رقم الترتيب :	.....
رقم التسلسل :	.....

الجمهورية الجزائرية الدّيمقراطية الشعبية

وزارة التّعليم العالي و البحث العلمي

جامعة الشّهيد حمّه لخضر بالوادي

كلّيّة العلوم الدّقيقة

قسم الكيمياء

مذكّرة مقدّمة لاستكمال متطلّبات نيل شهادة ماستر مهني

ميـدان : علـوم المــادّة

تخصّص : **كيمياء تحليلية**

إعداد الطّالبتيـن :

– سلسبيل قطّــاي

– شهـــرة حميـدي

التّحضير الأخضر و التّوصيف لمركّب نانوي هجين من أكسيد الحديد المغناطيسي (Fe_3O_4) و السّليلوز و تقييم نشاطه التّحفيزي الضّوئي و فعّاليّته المضادّة للميكروبات

Green Synthesis, Characterization, and Evaluation of the Photocatalytic and Antimicrobial Activities of a Hybrid (Fe_3O_4 / Cellulose) Nanocomposite

نوقشت يوم : 06 / 06 / 2026

أمام لجنة المناقشة المكوّنة من الأستاذات :

رشيدة زواري أحمد	**أستاذة محاضرة (أ)**	**جامعة الشهيد حمّه لخضر بالوادي**	**رئيســـةً**
حنـان دبـّـاش	**أستاذة محاضرة (أ)**	**جامعة الشهيد حمّه لخضر بالوادي**	**مشرفةً و مقرّرةً**
سميّـة شيـحي	**أستاذة محاضرة (أ)**	**جامعة الشهيد حمّه لخضر بالوادي**	**مناقشـةً**

الموسم الجامعيّ

2026-2025

الشكر والتقدير

الحمد لله أولاً و آخراً، ظاهراً و باطناً، على توفيقه و فضله، و الصلاة و السلام على من أرسله الله رحمة للعالمين، سيدنا محمد، و على آله و صحبه أجمعين.

و ها نحن نضع آخر لمساتنا على هذا العمل، و لا يسعنا إلا أن نرفع أكف الشكر لله عز و جل، الذي أمدّنا بعونه، و وفقنا لإتمام هذا الجهد المتواضع.

نتوجه بخالص عبارات الشكر و العرفان لمشرفتنا الفاضلة، الدكتورة حنان دباش، لما قدمته من دعم و توجيه كريم كانت لها بالغ الأثر في إتمام هذا العمل على الوجه الأكمل، فلها منا أسمى آيات التقدير و الاحترام.

كما نتقدّم بخالص الشكر و عظيم الامتنان إلى عضوي لجنة المناقشة الموقّرة : الدكتورة رشيدة زواري أحمد، رئيسةً، و الدكتورة سمية شيحي، مناقِشةً، لتفضّلهما بقبول مناقشة هذا البحث و تحكيمه، و ما أبدتاه من كرمٍ أكاديمي بتخصيص الوقت لقراءته و تقييمه. راجيتين أن ينال هذا العمل استحسانهما، و أن يكون محلّ تقديرهما العلمي.

و في لفتة وفاءٍ مقرونة بالدعاء، نستذكر بالرحمة و الامتنان أستاذنا القدير ورئيس قسم الكيمياء السابق، المرحوم بإذن الله "جمال عطية"، سائلين المولى عز و جل أن يتغمده بواسع رحمته، و يسكنه فسيح جناته، و يجزيه عنا خير الجزاء لما قدمه لنا و للقسم من علم و عطاء.

و إيماناً منا بأن التجربة لا تكتمل إلا ببيئتها الحاضنة، نتقدم بأسخى عبارات الشكر و الامتنان العميق، و تقديرنا البالغ للطاقم المسؤول عن المختبر: حفيظة ترعة، كنزة غانم، و كريمة بلول؛ اللواتي فتحن لنا أبواب المختبر، وذللن لنا الصعاب، ولم يبخلن علينا يوماً بتوجيهاتهن القيمة، و تسهيلاتهن الدائمة، و متابعتهن الدؤوبة طيلة فترة الجانب التطبيقي، فجزاهن الله عنا كل خير على تفانيهن و دعمهن المستمر.

و في الختام، نسأل الله أن يتقبل هذا العمل بقبول حسن، وأن يجعله خالصاً لوجهه الكريم، فله الحمد أولاً و آخراً.

الإهداء

"مَنْ قَالَ إنِّ لَهَا نَالَهَا"

انطلاقًا من هذا اليقين، أهدي هذا العمل المتواضع وثمرة الجهد والسهر:

إلى نفسي القوية.. التي لم تخذل طموحي، وآمنت بالوصول وسعت حتى بلغت المبتغى رغم وعورة الطريق.

إلى أمي.. البطلة الاستثنائية التي ربتني وحدها، وصنعت من تضحياتها سلمًا لنجاحي، إليكِ يا ضياء عيني وجنة حياتي.

إلى روح أبي العزيز.. الغائب الحاضر، الذي غيبه الموت مبكرًا ولم تغب روحه عن تفاصيلي، إليك في برزخك أهدي نجاحي.

