



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET
POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

جامعة قاصدي مرباح . ورقلة
UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA
كلية المحروقات والطاقات المتجددة وعلوم الأرض والكون
FACULTE DES HYDROCARBURES ET DES ENERGIES
RENOUVELABLES ET DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

مذكرة التخرج
لنيل شهادة ماستر أكاديمي

الميدان: علوم وتقنيات
الشعبة: هندسة ميكانيكية
التخصص: الطاقات المتجددة

من إعداد الطالبين:

حمزة عبوب

مالك نبيل الكيم

بعنوان:

إنجاز ودراسة و كفاءة الطاقوية لنظام تخزين حراري باستخدام مواد ماصة
مختلفة

نوقشت وأجيزت علنا بتاريخ: 2019/06/26

أمام اللجنة المكونة من الأساتذة:

رئيسا	جامعة ورقلة	أستاذ مساعد أ	د. سميرة شويشة
مناقشا	جامعة ورقلة	أستاذ محاضر ب	د. عمر رواق
مشرفا	جامعة ورقلة	أستاذ محاضر ب	د. جمال بن منين

الموسم الجامعي 2018 - 2019

شكر

الحمد لله الذي وفقنا لإنجاز هذي المذكرة وإتمام هذا البحث العلمي
كما نتقدم بجزيل الشكر لجميع أساتذتنا
وكمنا نشكر أستاذنا الفاضل: جمال بن منين
الذي وجهنا خلال فترة عملنا.

ونود أن نعرب عن امتناننا لجميع أعضاء لجنة المناقشة: أ.د. سميرة شويشة،
أ.د. عمر رواق. الذين وافقوا على قراءة أعمالنا والحكم عليها.

وكمنا نتقدم بالشكر أيضا إلى كل الزملاء في هذه الدفعة وكل من ساهم من
قريب أو بعيد في إنجاز هذا العمل.

الإهداء

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات حمدا كثيرا 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 لإنجاز هذه المذكرة وإتمام هذا البحث العلمي
المتواضع
والذي أهديته إلى:
أمي الحبيبة الغالية والعزيزة على قلبي التي أحاطتني بدعواتها الخالصة
والى زوجة أبي الغالية
والى أبي الغالي الذي علمني حروفى الأولى وكان قدوتى فى العمل
والمتابعة
أدام الله عليها نعمة الصحة والعافية
إلى إخوتى الأعمام: سعيد، حنان، عائشة، نوال، جعفر، الهام، ربيع،
محمد الكبير، لطيفة، سفيان، مسعودة، أعلام، عصام.
وإلى جميع أصدقائى وإلى جميع أقاربى
إلى كل من ساعدنى أو دعى لى بظفر الغيب.

حمزة عجبوب

الإهداء

إلى من أَرْضَعْتَنِي الحُبَّ والعِزَّ، إلى رمز الحُبِّ وولسم الشفاء، إلى القلبِ الأبيض،
يا من افتقدتكَ في كل لحظات حياتي، يا من يرتعش قلبي لذكرك،
يا من أودعتيني لله أهديك هذا البحث:

(أمي الحبيبة)

إلى من حُلَّتْ أزمانه ليقدِّم لي لحظة سعادة، إلى من تعب لأجلي و أعطاني الغالي
والنفيس،

إلى من صدَّ الأشواق عن دربي ليصمد لي طريق العلم. إلى القلب الكبير
(والدي العزيز)

إلى القلوب الطاهرة الرقيقة والنفوس البريئة، إلى رباحين حياتي. إخوتي:
(محمد، وائل، أشرف، مي، أرسلان)

إلى الروح التي سكنت روحي التي طالما دعمتني و وقفت بجانبتي خلال الأوقات
الصعبة.

(زوجتي الحبيبة)

إلى الأخ الذي لم تلده أمي، إلى من تحلى بالإخاء وتميز بالوفاء، إلى من معه وبرفته
سعدت

(رضا مناع)

إلى الوطن والشعب الذي لم أرى منهم سوى كل خير
إلى أصدقائي اليمنيين والجزائريين الذين جمعنا القدر لصحبتهم والتعرف
عليهم ومحبتهم

لكم مني جزيل الشكر والعرفان...

مالك نبيل الكميم

الفهرس

I	الفهرس
III	قائمة الأشكال
V	قائمة الجداول
VI	الرموز
	المقدمة العامة

I. الفصل الأول التخزين الحراري

5	I.المقدمة
5	I.1.التخزين الحراري
7	I.1.1.أنواع تخزين الطاقة الحراري
7	I.1.1.1.تخزين الطاقة الحرارية بالحرارة الحساسة
7	I.1.1.1.1.تخزين الحرارة المحسوسة مع المواد السائلة
8	I.1.1.1.2.تخزين الحرارة المحسوسة مع المواد الصلبة
8	I.2.1.1.1.تخزين الطاقة الحرارية بالحرارة الكامنة
10	I.2.1.1.1.1.الحرارة الكامنة للانصهار
10	I.2.2.1.1.1.الحرارة الكامنة للتبخر
12	I.3.1.1.1.التخزين الحراري الكيميائي
14	I.2.1.1.مقارنة لمختلف أنواع تخزين الطاقة الحرارية
15	I.2.1.1.2.ضروريات التخزين الحراري

II. الفصل الثاني التجفيف الشمسي

17	II.1.التجفيف الشمسي
17	II.1.1.نظريات وصفية لظاهرة التجفيف
18	II.2.1.أوضاع التجفيف
19	II.1.2.1.التجفيف بواسطة التوصيل الحراري
19	II.2.2.1.التجفيف بواسطة الحمل الحراري
20	II.3.2.1.التجفيف بالشعاع الحراري

21	4.2.1.II.نقل المواد
21	5.2.1.II. نقل مياه التجفيف
22	3.1.II.الوصف الفيزيائي للتجفيف
25	4.1.II.المجففات
25	1.4.1.II.تصنيفات المجففات الصناعية
26	2.4.1.II.أنواع مختلفة من مجففات الطاقة الشمسية
26	1.2.4.1.II.المجففات الطبيعية
27	2.2.4.1.II.مجففات الطاقة الشمسية المباشرة
29	3.2.4.1.II.مجففات الطاقة الشمسية غير المباشرة
30	4.2.4.1.II.نفق مجففات الطاقة الشمسية
	III.الفصل الثالث الجانب التطبيقي
32	1.III.المقدمة
32	2.III.وصف المواد المستعملة لعملية التخزين
32	1.2.III.السعة الحرارية للمواد
33	1.1.2.III.المواد والآليات المستعملة خلال التجربة
33	2.1.2.III.طريقة العمل
35	3.III.تصميم نظام التخزين الحراري
35	1.3.III.وصف المجفف الشمسي المستعمل لهذه التجربة
36	2.3.III.مبدأ تشغيل المجفف الشمسي
37	4.III.العمليات التجريبية
37	1.4.III.تحضير المواد المخزنة للحرارة
37	2.4.III.معدات القياس
39	3.4.III.طريقة عمل تجربة التخزين الحراري
40	5.III.النتائج والمناقشة
53	6.III.الخاتمة
55	الخاتمة العامة

قائمة الأشكال

I. الفصل الأول : التخزين الحراري

الرقم	العنوان	صفحة
1	مخطط مقياس أنظمة تخزين الطاقة الحرارية	06
2	تصنيف مواد تغيير المرحلة	09
3	الخطوات المختلفة من نظام التخزين	11
4	رسم تخطيطي للتخزين الكيميائي الحراري	12
5	المبدأ الأساسي لتفاعل تحلل و تشكيل $Ca(OH)_2$	13

II. الفصل الثاني : التجفيف الشمسي

6	التمثيل التخطيطي للمادة الصلبة الرطبة	22
7	منحنى التجفيف $f(t) = n_s$	23
8	منحنى التجفيف $f(t) = \frac{dn_s}{dt}$	23
9	منحنى التجفيف $f(n_s) = \frac{dn_s}{dt}$	24
10	مخطط التجفيف الشمسي الطبيعي	27
11	رسم بياني لمجفف شمسي مباشر للحمل الحراري الطبيعي	28
12	رسم بياني لمجفف شمسي مباشر للحمل الحراري ألقسري (المتعمد)	28
13	رسم تخطيطي لمجفف شمسي غير المباشر للحمل الحراري الطبيعي	29
14	رسم تخطيطي لنفق مجفف الطاقة الشمسية	30

III. الفصل الثالث : الجانب التطبيقي

15	تحديد منطقة ورقلة على خريطة الجزائر	32
16	ميزان كهربائي	33
17	مسعر حراري	33
18	مسخن كهربائي	33

35	أ) . مخطط المجفف الشمسي المباشر مع دمج الوسط المسامي (ب) . صورة توضيحية للمجففين	19
37	أ) - صورة توضح نوع الحصى المستعمل . (ب) - صورة توضح نوع الرمل المستعمل	20
37	جهاز قياس الرطوبة و درجة الحرارة Test 645	21
38	جهاز قياس درجة الحرارة	22
38	جهاز قياس شدة أشعة الشمس	23
40	الشكل يوضح تغيرات درجة الرطوبة بدلالة الزمن بالنسبة للتجربة الأولى	24
41	الشكل يوضح تغيرات درجة الرطوبة بدلالة الزمن بالنسبة للتجربة الثانية	25
42	الشكل يوضح تغيرات درجة حرارة الهواء داخل للمجفف بدلالة الزمن بالنسبة للتجربة الأولى	26
43	الشكل يوضح تغيرات درجة حرارة الهواء داخل للمجفف بدلالة الزمن بالنسبة للتجربة الثانية	27
44	الشكل يوضح تغيرات درجة حرارة الهواء الخارج من المجفف بدلالة الزمن بالنسبة للتجربة الأولى	28
45	الشكل يوضح تغيرات درجة حرارة الهواء الخارج من المجفف بدلالة الزمن بالنسبة للتجربة الثانية	29
46	الشكل يوضح تغيرات درجة حرارة الحصى داخل المجفف بدلالة الزمن بالنسبة للتجربة الأولى	30
47	الشكل يوضح تغيرات درجة حرارة الرمل الخشن داخل المجفف بدلالة الزمن بالنسبة للتجربة الثانية	31
48	الشكل يوضح تغيرات درجة رطوبة الهواء داخل المجففين بدلالة الزمن بالنسبة للتجربة الثالثة	32
49	الشكل يوضح تغيرات درجة حرارة المواد داخل المجففين بدلالة الزمن بالنسبة للتجربة الثالثة	33
50	الشكل يوضح تغيرات درجة حرارة الهواء داخل المجففين بدلالة الزمن بالنسبة للتجربة الثالثة	34
51	الشكل يوضح تغيرات درجة حرارة الهواء الخارج من المجففين بدلالة الزمن بالنسبة	35

قائمة الجداول

I. الفصل الأول : التخزين الحراري

الرقم	العنوان	صفحة
1	خصائص أنظمة تخزين الحرارة المختلفة	15
III. الفصل الثالث : الجانب التطبيقي		
2	جدول يوضح نتائج تجربة السعة الحرارية للمسعر $C_{p\text{calorique}}$	34
3	جدول يوضح نتائج تجربة السعة الحرارية للحصى $C_{p\text{حصى}}$	34
4	جدول يوضح نتائج تجربة السعة الحرارية للرمل الخشن الرمل الخشن $C_{p\text{الرمل الخشن}}$	34
5	أبعاد مكونات المجفف	36

قائمة الرموز

الرموز	تعريف الرمز	الوحدة
Q	كمية الحرارة	(J)
c_p	السعة الحرارية	$(J.kg^{-1}.K^{-1})$
m	كتلة	(kg)
dT	التغير في درجة الحرارة	(K)
ΔL	اونطالبي متناهية الصغر لتغيير الحالة	$(J.kg^{-1})$
L_f	الحرارة الكامنة للانصهار	$(J.kg^{-1})$
L_v	الحرارة الكامنة للتبخير	$(J.kg^{-1})$
E	مقدار الطاقة المخزنة	(J)
n	عدد المولات	(mol)
ΔH_r	أنتالبي التفاعل	$(J.mol^{-1})$
λ	الموصلية الحرارية	(W / m.K)
A	المساحة	(m ²)
α	معامل تبادل الحمل الحراري	(m ² / W)
ε	معامل الانبعاث	(بدون وحدة)
P	الضغط	(Pa)
K	معامل نقل المواد	(m /s)
T	درجة الحرارة	(K)

الاختصارات

مواد تغير الطور

MCP

المقدمة العامة

المقدمة العامة

لقد قام الإنسان بتخزين الطاقة بشكل حرارة بواسطة إمكانيات بسيطة وذلك عن طريق تسخين الحجر عبر الشمس واستخدامه بعد ذلك للتدفئة أو الطبخ.

بحيث أن تخزين الطاقة واحد من أهم قضاياها الرئيسية، فانه يجعل من الممكن ضبط الإنتاج و الاستهلاك للطاقة عن طريق الحد من الخسائر بل هو ضروري في حالات الطاقات المتجددة. يبلغ الطلب العالمي للطاقة حاليا حوالي 12,5 Gtep وهي في ارتفاع مستمر، يمكن أن يرتفع من 20 إلى 25 بحلول عام 2050 [1].

في موازاة ذلك تم تصريح وضع بيئي مقلق مع نسبة كبيرة من ثاني أكسيد الكربون المتولدة سنويا بمقدار 6,5 مما يؤدي إلى زيادة كبيرة في معدل درجات الحرارة المتوسطة على سطح الأرض بين 1,5°C و 5,8 بحلول عام 2100 ، وهذا يمثل زيادة غير مسبوقه، والتي سيكون مصحوبا بشكل خاص بارتفاع في مستوى البحر من 20 cm إلى 01 m [2].

في مواجهة هذا الموقف، يمثل استخدام الطاقات المتجددة حلا جيدا، من بين هذه الطاقات تظهر الطاقة الشمسية جاذبية كبيرة حول المستهلكين لأنها تتواجد بوفرة على الأرض و لا تتضب، بحيث متوسط تدفق الطاقة على مستوى الأرض يكون بنسبة (1300 W.m⁻²) (في حالة السماء صافية) الجو يعكس ويمتص جزءا منه ،في المتوسط تستقبل الأرض على مستوى اليابسة (1000 W.m⁻²)، يمكن أن تتطور قوتها إلى 50 MW و تجنب إطلاق 200000 طن من ثاني أكسيد الكربون سنويا، للمقارنة قوة محطة مفاعل الطاقة النووية الفرنسي ما بين (900 و 1450 MW) (خلال 24 ساعة) ومع ذلك فان الطاقة الشمسية بطبيعتها تكون متقطعة (نهارا أو ليلا) ، عشوائية (عواصف رعدية أو سحب) و تعوض عن الطلب اليومي للطاقة بالإضافة إلى ذلك يتطلب تشغيلها نشر أنظمة تخزين فعالة.[2]

في المقابل وصلت تقنية التخزين الحراري إلى مرحلة النضج مما يجعلها جاهزة للاستغلال من اجل الاستخدام الفعال للطاقة المتجددة.

- تستقبل الجزائر الكثير من أشعة الشمس بحيث تتمتع بمتوسط أشعة شمس سنويا تبلغ حوالي (2500 ساعة) و تتلقى طاقة شمسية يومية متوسطة تتراوح قيمتها من (16,2 MJ/m² إلى 27) في المستوى الأفقي [3]. هذه الطاقة كافية، لتلبية جميع الطلب على الطاقة في تجفيف المنتجات الزراعية ، وخاصة في فصل الصيف [4].

يؤدي ارتفاع الأسعار و نقص الوقود إلى إجراء دراسات و بحوث عميقة حول استخدام الطاقة الشمسية كمصدر بديل للطاقة خاصة في البلدان النامية [5].

يعتبر التجفيف الشمسي كوسيلة لحفظ الطعام و أكثر أنظمة الطاقة الشمسية استخداما على نطاق واسع. بحيث يعد تجفيف المنتجات إحدى أكبر العمليات المستهلكة للطاقة في صناعة ومعالجة الأغذية، وهي طريقة أفضل لتقليل خسائر ما بعد الحصاد.

يمارس التجفيف الشمسي للمحاصيل في جميع أنحاء العالم لقرون في الهواء الطلق (الشمس)، ولا يزال تجفيف جزء كبير من الإمدادات العالمية من المحاصيل بالطريقة التقليدية دون مساعدة تقنية. ومع ذلك فإن 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 .

قمنا خلال هذا العمل بانجاز نظام تخزين حراري متمثلا أساسا في الحصى و الرمل و ذلك لاستخدامه في تجارب مجفف شمسي من أجل معرفة تأثير التخزين الحراري على كفاءة المجفف الشمسي المباشر.

لأجل ذلك قمنا بتجارب حول مجففين شمسيين متماثلين يحتوي أحدهما على مواد تخزين حراري و الأخر بدون مواد، من أجل معرفة تأثير التخزين الحراري في ديمومة التجفيف الشمسي حتى بعد غروب الشمس، و كذا درجات الحرارة المستفاد منها مقارنة بالمجفف الشمسي العادي. أجريت التجارب في مخبر الطاقات المتجددة بكلية علوم المادة و الرياضيات بورقلة، خلال أيام 19،29،30/04/2019.

تتكون هذه الدراسة من ثلاثة فصول :

- يقدم الفصل الأول نظرة عامة سريعة على تقنيات التخزين الحراري و التركيز على التخزين الصلب و العمليات و المواد المختلفة، و التي يشير إليه هذا الفصل.
- يقدم الفصل الثاني دراسة ببلوغرافية حول طرق تجفيف مختلفة، يليها تاريخ موجز للتجفيف الشمسي، حيث أن هنالك أنواع مختلفة من مجففات الطاقة الشمسية المستخدمة، وبعض الأعمال على التجفيف و مجففات الطاقة الشمسية.
- يقدم الفصل الثالث عمل حول دراسة تأثير عملية التخزين الحراري في تحسين كفاءة و مدة عملية التجفيف الشمسي.

الفصل الأول التخزين الحراري

I. المقدمة

لقد تعلم الإنسان على مر التاريخ، أن يتقن المزيد والمزيد من مصادر الطاقة المتنوعة، مما يطرح مشكلة إنتاجها وتخزينها. واحدة من أول الطاقات التي يسيطر عليها الإنسان هي على الأرجح النار، وهو ما يفسر استخدامها على نطاق واسع لمصادر الطاقة الأخرى مثل: طاقة الشمس والرياح وطاقة الحرارة الجوفية، حيث لا يمكن تخزينها بسهولة وهي كذلك تستغل عموماً دون إتقان إنتاجها. ومع ذلك، فإن مصطلح التخزين سيكون وسيلة لتحويل الطاقة بشكل مؤقت لإعادة استخدامها في وقت لاحق.

لذلك دفع سياق الطاقة العلماء إلى التفكير في استخدام الطاقة المتجددة، و التي لديها فائدة مزدوجة من كونها مجانية ونظيفة. ومع ذلك، فإن عيب هذا المصدر للطاقة هو بشكل متقطع (نهار؛ ليل). أحد الحلول التي تم بحثها للتعامل مع هذه المشكلة هو تخزين الطاقة، يمكن تخزين هذه الطاقة كحرارة. الهدف من هذا الفصل هو لمحة عامة عن أساسيات تقنيات تخزين الطاقة الحرارية.

I.1. التخزين الحراري

تخزين الطاقة الحرارية يتعلق بشكل رئيسي بالحرارة الناتجة عن الشمس، كما يتعلق أيضاً بالحرارة الناتجة عن بعض الصناعات (الصناعة المعدنية، محطة وقود، محطة حرق...).

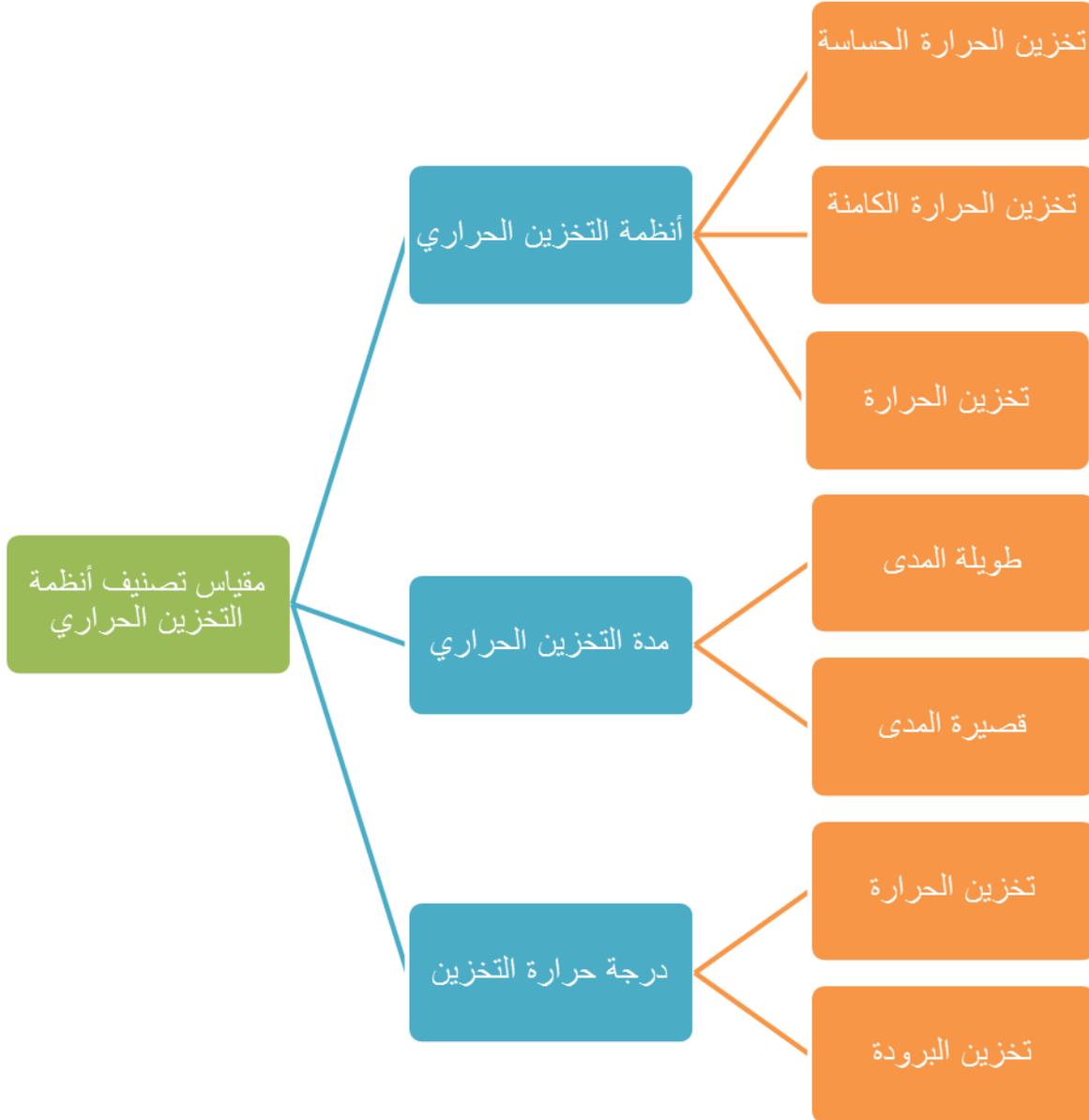
تقنيات تخزين الطاقة الحرارية يمكن تصنيفها في مختلف الفئات وفقاً لمعايير مختلفة انظر للشكل 1. إذا كان المعيار هو نطاق درجة الحرارة فإن أنظمة التخزين تنقسم إلى "تخزين الحرارة و تخزين البرودة" [6، 7]. في الحالة التي يكون فيها المعيار هو مدة التخزين، يتم اعتبار فئتين "تخزين طويل الأجل و تخزين قصير الأجل".

