الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة الشهيد حمة لخضر الوادي
كلية التكنولوجيا
قسم هندسة الطرائق والبتروكيمياء

مذكرة تخرج

لنيل شهادة ماستر أكاديمي

ميدان: العلوم والتكنولوجيا

شعبة: صناعات بتروكيميائية

تخصص: هندسة بتروكيميائية

إعداد الطلبة:

- صوالح عبد العالي
- قريشي بوبكر
- زمازي بشير

بعنوان :

المعالجة المتكاملة للمياه الملوثة باستخدام مركب أكسيد الزنك النانوي المنتج حيوياً والكربون النشط

أمام لجنة المناقشة :

حشاني صلاح الدين	*رئيس اللجنة*	*جامعة الوادي*
قماري فتحي	*مناقشا*	*جامعة الوادي*
منصر سهيلة	*مشرفا*	*جامعة الوادي*
سالمي شيماء	*مساعد مشرف*	*جامعة الوادي*

الموسم الجامعي: 2025/2026

الإهداء

إلى من وهبتني حياتها لتصنع مني رجلاً... إلى النور الذي لا ينطفئ في دربي، والقلب الذي يفيض بالحب والدعاء... إلى "أمي" الغالية، حفظها الله وأمد في عمرها.

إلى من كان لي خير خلفٍ لخير سلف، وسندي الذي أرتكن إليه كلما مالت بي الأيام... إلى أخي الأكبر، الذي لم يتوانَ يوماً عن تقديم الدعم والتشجيع.

إلى روح والدي الطاهرة، الذي رحل بجسده وبقي أثره يدفعني للنجاح... نم قرير العين، فثمرة غرسك اليوم تُجنى.

إلى من أناروا لنا سبل العلم بفيض عطائهم... الأستاذتين الفاضلتين: "سالمي شيماء" و"منصر سهيلة"، اللتين وجدنا فيهما نِعمَ العون والسند الأكاديمي، فلكما مني كل التقدير والامتنان

إلى رفاق الدرب، وكل من آمن بي يوماً... أهديكم ثمرة هذا الجهد المتواضع.

Korichi boubaker

الإهداء

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَٰنِ الرَّحِيمِ، والصلاة والسلام على أشرف المرسلين

أهدي ثمرة هذا الجهد المتواضع إلى من كان لهما الفضل بعد الله

في كل خطوة خطوتها، إلى والديَّ العزيزين، حفظهما الله، اللذين

غرسا فيَّ حب العلم والاجتهاد، وكانا خير سند وداعم لي طوال مسيرتي الدراسية، وإلى

أفراد عائلتي الكريمة الذين منحوني التشجيع والقوة لمواصلة هذا الطريق

كما أتقدم بخالص الشكر والتقدير إلى أستاذتي المشرفة، التي لم تبخل عليَّ

بتوجيهاتها القيّمة ونصائحها العلمية، وكانت خير داعم ومساند لي طوال

مراحل إنجاز هذه المذكرة، فكان لتشجيعها ومتابعتها المستمرة

أثر كبير في إتمام هذا العمل

وأتوجه كذلك بإهداء خاص إلى أساتذتي الأفاضل الذين أناروا لنا درب العلم

والمعرفة، وإلى كل من ساهم من قريب أو بعيد في إنجاز هذا العمل وقدم لي

الدعم والمساندة خلال مشواري الدراسي، راجيًا من الله تعالى التوفيق والسداد، و

أن يكون هذا العمل نافعًا

ومفيدًا في المجال العلمي

Zemmazi bachir

الإهداء

إلى من أضاءوا دربي بنور العلم والإيمان...

إلى والديَّ الكريمين، سندي في الحياة، ونبع الحنان والدعاء، الذين

غرسوا فيَّ حب المعرفة

وعلَّموني أن أجتهد لأبلغ الدرجات العلى

إلى أسرتي الكريمة، التي أحاطتني بالحب والدعم، ووقفت بجانبي

في كل خطوة.

إلى أساتذتي الكرام، الذين حملوا مشعل العلم، فأناروا لي الطريق، وعلى رأسهم الأستاذة المشرفة " سهيلة منصّر " التي كانت لنا نعم الدليل والمرشد

إلى كل الباحثين في مجال البيتروكيمياء

أهدي هذا العمل المتواضع...

راجين من الله أن يكون نافعاً، ومُضيفاً ولو بصمة صغيرة

إلى المكتبة العربية

Soualah Abdelali

شكر وتقدير

باسم الله الفاتح لكل مغلق، والمنعم بفيض جوده على عباده، والحمد لله الذي جعل العلم نوراً نهتدي به، وسبباً لرفعة الأوطان وعمارة الأرض سبحانه حمداً كثيراً طيباً كما ينبغي لجلال وجهه وعظيم سلطانه، والصلاة والسلام على المبعوث رحمة للعالمين، الذي علمنا أن شكر الناس من شكر الله

بقلوب يملؤها الامتنان، نتقدم بخالص الشكر والتقدير إلى من كانتا لنا القدوة والسند العلمي،

أستاذتينا المشرفتين د. سهيلة منصر و د. شيماء سلمي

على سعة صدرهما، وحكمتهما في التوجيه، ودعمهما الذي لم ينقطع،

فجزاهما الله عنا خير ما يجزي العلماء العاملين

كما نتقدم بأسمى آيات الشكر إلى السادة أعضاء لجنة المناقشة الأفاضل،

على تفضلهم بوقوفهم على ثمرة جهدنا وتقييمها، سائلين الله أن يبارك في علمهم ووقتهم

والشكر موصول إلى منارة العلم، قسم الهندسة البتروكيميائية بجامعة

الشهيد حمة لخضر بالوادي، إدارةً وأساتذة،

على كل ما قدموه لنا من زاد معرفي طيلة سنوات دراستنا

إلى من لولا دعاؤهم لما استقام لنا طريق، ولولا عطفهم لما ذقنا حلاوة النجاح؛ إلى عائلاتنا، والدينا وإخوتنا، الذين

كانوا وما زالوا لنا "السند" والوطن، نهديهم هذا الغرس المتواضع وفاءً وحبّاً

وفي الختام، نسأل الله أن يبارك في هذا العمل، ويجعله خالصاً لوجهه الكريم، ونافعاً لبلادنا وأمتنا

Korichi boubaker , Zemmazi bachir, Soualah Abdelali

ملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تطوير نظام متكامل لمعالجة المياه الملوثة باستخدام مركب نانوي هجين مكوّن من أكسيد الزنك النانوي المحضر حيويًا (ZnO) والكربون النشط .(AC) تم تحضير جسيمات أكسيد الزنك النانوية بطريقة التخليق الأخضر باستعمال مستخلص أوراق نبات الضرو(Pistacia lentiscus) ، ثم دمجها مع الكربون النشط بنسبة وزنية (1:1) للحصول على المركب الهجين .ZnO/AC تم توصيف المواد المحضرة بواسطة تقنيتي حيود الأشعة السينية (XRD) ومطيافية الأشعة تحت الحمراء (FTIR) للتأكد من نجاح التخليق والتركيب.

تم تقييم أداء المواد المحضرة في إزالة الملوثات العضوية من مياه الصرف من خلال قياس الطلب الكيميائي للأكسجين (DCO/COD) عند أزمنة تماس مختلفة (30، 60، و90 دقيقة)، مع متابعة تغيرات الأكسجين المذاب (DO) ودرجة الحرارة. أظهرت النتائج أن المركب الهجين ZnO/AC حقق أعلى كفاءة إزالة للملوثات العضوية بلغت 80% بعد 90 دقيقة، مقارنة بـ 70% لأكسيد الزنك النانوي و60% للكربون النشط. كما بينت نتائج XRD و FTIRنجاح دمج أكسيد الزنك مع الكربون النشط دون التأثير على البنية البلورية للمادة.

تشير النتائج إلى وجود تأثير تآزري بين الامتزاز الذي يوفره الكربون النشط والتحفيز الضوئي الذي يوفره أكسيد الزنك، مما أدى إلى تحسين كفاءة المعالجة وتسريع إزالة الملوثات. وتؤكد هذه الدراسة إمكانية استخدام المركب الهجين ZnO/AC كحل فعال وصديق للبيئة لمعالجة المياه الملوثة.

الكلمات المفتاحية:

أكسيد الزنك النانوي، الكربون النشط، التخليق الأخضر، المركبات النانوية الهجينة، معالجة المياه الملوثة، الطلب الكيميائي للأكسجين، الامتزاز، التحفيز الضوئي.

Résumé

Cette étude vise à développer un système intégré de traitement des eaux polluées à l'aide d'un nanocomposite hybride constitué d'oxyde de zinc nanométrique biosynthétisé (ZnO) et de charbon actif (AC). Les nanoparticules de ZnO ont été préparées par une méthode de synthèse verte utilisant l'extrait de feuilles de *Pistacia lentiscus*, puis associées au charbon actif selon un rapport massique de 1:1 afin d'obtenir le nanocomposite hybride ZnO/AC. Les matériaux obtenus ont été caractérisés par diffraction des rayons X (DRX/XRD) et spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR).

Les performances de matériaux ont été évaluées pour l'élimination des polluants organiques présents dans les eaux usées à travers la réduction de la demande chimique en oxygène (DCO) après 30, 60 et 90 minutes de traitement. L'évolution de l'oxygène dissous (OD) et de la température a également été suivie. Les résultats ont montré que le composite hybride ZnO/AC présente la meilleure efficacité d'élimination, atteignant 80 % après 90 minutes, contre 70 % pour le ZnO et 60 % pour le charbon actif seul. Les analyses DRX et FTIR ont confirmé la réussite de la synthèse et de l'intégration des deux matériaux.

L'amélioration des performances est attribuée à l'effet synergique entre les propriétés d'adsorption du charbon actif et l'activité photocatalytique du ZnO. Cette étude démontre ainsi le potentiel du composite ZnO/AC comme matériau performant, économique et respectueux de l'environnement pour le traitement des eaux polluées.

Mots-clés :

Nanoparticules d'oxyde de zinc, charbon actif, synthèse verte, nanocomposite hybride, traitement des eaux usées, demande chimique en oxygène (DCO), adsorption, photocatalyse.

Abstract

This study aims to develop an integrated water treatment system using a hybrid nanocomposite composed of biosynthesized zinc oxide nanoparticles (ZnO) and activated carbon (AC). ZnO nanoparticles were synthesized through a green route using *Pistacia lentiscus* leaf extract and subsequently combined with activated carbon at a 1:1 weight ratio to produce the ZnO/AC hybrid nanocomposite. The synthesized materials were characterized using X-ray diffraction (XRD) and Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) to confirm their structural and chemical properties.

The treatment performance was evaluated through the removal of organic pollutants from wastewater by monitoring the reduction of Chemical Oxygen Demand (COD) at contact times of 30, 60, and 90 minutes. Dissolved oxygen (DO) and temperature variations were also investigated. The results revealed that the ZnO/AC hybrid composite achieved the highest pollutant removal efficiency, reaching 80% after 90 minutes, compared to 70% for ZnO nanoparticles and 60% for activated carbon alone. XRD and FTIR analyses confirmed the successful synthesis of ZnO and its effective integration with activated carbon.

The enhanced treatment performance is attributed to the synergistic effect between the adsorption capacity of activated carbon and the photocatalytic activity of ZnO nanoparticles. These findings demonstrate that the ZnO/AC hybrid nanocomposite is a promising, environmentally friendly, and cost-effective material for wastewater treatment applications.

Keywords:

Zinc oxide nanoparticles, activated carbon, green synthesis, hybrid nanocomposite, wastewater treatment, chemical oxygen demand (COD), adsorption, photocatalysis.

قائمة الأشكال

الشكل 1.1 : صورة لآلية تلوث المسطحات المائية 5
الشكل 2.1 : يوضح تصنيف مصادر تلوث المياه 6
الشكل 3.1 : صورة محطات معالجة للمياه..... 8
الشكل 4.1 رسم توضيحي لعملية الأكسدة المتقدمة..... 9
الشكل 5.1 يوضح بنية أكسيد الزنك النانوي 10
الشكل 6.1 صورة لتكنلوجيا أنابيب الكربون النانوية 11
الشكل 7.1 تصور وتفاعل المركب النانوي ZnO/الكربون النشط..... 13
الشكل 8.1 : رسم توضيحي لتخليق أكسيد الزنك 14
الشكل 9.1 رسم تخطيطي لعمليات الإمتزاز والترسيب 15
الشكل 1.2: جهاز التحريك المغناطيسي 20
الشكل 2.2: جهاز الموجات فوق الصوتية..... 21
الشكل 3.2 : جهاز الطرد المركزي 21
الشكل 4.2 : جهاز الهضم الحراري (Thermoreactor) 21
الشكل 5.2: جهاز المطياف الضوئي (Spectrophotometer)..... 22
الشكل 6.2 : جهاز حيود الأشعة السينية (XRD)..... 22
الشكل 7.2: جهاز مطيافية الأشعة تحت الحمراء (FTIR) 22
الشكل 8.2: ميزان تحليلي إلكتروني..... 23
الشكل 9.2: مراحل التخليق الأخضر للمركب النانوي 24
الشكل 10.2: تقنية حيود الأشعة السينية (XRD) 25
الشكل 11.2 : الطيف الكهرومغناطيسي 26
الشكل 12.2: عينة من الماء الملوث المستخدم..... 27
الشكل 13.2 : بروتوكول معالجة المياه الملوثة..... 28
الشكل 14.2 : دراسة التأثير الزمني للخلط..... 28
الشكل 15.2: عملية فصل المواد الصلبة..... 29
الشكل 16.2: العينات بعد استخراجها من جهاز الهضم الحراري..... 30
الشكل 1.3 : منحنى يمثل نتائج تحليل DRX لنانو أكسيد الزنك 32
الشكل 2.3 : منحنى يمثل نتائج تحليل DRX للمركب النانوي ZnO@CA 33
الشكل 3.3 : طيف FTIR لجسيمات أكسيد الزنك النانوية (ZnO NP) 34
الشكل 4.3 : طيف FTIR لجسيمات المركب النانوي (ZnO@CA NC)..... 35

الشكل5.3 : تأثير زمن المعالجة على درجة الحرارة باستعمال جسيمات أكسيد الزنك النانوية (*ZnO NP*) 38
الشكل6.3 : تأثير زمن المعالجة على درجة الحرارة باستعمال المركب الهجين (*ZnO@CA NC*) 38
الشكل 7.3 : تأثير زمن المعالجة على تركيز الأكسجين المذاب (DO) باستعمال جسيمات أكسيد الزنك النانوية 40
الشكل 8.3 : تأثير زمن المعالجة على تركيز الأكسجين المذاب (DO) باستعمال المركب الهجين 40

قائمة الجداول

جدول 1.1 مقارنة بين تقنيات المعالجة المختلفة 9
جدول 2.1 ملخص الدراسات السابقة (جداول مقارنة)..... 16
جدول 1.3 : كفاءة إزالة الطلب الكيميائي للأكسجين (DCO)..... 36
جدول 2.3 : تأثير زمن المعالجة على تركيز الأكسجين المذاب (*DO*)..... 37
جدول 3.3 : تطور درجة الحرارة (C°) مع الزمن باستعمال ZnO NP وZnO@CA NC. 39
جدول 4.3: تطور الاكسجين المنحل (%) مع الزمن باستعمال ZnO NP وZnO@CA NC..... 39

قائمة المختصرات

المختصر	التسمية الكاملة باللغة الإنجليزية	التسمية باللغة العربية
AC	Activated Carbon	الكربون النشط
AOPs	Advanced Oxidation Processes	عمليات الأكسدة المتقدمة
CB	Conduction Band	نطاق التوصيل
COD	Chemical Oxygen Demand	الطلب الكيميائي للأكسجين
DCO	Demande Chimique en Oxygène	الطلب الكيميائي للأكسجين
DO	Dissolved Oxygen	الأكسجين المذاب
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy	مطيافية الأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه
JCPDS	Joint Committee on Powder Diffraction Standards	اللجنة المشتركة لمعايير حيود المساحيق
NC	Nanocomposite	مركب نانوي
NP	Nanoparticle	جسيم نانوي
NPs	Nanoparticles	جسيمات نانوية
O_2	Oxygen	الأكسجين
•OH	Hydroxyl Radical	جذر الهيدروكسيل
$•O_2^-$	Superoxide Radical	جذر فوق الأكسيد
UV	Ultraviolet	الأشعة فوق البنفسجية
VB	Valence Band	نطاق التكافؤ
XRD	X-Ray Diffraction	حيود الأشعة السينية