إلى إخوتي.. سند ظهري وقوتي في هذه الحياة، الذين لم يتوانوا يومًا عن تقديم العون والرعاية لي، وكانوا لي نعم السند الدائم **كمال محمد عبد الهادي لزهر بدر الدين سعيد صابر.**

إلى أخواتي.. رفيقات الدرب ومصدر الدفء والطمأنينة، اللواتي شاركنني اللحظات بحبهنّ ودعواتهنّ وصنعنَ بوجودهنّ بهجة هذا الإنجاز **فاطمة زهرة نزيهة.**

إلى خطيبي الغالي.. الذي شاركني شغف الطموح، وتحمل معي عناء الطريق، فكان خير عونٍ ومصدر إلهام وراحة **عبد القادر.**

إلى صديقاتي.. رفيقات السهر وزهرات رحلتي الدراسية اللواتي لولا مساندتهن وضحكاتهن وسط الضغوطات لما كانت للوصول هذه اللذة **سلسبيل ريحان سلسبيل اماني اية شيماء.**

شهرة

الإهداء

﴿وَآخِرُ دَعْوَاهُمْ أَنِ الْحَمْدُ لِلَّهِ رَبِّ الْعَالَمِينَ﴾.

إلى من شقّت الطريق بعزم، وصبرت على سهر الليالي وكفاح الأيام، إلى **نفسي** التي لم تخذلني واستمرت بالنهوض كلما تعثرت الخطى...

إلى منبع العطاء والرضا، وملاذي الآمن ومصدر قوتي... إلى والديّ العزيزين

أبي الغالي **عبد القادر**، سند العمر ومنبع الفخر، و**أمي** الغالية **حبيبة** دعائي الدائم ونور قلبي. إليكما أهدي هذا الجهد ثمرةً لغرسهما الطيب، ودعواتهما التي كانت تفتح لي أبواب التوفيق.

إلى من تقاسمت معهم الأيام والذكريات، وكانوا لي نعم السند... إلى **إخوتي وأخواتي؛**

شركاء العمر والقلب **فاطمة خديجة حليمة،محمد لخضر** شكراً لوجودكم الدائم بجانبي وتشجيعكم المستمر.

إلى من يحملون لنا دفء العائلة وسند السنين، **خالاتي وأخوالي** الأعزاء.. شكرًا من أعماق القلب على كل لحظة كنتم فيها العون والسند **عبلة نجاة ابتسام هناء جمال الدين موحي الدين** ادامكم الله لنا ذخراً وفرحة لا تنتهي.

إلى من شاركني الحلم، وكان لي رفيقاً ومشجعاً في أدق التفاصيل... إلى **خطيبي** العزيز **هشام؛**

شكراً لأنك كنت دائماً تدفعني للأمام، وتؤمن بي وبتفوقي، ولأنك جعلت من هذا الطريق أقل وعورة بكلماتك ودعمك.

إلى **رفيقات الدرب** واللحظات الجميلة... إلى صديقاتي الغاليات **اية شهرة اماني شيماء نجوى؛**

الى اخوتي التي لم تلدهم امي **اميمة بسملة** انا ممتنة جداً لوجودكم في حياتي، فأنتم لستم مجرد صديقات بل أخوات.

من شاركنني ضحكات الأيام وضغوط الدراسة، شكراً لصدق محبتكنّ ووجودكنّ الذي أضاف للرحلة بهجة لا تُنسى.

إليكم جميعاً... أهدي هذا العمل

سلسبيل

الملخص:

تهدف هذه الدراسة إلى إنتاج جسيمات أكسيد الحديد المغناطيسية النانوية Fe_3O_4 و توظيفها في تحضير متراكب نانوي مغناطيسي هجين (أكسيد الحديد / سليلوز) كدعامة حيوية مستدامة. و اعتمدت الدراسة على المنهج التجريبي لتركيب هذه المواد بطريقة خضراء صديقة للبيئة باستخدام مستخلص خميرة الخبز كعامل مختزل. و تمثلت عينة الدراسة في البنى النانوية و المتراكبات المحضرة، و التي خضعت للتوصيف و التحليل باستخدام مجموعة من التقنيات المتقدمة تشمل : مطيافية الأشعة فوق البنفسجية و المرئية(UV–Vis) ، و مطيافية الأشعة تحت الحمراء(FTIR) ، و مطيافية الأشعة السينية–X) (ray، إضافة إلى التصوير بالمجهر الإلكتروني كما شملت أدوات القياس اختبارات الفعالية البيولوجية ضد ميكروبات معينة، و اختبارات كفاءة التحفيز الضوئي لتفكيك الملوثات العضوية تحت الإشعاع الضوئي لمدة 120 دقيقة.

أظهرت نتائج التوصيف أن المتراكب النانوي المصنّع يمتلك شكلاً كروياً بمتوسط حجم جسيمات يبلغ 15 نانومتر. و في تقييم النشاط المضاد للميكروبات، أظهر أكسيد الحديد النانوي النقي تفوقاً و قوة تثبيطية أعلى كمضاد لبكتيريا بقطر تثبيط وصل إلى 33 ملم، مقارنة بمتراكب (أكسيد الحديد–سليلوز) الذي بلغت قدرته التثبيطية 29 ملم عند التركيز نفسه (80 ملجم/مل) أما في مجال البيئة، فقد حقق مركب أكسيد الحديد / سليلوز الهجين كفاءة إزالة لصبغة أزرق الميثيلين بلغت 64.2 %، بينما سجل كفاءة تفكيك لصبغة وردي البنغال بلغت 49.4 % متفوقاً بذلك على الأكسيد النقي الذي سجل 48.3 %.

