رقم الترتيب:.....

رقم التسلسل:.....

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة الشهيد حمه لخضر بالوادي

كلية العلوم الدقيقة

قسم: الكيمياء

مذكرة تخرج مقدمة لنيل شهادة ماستر مهني في الكيمياء

تخصص: كيمياء تحليلية

من إعداد الطلبة :

بوخالفة أسماء – صولي خولة

تحت عنوان:

تطبيق العملية الفوتوحرارية في التبخير السطحي للماء

Application of photothermal process for interfacial water evaporation

نوقشت علنا يوم: 2026/06/06

أمام اللجنة :

مصباحي محمد عادل	أستاذ محاضر قسم ـ ب	رئيسا
زبيدي عمـار	أستاذ التعليم العالي	مناقشا
محلو أحمد	أستاذ التعليم العالي	مؤطرا

السنة الجامعية: 2026/2025

ملـخص

تعتمد العملية الفوتوحرارية في معالجة المياه على تحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة حرارية باستخدام مواد ماصة للضوء تسمى بالمواد الفوتوحرارية. تعمل هذه العملية على تسخين الماء وتعزيز تبخره السطحي بكفاءة عالية، يليها عادة تكثيف البخار الناتج واستعادته.

يهدف هذا العمل إلى دراسة إمكانية استخدام مادة فوتوحرارية تتكون أساسًا من الكربون المنشط المستخلص من مخلفات النخيل. وقد تم تحسين البنية الهيكلية لطبقة الكربون المنشط (AC) بدمجها مع بوليمر حيوي (الألجينات، AG) متشابك بأيونات الكالسيوم. أُجريت تجارب مخبرية لتقييم أداء المادة الفوتوحرارية المصنعة في تبخير الماء تحت تأثير عدة عوامل تجريبية. أظهرت النتائج الأولية أن وجود الظاهرة الفوتوحرارية زاد من معدل تبخر الماء بمقدار خمسة أضعاف تقريبًا تحت الضوء المحاكي، وستة أضعاف تقريبا تحت ضوء الشمس. بلغت درجة حرارة سطح المادة الفوتوحرارية حوالي 43.1°C تحت ضوء الشمس، و 42.8°C تحت الضوء الاصطناعي. بينما في حالة التبخر الطبيعي لم تتجاوز درجة حرارة الماء 34°C. فيما يتعلق بتأثير بعض العوامل التجريبية، حققت الكتلة 0.4 g من الكربون المنشط أفضل أداء، بينما لم تُظهر التغيرات في تركيز كلوريد الكالسيوم ($CaCl_2$) تأثير مهمًّا على كفاءة التبخير. مع ذلك، أثبتت تحاليل المجهر الإلكتروني الماسح (SEM-EDX) و طيف الأشعة تحت الحمراء (FTIR) أن وجود أيونات الكالسيوم (Ca^{2+}) يُسهم في الترابط التشابكي وتقوية بنية بوليمر AG. كما أن زيادة تركيز AG إلى غاية 20 $g.L^{-1}$ تُحسّن أداء النموذج الفوتوحراري. من جهة أخرى، فإن زيادة تركيز ملح كلوريد الصوديوم (NaCl) في الماء المُبخّر له تأثير طفيف فقط على أداء العملية. ومن خلال عدة اختبارات لإعادة الإستعمال، أظهر النموذج الفوتوحراري المصنّع استقرارًا وأداءً مقبولين.

تُبرز هذه النتائج فعالية المادة الفوتوحرارية المُشتقة من المخلفات الزراعية المحلية كبديل واعد وفعّال من حيث التكلفة، ومستدام بيئيًا لتطوير أنظمة معالجة المياه القائمة على الطاقة المتجددة.

الكلمات المفتاحية: المخلفات النباتية، المواد الفوتوحرارية، التبخر السطحي الشمسي، التبخر السطحي للماء، المياه الراكدة.

Abstract

The use of photothermal technology in water treatment involves converting light energy into thermal energy using light-absorbing materials named photothermal materials. This process heats the water and enhances its surface evaporation with high efficiency, followed by condensation and recovery of the generated steam.

This work aims to investigate the feasibility of using a photothermal material primarily composed of activated carbon (AC) derived from palm waste. The structural integrity of the AC layer was improved by blending it with a calcium-ion-crosslinked biopolymer. Laboratory experiments were conducted to evaluate several factors affecting the material's performance during the photothermal evaporation process. Preliminary results showed that the photothermal effect increased the water evaporation rate by approximately fivefold under artificial light and sixfold under sunlight. The surface temperature of the photothermal material reached approximately 43.1°C under sunlight and 42.8°C under artificial light. In contrast, the water temperature did not exceed 34°C during natural evaporation. Regarding the influence of certain experimental parameters, the use of a 0.4 g mass of AC yielded the best performance, while variations in the concentration of calcium chloride ($CaCl_2$), showed no significant effect on evaporation performance, but SEM-EDX and FTIR characterization proved that the presence of Ca^{2+} ions contributes to crosslinking and strengthening the polymer structure of AG. Increasing the AG concentration up to 20 $g.L^{-1}$ improves the performance of the photothermal model. On the other hand, increasing the concentration of NaCl salt in the evaporated water has only a slight effect on the performance of the process. Through several recycling tests, photothermal material demonstrated acceptable stability and performance.

These results highlight the effectiveness of photothermal material derived from local agricultural waste as a promising, cost-effective, and environmentally sustainable alternative for developing renewable energy-based water treatment systems.

Keywords: Plant waste, Photothermal materials, Solar-driven interfacial evaporation, Interfacial water evaporation, Stagnant water.

❁ بِسْمِ اللّٰهِ الـرَّحْمٰـنِ
الـرَّحِيـمِ ❁

شـكـر وتـقـد يـر

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات، والصلاة والسلام على أشرف المرسلين

نتقدم نحن الطالبتان بجزيل الشكر ووافر الامتنان إلى أستاذنا الفاضل الدكتور **محلو أحمد**، المشرف على هذه المذكرة، على ما أولانا إياه من رعاية علمية، وتوجيه سديد، ومتابعة دقيقة، وصبر جميل طيلة فترة إنجاز هذا العمل. فكان لتوجيهاته القيمة وآرائه النيرة الأثر البالغ في إخراج هذه المذكرة على أحسن وجه.

كما يطيب لنا أن نتوجه بخالص الشكر والتقدير إلى الدكتور **مصباحي محمد عادل** ، رئيس لجنة المناقشة، على تفضله بقبول رئاسة اللجنة وتشريفنا بقراءة هذا العمل وتقييمه

ونتقدم بالشكر الجزيل إلى الأستاذ الدكتور **زوبيدي عمار**، عضو لجنة المناقشة، على قبوله مناقشة هذه المذكرة و على ما سيقدمه من ملاحظات علمية قيمة تسهم في إثرائها وتقويمها

ولا يفوتنا أن نشكر كل أساتذة قسم الكيمياء بجامعة **الشهيد حمة لخضر** على ما قدموه لنا من علم ومعرفة خلال مسارنا الجامعي، وعلى كل ما بذلوه من جهد في سبيل تكويننا.

كما لا ننسى كذلك شكر كل من ساعدنا من قريب و من بعيد في إنجاز و إتمام هذا العمل، حيث نخص بالذكر كل المخبريات (**ترعة ح، غانم ك، بلول ك، بوحامد م**) اللواتي كن ساهرات على خدمتنا و مساعدتنا طيلة مدة العمل.

وفي هذا المقام، نستذكر بالرحمة والعرفان الأستاذ **"جمال عطية"** ـ رحمه الله ـ، تقديرًا لما قدمه من جهود وعطاء في خدمة القسم والطلبة، سائلين الله أن يتغمده بواسع رحمته ويجزيه خير الجزاء.

والله ولي التوفيق

إهـــــداء

إلى من كانوا النور الذي يهتدي به قلبي في كل طريق...

إلى أمي وأبي، نبض روحي وسند عمري، من غرسا فيّ الحلم وعلّماني أن لا شيء مستحيل

إلى إخوتي الأعزاء **رباب، نجوى، عايدة، عبد الودود، أنس**، رفقائي في الفرح والدرب الجميل

وإلى أختي الكبرى **سناء** وعائلتها الصغيرة، الذين كانوا دومًا مصدر حب وطمأنينة

إلى عمّتي، وإلى جدّي وجدّتي، أطال الله في أعمارهم، ومنحهم الصحة والبركة.

وإلى خالتي الحبيبة وعائلتها الكريمة، وإلى أخوالي الأعزاء الذين لم يبخلوا يومًا بالدّعم

إلى أختايا عشيرتا عمري : **خولة** و **آية**

إلى صديقاتي الغاليات رفقاء المسيرة : خولة، فداء... لكل واحدة منكنّ مكان خاص في القلب لا يزول

إلى كل من يحمل لي محبة صادقة ويتمنى لي التوفيق...

إلى عائلتي **بوخالفة**، كلٌ باسمه ومقامه، فأنتم الأصل والظل والبركة

وإلى كل من علّمني حرفًا، وفتح لي بابًا من نور المعرفة...

أهديكم ثمرة جهدي، ودعائي لكم بالخير، وباقة امتنان لا تنتهي.

بـوخـالفـة أسـمـاء

إهـــــداء

الحمد لله الذي بنعمته تتمّ الصالحات، والذي وفقني لأصل إلى هذه اللحظة التي طالما حلمت بها.

إلى والديّ الكريمين ، سندي في الحياة ونور دربي...

إليكما أهدي ثمرة هذا النجاح، فبعد فضل الله كان دعاؤكما وتعبكما وصبركما أعظم سبب لوصولي إلى هنا، فشكراً لكما على كل الحب والدعم.

إلى إخوتي الأحبّة: بهاء الدين، إشراق، حيدر، عبد الحق، عبد العليم، ويوسف الصديق، شكراً لكونكم دائماً مصدر قوة وفرح في حياتي.

وإلى ابن أختي الغالي حذيفة، أهديك هذا النجاح لتكبر وأنت مؤمن بأن الأحلام تتحقق بالإصرار والطموح.

إلى جدي وجدتي أطال الله في عمركما، وإلى جدتي الراحلة رحمها الله، وإلى حبيبة قلبي ملاك الصغيرة رحمها الله، أسأل الله أن يجعل ذكراهم الطيبة ودعواتهم نوراً يرافقني دائماً.

إلى صديقاتي العزيزات: يسرى، فداء، بسملة، نرجس، وأسماء، شكرا لكل لحظة دعم وصدق ومحبة جعلت أيامي أجمل واخف

وإلى بنات خالتي: إكرام، زينب، وبيان،

دمتُنّ دائمًا قريبات من القلب ومصدرًا للفرح والمحبة.

وفي الختام، أهدي هذا النجاح لكل من ساندني بدعوة صادقة أو كلمة طيبة، بكل حب وامتنان.

صولي خولة

قائمة الأشكال

الشكل	العنوان	الصفحة
(1.I)	تمثيل تخطيطي لآلية التبخر السطحي للماء بالظاهرة الفوتوحرارية	05
(2.I)	مخطط تصنيف المواد الفوتوحرارية	07
(3.I)	مخطط يوضح تاريخ استعمال الكربون المنشط	09
(4.I)	البنية التحتية للفحم المنشط	10
(5.I)	بعض المصادر النباتية للكربون النشط (قشور جوز الهند، قصب السكر، قشور الأرز على ترتيب).	13
(6.I)	صورة فوتوغرافية لمياه راكدة في منطقة حضرية بمدينة الوادي	16
(1.II)	جذوع النخيل مقطعة إلى قطع صغيرة.	26
(2.II)	تجفيف قطع جذوع النخيل في الفرن.	27
(3.II)	طحن جذوع النخيل على شكل مسحوق.	27
(4.II)	مسحوق جذوع النخيل بعد الحرق الأولي.	29
(5.II)	التفاعل الحراري.	29
(6.II)	مخطط تلخيصي لخطوات تحضير الفحم المنشط إنطلاقا من جذوع النخيل الجافة.	30
(7.II)	صورة فوتوغرافية للعينة الفوتوحرارية المحضرة.	32
(8.II)	مخطط تمثيلي يوضح شكل النموذج الفوتوحراري المُصمم.	32
(9.II)	صورة فوتوغرافية للنموذج الفوتوحراري المصمم.	33
(10.II)	إجراء تجارب التبخير الفوتوحراري تحت الإشعاع الضوئي المحاكي. A: المصباح الهالوجيني المحاكي لضوء الشمس، B: العينات داخل خزانة الإختبار.	34
(11.II)	عينات التبخير الفوتوحراري تحت الضوء المحاكي الشمسي.	34
(12.II)	جهاز طيف الأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه (FTIR).	35

(13.II)	جهازالمجهر الإلكتروني الماسح (SEM) المزوّد بنظام EDS.	36
(14.II)	صورة توضح مبدأ التصوير بالكاميرا الحرارية ذات الأشعة تحت الحمراء (مثال لمكعب ثلج أثناء الذوبان بالتسخين).	38
(15.II)	الكاميرا الحرارية المستعملة في هذا العمل من النوع : Noyafa NF-521.	38
(17.II)	صورة فوتوغرافية للموقع الجغرافي للبحيرة الراكدة و الواقعة داخل مدينة وادي سوف و الآثار البيئية الناجمة عنها.	40
(1.III)	صور SEM لعينة من الـAC (A) ، العينة الفوتوحرارية في حالة عدم وجود عامل التشبيك Ca^{2+} (B) و في حالة وجود عامل التشبيك Ca^{2+} (C).	44
(2.III)	مخطط يوضح عملية تشبيك السلاسل البوليميرية للألجينات بواسطة أيون معدني ثنائي الشحنة.	45
(3.III)	تحليل EDX لعينة من الـAC (A)، العينة الفوتوحرارية في حالة عدم وجود عامل التشبيك Ca^{2+} (B) و في حالة وجود عامل التشبيك Ca^{2+} (C).	46
(4.III)	طيف FTIR لعينة من الـAC (A)، العينة الفوتوحرارية في حالة عدم وجود عامل التشبيك Ca^{2+} (B) و في حالة وجود عامل التشبيك Ca^{2+} (C).	47
(5.III)	(A) معدل التبخر في حالة وجود النموذج الفوتوحراري وغيابه تحت Sunlight وتحت Artificial light , (B) تغير درجة حرارة السطح الفوتوحراري تحت Sunlight وتحت Artificial light	50
(6.III)	صور حرارية للسطح المائي والسطح الفوتو حراري مسجلة خلال التجربة تحت (A) الضوء الاصطناعي المحاكي (Artificial light)، (B) ضوء الشمس (Sunlight).	52
(7.III)	(A) تغير درجة الحرارة (°C) لسطح النموذج الفوتوحراري خلال التجربة، (B) كفاءة التبخر ($Kg.m^{-2}.h^{-1}$) من أجل مختلف كتل الكربون المنشط المستعملة.	53
(8.III)	تغير كفاءة التبخر ($Kg.m^{-2}.h^{-1}$) من أجل مختلف تراكيز بوليمير الألجينات المستعملة.	55
(9.III)	(A) تغير درجة الحرارة (°C) لسطح النموذج الفوتوحراري خلال التجربة، (B) كفاءة التبخر ($Kg.m^{-2}.h^{-1}$) من أجل مختلف تراكيز ملح $CaCl_2$.	56

(10.III)	تغير كفاءة التبخر ($Kg.m^{-2}.h^{-1}$) من أجل مختلف تراكيز ملح NaCl في الماء.	58
(11.III)	معدل التبخر عند نهاية كل تجربة إعادة إستخدام للنموذج الفوتوحراري تحت الضوء المحاكي (Artificial light).	59
(12.III)	صور حرارية لسطح النموذج الفوتوحراري المسجلة عند نهاية كل تجربة إعادة إستخدام تحت الضوء المحاكي (Artificial light).	60

قائمة الجداول

الجدول	العنوان	الصفحة
(1.III)	المواد الكيميائية المستعملة	25
(2.III)	نوع المسامات وقطرها	43
(3.III)	حزم مطيافية الأشعة تحت الحمراء بتحويل فوريه (FTIR) المميزة لألجينات الصوديوم مع التعيينات المقابلة لها.	48

قائمة الرموز و الإختصارات

الرمز	التسمية بالإنجليزية	التسمية بالعربية
MOFs	Metal-Organic Frameworks	الأطر المعدنية العضوية
COFs	Covalent Organic Frameworks	الأطر العضوية التساهمية
LSPR	Surface Plasmon Resonance	رنين البلازمون السطحي
PAC	Powdered Activated Carbon	الكربون النشط المسحوق
GAC	Granular Activated Carbon	الكربون النشط الحبيبي
AC	Activated Carbon	الكربون النشط
AG	Biopolymer (Alginate)	البوليمر الحيوي (الالجينات)
FTIR	Fourier-Transform Infrared Spectroscopy	طيف تحويل فورييه للاشعة تحت حمراء
EDS	Electron Diffraction Spectroscopy	قياس طيف حيود الالكترون
SEM	Scanning Electron Microscopy	المجهر الإلكتروني الماسح
WHO	World Health Organization	منظمة الصحة العالمية
ASTM	American Society for Testing and Materials	الجمعية الأمريكية للاختبار والمواد

الـفـهـرس

ملخص

شكر و إهداء

قائمة الأشكال **i**

قائمة الجداول **iv**

قائمة الرموز و الإختصارات **v**

مقدمة عامة **01**

الفصل الأول: الجزء النظري

1.I التبخير الفوتوحراري (Photothermal evaporation) **04**

1.1.I مقدمة 04

2.1.I تعريف التبخير الفوتوحراري 04

3.1.I نبذة تاريخية عن التبخير الفوتوحراري 05

4.1.I تصنيف المواد الفوتوحرارية 06

1.4.1.I الجسيمات النانوية المعدنية 06

2.4.1.I المواد شبه الموصلة 06

3.4.1.I البوليمرات المترافقة 06

4.4.1.I المواد الكربونية 06

5.4.1.I الأطر المعدنية العضوية والأطر العضوية التساهمية 07

6.4.1.I مواد الهيدروجيل 07

5.1.I استعمالات عملية التبخير الفوتوحراري 08

1.5.1.I تحلية المياه 08

2.5.1.I معالجة مياه العادمة الصناعية 08

3.5.1.I توليد الكهرباء 08

4.5.1.I إزالة المعادن الثقيلة 08

2.I الكربون النشط (المنشط) **09**

1.2.I لمحة تاريخية عن استعمال و اكتشاف الكربون النشط 09

2.2. I تعريف الكربون النشط 10

3.2. I تحضير الكربون النشط 10

1.3.2.I مرحلة الكربنة 10

2.3.2.I مرحلة التنشيط 11

4.2. I أنواع الكربون النشط 11
1.4.2.I الكربون النشط المسحوق (PAC) 11
2.4.2.I الكربون النشط الحبيبي (GAC) 12
5.2. I تطبيقات الكربون النشط 12
6.2. I مصادر تحضير الكربون النشط 13
1.6.2.I الكربون النشط من أصل نباتي 13
2.6.2.I الكربون النشط من أصل حيواني 13
7.2. I مخلفات أشجار النخيل كمصدر لتحضير الكربون النشط 14
1.7.2.I مكونات مخلفات أشجار النخيل 14
2.7.2.I أهميـــة مخلفات النخيل 15
3.I المياه الراكدة 16
1.3.I تعريف المياه الراكدة 16
1.1.3.I التعريف المفاهيمي 16
2.1.3.I التعريف الهيدرولوجي 16
3.1.3.I التعريف البيوكيميائي 17
2.3. I أسباب ركود المياه 17
1.2.3. I الأسباب الطبيعية 17
2.2.3. I الأسباب البشرية 17
3.3.I مخاطر المياه الراكدة 18
1.3.3.I المخاطر الصحية 18
2.3.3.I المخاطر البيئية 19
3.3.3.I مخاطر نوعية المياه وأنظمة التوزيع 20
قائمة المراجع 21

الفصل الثاني: الطرق و الوسائل

1.II مقدمة 25
2.II المواد المستعملة 25
3.II الأجهزة المستعملة 25
4.II تحضير الكربون المنشط 26
1.4.II التحضير الأولي والكربنة (Pre-treatment and Carbonization) 26
2.4.II التنشيط الكيميائي (Chemical activation) 28
3.4. II الغسل والتنقية النهائية (Washing and Purification) 29

II .5 تحضير عينات التبخير الفوتوحراري 31
II .1.5 تحضير المادة الفوتوحرارية 31
II .2.5 تصميم النموذج الفوتوحراري 31
II.3.5 تحضير نموذج التبخير الفوتوحراري 32
II.4.5 البروتوكول التجريبي وقياسات الأداء 33
II .6 أدوات التحليل و التوصيف 35
II .1.6 مطيافية الأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه (FTIR) 35
II.2.6 التصوير بالمجهر الالكتروني الماسح المزود بمطيافية تشتت طاقة الأشعة السينية (SEM-EDX) 36
II .7 أدوات القياس و المتابعة 37
II .1.7 الكاميرا الحرارية (Thermal imager) 37
II .8 موقع أخذ العينات المائية المراد تبخيرها 39
II .9 الحسابات و عرض النتائج 41
II .1.9 معدل التبخر 41
II .2.9 كفاءة التبخير 41
قائمة المراجع 42

الفصل الثالث: النتائج و المناقشة

III .1 توصيف العينة الفوتوحرارية المصنعة 43
III.1.1 التحليل المورفولوجي و العنصري لسطح العينة الفوتوحرارية 43
III.2.1 التحليل بمطيافية الأشعة تحت الحمراء (FTIR) للعينة الفوتوحرارية 47
III.2 دراسة فعالية الظاهرة الفوتوحرارية في عملية التبخير 49
III.3 دراسة تأثير بعض العوامل التجريبية على فعالية التبخير الفوتوحراري 52
III .1.3 تأثير كمية الكربون المنشط 53
III.2.3 تأثير تركيز الألجينات (AG) 54
III.3.3 تأثير وجود عامل التشبيك (أيونات Ca^{2+}) 55
III.4.3 تأثير وجود ملح معدني في الماء 57
III.4 دراسة إستقرار النموذج الفوتوحراري 59
قائمة المراجع 62

خاتمة عامة **65**

مقدمة عامة

قال تعالى ((وَجَعَلنَا منَ المَاء كُلَّ شَيء حَي)) سورة الأنبياء الآية:30

نعم ، لولا الماء لما كان على وجه الأرض حياة ، عنصر في غاية الأهمية فالماء يدخل في كافة تفاصيل الحياة و هو المسؤول عن وجود الكائنات الحية و بقاءها و استمرارها على الأرض. في الآونة الأخيرة شهد العالم تطور في جميع المجالات من تقدم حضاري و عمراني و غيره، وهذا طبعا بفعل الإنسان و ارتفاع عدد السكان مما أدى إلى زيادة استخدام المياه و بالتالي ارتفاع نسبة تلوثها. تعد المياه الملوثة من أخطر و أهم الأسباب التي تؤثر بشكل كبير على البيئة، لاحتوائها على كميات كبيرة و متنوعة من المركبات الكيميائية و الكائنات الحية الدقيقة **[1]**.