أكسيد الزنك	Zinc Oxide	**ZnO**
جسيمات أكسيد الزنك النانوية	Zinc Oxide Nanoparticles	**ZnO NP**
المركب الهجين أكسيد الزنك/الكربون النشط	Zinc Oxide/Activated Carbon Hybrid Composite	**ZnO/AC**
المركب النانوي أكسيد الزنك المدعم بالكربون النشط	Zinc Oxide@Carbon Activated Nanocomposite	**ZnO@CA NC**
دورة في الدقيقة	Revolutions Per Minute	**rpm**
درجة مئوية	Degree Celsius	**°C**
إلكترون	Electron	**e^-**
فجوة موجبة	Hole	**h^+**
الأس الهيدروجيني	Potential of Hydrogen	**pH**
نبات الضرو	Mastics Tree	**Pistacia lentiscus**

فهرس المحتويات

فهرس المحتويات

ملخص V
Résumé VI
Abstract VII
قائمة الأشكال VIII
قائمة الجداول X
قائمة المختصرات XI
مقدمة 2

الفصل الأول: الإطار النظري

1.1 مقدمة : 5
1.2 تلوث المياه : 5
1.2.1 تعريف تلوث المياه : 5
1.2.2 مصادر تلوث المياه : 6
1.2.3 تصنيف الملوثات المائية : 6
1.2.4 تأثير الملوثات العضوية في البيئة والصحة : 7
1.3 تقنيات معالجة المياه : 7
1.3.1 المعالجة الفيزيائية : 7
1.3.2 المعالجة الكيميائية: 7
1.3.3 المعالجة البيولوجية : 8
1.3.4 تقنيات الأكسدة المتقدمة (AOPs): 8
1.4 المواد النانوية في معالجة المياه : 9
1.4.1 مقدمة حول النانوتكنولوجيا في معالجة المياه : 9
1.4.2 أنواع المواد النانوية المستخدمة: 10
1.4.3 مزايا المواد النانوية مقارنة بالتقنيات التقليدية : 11
1.5 أكسيد الزنك النانوي (ZnO) 11

1.5.1 تعريف وخصائص ZnO النانوي 11
1.5.2 طرق تحضير ZnO النانوي 11
1.5.3 الخصائص الفيزيائية والكيميائية : 12
1.5.3.1 آلية التحفيز الضوئي : 12
1.6 الكربون النشط : 14
1.6.1 تعريف الكربون النشط 14
1.6.2 آلية الامتزاز 14
1.6.2.2 العوامل المؤثرة على الامتزاز 15
1.7 المواد الهجينة (ZnO/AC) 15
1.7.1 تعريف المركبات الهجينة 15
1.7.2 آلية العمل التآزرية 16
1.7.3 مزايا المركب الهجين 16
1.8 الدراسات السابقة 16
1.8.1دراسات حول ZnO 16
1.8.2 دراسات حول الكربون النشط 16
1.8.3 دراسات حول المواد الهجينة 16
1.8.4 تحليل نقدي للدراسات السابقة والفجوة البحثية 17
1.9 إشكالية البحث وأهدافه 17
1.9.1 عرض المشكلة البحثية 17
1.9.2 أهداف الدراسة 17
1.10 خاتمة 17

الفصل الثاني: المواد وطرق العمل

2.1 مقدمة 20
2.2 المواد الكيميائية 20
2.3 الأجهزة المستخدمة 20
2.4 التحضير الأخضر لجسيمات أكسيد الزنك النانوية (ZnO NPs) 23
2.4.1 تحضير المستخلص النباتي 23
2.4.2 تخليق جسيمات أكسيد الزنك النانوية 23
2.5 تحضير المركب النانوي الهجينZnO/AC 24
2.6 توصيف المواد المحضرة 25
2.6.1 تحليل حيود الأشعة السينية (XRD) 25

2.6.2 تحليل مطيافية الأشعة تحت الحمراء (FTIR) 25
2.7 تحضير عينات المياه الملوثة 26
2.7.1 بروتوكول معالجة المياه الملوثة 27
2.8 فصل المواد الصلبة 29
2.9 قياس الطلب الكيميائي للأكسجين(DCO) 29
2.10 التحليل الإحصائي 30

الفصل الثالث:تحليل ومناقشة النتائج

3.1 تحليل حيود الأشعة السينية (XRD) 32
3.1.1 تحليل جسيمات أكسيد الزنك النانوية (ZnO NP) 32
3.1.2 تحليل المركب النانوي (ZnO@CA NC) 32
3.1.3 الاستنتاج البنيوي 33
3.2 تحليل مطيافية الأشعة تحت الحمراء وتحويل فورييه (FTIR) 34
3.2.1 تحليل جسيمات أكسيد الزنك النانوية (ZnO NP) 34
3.2.2 تحليل المركب النانوي (ZnO@CA NC) 35
3.2.3 الاستنتاج العام 35
3.3 نتائج كفاءة إزالة DCO 36
3.4 نتائج الأكسجين المذاب (DO) 37
3.5 دراسة تأثير الزمن على درجة الحرارة 37
3.6 دراسة تأثير الزمن على الأكسجين المنحل O2 39
3.7 تحليل منحنى جسيمات ZnO NP : 40
3.8 تحليل منحنى جسيمات ZnO@CA NP : 40
3.9 خاتمة الفصل 41

خاتمة 42

قائمة المراجع 45

مقدمة

مقدمة

يُعد الماء سر الحياة ومقوماً أساسياً لاستمرارية النظم البيئية والتنمية البشرية، إلا أن هذا المورد الحيوي يتعرض لضغوط متزايدة نتيجة التوسع العمراني والنهضة الصناعية والزراعة المكثفة، مما أدى إلى تصاعد كميات الملوثات العضوية وغير العضوية المطرحة في المسطحات المائية [1] من أخطر هذه الملوثات تلك العضوية المقاومة للتحلل (Recalcitrant Organic Pollutants) والتي لا تتكسر بسهولة عبر العمليات البيولوجية التقليدية، وتستمر في البيئة لفترات طويلة مسببة أضراراً صحية وبيئية جسيمة.

لذلك، بات البحث عن تقنيات معالجة فعالة وصديقة للبيئة ضرورة ملحة. تتراوح التقنيات المستخدمة بين الفيزيائية (كالترسيب والامتزاز) والكيميائية (كالأكسدة المتقدمة) والبيولوجية، ولكن لكل منها محدوديات. فالكربون المنشط (Activated Carbon) – رغم قدرته الامتزازية العالية – لا يحلل الملوثات بل ينقلها من طور إلى آخر، بينما تعاني عمليات الأكسدة المتقدمة (AOPs) من استهلاك عالٍ للطاقة وتكاليف تشغيلية مرتفعة[2].

في هذا السياق، برزت تكنولوجيا النانو كحل واعد، حيث تتيح المواد النانوية – وبخاصة أكسيد الزنك (ZnO) – خصائص فريدة كالمساحة النوعية الهائلة والنشاط التحفيزي الضوئي تحت الأشعة فوق البنفسجية والمرئية[3]. إلا أن العيب الرئيسي لـ ZnO هو سرعة إعادة اتحاد الشحنات (Electron-Hole Recombination) مما يحد من كفاءته العملية. للتغلب على هذا العائق، اتجهت الأبحاث الحديثة إلى تصنيع مواد هجينة (Hybrid Composites) تدمج بين قدرة ZnO التحفيزية وقدرة الكربون المنشط الامتزازية والتوصيلية، مما يخلق تأثيراً تآزرياً (Synergistic Effect) يحسن الأداء ويقلل زمن المعالجة [4].

علاوة على ذلك، تسعى مبادئ الكيمياء الخضراء (Green Chemistry) إلى تطوير طرق تخليق للمواد النانوية تعتمد على مستخلصات نباتية بدلاً من المواد الكيميائية السامة والمكلفة. وقد أثبتت دراسات حديثة إمكانية استخدام مستخلص أوراق نبات الضرو (Pistacia lentiscus) – وهو نبات متوسطي شائع – كعامل مختزل ومثبت لتحضير جسيمات ZnO النانوية بطريقة آمنة بيئياً [5].

إشكالية البحث:

على الرغم من الجهود السابقة، لا تزال هناك فجوة بحثية تتمثل في: (1) ندرة الدراسات التي تستخدم ZnO المُحضر حيوياً مع الكربون المنشط التجاري لمعالجة مياه صرف حقيقية أو اصطناعية متعددة المكونات (وليست ملوثاً نموذجياً واحداً)، (2) ضعف المعلومات حول كفاءة هذه المواد الهجينة في خفض

الطلب الكيميائي للأكسجين (COD) خلال أزمنة معالجة قصيرة (≤ 90 دقيقة)، (3) عدم مقارنة الأداء مع كل من المكونات منفردة تحت نفس الظروف.

أهداف الدراسة:

لذا، تهدف هذه المذكرة إلى:

1. تحضير جسيمات ZnO النانوية بطريقة خضراء باستخدام مستخلص أوراق نبات الضرو (Pistacia lentiscus).

2. تحضير المركب الهجين ZnO/AC بنسبة وزنية (50:50).

3. مقارنة كفاءة كل من: الكربون المنشط التجاري (AC)، وأكسيد الزنك النانوي المُحضر حيوياً (ZnO)، والمركب الهجين (ZnO/AC) في إزالة الملوثات العضوية من مياه الصرف الاصطناعية (مقاسة بانخفاض COD) عند أزمنة 30، 60، 90 دقيقة.

4. دراسة تأثير المعالجة على الأكسجين المذاب (DO) ودرجة الحرارة لربطها بالكفاءة.

أهمية البحث:

يكتسب هذا البحث أهميته من كونه يقدم حلاً معالجياً منخفض التكلفة وصديقاً للبيئة، معتمداً على مواد محلية (نبات الضرو) وتقنية هجينة تدمج بين الامتزاز والحفز الضوئي، مما قد يسهم في تطوير أنظمة معالجة أولية سريعة وفعالة لمياه الصرف الصناعي والبلدي قبل تصريفها أو إعادة استخدامها.

هيكلية الدراسة:

تتضمن هذه الدراسة ثلاثة فصول رئيسية: الفصل الأول (الإطار النظري) يغطي تلوث المياه، تقنيات المعالجة، النانوتكنولوجيا، والمركبات الهجينة. الفصل الثاني (المواد والطرق) يشرح بالتفصيل منهجية التخليق الأخضر، تحضير المركب، التصميم التجريبي، وأجهزة القياس. الفصل الثالث (التحاليل ومناقشة النتائج) يعرض جداول ومنحنيات كفاءة الإزالة، قياسات DO ودرجة الحرارة، ونتائج XRD و FTIR. يحلل النتائج ويقارنها بالدراسات السابقة، ويختتم بالخلاصة والتوصيات

الفصل الأول: الإطار النظري

1.1 مقدمة :

يُعد تلوث المياه من أبرز المشكلات البيئية التي تواجه العالم في الوقت الحاضر، نتيجة التوسع الصناعي والزراعي والسكاني المتزايد، وما يرافقه من طرح كميات كبيرة من الملوثات في الموارد المائية. وقد أدى ذلك إلى تدهور جودة المياه وتهديد صحة الإنسان والكائنات الحية، مما استدعى تطوير تقنيات فعالة ومستدامة لمعالجة المياه الملوثة.

وفي هذا الإطار، برزت المواد النانوية كأحد الحلول الواعدة بفضل خصائصها الفيزيائية والكيميائية الفريدة، خاصة أكسيد الزنك النانوي (ZnO) الذي يتميز بنشاطه التحفيزي الضوئي وقدرته على تفكيك الملوثات العضوية. كما يُعد الكربون النشط من أكثر المواد استخداماً في مجال معالجة المياه نظراً لمساحته السطحية الكبيرة وكفاءته العالية في الامتزاز. ومن هنا ظهرت أهمية تطوير المواد الهجينة التي تجمع بين مزايا المادتين بهدف تحسين كفاءة المعالجة.

يتناول هذا الفصل الإطار النظري للدراسة، حيث يستعرض مفاهيم تلوث المياه ومصادره وتأثيراته، وأهم تقنيات المعالجة التقليدية والحديثة، مع التركيز على تطبيقات المواد النانوية في معالجة المياه، وخصائص أكسيد الزنك النانوي والكربون النشط، إضافة إلى المركبات الهجينة المبنية عليهما والدراسات السابقة ذات الصلة بموضوع البحث.

1.2 تلوث المياه :

1.2.1 تعريف تلوث المياه :

يُعد تلوث المياه من أخطر التحديات البيئية التي تواجه العالم اليوم، خاصة مع تزايد الأنشطة الصناعية والزراعية والحضرية التي تطرح كميات هائلة من الملوثات العضوية وغير العضوية إلى المسطحات المائية. من بين هذه الملوثات، تأتي المواد العضوية القابلة للتحلل ومقاومة التحلل على رأس القائمة من حيث التأثير الضار في صحة الإنسان والنظم البيئية[6].



الشكل 1.1 *: صورة لآلية تلوث المسطحات المائية*

1.2.2 مصادر تلوث المياه :

تتعدد مصادر تلوث المياه، وتشمل [7] :

- ✓ مياه الصرف الصحي
- ✓ المخلفات الصناعية
- ✓ الجريان السطحي الزراعي
- ✓ التسربات النفطية
- ✓ النفايات الصلبة



الشكل 1.2 : *يوضح تصنيف مصادر تلوث المياه*

1.2.3 تصنيف الملوثات المائية :

تُصنَّف مصادر التلوث المائي إلى عدة فئات رئيسية، أبرزها:

1. التلوث الناجم عن الأنشطة الزراعية، والذي يشمل المبيدات الحشرية والأسمدة الكيميائية المتسربة إلى المجاري المائية[8].

2. تلوث مياه الصرف الصحي والصرف الصناعي، حيث تُعتبر هذه المصادر من أبرز الملوثات التي تحمل الملوثات العضوية والميكروبية والكيميائية [9].

3. التلوث النفطي، الذي يشكل تحديًا بيئيًا كبيرًا على المستوى العالمي [10].

أما الملوثات العضوية الرئيسية في المياه، فتشمل العديد من المركبات الخطرة، أبرزها:

· المبيدات الحشرية ومبيدات الأعشاب الضارة.

· المركبات الصيدلانية.

· المواد البتروكيميائية.

· مخلفات الصناعات المختلفة[7].

وتعمل هذه الملوثات على تراكم التركيز داخل الكائنات المائية عبر عملية التوازن البيئي، مما يُضاعف خطورتها على السلسلة الغذائية بأكملها. وقد أشارت الدراسات إلى أن الملوثات العضوية يمكن أن تتراكم في أنسجة الحيوانات المائية وتزداد تركيزًا عبر السلسلة الغذائية، مما يجعلها سامة لجميع أشكال الحياة[11].

من المنظور المنهجي الحديث، تم تقسيم مصادر التلوث إلى:

· مصادر نقطية (مثل أنبوب تصريف محدد).

· مصادر غير نقطية (منتشرة).

حيث أظهرت الدراسات أن المصادر غير النقطية الحضرية تُعد المصدر الرئيسي للملوثات العضوية والكيميائية والأمونياكية[12].

تصنف الملوثات المائية إلى: فيزيائية (مواد صلبة عالقة، حرارة)، وكيميائية (معادن ثقيلة، مواد عضوية، مغذيات)، وبيولوجية (بكتيريا، فيروسات، طفيليات).

1.2.4 تأثير الملوثات العضوية في البيئة والصحة :

تشكل الملوثات العضوية خطراً كبيراً على الكائنات المائية والإنسان، حيث ترتبط بالاضطرابات الهرمونية والسرطانية[6].

1.3 تقنيات معالجة المياه :

1.3.1 المعالجة الفيزيائية :

تشمل الترسيب، الترشيح، والامتزاز. كفاءتها متوسطة وتكلفتها منخفضة، وتناسب إزالة المواد العالقة[13].

1.3.2 المعالجة الكيميائية:

مثل الترسيب الكيميائي، والأكسدة الكيميائية. كفاءتها متوسطة إلى عالية، لكنها قد تنتج ملوثات ثانوية[14].

1.3.3 المعالجة البيولوجية :

فعالة في إزالة المواد العضوية القابلة للتحلل، بتكلفة منخفضة ولكنها تحتاج زمناً طويلاً[15].