بناءً على ما أسفرت عنه الدراسة من نجاح مركب (أكسيد الحديد/سليلوز) كدعامة حيوية مستدامة تحافظ على الأداء التحفيزي، يُوصى بالتوسع في استخدام السليلوز و المستخلصات الحيوية كبدائل خضراء واعدة و اقتصادية في تكنولوجيا النانو.

الكلمات المفتاحية :

أكسيد الحديد، السيليلوز، التصنيع الأخضر، التحفيز الضوئي، النشاط المضاد للبكتيريا.

Abstract:

This study aims to synthesize magnetic iron oxide nanoparticles Fe_3O_4 and utilize them in preparing a hybrid magnetic nanocomposite (iron oxide / cellulose) as a sustainable biomasse support. The study adopted an experimental approach to synthesize these materials via an eco-friendly green method using baker's yeast extract as a reducing agent. The study sample consisted of the synthesized nanostructures and composites, which underwent characterization and analysis using a suite of advanced techniques, including: Ultraviolet-Visible (UV–Vis) spectroscopy, Fourier-Transform Infrared (FTIR) spectroscopy, and X-ray spectroscopy, in addition to Electron Microscopy imaging. Furthermore, the measurement tools included biological activity assays against specific microbes and evaluation of photocatalytic efficiency in degrading organic pollutants under light irradiation for 120 minutes.

The characterization results revealed that the fabricated nanocomposite possesses a spherical shape with an average particle size of 15 nm. In the antimicrobial activity evaluation, the pure iron oxide nanoparticles demonstrated superior performance and higher inhibitory power against bacteria, with an inhibition zone diameter reaching 33 mm, compared to the (iron oxide-cellulose) composite, which achieved an inhibitory capacity of 29 mm at the same concentration (80 mg/mL). Environmental-wise, the hybrid iron oxide/cellulose composite achieved a removal efficiency of 64.2% for Methylene Blue dye, while recording a degradation efficiency of 49.4% for Rose Bengal dye, thereby outperforming the pure oxide, which recorded 48.3%.

Based on the study's findings regarding the success of the (iron oxide / cellulose) composite as a sustainable biomasse support that maintains catalytic performance, it is recommended to expand the utilization of cellulose and bio-extracts as promising and cost-effective green alternatives in nanotechnology.

Key words:

iron oxide, Cellulose, Green synthesis, Photocatalysis, Antibacterial activity.

قائمة الأشكال

رقم الشكل	عنوان الشكل	الصفحة
	الفصل الأول	
1	مقياس الأحجام في الطبيعة	6
2	مقياس النانو	6
3	نطاق أحجام الجسيمات النانوية مقارنة بأحجام الهياكل الكيميائية و البيولوجية	7
4	التركيب البلوري للمغنيتيت	16
1-5	بنية الإسبينيل المكعبة ممركزة الوجه.	16
2-5	تكبير لرباعي أوجه و ثماني أوجه متجاورين يشتركان في ذرة أكسجين".	16
	الفصل الثاني	
1	تخليق الجسيمات النانوية باستخدام الكائنات الحية الدقيقة	24
2	آلية تخليق الجسيمات النانوية داخل خلايا الكائنات الحية الدقيقة	28
3	التركيب الخلوي لخميرة الخبز	29
4	دراسة مجهرية لخميرة *Saccharomyces cerevisiae*	31
5	بنية السليلوز مصادر السيليلوز	33 35
	الجزء العملي	
1	مجموعة من الصور الفوتوغرافية للبروتوكول المتبع في تحضير الجسيمات النانوية	50
2	مجموعة من الصور الفوتوغرافية لتحضير السيليلوز	51
3	مجموعة من الصور الفوتوغرافية لتحضير مركب أكسيد الحديد - سيليلوز	52
4	مجموعة من الصور الفوتوغرافية لبروتوكول التحفيز الضوئي لمركب أكسيد الحديد-سيليلوز باستخدام أزرق الميثيلين	53
5	مجموعة من الصور الفوتوغرافية للتحفيز الضوئي لأكسيد الحديد باستخدام صبغة أزرق الميثيلين	54
6	مجموعة من الصور الفوتوغرافية للتحفيز الضوئي لمركب أكسيد الحديد - سيليلوز باستخدام وردي البنغال	55
7	مجموعة من الصور الفوتوغرافية للتحفيز الضوئي لأكسيد الحديد باستخدام وردي البنغال	56
	صورة فوتوغرافية لمزارع البكتيريا	58
8	موقع حيز الأشعة تحت الحمراء في طيف الموجات الكهرومغناطيسية	59
9	صورة فوتوغرافية لجهاز الأشعة تحت الحمراء كلية العلوم الدقيقة جامعة الوادي	60
10	جهاز XRD	61
11	جهاز UV Vis	61
12	المجهر الإلكتروني الماسح SEM	62

