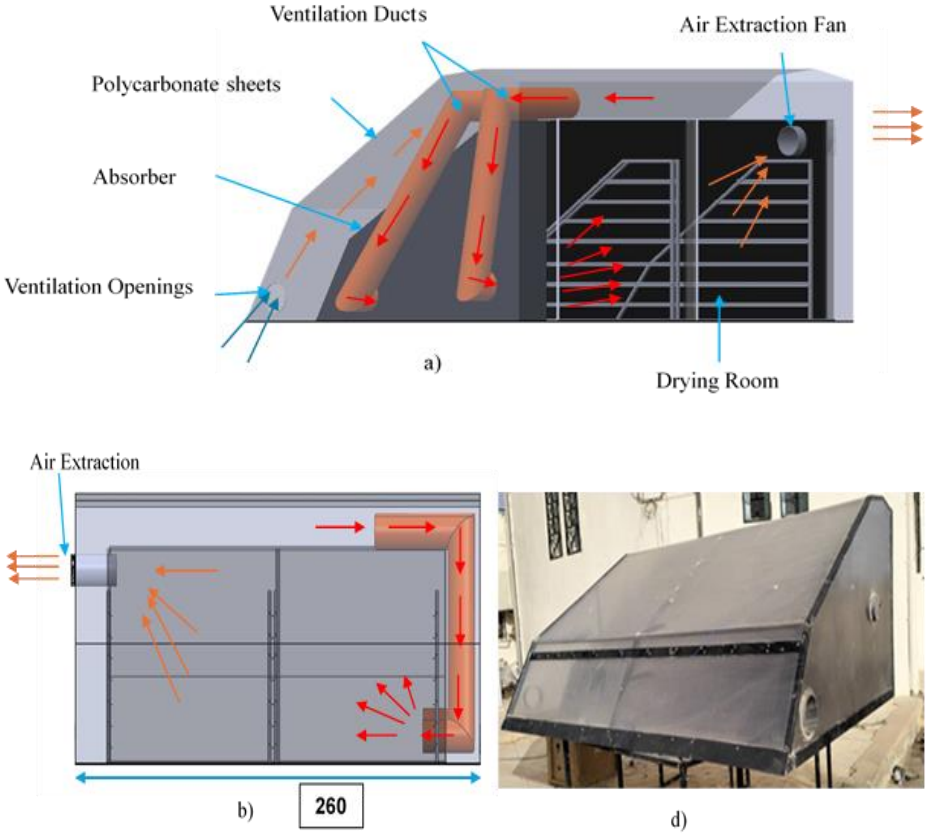
ح- مروحة شفط الهواء:

رُكّبت مروحة تيار مستمر بقدرة 32 واط في غطاء البولي كربونات، متصلة بغرفة التجفيف عبر قناة معدنية بقطر 200 مم. سهّلت هذه المروحة توزيع الهواء الساخن بفعالية، مما عزز تدفق الهواء وقلل من وقت التجفيف (الشكل 8د).

ا) ب) ج)

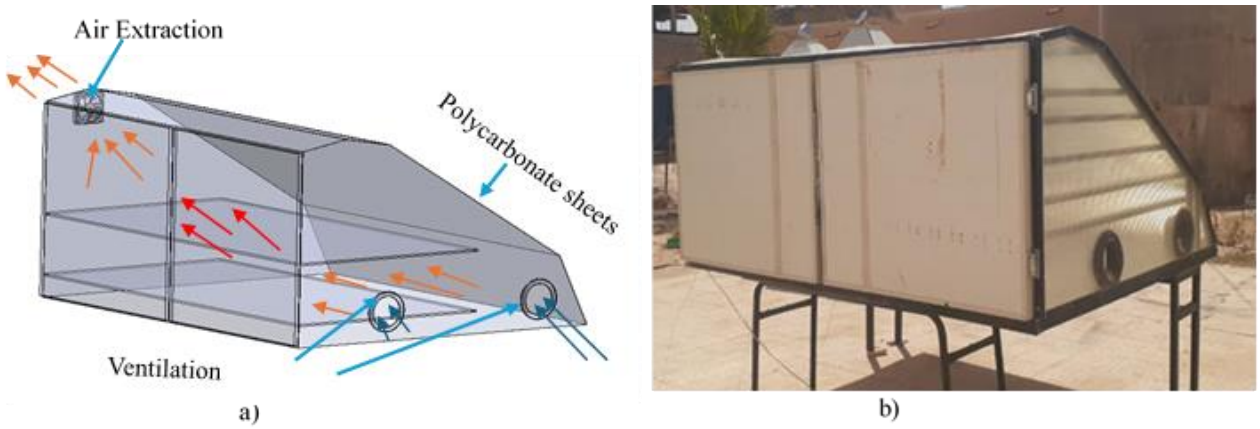
د)