من ناحية أخرى إذا كان المعيار هو حالة مواد التخزين فهناك ثلاثة أنواع رئيسية هي:

- تخزين الحرارة الحساسة.
 - تخزين الحرارة الكامنة.
 - تخزين الحرارة الكيميائية.
- [8].

ويمكن أيضاً تصنيف أنظمة تخزين الطاقة الحرارية إلى قسمين آخرين هما: "نشط أو غير نشط" [9].

يستخدم مصطلح التخزين النشط في الحالة التي يكون فيها مواد التخزين داخل النظام، بالمقابل في حالة وجود نظام تخزين الطاقة الحرارية الخاملة، مواد التخزين لا تتحرك في هذه العملية. يتم نقل الطاقة الحرارية عن طريق السائل المبرد، ويتم نقلها إلى مواد التخزين باستخدام مبادل حراري. يتم تثبيت هيكل المبادل الحراري داخل مادة التخزين.



الشكل 1: مخطط مقياس أنظمة تخزين الطاقة الحرارية [10].

1.1.1 أنواع تخزين الطاقة الحرارية

1.1.1.1 تخزين الطاقة الحرارية بالحساسة

في حالة التخزين بالحرارة الحساسة، يتم تخزين الطاقة في شكل زيادة درجات حرارة المواد. كمية الطاقة المخزنة تتناسب طرديا مع الحجم، ارتفاع درجة الحرارة، القدرة الحرارية لمواد التخزين في هذه الحالة، تسمح المواد بتخزين الطاقة في مجموعة من درجات الحرارة باستثناء تغيير الحالة. تباين في كمية الطاقة "Q" المخزنة أو المستردة من قبل المواد كميًا بواسطة المعادلة التالية:

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} mC_p dT \quad (1.1)$$

Q: هي كمية الحرارة المخزنة (J). C_p : هي الحرارة النوعية الخاصة بمادة التخزين ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)، m: هي كتلة مادة التخزين (kg)، dT: هي التغير في درجة الحرارة أثناء مرحلة الشحن (K).

1.1.1.1.1 تخزين الحرارة المحسوسة مع المواد السائلة

المواد الأكثر شيوعا واستخداما في نظام تخزين حرارة معقولة هو الماء. استخدام خزانات المياه الساخنة هو تكنولوجيا معروفة لتخزين الطاقة الحرارية [11].

- تخزين الماء

يعتبر الماء أفضل وسيط للتخزين في درجات الحرارة المنخفضة، وهذا يرجع للسعة الحرارية الكبيرة ($4185 J/kg \cdot K$ عند $20^\circ C$) التي تميزه مقارنة مع الأجسام الأخرى وهكذا فالماء يستطيع تخزين حوالي: $250 kJ/kg$ عند تبغيري الحرارة بـ $60^\circ C$) إضافة إلى أن الماء غير مكلف وهو موجود بكثرة ويمكن الحصول عليه بسهولة.

حاليا الماء الساخن هو الوسيلة الأكثر استخدام في أنظمة تطبيقات الطاقة الشمسية، وهي مستعملة في درجة حرارة تتراوح ما بين $(25^\circ C, 60^\circ C)$.

كما توجد وسائل أخرى لتخزين المياه مثل: المياه الجوفية الطبيعية تحت الأرض والخزان [12].

- تخزين عن طريق سوائل أخرى

السوائل الأخرى التي تستعمل في تخزين الحرارة عن طريق الحرارة الحساسة هي عموما:

➤ زيوت عضوية: لديها ضغط بخار أضعف من الماء كما يمكن استعمالها في درجات حرارة عليا أكثر من $300^\circ C$ لكن أقل من $350^\circ C$ لتجنب تفككها.

➤ أملاح معدنية ذائبة: يعتبر هيدروكسيد الصوديوم هو الأكثر استعمالاً، بحيث لديه درجة انصهار قيمتها 320°C ومن الممكن استعماله في درجة أكبر من 800°C لكنه يسبب تآكل ويصعب تخزينه في درجة حرارة عالية [12].

2.1.1.1.I. تخزين الحرارة المحسوسة مع المواد الصلبة

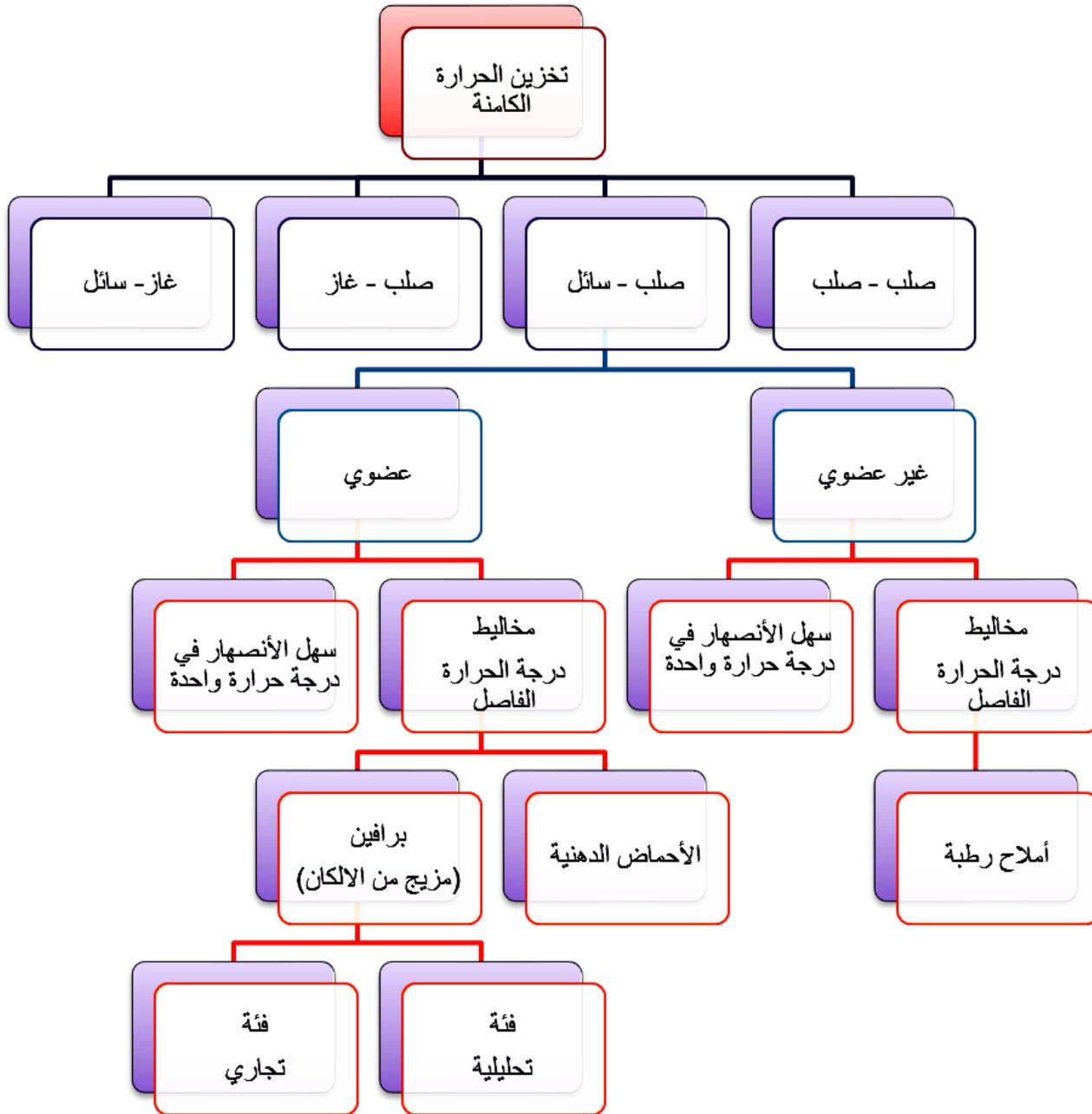
على عكس تخزين الحرارة السائل فإن تخزين الحرارة في المواد الصلبة يمكن أن يستعمل في التطبيقات عالية أو منخفضة الحرارة دون وجود مشكل الضغط المطروحة في حالة الماء، كما تجنبنا مشاكل أخرى تسببها بعض السوائل مثل: التآكل. يوجد تنوع كبير في المواد الصلبة المستعملة ف نجد مثلاً: مادة حديد الزهر (fontela) هي المادة الأكثر ملائمة نظراً لكثافة تخزينها التي تتعدى الماء لكن هذه المادة تبقى مكلفة مقارنة بالمواد الأخرى مثل: (الطوب - الخرسانة - الحجر - الرمال) بالنسبة لتطبيقات الشمسية نجد الخرسانة و الحجر هي الأكثر استعمال في مجال السكن.

وهذا التخزين يستعمل عند درجة حرارة أكبر من (100°C) بالتعاون مع تدفئة الهواء بالطاقة الشمسية علماً أن الحصى يمكن أن يستغل في درجة حرارة تفوق حتى (1000°C) .

من أكثر المواد المستعملة في تخزين الحرارة الحساسة عند الدرجة (20°C) نجد: الطين والطوب والحجر الرملي و الخشب و الخرسانة و الزجاج والألمنيوم و الحديد والنحاس [12].

2.1.1.1.I. تخزين الطاقة الحرارية بالحرارة الكامنة

خلال مرحلة تغيير المواد، (صلب/سائل أو سائل/بخار)، الطاقة الحرارية يمكن تخزينها بطريقة متساوية الحرارة اعتماداً على الحرارة الكامنة، خاصية جوهرية للمادة وكمية المواد المستخدمة في هذا النوع من التخزين يمكن أن يكون فعال من أجل اختلاف درجة حرارة منخفضة جداً. المواد المستخدمة في هذه الحالة تسمى: مواد تغيير الحالة "MCP" (Matériaux à Changement de Phase). تم دراسة العديد من مواد تغيير الحالة المحتملة و لكن عدد قليل يتم تسويقها على هذا النحو التالي:



الشكل 2: تصنيف مواد تغيير المرحلة.

كمية الطاقة المخزنة في مواد تغيير المرحلة هي مجموعة الطاقة المخزنة الحساسة و الطاقة الكامنة وفقا للعلاقة (2.1). معظم الطاقة المخزنة مضمونة في انتالبي تغيير الحالة للمواد .

$$Q = \int_{T_{\text{froid}}}^{T_{\text{fusion}}} m \cdot C_{p,s} \cdot dT + m \cdot \Delta L + \int_{T_{\text{fusion}}}^{T_{\text{chaud}}} m \cdot C_{p,l} \cdot dT \quad (2.1)$$

حيث أن:

Q: هي كمية الحرارة المخزنة (J).

m: هي كتلة مواد التخزين (kg).

$C_{p,l}$ ، $C_{p,s}$: هما السعة الحرارية للمواد الصلبة و السائلة على التوالي ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$).

ΔL : أونتالبي متناهية الصغر لتغيير الحالة ($J \cdot kg^{-1}$).

dT: هي اختلاف متناهي الصغر لدرجة الحرارة أثناء خطوات الشحن (K).

استخدام تخزين الحرارة الكامنة يقلل من أحجام التخزين بعكس تخزين الحرارة الحساسة تحت درجة حرارة عمل متساوية في الشحن والتفريغ، في المقابل التقنيات المستخدمة لنقل الحرارة و اختيار المواد هي الأكثر تعقيدا. المشاكل لا تزال قائمة بما في ذلك على وجه الخصوص، العمر الافتراضي للمواد التي تتحلل بعد عدة دورات من الاندماج و نقل الحرارة التي يصعب تحسينها [13].

1.2.1.1.I الحرارة الكامنة للانصهار

عبارة عن كمية الحرارة اللازمة لتحويل كتلة واحدة من المادة من الحالة الصلبة إلى الحالة السائلة أو بالعكس يرمز لها بالرمز L_f وتقدر حسب النظام الدولي بوحدة J/kg أو cal /g، و حددت L_f للثلج بـ:

$$(3.35 \times 10^5 \text{ J/kg})$$

يعبر عن الطاقة الحرارية في هذه الحالة بالعلاقة التالية:

$$\Delta Q_h = m \times L_f \quad (3.1)$$

حيث تشير إلى أن الطاقة المقدمة تعمل على تغيير في حالة المادة وليس تغيير في درجة الحرارة نفسها.

2.2.1.1.I الحرارة الكامنة للتبخير

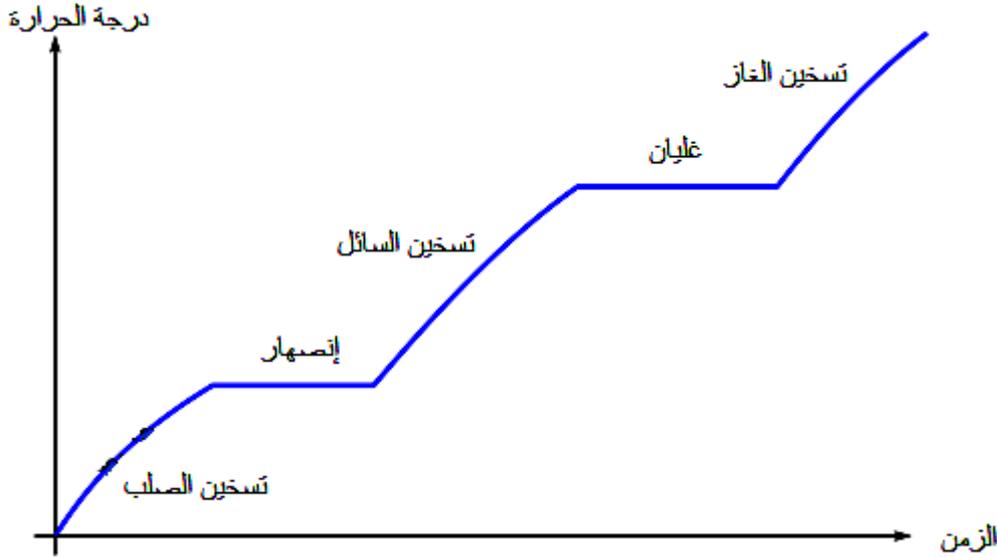
عبارة عن الحرارة اللازمة لتحويل كتلة واحدة من المادة من الحالة السائلة إلى الحالة الغازية أو العكس و يرمز لها بالرمز L_v وتقدر حسب النظام الدولي بوحدة J/kg أو cal /g، و حددت L_v للماء بـ:

$$(2.26 \times 10^6 \text{ J/kg})$$

يعبر عن الطاقة الحرارية في هذه الحالة بالعلاقة التالية:

$$\Delta Q = m \times L_v \quad (4.I)$$

يعد تخزين الحرارة الكامنة واحدة من أكثر الطرق كفاءة لتخزين الطاقة الحرارية لاستعادة الطاقة المخزنة واستئناف حالته الأولية. يوضح الشكل 3 الخطوات المختلفة من نظام التخزين هذا.



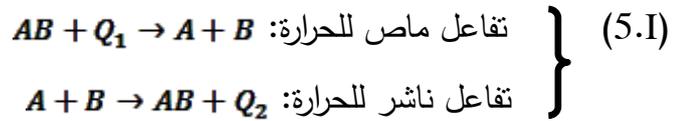
الشكل 3: الخطوات المختلفة من نظام التخزين.

عندما نقوم بتسخين مادة صلبة نقية تبدأ درجة حرارته في الارتفاع حتى تصل إلى نقطة الانصهار وتحول الحرارة التي يمتصها الجسم الصلب إلى سائل. خلال تلك الفترة تظل درجة حرارة النظام ثابتة حتى تتحول كل المادة الصلبة إلى حالة سائلة (تحول الطور). وعندما تتحول كل قطعة المادة الصلبة إلى سائل تبدأ درجة حرارة السائل في الزيادة مع استمرار التسخين. ويستمر ارتفاع درجة حرارة السائل بمواصلة التسخين حتى تصل درجة حرارته إلى نقطة الغليان، وعندها يبدأ السائل يتحول إلى بخار. وهذا أيضا هو تحول طور آخر. خلال عملية التبخير تبقى درجة حرارة النظام ثابتة. فمثلا بالنسبة للماء تظل درجة حرارة الماء الذي يغلي ثابتة عند درجة 100°C حتى يتحول كل الماء إلى بخار. في هذه الأثناء يخزن البخار الحرارة التي اكتسبها خلال تحوله من حالة سائلة إلى طور حالة غازية في هيئة حرارة كامنة. كمية الحرارة اللازمة لانصهار المادة تسمى حرارة انصهار أو أنتالبي الانصهار أو الحرارة الكامنة للانصهار، وهي تقاس J/mol ، أو تقاس J/kg .

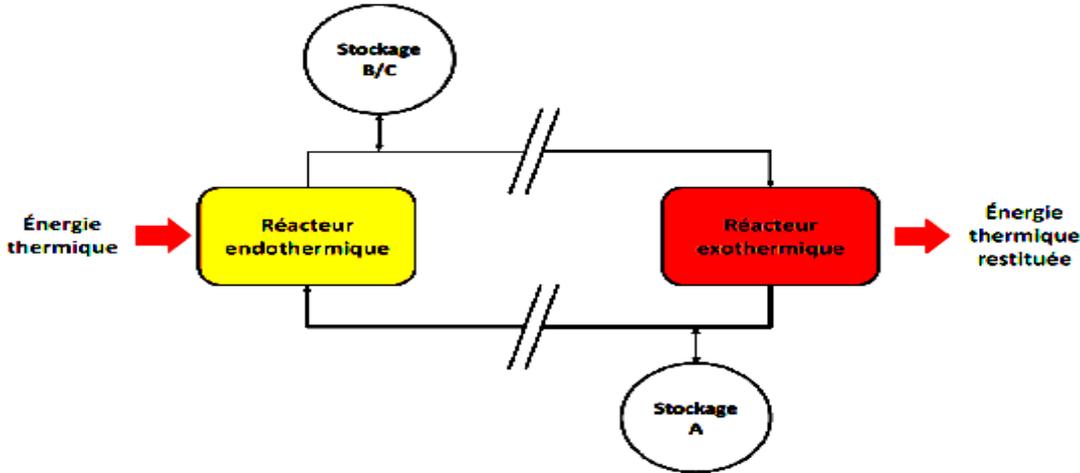
ويبين الشكل البياني تغير درجة الحرارة (المحور الرأسي) للمادة الصلبة مع زمن التسخين (المحور الأفقي). و نرى ثبات درجة الحرارة عند تحول المادة الصلبة إلى سائل، وكذلك ثبات درجة الحرارة عند نقطة الغليان أثناء تحول السائل إلى بخار.

3.1.1.I. التخزين الحراري الكيميائي

بعض التفاعلات الكيميائية يمكن استخدام التفاعل العكوس كحل للتخزين الحراري للطاقة. هذا النوع من التخزين يسمى التخزين الحراري الكيميائي يتم وصف المبدأ الأساسي للتخزين الحراري الكيميائي بواسطة المعادلة (5.I) [14]:



بالنسبة لهذا النوع من التخزين يجب أن يكون التفاعل عكوسا تماما، بحيث تكون العملية لا تفقد قدرتها التخزينية خلال الدورات. الرسم التخطيطي يظهر لنا تخزين الحرارة بالحرارة الكيميائية في الشكل 4.



الشكل 4: رسم تخطيطي للتخزين الكيميائي الحراري.

خلال مرحلة الشحن، الطاقة الحرارية المنتجة من مصدر الحرارة الخاصة في مجال الطاقة الشمسية يسمح بتنفيذ تفاعل ماص للحرارة، نتائج هذا التفاعل (B,A) يكونا منفصلين ومخزينين. عندما يجب استعادة الطاقة الحرارية فإنه يتم توصيل المواد المخزنة (B,A) في نهاية التفاعل العكوس الناشر للحرارة، و بالتالي استعادة الحرارة و تجديد المنتج الأولي (AB).

كمية الطاقة التي يمكن تخزينها في تفاعل كيميائي وفقا للعلاقة (5.I) هي المجموع للطاقة الحساسة للمواد و حرارة التفاعل. بحيث كمية الطاقة المخزنة يتم التعبير عنها وفقا للعلاقة (6.I) :

$$E = \sum_{i=1}^N \int_{T_i}^{T_f} m_i \cdot C_{p,i} \cdot dT + \Delta H_r \cdot n_r \quad (6.1)$$

حيث :

E : هي مقدار الطاقة المخزنة (J).