	جزء النتائج و المناقشة	
1-a	طيف FTIR لمركب Fe_3O_4	63
1-b	طيف FTIR لمركب Fe_3O_4–Cell	64
2	طيف الأشعة فوق البنفسجية UV لعينة Fe_3O_4	66
3	طيف الأشعة فوق البنفسجية UV لمركب Fe_3O_4–Cell	69
4	أنماط حيود الأشعة السينية XRD لجسيمات Fe_3O_4 و المركب النانوي Fe_3O_4–Cellulose	71
5	نتائج SEM EDX لأكسيد الحديد النانوي SPOT 1	74
6	نتائج SEM EDX لأكسيد الحديد النانوي SPOT 2	75
7	نتائج SEM EDX لأكسيد الحديد النانوي–سيليلوز SPOT 1	79
8	نتائج SEM EDX لأكسيد الحديد النانوي SPOT 2	78
9	منحنى إزالة صبغة ازرق الميثيلين بواسطة أكسيد الحديد النانوي ومركب أكسيد الحديد-سيليلوز	81
10	منحنى إزالة صبغة وردي البنغال بواسطة أكسيد الحديد النانوي ومركب أكسيد الحديد-سيليلوز	83
11	صورة مخبرية توضح فحص النشاط ضد ميكروبي بطريقة الانتشار لأكسيد الحديد النانوي	85
12	صورة مخبرية توضح فحص النشاط ضد ميكروبي بطريقة الانتشار لأكسيد الحديد النانوي–سيليلوز	87
	قائمة الجداول	
1	المواد الكيميائية	46
1	بيانات قمم XRD لجسيمات Fe_3O_4 النانوية.	72
2	بيانات قمم XRD للمركب النانوي Fe_3O_4 / Cellulose.	72
3	نتائج اختبار الفاعلية المضادة للبكتيريا لأكسيد الحديد النانوي تحليل ومناقشة النشاط المضاد للميكروبات لأكسيد الحديد النانوي	85
4	نتائج اختبار الفاعلية المضادة للبكتيريا لمركب أكسيد الحديد النانوي-سليلوز تحليل و مناقشة النشاط الميكروبي لمركب (أكسيد الحديد/سيليلوز)	88

قائمة الاختصارات والرموز		
nm	nanometer	وحدة النانومتر
NPs	nanoparticles	الجسيمات النانوية
CVD	Chemical Vapor Deposition	الترسيب البخاري الكيميائي
PECVD	Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition	الترسيب البخاري الكيميائي المعزز بالبلازما
IONPs	Iron Oxide Nanoparticles	الجسيمات النانوية لأكسيد الحديد
Fe_3O_4	Magnetic iron oxide	أكسيد الحديد المغناطيسي
α- Fe_2O_3	hematite iron oxide	أكسيد الحديد الهيماتيت
MRI	Magnetic Resonance Imaging	التصوير بالرنين المغناطيسي
$FeCl_3$	Iron(III) chloride	كلوريد الحديد الثلاثي
FeCl	Iron(II) chloride	كلوريد الحديد الثنائي
NaOH	Sodium Hydroxide	هيدروكسيد الصوديوم
M	molarity	وحدة المولاري
pH	Power of Hydrogen	الأس الهيدروجيني
NaCl	sodium chloride	كلوريد الصوديوم
HCl	hydrochloric acid	حمض الهيدروكلوريك
mL	milliliter	وحدة المليلتر
g	gram	الغرام
C	Degree	الدرجة
RPM	Revolutions Per Minute	دورة في الدقيقة
ATCC 25922		الإشريكية القولونية
ATCC 27853		الزائفة الزنجارية
ATCC 25932		المكورات العنقودية الذهبية
MHA	Mueller-Hinton Agar	وسط مولر-هينتون أجار
SDA	Sabouraud Dextrose Agar	وسط سابورو ديكستروز أجار
FT-IR	Fourier Transform Infrared Red	مطيافية الأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه
SEM	Scanning Electron Microscopy	المجهر الإلكتروني الماسح
XRD	X-ray Diffraction.	حيود الأشعة السينية
UV-VIS	UV-Vis Spectroscopy	مطيافية الاشعة المرئية وفوق البنفسجية