إن طرح المياه الملوثة في البيئة بكميات كبيرة بالإضافة إلى وجود بعض العوامل الطبيعية المساعدة كالبنية الجيولوجية للطبقات الأرضية و ظاهرة صعود المياه، يؤدي إلى تراكمها و تجمعها على السطح. حيث تعد المياه الراكدة بيئة خصبة لتكاثر الحشرات والعديد من أنواع البكتيريا الضارة، كما تشكل مصدرا لانتشار الأمراض المنقولة بالمياه, وتسهم بشكل كبير في تلوث التربة و المياه الجوفية. فضلا عن ذلك, فإن وجود المياه الراكدة في المناطق الحضرية يعيق عملية الصرف الصحي، ويتسبب أيضا في تدمير العديد من البنى التحتية.

إن الطرق المعتمدة لإزالة أو التقليل من المياه الراكدة, خصوصا في المناطق الحضرية من منطقة وادي سوف (الجنوب الشرقي الجزائر)، مثل عملية التشجير، والردم بالتربة، والضخ، ونقل المياه إلى مناطق أخرى، لم تعد فعالة لذلك أصبح من الضروري البحث عن حلول سريعة وفعالة للتخلص من تجمعات المياه الراكدة أو التقليل منها بشكل كبير في المناطق الحضرية **[2-4].**

تبرز تقنية التبخير الفوتوحراري كحل واعد، حيث تعتمد على تحويل الطاقة الشمسية إلى حرارة لتبخير الماء و فصل الملوثات بكفاءة عالية. على خلاف طرق التبخير التقليدية، يركّز التبخير الفوتوحراري على تسخين السطح البيني فقط، مما يرفع الكفاءة الحرارية ويقلل استهلاك الطاقة. وقد ساهم التقدم في تصنيع و تصميم المواد الفوتوحرارية في تحسين أداء هذه التقنية وجعلها قابلة للتطبيق على النطاق الواسع.

ورغم مزايا التبخير الفوتوحراري، إلا أنها لا تزال هناك تحديات تواجهها هذه التقنية مثل فقدان الحرارة، وتراكم الأملاح، وعدم استقرار أشعة الشمس. لذلك، تتجه الأبحاث الحديثة نحو دمجها مع تقنيات أخرى مثل التحفيز الكيميائي وتخزين الطاقة، بهدف تحسين الكفاءة وضمان استمرارية التشغيل، مما يعزز دورها كحل مستدام لتنقية و تبخير المياه **[5]**.

يعد الكربون المنشط أحد أبرز المواد المستخدمة في تصنيع المواد الفوتوحرارية نظرا لقدرته على إمتصاص الضوء و تحويله إلى طاقة حرارية و كذا مساميته و إمتزازيته العالية، كما أنه يُستخدم على نطاق واسع كحامل للمحفزات، و كمادة مازة لتنقية الغازات والسوائل من الملوثات. كما يُعدّ استخدام الكربون المنشط لإزالة الملوثات في معالجة المياه أمرًا بالغ الأهمية **[6]**.

الهدف من هذه الدراسة هو تقييم فعالية مادة فوتوحرارية مصنوعة أساسا من الكربون المنشط المستخلص من بقايا النخيل الجافة (الجذوع) في تسريع تبخر المياه الراكدة باستخدام الطاقة الشمسية بطريقة مستدامة ومنخفضة التكلفة. و للحصول على سطح فوتوحراري متماسك ميكانيكيا و مسامي البنية تم دمج الكربون المنشط مع الألجينات كبوليمير حيوي قليل التكلفة و مستعمل بكثرة في عديد المجالات **[7 -9]**.

وهذا العمل مقسم إلى ثلاثة فصول أساسية :

الفصل الأول (الجزء النظري): وهو مقسم إلى ثلاثة أجزاء كالآتي:

- ✓ الجزء الأول : يحتوي مفاهيم أساسية عن عملية التبخير الفوتوحراري.
- ✓ الجزء الثاني: يتطرق إلى مادة الكربون النشط وأهميته في ميدان حماية البيئة.
- ✓ الجزء الثالث: يعنى بظاهرة تجمع المياه وركودها في الطبقات السطحية.

الفصل الثاني : (الطرق و الوسائل).

الفصل الثالث : (النتائج و المناقشة).

المراجع العربية

[1] صالح الدين (22ماي2017) تقييم كفاءة وحدة معالجة مياه الصرف الصحي في المجمع السكني، مجلة تكريت للعلوم الصرفة قسم علوم الحياة-قسم التقنيات الإحيائية ، كلية التربية البنات-كلية العلوم جامعة تكريت-بغداد، العراق ص64-67.

المراجع الأجنبية

[2] Ameratunga, S. et al. (2021)"Integrated disease management: arboviral infections and waterborne diarrhoea" PLOS Neglected Tropical Diseases.

[3] Barkat, A. et al. (2022)"Assessment of Spatial Distribution and Temporal Variations of the Phreatic Groundwater Level Using Geostatistical Modelling: The Case of Oued Souf Valley "Water, MDPI, 14(9), 1415.

[4] Imene, D. et al. (2024)"Oued Souf (Algerian Sahara): balancing rising groundwater and agricultural sustainability"Bulletin of Geography. Physical Geography Series, 27.

[5] Opoku, K. N., et al. (2025). *Photo thermal water evaporation and catalytic degradation for efficient water treatment: A review*. **Energy Materials, 5,** 500020.

[6] Tamanna, K., Hasan, Md.S. and Priyanka, D. (2016) Applicability of Activated Carbon Filtration in Surface Water Treatment. Asian Journal of Innovative Research in Science, Engineering, and Technology, 1, 1-6 .

[7] Yin, X. et al. (2020)"Super Hydrophilic Activated Carbon Decorated Nanopolymer Foam for Scalable, Energy Efficient Photothermal Steam Generation" Nanomaterials, MDPI.

[8] Li, H. et al. (2023)"Recent advances in carbon-based materials for solar-driven interfacial photothermal conversion water evaporation"Carbon Energy, 5, e331.

[9] Siddique, M.F. et al. (2025)"Self-Cleaning Alginate–PVA Hydrogel Evaporator with Enhanced Solar Desalination Efficiency and Long-Term Salt Resistance"ACS Omega.

الفصل الأول

الـجـزء الـنـظـري

1.I التبخير الفوتوحراري (Photothermal evaporation):

1.1.I مقدمة:

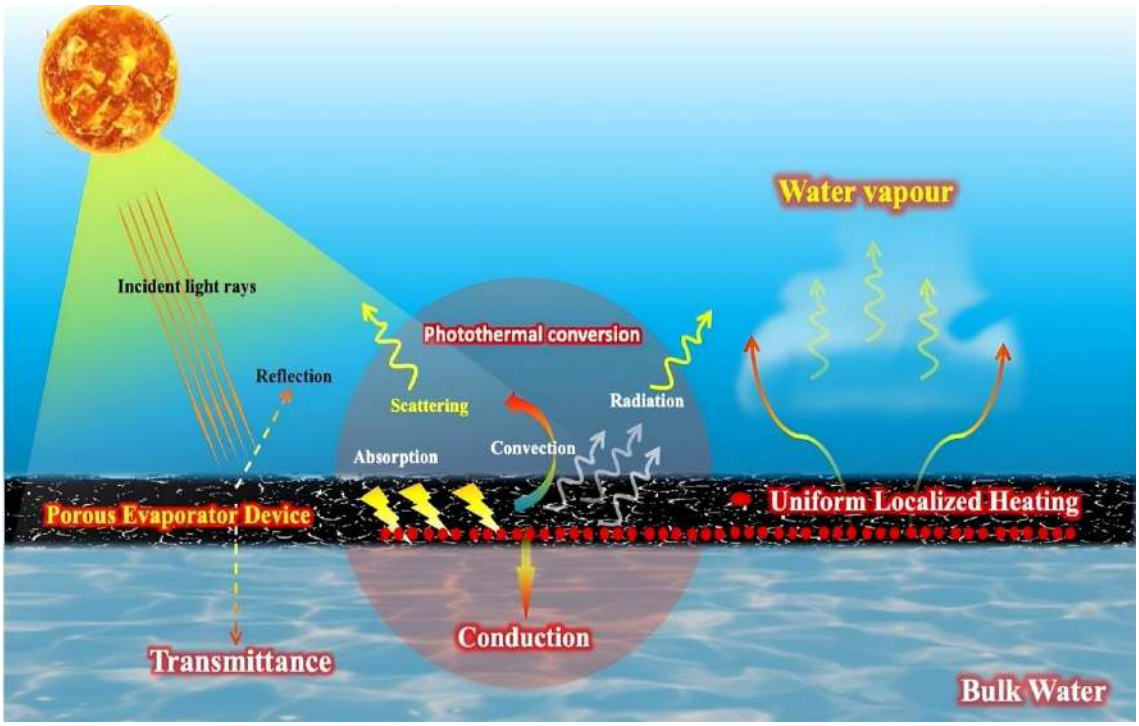
يُعدّ الماء أساس الحياة وعنصرًا حيويًا لاستمرار الكائنات الحية، ومع التطور الصناعي والتكنولوجي الذي شهده العصر الحديث، برزت تحديات بيئية خطيرة في مقدمتها تلوث المياه، الذي أصبح يُهدد صحة الإنسان والتوازن البيئي على حدٍّ سواء. وتُشكّل المياه الراكدة إحدى أبرز هذه التحديات، إذ تُهيّئ ظروفًا ملائمة لتراكم الملوثات وانتشار الكائنات الدقيقة الضارة، مما يُفاقم من خطورة هذه الأزمة ويجعل معالجتها ضرورة بيئية وصحية ملحّة.في هذا السياق، تبرز تقنية التبخير الفوتوحراري كحلٍّ واعد ومستدام، تعتمد على توظيف الطاقة الشمسية في تسخين السطح البيني للماء وتبخيره بكفاءة عالية، بعيدًا عن التكاليف الباهظة للأنظمة التقليدية. وتزداد فاعلية هذه التقنية حين تُدمج بمواد فوتوحرارية عالية الأداء، كالكربون النشط الذي يتميز ببنيته المسامية الواسعة وخصائصه الامتزازية الاستثنائية.

ويهدف هذا الجزء النظري إلى فهم الأسس العلمية لهذه التقنية، من خلال التطرق إلى مفهوم التبخير الفوتوحراري وتطوره وأنواع موادّه، وإلى الكربون النشط المستخلص من بقايا النخيل (الجذور) بوصفه مادةً محلية متجددة ومنخفضة التكلفة، فضلًا عن استعراض إشكالية المياه الراكدة وأسبابها ومخاطرها.

2.1.I تعريف التبخير الفوتوحراري :

يُعد التبخير الفوتوحراري تقنية تعتمد على تحويل الطاقة الشمسية إلى حرارة باستخدام مواد فوتوحرارية تمتص الضوء وتحوّله إلى طاقة حرارية، مما يؤدي إلى تسخين الماء عند السطح البيني وتبخره بكفاءة عالية. وتُعتبر الطاقة الشمسية مصدرًا نظيفًا ومتجددًا يحظى باهتمام كبير في ظل تزايد الطلب على الطاقة وتدهور الموارد الأحفورية.

تعتمد هذه التقنية على مواد نانوية متطورة تمتاز بقدرتها العالية على امتصاص الضوء وتحويله إلى حرارة، مما يحسن كفاءة توليد البخار مقارنة بالأنظمة التقليدية التي تسخن كامل حجم الماء. ومع التطور في علم المواد وتكنولوجيا الناتو، أصبح من الممكن تصميم أنظمة أكثر كفاءة وفعالية لتطبيقات مثل تحلية المياه ومعالجة الملوثات وإنتاج البخار الشمسي. ورغم التقدم الكبير، لا تزال هناك حاجة ماسة لتحسين كفاءة هذه الأنظمة وتطوير مواد منخفضة التكلفة وعالية الأداء لضمان تطبيقها على نطاق واسع في المستقبل [1].



الشكل (1.I) : تمثيل تخطيطي لآلية التبخر السطحي للماء بالظاهرة الفوتوحرارية **[1]**.

3.1.I نبذة تاريخية عن التبخير الفوتوحراري:

إن التبخير الفوتوحراري الذي يعتمد على الاستخدام الطويل المدى للطاقة الشمسية يعود إلى قرون في عديد التطبيقات مثل التحلية الشمسية للمياه , تسخين المياه ... إلخ ، إلا إن الإطار العلمي الحديث القائم على المواد الفوتوحرارية ظهر أساسا في أوائل القرن الحادي والعشرين مع التقدم في تكنولوجيا النانو. وبشكل خاص منذ حوالي عقد من الزمن حيث أدى تطوير ممتصات نانوية البنية (مثل المواد البلازمونية ,المواد الكربونية وأشباه الموصلات) إلى تمكين تحويل فعال للضوء إلى حرارة والتبخير البيني الموضعي عالي الكفاءة, مما حسّن الأداء بشكل كبير مقارنة بأنظمة التسخين التقليدية. وقد أدى ذلك إلى تقدم سريع في تصميم وهندسة المواد المحولة للضوء إلى حرارة مما حول هذه الظاهرة إلى مجال بحثي رئيسي في علوم الطاقة والبيئة.

يستخدم اليوم التبخير الفوتوحراري على نطاق واسع في تحلية مياه البحر , تنقية المياه العادمة , وأنظمة توليد الطاقة المعتمدة على الشمس حيث يوفر حلا منخفض التكلفة ومستداما لتحديات الماء والطاقة خاصة في المناطق النائية أو محدودة الموارد.

4.1.I تصنيف المواد الفوتوحرارية:

تعتمد كفاءة تبخير الماء بالظاهرة الفوتوحرارية بشكل أساسي على اختيار المواد المغلفة لسطح الجهاز، حيث تُعد قدرة المادة على امتصاص ضوء الشمس وتحويله إلى حرارة عاملًا حاسمًا. وتشمل أبرز المواد المستخدمة الجسيمات النانوية المعدنية، المواد شبه الموصلة، البوليمرات المترافقة، المواد الكربونية، الأطر المعدنية العضوية(MOFs) ، الأطر العضوية التساهمية (COFs)، ومواد الهيدروجيل، وذلك لقدرتها العالية على التقاط الطاقة الشمسية وتحويلها بكفاءة إلى طاقة حرارية.

1.4.1.I الجسيمات النانوية المعدنية:

تتميز بمساحة سطح كبيرة وخصائص رنين البلازمون السطحي (LSPR)، مما يعزز امتصاص الضوء وتحويله إلى حرارة موضعية، إضافة إلى استقرارها وإمكانية إعادة استخدامها. ومع ذلك، فإن تكلفتها المرتفعة تحد من تطبيقها الواسع، مما يدفع إلى تطوير مركبات هجينة لتحسين الأداء وخفض التكلفة.

2.4.1.I المواد شبه الموصلة:

تعمل عبر توليد أزواج إلكترون-فجوة عند امتصاص الفوتونات، وتتحول الطاقة غير الإشعاعية الناتجة إلى حرارة محلية. وتمتاز هذه المواد بقابلية تعديل فجوة الطاقة، وثباتها، وتعدد استخداماتها في تطبيقات بيئية متعددة.

3.4.1.I البوليمرات المترافقة:

تتميز ببنية إلكترونية-π ممتدة تتيح امتصاصًا واسع الطيف للضوء، مع سهولة تعديل خصائصها الكيميائية والبصرية، مما يجعلها فعالة في التحفيز الضوئي عند دمجها مع مواد أخرى.

4.4.1.I المواد الكربونية:

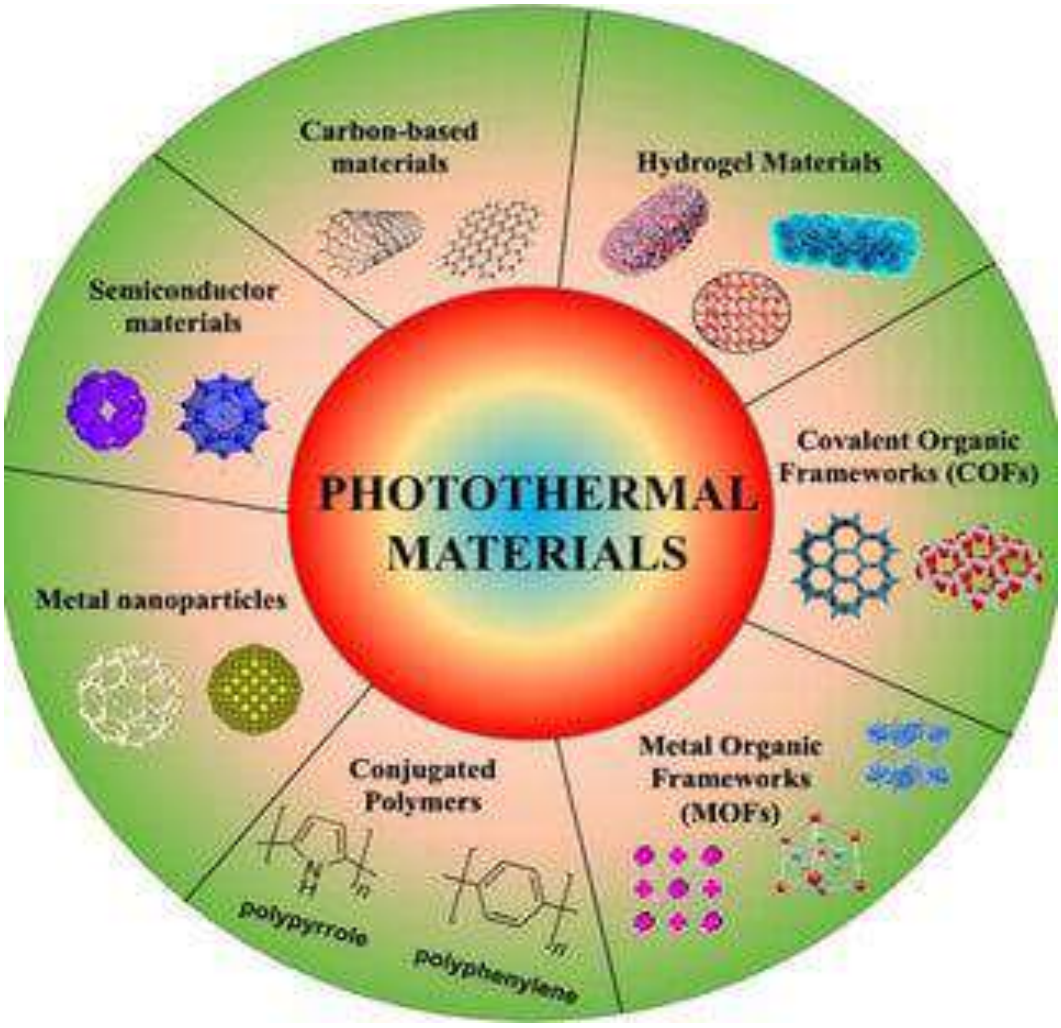
تعد المواد الكربونية مثل الجرافين وأنابيب الكربون النانوية والنقاط الكربونية من أبرز المواد نظرًا لخصائصها الحرارية والكهربائية الممتازة، إضافة إلى كفاءتها العالية في امتصاص الضوء وتحويله إلى حرارة.

5.4.1.I الأطر المعدنية العضوية (MOFs) والأطر العضوية التساهمية (COFs) :

توفر الأطر المعدنية العضوية (MOFs) والأطر العضوية التساهمية (COFs) هياكل ذات مسامية عالية المساحة السطحية وقابلة للتعديل البنيوي، مما يعزز امتصاص الماء والضوء وتحسين كفاءة التبخر، خاصة عند دمجها مع مواد أخرى مثل الجرافين أو الجسيمات النانوية.

6.4.1.I مواد الهيدروجيل:

تتميز بقدرتها العالية على الاحتفاظ بالماء وتسهيل نقله داخل البنية البوليمرية، مع إمكانية دمجها بعوامل فوتوحرارية لرفع كفاءة التحويل الشمسي، بل وإمكانية تحقيق وظائف مزدوجة تشمل إنتاج الكهرباء إلى جانب التبخر **[2]**.



الشكل (2.I): مخطط تصنيف المواد الفوتوحرارية **[2]**.

5.1.I استعمالات عملية التبخير الفوتوحراري:

شهد التبخير الفوتوحراري عدة استعمالات واسعة ومتنوعة , يمكن تصنيفها في المحاور التالية :

1.5.1.I تحلية المياه:

يعدّ استعمال تقنية التبخير الفوتوحراري في مجال تحلية المياه الأكثر تطوراً و شيوعا، إذ تتجاوز كفاءتها 85-95% تحت ضوء الشمس المعياري، بمعدلات تبخر تصل إلى $2.6\ kg.m^{-2}.h^{-1}$ مع قدرة بعض النماذج المعتمدة على ترسيب ملح البحر دون أي نفايات **[5-3]**.

2.5.1.I معالجة مياه العادمة الصناعية:

تجمع بين التبخير وتحطيم الملوثات كالأصباغ والمعادن الثقيلة في خطوة واحدة، دون الحاجة إلى طاقة إضافية، مما يجعلها مثالية للمناطق النائية **[6،5]**.

3.5.1.I توليد الكهرباء:

يُمكن تحويل حرارة البخار إلى كهرباء عبر التأثير زيبيك أو الكهروجريان، بقدرة تتراوح بين 1 و5 واط/م^2 **[3]**.