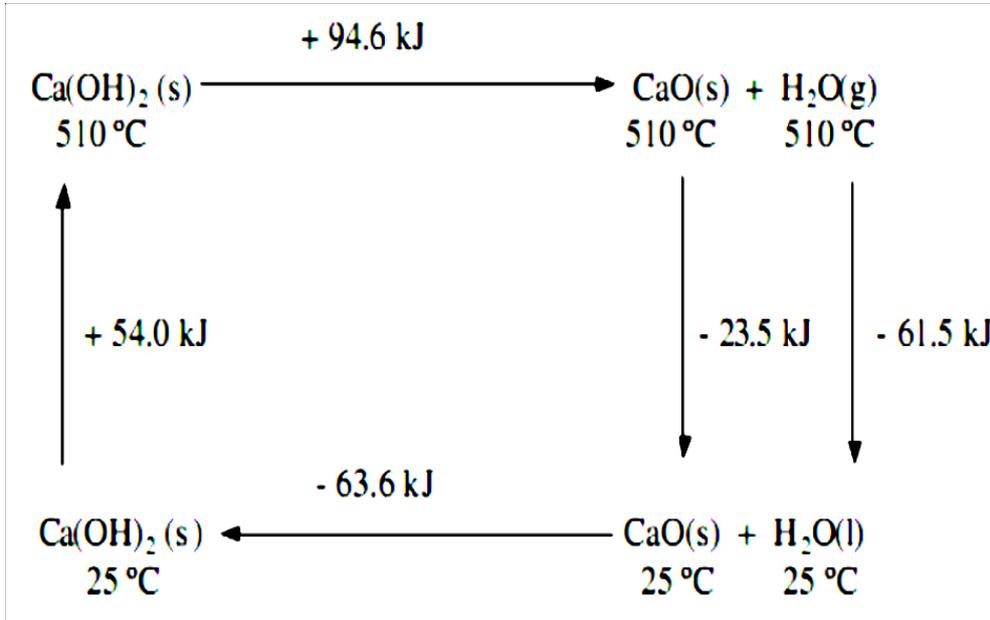
n_r : هي عدد المولات للمنتج (A) . (mol).

ΔH_r : هو أنتالبي التفاعل ($J \cdot mol^{-1}$).

بشكل عام يغطي التخزين الحراري الكيميائي ظاهرتين هما "الامتصاص، التفاعل الكيميائي"، يعد التخزين الحراري بالامتصاص أمرا مثيرا للاهتمام لتخزين درجات الحرارة المنخفضة ($T \approx 80^\circ C$) بينما يستخدم لتطبيقات الطاقة الشمسية المركزة ($1000^\circ C \text{---} 200^\circ C$)، فان تفاعلات التوليف الكيميائي هي الأكثر ملائمة، ويرجع أنظمة التخزين عن طريق الامتصاص والتفاعل الكيميائي، الشكل 5 [15].

في التخزين الحراري الكيميائي يتم استخدام أزواج من العناصر الكيميائية. من بين تفاعلات الأكثر استخداما

- التحلل العكسي لـ هيدروكسيد الكالسيوم ($Ca(OH)_2$)، والذي كان موضوع عدة مشاريع بحثية [16،17،18]. المبدأ الأساسي لهذا التفاعل في الشكل 5 بحيث أن التفاعل تم عند درجة حرارة عالية نسبيا ($510^\circ C$):



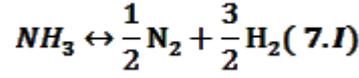
الشكل 5: المبدأ الأساسي لتفاعل تحلل و تشكيل $Ca(OH)_2$.

• اجتذب تفكك الأمونيا انتباه الباحثين لأكثر من عشرين سنة [19،20] بسبب اثنين من المزايا

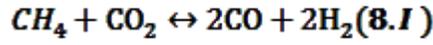
الرئيسية، التي هي "الجدوى في حرارة المحيط وسمية أمونيا المنخفضة" بالمقارنة مع غيرها من

المنتجات الكيميائية. العيب الرئيسي لهذا التفاعل هو أنتالبي التفاعل ($66,5 \text{ mol}^{-1} \cdot \text{kg}$)، بحيث

تعتبر منخفضة مقارنا بتفاعلات أخرى مثل: إصلاح الميثان بثاني أكسيد الكربون
($247\text{kg}\cdot\text{mol}^{-1}$).



• إصلاح الميثان بواسطة ثاني أكسيد الكربون:



مقارنة بأنواع تخزين أخرى لا يتطلب التخزين الحراري الكيميائي عزل النظام، بحيث يجعل من الإمكان الحصول على كثافة تخزين كبيرة، واستعادة طاقة تتم في درجات حرارة عالية، من ناحية أخرى هذه التكنولوجيا معقدة وباهظة الثمن ومازالت قيد التطوير.

2.1.I. مقارنة لمختلف أنواع تخزين الطاقة الحرارية

يوضح الجدول 1 خصائص ثلاثة أنواع لتخزين الطاقة الحرارية. تم اختيار ستة معايير أساسية:

- كثافة الطاقة.
- درجة حرارة التخزين .
- وقت التخزين.
- نقل الحرارة.
- نضج النظام.
- تركيب تنفيذ النظام.

حاليا التخزين الحراري الأكثر نضجا هو التخزين الحراري بالحرارة الحساسة.

		تخزين حساس	تخزين كامن	تخزين الحراري الكيميائي
كثافة الطاقة	حجمي	ضعيف ~15 - 60 $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-3}$	متوسط ~ 50 - 100 $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-3}$	مرتفع ~100 - 500 $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-3}$
	كتلي	ضعيف ~ 0,02 - 0,03 $\text{kWh}\cdot\text{kg}^{-1}$	متوسط ~ -0,05 - 0,1 $\text{kWh}\cdot\text{kg}^{-1}$	مرتفع ~0,5 - 1 $\text{kWh}\cdot\text{kg}^{-1}$
درجة حرارة التخزين		درجة حرارة مرحلة الشحن	درجة حرارة مرحلة الشحن	درجة حرارة الشحن أو درجة الحرارة المحيطة

مدة التخزين	محدودة (الخسائر الحرارية)	محدودة (الخسائر الحرارية)	غير محدود من الناحية النظرية
نقل الطاقة	مسافة منخفضة	مسافة منخفضة	مسافة غير محدودة من الناحية النظرية [31]
نضج	النطاق الصناعي (MWe 20)	مقياس تجريبي (kWth 100)	مقياس المختبر (kWth 5-1)
تكنولوجيا	بسيط	متوسط	معقد

الجدول 1: خصائص أنظمة تخزين الحرارة المختلفة.

2.I. ضروريات التخزين الحراري

إن تخزين الطاقة الحرارية هو الأداة التي يمكن أن تشارك في القدرة التنافسية للكثير من المجالات والتقنيات مثل شبكات الحرارة والبرودة و محطات الطاقة الشمسية، الأعمال الزراعية، والإسكان... الخ.

1. استخدام تخزين الطاقة الحرارية لأنظمة تسخين المياه وتسخين الهواء وكما تستخدم في التدفئة، وتجفيف المحاصيل و مزارع الدواجن... الخ [21].

2. يتم استخدام درجة حرارة انصهار منخفضة، (PMC) في أنظمة التبريد وتكييف الهواء [22].

3. تستخدم توليد الكهرباء عن طريق محطات البخار الجاف و محطات التبخير و محطات الدائرة المزدوجة.

4. تستخدم بصفة رئيسية في تدفئة مياه حمامات السباحة [23].

5. كما تستخدم في مجالات عديدة كتدفئة المنازل، وطهي الطعام في أفران شمسية مصممة لذلك، والتي تعتمد غالباً على تركيز الأشعة الشمسية من منطقة واسعة على نقطة مركزية، بالإضافة إلى تسخين المياه، والتي تفيد في أغراض عدة كالاستحمام، و غسل الملابس، ومياه السباحة.

6. استخدمت الطاقة الحرارية الجوفية قديماً خلال استغلال مياه الينابيع الحارة حيث يرجع تاريخ استعمالها إلى أكثر من 10.000 سنة عندما استخدم الهنود الحمر الينابيع الساخنة لطهي طعامهم [24].

الفصل الثاني التحقيق الشمسي

1.1.II. التجفيف الشمسي

هو عملية تستخدم لإزالة المياه من الجسم الرطب، وهذا الأخير قد يكون جسم صلب أو سائل. والهدف من تجفيف المنتج هو تخفيض محتواه المائي، بحيث يصل نشاطه المائي إلى قيمة تسمح بحفظه عند درجة حرارة عادية على مدار فترات زمنية طويلة (بدرجة السنة) [25]. ويمكن الحصول على إزالة أو فصل الماء ميكانيكيا أو حراريا.

1.1.II. نظريات وصفية لظاهرة التجفيف

تم اقتراح عدة نظريات لشرح ظاهرة التجفيف، والتي تجعل من الممكن دراسة نقل الكتلة والحرارة في المنتج. يمكن تصنيف هذه النظريات على النحو التالي:

• نظرية انتشار السائل (نموذج Sherwood (1929) [26] ، [27]

تفترض هذه النظرية أن حركة الماء نحو سطح المادة الصلبة يحكمها قانون Fick، وهو ما يعكس ظاهرة هجرة بخار الماء من وسط ذو التركيز العالي للماء إلى وسط ذو التركيز المنخفض للماء [28]. وبعبارة أخرى، (من لب المادة لتجف نحو سطحها، ثم على السطح يحدث التبخر بسبب مصدر طاقة خارجي). هذه النظرية مرضية لتجفيف الطعام والحبوب، وهذا ليس هو الحال بالنسبة للمنتجات الأخرى. يعتمد الانتشار على العديد من العوامل، مثل طبيعة المادة الصلبة، وطبيعة الرطوبة، ومحتوى الرطوبة، ودرجة الحرارة.

• نظرية الشعيرات (1937) [26]، [27]

تعتمد هذه النظرية على أن حركة الماء في المسام ناتجة عن قدرة الشفط، التي تم دراسة آليتها بواسطة Jurin. عند وضع شعيرة في خزان مملوء بالماء، هناك ارتفاع للسائل في الأنبوب نسبة إلى مستوى الخزان. يتم تطبيق هذه النظرية على المنتجات المسامية أو المنتجات الحبيبية. يوضح Ceaglske و Hougén أنه بالنسبة لتجفيف مادة حبيبية صلبة، تدفق المياه يرجع بالكامل إلى قوى شعيرات، ومستقلة تماما عن التركيز [29].

• نظرية Whitaker (1977) [30]

يقترح Whitaker طريقة جديدة لكتابة معادلات الحرارة ونقل الكتلة في الوسائط المسامية. هذا يطبق نظام معادلات الحفاظ على الحرارة والكتلة، للحالات الثلاث الموجودة في الوسط (الصلبة والسائلة والغازية)

وقوانين الديناميكا الحرارية. يمكن اعتبار هذه الدراسة نقطة انطلاق للنظريات الحديثة، لأنها تعطي توافق جيد للغاية مع النتائج التجريبية.

• نظرية Luikov (1934) [29]

اكتشف Luikov ظاهرة الانتشار الحراري للرطوبة. بحيث اقترح أن درجة حرارة التدرج هو واحدة من العوامل التي تسبب نقل الرطوبة. كان يعتمد على استخدام المعادلات الأساسية لديناميكا الحرارية، وعملية اللارجعة للتحقق من أن نقل البخار والسائل ينقسم إلى قسمين: تدرج التركيز، وتدرج درجة الحرارة.

• نظرية Krischer-Berger و Pei (1938) [29]

افتراض العالم Krischer، أن أثناء التجفيف والرطوبة في الحالة السائلة تكون بسبب قوى الشعيرات، وفي حالة البخار عند تدرج تركيز البخار.

Berger و Pei، اقترح أن نقل السائل يكون بسبب قوى الشعيرات وتدرج التركيز، و انتشار البخار راجع إلى التدرج في ضغط البخار.

• نظرية Philip و De Vries (1957) [27]

Philip و De Vries، أقترح أن حركة الماء ترجع إلى المسامية وانتشار البخار. تعتمد هذه النظرية على تطوير نظام معادلات يصف الرطوبة ونقل الحرارة في المواد التي يسهل اختراقها.

II.2.1. أوضاع التجفيف

من بين تقنيات إزالة المياه حرارياً، يمكن تنفيذ آليتين لاستخلاص الماء الموجود في الجسم الرطب عن طريق التبخر: عمليات الغليان، وعمليات التدرج [26]، [25].

- بواسطة الغليان: يتم إحضار المنتج إلى درجة الحرارة بحيث يصبح ضغط بخار الماء للمنتج مساوياً لإجمالي الضغط المحيط السائد في المجفف. وبالتالي يتم تحديد درجة حرارة السائل عن طريق ضغط الغليان (على سبيل المثال 100°C للماء في $1,013\text{atm}$) [26]، [25].

- بواسطة التبخر: يتم إحضار الطاقة بواسطة غاز ناقل متحرك، عادة يكون الهواء الساخن. بشرط تكون درجة حرارة هذا الغاز أعلى من درجة حرارة المنتج، ويكون ضغط بخار الماء P في المنتج أكبر من الضغط الجزئي للمياه P_i في الجو المحيط [26]، [25]. هناك تجفيف عن طريق التدرج، إذا P_t هو

الضغط الكلي في التثبيت، التأكد من عدم المساواة: $P < P_i < P_t$. هو في الواقع انتقال الكتلة عن طريق التدرج ضغط بخار الماء.

قد تتجح هاتان الآليتان معًا أثناء عملية التجفيف أو تتعايش في منتج ما في لحظة معينة [25]. يستخدم التجفيف في الطرق الثلاثة لنقل الحرارة بواسطة الوصل الحراري، بواسطة الحمل الحراري و الإشعاع. وكذلك نقل المواد، وتستخدم هذه وحدها أو مجتمعة مع بعضها البعض [31].

1.2.1.II. التجفيف بواسطة التوصيل الحراري

في هذا الوضع يتم توفير الطاقة اللازمة للتجفيف عن طريق الاتصال المباشر للمنتج بسطح ساخن (جدار ساخن)، و لا يتم إحضارها بواسطة غاز يتحرك حول المنتج ليتم تجفيفه.

التدفق الحراري في وضع النقل الحراري هذا يعبر عنه بالعلاقة (1.II) التالية:

$$\frac{Q}{A} = \lambda \frac{dT}{dt} \quad (1.II)$$

بحيث أن:

λ : هي الموصلية الحرارية ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$).

$\frac{dT}{dt}$: هو تغير درجة حرارة بين الجدار الساخن والمنتج (K).

2.2.1.II. التجفيف بواسطة الحمل الحراري

في التجفيف الصناعي، هو الأكثر شيوعا في عالم التجفيف، بحيث إنه ينطوي على ملامسة غاز (هواء) يتدفق في نظام مضطرب بشكل عام حول الجسم ليتم تجفيفه، والذي قد يكون في شكل جزيئات أو قطرات أو ألياف، أو الصفائح.

من أجل التجفيف الحراري، يتم تحديد تبادل الحرارة والكتلة بين المنتج المراد تجفيفه وهواء التجفيف بواسطة معاملات النقل على السطح، والتي تعتمد على خصائص الهواء (السرعة، درجة الحرارة والرطوبة).

في وضع الحراري هذا، يتم نقل الحرارة مباشرة عن طريق سائل نقل الحرارة، الذي يخزن الحرارة (الهواء الساخن، البخار، الماء، إلخ). الحمل الحراري هو وضع نقل سريع.

بشكل عام، يتم تقليل وقت التجفيف عند زيادة الفرق في درجة الحرارة بين السائل والمنتج. ومع ذلك، فإن الحساسية الحرارية للمنتج (التي تتميز بأقصى درجة حرارة يمكن أن يتحملها) تحد من قيمة الفرق، خاصة في نهاية التجفيف [26].

يستخدم هذا النوع من النقل المعادلة (2.II) التالية:

$$Q = \alpha A(Ta - Ts) \quad (2.II)$$

بحيث أن:

Q: هي كمية الحرارة المنقولة لكل وحدة زمنية (W).

A: هو سطح التبادل (m^2).

(Ta - Ts): هو الفرق بين درجة حرارة هواء التجفيف ودرجة حرارة سطح المنتج المراد تجفيفه (K).

α : هو معامل تبادل الحمل الحراري ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$).

3.2.1.II. التجفيف بالشعاع الحراري

هذا الوضع مخصص للمنتجات المصفحة (الورق المقوى، اللحم)، أو الألياف (النسيج، الورق)، و أيضًا المنتجات الحبيبية ذات السماكة المنخفضة. بحيث يتم تجفيف المنتجات في هذا الوضع من التجفيف بواسطة طاقة الموجات الكهرومغناطيسية (الإشعاع)، أو عن طريق رفع درجة حرارة باعثة للأشعة تحت الحمراء. كمية الحرارة التي تنتقل إلى المنتج لكل وحدة زمنية في هذا الوضع من النقل الحراري تعطى بالعلاقة (3.II) التالية:

$$Q = A_1 \cdot C \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (3.II)$$

$$C = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)} \quad (4.II)$$

T_1 : درجة حرارة مصدر الانبعاث (K).

T_2 : درجة حرارة المنتج (K).

A_1 : مساحة الجسم المستقبلة للشعاع (m^2).

A_2 : مساحة مرسل الأشعة تحت الحمراء (m^2).

ϵ_1 : الابتعاثية للمنتج.

ϵ_2 : انبعاثي المصدر.

II.1.2.4. نقل المواد

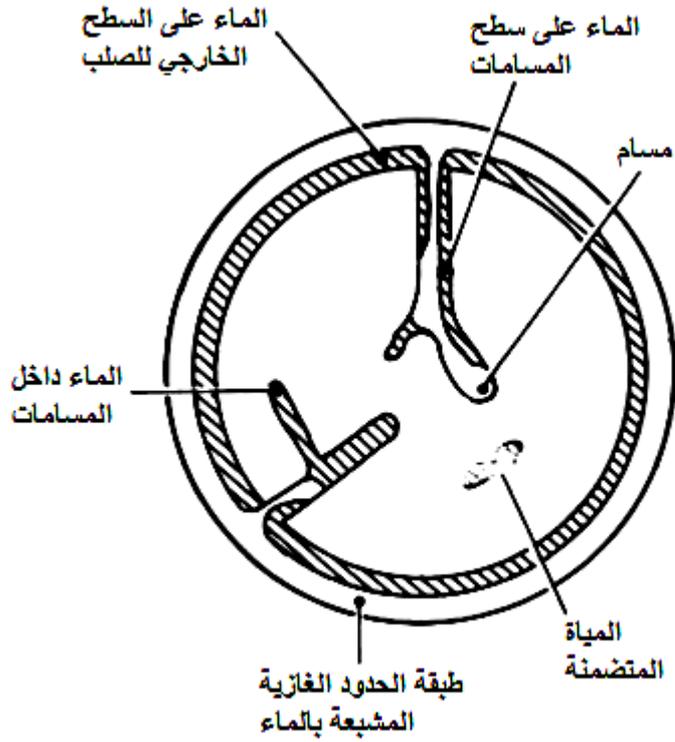
يلعب نقل الكتلة دوراً مهماً للغاية في عمليات الوحدة الأساسية، مثل التجفيف. في هذه العمليات الفيزيائية، بحيث تعد مقاومة انتقال الكتلة هي العامل المقيد، على الرغم من أن نقل الحرارة وتدفق المائع متسبان في التجفيف والمحافظة، بحيث أن نقل الرطوبة، الأبخرة، والغازات والمركبات العطرية يؤثر على نوعية الطعام [32].

تنتج الصعوبات في تطبيق نظريات نقل الكتلة في عمليات تصنيع الأغذية عن التركيبات الفيزيائية المعقدة والتركيب الكيميائي للأطعمة التي تختلف لنفس السلعة وتغير أثناء المعالجة [32].
تجدر الإشارة إلى أن هجرة الماء (السائل أو البخار) يمكن أن يتم عن طريق "الترشيح" من خلال المنتج المسامي تحت تأثير فرق الضغط بين الداخل والسطح [25].

II.1.2.5. نقل مياه التجفيف

الأجسام الصلبة المراد تجفيفها، بواسطة المسام الذي يسمح بنقل الماء من لب المادة الصلبة إلى سطحها. يمكن أن توجد الرطوبة على السطح الخارجي للمنتج وفي المسام أو داخل المادة نفسها الشكل (II.1)[26].
يمكن وصف التجفيف بأنه نقل المياه إلى جانب نقل الحرارة في مادة مسامية غير مشبعة. في المنتجات العضوية، يكون النقل الداخلي للمياه في كثير من الأحيان ظاهرة الحد. يؤثر حجم المسام وتوزيع أشعة المسام في المنتج على الطبيعة الاسترطابية للمنتج (كلما كانت المسام أصغر، كلما كانت الشخصية الاسترطابية مهمة) [25].

يتطلب تبخير الماء إلى مصدر طاقة من خارج المنتج، مما يتسبب في هجرة الماء إلى الوسط المحيط. بحيث أن سرعة انتقال المادة تختلف مع مرور الوقت. يعتمد ذلك على الظروف المحيطة (درجة الحرارة، الرطوبة النسبية، سرعة الغازات الملامسة للمنتج)، و أيضاً على طبيعة المادة الصلبة والماء [26].



الشكل 6: التمثيل التخطيطي للمادة الصلبة الرطبة.

II.3.1. الوصف الفيزيائي للتجفيف [26]

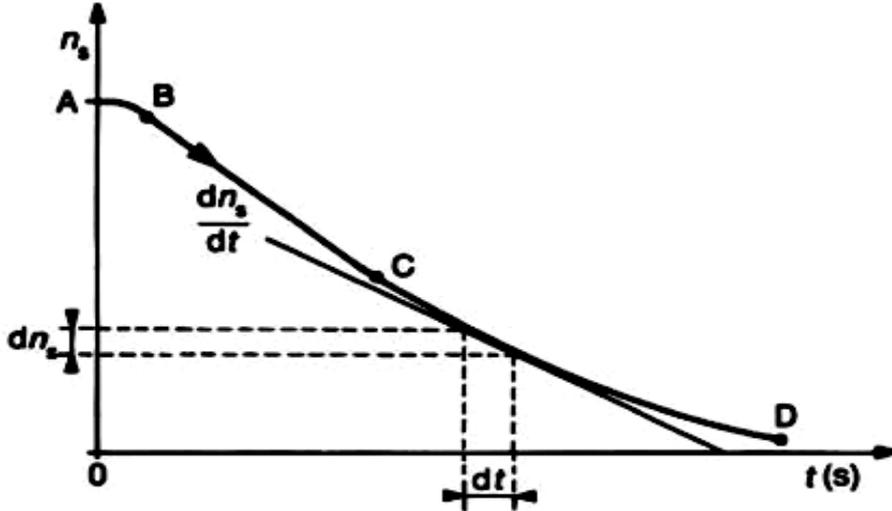
خصائص التجفيف للمنتج لها وصف أفضل عندما تمثله المنحنيات. أحد أكثر الأشكال إثارة للاهتمام والتي لا غنى عنها هو محتوى رطوبة المنتج n_s بدلالة الزمن t الوارد في الشكل 7، أو سرعة تجفيف dn_s / dt بدلالة الزمن t معطى في الشكل 8. منحنيات التجفيف هذه ذات الشكل الأكثر اكتمالا (وهذا يعني عند وجود جميع مراحل التجفيف).