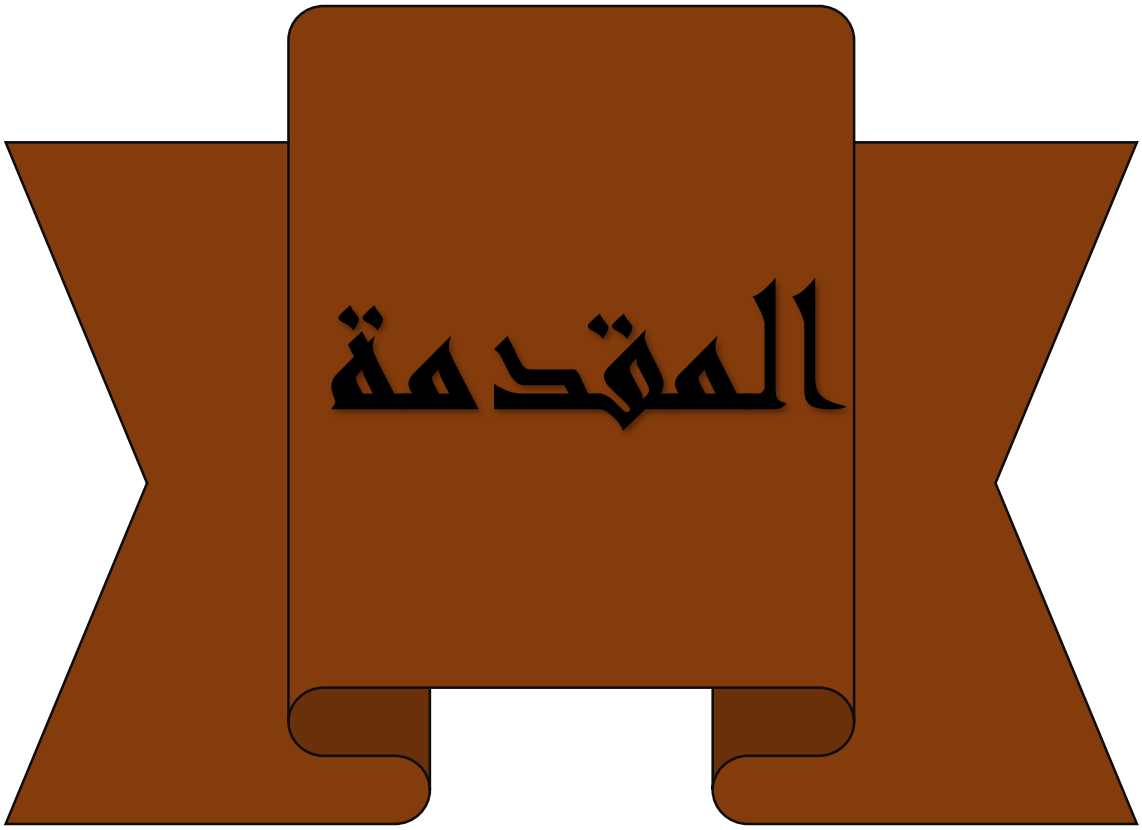
فهرس المحتويات

الشكر والتقدير	I
اهداء	II
الملخص	III
قائمة الأشكال	VI
قائمة الجداول	VII
قائمة الرموز والاختصارات	VIII
فهرس المحتويات	IX
المقدمة العامة	
المقدمة العامة	1
الفصل الأول : تكنولوجيا النانو وجسيمات اكسيد الحديد النانوية	
تمهيد	3
1- مقدمة في علم النانو	4
2- الجذور التاريخية لتقنية النانو	4
3- تعريف تقنية النانو	4
4- مقياس النانو	5
5_تعريف الجسيمات النانوية	7
6- الجسيمات النانوية المعدنية	7
6_1-الجسم النانوي (Nano-object)	8
7-الخصائص الفيزيائية والكيميائية للجسيمات النانوية	8
8-مجالات التطبيق	8
8-1- مجال الطبي	9
8-2-مجال الزراعي	9
8-3-مجال الطاقة	9
9-الأهمية العالمية لتكنولوجيا النانو	10
10- تقنيات تخليق المواد النانوية	10
10-1- أسلوب الأعلى إلى الأسفل (Top-down approach)	10
10-2- الأسلوب من الأسفل إلى الأعلى (Bottom-up approach)	11
10-2- ا)الطرق الفيزيائية	11
10-2 -ب) الطرق الكيميائية	12
11- التخليق الحيوي	13

12-تعريف اكاسيد الحديد	14
13- انواع اكاسيد الحديد	14
14-ذرة الحديد	14
15-أكسيد الحديد المغناطيسي(Fe_3O_4)	15
16-كلوريد الحديد	17
الفصل الثاني (II): دراسة وصفية لخميرة *Saccharomyces cerevisiae* والسليلوز	
1- تمهيد	23
2- تخليق الجسيمات النانوية باستخدام الكائنات الحية الدقيقة	23
3- تعريف الخميرة	24
4-اصل وتاريخ خميرة*Saccharomyces cerevisiae*	25
5-التصنيف العالمي لخميرة*Saccharomyces cerevisiae*	26
6-الية تخليق الجسيمات النانوية باستخدام الكائنات الحية الدقيقة	26
ا-الالية خارج الخلية	27
ب-الالية داخل الخلايا	27
7-التركيب الخلوي لخميرة*Saccharomyces cerevisiae*	28
8-البنية المجهرية والكيميائية لخميرة الخبز	29
9-آلية إنتاج الطاقة	31
ا-المسار الهوائي	31
ب-المسار اللاهوائي	31
الجزء الثاني السليلوز	
1-تعريف السليلوز	32
2-بنية السليلوز	32
3-مصادر السليلوز	33
ا-مصادر الكائنات الدقيقة	34
ب-المصادر الحيوانية	34
4-الخصائص الفيزيائية و الكيميائية للسليلوز	35
5-السليلوز النانوي	37
6-أنواع السليلوز النانوي	37
7-الخصائص الميكانيكية والكيميائية للسليلوز النانوي	39
8-السليلوز كدعامة في المواد المركبة	39
9-الوظائف الكيميائية	40
10-الاستدامة و المسامية	40