الشكل *8.II*: خطوات تصنيع المجفف الشمسي الجديد

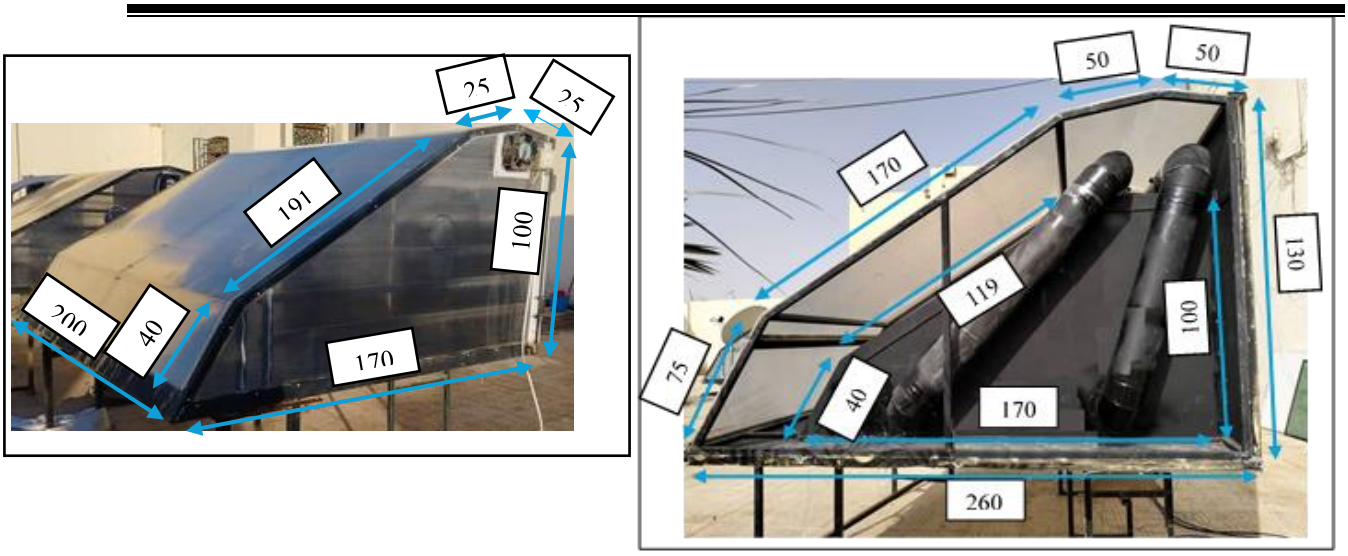


الشكل *9.II*: تصميم مجفف الدفيئة الجديد: a) مخطط ثلاثي الأبعاد، b) مخطط مقطعي، c) صورة للمجفف بعد الإنشاء

لتقييم كفاءة المجفف الجديد، تم مقارنته بمُجفف شمسي تقليدي بنفس الحجم والأبعاد وتحت نفس الظروف البيئية (الشكل 10).



الشكل *10.II*: صورة ومخطط توضيحي للمجفف الشمسي التقليدي للمقارنة



الشكل *11.II*: أبعاد المجففين الاثنين

3.II إعداد التجربة، الأجهزة المستخدمة، والظروف البيئية:

تم إجراء مقارنة أداء المجففين الشمسيين من خلال تجارب نُفذت في الفترة من 18 إلى 19 ماي 2025. وقد تم تشغيل كلا المجففين في وضع الحمل القسري باستخدام مراوح متماثلة لضمان معدل تدفق كتلي ثابت. يوضح الجدول 2 الخصائص الجغرافية والمناخية لموقع التجربة، بالإضافة إلى معلمات التجربة.

جدول رقم 02: الخصائص الجغرافية والمناخية، ومعلمات التجربة

الخصائص الجغرافية والمناخية، ومعلمات التجربة:	القيمة
خط العرض	33^0 23^′ 47^"
خط الطول	6^0 51^′ 43^"
الارتفاع عن مستوى سطح البحر	69 m
المتوسط اليومي السنوي للإشعاع الشمسي الكلي على الأسطح الأفقية	6.25 kWh/m^2
المدة السنوية لساعات سطوع الشمس	3328.17 h
متوسط التغير السنوي في درجة الحرارة يمكن أن يصل إلى	30.23°C
المتوسط السنوي للرطوبة النسبية	48.7%
معدل تدفق الكتلة	0.041 kg/s
كمية البصل في كلا المجففين	24 kg

تم استخدام إعدادين تجريبيين:

- اختبار بدون حمل: تم تشـــغيل المجففين بدون أي حمل طوال اليوم لقياس الأداء الحراري الأساسي.
- اختبار التجفيف: تم تحميل المجففين بالبصل، وتم مراقبة عملية التجفيف حتى الاكتمال.
- تم تسجيل المعلمات الجوية، بما في ذلك الإشعاع الشمسي، درجة الحرارة المحيطة، تدفق الهواء، ودرجات الحرارة داخل حجرة التجفيف، بشكل آلي باستخدام الأجهزة المدرجة في الجدول 3.

- تم اســتخدام ميزان تحليلي لمراقبة كتلة البصــل، وقيم محتوى الرطوبة طوال عملية التجفيف. تم تفصيل مواصفات وأخطاء قياس الأجهزة في الجدول 3.
- الأخطاء التي تحدث أثناء القياسات تؤثر على دقة النتائج. تم قياس جميع المعلمات في اختبارات التجفيف باستخدام الأدوات المناسبة. لتمثيل النتيجة التي تم تحديدها بواسطة x_1, x_2, ..., x_n، نستخدم R، وتمثل W_R عدم اليقين في R. يتم تمثيل عدم اليقين لـــ x_1, x_2, ..., x_n بواسطة w_1, w_2, ..., w_n على التوالي.

يتم تمثيل W_R بواسطة [28, 29]:

$$W_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2\right)^2 + \cdots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n\right)^2\right]^{1/2} \quad (1)$$

الأخطاء التي تم ارتكابها أثناء القياس والمعلمات المحسوبة موصوفة بواسطة:

$$E_R = \left(W_R/R\right) * 100 \quad (2)$$

يتم حساب إجمالي عدم اليقين في القياس كما يلي:

درجة الحرارة:

$$W_T = \left[\left(w_{thermocouple}\right)^2 + \left(w_{connection\ points}\right)^2 + \left(w_{tem\ recorder}\right)^2 + \left(w_{reading}\right)^2\right]^{1/2} = [(0.1)^2 + (0.1)^2 + (0.1)^2 + (0.25)^2]^{1/2} = 0.304 \quad (3)$$

سرعة الهواء:

$$W_V = \left[(w_{anemometer})^2 + \left(w_{reading}\right)^2 + \left(w_{leakage}\right)^2\right]^{1/2} = [(0.1)^2 + (0.1)^2 + (0.1)^2]^{1/2} = 0.173 \quad (4)$$

قياس الإشعاع الشمسي:

$$W_{sr} = \left[\left(w_{pyranometer}\right)^2 + \left(w_{reading}\right)^2\right]^{1/2} = [(0.2)^2 + (0.1)^2]^{1/2} = 0.223 \quad (5)$$

قياس الكتلة (w_im) (تحديد الرطوبة الأولية):

$$W_{im} = \left[(w_{balance})^2 + \left(w_{reading}\right)^2\right]^{1/2} = [(0.001)^2 + (0.1)^2]^{1/2} = 0.1 \quad (6)$$