اقترح Krisher طريقة أخرى للتمثيل؛ و هو سرعة تجفيف dn_s / dt بدلالة محتوى الرطوبة n_s كما هو موضح في الشكل 9.

تبرز هذه الأنواع الثلاثة من التمثيل وجود عدة مراحل خلال عملية التجفيف. ليست كلها قابلة للملاحظة بشكل منهجي. في حالة تحديدها، وهي كالتالي:

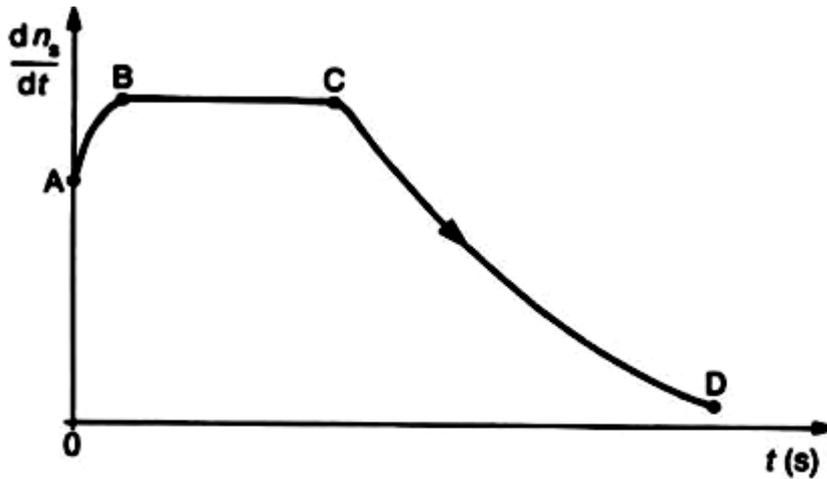
- المرحلة الانتقالية لتسخين المنتج المراد تجفيفه (AB).
- مرحلة ثبوت سرعة التجفيف (BC).

- مرحلة انخفاض سرعة التجفيف (CD).
C: هي النقطة الحاسمة في التجفيف.



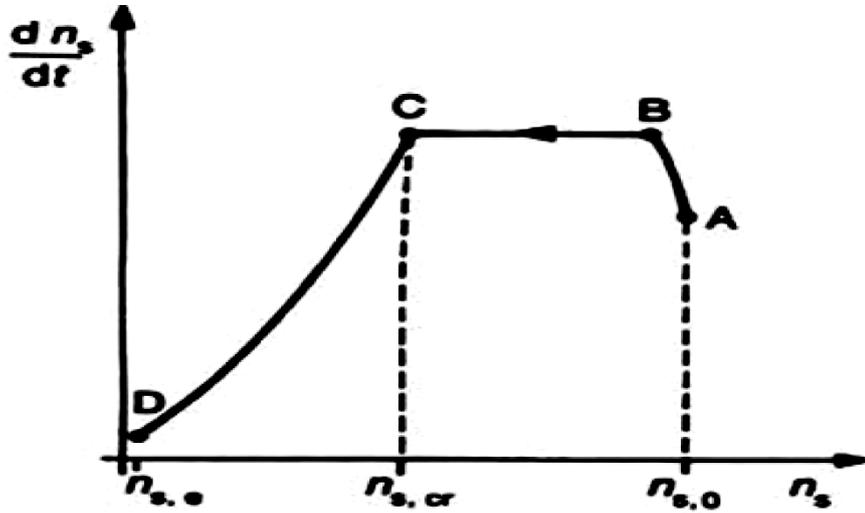
n_s : (كيلو جرام من الماء لكل كيلو جرام من المادة اللامائية) وهو محتوى الرطوبة للمنتج ليتم تجفيفه.

الشكل 7: منحنى التجفيف $f(t) = n_s$



$\frac{dn_s}{dt}$: (بالكيلو جرام من الماء لكل كيلو جرام من المواد اللامائية في الثانية الواحدة). وهي سرعة التجفيف

الشكل 8: منحنى التجفيف $f(t) = \frac{dn_s}{dt}$



$n_{s,e}$: معدل الرطوبة عند التوازن في نهاية التجفيف.
 $n_{s,cf}$: معدل الرطوبة الحرجة.
 $n_{s,0}$: معدل الرطوبة الأولي للمنتج.

الشكل 9: منحنى التجفيف $f(n_s) = \frac{dn_s}{dt}$

• المرحلة الانتقالية (AB)

A: هي القيمة الأولية للرطوبة.

عند وضع منتج ذو درجة حرارة ورطوبة ثابتة في وسط التجفيف، يضبط المنتج درجة حرارته على درجة الحرارة الرطبة للمادة الصلبة، لأن المنتج أبرد من الهواء والضغط الجزئي لبخار الماء على سطح المنتج ضعيف. في هذه الحالة، يتسبب الهواء الساخن في ارتفاع درجة حرارة المنتج حتى يعوض نقل الحرارة تمامًا عن نقل المواد [27].

• مرحلة ثبات سرعة التجفيف (BC) [26]، [29]

خلال هذه المرحلة، التي تستمر حتى النقطة الحرجة، يكون سطح المنتج مشبعًا بالماء. على شكل طبقة حدودية، حيث يكون ضغط بخار الماء مساويًا تقريبًا لضغط الماء النقي في نفس ظروف درجة الحرارة والضغط. ينتج هذا الموقف إما عن وجود الماء بكميات كبيرة على سطح المنتج، أو من انتشار الماء، داخل المنتج إلى سطحه الخارجي. هذه المرحلة هي مماثلة لتبخر السائل.

تظل درجة حرارة المنتج ثابتة ومساوية لدرجة الحرارة الرطبة لسائل التجفيف. خلال هذه الفترة لا تتدخل طبيعة المنتج، على عكس شكل المادة الصلبة يمكن أن يؤثر على سرعة التجفيف خلال هذه المرحلة، بحيث يساوي:

$$\frac{dw}{dt} = M \frac{dn_s}{dt} = K_G \cdot A \cdot (P_s - P_w) \quad (5.II)$$

M: كتلة المنتج المراد تجفيفه (kg).

A: السطح الذي يتم من خلاله نقل الرطوبة (m^2).

P_s: ضغط بخار الماء عند درجة الحرارة T وعلى سطح المنتج، خلال هذه المرحلة، هذا الضغط يساوي ضغط البخار المشبع عند درجة حرارة المنتج أو درجة الحرارة الرطبة (Pa).

P_w: ضغط جزئي لبخار الماء في الهواء (Pa).

K_G: المعامل الكلي لنقل المواد (s/m).

تنتهي هذه الفترة عندما يصل المنتج إلى ما يسمى المحتوى المائي، وهو المحتوى المائي الحرج.

• مرحلة انخفاض سرعة التجفيف (CD) [26]

إنها فترة التباطؤ، حيث تنخفض سرعة التجفيف. يسمى المحتوى المائي المقابل للانتقال بين المرحلتين BC و CD "المحتوى المائي الحرج" أو نقطة التجفيف الحرجة.

لم يعد يتم تعويض تدفق الحرارة المتبادل مع الهواء بالكامل بواسطة الحرارة الكامنة المستخدمة في التبخير، وبالتالي هناك زيادة في درجة حرارة المنتج.

II.4.1.1. المجففات

II.4.1.1. تصنيفات المجففات الصناعية [33]

تصنف المجففات الصناعية وفقا لـ:

(أ) الخاصية الفيزيائية للمادة:

الخواص الفيزيائية للمادة المراد تجفيفها هي أهم عامل في اختيار المجفف.

(ب) طريقة إمدادات الطاقة:

عندما يتم توفير الطاقة للمنتج (نقل الحرارة بالحمل الحراري) عن طريق الهواء الساخن، يتم تصنيف المجفف على أنه الحمل الحراري.

و عندما يتم نقل الحرارة إلى المنتج مع اتصال مباشر، يتم تصنيف المجفف على أنه الوصل الحراري.

ج) نطاق درجة الحرارة:

يمكن تصنيف أنظمة التجفيف وفقاً لنطاق درجة حرارة التشغيل، إما في درجات حرارة عالية أو في درجات حرارة منخفضة. أنواع مجففات الحرارة العالية، يتم استخدامها عندما يتطلب المنتج غازاً ساخناً للغاية، ويبقى متواصلاً حتى يجف المنتج (الخشب على سبيل المثال). بالنسبة لأنواع المجفف في درجات الحرارة المنخفضة، تكون هذه أقل من 100°C .

د) طريقة توزيع الأغذية:

- التجفيف في طبقة رقيقة: يتم وضع الفواكه والخضروات على الرفوف وتجفيفها في طبقة رقيقة عندما يمر الهواء الساخن عبر المنتجات من أسفل إلى أعلى.
- التجفيف في طبقة سميكة: يستخدم هذا النمط من التجفيف بشكل عام في الأعلاف والحبوب والقهوة وما إلى ذلك. يتم نفخ الهواء الساخن في مجموعة من المنتجات، ويستريح على شبكة مثقبة.

II.1.2.4.2. أنواع مختلفة من مجففات الطاقة الشمسية

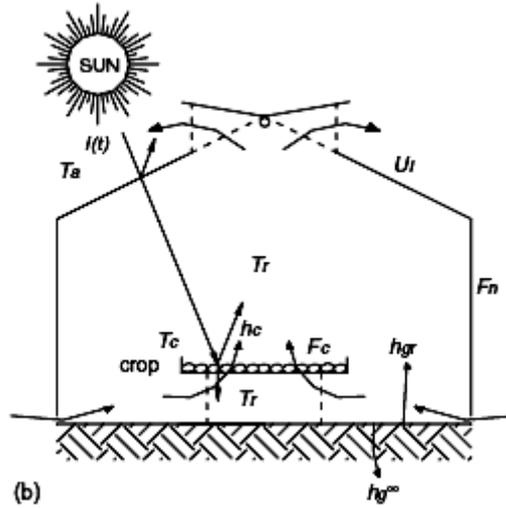
هناك عدة أنواع من مجففات الطاقة الشمسية التي تم تطويرها لخدمة الأغراض المختلفة لتجفيف المنتجات الغذائية الزراعية وفقاً للحاجة المحلية والتوافر [34]. يمكن تصنيف المجففات وفقاً لطريقة استخدامها للإشعاع الشمسي في المجففات الطبيعية والمجففات المباشرة والمجففات غير المباشرة.

- يُقال إن المجفف مباشر، إذا وصل الإشعاع الشمسي إلى المنتج مباشرةً، أما عندما تكون المنتجات محمية من الإشعاع فيعتبر المجفف غير المباشر.

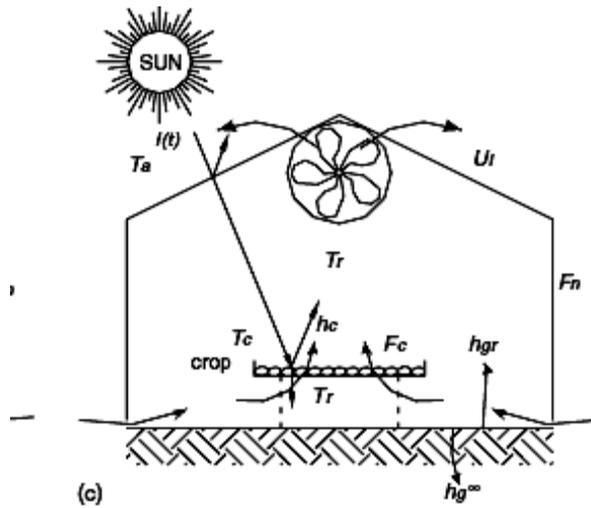
- يُطلق على مجفف الحمل الحراري الطبيعي إذا كان دوران الهواء مزوداً بالحرارة. ومجفف الحمل الحراري ألقسري إذا تم توفير دوران الهواء بواسطة عمل ميكانيكي [35].

II.1.2.4.1. المجففات الطبيعية

تستخدم حرارة الشمس كمصدر طبيعي للحرارة ويستخدم الهواء الجوي كوسيلة للامتصاص ونقل الرطوبة المبخرة من المواد الغذائية للتخلص مما فيها من رطوبة زائدة عن النسبة المسموح بها بعد التجفيف كما هو موضح في الشكل 10.



الشكل 11: رسم بياني لمجفف شمسي مباشر للحمل الحراري الطبيعي.



الشكل 12: رسم بياني لمجفف شمسي مباشر للحمل الحراري القسري (المتعمد).

هذا النوع من التجفيف له ميزتان:

- المنتجات محمية بشكل أفضل من هجوم الذباب والحشرات الأخرى.
- تتعرض لتأثيرات الدفيئة، بنفس طريقة الماص الجامع المستوي، وبالتالي تحسن في التوازن الإشعاعي وزيادة في درجة حرارة المنتج المراد تجفيفه، مما يجعل من الممكن تقليل أوقات التجفيف بشكل كبير مقارنة مع الأنظمة التقليدية.

من بين عيوب هذا النوع من الأجهزة، تدمير بعض الفيتامينات والأكسدة الضوئية للمنتج، وذلك بسبب جزء من الأشعة فوق البنفسجية المنقولة بواسطة الغطاء، وخطر تجاوز درجة الحرارة القصوى المسموح بها من قبل المنتج، ويحدث هذا غالباً بسبب ضعف دوران الهواء الشائع في هذه الأنظمة.

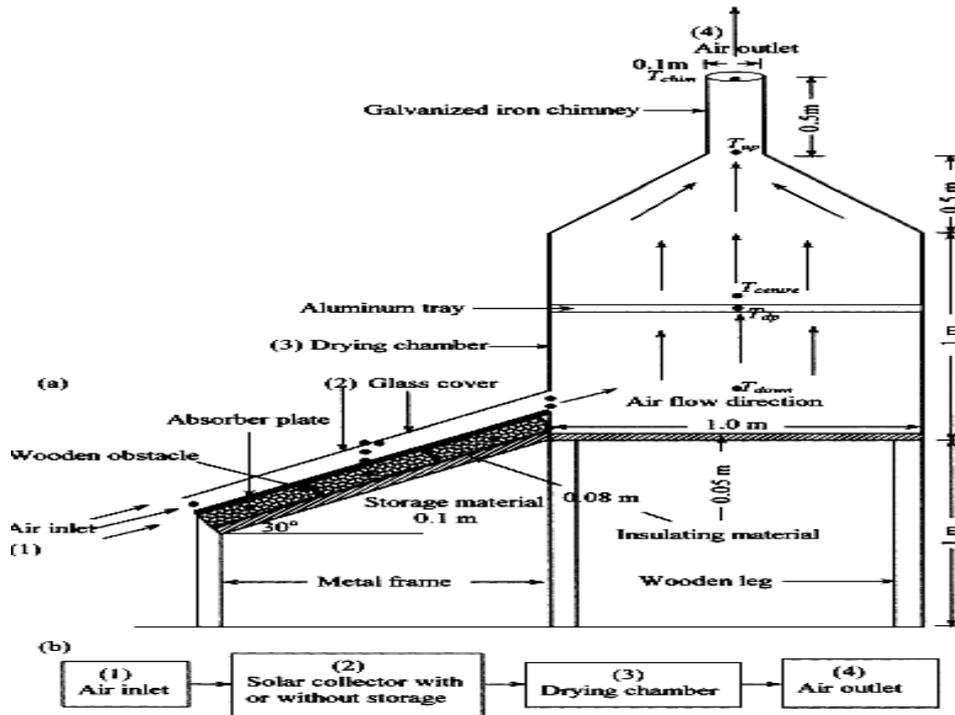
لبناء هذه مجففات، نفرض مجموعة متنوعة من الاحتمالات. و يجب أن تكون المواد والتقنيات المستخدمة متوافقة مع الهواء الدافئ الرطب والمنتجات التي يجب تجفيفها. إذا كان الأمر يتعلق بتحسين العمليات التقليدية، فستوفر هذه أساساً للحلول التقليدية والمكيفة.

تستعمل هذه الأجهزة كحل مناسب للإنتاج الحرفي، وتكون إنتاجيتها منخفضة جداً، حيث تتراوح من 5 إلى 10 kg من المنتجات لكل متر مربع من الرفوف. وتختلف أوقات التجفيف اعتماداً على الظروف المحلية للطقس والمنتجات المراد معالجتها، تختلف بين بضع ساعات وثلاثة إلى أربعة أيام.

3.2.4.1.II مجففات الطاقة الشمسية غير المباشرة

لا يتم تعريض المنتجات المراد تجفيفها مباشرة لأشعة الشمس. بل يتم وضعها على رفوف داخل حاوية أو غرفة فيما يتعلق بالكميات الكبيرة للمنتج المراد تجفيفها الشكل 13.

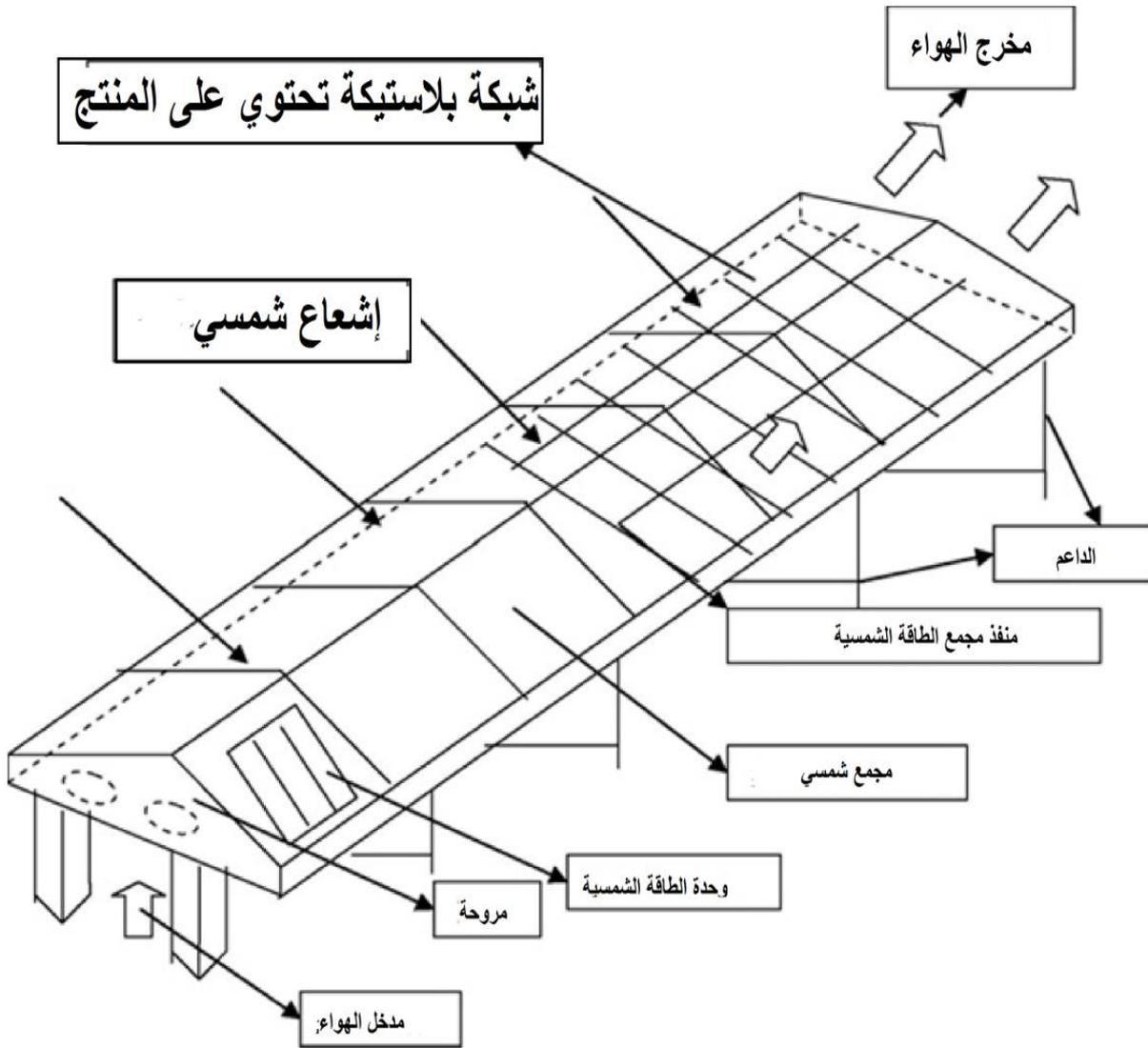
يتم إدخال الهواء النقي في غرفة التجفيف بعد المرور عبر جهاز استشعار الهواء أو أجهزة استشعار التسخين الأخرى، مما يؤدي إلى تسخينه وفقاً لمعدل التدفق المستخدم.



الشكل 13: رسم تخطيطي لمجفف شمسي غير المباشر للحمل الحراري الطبيعي.

II.4.2.4.1.1. نفق مجففات الطاقة الشمسية

في مجفف النفق، يوجد على طول المجفف سلسلة متعاقبة من درجات الحرارة والرطوبة. يكون هذا النوع من المجففات الشمسية متهوي ميكانيكياً، إما مع مروحة بسيطة تقع خارج المجفف أو مع مراوح متعددة موضوعة داخل المجفف الشكل 14.



الشكل 14: رسم تخطيطي لنفق مجفف الطاقة الشمسية.