الشكل 1.3 : *صورة محطات معالجة للمياه*

1.3.4 تقنيات الأكسدة المتقدمة (AOPs):

تعتمد على توليد جذور هيدروكسيل OH عالية التفاعل لأكسدة معظم الملوثات العضوية المقاومة. للتحلل الحيوي[16].

من أهم تقنيات الأكسدة المتقدمة: تحفيز الأوزون، وH_2O/O_2، والأشعة فوق البنفسجية مع بيروكسيد الهيدروجين، والمعالجة بالبلازما الباردة، والأكسدة اللكهروحفز ية[20].وتعمل هذه التقنيات على توليد جذور هيدروكسيل قو ية مؤكسدة تُحلل الملوثات العضو ية المعقدة إلى ثاني أكسيد اللكربون والماء.

تتميز تقنيات الأكسدة المتقدمة بعدة مزايا جوهرية: قدرتها على تحلل مجموعة واسعة من الملوثات العضوية دون إضافة مواد كيميائية ضارة، وإمكانية دمجها مع تقنيات أخرى لتكوين أنظمة معالجة هجينة فعالة، وفعاليتها في إزالة المركبات المقاومة للتحلل البيولوجي[17]. ويمكن تطبيق هذه التقنيات في معالجة مياه الشرب ومعالجة مياه الصرف الصحي وإعادة استخدام المياه ومعالجة المخلفات السائلة[18].

* تعمل هذه التقنيات على توليد جذور هيدروكسيل قوية مؤكسدة تُحلل الملوثات العضوية المعقدة إلى ثاني أكسيد الكربون والماء[19].تتميز تقنيات الأكسدة المتقدمة بقدرتها على معالجة مجموعة واسعة من الملوثات العضوية، وإمكانية دمجها مع تقنيات أخرى لتكوين أنظمة معالجة هجينة فعالة، وفعاليتها العالية في إزالة المركبات المقاومة للتحلل البيولوجي[20] [19].ويمكن تطبيق هذه التقنيات في معالجة مياه الشرب، ومعالجة مياه الصرف الصحي، وإعادة استخدام المياه، ومعالجة المخلفات السائلة[21] [22].



الشكل 1.4 *رسم توضيحي لعملية الأكسدة المتقدمة*

جدول 1.1 *مقارنة بين تقنيات المعالجة المختلفة*

التقنية	الكفاءة	التكلفة	ملاحظات
فيزيائية	متوسطة	منخفضة	للمواد العالقة
كيميائية	متوسطة–عالية	متوسطة	ملوثات ثانوية
بيولوجية	عالية (للعضوية القابلة للتحلل)	منخفضة	زمن طويل
AOPs (عمليات الأكسدة المتقدمة)	عالية جداً	مرتفعة	استهلاك طاقة

1.4 المواد النانوية في معالجة المياه :

1.4.1 مقدمة حول النانوتكنولوجيا في معالجة المياه :

تُعرَّف المواد النانوية بأنها مواد يقل بُعدها عن 100 نانومتر في اتجاه واحد على الأقل، وتتميز بمساحة سطحية نوعية هائلة ونشاط تحفيزي مرتفع، مما يمنحها خصائص فيزيائية وكيميائية فريدة مقارنة بنظيراتها ذات الحجم الأكبر. نتيجة لهذه الخصائص، تُستخدم المواد النانوية على نطاق واسع في تطبيقات معالجة المياه، حيث تعمل كمحفزات ضوئية (Photocatalysts)، ومواد مازة (Adsorbents)، ومكونات رئيسية في أغشية الترشيح فائقة الكفاءة (Membranes]. إن قدرتها العالية على إزالة الملوثات العضوية واللاعضوية ومسببات الأمراض تجعلها تقنية واعدة لمواجهة تحديات ندرة المياه وتلوثها .



الشكل 1.5 *يوضح بنية أكسيد الزنك النانوي*

1.4.2 أنواع المواد النانوية المستخدمة:

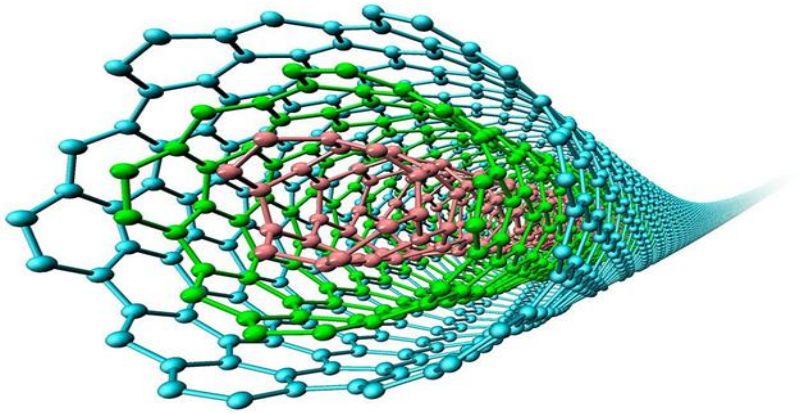
تتنوع المواد النانوية المستخدمة في معالجة المياه، ولكل نوع خصائصه الفريدة التي تجعله مناسبًا لتطبيقات محددة:

· **أشباه الموصلات (Semiconductors):** تُستخدم كعوامل تحفيز ضوئي فعالة، ومن أبرزها TiO_2، ZnO، Fe_2O_3، SnO_2. تعمل هذه المواد على توليد أنواع أكسجين نشطة تحت تأثير الضوء، مما يؤدي إلى تحليل الملوثات العضوية.

· **أكاسيد معدنية نانوية (Metal Oxide Nanoparticles):** مثل Fe_3O_4 (مغناطيسي)، الذي يتميز بقابلية استعادته بسهولة من المحاليل المائية باستخدام مجال مغناطيسي بعد عملية الامتزاز.

· **أنابيب كربون نانوية (Carbon Nanotubes, CNTs) وجرافين (Graphene):** تتميز بمساحة سطحية عالية جدًا، وثبات كيميائي ممتاز، وقوة ميكانيكية فائقة، مما يجعلها مثالية لعمليات الامتزاز، والتحفيز الضوئي، والترشيح الغشائي.

· **جسيمات فضة وذهب نانوية (Silver & Gold Nanoparticles):** تمتاز بخصائص مضادة للميكروبات قوية، حيث تُظهر جسيمات الفضة النانوية فعالية عالية ضد البكتيريا (سواء موجبة أو سالبة الجرام)، بينما تستخدم جسيمات الذهب في التحفيز الكيميائي وإزالة بعض الملوثات السامة.



الشكل 1.6 صورة لتكنلوجيا أنابيب الكربون النانوية

1.4.3 مزايا المواد النانوية مقارنة بالتقنيات التقليدية :

مساحة سطحية عالية، نشاط تحفيزي مرتفع، إمكانية تعديل السطح كيميائياً، العمل تحت ظروف معتدلة،ممايقلل من استهلاك الطاقة كما تتميز بقابلية عالية للإنتقائية في إزالة الملوثات وكفاءة معالجة متفوقة مقارنة بالطرق التقليدية.

1.5 أكسيد الزنك النانوي (ZnO)

1.5.1 تعريف وخصائص ZnO النانوي

أكسيد الزنك النانوي هو مركب كيميائي صيغته ZnO، يتميز بخصائص فريدة عندما يكون بحجم النانومتر. فجوة طاقته 3.37 eV، وهو أحد المحفزات الضوئية الأكثر شيوعاً، يتصف بثباته الكيميائي، تكلفته المنخفضة، ونشاطه تحت الأشعة فوق البنفسجية وبعض الضوء المرئي [9].

1.5.2 طرق تحضير ZnO النانوي

تتنوع طرق تحضير جسيمات أكسيد الزنك النانوية وتصنف بشكل عام إلى ثلاث فئات رئيسية:

1.5.2.1 الطرق الكيميائية (Chemical Methods):

تُعد أكثر الطرق شيوعًا واستخدامًا، وتشمل:

- **طريقة هلام الموائع (Sol-Gel):** تعتمد على التحلل المائي والتكثيف لمحاليل السلائف، وتعطي تحكمًا دقيقًا بحجم الجسيمات وانتظامها .
- **طاقةالترسيب الكيميائي (Co-precipitation):** طريقة بسيطة ومنخفضة التكلفة، وتتم بإضافة عامل مرسب إلى محلول الملح المعدني.
- **الطريقة الحرارية المائية (Hydrothermal):** تجري التفاعلات في درجات حرارة مرتفعة تحت ضغط مرتفع، مما ينتج جسيمات ذات بلورية عالية.

- **الترسيب الكيميائي للبخار (Chemical Vapor Deposition - CVD)**: لإنتاج أغشية رقيقة نانوية بجودة عالية.

1.5.2.2 الطرق الفيزيائية (Physical Methods):

تعتمد على عمليات فيزيائية لتفتيت أو تبخير الزنك:

- التبخير الحراري والتبخير بالليزر (Thermal Evaporation, Laser Ablation).
- الطحن عالي الطاقة (Ball Milling).
- الترسيب الفيزيائي للبخار (Physical Vapor Deposition - PVD).

تعتبر هذه الطرق نظيفة نسبيًا، لكنها غالبًا ما تحتاج أجهزة معقدة ومكلفة واستهلاك عالٍ للطاقة.

1.5.2.3 الطرق البيولوجية (Biological / Green Synthesis):

تُعرف أيضًا بـ التخليق الأخضر (Green Synthesis)، وهي طريقة حديثة وصديقة للبيئة تستخدم مستخلصات نباتية (أوراق، ثمار، لحاء)، أو كائنات دقيقة مثل البكتيريا والفطريات لتقليل أيونات الزنك وتثبيت الجسيمات الناتجة. وتتميز هذه الطريقة بـ:

- **كونها صديقة للبيئة:** لا تستخدم مواد كيميائية سامة أو ظروف قاسية.
- **اقتصادية:** تعتبر منخفضة التكلفة ومتاحة .
- **إنتاج جسيمات نشطة بيولوجيًا:** تتمتع بتوافق حيوي أفضل ونشاط مضاد للميكروبات محسن.

1.5.3 الخصائص الفيزيائية والكيميائية :

أكسيد الزنك النانوي هو مركب كيميائي صيغته ZnO، يتميز بخصائص فريدة عندما يكون بحجم النانومتر. يُعد من أشهر المواد التحفيزية الضوئية المستخدمة في معالجة المياه الملوثة، نظراً لفعاليته واستقراره. أظهرت الدراسات أن جسيمات أكسيد الزنك النانوية المُصنَّعة بطريقة الترسيب المشترك لها إمكانات كبيرة كعامل مضاد للجراثيم ومحفز ضوئي لتنقية المياه.

1.5.3.1 آلية التحفيز الضوئي :

يعتمد أكسيد الزنك النانوي (ZnO) على ظاهرة التحفيز الضوئي (Photocatalysis) لإزالة الملوثات العضوية من المياه. فعند تعريض جسيمات ZnO لضوء ذي طاقة مساوية أو أكبر من فجوة الطاقة الخاصة به(3.37 eV) ، تنتقل الإلكترونات من نطاق التكافؤ (Valence Band, VB) إلى نطاق التوصيل(Conduction Band, CB) ، مما يؤدي إلى تكوين أزواج من الإلكترونات والفجوات الموجبة.(e^-/h^+)

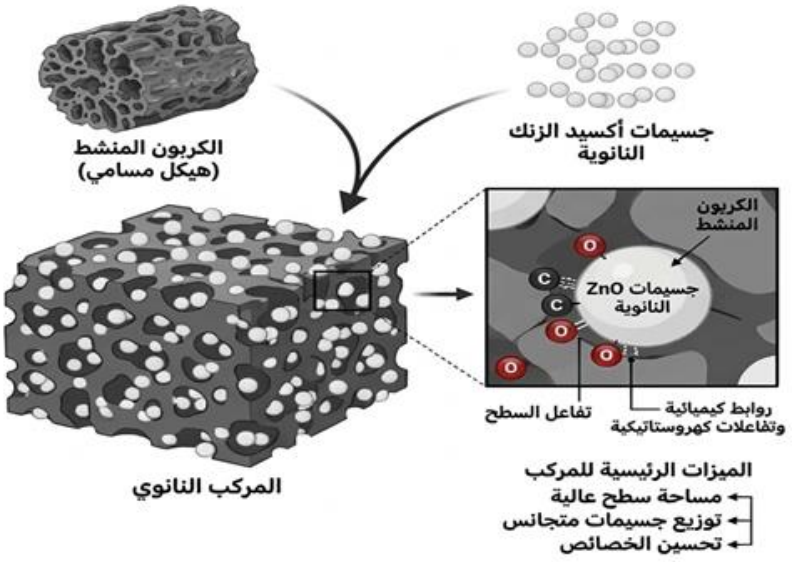
تتفاعل الإلكترونات المثارة (e^-) مع جزيئات الأكسجين المذاب في الماء لتكوين جذور فوق الأكسيد(O_2^{-}•) ، بينما تتفاعل الفجوات الموجبة (h^+) مع جزيئات الماء أو أيونات الهيدروكسيد (OH^-) لتكوين جذور الهيدروكسيل .(•OH) وتُعد هذه

الجذور من أقوى العوامل المؤكسدة، حيث تقوم بمهاجمة الملوثات العضوية وتحليلها تدريجياً إلى مركبات أبسط مثل ثاني أكسيد الكربون (CO_2) والماء.(H_2O)

يمكن تلخيص آلية التحفيز الضوئي بالتفاعلات التالية :

- $ZnO + h\nu \rightarrow e^- + h^+$
- $e^- + O_2 \rightarrow \bullet O_2^-$
- $h^+ + H_2O \rightarrow \bullet OH + H^+$
- $OH + Pollutants \rightarrow CO_2 + H_2O + Mineralized\ Products$

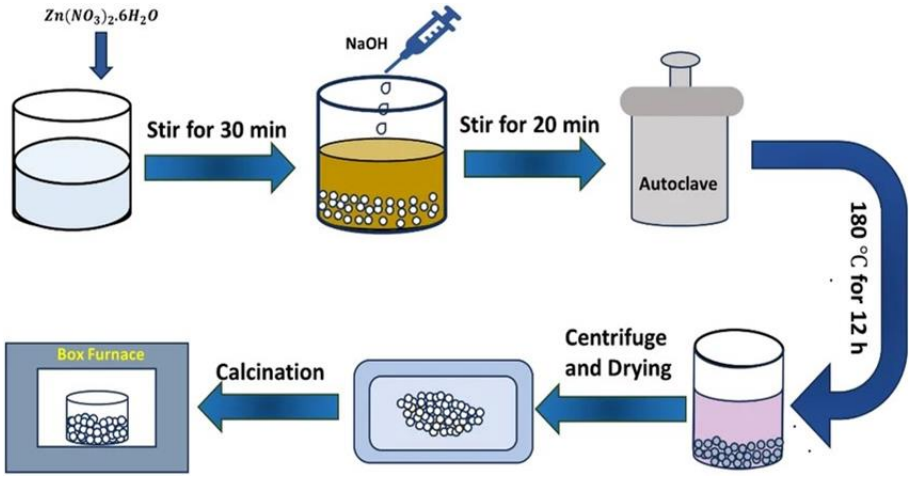
إلا أن كفاءة التحفيز الضوئي قد تنخفض بسبب إعادة اتحاد الإلكترونات والفجوات الموجبة، مما يؤدي إلى فقدان جزء من الطاقة المكتسبة. لذلك يُستخدم الكربون النشط مع أكسيد الزنك في المركبات الهجينة(ZnO/AC) ، حيث يعمل الكربون كمستقبل للإلكترونات، فيحد من إعادة الاتحاد ويزيد من إنتاج الجذور النشطة، وبالتالي يرفع كفاءة إزالة الملوثات العضوية من المياه.



الشكل 1.7 *تصور وتفاعل المركب النانوي* **ZnO**/*الكربون النشط*

1.5.3.2 العوامل المؤثرة على الأداء :

تشمل: pH، التركيز الأولي للملوث، شدة الإضاءة، كمية المحفز، وزمن التعريض.