4.5.1.I إزالة المعادن الثقيلة:

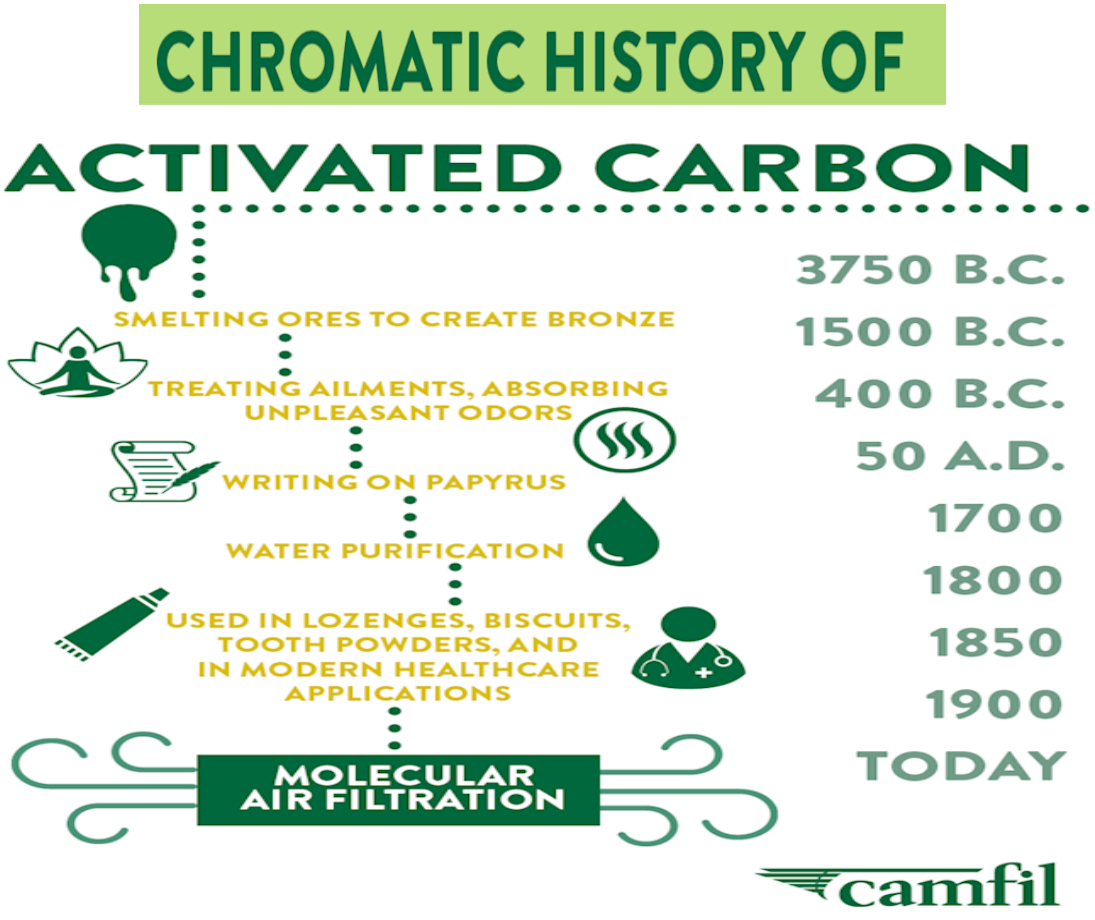
تُزيل مواد الهيدروجيل الفوتوحرارية المعادن الثقيلة كالرصاص والكادميوم بكفاءة تتجاوز 95% **[3]**.

2.I الكربون النشط (المنشط):

1.2.I لمحة تاريخية عن استعمال و اكتشاف الكربون النشط:

يرجع تاريخ الكربون النشط إلى قدماء المصريين منذ عام 1550 ق. م. فقد استخدموه في تطهير الماء أثناء إجراء العمليات الجراحية، ثم أستخدم كبديل عن الفحم الحيواني في عمليات تكرير السكر في عام 1900م، ثم استخدم أثناء الحرب العالمية الأولى في الأقنعة الواقية للحماية من الغازات السامة، وتزايدت وتوالت استخدامات الكربون النشط إلى يومنا هذا **[7]**.

في منتصف القرن التاسع عشر، أصبح الكربون منتشرا على نطاق واسع كعلاج للعديد من الحالات الطبية. وفي عام 1857، لاحظ الطبيب الجراح جيمس بيرد أن الكربون المخلوط بفتات الخبز أو الخميرة يمكن أن يكون مادة مفضلة لتشكيل الضمادات الجراحية **[8]**.



الشكل (3.I) : مخطط يوضح تاريخ استعمال الكربون المنشط **[8]**.

I .2.2 تعريف الكربون النشط:

يُعرف الكربون النشط بأنه مواد كربونية ذات بنية مسامية عالية تعطي مساحة احتكاك داخلية كبيرة، حيث تكون هذه المواد قادرة على امتزاز مركبات عديدة على سطحها الداخلي **[9]**.

I .3.2 تحضير الكربون النشط:

يحضر الكربون النشط انطلاقا من عدد كبير من المواد النباتية أو الحيوانية أو المعدنية، والتي تكون غنية بمادة الكربون مثل: الخشب، قشور جوز الهند، معادن الكربون وغيرها **[10].**

تحضير الكربون المنشط يكون بمرحلتين:

I.3.2.1 مرحلة الكربنة:

الكربنة هي الانحلال الحراري للمادة الأولية تحت جو محكم (غياب الأكسجين) أو تيار من غاز النتروجين عند درجات حرارة أقل من 800درجة مئوية. يتم إجراء الكربنة عموما بسرعة عالية كافية لتقليل الاتصال بين المنتجات الكربونية والمتطايرة **[11]**، وذلك للحصول على مادة كربونية قوية. ذرات الكربون تبقى متجمعة على شكل أوراق عطرية وتملك بنية مستوية وتكون مرتبة بشكل غير منتظم تحصر بينها فجوات تدل على بداية ظهور المسامات الأولى للمادة الكربونية **[12].**

الشكل (4.I) : البنية التحتية للفحم المنشط **[13].**

I.2.3.2 مرحلة التنشيط:

الهدف من هذه المرحلة هو زيادة حجم المسامات وتوسيعها، كما أن طبيعة المادة الأولية المستخدمة أثناء التفحيم تؤثر على البنية واسعة المسامات، كما أن التنشيط يزيل البنية الكربونية المنظمة على شكل صفائح و يجعلها أكثر عشوائية **[14]**.

وهناك طريقتان للتنشيط:

- **التنشيط الفيزيائي (Activation physique):**

التنشيط الفيزيائي يرتكز على الأكسدة في درجات حرارة مرتفعة (750C° _1000C°) بوجود أكاسيد غازية. الغاز المستعمل في هذه المرحلة يكون عبارة عن مزيج من الهواء، بخار الماء وثاني أكسيد الكربون. كما أن مستوى درجة الحرارة يلعب دورا كبيرا في عملية التنشيط وتجانس وتوسيع المسامات **[14]**.

- **التنشيط الكيميائي (Activation chimique):**

ويتم ذلك بغسل المادة المفحمة باستعمال حمض الفوسفوريك (H_3PO_4)، هيدروكسيد البوتاسيوم (KOH)، كلور الزنك ($ZnCl_2$)، أو حمض الكبريتيك (H_2SO_4)، حيث تعد هاته المرحلة شرطا أساسيا لإتمام الأكسدة. ثم تعرض المادة لدرجة حرارة منخفضة مقارنة بتلك التي تستعمل في التنشيط الفيزيائي وذلك لإعادة تنظيم بنية المادة الكربونية المنشطة. وبعد التفاعل نغسل المادة الكربونية المنشطة بالماء المقطر بشكل جيد لإزالة كل أثر للمواد الكيميائية المتبقية. إن المعالجة الكربونية بهذه الشروط تحسن من زيادة البنية المسامية **[14]**.

I .4.2 أنواع الكربون النشط:

I.1.4.2 الكربون النشط المسحوق (PAC):

يتكون الـ PAC من جزيئات الكربون المسحوقة أو المطحونة بحيث تمر منها نسبة 95-100% عبر غربال ذو مسامات تبلغ 0.297 mm وفقا لمعيار جمعية أعمال المياه الأمريكية أو mm 0.177 وفقا للمواصفات *ASTM .D5158*. يتم إنتاج الـ *PAC* بشكل عام من الخشب على شكل نشارة الخشب، ويتراوح متوسط حجم الجسيمات لـ *PAC* بين (25-15μm). تجد *PAC*تطبيقاً واسعاً في معالجة كل من مياه الشرب ومياه الصرف الصحي **[15]**.

I .2.4.2 الكربون النشط الحبيبي (GAC):

عادة ما يكون الـ GAC على شكل حبيبات مطحونة من الفحم. يمكن تحضيرGAC عن طريق تحبيب المساحيق المطحونة، حيث تتراوح أحجام جزيئات GAC من (0,2-5 mm).

تم تحديد *GAC* بأحجام شبكية مثل 8/20، 40/ 20او 8/ 30 لتطبيقات المرحلة السائلة و6/4 أو 8/ 4 أو 10/ 4 لتطبيقات مرحلة البخار، في نطاق 12/ 42 مفيدة شبكة مفيدة الامتصاص الطور السائل **[8]**.

تستخدم مرشحات GAC على نطاق واسع في عمليات تنقية مياه الشرب والمياه الجوفية ومياه الصرف كخطوة معالجة متقدمة خاصة إزالة المركبات العضوية السامة **[16]**.

I .5.2 تطبيقات الكربون النشط:

الفحم المنشط مادة فريدة من نوعها نظرا لتميزها بسطح نوعي كبير وبنية مسامية وخصائصها الامتزازية التي تتمتع بها إضافة إلى درجة تفاعل سطحها العالية.

ومن أهم التطبيقات الصناعية للفحم المنشط هي **[17]**:

- ✓ التخلص من الرائحة واللون والطعم بالإضافة إلى إزالة الشوائب العضوية غير المرغوب فيها من المياه المعالجة الناتجة عن معالجة المياه الزراعية والمنزلية .
- ✓ التحكم في تلوث الهواء عن طريق إزالة الغازات والأبخرة الضارة وإزالة بعض الملوثات المعقدة مثل المبيدات والفينولات والزيوت المعدنية .
- ✓ يستخدم بشكل واسع لامتزاز انبعاثات الزئبق من محطات الطاقة بالفحم ومحارق النفايات الطبية .
- ✓ استعادة المذيبات .
- ✓ في صناعة السكر لتنقية محلول الكر من الشوائب والألوان والحصول على بلورات نقية .
- ✓ يستخدم الفحم النشط لإزالة الأمونيا من حمض الخليك .
- ✓ استعمل الفحم النشط المحضر من مواد خام طبيعية لنزع الكلوروفورم من مياه الشرب فكانت نتائجه إيجابية لنزع هذا الأخير.

I .6.2 مصادر تحضير الكربون النشط:

من بين أهم مصادر تحضير الكربون النشط نجد المخلفات الحيوانية أو الزراعية، ولذلك فإن الفحم النشط من أصل نباتي أو الحيواني تعتبر الأكثر انتشارا من حيث الاستخدام:

I.6.2.1 الكربون النشط من أصل نباتي :

يتم إنتاجه عن طريق الانحلال الحراري للمواد العضوية ذات أصل نباتي ثم تنشيطه بعامل منشط.
وتشمل هذه المواد على سبيل المثال : قشور جوز الهند والخشب، قصب السكر وقشور فول الصويا، قشور الأرز، الطحالب وقذائف الجوز والمخلفات الزراعية **[18]**.

الشكل (5.I) : بعض المصادر النباتية للكربون النشط
(قشور جوز الهند، قصب السكر، قشور الأرز على ترتيب) **[18]**.

I.6.2.2 الكربون النشط من أصل حيواني:

الكربون النشط الحيواني أو ما يدعى بفحم العظام النشط هو نوع من الفحم يتشكل عن طريق تسخين عظام الحيوانات في وسط يحتوي على كمية قليلة من الهواء، يعتبر الفحم الحيواني أكثر أنواع الفحم الكربوني قتامة، إلا أن استخداماته بقيت محدودة مقارنة بالفحم النباتي.

عظام الحيوانات هي جزء من المركب الذي يشكل جسم الحيوانات. حيث يعطي أساسا شكلا ودعما للحيوانات (أنظمة الهيكل العظمي). يحتوي على حوالي 10٪ من الكربون، والباقي من الكالسيوم

والمغنيسيوم(80٪) والمواد غير العضوية الأخرى الموجودة في العظام. ومن بين أهم عظام الحيوانات التي تستخدم في تحضير الكربون النشط نجد :عظام البقر، الدجاج، الكالب، الجمال والماعز **[18]**.

I .7.2 مخلفات أشجار النخيل كمصدر لتحضير الكربون النشط :

تعتبر مخلفات نخيل التمر من أهم الموارد الطبيعية المتجددة التي من المحتمل أن تكون لها قيمة اقتصادية كبيرة عند إعادة استخدامها بالطرق المثلى ويقصد بها جميع النواتج وبقايا النخيل غير الرئيسية أثناء القيام بالعمليات الزراعية في المزرعة، وتشمل هذه المخلفات الجذوع، السعف، الكرناف، الليف، الغمد.... الخ **[19]**.

I.7.2.1 مكونات مخلفات أشجار النخيل :

وفي دراستنا هذه قمنا باختيار جذوع النخيل كواحدة من المخلفات من أجل الحصول على الفحم النشط .تتكون مخلفات النخيل من مواد لينيوسيلولوزية والتي تتكون بشكل رئيسي من: السليلوز، هيميسيليلوز، واللجنين **[12]**.

❖ **السيـــليلوز:**

يعتبر المكون الأساسي بجدار الخلايا النباتية على شكل متعدد السكاريد (polysaccharide) غير قابل للذوبان في الماء، تتفاوت نسبته حسب طبيعة ونوع النبات على العموم في القطن أكثر من (90%)، أما باقي الهياكل النباتية ما بين (30-50%) مما جعله ذو قيمة اقتصادية عالية **[20]**.

❖ **الهيميـــسيليلوز:**

هيميسيليلوز هو متعدد السكاريد والذي يوجد في جميع النباتات التي تتميز بكتلة موالية أقل بكثير من تلك التي في السيليلوز وبني أقل اعتيادية سواء بوجود وحدات مختلفة في فروعها حيث يحتل الهيميسيليلوز حوالي ربع إلى ثلث معظم المواد النباتية على عكس السيليلوز الذي هو جزء فريد من نوعه يختلف فقط في درجة البلمرة والتبلور **[21]**.

❖ **اللجنيـن:**

هو المكون الأساسي الثالث للمواد اللجنوسيليلوزية، والتي ليست من الكربوهيدرات وهو ليفي يساعد النبات في الحماية الميكانيكية (متانة الشد) نجده دوما في شراكة مع الهيميسيليلوز ليس كالتحام فيزيائي فحسب بل حتى برابطة تكافئية، في العموم يتشكل ممن ثالث وحدات بنائية **[21]**.

2.7.2.I أهميـــة مخلفات النخيل:

للنخلة فوائد كثيرة تتجاوز كونها مصدر غذاء أساسي للإنسان، فهي تحتوي على منتوجات ثانوية وقد أتقن الحرفيون بعض الصناعات منها. كما استخدم كل جزء منها في شتى جوانب الحياة، حيث استخدمت جميع أجزاء النخلة. كما يوجد عدة مجالات رئيسية الاستخدام نواتج تقليم نخيل التمر في الصناعات ومنها صناعة السماد العضوي (الكمبوست)، صناعة الأخشاب، بعض الصناعات الحرفية اليدوية، أعلاف الأغنام والحيوانات وصناعة أوراق الطباعة **[22]**.

3.I المياه الراكدة:

1.3.I تعريف المياه الراكدة:

1.1.3.I التعريف المفاهيمي:

تُعرَّف المياه الراكدة (Stagnant Water) في مجال علوم البيئة والهيدرولوجيا بأنها تلك الكتل المائية التي تفتقر إلى الحركة والتدفق الطبيعي، أو تتسم بحركة بطيئة للغاية بحيث لا تُفضي إلى تجديد مستمر لمحتواها المائي **[23]**. ويُعدّ هذا الركود المائي المحرّك الرئيسي لجملة من العمليات الفيزيوكيميائية والبيولوجية التي تُغيّر جذريًا التركيب الكيميائي والبيولوجي للماء.

وتتعدد الأنظمة المائية التي يشيع فيها الركود، وتشمل على وجه التحديد: البُحيرات الضحلة والمستنقعات (Marshes) والأحواض المعزولة، فضلًا عن المياه المحبوسة داخل شبكات التوزيع الصناعية والمنزلية، والخزانات الأرضية والعلوية غير المُدارة **[24]**.

2.1.3.I التعريف الهيدرولوجي:

من الناحية الهيدرولوجية، يُوصف الماء بأنه راكد حين يكون معدل تجدده منخفضاً جداً بالمقارنة مع معدلات الإضافة والسحب، إذ يُعبّر عن الركود رياضيًا بانعدام الجريان المائي أو اقترابه من الصفر ($Q \approx 0$). وتترتب على هذا الركود استجابات ثانوية كتطابق المياه (Thermal Stratification) وتهدّد التحكّم في الأكسجين المذاب **[25]**.

شكل (6.I) : صورة فوتوغرافية لمياه راكدة في منطقة حضرية بمدينة الوادي.

3.1.3.I التعريف البيوكيميائي:

أما من المنظور البيوكيميائي، فتُمثّل المياه الراكدة بيئةً مائية يعجز فيها التبادل الحراري والكيميائي مع الوسط الخارجي عن تحقيق التوازن الذاتي للمنظومة. وقد أكد (Chapra, 2008) أن فقدان الأكسجين الذائب بفعل الركود يُطلق آليات التحلل اللاهوائي (Anaerobic Decomp osition)، مما يُفضي إلى تراكم المركبات العضوية المعقدة والمواد السامة كمركبات الكبريت والميثان **[26]**.

2.3. I أسباب ركود المياه:

تتشعّب أسباب ركود المياه بين عوامل طبيعية وأخرى بشرية، وغالبًا ما تتضافر هذه العوامل لتُفاقم من حدة الظاهرة وانتشارها.

1.2.3. I الأسباب الطبيعية:

1) التضاريس والطوبوغرافيا:

تُسهم طبيعة التضاريس الجغرافية إسهامًا مباشرًا في نشوء ظاهرة ركود المياه؛ فالمناطق المنخفضة والمحاطة بحواجز طبيعية كالجبال والكثبان الرملية تُشكّل أحواضًا مستغلّة للمياه تُقيّد حركة الجريان السطحي وتُهيئ بذلك شروط الركود المائي الملائمة **[27]**.

2) انعدام التصريف الطبيعي:

في بعض المناطق الجيولوجية، تتسم طبقة التربة السطحية بنفاذية منخفضة (Low Permeability) مما يُعيق التصريف الطبيعي للمياه نحو الطبقات الجوفية. ويترتب على ذلك تجمّع المياه وبقاؤها على السطح لفترات مطوّلة، مُشكّلةً وفرة من الوسائط الراكدة **[28]**.

3) الجفاف وانخفاض مستوى المسطحات المائية:

تؤدي حالات الجفاف المتكررة والتذبذب المناخي إلى انخفاض مستويات المياه في الأنهار والبحيرات، مما يُحوّل أجزاء منها إلى أحواض منعزلة تفقد اتصالها بالتدفق الرئيسي وتتحوّل إلى مناطق ركود مائي معزولة **[28]**.

2.2.3. I الأسباب البشرية:

1) الصرف الصناعي غير المعالَج: يشكّل ضخّ المياه الصناعية غير المعالَجة في المسطحات المائية مصدرًا رئيسيًا للتلوث الذي يُسرّع الركود البيولوجي. إذ تحتوي هذه المياه عادةً على كميات

هائلة من المواد العضوية والمغذيات (Nutrients) التي تُحرّض الازدهار الطحلبي (Algal Bloom) وتستنزف الأكسجين الذائب **[29].**

2) التوسع العمراني والإنشاءات الهيدروليكية:

أسهمت إنشاءات السدود والقناطر والخزانات الصناعية في إحداث خلل في نظم الجريان الطبيعية، مما أفرز مناطق شاسعة من المياه الراكدة. وقد وثّق (Poff et al,1997) **[30]** أن التلاعب في الأنظمة الهيدرولوجية يُعيد تشكيل الديناميكيات المائية بصورة جوهرية، مُوجِدًا بيئات راكدة في مناطق كانت تتسم بالحيوية قبل التدخّل البشري.

3) شبكات التوزيع المائي المتقادمة:

تُعاني شبكات مياه الشرب في كثير من المدن من وجود "نقاط ميتة" (Dead Ends) حيث تقلّ سرعة جريان الماء أو تنعدم، مما يُهيئ بيئة مثالية للركود داخل الأنابيب ويُتيح فرص تكاثر الكائنات الدقيقة والتفاعلات الكيميائية الضارة **[31].**

4) ظاهرة التخثّث أو الإثراء الغذائي (Eutrophication):

تُعدّ ظاهرة التخثّث من أشد الأسباب تأثيرًا في نشوء مناطق الركود المائي، وتحدث نتيجة تراكم الأسمدة الزراعية المحتوية على النيتروجين والفسفور في المسطحات المائية. وتُفضي هذه الزيادة في المغذيات إلى الازدهار الطحلبي الكثيف الذي يُقلّص نفاذ الضوء وأكسجة الماء، ليتحول الحوض المائي إلى منطقة لاهوائية راكدة **[32].**

3.3.I مخاطر المياه الراكدة:

1.3.3.I المخاطر الصحية:

1) الأمراض المنقولة بالمياه (Waterborne Diseases)

تُشكّل المياه الراكدة البيئة الحاضنة المثالية لانتشار طيف واسع من مسببات الأمراض المعدية. إذ تتكاثر فيها البكتيريا الممرضة كـ Vibrio cholerae المسببة للكوليرا، و Salmonella typhi المسببة لحمى التيفوئيد، و Escherichia coli المسببة للأمراض المعدية المعوية الحادة **[33].** وتبيّن الدراسات أن معدلات التلوث البكتيري في المياه الراكدة تفوق نظيراتها في المياه المتدفقة بأضعاف كثيرة، مما يُضاعف مخاطر الإصابة بهذه الأمراض.

2) **تكاثر ناقلات الأمراض :**

تُوفر المسطحات المائية الراكدة ومستنقعات المياه الضحلة المناخ الملائم لتكاثر البعوض (Culex, Anopheles)، الذي يُعدّ الناقل الرئيسي لفيروس حمى الضنك، والملاريا، والحمى الصفراء، وفيروس النيل الغربي، فضلًا عن أمراض خطيرة أخرى تتفشّى في المناطق الاستوائية وشبه الاستوائية **[34].**

3) **ظاهرة الميكروبيوم المائي المُضطرب:**

كشفت دراسات حديثة أجرتها منظمة الصحة العالمية (WHO,2019) **[35]** أن المياه الراكدة تحتضن نظامًا بيئيًا جرثوميًا مضطربًا بالغ التعقيد، يتسم بهيمنة الأنواع المسببة للأمراض على حساب الأنواع المفيدة. وتُشير التقديرات العالمية إلى أن نحو 2.2 مليون حالة وفاة تقع سنويًا جراء الأمراض المرتبطة بمياه ملوثة، يمثل ركود المياه أحد أبرز أسبابها.