القصل الثالث الجانب التطبيقي

III.1.1. المقدمة

في هذا الفصل تم تحديد الخيار على استخدام الرمل و الحصى كوسيلة للتخزين الحراري مع العلم أن هذه المواد وفيرة في الجنوب الجزائري، كجزء من هذا العمل الرمل و الحصى تم أخذهما من منطقة ورقلة جنوب الجزائر. انظر للشكل 15.



الشكل 15: تحديد منطقة ورقلة على خريطة الجزائر.

الهدف من هذا الفصل هو تحديد الخصائص الفيزيائية للمواد المستعملة مثل: السعة الحرارية. بحيث تم إجراء الإعداد التجريبي على نطاق صغير. البيانات التجريبية التي تم جمعها تجعل من الممكن وصف السلوك الحراري للرمل و الحصى خلال مرحلة الشحن والتفريغ الحراري، وتحديد أداء النظام.

III.2. وصف المواد المستعملة لعملية التخزين

يتم إجراء اختبارات التوصيف المختلفة في مخبر (الكيمياء العامة والكيمياء التحليلية . رقم: 02/01) بكلية الرياضيات وعلوم المادة جامعة قاصدي مرباح - ورقلة.

III.1.2. السعة الحرارية للمواد

السعة الحرارية، وتسمى أيضاً الحرارة المحددة أو الحرارة الكتلية، هي كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة 01 kg من المواد بمقدار درجة مئوية واحدة. تعد خاصية المادة هذه ضرورية عند إنشاء توازن حراري على

رف التخزين، لأن كمية الحرارة المعقولة التي يتم تخزينها بواسطة المادة الصلبة ترتبط مباشرة بحرارتها المحددة.

يتم تحديد السعة الحرارية للرمل الخشن والحصى بواسطة مسعر حراري وفقاً للخطوات التالية:

III.1.1.2. المواد والآليات المستعملة خلال التجربة

. المواد: ماء مقطر، رمل خشن، حصى.

. الآليات: ميزان كهربائي، مسعر حراري، محرار كهربائي، مسخن كهربائي، بيشر.



الشكل 18: مسخن كهربائي.



الشكل 17: مسعر حراري.



الشكل 16: ميزان كهربائي.

III.2.1.2. طريقة العمل

- بالنسبة لحساب السعة الحرارية للمسعر الحراري $C_{p\text{calorifique}}$:

. قمنا بقياس درجة حرارة المحيط داخل المسعر الحراري والتي هي نفسها حرارة الجو ($T_{amb} = 21C^\circ$).

. بعد ذلك قمنا بقياس كتلة 150 ملتر من الماء المقطر بواسطة ميزان كهربائي ($m_{eau} = 147,2g$)، ثم قمنا

بتسخينها بدرجة حرارة ($T_{eau 1} = 50C^\circ$).

. قمنا بوضع الماء بعد التسخين داخل المسعر الحراري وبعد مدة زمنية قدرها (5 دقائق) ومن ثم قرئنا درجة

حرارة النظام (المسعر + الماء) بحيث تعتبر درجة حرارة التوازن الحراري ($T_{e1} = 44C^\circ$).

- بالنسبة لحساب السعة الحرارية للحصى

. قمنا بقياس 25g من الحصى بواسطة الميزان الكهربائي بعد ذلك سخنا هذه الكتلة لدرجة حرارة ($100C^\circ$)

. ($T_{حصي} =$

. قمنا بوضع 147,2g من الماء المقطر بدرجة حرارة المحيط ($T_{eau2} = T_{eau3} = T_{bam} = 21C^\circ$) وهي نفسها

درجة حرارة المسعر الحراري، وبعد ذلك وضعنا كتلة الحصى المسخنة داخل المسعر الحراري بعد مدة زمنية

قمنا بتسجيل درجة حرارة النظام (المسعر + الحصى + الماء المقطر) وهذا بعد لتوازن الحراري لنظام بحث كانت $(T_{\epsilon 2} = 25C^{\circ})$.

. ونفس الشيء بالنسبة لحساب السعة الحرارية للرمل الخشن للنظام بحيث كانت $(T_{\epsilon 3} = 26C^{\circ})$.
الحساب المفصل في الملحق أ-.

• بالنسبة للسعة الحرارية للمسعر الحراري $C_{P_{calorifique}}$

T_{eau1}	T_{amb}	m_{eau}	$T_{\epsilon 1}$
$50C^{\circ}$	$21C^{\circ}$	147,2g	$44C^{\circ}$

الجدول 2: جدول يوضح نتائج تجربة السعة الحرارية للمسعر $C_{P_{calorifique}}$

. حساب السعة الحرارية للمسعر الحراري حسب المعادلة التالية:

$$C_{P_{calorifique}} = \frac{m_{eau} \times C_{p_{eau}} (T_{\epsilon 1} - T_{eau1})}{(T_{\epsilon 1} - T_{amb})}$$

• بالنسبة لحساب السعة الحرارية للحصى

T_{eau2}	T_{amb}	m_{eau}	$m_{الحصى}$	$T_{الحصى}$	$T_{\epsilon 2}$
$21C^{\circ}$	$21C^{\circ}$	147,2g	25g	$100C^{\circ}$	$25C^{\circ}$

• **الجدول 3:** جدول يوضح نتائج تجربة السعة الحرارية للحصى $C_{p_{الحصى}}$.

. حساب السعة الحرارية للحصى حسب المعادلة التالية:

$$C_{p_{الحصى}} = \frac{(m_{eau} \times C_{p_{eau}} + C_{p_{calorifique}})(T_{\epsilon 2} - T_{amb})}{m_{الحصى}(T_{\epsilon 2} - T_{الحصى})}$$

• بالنسبة للسعة الحرارية للرمل الخشن

T_{eau3}	T_{amb}	m_{eau}	$m_{الرمل\ الخشن}$	$T_{الرمل\ الخشن}$	$T_{\epsilon 3}$
$21C^{\circ}$	$21C^{\circ}$	147,2g	25g	$100C^{\circ}$	$26C^{\circ}$

• **الجدول 4:** جدول يوضح نتائج تجربة السعة الحرارية للرمل الخشن $C_{p_{الرمل\ الخشن}}$

. حساب السعة الحرارية للرمل الخشن حسب المعادلة التالية:

$$C_{p_{الرمل\ الخشن}} = \frac{m_{eau} \times C_{p_{eau}} + C_{p_{calorifique}} (T_{\epsilon 3} - T_{amb})}{m_{الرمل\ الخشن} (T_{\epsilon 3} - T_{الرمل\ الخشن})}$$

. النتائج التي حصلنا عليها: $C_{p_{الحصى}} = 1654,8J \cdot kg^{-1}K^{-1}$; $C_{p_{الرمل\ الخشن}} = 2096,8J \cdot kg^{-1}K^{-1}$

مثال على ذلك قام احد الباحثين بحساب السعة الحرارية للرمل من منطقة وادي سوف بالجزائر بحيث تحصل على قيمة $C_p = 920 \text{ J/kg} \cdot \text{C}^\circ$ [37].

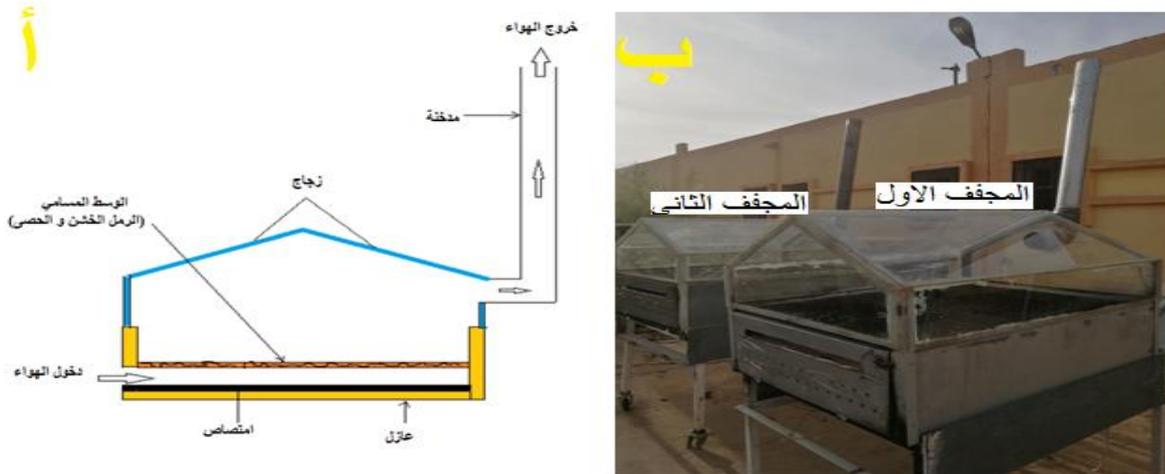
3.III. تصميم نظام التخزين الحراري

في هذه العملية قمنا بالاستعانة بمجففين شمسيين كنظام للتخزين الحراري.

1.3.III. وصف المجفف الشمسي المستعمل لهذه التجربة

في هذه الدراسة، استخدمنا نوعين من مجففات الطاقة الشمسية الحرارية المباشرة الشكل 19 التي صممتها وصنعتها مجموعة من باحثين حول تحويل الطاقة في مختبر (LENREZA) بكلية الرياضيات وعلوم المادة بجامعة قاصدي مرياح ورقلة الجزائر.

يحتوي هذا المجفف الشمسي على أربعة مكونات، نظام عزل حراري (عزل) يقلل من فقدان الحرارة عبر الجدران، لوحة الامتصاص تمتص الإشعاع الشمسي ثم تسخن الهواء الجاف، غطاء زجاجي يسمح بنقل الإشعاع الشمسي، مدخنة شمسية لإخلاء الهواء.



الشكلين 19: (أ) . مخطط المجفف الشمسي المباشر مع دمج الوسط المسامي. (ب) . صورة توضيحية للمجففين .

✓ غرفة التجفيف

تتكون من ستة ألواح زجاجية بسبك يساوي 4 ملم، تميل صفيحتان بزاوية 31.57° تم وضعهما في الجزء الأمامي والخلفي من المجفف واثنان في الأجزاء الجانبية من المجفف الأربعة الأخيرة، ترتكز اللوحة الزجاجية على صفيحة معدنية مجلفنة (السك = 0.5) وهي معزولة حرارياً مع بوليسترين. وتمثل اللوحة الموجودة في جهاز التهوية الصناعي المجفف باب الغرفة الذي تم تثبيته بواسطة صفوف من الثقوب قطرها هو 1 سم والمسافة المحورية بينها تساوي (القطر = 5 سم). تتكون قاعدة الحجرة من صفيحتين مجلفنتين

منفصلتين مع بوليسترين. واحدة من الصفيحة باللون الأسود تعتبر ممتصة للحرارة حيث تضع غرفة التجفيف على دعامة معدنية، يتم ترتيب المواد داخل هذه الغرفة على رف، يتم إيداع الأخير على مقياس من نوع rEnve الموجود أسفل الحجرة (بدقة 0.1).

✓ المدخنة

تحتوي مدخنة المجفف على أسطوانة من صفيحة مجلفنة يبلغ ارتفاعها 01 m وقطرها 10 cm ، وتلعب دور شافطة للهواء الرطب إلى الخارج.
قمنا بوضع جدول يوضح أبعاد مركبات المجففين الشمسين.

وصف المجفف	الرمز	قيمة الأبعاد (m)
عرض مجفف الشمسية	W	0,7
طول مجفف الشمسي	L	1
سمك العزل	E _i	0,04
سمك الزجاج	E _v	0,004
سمك الامتصاص	E _a	0,002
مدخل الهواء	E _a	0,004
قطر المدخنة	D _c	0,1
سمك المتوسطة التي يسهل اختراقها	E _m	0,01
ارتفاع المدخنة	H _c	1

الجدول 5: أبعاد مكونات المجفف [36].

III.2.3.2. مبدأ تشغيل المجفف الشمسي

في هذه الدراسة يمر الإشعاع الشمسي عبر الغطاء الشفاف ويضرب المنتج مباشرة، ويأتي الهواء النقي من الخارج ويخترق الثقوب، كما أن ملامسة ممتص الهواء (أسود)، وكذلك النقل الحراري يزيد من درجة حرارة المنطقة بسبب تأثير المدفأة التي تعمل على تجفيف المنتج، حيث كلما زادت درجة حرارة الجو الخارجي فإنها تزيد من درجة الحرارة الداخلية للمجفف الشمسي ويعمل على تقليل الرطوبة داخل المجفف وبذلك يؤدي إلى خروج الهواء الساخن عن طريق المدخنة.

4.III.العمليات التجريبية

1.4.III.تحضير المواد المخزنة للحرارة

في هذه الدراسة استخدمنا نوعين من المواد المخزنة للحرارة والمتمثلة في الرمل الخشن والحصى وقمنا بطلاتهم بالأسود كما موضح في الشكلين 20 التاليين:



الشكلين 20: (أ)- صورة توضح نوع الحصى المستعمل. (ب)- صورة توضح نوع الرمل المستعمل.

2.4.III.معدات القياس

✓ جهاز مقياس الرطوبة

يتم إجراء قياسات الرطوبة باستخدام مقياس الرطوبة في عدة أماكن.

يتم قياس الرطوبة النسبية لهواء التجفيف عند مدخل الغرفة والهواء الخارجي باستخدام مقياس الرطوبة الرقمي المتصل بجهاز ماركة (Testo 645).



الشكل 21: جهاز مقياس الرطوبة و درجة الحرارة Test 645.

✓ جهاز مقياس درجة الحرارة

يتم إجراء قياسات درجة الحرارة في عدة أماكن من المجفف الشمسي.



الشكل 22: جهاز مقياس درجة الحرارة.

. قياس درجة الحرارة في الدخول والخروج للمجفف الشمسي.

. قياس درجة حرارة المواد المخزنة للحرارة.

. قياس درجة حرارة الهواء الداخلي للغرفة المجفف الشمسي.

✓ جهاز مقياس أشعة الشمس

نقوم أيضاً بقياس شدة أشعة الشمس لمعرفة أداء الطاقة الشمسية لمدينة ورقلة خلال شهر افريل.



الشكل 23: جهاز مقياس شدة أشعة الشمس.

III.4.3. طريقة عمل تجربة التخزين الحراري

في هذه الدراسة قمنا بإجراء ثلاثة تجارب، في التجربة الأولى والثانية وضعنا في المجفف الشمسي الأول (4,5kg) من المواد المخزنة المتمثلة في الرمل الخشن، الحصى في شكل طبقة ثابتة موضوعة (طبقة مستطيلة رقيقة أسفل مدخل مجفف الطاقة الشمسية) ونحافظ على مجفف الطاقة الشمسية الثاني فارغاً (دون مواد)، وفي التجربة الثالثة قمنا بوضع الرمل الخشن في المجفف الشمسي الأول وفي المجفف الشمسي الثاني وضعنا الحصى وقمنا بالمقارنة بينهما.

الهدف من هذا العمل دراسة تأثير عملية التخزين الحراري في تحسين كفاءة و مردودية ومدة عملية التجفيف الشمسي من أجل هذا قمنا بدراسة تجريبية حول مجففين شمسيين متماثلين يزود أحدهما بمواد تخزين حراري من أجل معرفة الفرق بين الحالتين.

• التجربة الأولى

تهدف التجربة الأولى إلى معرفة قدرات تخزين الطاقة الحرارية لمادة التخزين المتمثلة في الحصى وضعنا (4,5kg) من الحصى المطلي باللون الأسود في غرفة المجفف الشمسي الأول مع الحفاظ على غرفة المجفف الشمسي الثاني فارغة .

حيث نقيس كل نصف ساعة القياسات التالية؛ من الساعة التاسعة صباحا حتى الساعة الثامنة والنصف مساء، حتى تتساوى كل من درجة حرارة الجو الخارجي والمادة المخزنة (الحصى):

. قياس درجة حرارة هواء غرفة المجففين الأول و الثاني.

. قياس درجة حرارة المادة المخزنة (الحصى) في المجفف الشمسي الأول.

. قياس درجة الحرارة عند مدخل الغرفتين وعند الخروج (المدخنة).

. قياس الرطوبة داخل غرفة المجففين الأول و الثاني ورطوبة الجو الخارجي.

. نقوم أيضاً بقياس شدة الأشعة الشمسية لمعرفة أداء الطاقة الشمسية لمدينة ورقلة خلال شهر أفريل.

• التجربة الثانية

تهدف التجربة الثانية إلى معرفة قدرات تخزين الطاقة الحرارية لمادة التخزين المتمثلة في (الرمل الخشن)، لذلك نقوم بتنفيذ نفس الخطوات من التجربة الأولى، وضعنا (4,5kg) من الرمل الخشن المطلي باللون الأسود في غرفة مجفف الشمسي الأول مع الحفاظ على غرفة مجفف الشمسي الثانية فارغة. حيث قمنا بنفس قياسات التجربة الأولى.

• التجربة الثالثة

تهدف التجربة الثالثة إلى المقارنة بين المواد المخزنة لدرجة الحرارة المتمثلة في (الحصى والرمل الخشن) حيث قمنا بوضع (4,5kg) من الرمل الخشن المطلي باللون الأسود في المجفف الشمسي الأول، وفي المجفف الشمسي الثاني وضعنا (4,5 kg) من الحصى المطلي باللون الأسود. بحيث قمنا بنفس قياسات التجربة الأولى.

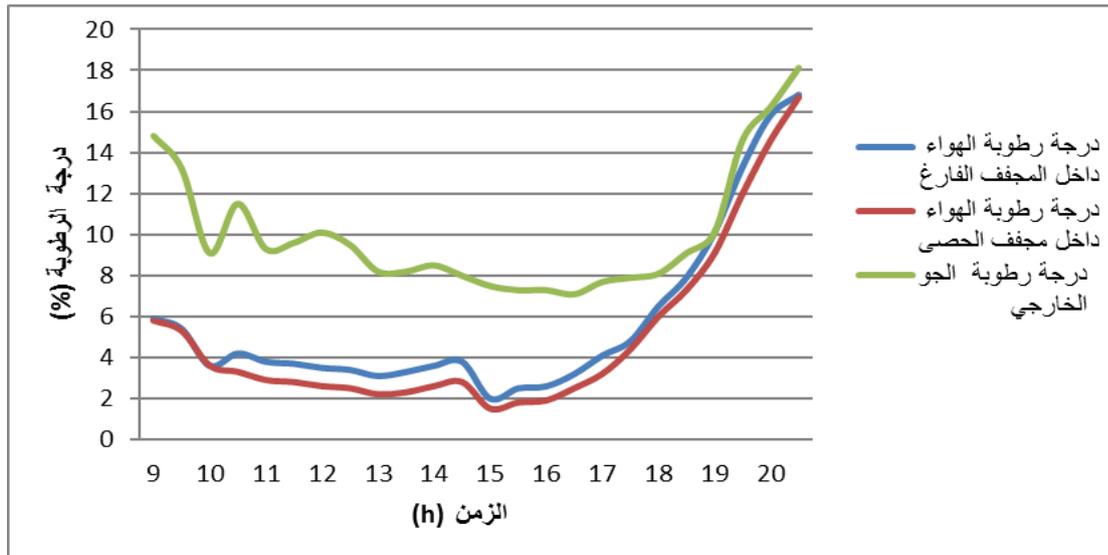
5.III. النتائج والمناقشة

خلال عملنا هذا قمنا بمقارنة النتائج التي تحصلنا عليها خلال هذه التجارب.

➤ مقارنة لدرجة رطوبة الهواء بين كل من (المجفف الفارغ والمجفف الذي يحتوي على المواد والجو الخارجي)

. خلال هذه التجربة قمنا بدراسة تحليلية حول درجة رطوبة الهواء بحيث تتبعنا تغيرات الرطوبة في كل من الهواء المحيط والهواء داخل المجفف الفارغ و الهواء داخل المجفف الذي يحتوي على المواد. بدلالة الزمن وقمنا بمقارنة بينهم، كما هو موضح في الشكلين 24 و 25.

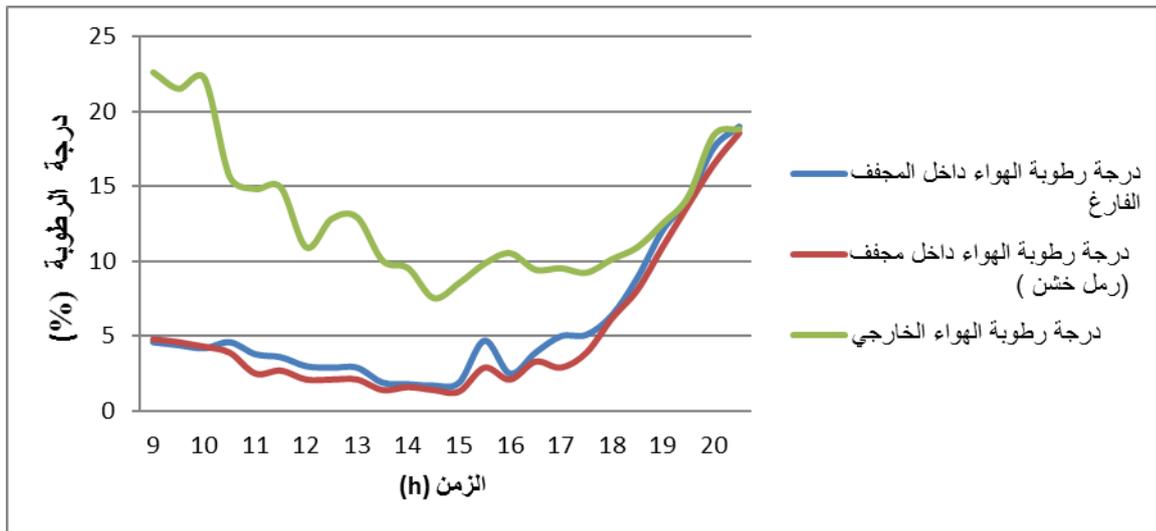
• بالنسبة لتجربة الحصى (2019/04/19) "في جو معتدل وصافي"



الشكل 24: الشكل يوضح تغيرات درجة الرطوبة بدلالة الزمن بالنسبة للتجربة الأولى.