الفصل الثالث (II): الطرق و الأدوات المستعملة	
1-المواد و الأجهزة	45
1-1 المواد	45
1-2 المواد الكيميائية (Chemical Reagents)	45
2-الأجهزة والمعدات (Instrumentation)	46
3-تحضير المحاليل	47
3-1مستخلص الخميرة	47
3-2مستخلص السيليلوز	47
4-التخليق الأخضر لجسيمات أكسيد الحديد النانوية(IONPs)	48
5-تحضير المركب النانوي الهجين(Fe3O4-Cellulose Composite)	48
6-بروتوكول تحضير السيليلوز	50
7-بروتوكول تحضير مركب أكسيد الحديد – سيليلوز	51
8-التحفيز الضوئي	53
9-بروتوكول النشاط المضاد للبكتيريا	57
10-أساليب التحليل و الوصف العملي	59
10-1مطيافية الأشعة تحت الحمراء	59
10-2حيود الأشعة السينية XRD	60
10-3مطيافية الأشعة المرئية و فوق البنفسجية UV-VIS	61
10-4المجهر الإلكتروني الماسحSEM	62
الفصل الرابع (II): النتائج و مناقشتها	
1- مناقشة و تحليل طيف الأشعة تحت الحمراء لمركب أكسيد الحديد-سيليلوز	67
2- مناقشة و تحليل طيف الأشعة فوق البنفسجية لعينتي Fe_3O_4 و مركب أكسيد الحديد-سيليلوز	68
3-تحليل حيود الأشعة السينية لعينتي Fe_3O_4 و مركب أكسيد الحديد-سيليلوز	71
4-دراسة و مناقشة نتائج التحليل المجهري و الإلكترونيSEM EDX	73
أولا أكسيد الحديد النانوي	74
ثانيا مركب أكسيد الحديد-سيليلوز	76
5-مناقشة و تحليل القدرة على إزالة صبغة أزرق الميثيلين عبر التحفيز الضوئي	83
6-مناقشة وتحليل القدرة على إزالة صبغة وردي البنغال عبر التحفيز الضوئي	84
تقييم القدرة المضادة للبكتيريا	85
أولا أكسيد الحديد النانوي	85

ثانيا مركب أكسيد الحديد –سيليلوز	87
الخاتمة	


المقدمة

شهد العصر الحديث طفرة علمية وتقنية متسارعة أحدثت ثورة في مختلف المجالات الصناعية والطبية والبيئية، حيث اتجهت الأبحاث العلمية نحو السيطرة على المادة وتطويعها على مقاييس دقيقة جداً لتحقيق كفاءة أعلى وخصائص وظيفية متميزة. وفي ظل هذا التطور، برزت تقنية النانو كإحدى أهم الركائز التي يعول عليها العلم الحديث في إيجاد حلول مبتكرة للعديد من التحديات المعاصرة.

يُعدّ تطويرُ أساليب موثوقة وفعّالة لإنتاج جسيمات نانوية أحادية التشتت ذات خصائص محددة ومضبوطة من أبرز الأهداف في مجال تقنية النانو الحديثة. وتتنوع هذه الطرق بين الفيزيائية و الكيميائية و البيولوجية، بالإضافة إلى التقنيات الهجينة التي تدمج المواد الحيوية مع المؤثرات الفيزيائية. و رغم أن الطرق التقليدية تسمح بتصنيع كميات ضخمة في وقت وجيز، إلا أنها غالباً ما تكون باهظة التكاليف و معقدة التنفيذ، فضلاً عن المخاطر البيئية المرتبطة بها؛ لذا برز في السنوات الأخيرة اهتمام متزايد بـ"تكنولوجيا النانو الخضراء" و التخليق الحيوي، سعياً للحد من الآثار السلبية على البيئة عبر استخدام كواشف أقل سمية و تقليل فرص التلوث الثانوي، مع إنتاج جسيمات تتميز باستقرار و توافق حيوي عالٍ بفضل تغليفها الطبيعي بعوامل تغليف بيولوجية (Capping agents).

و في هذا السياق، تبرز المزارع الفطرية بمختلف أنواعها كأجسام بيولوجية واعدة للغاية؛ حيث تكمن ميزتها التنافسية في قدرتها العالية على إفراز مجموعة واسعة من الجزيئات البروتينية و الإنزيمات النشطة و تراكمها بكميات كبيرة. وقد أظهرت الدراسات قدرة الفطريات

الفائقة على تشكيل نطاق واسع من الجسيمات النانوية، بما في ذلك المعادن و أكاسيد المعادن و الجسيمات المركبة. و يمكن تقسيم هذه الطرق الحيوية إلى نوعين: الأول يعتمد على استخدام المزارع الحية كـ "مصانع نانوية"، و الثاني يعتمد على استخدام المستخلصات أو النواتج الأيضية المنفردة، و هي الطريقة التي تسهل عملية التخليق بشكل كبير دون الحاجة لتدمير الخلايا أو تعقيد عمليات الفصل.

إن الخصائص الفيزيائية و الكيميائية للجسيمات النانوية ترتبط ارتباطاً وثيقاً بحجمها و شكلها و تضاريسها السطحية، و من الضروري أن تكون هذه الجسيمات متجانسة و مقاومة للتكتل. و بما أن هذه الخصائص تعتمد بشكل مباشر على سلالة الكائن المستخدم و ظروف التفاعل مثل درجة الحرارة والرقم الهيدروجيني (pH) و تركيز المادة السليفة، فإن التحدي الأكبر في التكنولوجيا الحيوية النانوية يكمن في تطوير طرق تمنح تحكماً دقيقاً في هذه المعايير. و بناءً على ذلك، تهدف هذه الدراسة إلى المساهمة في فهم تأثير هذه الظروف على خصائص الجسيمات الحيوية الناتجة، و توظيفها في تطبيقات بيئية فعالة.