الشكل 1.8 : *رسم توضيحي لتخليق أكسيد الزنك*

1.5.3.3 تطبيقات ZnO في معالجة المياه :

يستخدم في إزالة الملوثات العضوية، الأصباغ، والمركبات الصيدلانية، بالإضافة إلى خاصيته المضادة للميكروبات

1.6 الكربون النشط :

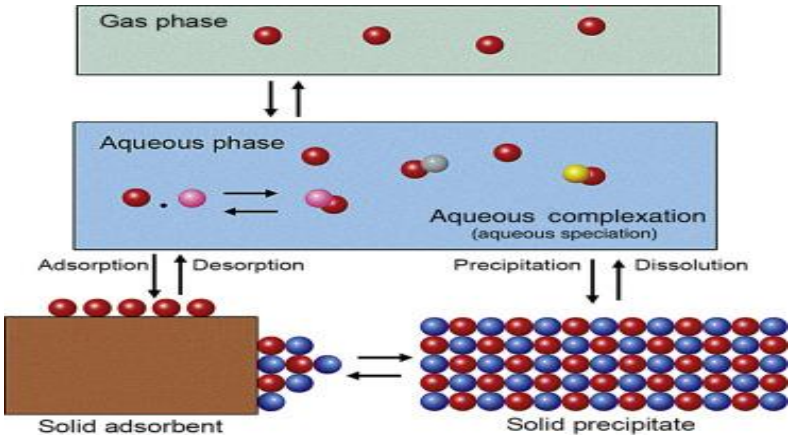
1.6.1 تعريف الكربون النشط

الكربون النشط هو شكل من أشكال الكربون ذي المسامية العالية جداً، يُنتَج عن طريق تنشيط الكربون عند درجات حرارة عالية في وجود عوامل التنشيط. يتميز بمساحة سطحية كبيرة تتراوح بين 500–2000 م²/غ، مما يمنحه قدرة امتزاز استثنائية للملوثات العضوية.

يُعرَّف الكربون النشط البودري بأنه الشكل الحبيبي للكربون النشط، بحجم جسيمات يتراوح 10–100 ميكرومتر. يُستخدم مباشرة في معالجة المياه بإضافته إلى الماء، حيث يمتص الملوثات ثم يُفصل عن طريق الترشيح أو الترسيب.

1.6.2 آلية الامتزاز

تعتمد آلية إزالة الملوثات العضوية بالكربون النشط البودري على عملية الامتزاز الفيزيائي والكيميائي[3]. ففي الامتزاز الفيزيائي، ترتبط الجزيئات العضوية بسطح الكربون عبر قوى فان دير فالس الضعيفة، بينما في الامتزاز الكيميائي تحدث تفاعلات كيميائية بين المجموعات الوظيفية على سطح الكربون والملوثات.



الشكل 1.9 *رسم تخطيطي لعمليات الإمتزاز والترسيب*

1.6.2.1 أنواع آلية الامتزاز

· فيزيائية (قوى فان دير فالس، تنفس)

· كيميائية (روابط هيدروجينية، تفاعلات π-π)

· تعتمد على المساحة السطحية والمجموعات الوظيفية [23].

1.6.2.2 العوامل المؤثرة على الامتزاز

تتأثر كفاءة امتزاز الكربون النشط البودري بعدة عوامل رئيسية:

- درجة الحموضة (pH) حيث يكون الامتزاز أسهل في الظروف الحمضية.
- درجة الحرارة حيث تنخفض كفاءة الامتزاز مع ارتفاع درجة الحرارة[24].
- التركيز الأولي للملوث.
- وقت التعرض حيث يتطلب وقتاً كافياً لتحقيق التوازن.
- مساحة السطح الكلية وحجم المسامات.

أظهرت الدراسات أن الكربون النشط البودري فعال في إزالة مجموعة واسعة من الملوثات العضوية الدقيقة، بما فيها الأصباغ والمركبات الصيدلانية والمبيدات الحشرية. وقد تم توثيق كفاءة إزالة تصل إلى 95% للملوثات العضوية تحت ظروف تشغيل مثالية.

1.7 المواد الهجينة (ZnO/AC)

1.7.1 تعريف المركبات الهجينة

تجمع المركبات الهجينة بين قدرة امتزاز الكربون ونشاط ZnO التحفيزي الضوئي في مادة واحدة، لتحقيق تأثير تآزري.

1.7.2 آلية العمل التآزرية

· امتزاز سريع للملوثات على الكربون قرب جسيمات ZnO.

· **تقليل إعادة اتحاد الشحنات:** الكربون يستقبل الإلكترونات، فيطول عمر الفجوات الموجبة.

· تجديد مواقع الامتزاز بأكسدة الملوثات [25] [4].

1.7.3 مزايا المركب الهجين

كفاءة أعلى، سرعة أكبر، إمكانية إعادة الاستخدام، عمل تحت ضوء مرئي محسن.

1.8 الدراسات السابقة

1.8.1دراسات حول ZnO

أظهرت الدراسات أن ZnO النانوي يحقق كفاءة تحفيز ضوئي جيدة، لكن سرعة إعادة اتحاد الشحنات تحد من أدائه.

1.8.2 دراسات حول الكربون النشط

الكربون النشط فعال في إزالة الملوثات العضوية لكنه لا يحللها ويصعب فصله [2] [26].

1.8.3 دراسات حول المواد الهجينة

- **دراسة رائدة:** تم تطوير نوع جديد من المواد الهجينة الكربون/ZnO التي تمتلك خصائص امتزاز وتحلل ضوئي معاً، وتم الحصول عليها بخطوات تصنيع متتالية تجمع بين خصائص المكونين.
- **دراسة حول التأثير التآزري:** أظهرت دراسة حديثة أن المزج الكيميائي بين الكربون النشط وأكسيد الزنك باستخدام حمض الفوسفوريك كعامل تنشيط يُقدم حلاً فعالاً لمعالجة المياه، وأظهرت النتائج التجريبية تحسناً ملحوظاً في امتزاز الفينول بواسطة المركب AC/ZnO مع إزالة 100%.
- **دراسات حول أكاسيد المعادن والكربون النشط:** في دراسة حول تأثير جسيمات SnO_2-ZnO النانوية على الكربون النشط، أشارت النتائج إلى وجود تأثير تآزري لتثبيت أكاسيد المعادن النانوية على الكربون النشط في التحلل الضوئي المحفَّز للمركبات العضوية. كما أظهرت دراسة أخرى حول المركبات النانوية الهجينة ZnO-biochar أن تقنية المركب الضوئي ZnO أثبتت فعاليتها في إزالة الملوثات العضوية من المياه.

***جدول 1.2** ملخص الدراسات السابقة (جداول مقارنة)*

الدراسة	المركب	النتيجة

Salah (2024)	AC/ZnO	كفاءة إزالة 100% للفينول تحت ظروف مثالية
Obayomi (2024)	ZnO@GAC	كفاءة تحفيز ضوئي 82–97% تحت UV-A و UV-C خلال 120 دقيقة
Sobana (2013)	AC-ZnO	كفاءة محدَّشة بنسبة 20–30% مقارنة بأكسيد الزنك وحده في التحلل الضوئي لصبغة Direct Blue 53
Sharma (2025)	ZnO-2CCAC/ZrO	كفاءة إزالة عالية جداً للملوثات العضوية في التفاعل المائي

1.8.4 تحليل نقدي للدراسات السابقة والفجوة البحثية

معظم الدراسات السابقة استخدمت طرقاً كيميائية لتحضير ZnO، أو ركزت على ملوثات نموذجية (فينول، ألوان) وليس مياه صرف حقيقية. دراسات المقارنة المباشرة بين AC التجاري، ZnO الحيوي، ومركبهما في الحالة البودرية على مياه صرف حقيقية باستخدام DCO كمعيار رئيسي لا تزال محدودة، وهذا ما تسدّه الدراسة الحالية

1.9 إشكالية البحث وأهدافه

1.9.1 عرض المشكلة البحثية

تلوث المياه بالمواد العضوية المقاومة للتحلل يمثل تحدياً بيئياً كبيراً. التقنيات التقليدية إما غير فعالة أو مكلفة. المواد النانوية مثل ZnO تقدم حلاً واعداً، لكنها تحتاج إلى دعم لتحسين أدائها.

1.9.2 أهداف الدراسة

- تحضير جسيمات ZnO النانوية بطريقة خضراء باستخدام مستخلص أوراق نبات الضرو (Pistacia lentiscus).
- تحضير المركب الهجين ZnO/AC بنسبة (50:50).
- مقارنة كفاءة ZnO، AC، و ZnO/AC في إزالة الملوثات العضوية من مياه الصرف (مقاسة بالطلب الكيميائي للأكسجين DCO) عند أزمنة 30، 60، 90 دقيقة.
- دراسة تأثير المعالجة في الأكسجين المذاب (DO) ودرجة الحرارة.

1.10 خاتمة

من خلال ما تم عرضه في هذا الفصل، يتضح أن تلوث المياه يمثل أحد أبرز التحديات البيئية المعاصرة نتيجة الزيادة المستمرة في طرح الملوثات العضوية وغير العضوية في الأوساط المائية، الأمر الذي يستدعي البحث عن تقنيات معالجة فعالة

ومستدامة. وقد تم استعراض أهم مصادر تلوث المياه وآثاره البيئية والصحية، بالإضافة إلى مختلف تقنيات المعالجة التقليدية والحديثة المستخدمة للحد من هذه المشكلة.

كما تناول هذا الفصل دور المواد النانوية في معالجة المياه، مع التركيز على أكسيد الزنك النانوي (ZnO) لما يتميز به من خصائص تحفيزية ضوئية عالية، والكربون النشط (AC) المعروف بقدرته الكبيرة على الامتزاز. وقد أظهرت الدراسات السابقة أن الجمع بين هاتين المادتين في مركب هجين يمكن أن يؤدي إلى تحسين كفاءة إزالة الملوثات بفضل التأثير التآزري بين الامتزاز والتحفيز الضوئي.

وبناءً على هذه المعطيات النظرية، تأتي هذه الدراسة لتقييم فعالية المركب الهجين ZnO/AC المحضر بطريقة صديقة للبيئة في معالجة المياه الملوثة وإزالة الملوثات العضوية. وفي الفصل الموالي سيتم عرض المواد المستعملة والمنهجية التجريبية المتبعة لتحضير المواد المدروسة وتقييم أدائها في معالجة المياه.

الفصل الثاني: المواد وطرق العمل

2.1 مقدمة

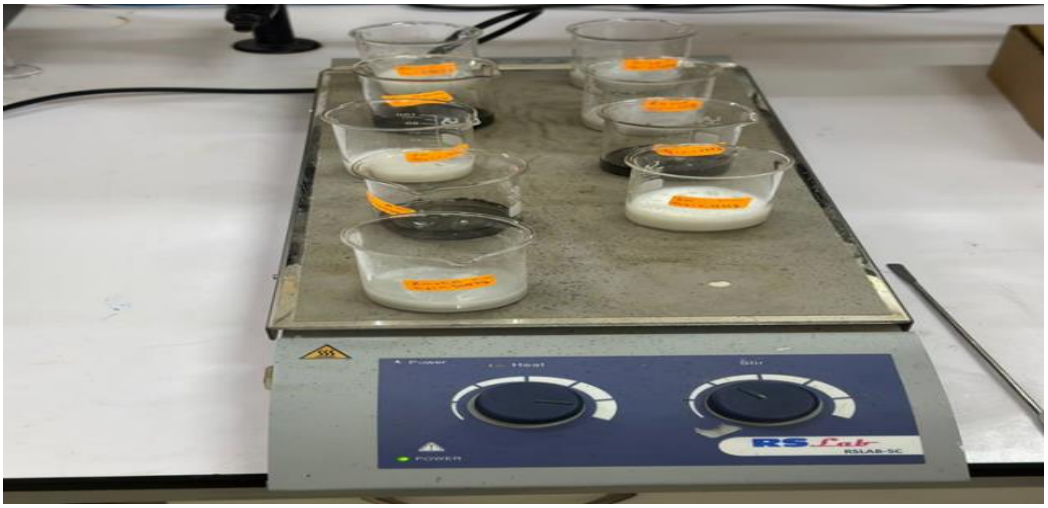
يهدف هذا الفصل إلى عرض المواد الكيميائية والأجهزة المستخدمة في هذه الدراسة، بالإضافة إلى شرح المنهجية التجريبية المتبعة لتحضير جسيمات أكسيد الزنك النانوية بطريقة التخليق الأخضر باستعمال مستخلص أوراق نبات الضرو (Pistacia lentiscus)، وتحضير المركب النانوي الهجين ZnO/AC المكون من أكسيد الزنك النانوي والكربون النشط. كما يتضمن الفصل وصفاً مفصلاً للبروتوكول التجريبي المستخدم في معالجة المياه الملوثة وتقييم كفاءة إزالة الملوثات العضوية من خلال قياس الطلب الكيميائي للأكسجين(DCO) ، إضافة إلى طرق التوصيف البنيوي باستعمال تقنيتي حيود الأشعة السينية (XRD) ومطيافية الأشعة تحت الحمراء.(FTIR)

2.2 المواد الكيميائية

- نترات الزنك سداسي الهيدرات.$Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$
- الكربون النشط التجاري.(Activated Carbon, AC)
- أوراق نبات الضرو.(Pistacia lentiscus)
- الماء المقطر.
- الإيثانول المطلق.
- كواشف تحليل الطلب الكيميائي للأكسجين.(DCO)
- مياه صرف ملوثة تحتوي على مواد عضوية قابلة للأكسدة.

2.3 الأجهزة المستخدمة

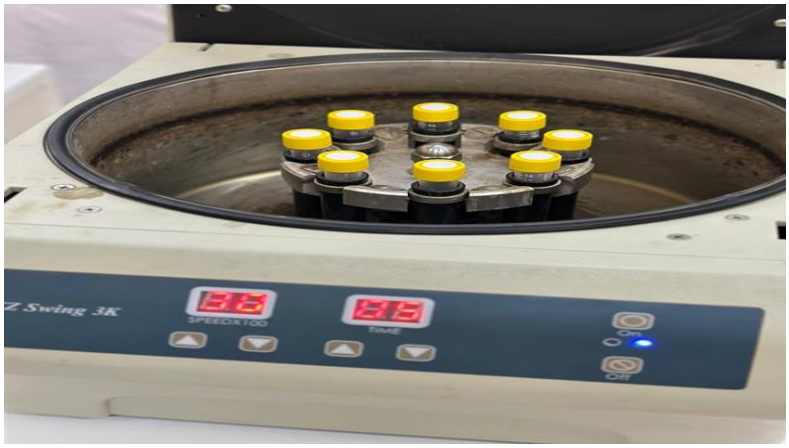
تم إجراء التحضيرات والتحاليل باستعمال مجموعة من الأجهزة المخبرية، وهي:



الشكل 1.2: *جهاز التحريك المغناطيسي*



الشكل 2.2: جهاز الموجات فوق الصوتية



الشكل 3.2 : جهاز الطرد المركزي



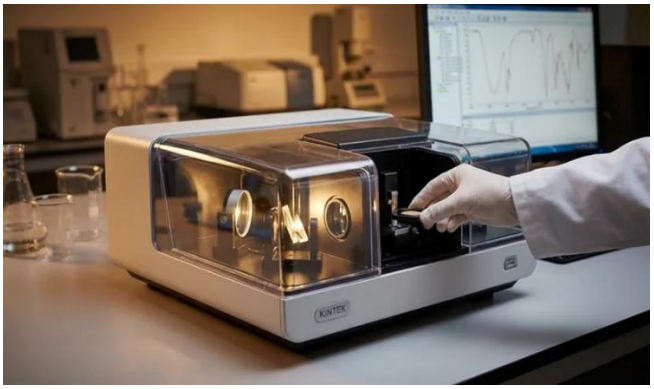
الشكل 4.2 : جهاز الهضم الحراري (**Thermoreactor**)



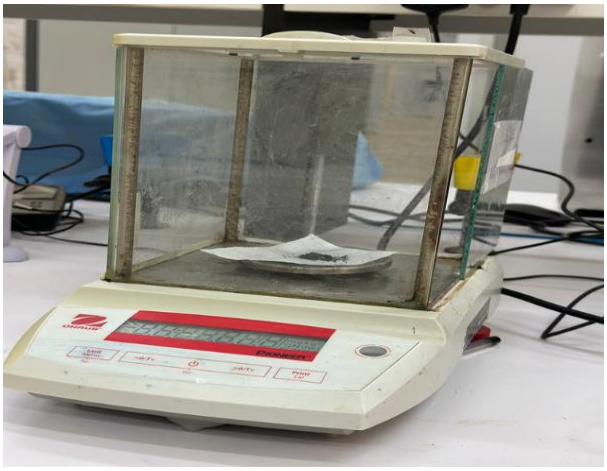
الشكل 5.2: جهاز المطياف الضوئي (**Spectrophotometer**)



الشكل 6.2 : جهاز حيود الأشعة السينية (**XRD**)



الشكل 7.2: جهاز مطيافية الأشعة تحت الحمراء (**FTIR**)



الشكل 8.2: *ميزان تحليلي إلكتروني*

2.4 التحضير الأخضر لجسيمات أكسيد الزنك النانوية (ZnO NPs)

2.4.1 تحضير المستخلص النباتي

تم جمع أوراق نبات الضرو (Pistacia lentiscus) من البيئة المحلية، ثم غُسلت عدة مرات بالماء المقطر لإزالة الأتربة والشوائب العالقة. بعد ذلك تُركت الأوراق لتجف في درجة حرارة الغرفة لمدة عدة أيام، ثم طُحنت باستعمال طاحونة كهربائية للحصول على مسحوق نباتي ناعم.