. نلاحظ من خلال الشكل 24 انه في الساعة التاسعة صباحا كانت درجة رطوبة الجو تقدر بـ (15%) وهي كبيرة مقارنة مع رطوبة المجففين (الفارغ، والذي يحتوي على الحصى) بحيث كانت هذه الأخيرة تقدر بـ (6%) . ومع مرور الوقت نلاحظ انخفاض في درجة رطوبة الهواء لكل من "هواء الجو الخارجي والهواء داخل المجففين " بحيث انه خلال الساعة الثالثة زوالا سجلنا أدنى قيمة لدرجة الرطوبة، بحيث كانت درجة رطوبة الجو الخارجي تقدر بـ (7%) وهي مازالت كبيرة مقارنة مع درجة رطوبة المجففين الفارغ والذي يحتوي على الحصى والتي كانت هذه الأخيرة على الترتيب بقيمة (2% للفارغ، 1.5% للحصى) كأدنى قيمة. وبعد الساعة الثالثة زوالا نلاحظ ارتفاع واضح لدرجة رطوبة الهواء لكل من الجو الخارجي والهواء الموجود داخل المجففين، لتتساوى قيمة درجة رطوبة الهواء من (16%) خلال الساعة الثامنة مساء.

- بالنسبة لتجربة الرمل الخشن (2019/04/29) "الجو مضطرب (غبار مع ضباب)"



الشكل 25: الشكل يوضح تغيرات درجة الرطوبة بدلالة الزمن بالنسبة للتجربة الثانية.

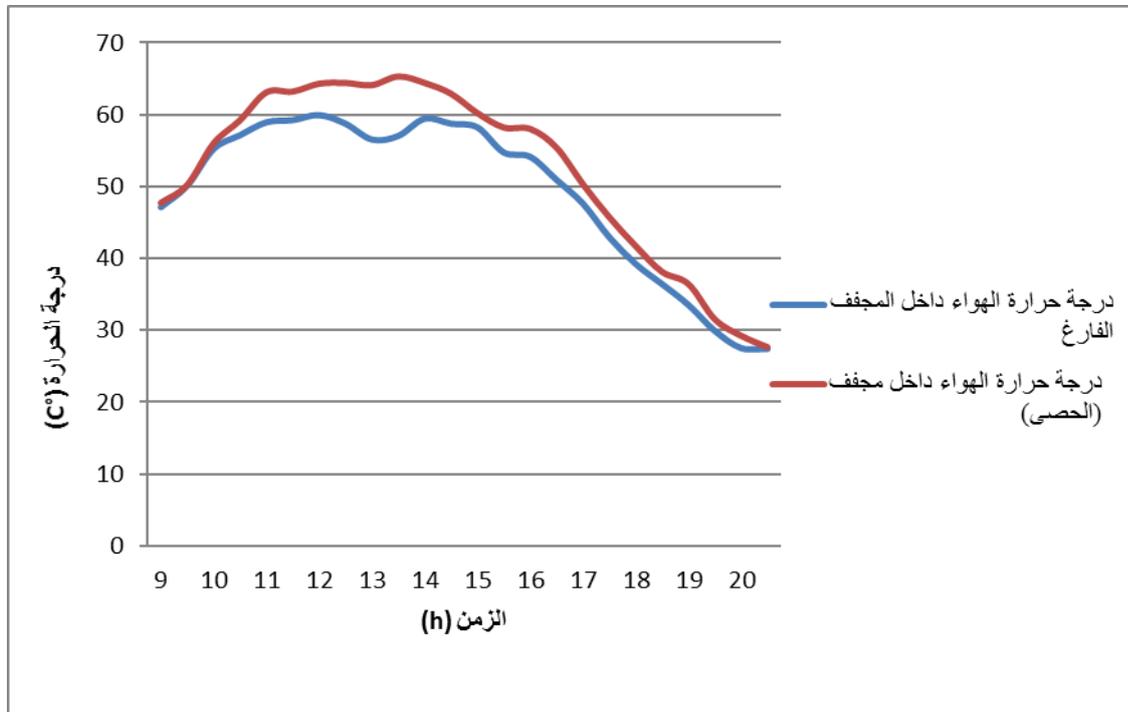
. نلاحظ من خلال الشكل 25 انه في الساعة التاسعة صباحا كانت درجة رطوبة الجو تقدر بـ 22,6% وهي كبيرة مقارنة مع رطوبة المجففين (الفارغ، والذي يحتوي على الرمل الخشن)، بحيث كانت هذه الأخيرة متساوية عند القيمة (4,8%)، هذا راجع إلى ارتفاع رطوبة الجو الخارجي بسبب الضباب والجو المضطرب، بعد الساعة التاسعة صباحا نلاحظ انخفاض حاد وغير منتظم لدرجة رطوبة الجو يقابله انخفاض ضئيل لدرجة رطوبة المجففين بشكل متوازي ليصل كأدنى قيمة له خلال الساعة الثانية والنصف زوالا بقيمة تصل (7,5%) بالنسبة للجو الخارجي، 1,4% للمجفف الذي يحتوي على الرمل الخشن، 1,7% بالنسبة للمجفف

الفارغ). وبعد الساعة الثانية والنصف زوالا نلاحظ ارتفاع حاد لدرجة رطوبة الهواء لكل من الجو الخارجي والمجففين لتتساوى عند (19%) خلال الساعة الثامنة مساءا.

➤ مقارنة بين درجة حرارة الهواء داخل المجفف الفارغ والمجفف الذي يحتوي على المواد

. خلال هذه التجربة قمنا بدراسة تحليلية حول درجة حرارة الهواء داخل المجفف الفارغ والمجفف الذي يحتوي على المواد (الحصى والرمل الخشن) بحيث تتبعنا تغيرات درجة حرارة الهواء بدلالة الزمن، وقمنا بمقارنة بينهم كما هو موضح في الشكلين 26؛ 27.

• بالنسبة لتجربة الحصى (2019/04/19) "في جو معتدل وصافي"



الشكل 26: الشكل يوضح تغيرات درجة حرارة الهواء داخل للمجفف بدلالة الزمن بالنسبة للتجربة الأولى.

. نلاحظ من خلال الشكل 26 انه في الساعة التاسعة صباحا كانت درجة حرارة الهواء متساوية بالتقريب لكل المجففين عند القيمة (47,5 C°) وبعد الساعة التاسعة صباحا نلاحظ ارتفاع ملحوظ في درجة حرارة الهواء لكل المجففين لتصل إلى أقصى قيمة لها خلال الساعة الثانية زوالا هذا بسبب ارتفاع حرارة الجو الخارجي بحيث كانت درجة حرارة المجفف الذي يحتوي على الحصى اكبر بقليل من المجفف الفارغ، بحيث سجلنا على الترتيب (64,5C° و 59,4C°). هذا راجع لان الحصى قام بدوره بتخزين الحرارة وإمدادها للهواء داخل

المجفف عن طريقة ظاهرة الحمل الحراري. وبعد الساعة الثانية زوالا نلاحظ انخفاض في درجة الهواء لكل المجففين لتتساوى بالتقريب في أدنى قيمة لها خلال الساعة الثامنة مساءً عند القيمة (27,5 %).

- بالنسبة للرمل الخشن (2019/04/29) جو مضطرب (غبار مع ضباب)



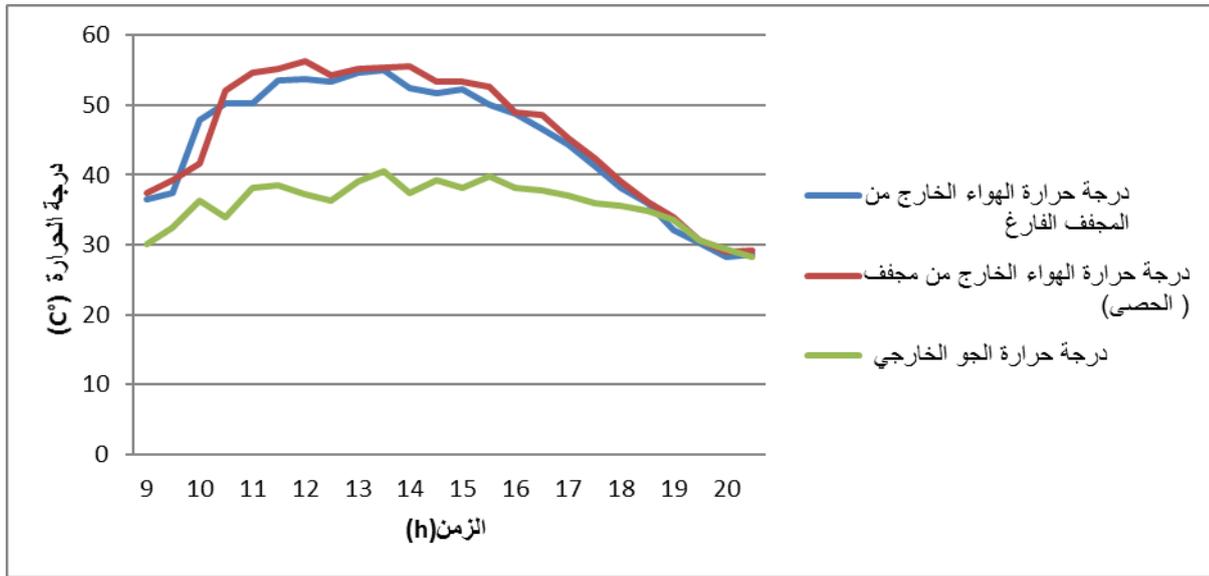
الشكل 27: الشكل يوضح تغيرات درجة حرارة الهواء داخل للمجفف بدلالة الزمن بالنسبة للتجربة الثانية.

. نلاحظ من خلال الشكل 27 انه خلال الساعة التاسعة صباحا كانت درجة حرارة الهواء داخل المجفف الفارغ اكبر بقليل من درجة حرارة الهواء داخل مجفف الرمل بحيث سجلنا على الترتيب ($49,2^{\circ}\text{C}$ و $46,7^{\circ}\text{C}$)، هذا راجع إلى إن الرمل كان لازال باردا بحيث قام بدورة بعملية تبادل حراري مع الهواء الداخلي نلاحظ درجة حرارة الهواء وترتفع درجة حرارة الرمل عن طريق ظاهرة الحمل الحراري. وبعد الساعة التاسعة صباحا نلاحظ ارتفاع في درجة حرارة الهواء لكلي المجففين لتصل إلى أقصى قيمة لها خلال الساعة الثانية والنصف زوالا هذا بسبب ارتفاع حرارة الجو الخارجي حيث كانت درجة حرارة المجفف الذي يحتوي على الرمل الخشن اكبر من المجفف الفارغ بحيث سجلنا على الترتيب ($66,2^{\circ}\text{C}$ و $58,4^{\circ}\text{C}$). هذا راجع إلى أن الرمل قام بدورة بتخزين الحرارة التي استقبلها من أشعة الشمس وإمدادها للهواء داخل المجفف عن طريق ظاهرة الحمل الحراري. وبد الساعة الثانية والنصف زوالا نلاحظ انخفاض غير منتظم في درجة حرارة الهواء الداخلي لكل المجففين بسبب الجو المضطرب لتتساوى بالتقريب في أدنى قيمة لها خلال الساعة الثامنة والنصف عند القيمة (23°C)، هذا راجع إلى انخفاض درجة حرارة الجو الخارجي (غروب الشمس).

➤ مقارنة بين درجة حرارة الهواء الخارج من المجفف الفارغ والمجفف الذي يحتوى على المواد ودرجة حرارة الجو الخارجي

خلال هذه التجربة قمنا بدراسة تحليلية حول درجة حرارة الهواء الخارج من المجفف الفارغ والمجفف الذي يحتوى على المواد ودرجة حرارة الجو الخارجي، بحيث تتبعنا تغيرات درجة حرارة الهواء بدلالة الزمن. وقمنا بمقارنة بينهم كما هو موضح في الشكلين 28 و 29.

- بالنسبة لتجربة الحصى (2019/04/19) "الجو معتدل وصافي"

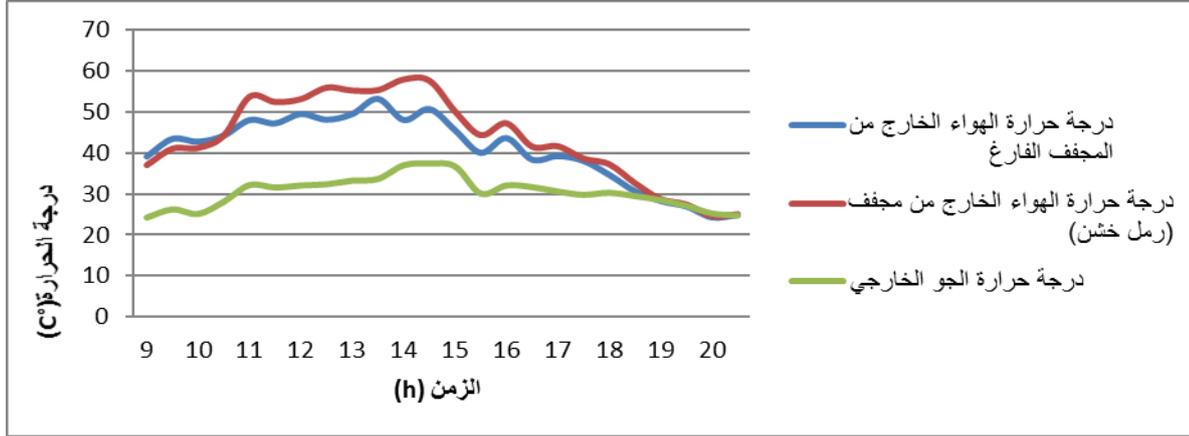


الشكل 28: الشكل يوضح تغيرات درجة حرارة الهواء الخارج من المجفف بدلالة الزمن بالنسبة للتجربة الأولى.

. نلاحظ من خلال الشكل 28 انه خلال الساعة التاسعة صباحا كانت درجة حرارة المجففين متساوية تقريبا عند القيمة (37°C) وهي كبيرة نوعا ما مقارنة مع درجة حرارة الجو الخارجي بحيث كانت هذه الأخيرة تقدر بـ ($30,1^{\circ}\text{C}$)، وهذا راجع إلى أن المجففين استقبلا كمية من الحرارة عن طريق أشعة الشمس ليحملها الهواء المتدفق داخل المجففين عن طريق ظاهرة الحمل الحراري ويخرج من المجففين بدرجة حرارة كبيرة نوعا ما من درجة الحرارة التي دخل بها للمجففين. بعد الساعة التاسعة صباحا نلاحظ ارتفاعا حاد لدرجة حرارة الهواء الخارج من المجففين يقابله ارتفاع ضئيل لدرجة حرارة الجو الخارجي ليصل كأقصى قيمة له خلال الساعة الثانية عشر منتصف الظهيرة بالنسبة للهواء الخارج من المجفف الذي يحتوي على الحصى بدرجة ($56,3^{\circ}\text{C}$). أما بالنسبة للهواء الخارج من المجفف الفارغ فأقصى قيمة يصل لها خلال الساعة الواحدة والنصف زوالا بدرجة ($54,9^{\circ}\text{C}$). وفي نفس الوقت نسجل أقصى قيمة لدرجة حرارة الجو الخارجي بدرجة

(40,6C°) وبعد الساعة الثانية زوالا نلاحظ انخفاض حاد لدرجة حرارة الهواء إلى أن تتساوى عند درجة (29C°) خلال الساعة الثامنة والنصف مساء.

- بالنسبة لتجربة الرمل الخشن(2019/04/29) " الجو مضطرب (غبار وضباب)"



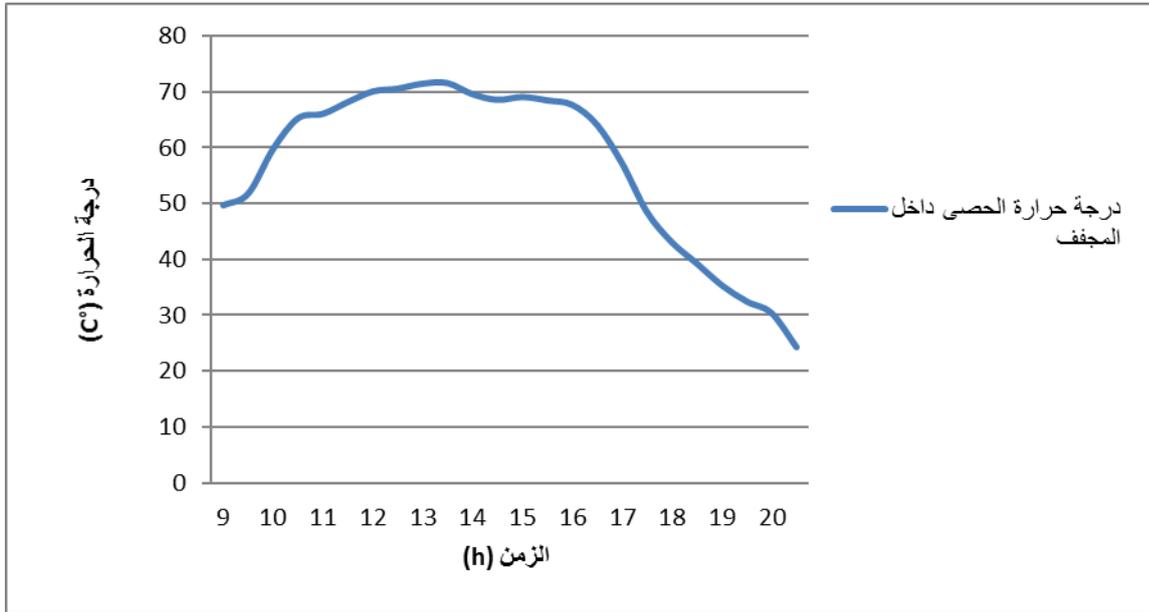
الشكل 29: الشكل يوضح تغيرات درجة حرارة الهواء الخارج من المجفف بدلالة الزمن بالنسبة للتجربة الثانية.

. نلاحظ من خلال الشكل 29 انه عند الساعة التاسعة صباحا كانت درجة حرارة المجففين (الفارغ، مجفف الرمل) متساوية تقريبا بحيث سجلنا على الترتيب (37C°، 39,2C°) وهي كبيرة نوعا ما مقارنة مع حرارة الجو الخارجي بحيث كانت هذه الأخيرة تقدر بـ(24,2C°)، وهذا راجع إلى أن المجففين استقبلا كمية من الحرارة عن طريق أشعة الشمس ليحملها الهواء المتدفق داخل المجففين عن طريق ظاهرة الحمل الحراري، ويخرج من المجففين بدرجة حرارة كبيرة نوعا ما من درجة الحرارة التي دخل بها. بعد الساعة التاسعة صباحا نلاحظ ارتفاع لدرجة حرارة الهواء الخارج من المجففين وكذلك حرارة الجو الخارجي. بحيث سجلنا خلال الساعة الثانية زوالا كأقصى قيمة لدرجة الهواء الخارج من مجفف الرمل والمقدر بـ (57,9C°) بحيث كانت كبيرة مقارنة مع حرارة الهواء الخارج من المجفف الفارغ والجو الخارجي هذا راجع إلى أن الرمل قام بدور بتخزين الحرارة التي استقبلها عن طريق أشعة الشمس وإمدادها للهواء المتدفق داخل المجفف عن طريق ظاهرة الحمل الحراري ليخرج الهواء من المجفف بدرجة حرارة عالية مقارنة مع حرارة الهواء الخارج من المجفف الفارغ بحيث كانت هذه الأخيرة (53,3C°) كأقصى قيمة لها خلال الساعة الواحدة والنصف زوالا، أما بالنسبة للجو الخارجي فسجلنا أقصى قيمة له خلال الساعة الثانية والنصف زوالا حيث بلغته (37,5C°). بعد الساعة الثانية والنصف زوالا نلاحظ انخفاض غير منتظم لدرجة حرارة الهواء لكل من المجففين والجو الخارجي إلى أن تتساوى خلال الساعة الثامنة والنصف مساء عند القيمة (25C°).

➤ دراسة حول تغيرات حرارة المواد المستعملة في عملية التخزين الحراري

. في هذه التجربة قمنا بدراسة تحليلية حول درجة حرارة المواد (الحصى والرمل الخشن) داخل المجفف الشمسي. بحيث نتبعنا تغيرات درجة حرارة المواد بدلالة الزمن. كما هو موضح في الشكلين 30 و 31.

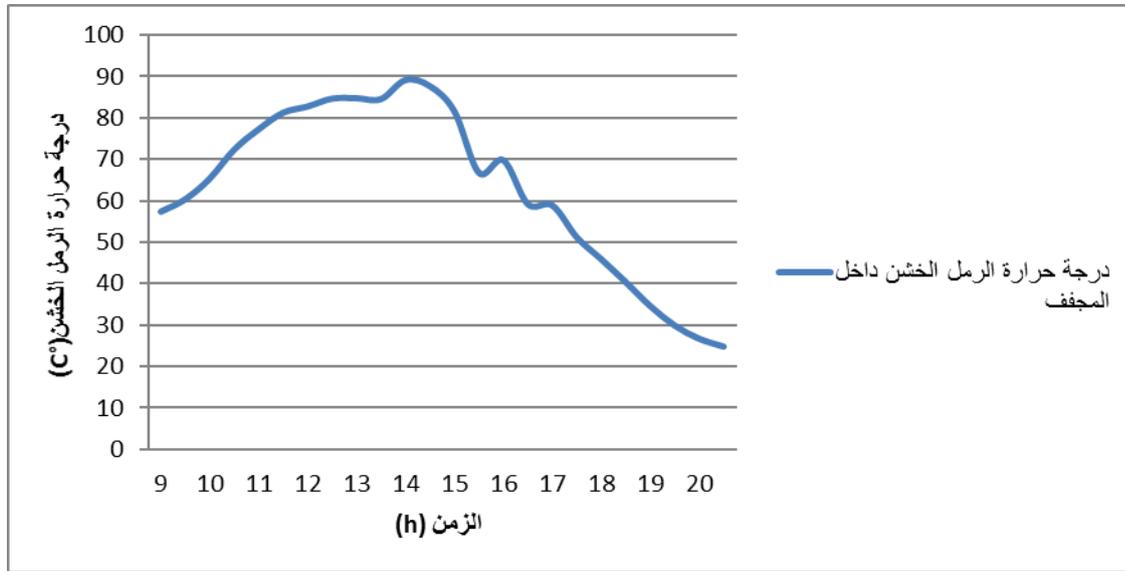
• بالنسبة لتجربة الحصى (2019/04/19) " جو معتدل نسبيا"



الشكل 30: الشكل يوضح تغيرات درجة حرارة الحصى داخل المجفف بدلالة الزمن بالنسبة للتجربة الأولى.