قياس الكتلة (w_dm) (وزن التجفيف):

$$W_{dm} = \left[(w_{balance})^2 + \left(w_{reading}\right)^2\right]^{1/2} = [(0.01)^2 + (0.1)^2]^{1/2} = 0.1 \quad (7)$$

يمكن أن ينشـــأ إجمالي عدم اليقين في قياس الوقت المرتبط بقيم درجة الحرارة وفقدان الكتلة (wtt) من التذبذبات في مقياس الوقت والأخطاء في القراءة. يمكن حساب هذا عدم اليقين من خلال مراعاة التذبذبات في قياس الوقت لكل من قيم درجة الحرارة وفقدان الكتلة.

$$W_{tm} = \left[(w_{oscillation})^2 + \left(w_{reading}\right)^2\right]^{1/2} = [(0.0003)^2 + (0.1)^2]^{1/2} = 0.1$$

3

يتم حساب إجمالي عدم اليقين في نسبة الرطوبة ومعدل التجفيف للبصل كما يلي:

$$W_{XR} = W_{DR} = [(w_{tm})^2 + (w_{bm})^2 + (w_{im})^2]^{1/2} = [(0.1)^2 + (0.1)^2 + (0.1)^2]^{1/2} = 0.173 \quad (8)$$

جدول رقم 03: الأجهزة المستخدمة وأخطائها

الرقم	اسم الجهاز	الاستخدام	النطاق	إجمالي الخطأ
1	مقياس سرعة الرياح (AM-4207 SD)	سرعة الهواء	30 – 0.4م/ث	0.173
3	مقياس الإشعاع الشمسي (SKS 1110)	الإشعاع الشمسي	5000 – 0واط/م²	0.2
4	مسجل درجة الحرارة (BTM-4208SD + الثيرمومتر)	جمع البيانات	999°C – 50-	0.51
5	الميزان (KERN 220-2)	تحديد الرطوبة	220 – 0جرام	0.224
6	الميزان (KERN 3500-4)	عملية التجفيف	3500 – 0جرام	2.002
7	إجمالي الأخطاء في نسبة الرطوبة ومعدل التجفيف للبصل			0.173

9.II تجارب التجفيف

1.9.II محتوى الرطوبة

تم قياس محتوى الرطوبة عن طريق وضع 4−6 جرام من العينات في فرن عند 105°C لمدة 24 ساعة. بعد ذلك، تم تبريد العينات في جهاز تجفيف لمدة 20 دقيقة قبل وزنها. تم استخدام المعادلة التالية لتحديد كمية الرطوبة التي تم استخراجها من العينة:

$$M_C = \frac{M_0 - M_f}{M_0} * 100 \qquad (9)$$

حيث يمثل M_C محتوى الرطوبة الأولي للبصل على أساس الوزن الرطب (%)، و M_0 يمثل الكتلة الأولية للبصل قبل التجفيف، و M_f هو الكتلة النهائية للبصل بعد التجفيف.

تم وضع ثلاث عينات (واحدة في المجفف الجديد، واحدة في المجفف الشمسي التقليدي، وواحدة في الشمس المفتوحة). لتحديد كمية الرطوبة المتبخرة من العينات الثلاث، تم وزنها على فترات زمنية مختلفة حتى استقرت كتلة كل عينة.

2.9.II نمذجة حركيات التجفيف:

تم استخدام المعادلة التالية لتحديد نسبة الرطوبة (MR) للبصل خلال التجارب:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \qquad (10)$$

جدول رقم 04: النماذج الرياضية للتجفيف في الطبقات الرقيقة

الرقم	النموذج	المعادلة	المرجع
1	نيوتن	MR = exp(−kt)	[9]
2	بايج	MR = exp(−kt^n)	[10]

3	بايج المعدل	MR = exp(−(kt)^n)	[11]
4	هندرسون وبابيس	MR = a exp(−kt)	[12]
5	لوغاريتمي	MR = a exp(−kt) + c	[13]
6	ميدلي−كوكوك	MR = a exp(−kt^n) + bt	[14]
7	تقريب الانتشار	MR = a exp(−kt^n) + (1−a)exp(−kbt)	[15]
8	ذو الحدين	MR = a exp(−k_1 t) + b exp(−k_2 t)	[16]
9	دالة أسية ذات حدين	MR = a exp(−kt) + (1−a) exp(−kat)	[17]

لفهم وتنبؤ حركيات التجفيف، سيتم استخدام النماذج الرياضية للتجفيف في الطبقات الرقيقة. سيتم اختيار النموذج الأنسب من النماذج المدرجة في الجدول 4. يعتبر معامل التحديد (R^2) واحدًا من المعايير الأساسية لاختيار أفضل نموذج لتمثيل منحنيات التجفيف. إلى جانب R^2، يتم استخدام مقاييس إحصائية مختلفة، مثل قيمة كاي−مربع المخفضة (χ^2) وجذر متوسط الخطأ التربيعي (RMSE)، لتقييم أفضل تطابق. سيكون النموذج الرياضي الأمثل هو النموذج الذي يحتوي على أعلى قيمة لـ R^2 وأدنى قيم لكل من كاي−مربع المخفضة (χ^2) وجذر متوسط الخطأ التربيعي (RMSE). يمكن حساب هذه المعلمات كما يلي [18].

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}(XR_{exp,i} - XR_{pre,i})^2}{\sum_{i=1}^{N}(\overline{XR_{exp,i}} - XR_{pre,i})^2} \qquad (11)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N}(XR_{exp,i} - XR_{pre,i})^2}{N-n} \qquad (12)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(XR_{pre,i} - XR_{exp,i}\right)^2} \qquad (13)$$

مع

$$\overline{XR_{exp,\iota}} = \frac{\sum_{i=1}^{N} XR_{exp,i}}{N} \qquad (14)$$

حيث يمثل ⟦XR⟧ (exp,i) و ⟦XR⟧ (pre,i) محتوى الماء الذي تم قياســه تجريبيًا والذي تم التنبؤ به بواسطة النموذج على التوالي، وN يمثل عدد الملاحظات، وn هو عدد معلمات النموذج.