2.3.3.I المخاطر البيئية:

1) **استنزاف الأكسجين وانهيار التنوع البيولوجي**

يُؤدي غياب الحركة المائية إلى تراجع حاد في مستويات الأكسجين الذائب (Dissolved Oxygen – DO) عبر ظاهرة تُعرف بـ"نقص الأكسجين" أو Hypoxia. وحين ينخفض تركيز الأكسجين الذائب دون العتبة الحرجة (mg/L 2 >)، تبدأ ظاهرة النفوق الجماعي للأسماك والكائنات المائية، مما يُدمّر التنوع البيولوجي المائي تدميرًا قد يتعذّر التعافي منه **[36].**

2) **التلوث الكيميائي التراكمي:**

في غياب التجديد المائي المستمر، تتراكم الملوثات الكيميائية كالمعادن الثقيلة (الرصاص، الزئبق، الكادميوم، الزرنيخ) ومركبات الفسفور والنيتروجين الزائدة والمبيدات الحشرية بصورة تتخطى القدرة الاستيعابية للنظام البيئي المائي، مما يُحوّل الحوض المائي إلى مستودع للملوثات الخطيرة **[37].**

3) **إنتاج الغازات الدفيئة:**

تُنتج المياه الراكدة الغنية بالمواد العضوية كميات وافرة من غازات الدفيئة، ولا سيما غاز الميثان ($_4CH$) وثاني أكسيد الكربون (CO_2) وأكسيد النيتروز (ON_2)، الناجمة عن التحلل البكتيري اللاهوائي للمادة العضوية. وتُسهم هذه الانبعاثات في تفاقم أزمة التغيّر المناخي العالمي **[38].**

3.3.3.I مخاطر نوعية المياه وأنظمة التوزيع:

1) تكوّن مركبات ثانوية ضارة:

يفضي الركود المائي داخل شبكات التوزيع إلى التفاعل بين مخلّفات الكلور المُستخدَم في التعقيم والمواد العضوية الذائبة، مما يُولّد مركبات ثانوية مُسرطنة تُعرف بـ"منتجات التطهير الثانوية" (Disinfection By-Products – DBPs) كمركبات التريهالوميثان (THMs) وحمض الهالوأسيتيك (HAAs) **[39].**

2) تآكل البنية التحتية:

تُسبّب الأوساط المائية الراكدة ذات الخصائص الفيزيوكيميائية غير المستقرة (تقلبات في درجة الحموضة pH والتوصيلية الكهربائية والتركيز الأيوني) تآكلًا متسارعًا للأنابيب والخزانات المعدنية، مما يُهدد سلامة البنية التحتية للمياه ويُضاف إليها خطر تسرّب ملوثات معدنية إلى مياه الشرب **[40].**

قائمة المراجع :

المراجع بالعربية:

[7] مجلة بيئتنا – الهيئة العامة للبيئة – العدد 09 الصفحة 36.

[11] حمايمي شافية" طريقة تحضير الكربون النشط من بذور النبات واستعماله في إزالة سمية العناصر الثقيلة من المياه" مذكرة ماستر، جامعة قاصدي مرباح-ورقلة (2018-2019).

[12] برتمية حكيمة، هركوس خضرة " تحضير البلاستيك الحيوي من السيليلوز المستخلص من نخيل التمر " مذكرة مقدمة لنيل شهادة ماستر أكاديمي كلية تكنولوجيا جامعة الشهيد حمه لخضر الوادي (2017 2018)

[13] بن عشورة إشراق، حميتي كريمة "محاولة إزالة صبغة الميثيلين الأزرق من محلولها المائي باستخدام الفحم المنشط المنتج من مخلفات عظام الدجاج" مذكرة ماستر أكاديمي، جامعة قاصدي مرباح ورقلة (2018-2019).

[14] عباس كمرشو" استعمال كربون نشط محضر من مشتقات نخيل التمر (نواة تمرة دقلة نور) في معالجة المياه المستعملة الحضرية. دراسة مقارنة "أطروحة دكتوراه، جامعة قاصدي مرباح ورقلة (2017_2018).

[19] بالشيخة شهيرة، براهيمي عبير، بن عبد هللا كريمة" استخلاص وتشخيص السيليلوز من نخيل التمر وأهم تطبيقاته" "مذكرة مقدمة لنيل شهادة ماستر أكاديمي كلية تكنولوجيا جامعة الشهيد حمه لخضر-الوادي (2019-2020).

[22] س.بن عبد الكريم الفدا,ر.عبد الرحيم عيانة,المنتجات الثانوية للنخيل (أنواعها وأهميتها الاقتصادية) الباب الثاني.السعودية:أوقاف صالح راجحي, 2016.

المراجع الأجنبية:

[1] Zhu, L., GAO, M., Peh, C. K. N., & Ho, G. W. (2019). Recent progress in solar-driven interfacial water evaporation: Advanced designs and applications. Nano Energy, 57, 507–518.

[2] Opoku, K. N., et al. (2025). Photo thermal water evaporation and catalytic degradation for efficient water treatment: A review. Energy Materials, 5**,** 500020.

[3] Wu, X. et al. (2024). Interfacial Solar Evaporation: From Fundamental Research to Applications. Advanced Materials, 36(12), 2313090.

[4] Tao, P., Ni, G., Song, C., Shang, W., Wu, J., Zhu, J., Chen, G., & Deng, T. (2018). Solar-driven interfacial evaporation. Nature Energy, 3(12), 1031–1041.

[5] Irshad, M. S., Arshad, N., & Wang, X. (2020). Nanoenabled Photo thermal Materials for Clean Water Production. Global Challenges, 5(1), 2000055.

[6] Cao, F. et al. (2023). Emerging Materials for Interfacial Solar-Driven Water Purification. Angewandte Chemie International Edition, 62(5), e202214391.

[8] camfil.Historicjourney of activated carbon and breakthroughs. Created Thursday، April 9, 2020.

[9] Le conseil européen des fédérations de l'industrie chimique. (1997). " Test method for Activated Carbon " .

[10] Dvorak B.I.,Skipton S.O.,(2013),"Drinking water Treatment Activated carbon filtration", University of Nebraska-Lincoln.

[15] Çeçen، Ferhan، and Özgür Aktas. Activated carbon for water and wastewater treatment: integration of adsorption and biological treatment. John Wiley& Sons, 2011, p (13, 16).

[16] Tanabe، Yasuhiro، et al. "Effect of the size and the amount of surface functional groups of inclusions on microstructure development in furan resin-derived carbon."

[17] S. M. Manocha , "Porous carbons," Thèse de Doctorat, Faculté de science des matériaux, Université Sardar Patel, India, 2003.

[18] American Journal of Engineering Research (AJER)، Production and Characterization of Activated Carbon from Animal Bone.

[20] Dalena, F., A. Basile, and C. Rossi, Bioenergy systems for the future: prospects for biofuels and biohydrogen.2017 Woodhead Publishing.

[21] Sun, Run-cang. Cereal strawas a Resousces for sustaimable biomaterials and biofuels. B.V: Elsever, 2010 2018.

[23] Wetzel, Robert G. Limnology: Lake and River Ecosystems. 3rd ed. San Diego: Academic Press, 2001 .

[24] Stumm, W., & Morgan, J.J. (1996). Aquatic Chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters Wiley3 .rd ed Waters New York-Interscience.

[25] Quality Modeling .Waveland Press, Long Grove, IL-Chapra, S.C. (2008).Surface Water.

[26] Chapra,S.C. (2008). lbid.PP.112-145.

[27] Lampert, W., &Sommer,U.(2007).Limnoecology :The Ecology and Strea ms .2nd ed .

[28] Todd, D.K., & Mays, L.W. (2005). Groundwater Hydrology.3rd.ed.Johnd Wiley & Sons.

[29] Chorus, I., & Bartram, J. (Eds.) (1999). Toxic Cyan bacteria in Water: A Guide to their Public Health Consequences, Monitoring and Management .WHO / E & FN Spon, London.

[30] Poff, N.L., Allan, J.D., Bain, M.B., et al. (1997). The natural flow regime. BioScience, 47(11), 784-769.

[31] Scale studies of factors related LeChevallier, M.W., Welch, N.J, &Smith, D.B. (1996).Fullcoliform regrowth in drinking water. Applied and Environmental Microbiology, 62(7), 2021-2211.

[32] Schindler, D.W. (2006). Recent advances in the understanding and management of eutrophication.Limology and Oceanogrphy, 51(1Part2), 356-363 .

[33] Water Quality .4th ed –World Health Organization WHO. (2017) Guidelines for drinking .incorporating the 1st addendum .WHO Press, Geneva.

[34] borne Diseases. American Mosquito control Association –Townson, H. (Ed.) (2005). Mosquito.

[35] World Health Organization (WHO). (2019). Safer Water, Better Health WHO Press, Geneva .

[36] Diaz, R.J., & Rosenberg, R. (2008).Spreading dead Zones and consequences for marine. Ecosystems. Science, 321(5891), 926-929.

[37] Förstner, U., & Wittmann, G.T.W. (1983). Metal Pollution in the Aquatic Environement.2nd ed. Verlag, Berlin-Springer.

[38] Bastviken, D., Tranvik, L.J., Dowing, J.A., et al. (2011).Freshwater methane emissions offset the Continental Carbon Sink. Science, 331(6013),50.

[39] Richardson S.D., Plewa, M .J., Wagner, E.D.,et al. (2007). Occurrrence, genotoxicity, and products in drinking water. Mutation-carcinogenicity of regulated and emerging disinfection by Research, 636(1–3) , 178-242.

[40] Sarin, P., Snoeyink, V.L., Bebee, J., etal. (2004).iron release from corroded iron pipes in, (drinking water distribution systems: Effect of dissolved oxygen. Water Research, 38(5)1269-1259.

الفصل الثاني

الـطـرق و الـوسـائـل

1.II مقدمة :

نستعرض في هذا الفصل الخطوات العملية للدراسة، حيث نبدأ أولاً بتحديد المواد والأجهزة المستعملة. ثم ننتقل لوصف مراحل تحضير الفحم المنشط من مخلفات النخيل باستخدام عمليتي الكربنة والتنشيط. نوضح طريقة إعداد النموذج المعتمد في إجراء تطبيقات التبخير الفوتوحراري.وفي الختام، نستعرض أهم تقنيات التحليل والتوصيف المستعملة.

2.II المواد المستعملة:

- المادة الحيوية الأولية: بقايا النخيل (الجذوع–Roots).

جدول (1.II): المواد الكيميائية المستعملة

المادة	KOH	HCl	NaOH	$CaCl_2$	NaCl	Alginate
النقاوة	99%	37.5%	99%	98%	99.5%	-
العلامة	BIOCHEM	BIOCHEM	SIGMA-ALDRICH	BIOCHEM	BIOCHEM	DANISCO Ingredients

3.II الأجهزة المستعملة:

- فرن تجفيف حراري (Drying Oven).
- فرن كربنة (Muffle Furnace) بقدرة تصل إلى 1000 درجة مئوية.
- مطحنة كهربائية مخبرية (Electrical Grinder).
- جهاز تسخين مع تقليب مغناطيسي (Magnetic Stirrer with Hotplate).
- جهاز طرد مركزي (Centrifuge).
- ميزان إلكتروني تحليلي.

II .4 تحضير الكربون المنشط :

تمت عملية تحضير الكربون المنشط (Activated Carbon, AC) انطلاقا من جذوع النخيل بإتباع الخطوات المعتمدة من طرف Al-Ghurabi et al., 2025 **[1]** حيث تمر بثلاث مراحل أساسية:

II.4.1 التحضير الأولي والكربنة (Pre-treatment and Carbonization):

- **المعالجة الأولية:**

تم تجميع بقايا النخيل (الجذوع) وتقطيعها إلى قطع صغيرة لضمان تجانس المعالجة، ثم غُسلت بالماء المقطر لعدة مرات لإزالة الغبار والشوائب العالقة.

الشكل (1.II): جذوع النخيل مقطعة إلى قطع صغيرة.

- **التجفيف:**

وُضعت العينات في فرن التجفيف عند درجة حرارة°C 80 لمدة 48 ساعة حتى استقرار الكتلة تماماً.

الشكل (2.II): تجفيف قطع جذوع النخيل في الفرن.

- **الطحن:**

تطحن العينات المجففة باستخدام مطحنة كهربائية للحصول على مسحوق ناعم.

الشكل (3.II): طحن جذوع النخيل على شكل مسحوق.

- **الكربنة الحرارية:**

خضع المسحوق لعملية تفحم في فرن (Muffle Furnace) عند درجة حرارة 500 °C لمدة ساعة ونصف. ونظراً لعدم توفر بيئة الغاز الخامل، تمت العملية في ظروف أكسدة محدودة (Limited Oxidation)، مما سمح بتكوين فحم خام غني بالمجموعات الوظيفية السطحية.

الشكل (4.II): مسحوق جذوع النخيل بعد الحرق الأولي.

II 2.4. التنشيط الكيميائي (Chemical activation):

تعد مرحلة التنشيط الكيميائي (Chemical Activation) من أهم المراحل لتطوير المسامية (Porosity) وزيادة مساحة السطح النوعية للفحم حيث تمت عبر الخطوات التالية:

- **الخلط:**

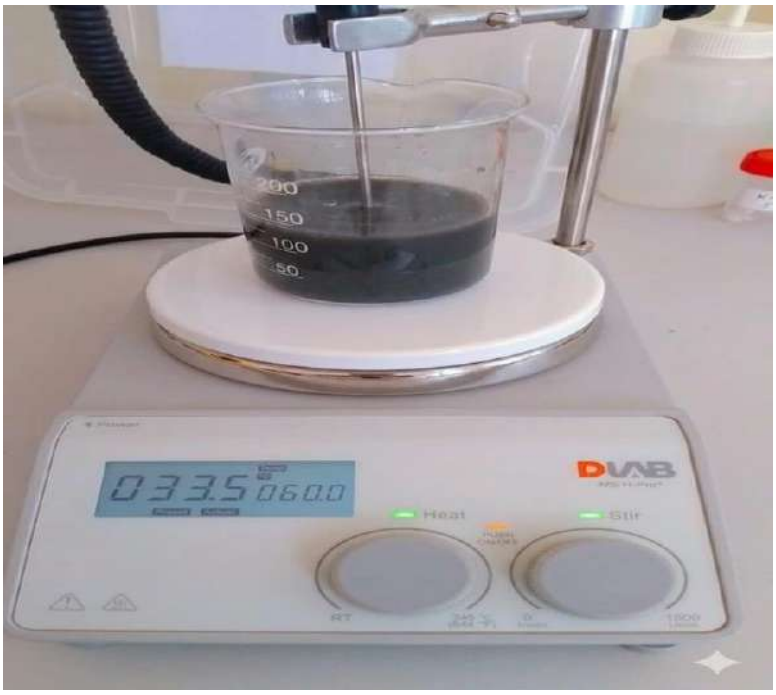
تم مزج 2g من الفحم الناتج مع 4g من عامل التنشيط (KOH)، مع إضافة120 ml من الماء المقطر.

- **التفاعل الحراري:**

وُضع المزيج على جهاز التقليب المغناطيسي مع التسخين عند درجة حرارة 60 °C (درجة حرارة الوسط التفاعلي) مع الرج المستمر لمدة 6 ساعات.

- **التجفيف:**

بعد انتهاء مدة التفاعل، وُضعت المادة في المجفف لتبخير السوائل الزائدة وتسهيل عملية التنقية.



الشكل (5.II): التفاعل الحراري.

3.4. II الغسل والتنقية النهائية (Washing and Purification):

للحصول على فحم منشط نقي ذو كفاءة عالية في التبخير الفوتوحراري، اتبعت الخطوات التالية:

- **الغسل بالماء المقطر:**

غُسلت المادة بالماء المقطر لإزالة بقايا المواد الكيميائية الناتجة عن التنشيط.

- **الفصل الميكانيكي:**

استُخدم جهاز الطرد المركزي لمدة 5 دقائق في كل دورة غسل لفصل المسحوق بدقة عن الطور السائل.

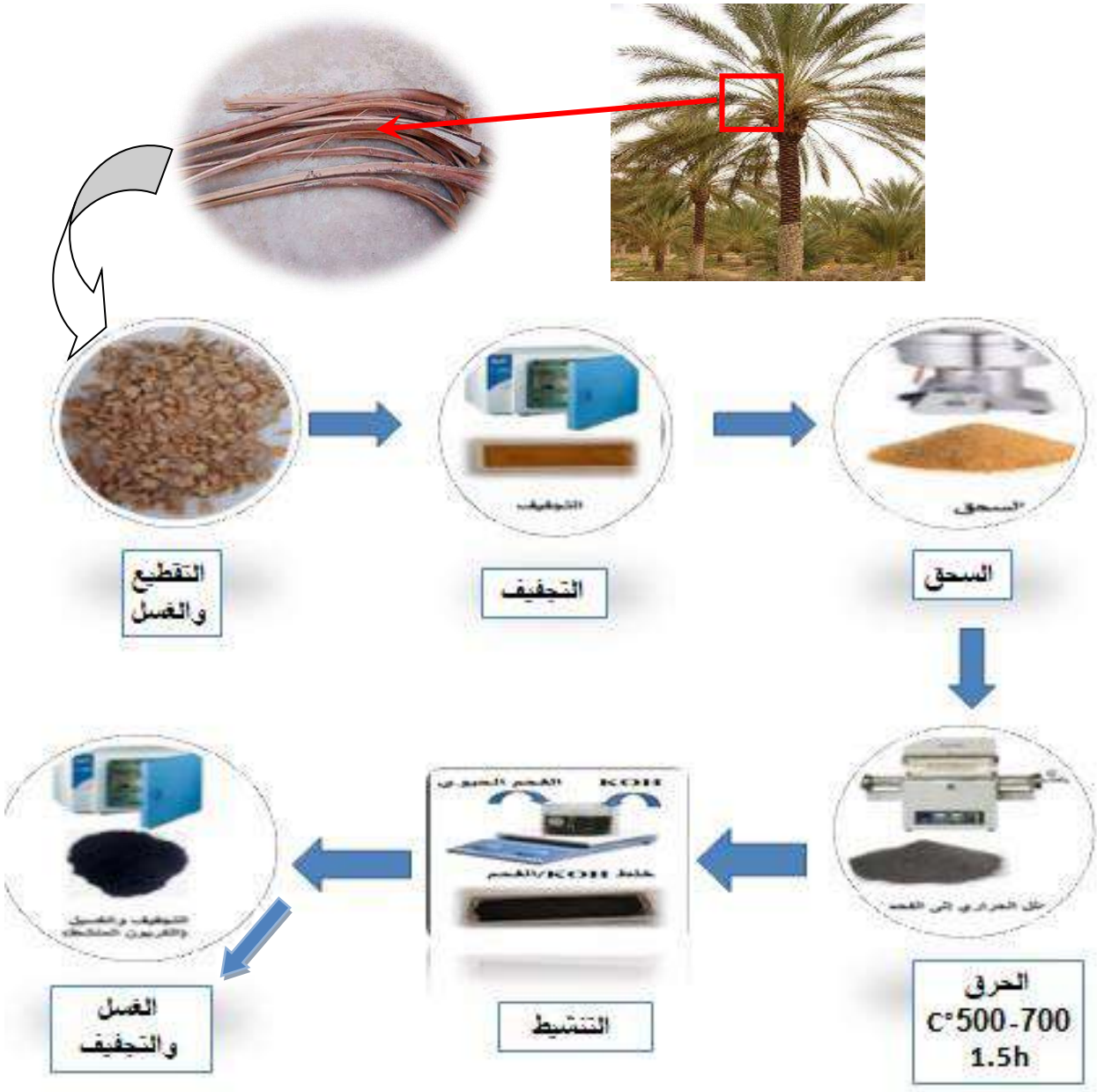
- **المعالجة الحمضية :**

غُسل الفحم بمحلول حمض الهيدروكلوريك (HCl) بتركيز 0.1M لإزالة وتعديل أكبر قدر ممكن من بقايا هيدروكسيد البوتاسيوم بالإضافة إلى أية شوائب أخرى ناتجة عن عملية الكربنة أو التنشيط، ثم أُجريت عملية الطرد المركزي مرة أخرى لفصل الكربون المنشط عن الطور السائل.

- **التجفيف النهائي:**

وُضع الفحم المنشط النهائي في الفرن (110 °C) لمدة 24 ساعةً، ثم حُفظ في عبوات محكمة الغلق لاستخدامه في تحضير عينات التبخير الفوتوحراري.

والمخطط الموضح في الشكل الموالي يلخص كل الخطوات السابقة المتبعة في تحضير الفحم المنشط.



الشكل (6.II): مخطط لخطوات تحضير الفحم المنشط إنطلاقا من جذوع النخيل الجافة **[1].**

II .5 تحضير عينات التبخير الفوتوحراري :

II .1.5 تحضير المادة الفوتوحرارية:

- أُذيبت 400 mg من NaOH في 100ml من الماء المقطر للحصول على محلول قاعدي بتركيز 0.1M.

- أُضيفت كتلة m (متغيرة بين 100 إلى 1000 mg حسب التجربة) من الكربون المنشط إلى 4ml من المحلول السابق، وعولجت بالموجات فوق الصوتية لمدة 30 دقيقة لتفتيت جسيمات الكربون في المحلول.

- أضيفت كتلة m (متغيرة بين 10 إلى 300 mg حسب التجربة) من بوليمير الألجينات بالإضافة إلى حجم 1ml من محلول $CaCl_2$ (بتركيز متغير بين 0 إلى 0.1 M حسب التجربة) للخليط لضمان تماسك المادة وتشكيل الهيكل الهيدروهلامي المسامي.

II .2.5 تصميم النموذج الفوتوحراري:

- لتصميم نموذج فوتوحراري فعال يعتمد على خاصية النقل الشعري للماء من الأسفل إلى السطح استُخدمت أوعية بلاستيكية من البولي إيثيلان تيريفتالات (PET) على شكل حرف T مثقوبة من الأسفل ومسدودة بفتيلة قطنية.

- لتوفير طبقة دعم وترشيح وُضعت كتلة 10 g من الرمل فوق القاعدة العلوية للوعاء. حيث يعود استعمال الرمل في هذا الجزء من النموذج إلى قدرة الرمل على تحقيق صعود الماء بالخاصية الشعرية وهذا يعود إلى خصائصه الإمتزازية،بالإضافة إلى قدرته على تخزين الحرارة وتوفره كمادة طبيعية رخيصة.

- يوُضع مزيج الكربون المنشط والألجينات فوق السطح العلوي للرمل باستعمال بخاخ لضمان التوزع المتساوي والمنتظم للمزيج فوق طبقة الرمل.

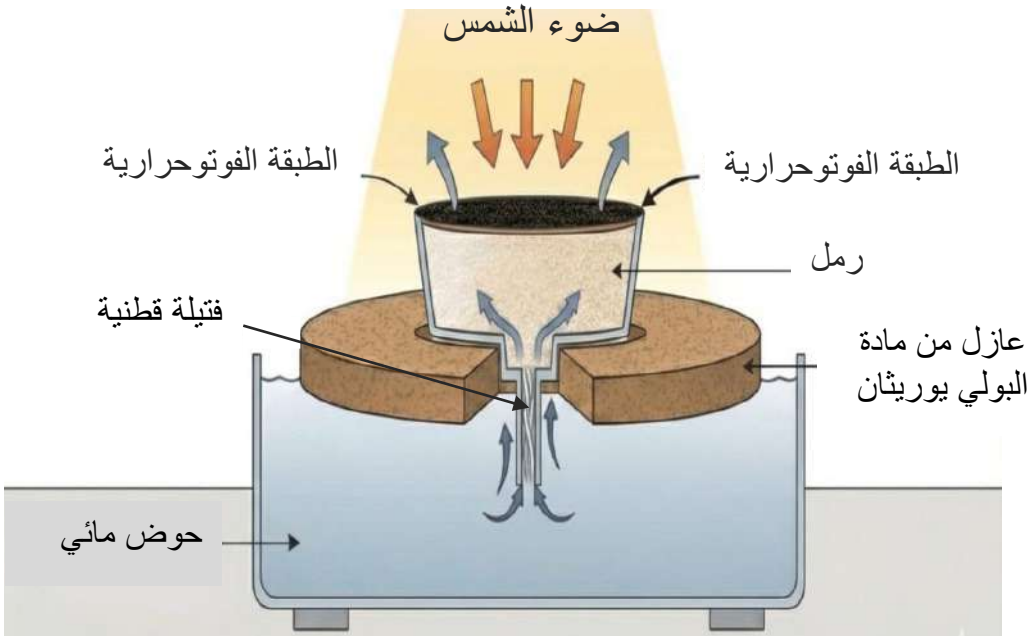
- تترك العينة في الظروف العادية المخبرية لمدة 24 h ليجف جيدا ويكتسب بنية سطحية مسامية صلبة.