. نلاحظ من خلال الشكل 30 انه في الساعة التاسعة صباحا كانت درجة حرارة الحصى ($49,7C^{\circ}$). بعد الساعة التاسعة صباحا نلاحظ ارتفاع في درجة حرارة الحصى لتصل إلى أقصى قيمة لها خلال الساعة الواحدة والنصف زوالا حيث بلغت ($71,6C^{\circ}$)، هذا راجع إلى أن أشعة الشمس زادت ليستقبلها الحصى ويخزنها على شكل حرارة، وبالتالي ترتفع درجة حرارة الحصى. بعد الساعة الواحدة والنصف زوالا نلاحظ انخفاض حاد لدرجة حرارة الحصى لتصل إلى أدنى قيمة لها خلال الساعة الثامنة والنصف مساءً بحيث بلغت ($24,3C^{\circ}$)، هذا راجع إلى غياب الشمس. وبالتالي فإن الهواء البارد الداخل إلى المجفف يقوم بتبادل حراري مع الحصى ليأخذ من كمية من الحرارة عن طريق ظاهرة الحمل الحراري فتحفظ درجة حرارة الحصى إلى أن تتساوى مع درجة حرارة الجو الخارجي لتتوقف ظاهرة التبادل الحراري.

- بالنسبة لتجربة الرمل الخشن (2019/04/29) " جو مضطرب (غبار وضباب) "

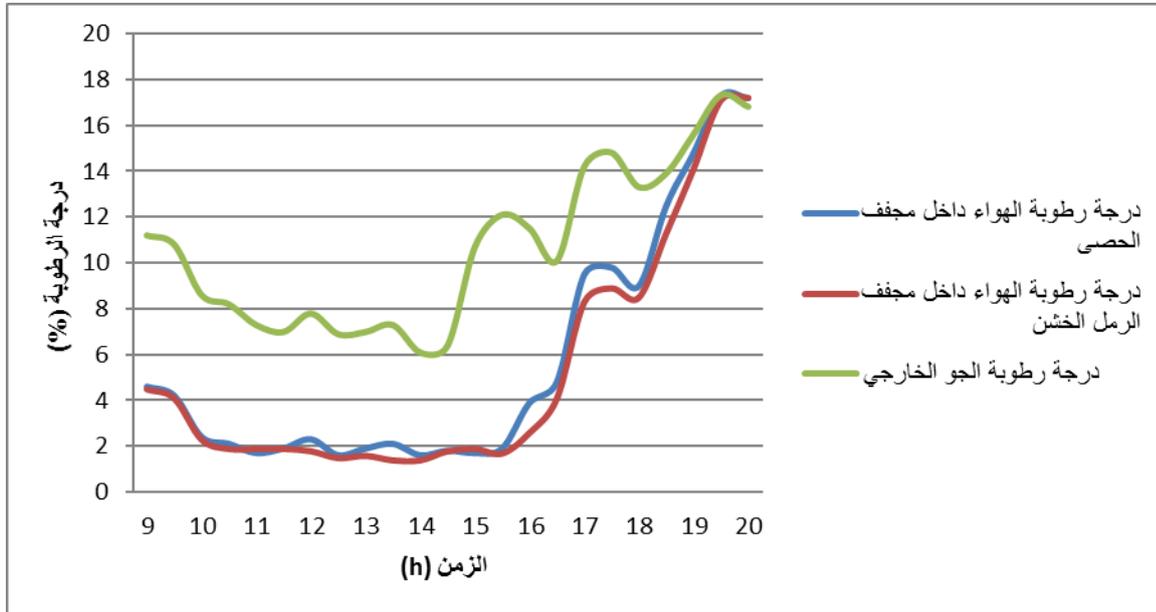


الشكل 31: الشكل يوضح تغيرات درجة حرارة الرمل الخشن داخل المجفف بدلالة الزمن بالنسبة للتجربة الثانية.

. نلاحظ من خلال الشكل 31 انه في الساعة التاسعة صباحا كانت درجة حرارة الرمل ($57,3C^{\circ}$). وبعد الساعة التاسعة صباحا نلاحظ ارتفاع في درجة حرارة الرمل إلى أن تصل إلى أقصى قيمة لها خلال الساعة الثانية زوالا والتي بلغت ($89,1C^{\circ}$). هذا راجع إلى زيادة حرارة أشعة الشمس التي يستقبلها المجفف الشمسي بحيث تخترق الزجاج الذي يعزل الرمل عن الوسط الخارجي ليستقبلها الرمل ويخزنها بشكل طاقة حرارية مخزنة وبالتالي تزداد درجة حرارة الرمل. وبعد الساعة الثانية زوالا نلاحظ انخفاض حاد لدرجة حرارة الرمل إلى أن تصل إلى أدنى قيمة لها خلال الساعة الثامنة والنصف مساءا بحيث بلغت ($24,7C^{\circ}$). هذا راجع إلى غياب أشعة الشمس انخفاض درجة حرارة الجو الخارجي. وبالتالي ضياع للطاقة الحرارية المخزنة في الرمل بسبب الهواء البارد الداخل إلى المجفف عن طريق ظاهرة التبادل الحراري إلى أن تتساوى درجة حرارة الرمل مع درجة حرارة الجو الخارجي.

➤ مقارنة لدرجة رطوبة الهواء داخل مجففين شمسيين و رطوبة الجو الخارجي (2019/04/30)

خلال هذه التجربة قمنا بدراسة تحليلية حول درجة رطوبة الهواء. بحيث نتبعنا تغيرات الرطوبة في كل من الهواء المحيط والهواء داخل المجففين (مجفف الحصى و مجفف الرمل الخشن). وكذلك قمنا بمقارنة بينهم كما هو موضح في الشكل 32.

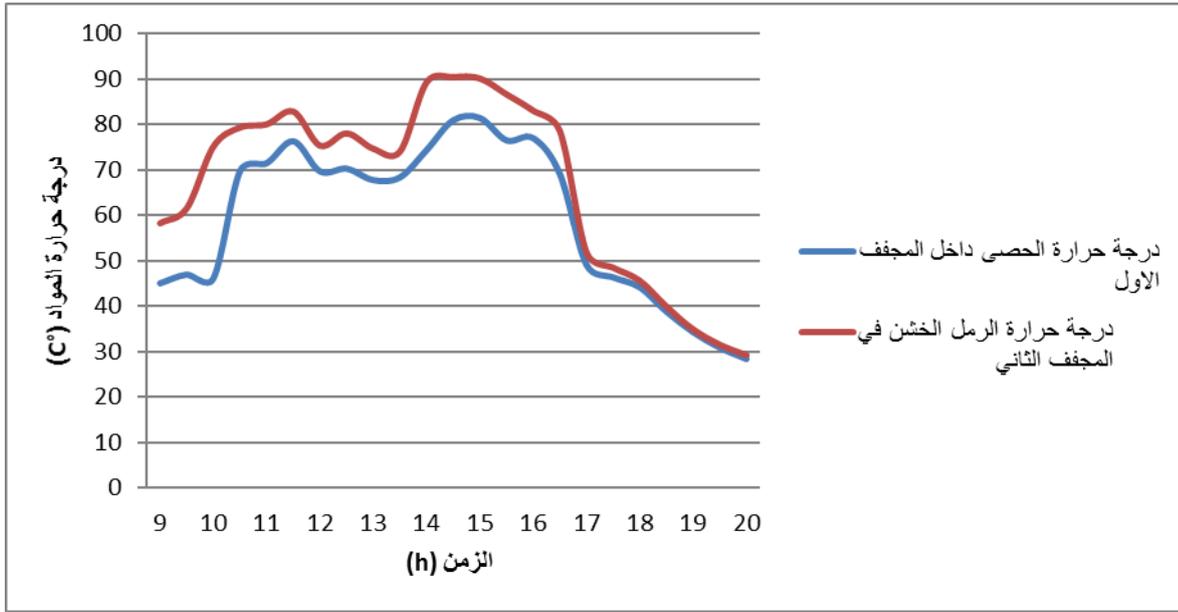


الشكل 32: الشكل يوضح تغيرات درجة رطوبة الهواء داخل المجففين بدلالة الزمن بالنسبة للتجربة الثالثة.

. نلاحظ من خلال الشكل 32 انه في الساعة التاسعة صباحا كانت درجة رطوبة الجو تقدر بـ (11,2%)، وهي كبيرة مقارنة مع رطوبة الهواء داخل المجففين (مجفف الحصى و مجفف الرمل الخشن). بحيث كانت هذه الأخيرة متساوية عند القيمة (4,5%). وبعد الساعة التاسعة صباحا نلاحظ انخفاض في درجة رطوبة الهواء لكل من الجو الخارجي والهواء داخل المجففين. بحيث انه في خلال الساعة الثانية زوالا سجلنا أدنى قيمة لدرجة الرطوبة، بحيث كانت درجة رطوبة الجو الخارجي (6,1%) وهي لازالت كبيرة مقارنة مع درجة رطوبة المجففين، بحيث سجلنا (1,6% بالنسبة لهواء مجفف الحصى، 1,4% لهواء مجفف الرمل الخشن). وبعد الساعة الثانية زوالا نلاحظ ارتفاع غير منتظم لدرجة رطوبة الهواء لكل من الجو الخارجي و المجففين لتتساوى عند (17,2%) خلال الساعة الثامنة مساء.

➤ مقارنة لدرجة حرارة المواد المستعملة في عملية التخزين الحراري (2019/04/30) " جو مضطرب نسبيا"

خلال هذه التجربة قمنا بدراسة تحليلية حول درجة حرارة (الحصى و الرمل الخشن) في مجففين شمسيين. بحيث قمنا بمتبع درجة حرارة المواد بدلالة الزمن. مع مقارنة بينهما كما هو موضح في الشكل 33.

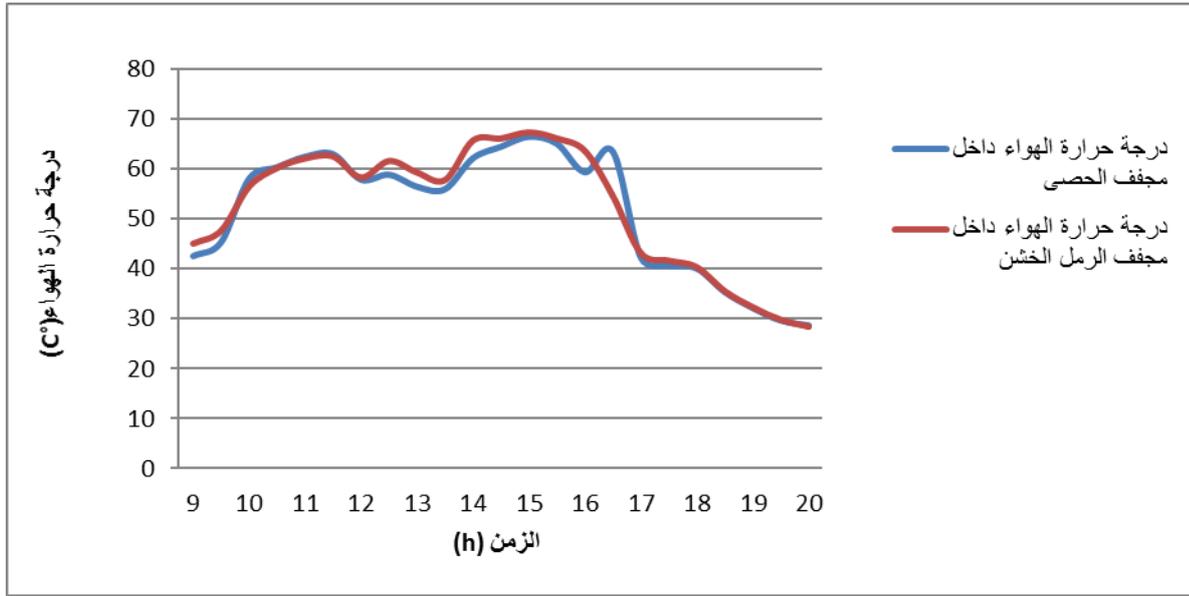


الشكل 33: الشكل يوضح تغيرات درجة حرارة المواد داخل المجففين بدلالة الزمن بالنسبة للتجربة الثالثة.

. نلاحظ من خلال الشكل 33 انه في الساعة التاسعة صباحا كانت درجة حرارة الرمل في المجفف الأول كبيرة نسبيا من درجة حرارة الحصى في المجفف الثاني بحيث سجلنا على التوالي $(58,2C^{\circ}, 45,1C^{\circ})$. هذا راجع إلى أن الرمل يخزن الحرارة أكثر من الحصى. وبعد الساعة التاسعة صباحا نلاحظ ارتفاع غير منتظم لدرجة حرارة المواد إلى أن يصل إلى أقصى قيمة لها خلال الساعة الثالثة زوالا بحيث لازالت درجة حرارة الرمل اكبر من درجة حرارة الحصى بحيث سجلنا على الترتيب $(90,4C^{\circ}, 81,3C^{\circ})$. هذا راجع إلى ارتفاع درجة حرارة الجو الخارجي. وبعد الساعة الثالثة زوالا نلاحظ انخفاض حاد لدرجة حرارة المواد إلى أن تصل إلى أدنى قيمة لها وتتساوى عند الساعة الثامنة مساءا بحيث سجلنا خلال هذه الفترة $(29C^{\circ})$.

➤ مقارنة لدرجة حرارة الهواء داخل مجففين شمسيين (2019/04/30) " جو مضطرب نسبيا"

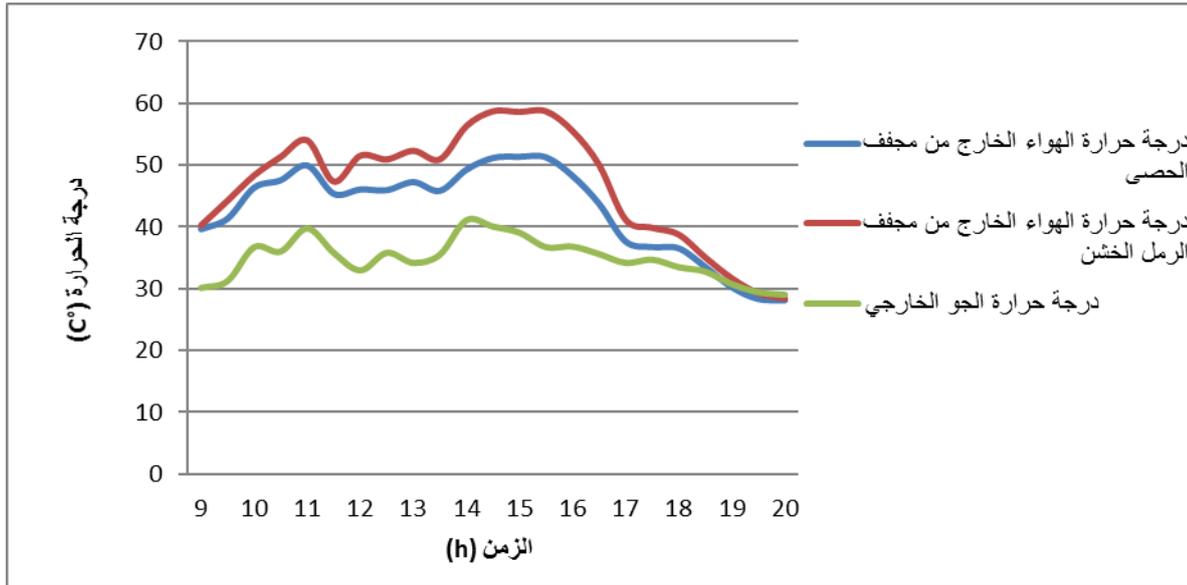
خلال هذه التجربة بدراسة تحليلية حول درجة حرارة الهواء داخل مجففين شمسيين الأول يحتوي على رمل خشن والثاني يحتوي على الحصى. بحيث قمنا بتتبع درجة حرارة الهواء بدلالة الزمن. والنتائج التي تحصلنا عليها قمنا بمقارنتها كما هو موضح في الشكل 34.



الشكل 34: الشكل يوضح تغيرات درجة حرارة الهواء داخل المجففين بدلالة الزمن بالنسبة للتجربة الثالثة.

. نلاحظ من خلال الشكل 34 انه في خلال الساعة التاسعة صباحا كانت درجة حرارة الهواء في المجفف الأول كبيرة نسبيا من المجفف الثاني بحيث سجلنا على الترتيب $(45,1C^{\circ}, 42,5C^{\circ})$ ، هذا راجع إلى أن الرمل ينشر حرارة أكثر من الحصى، والحرارة التي ينشرها الرمل يأخذها الهواء داخل المجفف الأول عن طريق ظاهرة الحمل الحراري. وبعد الساعة التاسعة صباحا نلاحظ ارتفاع غير منتظم لدرجة حرارة الهواء في المجففين لتصل إلى أقصى قيمة لها بحيث كانت متساوي خلال الساعة الثالثة زوالا عند القيمة $(67C^{\circ})$. هذا راجع إلى ارتفاع حرارة الجو الخارجي. وبعد الساعة الثالثة زوالا نلاحظ انخفاض حاد لدرجة حرارة الهواء في المجففين لتصل إلى أدنى قيمة لها خلال الساعة الثامنة مساء، بحيث كانت متساوية عند القيمة $(28,5C^{\circ})$.

➤ مقارنة لدرجة حرارة الهواء الخارج من مجففين شمسيين ودرجة حرارة الجو الخارجي (2019/04/30)
 خلال هذه التجربة قمنا بدراسة تحليلية حول درجة حرارة الهواء الخارج من المجفف الشمسي الأول الذي يحتوي على الرمل والمجفف الشمسي الثاني الذي يحتوي على الحصى ودرجة حرارة الجو الخارجي. بحيث قمنا بتتبع تغيرات درجة حرارة الهواء بدلالة الزمن، والمقارنة بينهما كما هو موضح في الشكل 35.

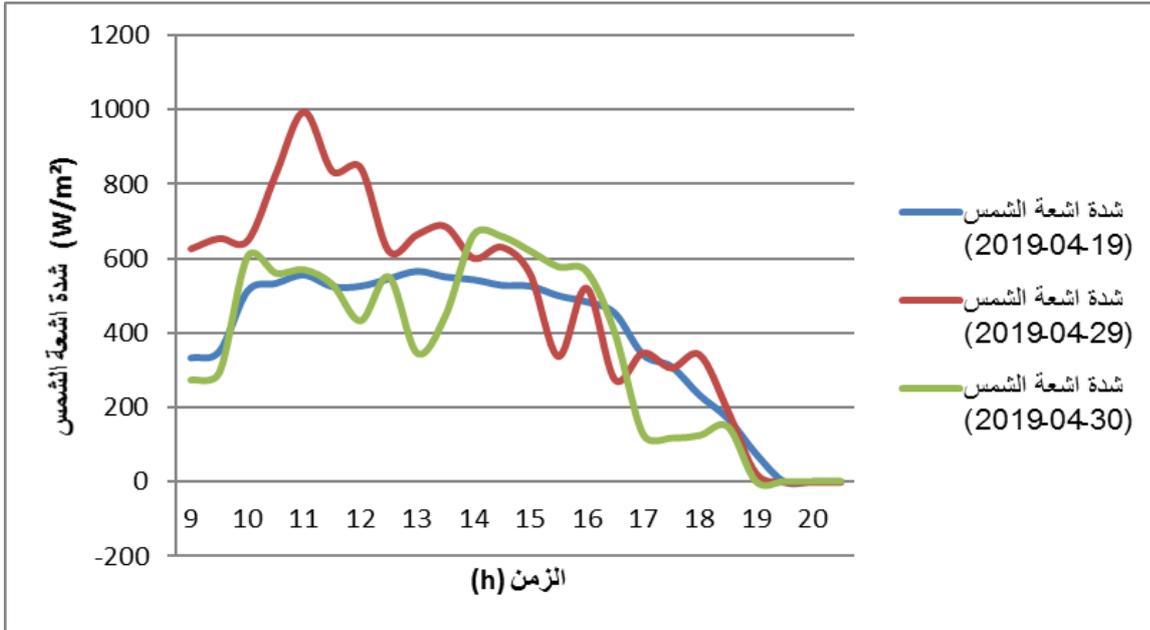


الشكل 35: الشكل يوضح تغيرات درجة حرارة الهواء الخارج من المجففين بدلالة الزمن بالنسبة للتجربة الثالث.

. نلاحظ من خلال الشكل 35 انه في الساعة التاسعة صباحا كانت درجة حرارة الهواء الخارج من المجففين كبيرة مقارنة مع حرارة الجو الخارجي، بحيث كانت (40°C)، أما بالنسبة للجو الخارجي فكانت ($30,2^{\circ}\text{C}$)، هذا راجع إلى أن الهواء الداخل للمجففين اكتسب حرارة من المواد المستعمل في التخزين الحراري (الرمل والحصى)، ليخرج من المجففين بدرجة حرارة كبيرة نسبيا عما دخل بها. أما بعد الساعة التاسعة صباحا نلاحظ ارتفاع غير منتظم لدرجة حرارة الهواء ونلاحظ فرق في درجة حرارة الهواء الخارج من المجففين الأول والثاني بحيث كانت اكبر بالنسبة للمجفف الأول بحيث سجلنا على الترتيب خلال الساعة الثالثة زوالا ($58,8^{\circ}\text{C}$ و $51,4^{\circ}\text{C}$). هذا راجع إلى أن الرمل قام بتخزين حرارة اكبر من الحصى وإمدادها للهواء الذي يتدفق داخل المجفف الشمسي. وبعد الساعة الثالثة زوالا نلاحظ انخفاض حاد لدرجة حرارة الهواء الخارج من المجففين ودرجة حرارة الجو الخارجي. إلى أن تتساوى خلال الساعة الثامنة مساء عند القيمة ($28,5^{\circ}\text{C}$) كأدنى قيمة.