و في إطار السعي لتحسين كفاءة هذه الجسيمات الحيوية و تسهيل استرجاعها و استقرارها، قمنا في هذا العمل بتشكيل متراكب حيوي نانوي (Bionanocomposite) بدمج جزيئات أكسيد الحديد النانوية المصنعة حيوياً مع مادة السليلوز. حيث يعمل السليلوز كركيزة بنيوية توفر مساحة سطحية واسعة و مجموعات وظيفية فعالة، مما يساهم في منع تكتل الجزيئات النانوية و تعزيز قدرتها الامتزازية و التحفيزية. يهدف هذا الدمج الاستراتيجي بين بوليمر

طبيعي وجسيمات نانوية حيوية إلى ابتكار مادة مستدامة و عالية الكفاءة لتطبيقات معالجة المياه، و بالتحديد في عملية التفكيك الضوئي للملوثات العضوية مثل صبغة أزرق الميثيلين.

الجزء النظري

الفصل الاول

تكنولوجيا النانو وجسيمات أكسيد الحديد النانوية

تمهيد :

تُعَدّ تقنية النانو من أهم التطورات العلمية و التكنولوجية في مختلف المجالات خلال السنوات الأخيرة، إذ تُمثّل ثورة صناعية في القرن الحادي و العشرين. و قد استقطبت هذه التقنية اهتمام معظم الحكومات و المؤسسات الإنتاجية الكبرى حول العالم [1].

يُعدّ علم النانو و تقنية النانو من أكثر المجالات العلمية الواعدة. و كلمة "نانو" مشتقة من الكلمة اليونانية "نانوس" التي تعني "صغير"، في إشارة إلى النانومتر، و هو جزء من مليار جزء من المتر (10^{-9} متر).

توجد طرق متعددة لتحضير الجسيمات النانوية، من بينها الطرق الفيزيائية و الكيميائية و البيولوجية. و تُعتبر الطرق الفيزيائية و الكيميائية عمومًا فعّالة في الحصول على جسيمات نانوية ذات حجم متجانس و استقرار عالٍ على المدى الطويل، إلا أنها غالبًا ما تكون مكلفة و قد تُنتج مواد سامة تُشكّل خطرًا على البيئة.

لذلك، يُعدّ التوجه نحو الطرق الصديقة للبيئة، و خاصة التحضير الحيوي للجسيمات النانوية باستخدام الكائنات الدقيقة أو المستخلصات النباتية، خيارًا واعدًا لتحقيق إنتاج نظيف و أكثر أمانًا و ملاءمة من الناحية الاقتصادية و البيئية [2] .

1- مقدمة في علم النانو (Nanoscience) :

يُعنى **علم النانو** بدراسة المبادئ الأساسية للجزيئات و المركبات التي لا يتجاوز حجمها **100 نانومتر** . ويركز هذا العلم على استخدام المواد متناهية الصغر لدراسة الظواهر المتعلقة بتقليل الأبعاد، من خلال قياس خصائصها **الكيميائية و الفيزيائية**، وتحقيق **تحكم دقيق في إنتاج المادة** عبر التحكم في عدد الذرات المكونة للجسيمات. و مع تغيّر عدد الذرات في الجسيمات، تتغير خصائص المادة بشكل ملحوظ، مما يمنحها سلوكًا فريدًا يختلف عن المواد ذات الأحجام الأكبر [3] .

2- الجذور التاريخية لتقنية النانو :

على الرغم من استكشاف المفاهيم الأساسية لتقنية النانو منذ منتصف القرن العشرين، و تحديدًا في أواخر الستينيات، كانت هذه المفاهيم تُعتبر **خيالًا علميًا** أو مستحيلة التحقيق في ظل الظروف العلمية السائدة آنذاك.

و من أبرز الدراسات التي تناولت مفهوم تقنية النانو، **محاضرة ريتشارد فاينمان** الحائز على جائزة نوبل عام 1959 بعنوان "هناك الكثير في الأسفل " There's Plenty of Room at the Bottom" و التي وصف فيها العالم الصغير المدهش و إمكانياته غير المحدودة.

لاحقًا، أدخل الفيزيائي الياباني **نوريو تانيغوتشي** مصطلح "تقنية النانو" رسميًا إلى الأوساط العلمية عام 1974. و في الممارسة العالمية، يُستخدم مصطلح "**تقنية النانو** "للإشارة إلى جميع الأساليب المستخدمة في **البحث و التصميم و الإنتاج للمواد و الأجهزة النانوية** [4] .

3- تعريف تقنية النانو :

تشير **تكنولوجيا النانو** إلى العلم الذي يهتم بتصميم و تصنيع و استغلال الهياكل و الأجهزة التي تحتوي على مكون واحد أو أكثر بحجم يقارب **100 نانومتر أو أقل** (أي جزء من مليار من المتر)، و ذلك

من خلال التحكم الدقيق في الشكل و الحجم على هذا المقياس. و بفضل هذا التحكم، تكتسب المواد خصائص غير متوقعة، و غالبًا ما تختلف عن خصائص نفس المواد على المستويات الميكروية أو الكلية.