الشكل (7.II): صورة فوتوغرافية للعينة الفوتوحرارية المحضرة.

3.5.II تحضير نموذج التبخير الفوتوحراري:

ـ لتوفير نظام إمداد مائي استُخدم حوض زجاجي يحتوي على 50 ml من الماء المراد تبخيره.

ـ ثُبّتت العينة داخل حامل مصنوع من مادة البولي يوريثان (PU Foam) على شكل قرص مثقوب في المركز لضمان الطفو والعزل الحراري التام للنموذج عن الحوض المائي.



شكل(8.II): مخطط تمثيلي يوضح شكل النموذج الفوتوحراري المُصمم.

الشكل (9.II): صورة فوتوغرافية للنموذج الفوتوحراري المصمم.

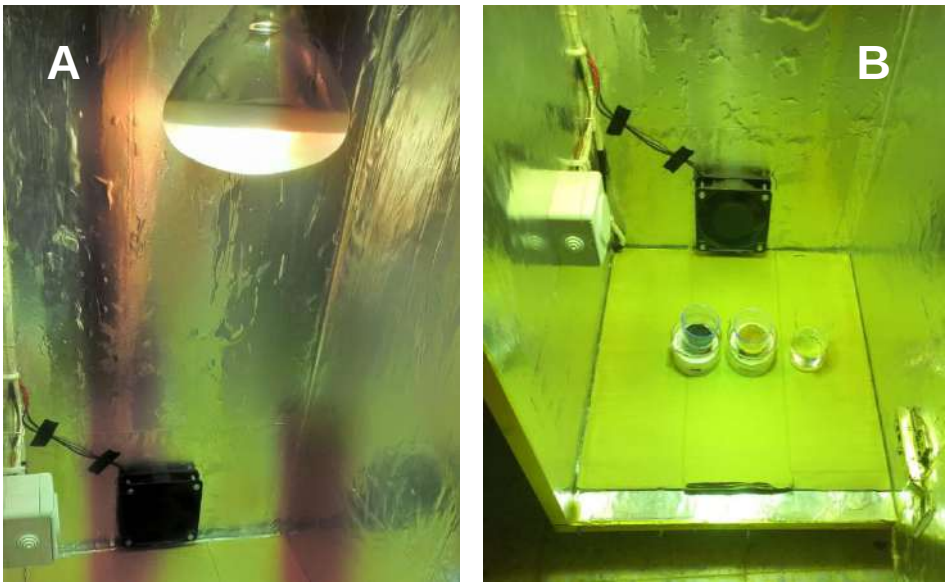
4.5.II البروتوكول التجريبي وقياسات الأداء:

يصف هذا القسم المنهجية المتبعة في تنفيذ التجارب المخبرية لتقييم أداء التبخير الضوئي الحراري، والتي تمت وفق الخطوات التقنية التالية :

ـ لتحقيق التعريض الضوئي وُضع النظام تحت المحاكي الشمسي (Solar Simulator) و هو عبارة عن مصباح هالوجيني يحاكي ضوء الشمس مثبت داخل خزانة إختبار بحيث تضمن توزيع شدة إشعاع متساوية على كامل سطح العينة و عزلها عن المحيط الخارجي.

ـ لمراقبة تطور درجة حرارة السطح خلال التجربة استُخدم جهاز قياس الحرارة عن بعد يعمل بالأشعة تحت الحمراء (Infrared Thermometer).

ـ تم تسجيل درجة الحرارة الابتدائية، ثم استمرت القياسات دورياً كل 15 دقيقة.



الشكل (10.II): إجراء تجارب التبخير الفوتوحراري تحت الإشعاع الضوئي المحاكي.
A: المصباح الهالوجيني المحاكي لضوء الشمس، **B:** العينات داخل خزانة الإختبار.

- استغرقت كل تجربة مدة زمنية إجمالية قدرها 150 دقيقة (ساعتان ونصف)، مع مراقبة استقرار درجة حرارة الواجهة أو السطح (Interface Temperature).

- عند نهاية كل تجربة، توقف عملية التعريض الضوئي، وتُسجل الكتلة النهائية للجملة لتحديد الفقد الكتلي المباشر، والذي يمثل كمية الماء المتبخر بفعل التأثير الفوتوحراري للنموذج المصنع.

الشكل (11.II): عينات التبخير الفوتوحراري تحت الضوء المحاكي الشمسي.

II .6 أدوات التحليل و التوصيف :

II .1.6 مطيافية الأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه (FTIR) :

تستخدم تقنية مطيافية الأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه (FTIR) لتوصيف المواد أو المركبات الكيميائية من خلال التعرف على المجموعات الوظيفية الموجودة فيها، وهي تعتمد على امتصاص الأشعة تحت الحمراء من قبل العينة. هذا الامتصاص يرتبط بالاهتزازات الخاصة بالروابط الكيميائية، مما يسمح بفهم البنية الكيميائية للمادة بشكل عام. حيث تستخدم لدراسة المركبات العضوية وغير العضوية عبر نطاقي الأشعة تحت الحمراء ذو طول الموجة الموجود في المجال $400- 4000cm^{-1}$ **.[2]**

يهدف تحليل FTIR في دراستنا إلى توصيف المجموعات الوظيفية ودراسة التآثرات الجزيئية بين مكونات العينات المحضرة، حيث يُستخدم لتأكيد نجاح دمج الفحم داخل مصفوفة الألجينات من خلال رصد قمم روابط الهيدروكسيل (OH^-) والإيثر (C-O-C). كما يساهم التحليل في إثبات حدوث عملية التشبيك الأيوني (Cross-linking) عند إضافة ملح $CaCl_2$، وذلك عبر تتبع الإزاحة في ترددات مجموعات الكربوكسيلات ($-COO^-$)، مما يؤكد استقرار البنية الكيميائية للمركب الناتج وقدرته على العمل كطبقة فوتوحرارية متماسكة **[3، 4].**

شكل(12.II): جهاز طيف الأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه (FTIR) المستعمل.

II 2.6. التصوير بالمجهر الالكتروني الماسح المزود بمطيافية تشتت طاقة الأشعة السينية (SEM-EDX) :

يتم إجراء تحليل SEM-EDX لتوصيف الخصائص المورفولوجية وتضاريس السطح للعينات، بهدف تقييم المسامية البنيوية وتوزيع الفحم داخل مصفوفة الألجينات. كما يتيح هذا التحليل مراقبة التغيرات الإنشائية الناتجة عن عملية التشبيك مع أيونات الكالسيوم، مما يوفر رؤية بصرية مباشرة حول مدى تماسك الطبقة الفوتوحرارية وجهوزيتها الوظيفية لعملية التبخير البيني **[3]**.

- **مبدأ التقنية:**

تستخدم تقنية المجهر الإلكتروني الماسح (SEM-EDS) للحصول على صور عالية الدقة لسطوح المواد بتكبير كبير من درجة الميكرو متر وأحيانا أقل، كما تتيح في الوقت نفسه إجراء تحليل عنصري دقيق للسطح. وتعتمد هذه التقنية على تسليط حزمة من الإلكترونات عالية الطاقة على العينة، مما يؤدي إلى انبعاث إلكترونات ثانوية ومرتدة، يتم التقاطها وتحليلها بواسطة كواشف خاصة لتكوين صورة ثلاثية الأبعاد توضح تفاصيل السطح بدقة عالية **[5]**.

شكل(13.II): جهازالمجهر الإلكتروني الماسح (SEM) المزوّد بنظام EDX.

II .7 أدوات القياس و المتابعة :

II .1.7 الكاميرا الحرارية (Thermal imager):

لمتابعة تطور درجة حرارة السطح الفوتوحراري وتقييم كفاءة التبخير ، تم استخدام كاميرا تصوير حراري تعمل بالأشعة تحت الحمراء (Termal imager or Infrared thermography)، حيث أتاحت لنا رصد وتوثيق التوزيع الحراري على سطح العينة الفوتوحرارية بشكل لحظي ودقيق تحت تأثير الإشعاع الشمسي الطبيعي أو المحاكي.

- **تعريف :**

تُعد الكاميرا الحرارية أداة تصوير متطورة تعتمد على التقاط الإشعاع الكهرومغناطيسي الواقع ضمن نطاق الأشعة تحت الحمراء، والذي ينبعث تلقائياً وبشكل مستمر من جميع الأجسام التي تفوق درجة حرارتها الصفر المطلق.

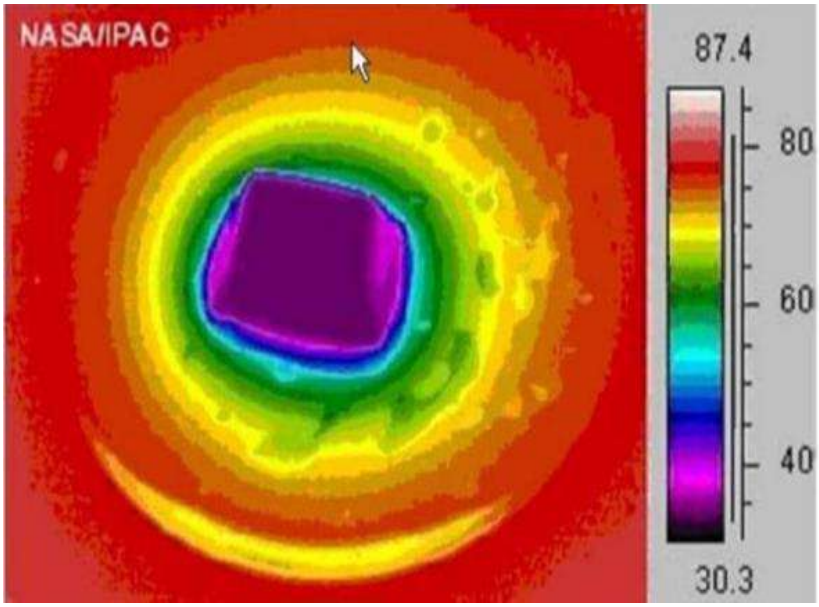
وتتميز هذه التقنية عن الكاميرات الضوئية التقليدية بقدرتها على الرؤية بدقة عالية في ظروف الظلام الدامس، والضباب، والدخان، والغبار؛ نظراً لأنها لا تشترط وجود منبع ضوئي خارجي يرتد عن الأجسام، بل تعتمد على حرارة الأجسام ذاتها، مما جعلها أداة أساسية في التطبيقات الأمنية، والعسكرية، والطبية، والاستكشافات العلمية والفلكية.

- **مبدأ العمل :**

يتلخص مبدأ عمل الكاميرا الحرارية في منظومة فيزيائية متكاملة؛ حيث تبدأ العدسات البصرية الخاصة (المصنوعة من مواد نفوذة للأشعة تحت الحمراء) بتجميع الإشعاع الحراري المنبعث من الأجسام وتركيزه بدقة على كاشف حراري حساس (Detector).

يقوم هذا الكاشف بتحويل الطاقة الإشعاعية وفروق درجات الحرارة إلى إشارات كهربائية تناظرية، تنتقل بعدها إلى وحدة معالجة رقمية تتولى ترجمة هذه الإشارات وتحويلها إلى خريطة حرارية مرئية تُعرض على الشاشة.

وتظهر هذه البيانات عادةً عبر نظام "الألوان الكاذبة"، حيث يُمنح كل مدى حراري لوناً مصطنعاً (كاللونين الأصفر والأحمر للأجسام الساخنة، والأزرق والبنفسجي للمناطق الباردة) لتسهيل تمييز الفروق الحرارية وتحليلها بصريًا **[6]**.



الشكل (14.II): صورة توضح مبدأ التصوير بالكاميرا الحرارية ذات الأشعة تحت الحمراء (مثال لمكعب ثلج أثناء الذوبان بالتسخين).

الشكل (15.II): الكاميرا الحرارية المستعملة في هذا العمل من النوع : Noyafa NF-521.

II .8 موقع أخذ العينات المائية المراد تبخيرها :

لتحقيق أهداف الدراسة وتطبيق نموذج التبخر الفوتوحراري في سياق بيئي واقعي لمعالجة مشكلة بيئية حقيقية ، تم تطبيق عملية التبخير الفوتوحراري من أجل تسريع تبخير المياه الراكدة في منطقة حضرية واقعة بولاية وادي سوف (الجنوب الشرقي الجزائري).

الشكل (16.II): الموقع الجغرافي لمنطقة وادي سوف (الجنوب الشرقي الجزائري).

حيث تم أخذ عينات من المياه الراكدة في بحيرة واقعة داخل محيط منطقة عمرانية بمدينة وادي سوف ، والمحددة بدقة حسب الإحداثيات الجغرافية التالية:

- خط العرض 33.3850832° شمالاً
- خط الطول 6.8611765° شرقاً

وقد تم اختيار هذا الموقع نظراً لأهميتة البيئية والصحية التي يكتسيها؛ حيث تتجمع هذه المياه الراكدة في وسط محيط عمراني و بالتالي تشكل خطراً صحياً محدقاً بالساكنة، مما يجعل البحث عن حلول علمية لمعالجتها وتطهيرها أمراً ضرورياً **[7، 8].**

جُمعت العينات بعناية في قارورات بلاستيكية من البولي إيثيلان تيريفتالات (PET) نظيفة ومحكمة الإغلاق لتفادي أي تلوث خارجي إضافي، ونُقلت مباشرة إلى المختبر لإجراء تجارب والتبخر الفوتوحراري عليها.

الشكل (17.II): صورة فوتوغرافية للموقع الجغرافي للبحيرة الراكدة و الواقعة داخل مدينة وادي سوف و الآثار البيئية الناجمة عنها.

II .9 الحسابات و عرض النتائج :

II .1.9 معدل التبخر:

معدل التبخر (Evaporation rate) هو النسبة المئوية للماء المتبخر خلال عملية التبخير الفوتوحراري، وهو يمثل كمية الماء المتبخرة نسبةً إلى الكمية الإبتدائية، ويُحسب بالعبارة التالية :

$$Evaporation\ rate\ (\%) = \frac{m_{water}^{initial} - m_{water}^{final}}{m_{water}^{initial}} \times 100$$

حيث $m_{water}^{initial}$ و m_{water}^{final} يمثلان على التوالي الكتلة الإبتدائية و الكتلة النهائية للماء.

II .2.9 كفاءة التبخير:

تشير كفاءة التبخير (Evaporation Efficiency) إلى مدى فعالية النظام في تحويل الطاقة الحرارية إلى بخار، و هي تمثل كتلة الماء المتبخر بالكيلوغرام بالنسبة للمتر المربع الواحد من السطح الفوتوحراري و الزمن بالساعة. حيث يتم حسابها بالعبارة التالية :

$$Evaporation\ Efficiency\ (Kg.m^{-2}.H^{-1}) = \frac{\left(m_{water}^{initial} - m_{water}^{final}\right)}{S\ .\tau}$$

حيث :

$m_{water}^{initial}$ و m_{water}^{final} هما على التوالي الكتلة الإبتدائية و الكتلة النهائية للماء بـ Kg.

S هي المساحة الفعالة للسطح الفوتوحراري بـ m^2.

τ هي المدة الزمنية لعملية التبخير الفوتوحراري بـ h.

قائمة المراجع :

[1] Al-Ghurabi, E. H., Boumaza, M. M., Al-Masry, W., & Asif, M. (2025). Optimizing the synthesis of nanoporous activated carbon from date-palm waste for enhanced CO_2 capture. Scientific Reports, 15(1), 17132.

[2] S. Prati, E. Joseph, G. Sciutto, and R. Mazzeo, "New advances in the application of FTIR microscopy and spectroscopy for the characterization of artistic materials," Accounts of chemical research, vol. 43, pp. 792-801, 2010.

[3] Balasooriya, I. L., Senavirathna, M. D. H. J., & Wang, W. (2025). Application of Activated Carbon/Alginate Composite Beads for the Removal of 2-Methylisoborneol from Aqueous Solution. AppliedChem, 5(4), 32.

[4] Ye, L., Yan, J., Su, Q., Hou, S., Xiao, W., Wu, H., ... & Gao, J. (2025). Sodium alginate hydrogel–conductive fabric architecture enables electro-solar dual-driven interfacial evaporation for all-day steam generation. Carbohydrate Polymers, 124333.

[5] A. Mohammed and A. Abdullah، "Scanning electron microscopy (SEM): A review," in Proceedings of the 2018 international conference on hydand pneumatics—HERVEX, Băile Govora, Romania, 2018, pp. 7-9.

[6] Dr. W. Harara, Eng. Y. Allouch, Eng. A. Altahan Department of Scientific Services - May 2015.

[7] Diaf, I., Lifa, A., & Mostfaoui, A. (2024). Oued Souf (Algerian Sahara): balancing rising groundwater and agricultural sustainability. Bulletin of Geography. Physical Geography Series, (27), 45-56.

[8] Barkat, A., Bouaicha, F., Mester, T., Debabeche, M., & Szabó, G. (2022). Assessment of spatial distribution and temporal variations of the phreatic groundwater level using geostatistical modelling: The case of Oued Souf Valley—Southern East of Algeria. Water, 14(9), 1415.

الفصل الثالث

الـنـتـائـج و الـمـنـاقـشـة

III .1 توصيف العينة الفوتوحرارية المصنعة:

III.1.1 التحليل المورفولوجي و العنصري لسطح العينة الفوتوحرارية:

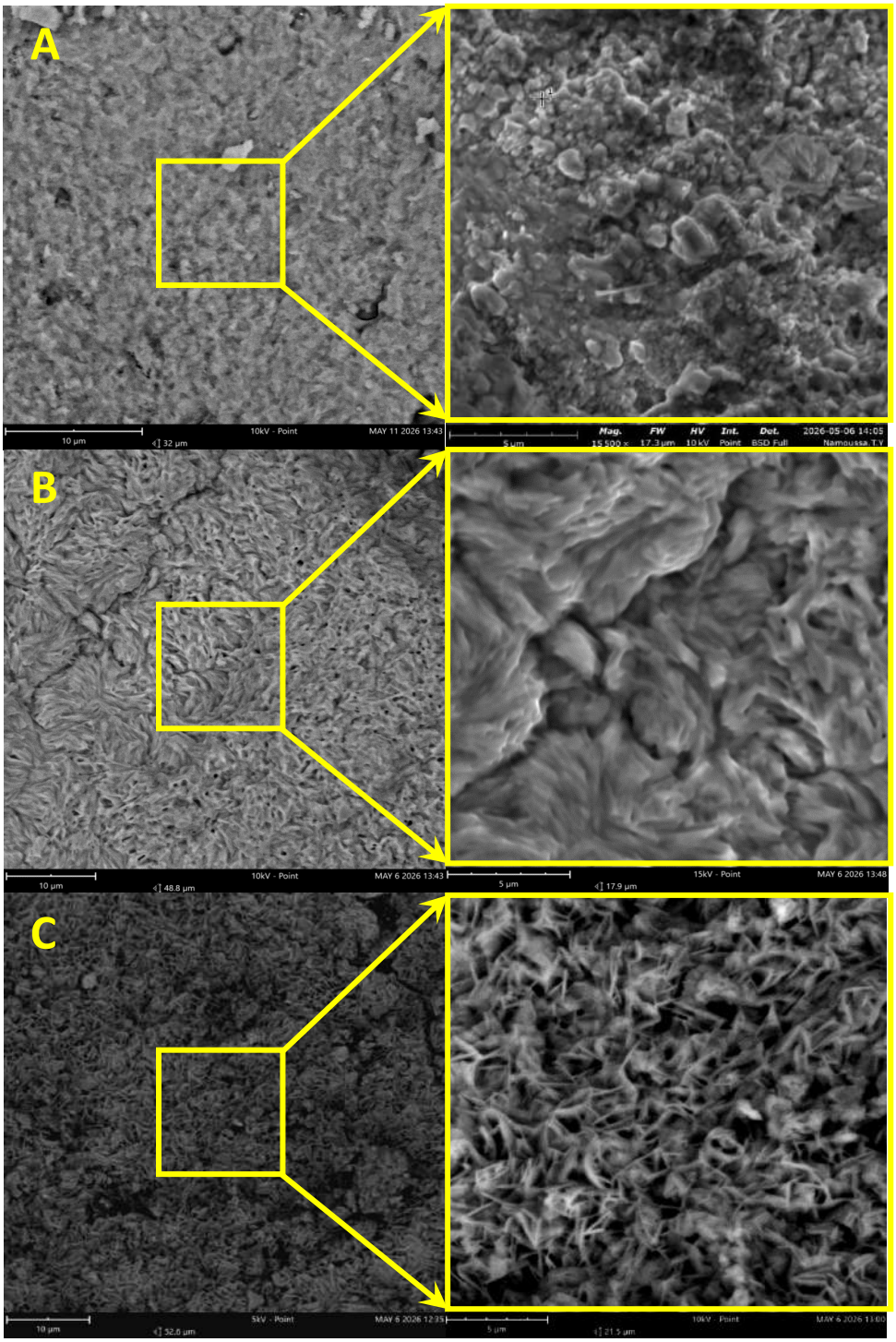
بالإضافة إلى تحليل سطح العينة الفوتوحرارية في حالة وجود و عدم وجود أيونات Ca^{++} تمت أيضًا متابعة مورفولوجيا عينة من AC، وقد أظهرت النتائج (الشكل III .A.1) أن الكربون المنشط يتميز بأنه غير منتظم، وذلك بسبب عدم التجانس في طول الرابطة (C-C) على سطح البنية، وهذا بسبب تدمير سطح الكربون أثناء عملية التنشيط التي تتم تحت ظروف قاسية تؤدي الى تكسير الروابط، مما يتسبب في انتقال المادة من الحالة المنتظمة إلى الحالة العشوائية. كما ينتج عن ذلك تركيبة ذات بنية مسامية تتميز بمساحة سطحية كبيرة **[1، 2].**

يمكن تصنيف التراكيب المسامية في الكربون المنشط إلى ثلاثة أنواع رئيسية، كما هو موضح في الجدول التالي :

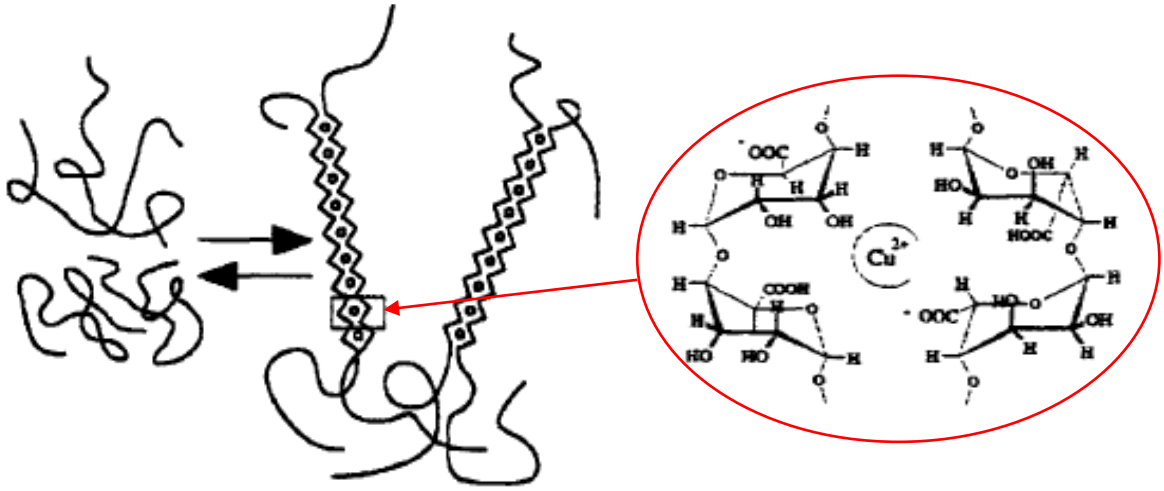
جدول (1.III): نوع المسامات وقطرها.