لتحضير المستخلص النباتي، تم إضافة كمية مناسبة من مسحوق الأوراق إلى الماء المقطر وتسخين المزيج لمدة 30 دقيقة مع التحريك المستمر. بعد ذلك تُرك المزيج ليبرد ثم رُشح باستعمال ورق ترشيح للحصول على مستخلص نباتي صافٍ استُخدم مباشرة في عملية التخليق الأخضر.

2.4.2 تخليق جسيمات أكسيد الزنك النانوية

تم تحضير محلول نترات الزنك بتركيز 0.33 مول/لتر بإذابة الكمية المناسبة من $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ في 100 مل من الماء المقطر تحت التحريك المستمر.

بعد ذلك أضيف 50 مل من المستخلص النباتي تدريجياً إلى محلول نترات الزنك مع استمرار التحريك. تُرك المزيج عند درجة حرارة 70 °م لمدة ساعتين حتى حدوث التفاعل وتكوين الراسب الأولي لجسيمات أكسيد الزنك النانوية.

بعد انتهاء التفاعل تم فصل الراسب باستعمال جهاز الطرد المركزي، ثم غُسل عدة مرات بالماء المقطر والإيثانول لإزالة الشوائب وبقايا المواد العضوية غير المتفاعلة.

تم تجفيف الراسب عند درجة حرارة 70 °م لمدة 24 ساعة، ثم طحنه للحصول على مسحوق متجانس. بعد ذلك أجريت عملية التكليس عند درجة حرارة 500 °م لمدة 4 ساعات للحصول على جسيمات أكسيد الزنك النانوية ذات درجة تبلور مرتفعة.

2.5 تحضير المركب النانوي الهجينZnO/AC

تم تحضير المركب النانوي الهجين ZnO/AC بطريقة المزج الفيزيائي المدعوم بالموجات فوق الصوتية.

في البداية تم وزن 0.3 غ من جسيمات أكسيد الزنك النانوية و0.3 غ من الكربون النشط التجاري.

تم وضع كل مادة في وعاء منفصل يحتوي على 100 مل من الماء المقطر، ثم خضع كل معلق للتحريك المغناطيسي لمدة 20 دقيقة عند درجة حرارة الغرفة.

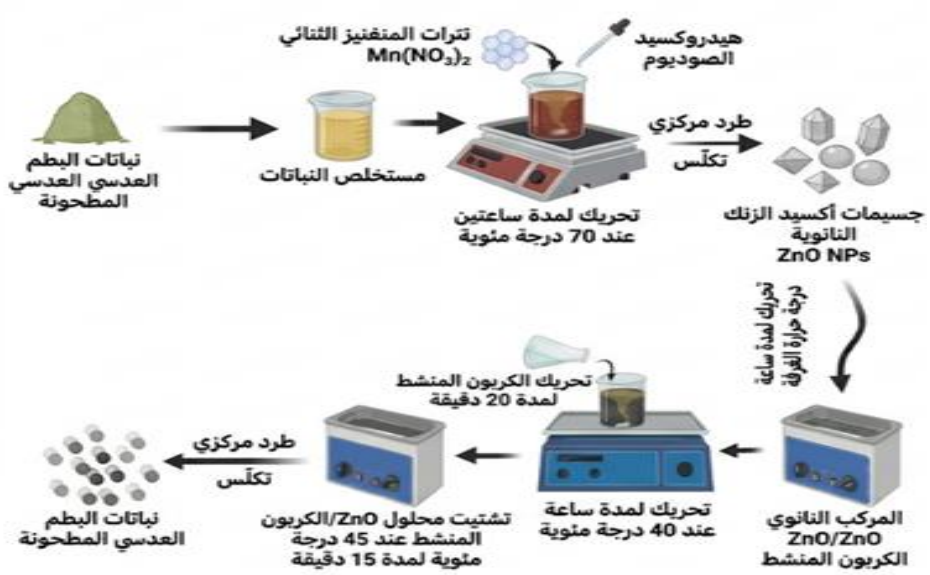
بعد ذلك تم تعريض معلق أكسيد الزنك للموجات فوق الصوتية لمدة ساعة واحدة عند درجة حرارة 45 °م بهدف تفكيك التكتلات وتحسين تشتت الجسيمات النانوية.

تمت إضافة معلق أكسيد الزنك تدريجياً إلى معلق الكربون النشط مع استمرار التحريك المغناطيسي لمدة ساعة إضافية للسماح بحدوث التفاعل والتوزيع المنتظم للجسيمات النانوية على سطح الكربون النشط.

ولتحسين التجانس البنيوي للمركب الناتج، خضع المزيج النهائي لمعالجة إضافية بالموجات فوق الصوتية لمدة 15 دقيقة عند درجة حرارة 45 °م.

بعد ذلك فُصل المركب باستعمال جهاز الطرد المركزي، وغُسل عدة مرات بالماء المقطر والإيثانول للتخلص من الشوائب والجسيمات غير المرتبطة.

أخيراً جُفف المركب الناتج داخل فرن تجفيف عند درجة حرارة 60 °م لمدة 24 ساعة للحصول على مسحوق ZnO/AC جاهز لعمليات التوصيف والتطبيق.



***الشكل 9.2**: مراحل التخليق الأخضر للمركب النانوي*

2.6 توصيف المواد المحضرة

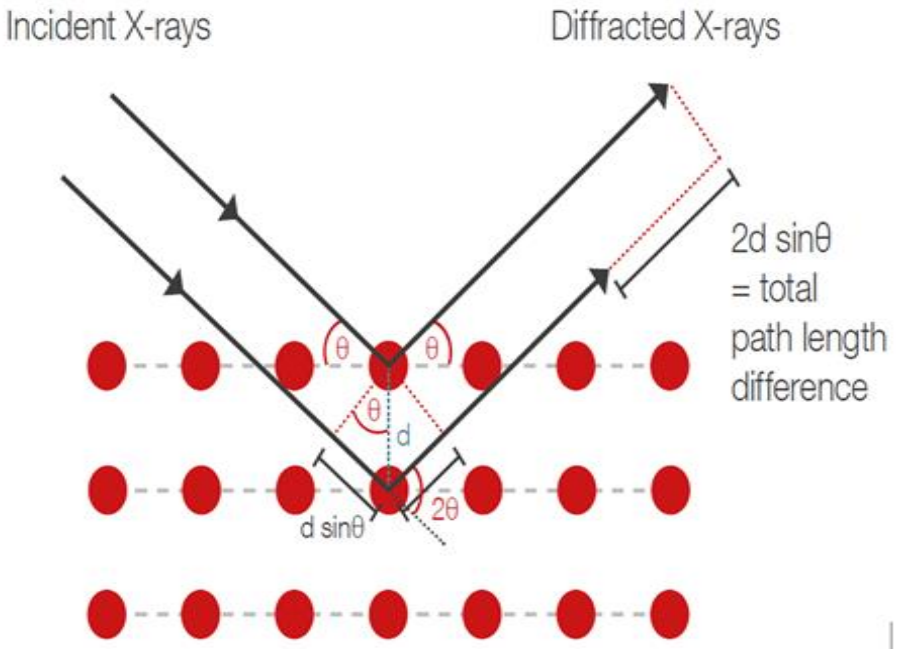
2.6.1 تحليل حيود الأشعة السينية (XRD)

تم استخدام تقنية حيود الأشعة السينية (XRD) لدراسة التركيب البلوري للمواد المحضرة وتحديد الأطوار المتكونة.

أجريت القياسات باستعمال جهاز يعمل بإشعاع Cu-Kα ذي طول موجي قدره 1.5406 Å عند جهد تشغيل 40 kV وشدة تيار 40.mA

تم تسجيل أنماط الحيود ضمن المجال الزاوي 2 θالممتد من 10° إلى 80° مع خطوة مسح مقدارها 0.02.°

استُخدمت بطاقات JCPDS القياسية لتحديد الأطوار البلورية ومقارنة النتائج المرجعية.

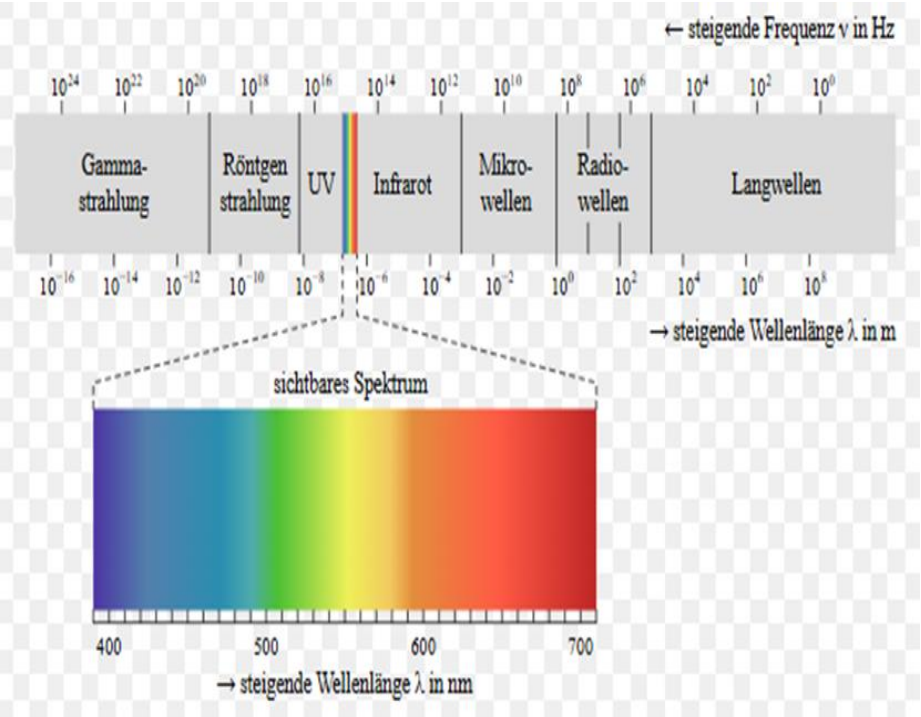


الشكل 10.2: *تقنية حيود الأشعة السينية (***XRD***)*

2.6.2 تحليل مطيافية الأشعة تحت الحمراء (FTIR)

تم استخدام مطيافية الأشعة تحت الحمراء لتحويل فورييه (FTIR) بهدف التعرف على المجموعات الوظيفية الموجودة على سطح المواد المحضرة.

أجريت القياسات باستعمال أقراص KBr ضمن المجال الطيفي الممتد من 4000 إلى 400 cm^{-1} وبدقة تحليل قدرها 4.cm^{-1}



الشكل 11.2 : *الطيف الكهرومغناطيسي*

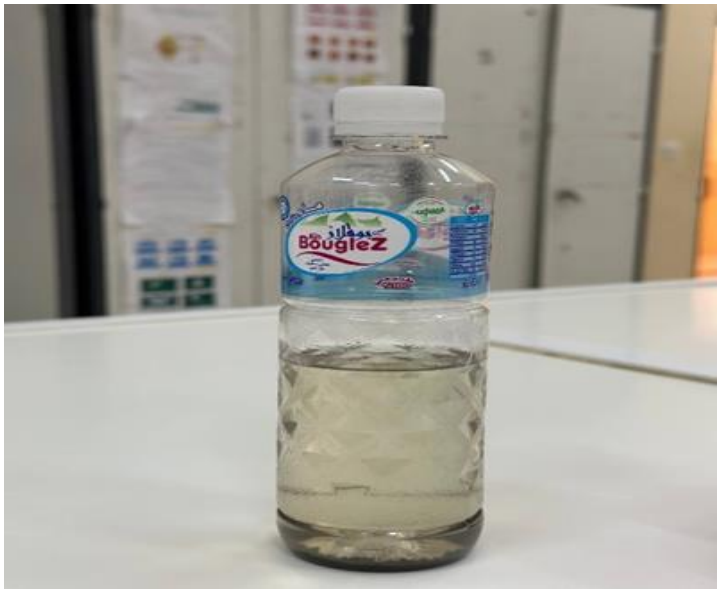
2.7 تحضير عينات المياه الملوثة

تم استخدام مياه صرف ملوثة تحتوي على ملوثات عضوية قابلة للأكسدة كمادة أولية للدراسة.

قبل بدء المعالجة تم قياس الخصائص الأولية للعينة والتي تشمل:

- الطلب الكيميائي للأكسجين.(DCO_0)
- الأكسجين المذاب.(DO)
- درجة الحرارة.

واعتبرت هذه القيم مرجعاً لمقارنة فعالية المواد المحضرة في إزالة الملوثات العضوية.



***الشكل 12.2**: عينة من الماء الملوث المستخدم*

2.7.1 بروتوكول معالجة المياه الملوثة

تم إجراء تجارب المعالجة باستعمال ثلاث مواد مختلفة:

- الكربون النشط.(AC)
- جسيمات أكسيد الزنك النانوية.(ZnO)
- المركب الهجين.ZnO/AC

في كل تجربة تم وضع 20 مل من المياه الملوثة داخل كأس زجاجي نظيف، ثم أضيفت كمية ثابتة 0.4 g من المادة المدروسة.

وضعت العينات فوق جهاز التحريك المغناطيسي بسرعة 300 دورة في الدقيقة مع المحافظة على نفس ظروف التشغيل لجميع التجارب.

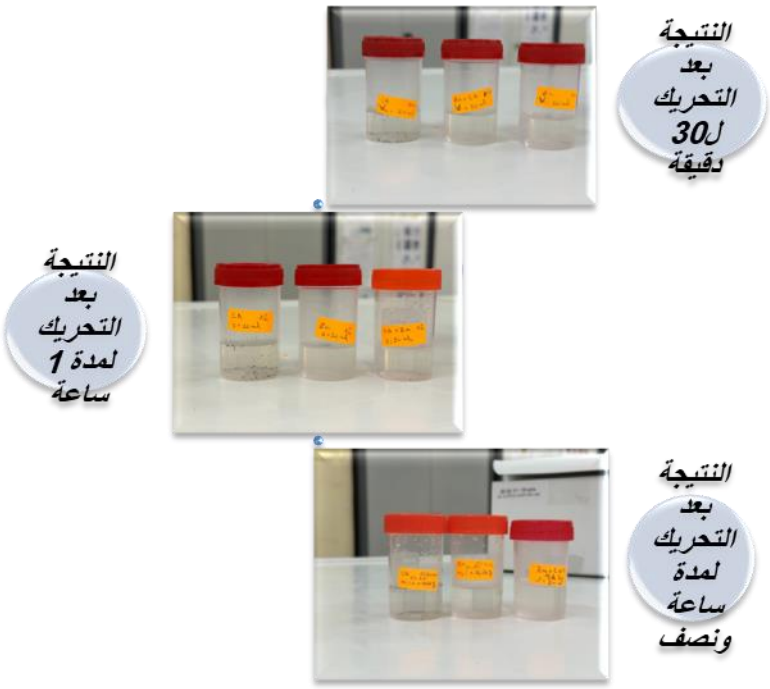
تمت متابعة عملية المعالجة عند ثلاث فترات زمنية مختلفة:

- 30دقيقة.
- 60دقيقة.
- 90دقيقة.

بعد انتهاء الزمن المحدد لكل تجربة تم نقل العينة مباشرة إلى أنابيب الطرد المركزي.