10.II معامل انتشار الرطوبة أثناء عملية التجفيف

تتحكم عملية نقل الرطوبة أثناء التجفيف بالانتشـار الداخلي. يُسـتخدم قانون فيك الثاني للانتشـار بشـكل شـائع لوصـف عملية التجفيف لمعظم المنتجات البيولوجية [19]. يتم اسـتخدام المعادلة التالية لحسـاب معامل انتشار الرطوبة [20]:

$$XR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)} exp\ (-(2n+1)^2 + \pi^2 D_{eff} t/4L^2 \qquad (15)$$

حيث:

Deff يمثل النفاذية الفعالة (م²/ث)، t هو الوقت (ث)، L يمثل نصـف سـمك الشـريحة (م)، وn هو عدد صحيح موجب.

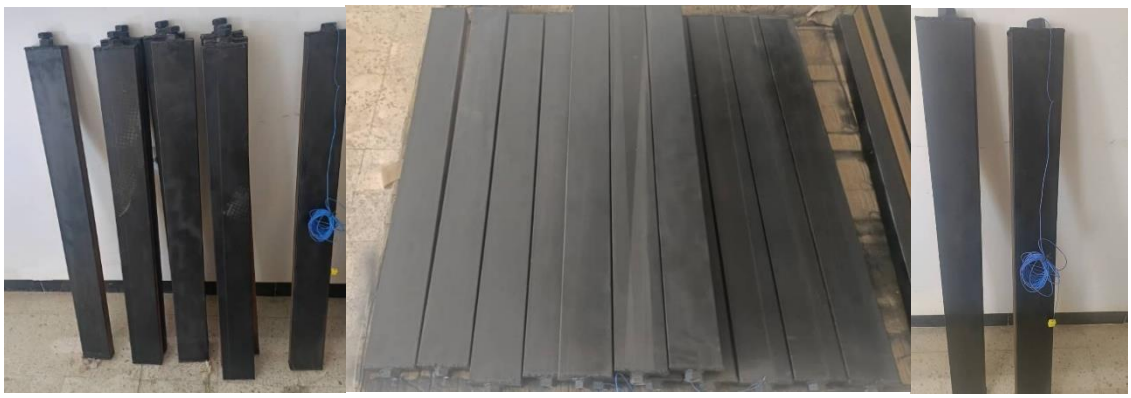
إذا كانت مدة التجفيف طويلة، فإن جميع المصطلحات في المعادلة (16) في التسلسل الذي يكون فيه n أكبر من أو يساوي 1 تكون ضئيلة مقارنة بالمصطلح الأول، ويمكن التعبير عن المعادلة (16) في شكل لوغاريتمي كما يلي:

$$ln(XR) = ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \qquad (16)$$

$$Salop = \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \qquad (17)$$

11.II طريقة تحضير قوالب الشمع (بارافين)

قمنا بتجهيز قوالب حديدية ذات أبعاد 5 × 10 × 100 سـم ثم تعبئتها بمادة الشـمع (بارافين) التي قمنا بتذويبها سابقا مع غلق القوالب، ثم صباغة القالب بطلاء أسود.



الشكل *12.II*: قوالب الشمع

حيث قمنا بوضع قوالب الشمع(بارافين) فوق سطح المجفف.

تم إجراء التجربة والمجفف فارغ بدون البصـــل من خلال تجارب نُفذت في الفترة من 18 إلى 19 ماي 2025

الشكل *13.II*: قوالب الشمع داخل المجفف

12.II خلاصة

يتناول هذا الفصل أهمية التخزين الحراري كعنصر أساسي في دعم استقرار أنظمة الطاقة المتجددة، خاصة في ظل الطبيعة المتقطعة للطاقة الشمسية. يُعرض فيه تصنيف لأنواع التخزين الحراري :التخزين الحسي، التخزين الكامن، والتخزين الكيميائي، مع التركيز على مزايا وقيود كل نوع.

يُسلط الفصل الضوء على مواد تغيير الطور (PCMs) ، خاصة شمع البارافين، التي تُعد من الخيارات الفعالة لتخزين الطاقة بفضل قدرتها على امتصاص وإطلاق كميات كبيرة من الحرارة خلال الانتقال من الحالة الصلبة إلى السائلة والعكس، ضمن نطاق حراري ضيق. وقد تميز البارافين بخواص حرارية وفيزيائية وكيميائية مناسبة، مثل الحرارة الكامنة العالية، والثبات الكيميائي، وعدم السمية، لكنه يعاني من ضعف التوصيل الحراري.

كما تضمن الفصل شرحًا تفصيليًا لتصميم وبناء مجفف شمسي مطوّر مزوّد بقوالب شمع البارافين، واستخدامه لتجفيف البصل. وقد تمّت التجارب في مركز تطوير الطاقات المتجددة بجامعة الوادي، مع تسجيل دقيق للظروف البيئية ومعايير الأداء باستخدام أجهزة قياس مخصصة.

ختامًا، أكد الفصل أن حسن اختيار مادة التخزين الحراري يجب أن يراعي التوازن بين الكفاءة الحرارية، والتكلفة، وطبيعة الاستخدام، وهو ما يجعل شمع البارافين خيارًا عمليًا لتطبيقات التجفيف الشمسي في المناطق ذات الإشعاع المرتفع.