نوع المسامات	القطر
المسامات الدقيقة micro pores	< 2nm (20A°)
المسامات الانتقالية meso pores	50-2nm (500-20A°)
المسامات الكبيرة macro pores	>50nm (500A°)

بينما في حالة إضافة البوليمير الحيوي AG (الشكلIII .B.1) نلاحظ اختفاء بعض هذه المسامات نتيجة لتغليف AG لحبيبات الكربون وتكوين مصفوفة متماسكة وناعمة الحواف. وبفعل إضافة أيونات Ca^{++} (الشكلIII .C.1) تشكلت بنية شبكية ثلاثية الأبعاد، تتميز بصفائح رقيقة متشابكة، يعود هذا التحول الطوبوغرافي إلى آلية الربط التشابكي الأيوني (Ionic Cross-linking) حيث تحل أيونات Ca^{++} محل أيونات Na^{+} لتشكيل نموذج صندوق البيض (Egg-box model) كما هو موضح في الشكل (2.III)، وهو ما يتطابق مع الملاحظات المورفولوجية و البنيوية الموثقة في دراسات سابقة كتلك المنجزة من طرف Mehellou et al., 2020 **[3].**



الشكل (1.III): صور SEM لعينة من الـAC **(A)** ، العينة الفوتوحرارية في حالة عدم وجود عامل التشبيك Ca^{2+} **(B)** و في حالة وجود عامل التشبيك Ca^{2+} **(C).**



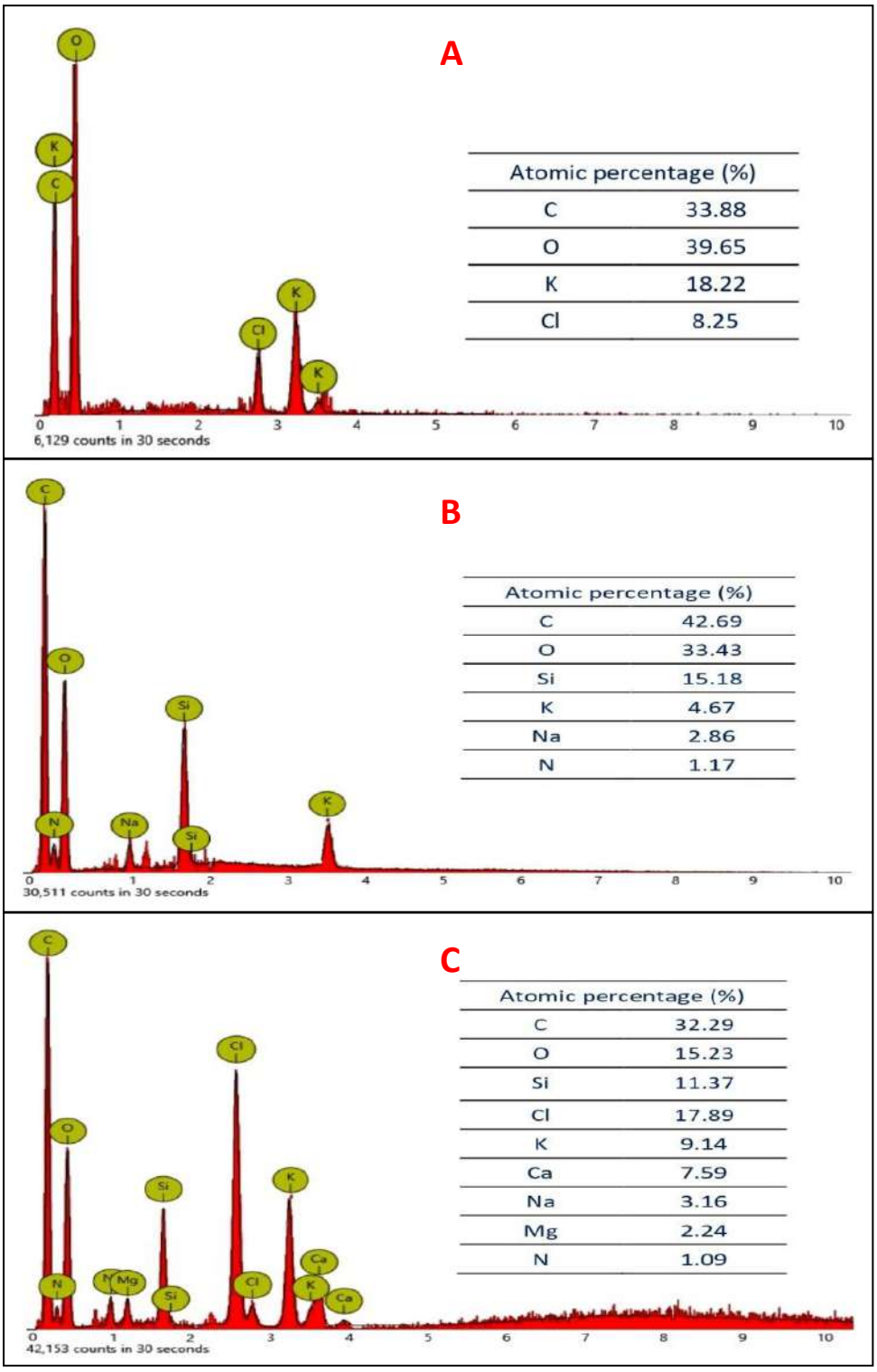
الشكل (2.III): مخطط يوضح عملية تشبيك السلاسل البوليميرية للألجينات بواسطة أيون معدني ثنائي الشحنة **[4]**.

تظهر أطياف EDS الموضحة في الشكل (3.III) وجود عنصر C بنسبة معتبرة مما يؤكد تكوّن المادة الكربونية ونجاح عملية تحضير الكربون المنشط (الشكلA.3.III) ، كما أن وجود الأكسجين بنسبة كبيرة يدل على وجود مجموعات سطحية أكسجينية مثل مجموعات الكربونيل C=O، الكربوكسيل COO^-، والهيدروكسيل C-OH (Hydroxyl, carboxyl, carbonyl) التي تساعد في الامتزاز. وجود البوتاسيوم K بنسبة 18.22 % يعود إلى بقايا مادة التنشيط الكيميائي KOH المستعملة أثناء التحضير, كما أن وجود الـCl قد يكون ناتجًا عن شوائب أو بقايا خطوات الغسل النهائي باستعمال حمض HCl.

بالنسبة للعينة AC/AG (الشكل B.3.III) نلاحظ زيادة في نسبة الكربون والتي تعود إلى التغليف أو التثبيت الجيد للكربون داخل مصفوفة بوليمير الـAG العضوي (ذو البنية الكربونية العالية). ظهور Na بنسبة ضعيفة (2.86 %) يؤكد وجود الـAG التي تحتوي على الصوديوم المثبت في مجموعاتها الكربوكسيلية. من ناحية أخرى، فإن انخفاض نسبة الـK مقارنة بالعينة الأولى يعني أن إضافة الـAG ساعدت على تقليل بقايا KOH أو تغطيتها. أما عنصر Si الحاضر بنسبة في حدود 15.18% فهو يعود إلى حبيبات الرمل العالقة في طبقة الـ AC/AG المحللة.

في الشكل (C.3. III) ، ظهور عنصر Ca (الكالسيوم) يؤكد نجاح دور ملح الـ $CaCl_2$ في توفير أيونات الـ Ca^{2+} والتي تعمل على تشبيك السلاسل البوليميرية الخطية للأجينات. أيونات الكالسيوم ترتبط بمجموعات الكربوكسيل في الألجينات مكوّنة بنية مسامية أكثر صلابة وثباتًا **[5، 6]**. كما أن

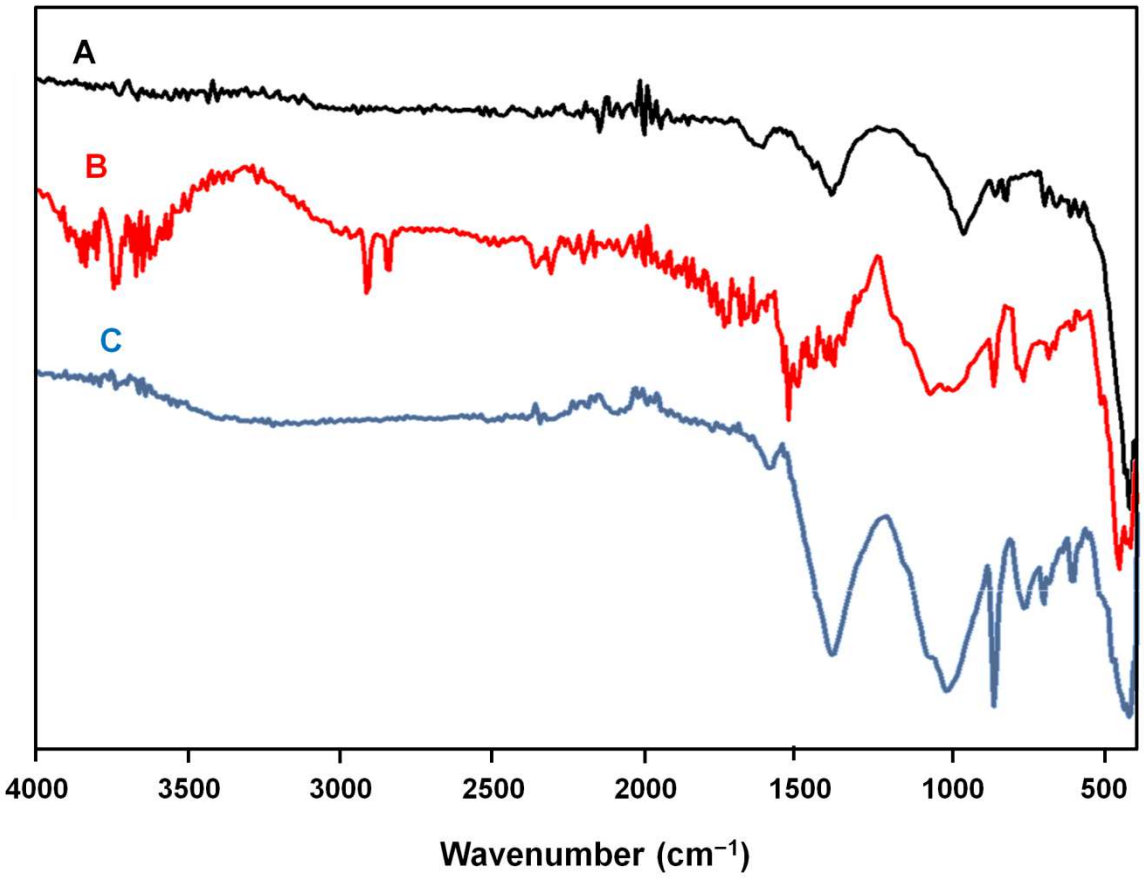
ارتفاع نسبة الـ Cl في هذه العينة إلى قيمة مرتفعة (17.89%) يعود إلى أيونات الكلور الناتجة عن إضافة ملح $CaCl_2$.



الشكل (3.III) : تحليل EDS لعينة من الـAC **(A)**، العينة الفوتوحرارية في حالة عدم وجود عامل التشبيك Ca^{2+} **(B)** و في حالة وجود عامل التشبيك Ca^{2+} **(C).**

2.1.III التحليل بالأشعة تحت الحمراء (FTIR) للعينة الفوتوحرارية:

لمتابعة التغيرات الهيكلية والمجموعات الوظيفية الناتجة عن دمج الكربون المنشط (AC) مع بوليمير الألجينات (AG) الحيوي وتشبيكه باستخدام أيونات الكالسيوم Ca^{2+} تم تحليل العينات الثلاث (الكربون المنشط (AC)، والكربون المدمج مع الألجينات (AC/AG)، والنموذج النهائي (AC/AG/Ca)) بواسطة تقنية الـ FTIR. ومن أجل المناقشة الجيدة لهذه النتائج، تم تمثيل الأطياف الثلاثة في نفس المخطط (الشكل 4.III).



الشكل (4.III): طيف FTIR لعينة من الـAC **(A)**، العينة الفوتوحرارية في حالة عدم وجود عامل التشبيك Ca^{2+} **(B)** و في حالة وجود عامل التشبيك Ca^{2+} **(C)**.

يظهر طيف الكربون المنشط النقي بنية كربونية مستقرة ذات مجموعات وظيفية سطحية محدودة ناتجة عن عملية التنشيط الكيميائي و الحراري. يتضح ذلك من خلال حزمة امتصاص ضعيفة نسبياً عند $3400cm^{-1}$ لتمطط روابط الهيدروكسيل (OH)، بالإضافة إلى ظهور قمة عند المنطقة

$1600\ cm^{-1}$ العائدة لتمدد الروابط العطرية الحلقية (C=C) المكونة للهيكل الفحمي، بالإضافة إلى موجة تظهر في حدود $1000\ cm^{-1}$ الخاصة بروابط (C-O) **[7، 8]**.

عند دمج ألجينات الصوديوم مع الكربون المنشط، يلاحظ بوضوح ظهور البصمات الهيكلية للألجينات المتطابقة مع القيم المرجعية الواردة في الجدول (2.III)، مما يؤكد نجاح عملية التغليف أو التعديل السطحي للكربون . فمن أجل مجموعات الكربوكسيل (COO^-) سُجلت قمة حادة وقوية جداً عند $1596cm^{-1}$ تعود للتمطط غير المتناظر، مصحوبة بقمة التمطط المتناظر لنفس المجموعة الوظيفية عند $1412\ cm^{-1}$ و $1409cm^{-1}$ الموجودة في الـAG. مجموعات الكربونيل الحرة (C=O) تُظهر قمة صغيرة عند حوالي $1722\ cm^{-1}$ -1718 وهي مميزة لتمطط مجموعة الـ (C=O) الموجود في وحدات المانورونيك والجلوكورانيك للبوليمر. أما روابط الإيثر والجليكوسيد (C-O-C) فتبرز قممها الحادة في المدى $1025\ cm^{-1}$ -1080 والتي تعود إلى التمطط غير المتناظر لهاته المجموعات المكونة للحلقات السكرية للألجينات **[3، 9]**.

الجدول (2.III): حزم مطيافية الأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه (FTIR) المميزة لألجينات الصوديوم مع التعيينات المقابلة لها **[10]**.

sodium alginate vibration (cm^{-1})	alginic acid vibration (cm^{-1})	assignment
3700–3000 (broad)	3700–3000 (broad)	OH stretch
3000–2850	3000–2850	CH stretch
	1722	C=O stretch of COOH
	1635	water
1596		antisymmetric CO_2^- stretch
1412		symmetric CO_2^- stretch
	1385, 1347	O–H deformation and C–Ostretch modes
1297	1237	skeletal vibration
1081–1027	1081–1027	antisymmetric stretch C–O–C

تظهر القمم الثانوية مثل تلك القريبة من $1320\ cm^{-1}$ و 1398 الناتجة عن تشوه الرابطة (C-O) في مجموعة الكربوكسيل، والقمة عند $1297\ cm^{-1}$ العائدة لاهتزاز الهيكل. كل القمم السابقة تعتبر دليل قاطع على دمج بوليمير الألجينات مع الكربون المنشط كمرحلة أولية لتحضير النموذج الفوتوحراري النهائي.

عند إضافة ملح ($CaCl_2$) للمزيج المدمج يطرأ تغير جوهري في الطيف و الذي يثبت حدوث تفاعل التشبيك الأيوني (Cross-linking) للسلاسل الخطية للبوليمير واختفاء الصوديوم وحلول الكالسيوم محله لتكوين بنية "صندوق البيض" (Egg-box model) **[6]**. فمن خلال الطيف الأخير (الطيف C) نلاحظ اختفاء الحدة السابقة للقمة $1596\ cm^{-1}$ (في الطيف B) وانزياحها أو اندماجها في حزمة عريضة وقوية ممتدة بين $1400\ cm^{-1}$ -1450. هذا السلوك يعود كيميائياً إلى إحتجاز أيونات الكالسيوم ثنائية التكافؤ (Ca^{2+}) بين سلاسل الألجينات، حيث ترتبط هاته الأيونات مع أكسجين مجموعات الكربوكسيل، مما يقلل من حرية الاهتزاز المستقل لهذه المجموعات ويغير من تردد الامتصاص الخاص بها.

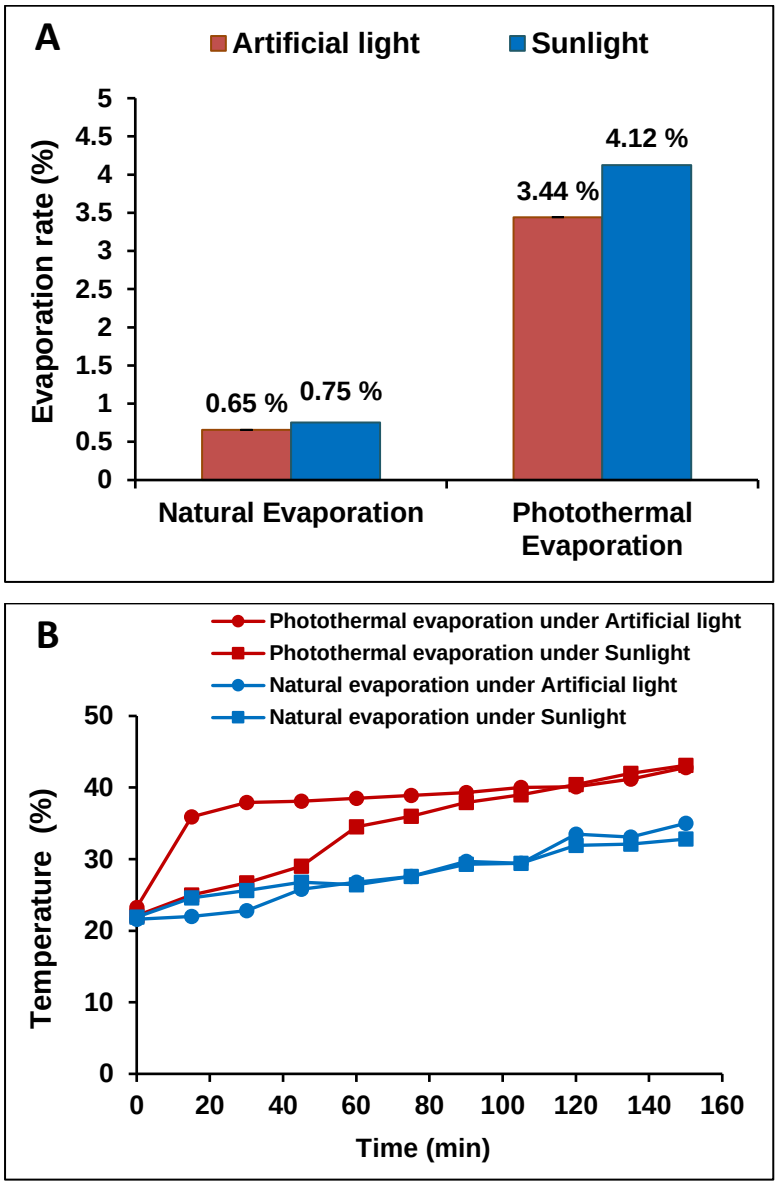
تحولت القمم الحادة والمنفصلة السابقة ($1025\ cm^{-1}$ و1080) العائدة إلى الـC-O-C و الـ C-O إلى قمة واحدة عريضة جداً وعميقة. هذا الاتساع العالي يعكس انخراط الأكسجين الموجود في الروابط السكرية والإيثرية في الاستقرار الفراغي والارتباط التناسقي مع كاتيون الكالسيوم، مما يؤدي إلى زيادة صلابة المصفوفة البوليمرية وتماسكها الميكانيكي. كما أن حـــزمة الهيدروكسيل (HO) عند $3400\ cm^{-1}$ أصبحت أقل حدة وأكثر اتساعاً، مما يدل على نشوء شبكة مكثفة من الروابط الهيدروجينية البينية نتيجة لتقارب السلاسل البوليمرية وتشابكها بفعل أيونات الكالسيوم.

2.III دراسة فعالية الظاهرة الفوتوحرارية في عملية التبخير:

الهدف من هذه الدراسة هو إثبات فعالية الظاهرة الفوتوحرارية في عملية تبخير الماء باستعمال النموذج الفوتوحراري المصنع. لتحقيق ذلك، نقوم بإجراء تجارب تبخير تحت ضوء الشمس (Sunlight) وتحت الضوء المحاكي (Artificial light) باستعمال النموذج الفوتوحراري AC/AG المصنع في الشروط التالية:

- كمية AC تساوي 200 mg.
- تركيز البوليمير (AG) تساوي $2\ g.L^{-1}$.
- مدة التبخير: 2.5 h.

وتم عرض النتائج المتحصل عليها على شكل معدل التبخر وتغير درجة حرارة سطح النموذج الفوتوحراري في الشكل (5.III).