الشكل 13.2 : بروتوكول معالجة المياه الملوثة

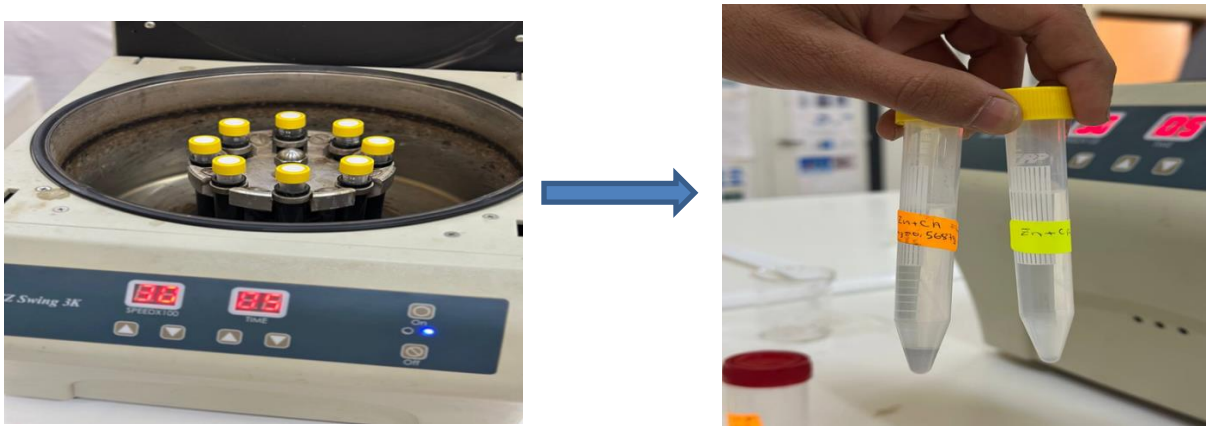


الشكل 14.2 : دراسة التأثير الزمني للخلط

2.8 فصل المواد الصلبة

تم فصل المواد الصلبة عن المحلول باستعمال جهاز الطرد المركزي بسرعة 3000 دورة/دقيقة لمدة 5 دقائق.

بعد اكتمال عملية الفصل تم الحصول على محلول رائق استُخدم مباشرة في قياس الطلب الكيميائي للأكسجين (DCO) .



الشكل 15.2: عملية فصل المواد الصلبة

2.9 قياس الطلب الكيميائي للأكسجين(DCO)

تم قياس الطلب الكيميائي للأكسجين باستعمال طريقة الأنبوب المغلق.(Closed Reflux Method)

تم أخذ 2 مل من المحلول الرائق وإضافتها إلى أنابيب التحليل المحتوية على الكواشف المناسبة.

بعد ذلك أُخضعت الأنابيب لعملية الهضم الحراري داخل جهاز Thermoreactor عند درجة حرارة 150 °م لمدة ساعتين.

بعد انتهاء عملية الهضم تُركت العينات لتبرد إلى درجة حرارة الغرفة، ثم تم قياس الامتصاصية باستعمال جهاز المطياف الضوئي.

تم حساب قيم DCO اعتماداً على منحنى المعايرة القياسي الخاص بالجهاز.

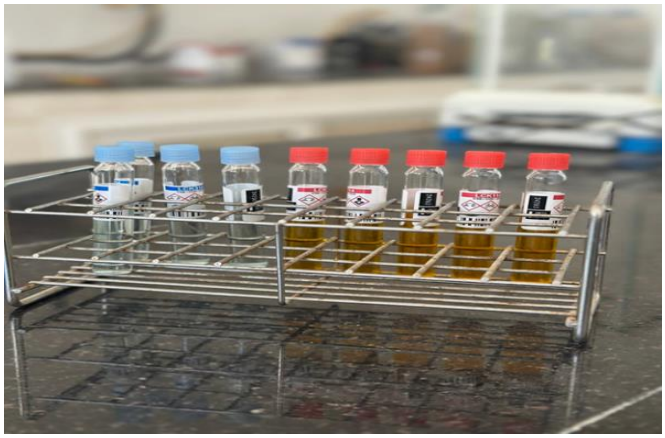
تم حساب كفاءة إزالة الملوثات العضوية وفق العلاقة التالية:

$$E\ (\%) = [(DCO_0 - DCO_t) / DCO_0] \times 100$$

حيث:

DCO_0 : قيمة الطلب الكيميائي للأكسجين قبل المعالجة.

DCOt : قيمة الطلب الكيميائي للأكسجين بعد المعالجة عند الزمن t



***الشكل 16.2**: العينات بعد استخراجها من جهاز الهضم الحراري*

2.10 التحليل الإحصائي

أُجريت جميع التجارب بثلاث مكررات مستقلة لضمان موثوقية النتائج.

عُبِّر عن النتائج على شكل متوسط حسابي ± انحراف معياري.

تم استخدام برنامج Microsoft Excel في معالجة البيانات الإحصائية، وحساب المتوسطات والانحرافات المعيارية، ورسم المنحنيات البيانية اللازمة لمناقشة النتائج.

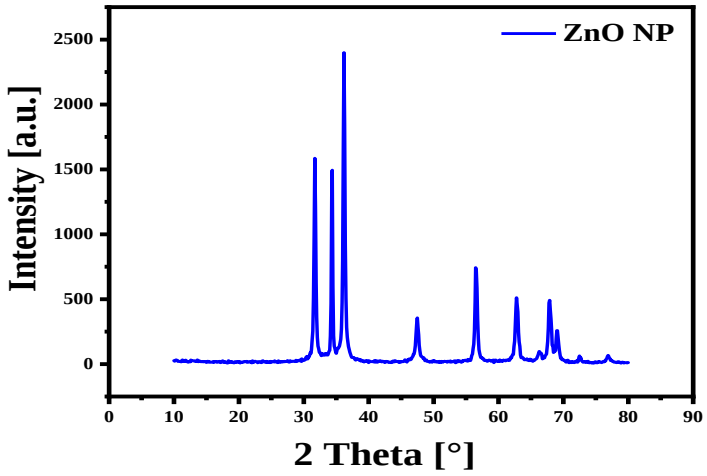
الفصل الثالث: تحليل ومناقشة النتائج

3.1 تحليل حيود الأشعة السينية (XRD)

تُعرض أنماط حيود الأشعة السينية (XRD) لجسيمات أكسيد الزنك النانوية النقية (ZnO NP) والمركب النانوي المكون من أكسيد الزنك والكربون المنشط (ZnO@CA NC) في الشكل(3.1) ، (3.2) ما يوفر رؤية واضحة لخصائصهما الهيكلية.

3.1.1 تحليل جسيمات أكسيد الزنك النانوية (ZnO NP)

بالنسبة لعينة ZnO NP، يمكن إرجاع قمم الحيود المرصودة عند زوايا theta\2 التقريبية: 31.71°، 34.35°، 36.21°، 47.49°، 56.57°، 62.82°، 66.47°، 67.91°، و69.07° إلى المستويات البلورية التالية على التوالي:
(100)، (002)، (101)، (102)، (110)، (103)، (200)، (112)، و(201).

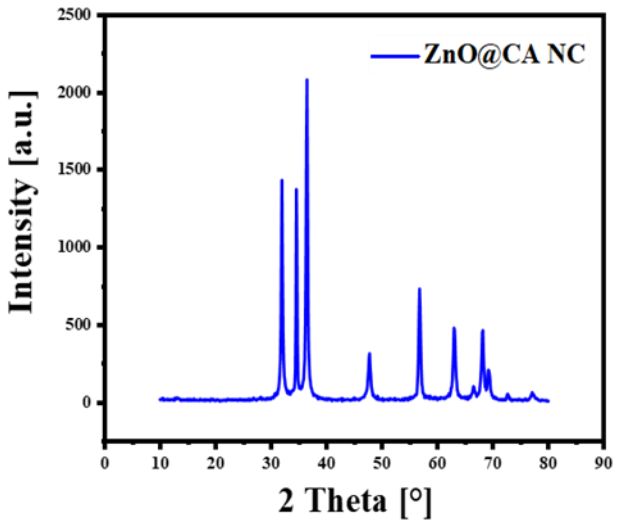


الشكل 1.3 *: منحنى يمثل نتائج تحليل* **DRX** *لنانو أكسيد الزنك*

تتوافق هذه النتائج مع بنية "الورتزيت" السداسية (Hexagonal Wurtzite) لأكسيد الزنك، وهي في توافق جيد مع بطاقة القياس المعيارية JCPDS رقم (01-076-0704). وتُشير الشدة العالية والحدة لهذه القمم إلى أن جسيمات أكسيد الزنك المُصنعة تتمتع بدرجة عالية من التبلور ونقاء الطور، مع عدم وجود شوائب قابلة للكشف أو أطوار ثانوية.

3.1.2 تحليل المركب النانوي (ZnO@CA NC)

في حالة المركب النانوي ZnO@CA، يظهر نمط الحيود قممًا عند زوايا theta\2 تقريبية: 31.99°، 34.63°، 36.48°، 47.77°، 56.82°، 63.05°، 66.56°، 68.15°، و69.28°، والتي تُنسب وبالمثل إلى المستويات المميزة لأكسيد الزنك السداسي (JCPDS No. 01-079-0205).



الشكل 2.3 : *منحنى يمثل نتائج تحليل* **DRX** *للمركب النانوي* **ZnO@CA**

ويؤكد هذا أن التركيب البلوري لأكسيد الزنك قد حُوفظ عليه جيدًا بعد دمجه في مصفوفة الكربون المنشط. ومع ذلك، وبالمقارنة مع أكسيد الزنك النقي، يُلاحظ وجود إزاحات طفيفة في القمم وانخفاض هامشي في الشدة، وهو ما يمكن إرجاعه إلى:

- التفاعلات البينية بين أكسيد الزنك ودعامة الكربون.
- تحسن التشتت (Dispersion).
- احتمال حدوث اختزال في الحجم البلوري.

3.1.3 الاستنتاج البنيوي

أظهرت قمم حيود ZnO النانوي عند الزوايا: 31.71°، 34.35°، 36.21°، 47.49°، 56.57°، 62.82°، 66.47°، 67.91°، 69.07°، والمقابلة للمستويات البلورية (100)، (002)، (101)، (102)، (110)، (103)، (112)، (201)، على التوالي، وهي تطابق بنية الورتزيت السداسية (JCPDS 01-076-0704). القمم حادة وعالية الطاقة، تشير إلى تبلور عالٍ ونقاوة الطور.

في المركب الهجين ZnO/AC، ظهرت قمم ZnO نفسها مع إزاحات طفيفة وانخفاض في الشدة، بالإضافة إلى قمم عريضة في منطقة 13-28° θ2 تعود للكربون غير المتبلور، مما يؤكد دمج الكربون دون تدمير بنية ZnO.

من الأهمية بمكان ملاحظة أن المركب النانوي ZnO@CA يظهر ملامح إضافية عريضة ومنخفضة الكثافة في منطقة الزوايا المنخفضة (°28–13 ≈ 2θ)، وهي ملامح تغيب تمامًا في نمط أكسيد الزنك النقي. وتعتبر ميزات الحيود العريضة هذه مميزة للكربون المنشط غير المتبلور (Amorphous)، والذي يرتبط عادةً بالهياكل الجرافيتية غير المنتظمة.

يؤكد وجود هذه القمم المنتشرة (Diffuse peaks) النجاح في دمج الكربون المنشط داخل المركب، ويسلط الضوء على طبيعته غير المتبلورة السائدة. وبشكل عام، تثبت نتائج XRD أن المركب النانوي ZnO@CA يتكون من جسيمات أكسيد زنك جيدة التبلور مدعومة بانتظام على مصفوفة كربونية غير متبلورة؛ وهو مزيج هيكلي يُتوقع أن يعزز كلاً من قدرة الامتصاص

والأداء الحفزي بسبب التأثير التآزري بين أكسيد الزنك والكربون المنشط.القياس النهائي :بعد تبريد العينات، يتم قياس قيمة الـ DCOبواسطة جهاز القياس الضوئي المخصص.

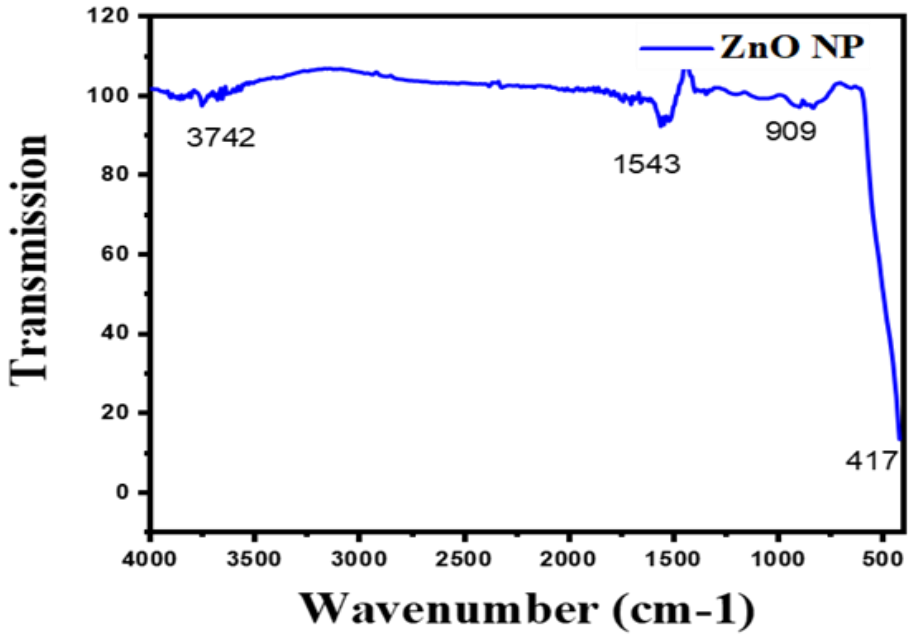
3.2 تحليل مطيافية الأشعة تحت الحمراء وتحويل فورييه (FTIR)

يوفر طيف FTIR لجسيمات أكسيد الزنك النانوية (ZnO NP) والمركب النانوي المكون من أكسيد الزنك والكربون المنشط (ZnO@CA NC) رؤى هامة حول الكيمياء السطحية للمواد، ويؤكد النجاح في تشكيل المادة المركبة.

3.2.1 تحليل جسيمات أكسيد الزنك النانوية (ZnO NP)

يعتبر طيف عينة ZnO NP بسيطاً نسبيًا، مما يعكس الطبيعة غير العضوية للمادة. وتتمثل أهم الملامح فيما يلي:

- **نطاق الامتصاص القوي:** يظهر في منطقة العدد الموجي المنخفض (أقل من 600 سم$^{-1}$ تقريبًا)، ويُعزى إلى اهتزاز التمدد لروابط Zn–O، مما يؤكد تشكل أكسيد الزنك.
- **نطاق عريض وضعيف:** يظهر في المنطقة ما بين 3200 و3500 سم$^{-1}$ تقريبًا، ويُنسب إلى اهتزازات التمدد لمجموعات الهيدروكسيل (O–H)، مما يشير إلى وجود مجموعات هيدروكسيل سطحية أو رطوبة ممتصة، وهو أمر معتاد في الجسيمات النانوية لأكاسيد المعادن المعرضة للظروف المحيطة.
- **النقاء:** يشير غياب القمم الهامة في منطقة الأشعة تحت الحمراء المتوسطة (1000-1700 سم$^{-1}$) إلى أن عينة ZnO نقية نسبيًا وتحتوي على حد أدنى من البقايا العضوية.