الفصل III

النتائج والمناقشات

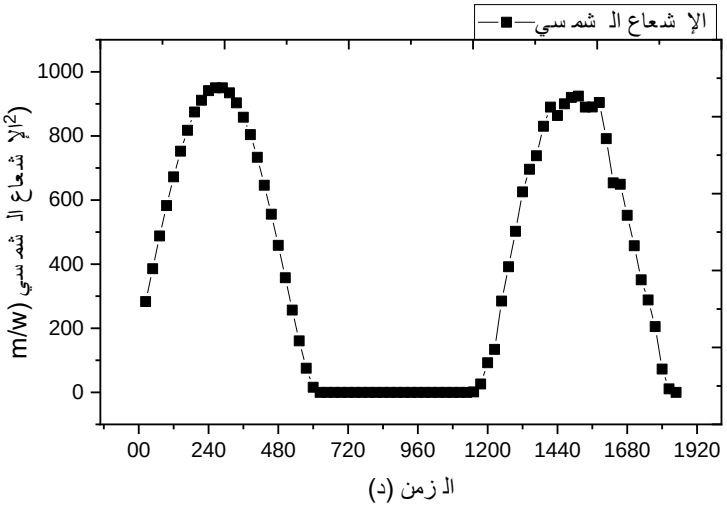
1.III مقدمة:

أجري التجربة على مدى يومين في ولاية الوادى من 18 الى 19 ماي 2025 وحدة تطوير الطاقات المتجددة

تم قياس درجة الحرارة المحيطة واشعاع الشمس على مدى الوقت (الشكل 13) يظهر التغيرات في درجة الحرارة المحيطة وإشعاع الشمس.

2.III تغير الاشعاع الشمسي على مدار الزمن

من المنحنى نلاحظ أن الإشعاع الشمسي اتبع نمطًا يوميًا واضحًا على مدار اليومين الموضحين. في كل يوم، بدأ الإشعاع من قيمة قريبة من الصفر في ساعات الصباح الباكر، ثم ازداد تدريجياً ليصل إلى ذروته حوالي منتصف النهار، قبل أن يتناقص تدريجياً مرة أخرى ليقترب من الصفر مع غروب الشمس. ففي اليوم الأول، وصل الإشعاع الشمسي إلى قيمة قصوى تقريبية بلغت حوالي 850 واط/متر مربع. بينما في اليوم الثاني، لوحظ أن الإشعاع الشمسي كان أعلى قليلاً بشكل عام، حيث بلغ ذروته عند حوالي 950 واط/متر مربع، مما يشير إلى ظروف شمسية أفضل في اليوم الثاني مقارنة باليوم الأول. هذا التذبذب اليومي في الإشعاع الشمسي يعكس التوفر الطبيعي للطاقة الشمسية، والتي تعد المصدر الرئيسي لتشغيل المجفف الشمسي خلال ساعات النهار.

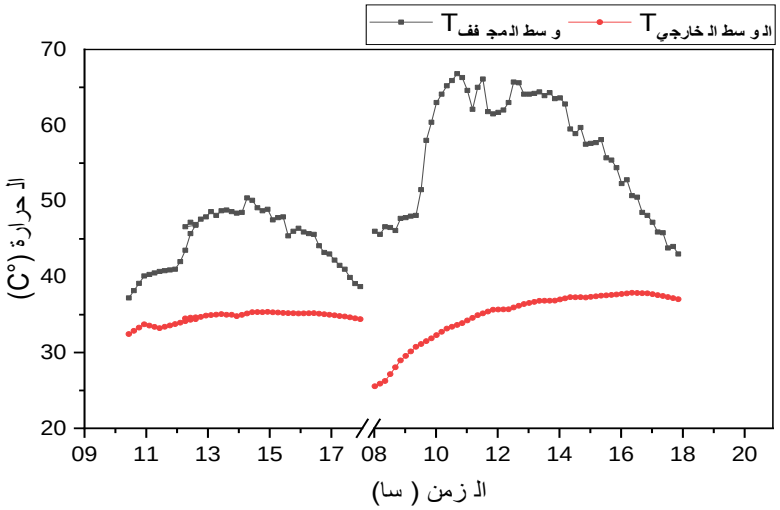


الشكل *14.III*: تغير الاشعاع الشمسي على مدار الزمن

3.III فعالية وأداء المجفف الشمسي:

1.3.III تغير درجة الحرارة وسط المجفف بدلالة الزمن

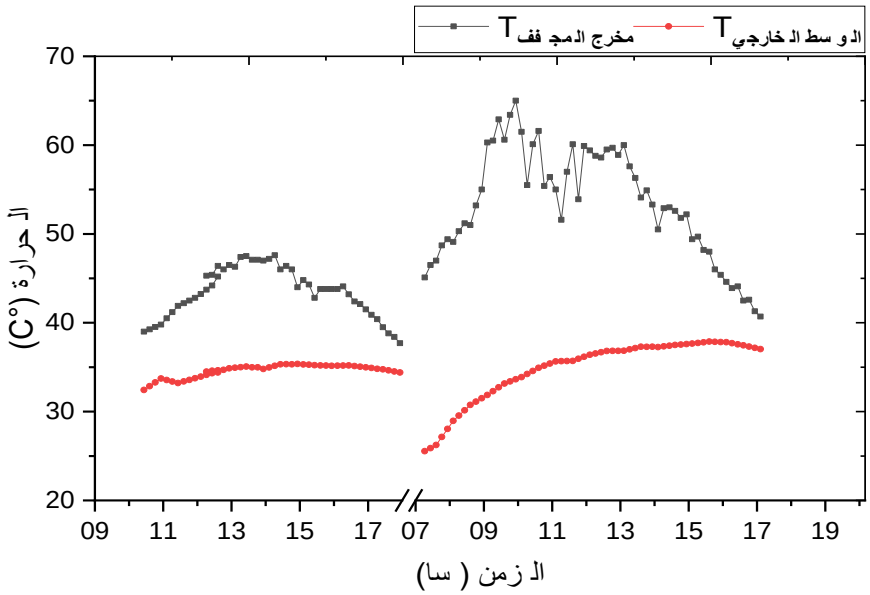
من المنحنى نلاحظ أن درجة حرارة وسط المجفف (الخط الأسود) كانت دائمًا أعلى بشكل ملحوظ من درجة حرارة الوسط الخارجي (الخط الأحمر) على مدار اليومين الموضحين. خلال ساعات النهار، ارتفعت كلتا درجتي الحرارة، حيث وصلت درجة حرارة وسط المجفف إلى قيم تتراوح بين حوالي 40–50 درجة مئوية، بينما تراوحت درجة حرارة الوسط الخارجي بين حوالي 25–35 درجة مئوية. هذا الفارق الحراري الكبير، الذي يصل إلى ما يقارب 15–20 درجة مئوية في أوقات الذروة، يؤكد على قدرة النظام على تسخين الهواء بكفاءة فوق درجة حرارة البيئة المحيطة.