الشكل (5.III): (A) معدل التبخر في حالة وجود النموذج الفوتوحراري وغيابه تحت Sunlight وتحت Artificial light **(B)** , تغير درجة حرارة السطح الفوتوحراري تحت Sunlight وتحت Artificial light

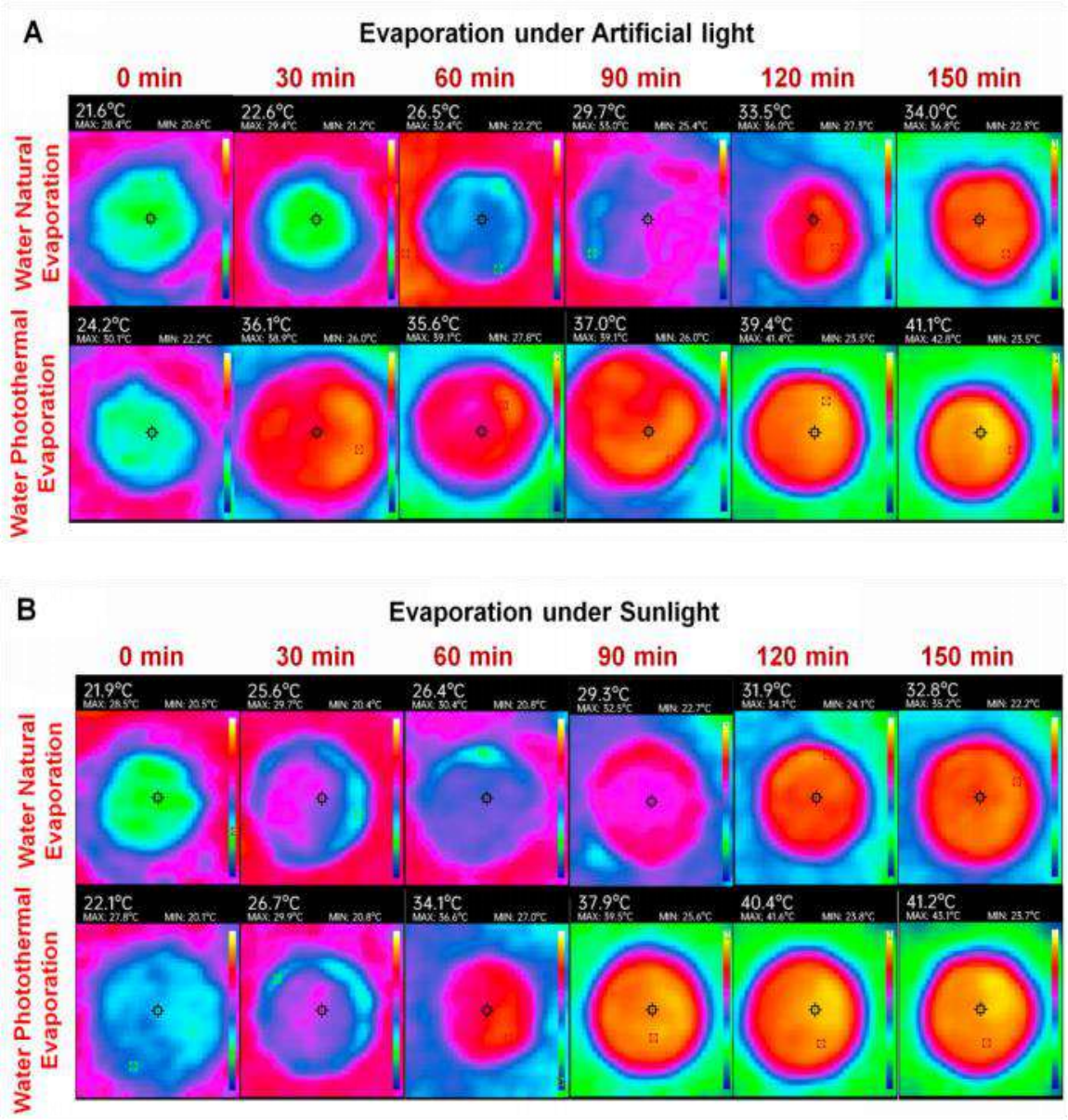
النتائج الممثلة في الشكل (5.III) تُثبت فاعلية النموذج الفوتوحراري من خلال الرصد المباشر لتغيرات درجة الحرارة؛ حيث سُجِّل ارتفاع ملحوظ في درجة حرارة سطح النموذج خلال تعريضة للإشعاع الضوئي (سواء تحت ضوء الشمس أو الضوء المحاكي)، حيث ارتفعت درجة الحرارة من قيمة ابتدائية في حدود 24 °C إلى غاية 41 °C بعد عملية تبخير دامت 2.5 h.

بالإضافة إلى ذلك يلاحظ ارتفاع سريع لدرجة الحرارة خلال 15 min الأولى وثباتها في أقصى قيمة لها تقريبا (≈41°C) إلى غاية نهاية التجربة في حالة الضوء المحاكي، وهذا بسبب الشدة الإشعاعية الثابتة لهذا الضوء. في حين أنه في ضوء الشمس سجل ارتفاع تدريجي في درجة الحرارة وهذا راجع إلى الزيادة التدريجية في شدة إشعاع ضوء الشمس خلال ساعات النهار.

هذا التغير الحراري المتسارع والمباشر على السطح أدى بدوره إلى قفزة هائلة في معدل تبخير المياه وزيادة نسبة التبخر من 0.75 % في حالة التبخر الطبيعي للماء (أي في عدم وجود النموذج الفوتوحراري) إلى 4.12% تحت ضوء الشمس ومن 0.65% إلى 3.44% تحت الضوء المحاكي.

تضاعف نسبة التبخر في وجود النموذج الفوتوحراري 6 مرات تقريبا تحت ضوء الشمس و5 مرات تقريبا تحت الضوء المحاكي في زمن قياسي (2.5 h) يشكل دليلاً فيزيائياً ملموساً على نجاح النموذج في امتصاص الطاقة الضوئية وتحويلها بكفاءة إلى طاقة حرارية دافعة للتبخير.

وهذا ماتُظهره نتائج التصوير الحراري المعروضة في الشكل (6.III) ، و التي نلاحظ من خلالها فرقاً واضحاً في السلوك الديناميكي الحراري. حيث حقق السطح الفوتوحراري استجابة حرارية سريعة واستقراراً عند درجات حرارة مرتفعة تجاوزت 41°C بعد 150 دقيقة تحت كِلا الضوئين (المحاكي وضوء الشمس)، مقارنة بالماء النقي الذي لم يتجاوز حرارته 34°C و يُعزز هذا الارتفاع الملحوظ في درجة الحرارة كفاءة الطبقة الفوتوحرارية في الامتصاص الواسع للطيف الضوئي، كما يثبت تمركز البقعة الساخنة في الطبقة السطحية نجاح استراتيجية الحصر الحراري الموضعي والحد من تشتت الطاقة نحو العمق، مما يوجه الحرارة بالكامل لتسريع عملية التبخير.



الشكل (6.III): صور حرارية للسطح المائي والسطح الفوتو حراري مسجلة خلال التجربة تحت **(A)** الضوء الاصطناعي المحاكي (Artificial light)، **(B)** ضوء الشمس (Sunlight).

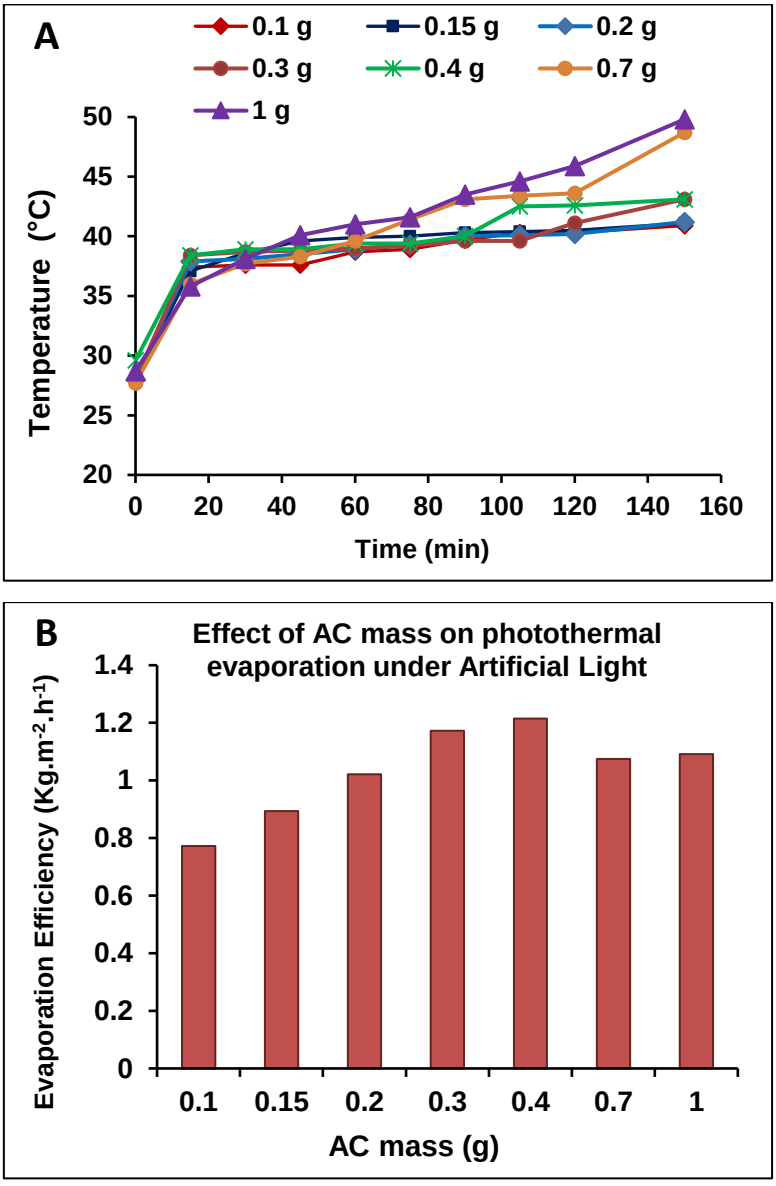
3.III دراسة تأثير بعض العوامل التجريبية على فعالية التبخير الفوتوحراري:

بهدف الوصول إلى الكفاءة القصوى للنموذج الفوتوحراري المصنع، قمنا بدراسة تأثير مجموعة من العوامل التجريبية بهدف الوصول إلى الشروط المثلى التي تحقق أعلى معدل تبخير وأفضل استقرار للنموذج.

III .1.3 تأثير كمية الكربون المنشط :

من أجل دراسة تأثير كمية الكربون المنشط قمنا بتحضير عينات مختلفة في الكمية و إستعمالها في عملية التبخير في الشروط الموضحة أدناه و النتائج المتحصل عليها ممثلة في الشكل (7.III).

- كمية AC متغيرة بين 0.1 g و 1 g.
- تركيز البوليمير (AG) تساوي 2 $g.L^{-1}$.
- مدة التبخير: 2.5 h.



الشكل (7.III): (A) تغير درجة الحرارة (°C) لسطح النموذج الفوتوحراري خلال التجربة، **(B)** كفاءة التبخر ($Kg.m^{-2}.h^{-1}$) من أجل مختلف كتل الكربون المنشط المستعملة.

يُظهر الشكل (7.III) تأثير كتل مختلفة من الAC على درجة حرارة السطح (A) وكفاءة التبخير (B)، حيث سُجل ارتفاع سريع في درجات الحرارة لجميع العينات خلال الـ 20 دقيقة الأولى لتستقر عند نهاية التجربة بين 41 °C و 49 °C. و بالموازاة مع ذلك، سلكت كفاءة التبخير منحنى تصاعدياً مع زيادة الكتلة من 0.1g حتى بلغت ذروتها عند الكتلة 0.4 g بمعدل تقاربي قدره 1.22 $Kg.m^{-2}.h^{-1}$ ويُعود هذا الصعود إلى زيادة مساحة السطح المعرضة للامتصاص الضوئي وتوفر مسارات شعرية أكثر تعزز تدفق وتبخر جزيئات الماء.

بالمقابل، شهدت الكتل الأكبر من الكتلة 0.4 g (1 g و 0.7g) تراجعاً نسبياً في كفاءة التبخير رغم تسجيلها لأعلى درجات حرارة على السطح، وهذا راجع لارتفاع سُمك الطبقة الكربونية الذي خلق عائقاً فيزيائياً زاد من مقاومة انتقال الكتلة ومنع بخار الماء من الصعود بحرية، بالإضافة إلى زيادة المقاومة الحرارية التي قللت من وصول الحرارة السطحية بفعالية إلى الطبقات الداخلية للنموذج **[11]**. و بناءا على هذه النتائج يمكن إعتبار الكتلة 0.4 g ككمية مثلى من الكربون المنشط للنموذج.

2.3.III تأثير تركيز الألجينات (AG):

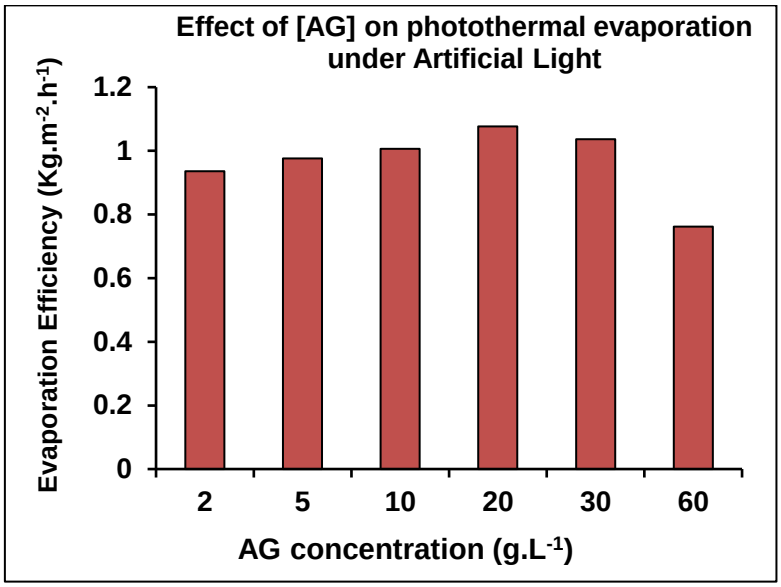
من أجل دراسة تأثير تركيز الـ AG كبوليمير حيوي يعمل على تثبيت و تماسك الطبقة الفوتوحرارية و من أجل تحديد الكمية المثالية لهذا البوليمير التي تساعد على تحقيق أعلى كفاءة تبخير تم اختبار مجموعة تراكيز مختلفة من الـAG. حيث تمت هاته الدراسة في الشروط التالية :

- كمية AC تساوي 0.4 g.
- تركيز البوليمير (AG) متغير بين 2 $g.L^{-1}$ و 60 $g.L^{-1}$.
- مدة التبخير: 2.5 h.

و قد تم عرض النتائج على شكل تغير كفاءة التبخر ($Kg.m^{-2}.h^{-1}$) من أجل مختلف تراكيز بوليمير الألجينات المستعملة في الشكل (8.III).

تظهر النتائج المتحصل عليها تأثير واضح للتراكيز المختلفة من الألجينات AGعلى كفاءة التبخير الفوتوحراري، حيث نلاحظ أن الكفاءة تزداد تدريجياً مع زيادة تركيز AG من 2 $g.L^{-1}$ لتسجل أعلى قيمة لها عند التركيز المثالي 20 $g.L^{-1}$ بمعدل يقارب 1.08 $Kg.m^{-2}.h^{-1}$. ويُعود هذا الارتفاع إلى نجاح الألجينات في بناء شبكة هيدروجيلية متماسكة ومسامية، تُحسّن من حبس المادة الكربونية وتضمن تدفقاً مستمراً وجيداً لجزيئات الماء نحو السطح عبر الخاصية الشعرية **[11، 12].**

بالمقابل، أدى رفع تركيز الـAG بشكل كبير (عند $30\ g.L^{-1}$ و $60\ g.L^{-1}$) إلى تراجع ملحوظ في الكفاءة. يُفسر ذلك بأن التركيز العالي من البوليمير قد يزيد من سمك الطبقة الفوتوحرارية ويجعل الشبكة البوليميرية شديدة الكثافة وضيقة المسامات، مما يعيق حركة صعود الماء ويقلل من معدل التبخير. و بناءا على هذه النتائج يمكن إعتماد التركيز $20\ g.L^{-1}$ هو الأمثل.



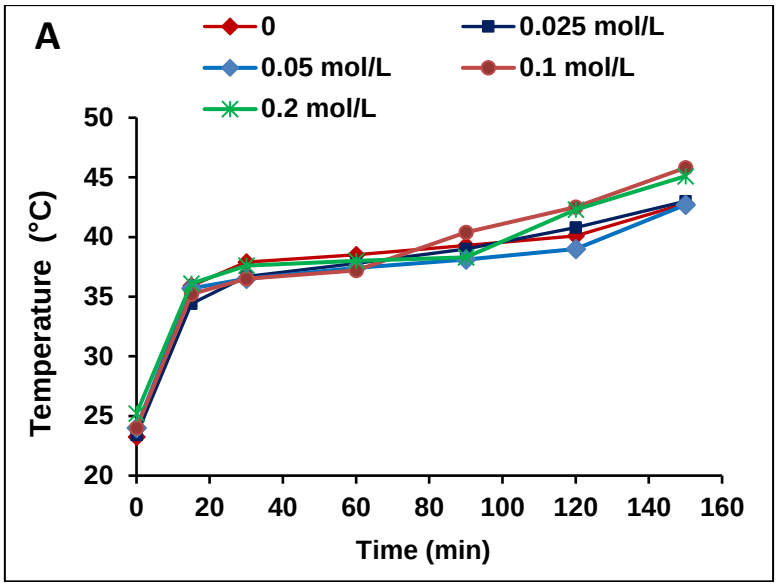
الشكل (8.III): تغير كفاءة التبخر ($Kg.m^{-2}.h^{-1}$) من أجل مختلف تراكيز بوليمير الألجينات المستعملة.

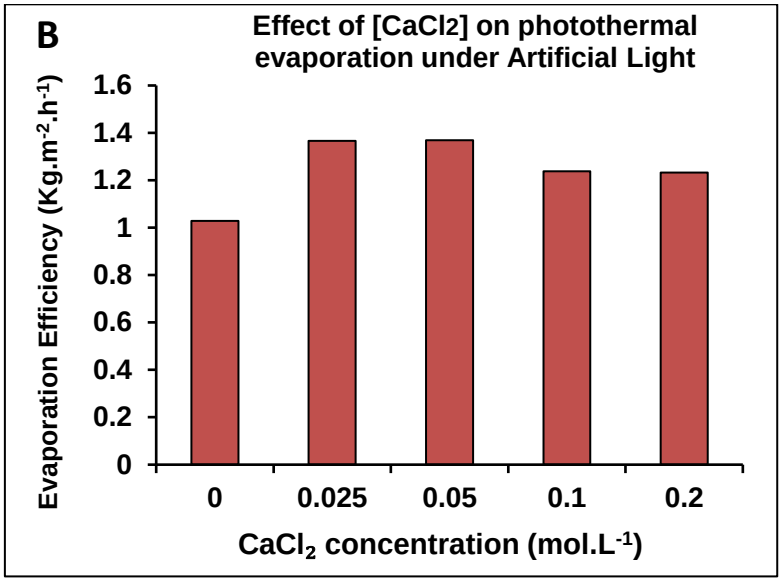
3.3.III تأثير وجود عامل التشبيك (أيونات Ca^{2+}):

تهدف هذه الدراسة إلى تحديد الدور الذي يلعبه عامل التشبيك الأيوني المتمثل في أيونات الكالسيوم (Ca^{2+}) كأيونات معدنية ثنائية التكافؤ تكوّن روابط كيميائية قوية بين السلاسل الخطية للبوليمير مما يؤدي إلى تحسين الخصائص الحرارية والميكانيكية للطبقة الفوتوحرارية **[5، 6، 13].** من أجل دراسة تأثير وجود هذا الأيون المعدني على آداء الطبقة الفوتوحرارية تم إضافة تراكيز مختلفة من ملح $CaCl_2$ لمزيج الكربون المنشط و بوليمير الألجينات عند تحضير النموذج. بينما كانت الشروط التجريبية الأخرى كالآتي :

- تراكيز ملح $CaCl_2$ متغيرة كالتالي : 0 ، 0.025 ، 0.05 ، 0.1 ، $0.2\ mol.L^{-1}$.
- كمية AC تساوي 0.4 g.
- تركيز البوليمير (AG) يساوي $20\ g.L^{-1}$.
- مدة التبخير: 2.5 h.

تم عرض النتائج في الشكل (9.III).





الشكل (9.III): (A) تغير درجة الحرارة (°C) لسطح النموذج الفوتوحراري خلال التجربة، **(B)** كفاءة التبخر ($Kg.m^{-2}.h^{-1}$) من أجل مختلف تراكيز ملح $CaCl_2$.

يُلاحظ من خلال المنحنيات البيانية (الشكل 9.III -A) أن تغير تركيز أيونات الكالسيوم لا يؤثر بشكل كبير على درجة حرارة السطح الفوتوحراري. حيث تم تسجيل ارتفاع حاد وسريع في درجة الحرارة خلال الـ 15 دقيقة الأولى من التجربة، لتنتقل من حوالي 23 °C إلى 36 °C من أجل كل تراكيز الكالسيوم المستعملة.

بعد هذه المرحلة، تستقر درجات الحرارة وتدخل في طور من الثبات النسبي يتراوح بين 38C° و 45C° حتى نهاية مدة الاختبار (150 دقيقة). يُعزى الارتفاع الأولي السريع إلى الكفاءة العالية للمادة الفوتوحرارية في امتصاص الإشعاع الضوئي وتحويله إلى طاقة حرارية.

بينما يُفسَّر الاستقرار اللاحق بالوصول إلى حالة توازن ديناميكي حراري، حيث يتم استهلاك الطاقة الحرارية الممتصة كاملة لتوفير الطاقة اللازمة للحرارة الكامنة لتبخر الماء دون رفع درجة حرارة السطح بشكل مستمر. كما يُظهر تقارب المنحنيات أن إضافة عامل التشبيك بتراكيز مختلفة لا يؤثر بشكل مهم على قدرة الامتصاصية الضوئية للمادة.

من ناحية أخرى أظهرت النتائج المسجلة (الشكل 9.III -B) كفاءة تبخير متباينة إلى حد ما بدلالة تركيز عامل التشبيك. ويعود السبب في الارتفاع الملحوظ لكفاءة التبخير عند التركيزين 0.025 و $0.05\ mol.L^{-1}$ إلى دور أيونات Ca^{2+} بهاذين التركيزين في إحداث تشبيك معتدل بين السلاسل البوليمرية، مما يساهم في هندسة وتكوين قنوات شعرية منتظمة تسهل النقل السريع للماء نحو السطح. بينما يُفسر النقصان المُلاحظ في كفاءة التبخير عند التراكيز التي تفوق $0.05\ mol.L^{-1}$ (أي عند التركيزين 0.1 و $0.2\ mol.L^{-1}$) بأن تجاوز حد معين من هذا التشبيك قد يقلل من قوى التجاذب بين الماء والبوليمر، و بالتالي يعيق نفوذ جزيئات الماء إلى الطبقة السطحية للمادة الفوتوحرارية.