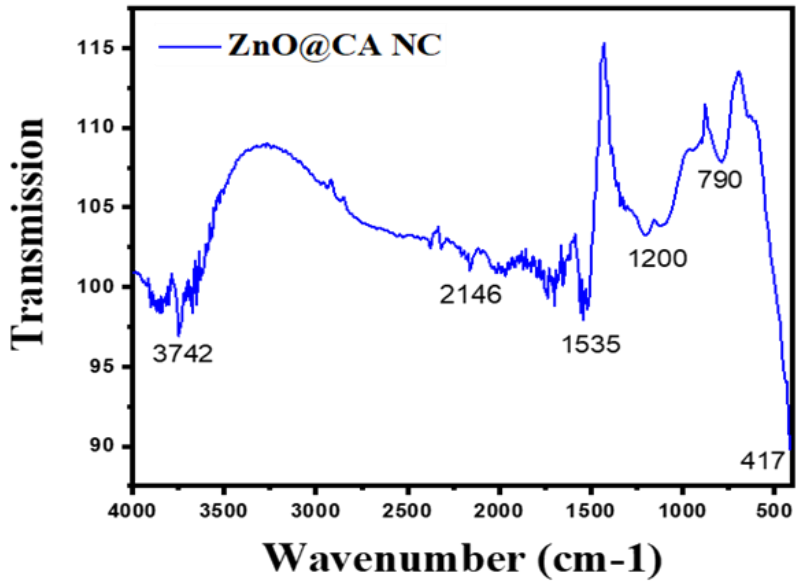


الشكل 3.3 : *طيف* **FTIR** *لجسيمات أكسيد الزنك النانوية (***ZnO NP***)*

3.2.2 تحليل المركب النانوي (ZnO@CA NC)

في المقابل، يعد طيف المركب النانوي ZnO@CA أكثر تعقيداً بشكل ملحوظ، مما يظهر بوضوح مساهمة الكربون المنشط:

- **مجموعات الهيدروكسيل**: يُلاحظ وجود نطاق عريض وكثيف متمركز حول 3200-3600 سم$^{-1}$، يتوافق مع اهتزازات تمدد O–H لمجموعات الهيدروكسيل والمياه الممتصة فيزيائياً، والتي تتوافر بكثرة على سطح الكربون المنشط.
- **الهياكل الكربونية**: تظهر نطاقات امتصاص متميزة في المنطقة حول 1600 سم$^{-1}$، والتي يمكن إرجاعها إلى اهتزازات تمدد C=C للهياكل الكربونية العطرية، مما يؤكد وجود مجالات جرافيتية.
- **المجموعات الوظيفية الأكسجينية**: ترتبط النطاقات الإضافية في نطاق 1000-1400 سم$^{-1}$ بالمجموعات الوظيفية C–O وC–OH وC=O، مما يشير إلى وجود وظائف سطحية تحتوي على الأكسجين أُدخلت أثناء عملية التنشيط.



الشكل 4.3** : طيف* **FTIR** *لجسيمات المركب النانوي (ZnO@CA NC***)*

3.2.3 الاستنتاج العام

من المهم ملاحظة أن نطاق اهتزاز Zn–O لا يزال مرئياً في طيف المركب، مما يؤكد الحفاظ على بنية ZnO بعد دمجها في مصفوفة الكربون. ومع ذلك، فإن التغيرات الطفيفة في الشدة وتوسع النطاق تشير إلى وجود تفاعلات بينية قوية بين جسيمات أكسيد الزنك النانوية وسطح الكربون المنشط، مما قد يعزز التشتت ويخلق مواقع نشطة إضافية.

بشكل عام، يؤكد تحليل FTIR أن المركب النانوي ZnO@CA يتكون من أكسيد زنك متبلور مثبت على مصفوفة كربون منشط وظيفية. إن التعايش بين روابط Zn–O والمجموعات الوظيفية المرتبطة بالكربون يثبت التكامل الناجح لكلا المكونين، وهو ما يُتوقع أن يحسن قدرة الامتصاص والأداء الحفزي بسبب التأثير التآزري بين أكسيد الزنك والكربون المنشط.

3.3 نتائج كفاءة إزالة DCO

جدول 1.3 : *كفاءة إزالة الطلب الكيميائي للأكسجين (**DCO**)*

المادة	30 دقيقة	60 دقيقة	90 دقيقة
AC (كربون منشط)	2 ± 45	1.5 ± 55	1.0 ± 60
ZnO (أكسيد زنك نانوي)	1.8 ± 52	1.2 ± 54	1.5 ± 70
ZnO/AC (مركب هجين)	0.9 ± 70	0.8 ± 75	0.7 ± 80

تُظهر النتائج المبينة في الجدول (3.1) أن كفاءة إزالة الطلب الكيميائي للأكسجين (DCO) تزداد تدريجياً بزيادة زمن المعالجة بالنسبة لجميع المواد المدروسة، مما يدل على أن زيادة زمن التماس بين المادة المعالجة والملوثات العضوية يساهم في تحسين عملية الإزالة. وقد سجل الكربون النشط (AC) كفاءة إزالة بلغت 45% بعد 30 دقيقة، لترتفع إلى 55% و60% بعد 60 و90 دقيقة على التوالي، ويُعزى ذلك إلى قدرة الكربون النشط العالية على امتزاز المركبات العضوية بفضل مساحته السطحية الكبيرة وبنيته المسامية المتطورة.

أما جسيمات أكسيد الزنك النانوية(ZnO) ، فقد أظهرت كفاءة إزالة أعلى نسبياً مقارنة بالكربون النشط خلال معظم فترات المعالجة، حيث ارتفعت من 52% بعد 30 دقيقة إلى 70% بعد 90 دقيقة. ويُعزى هذا الأداء إلى النشاط التحفيزي الضوئي لأكسيد الزنك وقدرته على توليد أنواع الأكسجين النشطة والجذور الحرة القادرة على أكسدة وتحليل الملوثات العضوية الموجودة في المياه.

من جهة أخرى، حقق المركب الهجين (ZnO/AC) أفضل أداء بين جميع المواد المدروسة، حيث بلغت كفاءة الإزالة 70% بعد 30 دقيقة وارتفعت إلى 80% بعد 90 دقيقة. ويُفسر هذا التحسن الملحوظ بوجود تأثير تآزري بين الكربون النشط وأكسيد الزنك النانوي، إذ يعمل الكربون النشط على تركيز الملوثات العضوية على سطحه من خلال الامتزاز، بينما يقوم أكسيد الزنك بتحليل هذه الملوثات ضوئياً، مما يقلل من تشبع مواقع الامتزاز ويزيد من فعالية عملية المعالجة.

وتؤكد هذه النتائج أن دمج أكسيد الزنك النانوي مع الكربون النشط يُحسن بشكل واضح من كفاءة إزالة الملوثات العضوية مقارنة باستخدام كل مادة على حدة، مما يجعل المركب الهجين ZnO/AC مادة واعدة لتطبيقات معالجة المياه الملوثة بكفاءة عالية وفي زمن معالجة قصير نسبياً.

تُحسب كفاءة إزالة التلوث العضوي (E%) بناءً على انخفاض قيم DCO بالعلاقة:

$$E\% = [(DCO_0 - DCO_t) / DCO_0] \times 100$$

حيث DCO_0 هي القيمة الابتدائية قبل المعالجة، و DCO_t هي القيمة بعد المعالجة عند الأزمنة المختلفة (30، 60، 90 دقيقة).

- لا تُحسب الكفاءة بقسمة DCO_0 على DCO_t (هذا يعطي نسبة مقلوبة، قد تزيد عن 100% وتخلو من المنطق الفيزيائي).

- يجب استخدام فرق القيم (الابتدائية – النهائية) في البسط.
- الضرب في 100 لتحويل الكسر إلى نسبة مئوية.

3.4 نتائج الأكسجين المذاب (DO)

جدول 2.3 : تأثير زمن المعالجة على تركيز الأكسجين المذاب (***DO***)

الزمن (دقيقة)	ZnO NP	ZnO/AC NC
30	0.05 ± 9.77	0.04 ± 9.80
60	0.04 ± 9.75	0.06 ± 9.63
90	0.03 ± 9.68	0.05 ± 9.58

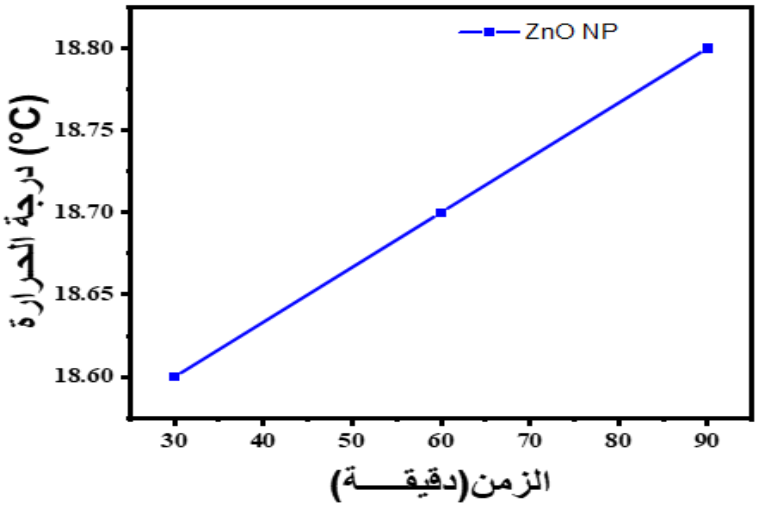
تُبين النتائج الواردة في جدول (***3.2***) وجود انخفاض تدريجي في تركيز الأكسجين المذاب (DO) مع زيادة زمن المعالجة لكل من جسيمات أكسيد الزنك النانوية (ZnO) والمركب الهجين .(ZnO/AC) فقد انخفضت قيمة DO في حالة ZnO من 9.77 mg/L عند 30 دقيقة إلى 9.68 mg/L بعد 90 دقيقة، بينما كان الانخفاض أكثر وضوحاً في حالة المركب الهجين ZnO/ACحيث تراجعت القيمة من 9.80 mg/L إلى 9.58 mg/L خلال نفس الفترة الزمنية.

يمكن تفسير هذا الانخفاض باستهلاك الأكسجين المذاب أثناء التفاعلات التأكسدية التي ترافق عملية إزالة الملوثات العضوية. ففي وجود أكسيد الزنك النانوي، تتولد أنواع أكسجين نشطة مثل جذور فوق الأكسيد (O_2^{-}•) والجذور الهيدروكسيلية(•OH) ، والتي تساهم في أكسدة وتحليل المركبات العضوية. ويؤدي تكوين هذه الأنواع النشطة إلى استهلاك جزء من الأكسجين المذاب الموجود في الوسط.

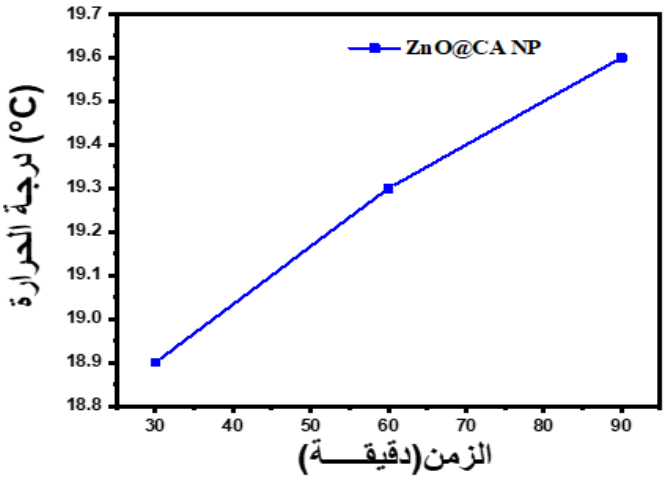
كما يُلاحظ أن المركب الهجين ZnO/AC أظهر انخفاضاً أكبر في قيم DO مقارنةً بـ ZnO منفرداً، وهو ما يتوافق مع كفاءته الأعلى في إزالة الملوثات العضوية. ويُعزى ذلك إلى التأثير التآزري بين الكربون النشط وأكسيد الزنك، حيث يعمل الكربون النشط على تركيز الملوثات بالقرب من المواقع النشطة لأكسيد الزنك، مما يعزز التفاعلات التأكسدية ويزيد من استهلاك الأكسجين المذاب. وتشير هذه النتائج إلى وجود علاقة مباشرة بين انخفاض تركيز الأكسجين المذاب وارتفاع كفاءة إزالة الملوثات العضوية، الأمر الذي يؤكد فعالية المركب الهجين ZnO/AC في عمليات معالجة المياه الملوثة.

3.5 دراسة تأثير الزمن على درجة الحرارة

توضح النتائج المبينة في الشكلين (3.5) و(3.6) أن درجة الحرارة ارتفعت بشكل طفيف مع زيادة زمن المعالجة لكل من جسيمات أكسيد الزنك النانوية (ZnO NP) والمركب الهجين .(ZnO@CA NC) فقد ارتفعت درجة الحرارة في حالة ZnO من 18.6 °C عند 30 دقيقة إلى 18.8 °Cبعد 90 دقيقة، بينما ارتفعت في حالة المركب الهجين من 18.9 °Cإلى 19.3 °C خلال نفس الفترة الزمنية.



الشكل 5.3 : تأثير زمن المعالجة على درجة الحرارة باستعمال جسيمات أكسيد الزنك النانوية (***ZnO NP***)



الشكل 6.3 : تأثير زمن المعالجة على درجة الحرارة باستعمال المركب الهجين (***ZnO@CA NC***)

يُلاحظ أن الزيادة الحرارية في كلا النظامين كانت محدودة جداً ولم تتجاوز 0.2 °C بالنسبة لـ ZnO و0.4 °C بالنسبة لـ ZnO@CA، مما يدل على أن عملية المعالجة تتم في ظروف حرارية شبه مستقرة ولا تتطلب استهلاكاً كبيراً للطاقة. كما يُظهر المركب الهجين قيماً أعلى بقليل من تلك المسجلة لأكسيد الزنك النقي، وهو ما يمكن تفسيره بزيادة النشاط السطحي والتفاعلات التأكسدية الناتجة عن التأثير التآزري بين الكربون النشط وأكسيد الزنك.

وتشير هذه النتائج إلى أن ارتفاع درجة الحرارة ليس العامل الرئيسي المسؤول عن تحسن كفاءة إزالة الملوثات العضوية، بل يعود ذلك أساساً إلى آليات الامتزاز والتحفيز الضوئي التي يوفرها المركب الهجين. كما أن التغير الحراري المحدود يعد ميزة عملية مهمة، لأنه يسمح بتطبيق المادة في معالجة المياه دون الحاجة إلى أنظمة تحكم حراري معقدة أو استهلاك إضافي للطاقة.

جدول3.3 *: تطور درجة الحرارة (° C) مع الزمن باستعمال* **ZnO NP** *و* **ZnO@CA NC**.

الزمن		30	60	90
درجة الحرارة (C°)	ZnO NP	18.6	18.7	18.8
	ZnO@CA NC	18.9	19.1	19.3

3.6 دراسة تأثير الزمن على الأكسجين المنحل O2

جدول 4.3*: تطور الاكسجين المنحل (%) مع الزمن باستعمال* **ZnO NP** *و* **ZnO@CA NC**

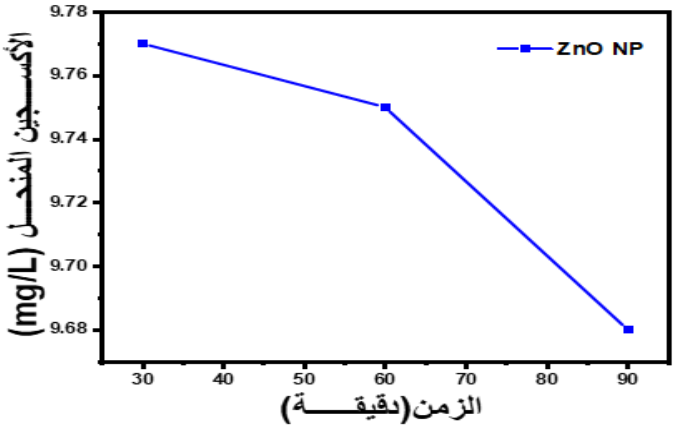
الزمن (د)		30	60	90
O2 (%)	Zn Np	9.77	9.75	9.68
	Zn@CA	9.80	9.63	9.58

توضح النتائج المبينة في جدول (3.4) أن تركيز الأكسجين المذاب **(DO)** انخفض تدريجياً مع زيادة زمن المعالجة لكل من جسيمات أكسيد الزنك النانوية **(ZnO NP)** والمركب الهجين **(ZnO@CA NC).** ففي حالة **ZnO** انخفضت قيمة الأكسجين المذاب من 9.77 **mg/L** عند 30 دقيقة إلى 9.68 **mg/L** بعد 90 دقيقة، أي بانخفاض إجمالي قدره 0.09 **mg/L.** أما بالنسبة للمركب الهجين **ZnO@CA** فقد سجل انخفاضاً أكبر، حيث تراجعت القيمة من 9.80 **mg/L** إلى 9.58 **mg/L** خلال نفس الفترة الزمنية، أي بانخفاض قدره 0.22**mg/L.** يمكن تفسير هذا السلوك باستهلاك الأكسجين المذاب أثناء التفاعلات التأكسدية المصاحبة لعملية إزالة الملوثات العضوية. فعند تعرض أكسيد الزنك للضوء تتولد إلكترونات وفجوات موجبة تتفاعل مع الأكسجين والماء لتكوين أنواع أكسجين نشطة مثل جذور فوق الأكسيد **($O_2^{\bullet-}$)** والجذور الهيدروكسيلية **(•OH)**، والتي تلعب دوراً رئيسياً في أكسدة وتحلل المركبات العضوية الموجودة في المياه.ويُلاحظ أن الانخفاض في قيم الأكسجين المذاب كان أكثر وضوحاً في حالة المركب الهجين **ZnO@CA** مقارنة بـ **ZnO** النقي، وهو ما يعكس نشاطاً تحفيزياً أعلى للمركب الهجين. ويُعزى ذلك إلى الدور التآزري للكربون النشط الذي يعمل على تركيز الملوثات على سطحه وتحسين انتقال الشحنات، مما يزيد من إنتاج الأنواع المؤكسدة النشطة ويؤدي إلى استهلاك كمية أكبر من الأكسجين المذاب.