الشكل *15.III*:تغير درجة الحرارة وسط المجفف بدلالة الزمن

2.3.III تغير درجة الحرارة مخرج المجفف بدلالة الزمن

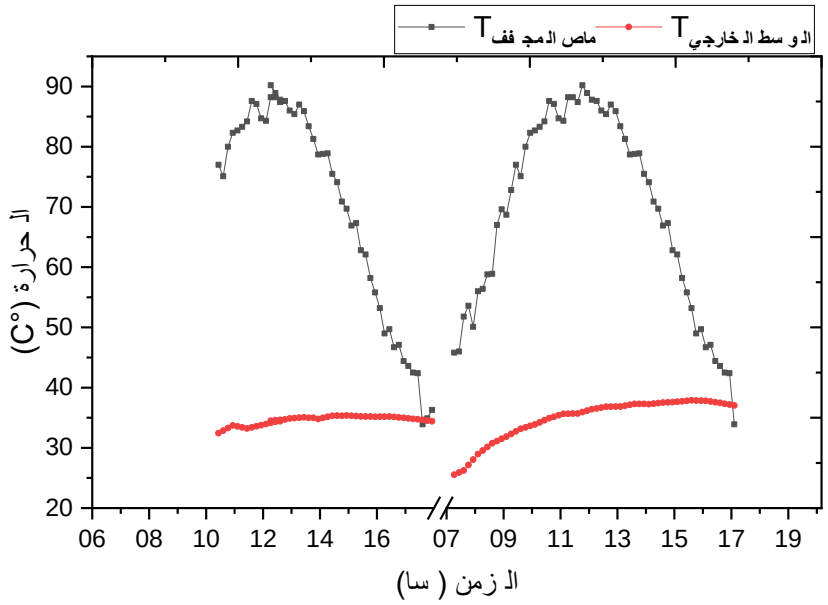
نلاحظ من المنحنى أن درجة حرارة مخرج المجفف (الخط الأسود) كانت دائمًا أعلى بشكل ملحوظ من درجة حرارة الوسط الخارجي (الخط الأحمر) على مدار اليومين الموضحين. خلال ساعات النهار، ارتفعت كلتا درجتي الحرارة، حيث وصلت درجة حرارة مخرج المجفف إلى قيم تتراوح بين حوالي 40–50 درجة مئوية، بينما تراوحت درجة حرارة الوسط الخارجي بين حوالي 25–35 درجة مئوية. هذا الفارق الحراري الكبير، الذي يصل إلى ما يقارب 15–20 درجة مئوية في أوقات الذروة، يؤكد على قدرة النظام على تسخين الهواء بكفاءة فوق درجة حرارة البيئة المحيطة، وهو أمر بالغ الأهمية لعملية التجفيف الفعالة.



الشكل *16.III*:تغير درجة الحرارة مخرج المجفف بدلالة الزمن

3.3.III تغير درجة الحرارة عنصر ماص بدلالة الزمن

نلاحظ في المنحنى الممثل لنتائج تجربة تجفيف البصل باستخدام مجفف شمسي غير مباشر خلال يومي 18 و19 ماي، أن درجة حرارة الوسط الخارجي (المنحنى الأسود) تعرف تغيرًا يوميًا واضحًا، حيث تبدأ منخفضة في الصباح (حوالي 17–18°C) وترتفع تدريجيًا لتبلغ ذروتها ما بين الساعة 12:00 و14:00 لتصل إلى حوالي 40–42°C، ثم تنخفض مجددًا مع نهاية اليوم. هذا السلوك يبين استقرار الظروف الجوية خلال اليومين، مما يوفر بيئة مناسبة للتجفيف الشمسي. في المقابل، نلاحظ أن درجة حرارة ماء المجفف (المنحنى الأحمر) تتسم بثبات نسبي، حيث تبدأ عند حوالي 28°C صباحًا، ثم ترتفع تدريجيًا لتصل إلى ذروة تقارب 35–37°C، مع بقاء المنحنى أكثر تسطحًا واستقرارًا مقارنة بدرجة حرارة الهواء الخارجي. هذا الفرق في السلوك الحراري يُظهر فعالية النظام في تخزين وتوزيع الحرارة داخليًا، ويعكس أيضًا استجابة بطيئة للكتلة الحرارية داخل المجفف، مما يساعد على توفير حرارة معتدلة وثابتة ملائمة لتجفيف البصل دون إتلافه. الفرق المسجل بين درجة حرارة الوسط الخارجي ودرجة حرارة ماء المجفف، والذي يتراوح بين 5 إلى 10 درجات مئوية في ساعات الذروة، يُعد مؤشرًا إيجابيًا على كفاءة المجفف في تقليل الفقد الحراري وضمان تجفيف منتظم. وبشكل عام، يُظهر المنحنى أن المجفف الشمسي غير المباشر قد عمل في ظروف مثالية تقريبًا، ما ساهم في توفير درجات حرارة مستقرة ومناسبة لعملية التجفيف الفعالة للبصل.

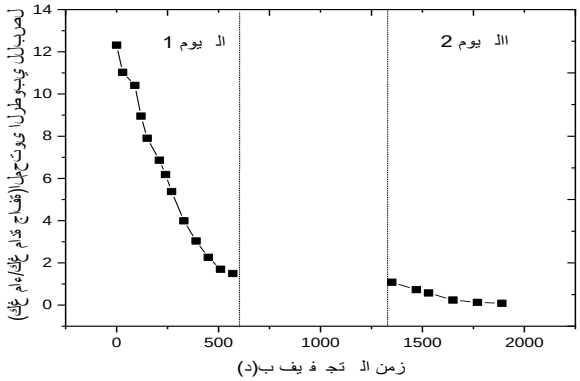


الشكل *III. 17*:تغير درجة الحرارة عنصر ماص بدلالة الزمن

4.III حركية التجفيف:

1.4.III المحتوى الرطوبي بدلالة الزمن

نلاحظ من الشكل18 أن المحتوى الرطوبي للبصل، المُعبّر عنه بواحدة كغ ماء/كغ مادة جافة، يتناقص بشكل كبير مع مرور التجفيف، مما يدل على فعالية العملية. في اليوم الأول، بدأ التجفيف بمحتوى رطوبي مرتفع جداً يبلغ حوالي 12.3، وشهدت الساعات الأولى معدل تجفيف سريع جداً كما يظهر من الانحدار الشديد للمنحنى، حيث انخفض المحتوى الرطوبي إلى حوالي 2 كغ/كغ بعد 500 دقيقة فقط. مع نهاية اليوم الأول، بعد حوالي 600 دقيقة، وصل المحتوى الرطوبي إلى قرابة 1.5 كغ/كغ. وفي اليوم الثاني، استؤنفت عملية التجفيف ولكن بمعدل أبطأ بكثير، حيث أصبح انحدار المنحنى أقل حدة، وهذا يعود إلى أن معظم الماء الحر قد تبخر وبدأت عملية إزالة الماء المرتبط الأكثر صعوبة. استمر المحتوى الرطوبي في الانخفاض تدريجياً من قيمة 1.5 كغ/كغ في بداية اليوم الثاني حتى وصل إلى قيمة نهائية تقارب الصفر في نهاية التجربة عند حوالي 1900 دقيقة، مما يشير إلى اكتمال عملية التجفيف بنجاح.



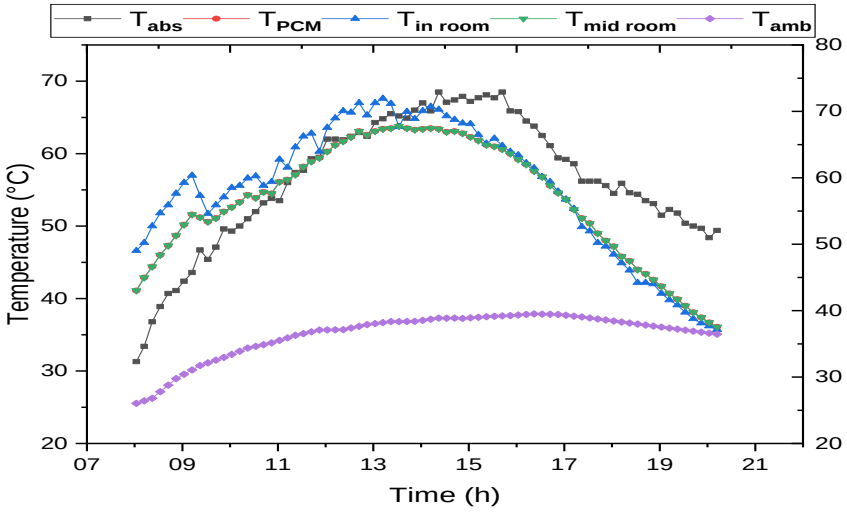
الشكل *III* .18 : المحتوى الرطوبي بدلالة الزمن

الشكل *III*.19:عينة البصل قبل التجفيف

الشكل *III*. 20: عينة البصل بعد التجفيف

5.III منحنى الحرارة ثنائية الطور

يُظهر منحنى حرارة المادة ثنائية الطور (TPCMs) الشمع البارافين سلوكًا حراريًا منتظمًا يعكس دور هذه المادة في تخزين وإطلاق الطاقة الحرارية داخل المجفف الشمسي غير المباشر. في بداية اليوم، عند الساعة 08:00 صباحًا، تبدأ درجة حرارة المادة ثنائية الطور (البارافين) من قيمة تقارب 34°C،وبين الساعة 08:00و11:00، نلاحظ ارتفاعًا تدريجيًا في حرارةTPCM ، لتصل إلى حوالي 56°C، وهو ما يدل على بداية امتصاصها للحرارة القادمة من الهواء الساخن. بعد ذلك، من الساعة 11:00إلى 13:00، تبدأ درجة الحرارة بالثبات حول 55–58°C، وهو مؤشر واضح على دخول المادة في مرحلة الانصهار، ومن الساعة 13:00حتى 15:00، تواصل TPCM الارتفاع التدريجي لتصل إلى ذروتها التي تبلغ حوالي 70°C. هذه المرحلة تمثل تخزين الحرارة بعد الانصهار الكامل، حيث تصبح المادة في الحالة السائلة. بعد الساعة 15:00، تبدأ درجة الحرارة بالانخفاض تدريجيًا، ومع حلول الساعة 20:00، تصل إلى حوالي 45°C، ما يدل على أن المادة بدأت بإطلاق الحرارة المخزّنة تدريجيًا، ودخلت في مرحلة التصلب (التجمد)، أي التحول من سائل إلى صلب، مما يسمح بالحفاظ على درجة حرارة داخلية مناسبة للمجفف حتى مع انخفاض الإشعاع الشمسي. مقارنةً بذلك، فإن درجة حرارة الوسط الخارجي (Tamb) لم تتجاوز 40°C طوال اليوم، في حين أن حرارة TPCM بقيت أعلى بكثير في معظم الوقت، مما يثبت فعالية مادة الشمع (البارافين) في رفع كفاءة المجفف الشمسي من خلال تخزين الحرارة ثم إطلاقها بسلاسة.



الشكل *III* .21 : منحنى الحرارة ثنائية الطور بدلالة الزمن

6.III خلاصة الفصل:

في الختام، تؤكد النتائج الموضحة في المنحنيات بشكل قاطع على الأداء الفعال للمجفف الشمسي المستخدم. ففي كلا اليومين التجريبيين، لوحظ ارتفاع مستمر وملحوظ في درجة حرارة الهواء داخل المجفف مقارنة بدرجة حرارة الوسط الخارجي. هذا الفارق الحراري الكبير، الذي بلغ في ذروته حوالي 15 إلى 20 درجة مئوية، يخلق بيئة مثالية لعملية التجفيف، حيث أن الهواء الساخن يمتلك قدرة أكبر على حمل الرطوبة، مما يسرّع من عملية تبخر الماء من المنتج المراد تجفيفه. بشكل عام، تدل هذه البيانات على نجاح تصميم المجفف في استغلال الطاقة الشمسية بكفاءة لتحقيق الظروف الحرارية اللازمة لعملية التجفيف.