كخلاصة، فإن زيادة تركيز عامل التشبيك فوق الحد المثالي يؤدي إلى تراجع تدريجي في الكفاءة؛ نتيجة لحدوث تشبيك مفرط (Over-crosslinking) يتسبب في انكماش الشبكة و تضيق المسامات، فضلاً عن تأثير الملوحة العالية (Salting-out) الذي يقيد حركة جزيئات الماء ويزيد من صعوبة إفلاتها **[13، 14]**.

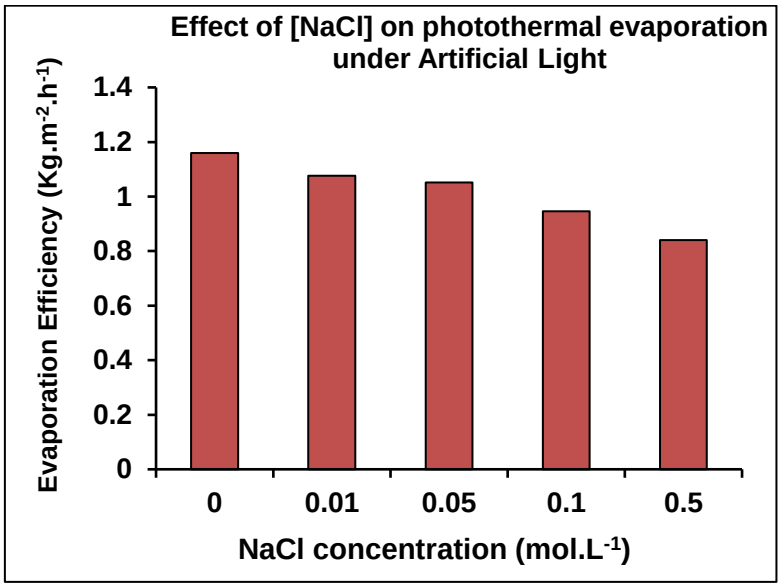
4.3.III تأثير وجود ملح معدني في الماء:

وجود الأملاح في الماء له تأثير مهم جدا على عملية البخير الفوتوحراري **[15، 16]**. و هناك العديد من الدراسات الحديثة التي أنجزت من أجل الحد أو التقليل من تأثير و تراكم الأملاح خلال عملية التبخير الفوتوحراري **[17-19]**.

ومن أجل دراسة تأثير وجود الملح في الماء على كفاءة التبخير الفوتوحراري ، تم اختبار عدة تراكيز مختلفة من ملح كلوريد الصوديوم (NaCl) في الماء المراد تبخيره، حيث أجريت التجارب في الشروط التالية :

- تراكيز ملح في الماء NaCl متغيرة كالتالي : 0 ، 0.01 ، 0.05 ، 0.1 ، 0.5 $mol.L^{-1}$.
- كمية AC تساوي 0.4 g.
- تركيز البوليمير (AG) يساوي 20 $g.L^{-1}$.
- تركيز ملح $CaCl_2$ يساوي 0.05 $mol.L^{-1}$.
- مدة التبخير: 2.5 h.

و لمتابعة تغير كفاءة التبخير بدلالة تركيز الملح في الوسط المائي تم عرض النتائج على شكل كفاءة تبخير كالتالي :



الشكل (10.III): تغير كفاءة التبخر ($Kg.m^{-2}.h^{-1}$) من أجل مختلف تراكيز ملح NaCl في الماء.

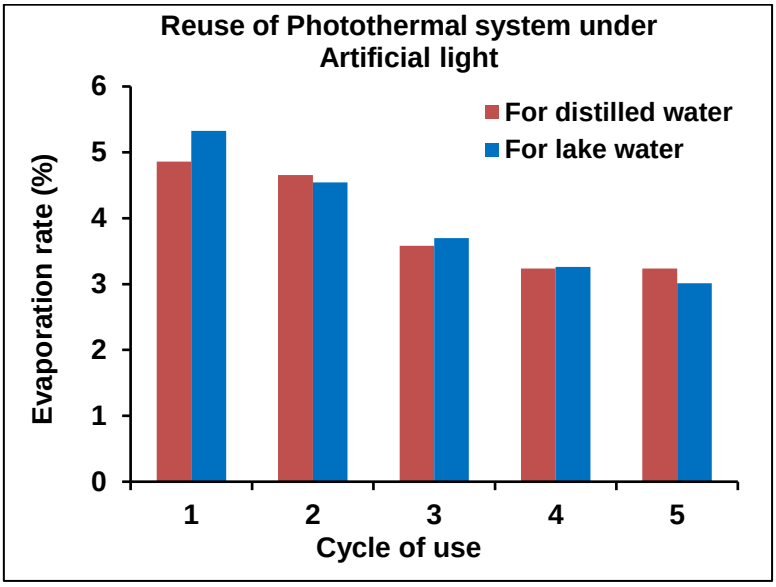
تُظهر النتائج المبينة في الشكل (**10.III**) أن كفاءة التبخير تنخفض تدريجيًا بزيادة تركيز ملح NaCl في الماء. حيث سُجلت أعلى قيمة لكفاءة التبخير عند غياب الملح (التركيز 0)، ثم بدأت القيم بالانخفاض مع زيادة التركيز تدريجيا لتصل إلى أدنى قيمة عند التركيز 0.5 $mol.L^{-1}$.

ويُفسَّر هذا الانخفاض بأن وجود الأملاح في الماء يؤدي إلى تقليل ضغط البخار للماء وإعاقة حركة جزيئاته الحرة، مما يجعل عملية التبخر أكثر صعوبة. كما أن تراكم الأملاح على سطحي المادة الفوتوحرارية قد يحدّ من امتصاص الضوء وانتقال الحرارة، وبالتالي تنخفض كفاءة التبخير الفوتوحراري. بالإضافة إلى ذلك ، فإن زيادة الملوحة تؤثر على الخصائص الفيزيائية للماء مثل اللزوجة والكثافة، وهو ما يساهم بدوره في تقليل معدل التبخر مع ارتفاع تركيز الملح **[17].**

4.III دراسة إستقرار النموذج الفوتوحراري :

تُعدّ دراسة إمكانية إعادة استخدام أي نموذج أو مادة فوتوحرارية مصنعة واستمرار فعاليتها من الاعتبارات المهمة للتطبيقات العملية، لا سيما على النطاق الصناعي **[20، 21]**. ولتحقيق ذلك، أُجريت خمسة تجارب متتالية من أجل عينة من الماء المقطر (Distilled water) و أخرى من ماء البحيرة (Lake water) بإستعمال نفس النموذجين الفوتوحراريين في الشروط المثلى المحدد سابقا :

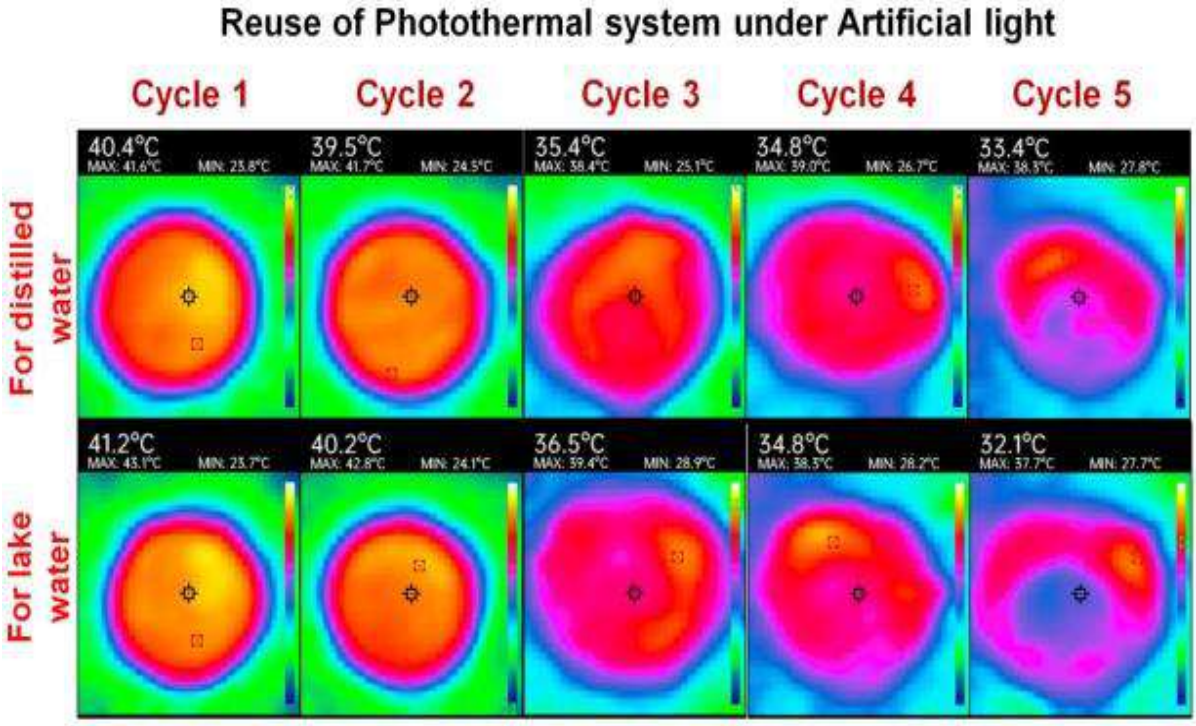
- ❖ كمية AC تساوي 0.4 g.
- ❖ تركيز البوليمير (AG) يساوي $20\ g.L^{-1}$.
- ❖ تركيز ملح $CaCl_2$ يساوي $0.05\ mol.L^{-1}$.
- ❖ مدة التبخير : 2.5 h.



الشكل (11.III): معدل التبخر عند نهاية كل تجربة إعادة إستخدام للنموذج الفوتوحراري تحت الضوء المحاكي (Artificial light).

أظهرت نتائج تجارب إعادة الاستخدام المستمرة لخمس دورات متتالية تحت الضوء المحاكي، والموضحة في الشكل (11.III) و الشكل (12.III)، سلوكاً متقارباً للنموذج عند اختباره بالماء المقطر وماء البحيرة؛ حيث سجلت الدورة الأولى أعلى معدل تبخير (قارب 5 % للماء المقطر و 5.4 % لمياه البحيرة) ترافق مع أعلى درجة حرارة سطحية قصوى (41.6 °C و 43.1 °C للماء المقطر و مياه البحيرة على التوالي).

ومع ذلك، يُلاحظ من المخطط البياني (الشكل (11.III)) والصور الحرارية (الشكل (12.III)) حدوث انخفاض تدريجي وملموس في الأداء و في درجة حرارة السطح ينطلق أساساً من دورة الإستعمال الثالثة، حيث تراجعت كفاءة التبخير وحرارة السطح بوضوح في هاته الدورة. ثم بعد ذلك تتجه نتائج معدل التبخير نحو نوع من الاستقرار النسبي في دورتي الإستعمال الرابعة والخامسة (عند القيمة 3% تقريبا) وحرارة سطحية في حدود 38 °C و 37 °C من أجل نموذجي الماء المقطر و ماء البحيرة على الترتيب.



الشكل (12.III): صور حرارية لسطح النموذج الفوتوحراري المسجلة عند نهاية كل تجربة إعادة إستخدام تحت الضوء المحاكي (Artificial light).

من ناحية أخرى، يُلاحظ من كذلك خلال الصور الحرارية (الشكل (12.III)) تلاشي و تدهور التجانس الحراري للسطح الفوتوحراري، و هذا ما يفسر التراجع الحاد في معدل التبخر إبتداءا من الدروة الثالثة. حيث أن السبب الرئيسي في هذا التراجع يتعلق ببنية النموذج نفسه؛ فيبدأ سطح المادة الفوتوحرارية بالتفكك الجزئي نتيجة الفقد الميكانيكي و تكسر الترابط البوليميري مما يؤدي إلى تأثر الفعالية.

يضاف إلى هذا التلاشي البنيوي عامل التشبع المائي التدريجي للمسامات الذي يغير من السعة الحرارية للسطح. أما في حالة مياه البحيرة، فإن هذا الانخفاض تضاعف نتيجة عامل كيميائي إضافي وهو تراكم الأملاح و المواد العالقة وتأثيرها في سد مسامات الكربون المنشط وحجب الضوء عن السطح . ورغم هذا التفكك الأولي والتراجع في الكفاءة، فإن صمود النموذج واستقراره في الدورات الأخيرة دون انهيار كلي يعكس قدرته المقبولة على العمل المتكرر في تطبيقات التبخير على النطاق الواسع.

قائمة المراجع:

المراجع العربية :

[1] الطائي سإخ. تحضير أنواع جديدة من الكاربون المنشط واختبار كفاءتها من خلال امتزاز بعض الأصباغ عليها، دراسة ثيرموديناميكية وحركية، أطروحة دكتوراه بجامعة الموصل، 2017.

[2] غاري أتار و كولين بارنس": السطوح"، سلسلة أكسفورد لمبادئ الكيمياء ،1997، ص49.

المراجع الأجنبية :

[3] Mehellou, A., Delimi, R., Benredjem, Z., Saaidia, S., Allat, L., & Innocent, C. (2020). Improving the efficiency and selectivity of Cd^{2+} removal using a modified resin in the continuous electropermutation process. Separation Science and Technology, 55(11), 2049–2060.

[4] Mehellou, A., Elimination des métaux lourds par électrodialyse associée à l'échange d'ions, Thése de doctorat, 2015, Université de Annaba.

[5] Feyissa, Z., Edossa, G. D., Gupta, N. K., & Negera, D. (2023). Development of double crosslinked sodium alginate/chitosan based hydrogels for controlled release of metronidazole and its antibacterial activity. Heliyon, 9(9).

[6] Tordi, P., Gelli, R., Tamantini, S., & Bonini, M. (2025). Alginate crosslinking beyond calcium: Unlocking the potential of a range of divalent cations for fiber formation. International Journal of Biological Macromolecules, 306, 141196.

[7] El-Kady, A. A., Ghafar, H. H. A., Ibrahim, M. B., & Abdel-Wahhab, M. A. (2013). Utilization of activated carbon prepared from agricultural waste for the removal of organophosphorous pesticide from aqueous media. Desalination and Water Treatment, 51(37-39), 7276-7285.

[8] Blachnio, M., Derylo-Marczewska, A., Charmas, B., Zienkiewicz-Strzalka, M., Bogatyrov, V., & Galaburda, M. (2020). Activated carbon from agricultural wastes for adsorption of organic pollutants. *Molecules*, *25*(21), 5105.

[9] de Moraes, M. A., Cocenza, D. S., da Cruz Vasconcellos, F., Fraceto, L. F., & Beppu, M. M. (2013). Chitosan and alginate biopolymer membranes for remediation of contaminated water with herbicides. Journal of Environmental Management, 131, 222-227.

[10] Lawrie, G., Keen, I., Drew, B., Chandler-Temple, A., Rintoul, L., Fredericks, P., & Grøndahl, L. (2007). Interactions between alginate and chitosan biopolymers characterized using FTIR and XPS. Biomacromolecules, 8(8), 2533-2541.

[11] Zhu, J., Huang, L., Bao, F., Chen, G., Song, K., Wang, Z., ... & Ji, M. (2024). Carbon materials for enhanced photothermal conversion: Preparation and applications on steam generation. *Materials Reports: Energy*, *4*(2), 100245.

[12] Balasooriya, I. L., Senavirathna, M. D. H. J., & Wang, W. (2025). Application of Activated Carbon/Alginate Composite Beads for the Removal of 2-Methylisoborneol from Aqueous Solution. *AppliedChem*, *5*(4), 32.

[13] Ye, L., Yan, J., Su, Q., Hou, S., Xiao, W., Wu, H., ... & Gao, J. (2025). Sodium alginate hydrogel–conductive fabric architecture enables electro-solar dual-driven interfacial evaporation for all-day steam generation. *Carbohydrate Polymers*, 124333.

[14] Siddique, M. F., Omar, F. K., Waseem, M., & Al-Marzouqi, A. H. (2025). Self-Cleaning Alginate–PVA Hydrogel Evaporator with Enhanced Solar Desalination Efficiency and Long-Term Salt Resistance. ACS omega, 10(44), 52459-52472.

[15] Djellabi, R., Noureen, L., Dao, V. D., Meroni, D., Falletta, E., Dionysiou, D. D., & Bianchi, C. L. (2022). Recent advances and challenges of emerging solar-driven steam and the contribution of photocatalytic effect. Chemical Engineering Journal, 431, 134024.

[16] Zeng, B., Kumar, T., Wu, H., Stark, S., Hamza, H., Zhao, H., ... & Zhang, X. (2023). Evolution of morphology and distribution of salt crystals on a photothermal layer during solar interfacial evaporation. *Langmuir*, *39*(41), 14737-14747.

[17] Wei, Z., Wang, J., Guo, S., & Tan, S. C. (2022). Towards highly salt-rejecting solar interfacial evaporation: Photothermal materials selection, structural designs, and energy management. *Nano Res. Energy*, *1*(2), e9120014.

[18] Ran, Y., Liu, L., & Bao, Y. (2025). A novel method for salt separation-crystallization and water recovery via photothermal evaporation. *Journal of Water Process Engineering*, *75*, 107877.

[19] Li, C., Zhu, B., Liu, Z., Zhao, J., Meng, R., Zhang, L., & Chen, Z. (2022). Polyelectrolyte-based photothermal hydrogel with low evaporation enthalpy for solar-driven salt-tolerant desalination. *Chemical Engineering Journal*, *431*, 134224.

[20] Shan, X., Zhao, A., Lin, Y., Hu, Y., Di, Y., Liu, C., & Gan, Z. (2020). Low-cost, scalable, and reusable photothermal layers for highly efficient solar steam generation and versatile energy conversion. *Advanced Sustainable Systems*, *4*(5), 1900153.

[21] Zhong, H., Zhu, Z., Lin, J., Cheung, C. F., Lu, V. L., Yan, F., ... & Li, G. (2020). Reusable and recyclable graphene masks with outstanding superhydrophobic and photothermal performances. *ACS nano*, *14*(5), 6213-6221.

خـاتـمـة عـامـة

تهدف هذه الدراسة إلى نمذجة وتحسين نموذج مبتكر وصديق للبيئة للقيام بعمليات التبخير االفوتوحراري، من أجل المساهمة في إيجاد حلول واعدة للتخلص من المياه الراكدة خاصة تلك المتواجدة في المناطق العمرانية والحظرية التي تشكل بدورها خطرا بيئي وسكاني. وقد ركزت الدراسة بشكل أساسي على تثمين نفايات حيوية متمثلة في بقايا النخيل (جذوع) وتحويلها إلى كربون منشط ذو بنية مسامية واستخدامه كمادة فوتوحرارية تمتص الأشعة الضوئية وتحولها إلى حرارة.

- ❖ في البداية أثبتت تحاليل التوصيف البنيوي للسطح بواسطة SEM-EDS، نجاح تحضير مادة فوتوحرارية ذات بنية كربونية بوليميرية متماسكة و منتظمة وذات مسامسة عالية. كما أظهرت نتائج تحليل مطيافية الأشعة تحت الحمراء نجاعة عملية تحضير الكربون المنشط و تماسكه و تشبيكه بشكل فعال و جيد في المادة الفوتوحرارية بواسطة الأجينات.
- ❖ في مرحلة تطبيقية أولى للمادة الفوتوحرارية، أظهرت دراسة المقارنة الأولية بين عملية التبخير الطبيعي للماء و التبخير بإستخدام النظام الفوتوحراري المحضر في ظل نفس الشروط، أن وجود هذا الأخير أثبت فعالية و آداء عالي. حيث تضاعف معدل تبخر الماء بمقدار خمسة أضعاف تقريبًا تحت الضوء المحاكي، وستة أضعاف تقريبا تحت ضوء الشمس في مدة زمنية قدرها 2.5h. من ناحية أخرى، بلغت درجة حرارة سطح المادة الفوتوحرارية حوالي 43.1°C تحت ضوء الشمس، و 42.8°C تحت الضوء الاصطناعي. إضافة إلى ذلك ، وثقت تقنية التصوير الحراري بالأشعة تحت الحمراء القدرة العالية والسريعة للمادة على التحويل الفوتوحراري ورفع درجة حرارة السطح فور تعرضها للإشعاع الضوئي.
- ❖ في مرحلة أخرى ومن خلال سلسلة من التجارب المخبرية، تم التوصل إلى أن الكتلة المثلى من الكربون المنشط الملائمة لأداء عالٍ للمادة الفوتوحرارية هي 400 mg، حيث سمحت هذه الكتلة بتغطية سطح النموذج بشكل متجانس وامتصاص أقصى قدر من الضوء، كما تم ضبط تركيز ملح كلوريد الكالسيوم $CaCl_2$ عند القيمة المثلى M 0.05 بالإضافة إلى اختيار التركيز المناسب من مادة الألجينات (AG) المتمثل في $20\ g.L^{-1}$ لتعزيز تماسك الهيكل البنيوي للنموذج. وقد أثبت هذا النموذج فعالية التبخير العالية عند تطبيقها على عينات المياه.
- ❖ وفي مرحلة أخيرة خضع النموذج الفوتوحراري المحضر و بتطبيق الشروط التجريبية المثلى لاختبارات إعادة إستعمال عبر 5 دورات متتالية لمقارنة سلوكه واستقراره لتجارب

التبخير لكل من الماء المقطر ومياه البحيرة، وقد أبانت النتائج المدعومة بالتوثيق الحراري لكاميرا الأشعة تحت الحمراء عن تراجع تدريجي في كفاءة التبخير وحرارة السطح يظهر بوضوح بداية من الدورة الثالثة، حيث يعزى هذا الانخفاض الى بداية تلاشي وتفكك جزئي لبنية الطبقة الفوتوحرارية السطحية، ورغم هذا التفكك الأولي والتراجع المبكر في الأداء، إلى أن النظام اتجه نحو الاستقرار النسبي في الدورتين الرابعة والخامسة محافظا على نتائج مقبولة دون حدوث تلف كلي للنموذج.

بشكل عام، أثبتت هذه الدراسة فعالية النموذج الفوتوحراري المحضر تحت الشروط المثلى المدروسة في تبخير المياه الراكدة، ورغم تسجيل تراجع مبكر في الأداء إلا أن استقرار النظام في الدورات المتقدمة يؤكد صموده البنيوي وقدرته على الخدمة المتكررة كحل مقبول وصديق للبيئة لتبخير المياه.

افاق مستقبلية لهذا العمل:

- تحسين تركيبة النموذج الفوتوحراري من ناحية العزل بين النظامين السفلي البارد (الماء) والعلوي الساخن (العينة الفوتوحرارية) لحصر الحرارة وعدم ضياعها.
- الحرص على تطوير طرق تثبيت أكثر فعالية لربط جزيئات الكربون بحامل النموذج، وذلك للحد من تلاشيها وضمان استقرارها لفترة أطول.
- تحضير مواد فوتوحرارية ذات كفاءة أعلى و بتكاليف أقل.