➤ مقارنة لشدة أشعة الشمس بين الأيام التي أجريت فيها التجارب

من خلال هذه التجربة قمنا بدراسة تحليلية لشدة أشعة الشمس خلال الثلاثة أيام التي أجريت فيها التجارب بحيث اليوم الأول كان بتاريخ (2019/04/19)، واليوم الثاني بتاريخ (2019/04/29)، واليوم الثالث بتاريخ (2019/04/30). وقمنا بمقارنة حول شدة أشعة الشمس.



الشكل 36: الشكل يوضح تغيرات شدة أشعة الشمس بدلالة الزمن بالنسبة للتجربة الثالث.

. من خلال المنحنى 36 نلاحظ أن خلال الساعة التاسعة صباحا كان شدة أشعة الشمس لليوم الثاني كبيرة جدا مقارنة مع اليوم الأول واليوم الثالث حيث بلغت على الترتيب ($627w/m^2$ ، $332,5w/m^2$ ، $272,5w/m^2$). هذا راجع إلى أن خلال اليوم الثاني كانت الشمس ساطعة ودرجة الحرارة مرتفعة. بعد الساعة التاسعة صباحا نلاحظ ارتفاع حاد لشدة أشعة الشمس بالنسبة لليوم الثاني يقابله ارتفاع معتبر لشدة أشعة الشمس بالنسبة لليومين الأول والثالث. بحيث سجلنا على الترتيب خلال الساعة الحادي عشر والنصف زوالا ($524w/m^2$ ، $835w/m^2$ ، $529,5w/m^2$)، بعد الساعة الحادي عشر والنصف نلاحظ انخفاض غير منتظم لشدة أشعة الشمس بالنسبة لليوم الثاني والثالث. هذا راجع إلى سوء الأحوال الجوية بحيث كان هناك "غبار وضباب" وكانت السماء غائمة، أما بالنسبة لليوم الأول فكانت شدة أشعة الشمس تنخفض بشكل منتظم، لأن خلال ذلك اليوم كان الجو معتدل والسماء صافية. إلى أن تصل شدة أشعة الشمس إلى ($0w/m^2$) خلال الساعة الثامنة والنصف مساء. هذا راجع إلى غياب الشمس.

من خلال هذا التحليل نستنتج أن اليوم الأول كان أفضل يوم لإجراء التجارب.

✓ الخاتمة

استنتجنا من خلال هذه التجارب أن الرمل الخشن المستعمل لعملية التخزين الحراري له سعة تخزين حرارية أكثر من الحصى وهذا موضح في المقارنات التي جرت وهو أيضا يعتبر كأفضل وسيط لتبادل الحراري.

الخاتمة العامة

الخاتمة العامة

يتمثل العمل المقدم في هذه الأطروحة مساهمة في دراسة نظام تخزين حراري لتخزين الطاقة الشمسية، باستخدام مواد اقتصادية وبيئية، بحيث وقع اختيارنا على الرمل والحصى هذا لأنهما يتوفران بشكل كبير في المناطق الجافة وشبه الجافة. حيث تتميز ورقلة بكفاءة شمسية عالية بحيث خلال التجارب وصلت أعلى قيمة لها ($994,5 \text{ w /m}^2$).

تم إجراء هذه الدراسة من خلال تحليل السلوك الحراري للرمل والحصى، وهذا ما قمنا به في دراستنا. في البداية قمنا بدراسة مفصلة عن أنظمة التخزين الحراري استنادا إلى المواد الصلبة والتي يتم نشر نتائجها على نطاق واسع، وكما قمنا في الفصل الثاني بدراسة المجففات الشمسية وأنواعها حيث كرسنا جزءا من هذه الدراسة بأجراء تجارب تطبيقية على المجفف الشمسي المباشر حيث قمنا باستعمال المواد الصلبة الحبيبية (الرمل و الحصى).

حيث اثبتت الدراسة التطبيقية النتائج التالية:

- السعة الحرارية للرمل وللحصى: $C_{p_{\text{رمل}}}=2096,8 \text{J.kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ، $C_{p_{\text{حصى}}}=1654,8 \text{J.kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ،
بالتالي فإن السعة الحرارية للرمل أفضل من السعة الحرارية للحصى.
- وجدنا أن درجة حرارة الهواء للمجفف الذي يحتوي على الحصى أكبر بكثير من المجفف الفارغ (بدون مواد) بقيمة متوسطة بلغت: $5,5 \text{ C}^\circ$.
- رطوبة المجفف الفارغ (بدون مواد) أكبر من المجفف الذي يحتوي على الحصى بقيمة متوسطة بلغت: $5,12\%$.
- وجدنا أن درجة حرارة الهواء داخل المجفف الذي يحتوي على الرمل أفضل بكثير من المجفف الفارغ (بدون مواد) بقيمة متوسطة بلغت: $6,4 \text{ C}^\circ$.
- رطوبة المجفف الفارغ (بدون مواد) أكبر من المجفف الذي يحتوي على الرمل بقيمة متوسطة بلغت: $5,52\%$.
- درجة حرارة الهواء داخل المجفف الذي يحتوي على الرمل أكثر من المجفف الذي يحتوي على الحصى بقيمة متوسطة بلغت: $1,5 \text{ C}^\circ$.
- درجة الرطوبة للمجفف الذي يحتوي على الرمل اقل من درجة الرطوبة للمجفف الذي يحتوي على الحصى بقيمة متوسطة بلغت: $5,48\%$.

الخاتمة العامة

من خلال هذه النتائج وجدنا بأن الرمل قام بالمحافظة على حرارته لأطول مدة مقارنة مع الحصى. ومنه نستنتج أن المجففين الذين يحتويان على مواد تخزين حراري (الرمل والحصى) أفضل بكثير من المجفف الفارغ (بدون مواد).

نتيجة هذا العمل وجدنا أن الرمل لديه مميزات تجعله أفضل تخزينا للحرارة من الحصى. وقع عملنا هذا على التخزين الحراري لان لديه إيجابيات تجعله كحل مميز على باقي البدائل الأخرى. الايجابيات:

- استغلال الطاقة الناتجة عن التخزين الحراري يكون بمثابة حل بديل للوقود الأحفوري الذي هو على وشك النفاذ في العقود القليلة القادمة.
- يمكن للمؤسسات الصغيرة أن تستغل التخزين الحراري لتوفير كفاءتها الذاتية للطاقة.
- اعتبار التخزين الحراري كحل بديل و اقتصادي وبيئي ، لإنتاج الطاقة و تصديرها.
- تستخدم في مجالات عديدة كتدفئة المنازل، وطهي الطعام في أفران شمسية مصممة لذلك.

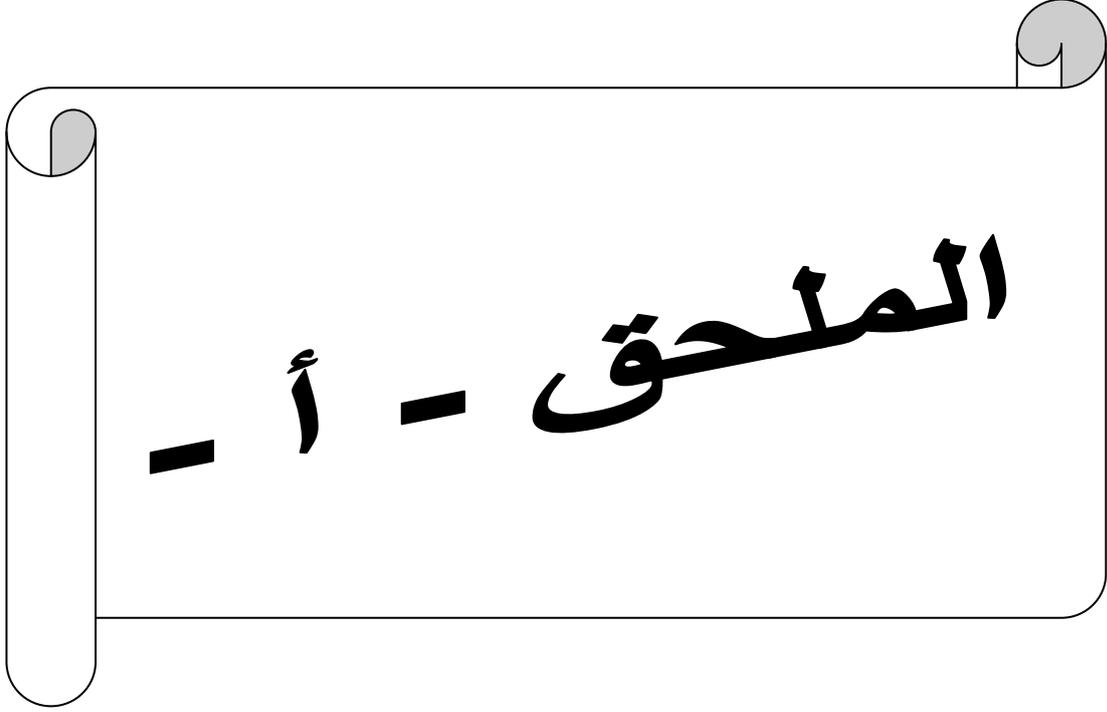
المراجع والمصادر

المراجع و المصادر

- [1] MahfoudiNadjiba," Stockage de la chaleur dans un milieu granuleux solide," Thèse Pour l'obtention du diplôme de Doctorat,2016. (12/10/2015).Statistical Review [Online].Available: <http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-worldenergy>. Hotmail.
- [2] (12/10/2015). Preface de l'Apercugeneral du GIEC. [Online]. Available: https://www.ipcc.ch/ipccreports/1992%20IPCC%20Supplement/IPCC_1990_and_1992_Assesments/French/ipcc_90_92_assessments_far_overview_fr.pdf.
- [3] L. Bennamoun et A. Belhamri. (2007) Contribution à l'étude de faisabilité de séchoirs solaires pour les produits agricoles Revue des Energies Renouvelables CER 07 Oujda (2007) 201-204.
- [4] Abdelhamid Farhat, Sami Kooli, Chakib Kerkeni, Mohamed Maalej, Abdelhamid Fadhel et Ali Belghith. (2004). Validation of a pepper drying model in a polyethylene tunnel greenhouse. International Journal of Thermal Science, 43, 53-58 .
- [5] Busunia MA., Abc T.(2001) Characteristics of rough rice under natural convection. Journal of Food Engineering, 47, 295-301 .
- [6] S. Hasnain, "Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: heat storage materials and techniques," Energy Conversion and Management, vol. 39, pp. 1127-1138, 1998.
- [7] S. Hasnain, "Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part II: cool thermal storage," Energy Conversion and Management, vol. 39, pp. 1139-1153, 1998.
- [8] I. Dincer and M. Rosen, "Thermal energy storage: systems and applications," 2nd ed. John Wiley & Sons, 2011, pp. 84-141.
- [9] G. P. Henze, and M. Krarti, "Predictive Optimal Control of Active and Passive Building Thermal Storage Inventory," University of Nebraska ,Lincoln, University of Colorado, Boulder, Tech. Rep. Ap. 2003.
- [10] F. Bai and C. Xu, "Performance analysis of a two-stage thermal energy storage system using concrete and steam accumulator," Applied Thermal Engineering, vol. 31, pp. 2764-2771, 2011.
- [11] Basecq, V.; Michaux, G.; Inard, C.; Blondeau, P. Short-term storage systems of thermal energy for buildings: A review. Adv. Build. EnergyRes. 2013, 7, 66–119 .
- [12] Ali Abou Hassan," Modélisation et caractérisation de modules de stockage de chaleur comprenant des matériaux à changement de phase,"Rapport de stage Master Recherche,2012.
- [13] L. F. Cabeza, "Advances in thermal energy storage systems: Methods and applications," Woodhead Publishing, 2014.

- [14] J. A. Duffie and W. A. Beckman, "Solar engineering of thermal processes ," vol. 3, Wiley, New York, 1980.
- [15] K. E. N'Tsoukpoe, H. Liu, N. Le Pierrès, and L. Luo, "A review on long-term sorption solar energy storage," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, pp. 2385-2396, 2009.
- [16] J. A. Duffie and W. A. Beckman, "Solar engineering of thermal processes ," vol. 3, Wiley, New York, 1980.
- [17] M. Azpiazu, J. Morquillas, and A. Vazquez, "Heat recovery from a thermal energy storage based on the Ca (OH) 2/CaO cycle," *Applied Thermal Engineering*, vol. 23, pp. 733-741, 2003.
- [18] I. Fujii, K. Tsuchiya, Y. Shikakura, and M. Murthy, "Consideration on thermal decomposition of calcium hydroxide pellets for energy storage," *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 111, pp. 245-250, 1989.
- [19] M. Scheffler, "Investigation of the Feasibility of a Parabolic Trough Driven Solar Energy Storage System Using Ammonia," Ph.D. dissertation, Stuttgart University, 2001.
- [20] R. Tamme, T. Bauer, and E. Hahne, "Heat storage media," in *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, 2000.
- [21] Yanping Yuan , Nan Zhang , Wenquan Tao , Xiaoling Cao , Yaling He, Fatty acids as phase change materials: A review , *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 29 (2014) 482–498.
- [22] Xiaolin Wang , Mike Dennis, Liangzhuo Hou, Clathrate hydrate technology for cold storage in air conditioning systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 36 (2014) 34–51.
- [23] Weiss, Werner; Faninger, Gerhard. "Solar Heat Worldwide (Markets and Contributions to the Energy Supply 2005)" (PDF). International Energy Agency.
- [24] (USA Energy Authority, 2008) Copy Reserved 05 April 2014 on the site of Wi-Pak Mashin.
- [25] Bimbenet J.J., (1984) Les échanges dans l'industrie agricole et alimentaire Cahiers du génie Industriel Alimentaire (G.I.A), Sepaic, Paris 2ème édition pp34 Cité par H. Madjoudj.
- [26] Charreau A., Cavaille R. (1991) Séchage théorie et pratique Technique de l'Ingénieur, génie des procédés, 2480-1; 2480-23 .
- [27] Daoued Mihoubi, (2004) Déshydratations d'argile par compression et séchage. Aspects de modélisation et de simulation.
- Thèse de doctorat, université de Pan et des pays de l'Adour, école doctorale des sciences exactes et de leur application .
- [28] A. Bondil, J. Hrabovsky Isolation thermique, tome , edition Eyrolles Cité par N. Chalal.

- [29] Lyes Bennamoun. (2001) Simulation numérique d'un séchoir solaire adaptation au climat local Magister, Université de Mentouri Constantine, Faculté des Sciences, Département de physique
- [30] S. Whitaker. (1980) Heat and mass transfert in granular parous media Advances in drying I, Hemisphere publication, pp 23-61
- [31] Jean Claude Charpentier, (1996) Technique de l'Ingénieur, génie des procédés, 2480-4; 2480-20
- [32] Saravacos George D., (1995) Mass transfer proprieties of foods Engineering proprieties of foods, INC 2ème edition, pp531.
- [33] Philip A., Schweitzer, (1979) Hand Book of separation techniques for chemical engineers Me Graw Hill Book Company, pp 4-14, 4-183.
- [34] M.V. Ramana Murthy, (2008) A review of new technologies, models and experimental investigations of solar driers Renewable and sustainable energy reviews RSER-548; pp 10-548.
- [35] Yves Jannot, (2007) Thermique solaire.
- [36] Messaoud Sandali ; Abdelghani Boubekri ; Djamel Mennouche. 09 December 2018 : Etude du comportement thermique d'un séchoire solaire direct influencé par l'intégration d'un milieu poreux non consolide.
- [37] MAHFOUDI Nadjiba. 28/02/2016 : Stockage de la chaleur dans un milieu granuleux solide.



- بالنسبة للسعة الحرارية للمسعر الحراري $C_{P_{calorifique}}$

T_{eau1}	T_{amb}	m_{eau}	$T_{\epsilon1}$
$50C^{\circ}$	$21C^{\circ}$	147,2g	$44C^{\circ}$

الجدول 2: جدول يوضح نتائج تجربة السعة الحرارية للمسعر $C_{P_{calorifique}}$

$$C_{p_{eau}} = 4,18 \text{ J/g.k}$$

- حساب السعة الحرارية للمسعر الحراري حسب المعادلة التالية:

$$C_{P_{calorifique}} = \frac{m_{eau} \times C_{p_{eau}} (T_{\epsilon1} - T_{eau1})}{(T_{\epsilon1} - T_{amb})}$$

- التطبيق العددي

$$C_{P_{calorifique}} = \frac{147,2 \times 4,18(50 - 44)}{(44 - 21)}$$

$$C_{P_{calorifique}} = 160,512 \text{ J/K}$$

- بالنسبة لحساب السعة الحرارية للحصى

T_{eau2}	T_{amb}	m_{eau}	$m_{الحصى}$	$T_{الحصى}$	$T_{\epsilon2}$
$21C^{\circ}$	$21C^{\circ}$	147,2g	25g	$100C^{\circ}$	$25C^{\circ}$

الجدول 3: جدول يوضح نتائج تجربة السعة الحرارية للحصى $C_{P_{الحصى}}$.

- حساب السعة الحرارية للحصى حسب المعادلة التالية:

$$C_{P_{الحصى}} = \frac{(m_{eau} \times C_{p_{eau}} + C_{P_{calorifique}})(T_{\epsilon2} - T_{amb})}{m_{الحصى}(T_{\epsilon2} - T_{الحصى})}$$

- التطبيق العددي

$$Cp_{\text{الحصى}} = \frac{(147,2 \times 4,18 + 160,512)(25 - 21)}{25 \cdot 10^{-3}(100 - 25)}$$

$$Cp_{\text{الحصى}} = 1654,8 \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \text{K}^{-1}$$

• بالنسبة للسعة الحرارية للرمل الخشن

T_{eau3}	T_{amb}	m_{eau}	$m_{\text{الرمل الخشن}}$	$T_{\text{الرمل الخشن}}$	T_{e3}
21°C	21°C	147g,2	25g	100°C	26°C

الجدول 4: جدول يوضح نتائج تجربة السعة الحرارية للرمل الخشن $Cp_{\text{الرمل الخشن}}$.

- حساب السعة الحرارية للرمل الخشن حسب المعادلة التالية:

$$Cp_{\text{الرمل الخشن}} = \frac{(m_{\text{eau}} \times Cp_{\text{eau}} + Cp_{\text{calorifique}})(T_{\text{e3}} - T_{\text{amb}})}{m_{\text{الرمل}}(T_{\text{e3}} - T_{\text{الرمل الخشن}})}$$

- التطبيق العددي

$$Cp_{\text{الرمل الخشن}} = \frac{(147,2 \times 4,18 + 160,512)(26 - 21)}{25 \cdot 10^{-3}(100 - 26)}$$

$$Cp_{\text{الرمل الخشن}} = 2096,8 \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \text{K}^{-1}$$

مثال قام احد الباحثين بحساب السعة الحرارية للرمل في منطقة وادي سوف بالجزائر بحيث تحصل على قيمة.

$$Cp = 920 \text{J/kg} \cdot ^{\circ}\text{C}.$$

الملخص

يقدم هذا العمل مساهمة تجريبية ونظرية لدراسة السلوك الحراري لمادتين (الرمل و الحصى). كوسط بيئي و اقتصادي، بغرض استخدامه كوسط لتخزين الطاقة الحرارية والدراسة النظرية لتكنولوجيات التخزين. هذا العمل التجريبي مكنا من اختيار تقنية لتأمين التخزين الحراري في الرمل والحصى، وذلك باستغلال المجفف الشمسي المباشر. تم تحديد الخصائص الفيزيائية للمواد المستعملة (الرمل و الحصى)، بحيث تم إجراء الإعداد التجريبي لحساب السعة الحرارية لكل منهما، حيث كانت: الحصى (1654,8 J/K.kg) الرمل الخشن (2096,8 J/kg.K). الجزء التجريبي لهذه الدراسة يتمثل في التخزين الحراري لمادتين الرمل والحصى في المجفف الشمسي المباشر، واختيار أيهما أفضل تخزيناً للحرارة، والمقارنة بينهم لذلك أجريت دراسة تطبيقية. أظهرت النتائج بان السعة الحرارية وتخزين الطاقة الحراري في المجفف المباشر لمادة الرمل أفضل من الحصى، وذلك عن طريق تحليل السلوك الحراري خلال دورة الشحن والتفريغ. هذا التحليل يسمح لتحديد أداء نظام المجفف المباشر.

الكلمات المفتاحية :

التخزين الحراري، الطاقة الشمسية، المجفف الشمسي المباشر، الوسط الحبيبي.

Résumé

Dans ce travail, nous avons étudié le comportement thermique de deux matériaux (sable et gravier), pouvant être utilisés en tant que moyen de stockage d'énergie. L'étude théorique des technologies de stockage nous a permis de sélectionner une technique d'évaluation du stockage thermique dans le sable et le gravier, le séchoir solaire direct.

La partie expérimentale de cette étude consiste à déterminer les caractéristiques du sable et du gravier et à choisir le meilleur stockage de chaleur. En parallèle, une étude la capacité calorifique des matériaux, nous avons résulté : (1654,8 J/K.kg) pour sable et (2096,8 J/K.kg) pour gravier.

Les résultats et l'utilité de l'utilisation du sable comme matériau de stockage plutôt que du gravier ont été démontrés par l'analyse du comportement thermique pendant le cycle de charge / décharge, ce qui permet de déterminer les performances du système.

Mots-clés: *stockage thermique, énergie solaire, séchoir solaire direct, milieu granulaire.*

Abstract

In this work, we studied the thermal behavior of two materials (sand and gravel), which can be used as a means of storing energy. The theoretical study of storage technologies allowed us to select a technique for evaluating thermal storage in sand and gravel, the direct solar dryer.

The experimental part of this study is to determine the characteristics of sand and gravel and to choose the best heat storage. In parallel, a study of the heat capacity of materials, we obtained: (1654.8 J/K.kg) for sand and (2096.8 J/K.kg) for gravel.

The results and utility of using sand as a storage material rather than gravel have been demonstrated by the analysis of thermal behavior during the charge/discharge cycle, which allows the performance of the system to be determined.

Keywords: *thermal storage, solar energy, direct solar dryer, granular medium.*