خاتمة

خاتمة

في ختام هذه المذكرة، قدم هذا العمل مساهمة نظرية وتجريبية قيمة في دراسة شاملة لتقنيات التخزين الحراري. لقد أظهرت النتائج التجريبية التي أُجريت في مركز تطوير الطاقات المتجددة جامعة الوادي كفاءة ملحوظة للمجفف الشمسي غير المباشر في عملية تجفيف البصل. فقد أكدت المنحنيات البيانية بوضوح قدرة المجفف على رفع درجة حرارة الهواء داخله (سواء عند المخرج أو في الوسط) بشكل مستمر مقارنة بالوسط الخارجي، حيث بلغ الفارق الحراري ذروته لتصل إلى حوالي 15–20 درجة مئوية، مما وفر الظروف المثلى لعملية التجفيف. حيث انعكس ذلك مباشرة على فعالية إزالة الرطوبة من البصل، حيث أظهر منحنى التجفيف انخفاضاً سريعاً للمحتوى الرطوبي من قيمة أولية عالية (حوالي 12.3 كغ ماء/كغ مادة جافة) في اليوم الأول بمعدل تجفيف أولي سريع، ثم تبعه معدل تجفيف أبطأ في اليوم الثاني، ليصل في النهاية إلى محتوى رطوبي قريب جداً من الصفر بعد حوالي 1900 دقيقة من التجفيف الكلي، مما يؤكد على تحقيق التجفيف الكامل للمنتج.كما تُبرز هذه النتائج الإيجابية الجدوى العملية لدمج مواد تغيير الطور في المجففات الشمسية لتحسين أدائها واستدامتها، مما يفتح آفاقاً واسعة لاستخدام هذه التقنيات في حفظ المنتجات الزراعية. بناءً على هذه النتائج، يوصى بمواصلة البحث في تحسين تصميم المجفف من خلال دراسة تأثير متغيرات تشغيلية أخرى، وتقييم أنواع مختلفة من مواد تخزين الحرارة، وإجراء تحليلات اقتصادية وبيئية أعمق لتعزيز نشر هذه التكنولوجيا الصديقة للبيئة.

قائمة المراجع

قائمة المراجع

[1] أسعد رحمن الحلفي تصميم و تصنيع و اختبار مجفف شمسي شبه مختلط لتجفيف التمر) مجلة البصرة لأبحاث نخلة التمر كلية الزراعة / جامعة البصرة المجلد 6 ص 2007,19

[2] بوسونيا م.أ.، أ.ب.ت. (2001) خصائص الأرز الخشن تحت الحمل الحراري الطبيعي. مجلة هندسة الأغذية، 47، 295-301.

[3] التجفيف الشمسي للفواكه والخضروات خبرات فلسطين الأستاذ محمد سليم علي – مركز أبحاث التنوع الحيوي والبيئة نابلس فلسطين – صفحة رقم 2 – 2010

[4] ص ، الشطي ، أ ، الحلفي ، ع ، جعفر ، دراسة الصفات الحسية و الفيزيائية لأسماك الكارب المجففة بمجفف يعمل بالطاقة الشمسية و تحت التفريغ المصنع محليا ، مجلة جامعة ذي قار للبحوث الزراعية ، المجلد 3 ، الجزء الثالث ، 2014

[5] دراسة الكفاءة الطاقوية للمجفف الشمسي، سلمان بن يحي واخرون، جامعة ورقلة، 2019

[6]Exploring Solar Drying of Henna (Lawsonia inermis) and Its Effect on the BioactIIlities. 2024

[7] Development, drying characteristics, and environmental analysis of a PV operated automatic solar dryer for drying date. 2025

[8]J.P. Holman, Experimental Methods for Engineers, McGraw-Hill/Connect Learn Succeed2012.

[9]M.A. Kherrafi, A. Benseddik, R. Saim, H. Zakaria, R. Bahmed, Performance evaluation of innovatIIIe sensible energy storage material integration as an obstacle in solar collectors for drying applications, Journal of Energy Storage 74 (2023) 109317.

[10]D.S. Jayas, S. Cenkowski, S. Pabis, W.E. Muir, Review of thin-layer drying and wetting equations, Drying technology 9(3) (1991) 551-588.

[11]G. Xanthopoulos, G. Lambrinos, H. Manolopoulou, Evaluation of thin-layer models for mushroom (Agaricus bisporus) drying, Drying Technology 25(9) (2007) 1471-1481.

[12]G. White, T. Bridges, O. Loewer, I. Ross, Seed coat damage in thin-layer drying of soybeans, Transactions of the ASAE 23(1) (1980) 224-0227.

[13]Q. Zhang, J. Litchfield, An optimization of intermittent corn drying in a laboratory scale thin layer dryer, Drying technology 9(2) (1991) 383-395.

[14]İ.T. Toğrul, D. PehlIIIan, Mathematical modelling of solar drying of apricots in thin layers, Journal of food Engineering 55(3) (2002) 209-216.

[15]A. Midilli, H. Kucuk, Z. Yapar, A new model for single-layer drying, Drying technology 20(7) (2002) 1503-1513.

[16]O. Yaldiz, C. Ertekin, H.I. Uzun, Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes, Energy 26(5) (2001) 457-465.

[17]S. Henderson, Progress in developing the thin layer drying equation, Transactions of the ASAE 17(6) (1974) 1167-1168.

[18]Y.I. Sharaf-Eldeen, J. Blaisdell, M. Hamdy, A model for ear-corn drying , .(1981)

[19]A. Benseddik, A. Azzi, K. Allaf, Mathematical empirical models of thin-layer airflow drying kinetics of pumpkin slice, Engineering in Agriculture, Environment and Food 11(4) (2018) 220-231.

[20]R.P. Singh, D.R. Heldman, Introduction to food engineering, Gulf Professional Publishing2001.

[21]J. Crank, The mathematics of diffusion, Oxford unIIIersity press1979.