وتتوافق هذه النتائج مع بيانات كفاءة إزالة **DCO** التي أظهرت تفوق المركب الهجين**ZnO@CA** ، حيث ارتبط الانخفاض الأكبر في الأكسجين المذاب بارتفاع كفاءة إزالة الملوثات العضوية. وعليه، يمكن اعتبار استهلاك الأكسجين المذاب مؤشراً غير مباشر على شدة التفاعلات التأكسدية وكفاءة عملية المعالجة.

3.7 تحليل منحنى جسيمات ZnO NP :

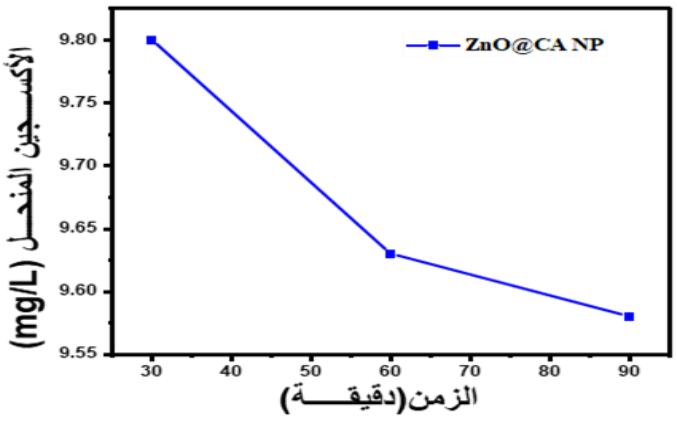
يظهر هذا المنحنى انخفاضاً تدريجياً في تركيز الأكسجين المذاب بمرور الوقت. عند الدقيقة 30، كان التركيز حوالي 9.77 mg/L، ثم انخفض بشكل طفيف حتى الدقيقة 60، ليعقبه هبوط أكثر وضوحاً عند الدقيقة 90 ليصل إلى 9.68 mg/L. هذا يشير إلى وجود استهلاك مستمر للأكسجين في الوسط بوجود جسيمات أكسيد الزنك غير المغلفة، لكن بمعدل يعتبر هادئاً نسبيًا في المراحل الأولى.



***الشكل 7.3** : تأثير زمن المعالجة على تركيز الأكسجين المذاب (**DO**) باستعمال جسيمات أكسيد الزنك النانوية*

3.8 تحليل منحنى جسيمات ZnO@CA NP :

في هذا المنحنى الخاص بالجسيمات المغلفة بحمض الستريك، نلاحظ انخفاضاً أكثر حدة وسرعة في تركيز الأكسجين. بدأ التركيز من قيمة أعلى قليلاً (9.80 mg/L) عند الدقيقة 30، لكنه انخفض بشكل حاد جداً ليصل إلى 9.63 mg/L خلال 30 دقيقة فقط (عند الدقيقة 60)، واستمر في الانخفاض حتى 9.58 mg/L. هذا السلوك يعكس نشاطاً تفاعلياً أكبر لهذه الجسيمات المعدلة، مما أدى إلى استهلاك كمية أكبر من الأكسجين المذاب في وقت أقصر.



***الشكل 8.3** : تأثير زمن المعالجة على تركيز الأكسجين المذاب (**DO**) باستعمال المركب الهجين*

بالمقارنة بين المنحنيين، يتضح أن إضافة غلاف من حمض الستريك (CA) إلى جسيمات أكسيد الزنك النانوية قد أدى إلى تعزيز قدرتها على التفاعل مع الأكسجين المذاب أو تحفيز تفاعلات تستهلكه. فبينما فقدت العينة الأولى (الخام) حوالي 0.09 mg/L من الأكسجين خلال ساعة ونصف، فقدت العينة المعدلة (ZnO@CA) حوالي 0.22 mg/L في نفس الفترة. هذا الفارق الكبير يؤكد أن التعديل السطحي للجسيمات النانوية يغير من خصائصها الكيميائية ويزيد من كفاءتها في التفاعل مع الوسط المحيط.

3.9 خاتمة الفصل

أظهرت نتائج هذا الفصل نجاح عملية التخليق الأخضر لجسيمات أكسيد الزنك النانوية (ZnO) وتحضير المركب الهجين (ZnO/AC)، وهو ما أكدته تحاليل حيود الأشعة السينية (XRD) ومطيافية الأشعة تحت الحمراء .(FTIR) فقد بينت النتائج احتفاظ أكسيد الزنك ببنيته البلورية السداسية عالية التبلور بعد دمجه مع الكربون النشط، مع ظهور المجموعات الوظيفية والمظاهر البنيوية المميزة للكربون، مما يؤكد نجاح تكوين المركب الهجين.

كما أظهرت دراسة كفاءة إزالة الطلب الكيميائي للأكسجين (DCO) تفوق المركب الهجين ZnO/AC على كل من أكسيد الزنك النانوي والكربون النشط المستخدمين بصورة منفردة، حيث بلغت كفاءة الإزالة 80% بعد 90 دقيقة من المعالجة، مقابل 70% و60% لكل من ZnO و ACعلى التوالي. ويُعزى هذا التحسن إلى التأثير التآزري بين خاصية الامتزاز التي يوفرها الكربون النشط والنشاط التحفيزي الضوئي لأكسيد الزنك، مما أدى إلى زيادة فعالية إزالة الملوثات العضوية وتسريع عملية المعالجة.

وأظهرت نتائج الأكسجين المذاب (DO) انخفاضاً تدريجياً مع الزمن، وكان الانخفاض أكثر وضوحاً في حالة المركب الهجين، مما يشير إلى زيادة استهلاك الأكسجين في التفاعلات التأكسدية وتكوين أنواع الأكسجين النشطة المسؤولة عن تفكيك الملوثات العضوية. كما بينت نتائج درجة الحرارة أن التغيرات الحرارية كانت طفيفة جداً طوال فترة المعالجة، مما يدل على استقرار النظام وعدم الحاجة إلى شروط تشغيل حرارية خاصة.

وبصفة عامة، تؤكد النتائج المتحصل عليها أن دمج أكسيد الزنك النانوي مع الكربون النشط أدى إلى تحسين الأداء المعالجي بشكل ملحوظ مقارنة بالمكونات المنفردة، وهو ما يبرز إمكانات المركب الهجين ZnO/AC كمادة واعدة وصديقة للبيئة لمعالجة المياه الملوثة وإزالة الملوثات العضوية بكفاءة **عالية.**

خاتمة

خاتمة:

تهدف هذه الدراسة إلى تحضير جسيمات أكسيد الزنك النانوية (ZnO NPs) بطريقة خضراء باستخدام مستخلص أوراق نبات الضرو (Pistacia lentiscus)، ودمجها مع الكربون المنشط (AC) بنسبة (50:50) للحصول على مركب هجين (ZnO/AC)، ثم مقارنة كفاءة المواد الثلاث (AC، ZnO، ZnO/AC) في إزالة الملوثات العضوية من مياه الصرف (مقاسة بالطلب الكيميائي للأكسجين DCO) عند أزمنة 30، 60، 90 دقيقة.

أظهرت نتائج XRD و FTIR نجاح التخليق والدمج. حقق المركب الهجين ZnO/AC كفاءة إزالة DCO عند 30، 60، 90 دقيقة هي 70%، 75%، 80% على التوالي، بينما حقق ZnO وحده 52%، 54%، 70% على التوالي، وحقق AC وحده (تقديرياً) 45%، 55%، 60% على التوالي. لوحظ انخفاض أسرع في الأكسجين المذاب (DO) عند استخدام المركب الهجين، وتغير طفيف جداً في درجة الحرارة (أقل من 0.5°C). يعود التفوق إلى دور الكربون في الامتزاز وتقليل إعادة اتحاد الشحنات.

الاستنتاجات والتوصيات:

- المركب الهجين (ZnO/AC) أكثر كفاءة وأسرع من ZnO وحده، حيث يصل إلى ~70% إزالة خلال 30 دقيقة فقط (مقابل 90 دقيقة لـ ZnO).
- يوصى بتحسين نسبة ZnO:AC للحصول على أعلى كفاءة.
- يوصى باختبار المركب على مياه صرف صناعية حقيقية (وليست اصطناعية) وتقييم إمكانية إعادة الاستخدام (reusability) واستقرار المحفز.
- يوصى بتصميم مفاعل ضوئي هجين للتطبيق على نطاق أوسع.

استنتاجات رئيسية:

1. نجح التخليق الحيوي لجسيمات ZnO النانوية باستخدام مستخلص أوراق الضرو (Pistacia lentiscus)، وأثبتت التحاليل (XRD ،FTIR) بلورتها ونقاوتها.

2. نجح تحضير المركب الهجين ZnO/AC بنسبة (50:50) ، مع توزيع جيد للجسيمات على الكربون.

3. تفوق المركب الهجين على ZnO وحده في جميع الأزمنة: حقق 80% إزالة DCO عند 90 دقيقة مقابل 70% لـ ZnO.

4. المركب الهجين أسرع بثلاث مرات تقريباً: وصل إلى 70% خلال 30 دقيقة بينما احتاج ZnO إلى 90 دقيقة.

5. الانخفاض الأسرع للأكسجين المذاب في المركب الهجين يؤكد نشاطاً أكسيدياً أعلى.

6. التغير الحراري طفيف جداً، مما يسهل التطبيق العملي.

توصيات:

- **تحسين النسبة:** تحسين نسبة ZnO:AC (مثل 1:2، 2:1، 1:3) للوصول إلى أقصى كفاءة.
- **دراسة الحركيات:** دراسة حركيات الامتزاز وأيزوثرمات (Langmuir، Freundlich).
- **توسيع نطاق الملوثات:** اختبار المركب على ملوثات نموذجية أخرى (فينولات، هيدروكربونات).
- **قابلية إعادة الاستخدام:** دراسة إعادة استخدام المركب لعدة دورات.
- **تأثير pH:** دراسة تأثير درجة الحموضة على الأداء.
- **تطبيق واسع:** تصميم مفاعل ضوئي هجين للتطبيق على نطاق واسع.

قائمة المراجع

المراجع

[1]. **Mahmoodi, M., et al.** (2025). Ozone-based advanced oxidation processes in water treatment: Recent advances, challenges, and perspective. *Environmental Science and Pollution Research*, 32(7), 3531–3570. https://doi.org/10.1007/s11356-024-35835-w

[2]. **NIH/PMC.** (2024). *A systematic review on health risks of water pollutants* (PMC11761733).

[3]. **Chen, C. X., et al.** (2024). Impact of nutrient deficiency on biological sewage treatment - Perspectives towards urine source segregation. *Science of the Total Environment*, 946, 174174. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174174

[4]. **NRDC (Natural Resources Defense Council).** (2024). *Water pollution: Everything you need to know*. https://www.nrdc.org/stories/water-pollution-everything-you-need-know

[5]. **Long, F., Ghani, D., Huang, R., & Zhao, C.** (2025). Versatile electrode materials applied in the electrochemical advanced oxidation processes for wastewater treatment: A systematic review. *Separation and Purification Technology*, 128725. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.128725

[6]. **Mahmood, N. A.** (2013). Photocatalytic degradation of organic pollutants.

[7]. **Shekhar, C., Khosya, R., Sharma, A. K., Thakur, K., Mahajan, D., Kumar, R., Kumar, S., & Sharma, A. K.** (2025). A systematic review on health risks of water pollutants: classification, effects and innovative solutions for conservation. *Toxicology Research*, 14(1), tfaf014. https://doi.org/10.1093/toxres/tfaf014

[8]. **Shoma, M., Rahman, M. M., & Hossain, M. M.** (2024). Comprehensive review of industrial wastewater treatment techniques. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 51064–51097. https://doi.org/10.1007/s11356-024-34584-0

[9]. **Sobana, N.** (2013). AC-ZnO for Direct Blue 53 degradation.

[10]. **SSWM.** (2024). Adsorption (Activated Carbon). *Sustainable Sanitation and Water Management Toolbox*.

[11]. **Hettithanthri, O., Nguyen, T. B. T., Fiedler, T., Phan, C., Vithanage, M., Pallewatta, S., ... & Bolan, N.** (2024). A review of oil spill dynamics: Statistics, impacts, countermeasures, and weathering behaviors. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 19(6), e3128. https://doi.org/10.1002/apj.3128

[12]. **Sharma, S.** (2025). ZnO-2CCAC/ZrO composite for high-efficiency removal of organic pollutants.

[13]. **Tchobanoglous, G., Stensel, H. D., Tsuchihashi, R., & Burton, F.** (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery* (5th ed.). McGraw-Hill Education.

[14]. **TU Delft.** (2017). *Integrating powdered activated carbon into wastewater tertiary filter*.

[15]. **US EPA (United States Environmental Protection Agency).** (2024). *Basic Information about Nonpoint Source (NPS) Pollution*. https://www.epa.gov/nps/basic-information-about-nonpoint-source-nps-pollution

[16]. **Wang, H., Gao, X., & Zuo, Y.** (2024). Research and application of water treatment technologies for emerging contaminants (ECs): A pathway to solving water environment challenges. *Water*, 16(13), 1837. https://doi.org/10.3390/w16131837

[17]. **Chang, C. F., Chang, C. Y., & Tsai, W. T.** (2004). Adsorption of dye from aqueous solution onto activated carbon. *Journal of Colloid and Interface Science*, 271(1), 22-30.

[18]. **Kazan Kaya, E. S., et al.** (2025). Application of biological and green nanomaterials in wastewater treatment: techniques for the effective removal of dyes, heavy metals, and organic pollutants. *Turkish Journal of Biology*, 49(5), 441–458. https://doi.org/10.55730/1300-0152.2760

[19]. **Rad, S. M., Ray, A. K., & Barghi, M.** (2022). Water Pollution and Agriculture Pesticide. *Water*, 14(1), 113. https://doi.org/10.3390/w14010113

[20]. **Kelly, B. C., Ikonomou, M. G., Blair, J. D., Morin, A. E., & Gobas, F. A.** (2007). Food web-specific biomagnification of persistent organic pollutants. *Science*, 317(5835), 236-239. https://doi.org/10.1126/science.1138275

[21]. **Hamdaoui, O. (Ed.).** (2025). *Innovative and Hybrid Advanced Oxidation Processes for Water Treatment*. Elsevier.

[22]. **Hübner, U., et al.** (2024). Advanced oxidation processes for water and wastewater treatment – Guidance for systematic future research. *Heliyon*, 10(9), e30402. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30402

[23]. **Satyam, S., & Patra, S.** (2025). The evolving landscape of advanced oxidation processes in wastewater treatment: Challenges and recent innovations. *Processes*, 13(4), 987. https://doi.org/10.3390/pr13040987

[24]. **Alfa Chemical.** (2022). *The adsorption principle of activated carbon* [In Arabic]. https://ar.alfa-chemical.com/info/the-adsorption-principle-of-activated-carbon-68792725.html

[25]. **PJES (Polish Journal of Environmental Studies).** (2016). Adsorption efficiency of powdered activated carbon applied to natural water. *Polish Journal of Environmental Studies*, 25(3), 1177-1184.

[26]. **ScienceDirect.** (2021). Adsorption of heavy metals by activated carbon.