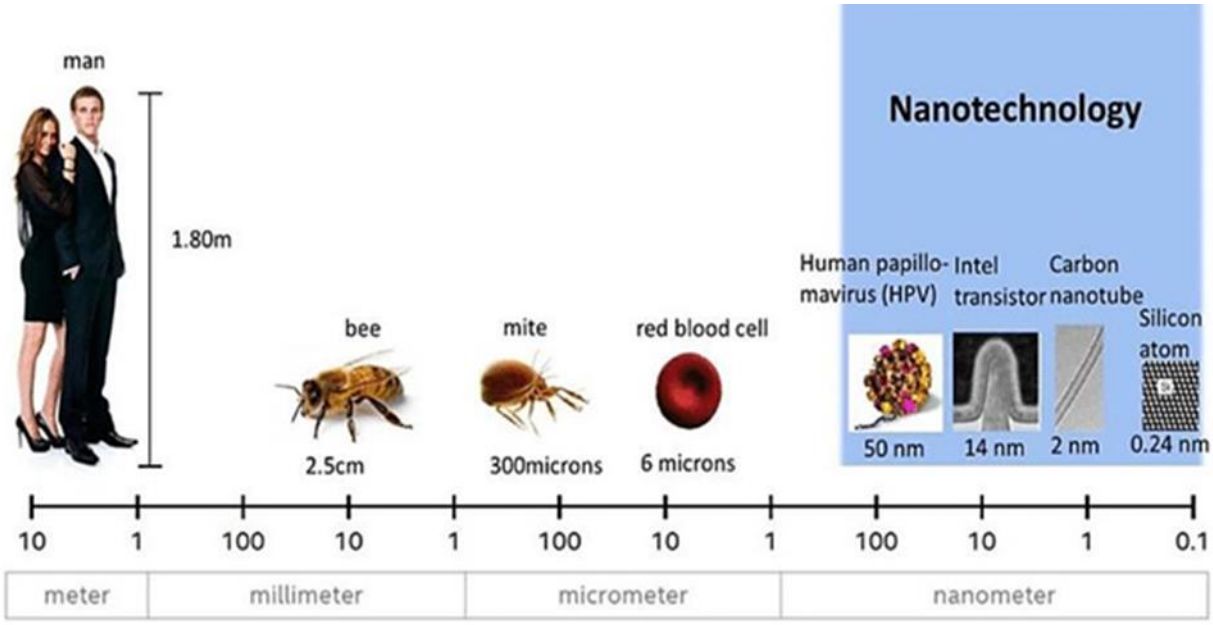
أصبحت تكنولوجيا النانو واحدة من أكثر التقنيات الواعدة، نظرًا لإمكانية تطبيقها في مختلف مجالات العلوم. [2] و يُعدّ الاعتراف بها **تقنية ثورية** تُحفّز الابتكار العلمي و تُسهم في تحقيق فوائد كبيرة للمجتمع. و تظهر تطبيقاتها في مجالات متعددة، مثل **الطب، الحوسبة، و الهندسة** و غيرها من المجالات الأخرى.

و تتمثل تكنولوجيا النانو في استغلال المعرفة و التحكم في المادة ضمن أبعاد تتراوح بين **1 و 100 نانومتر**، مما يسمح بتطوير تطبيقات جديدة اعتمادًا على الخصائص الفيزيائية و الكيميائية المميزة لهذه المواد [5].

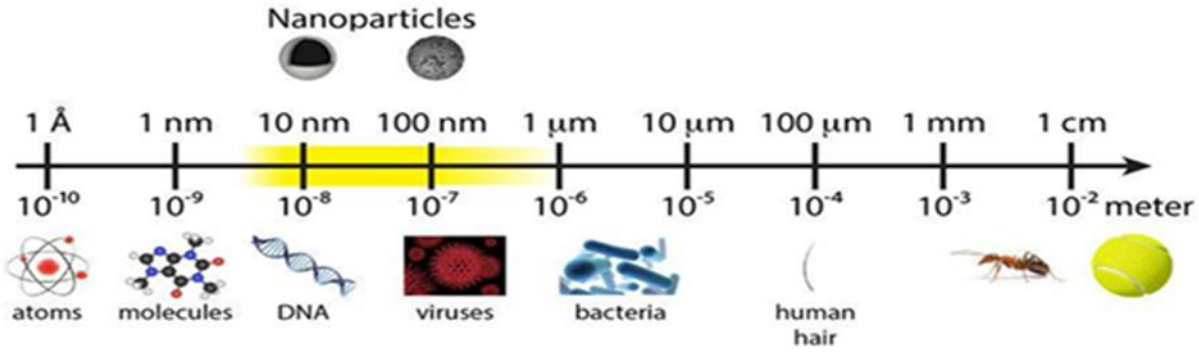
4-مقياس النانو (Nanoscale) :

هو نطاق يُستخدم لوصف الأطوال المتناهية في الصغر، حيث يُعدّ **النانومتر (nm)** وحدة قياس تعادل جزءًا من مليار جزء من المتر **10^{-9} متر**، و يُستخدم هذا المقياس لوصف المواد و الهياكل التي يتراوح حجمها بين **1 و 100 نانومتر** [6] .

يوضح الشكل أدناه مقياس الأحجام في الطبيعة، حيث يمتد من الأجسام العيانية المرئية بالعين المجردة إلى التراكيب متناهية الصغر على المستوى النانوي.



الشكل 1: مقياس الأحجام في الطبيعة[6]



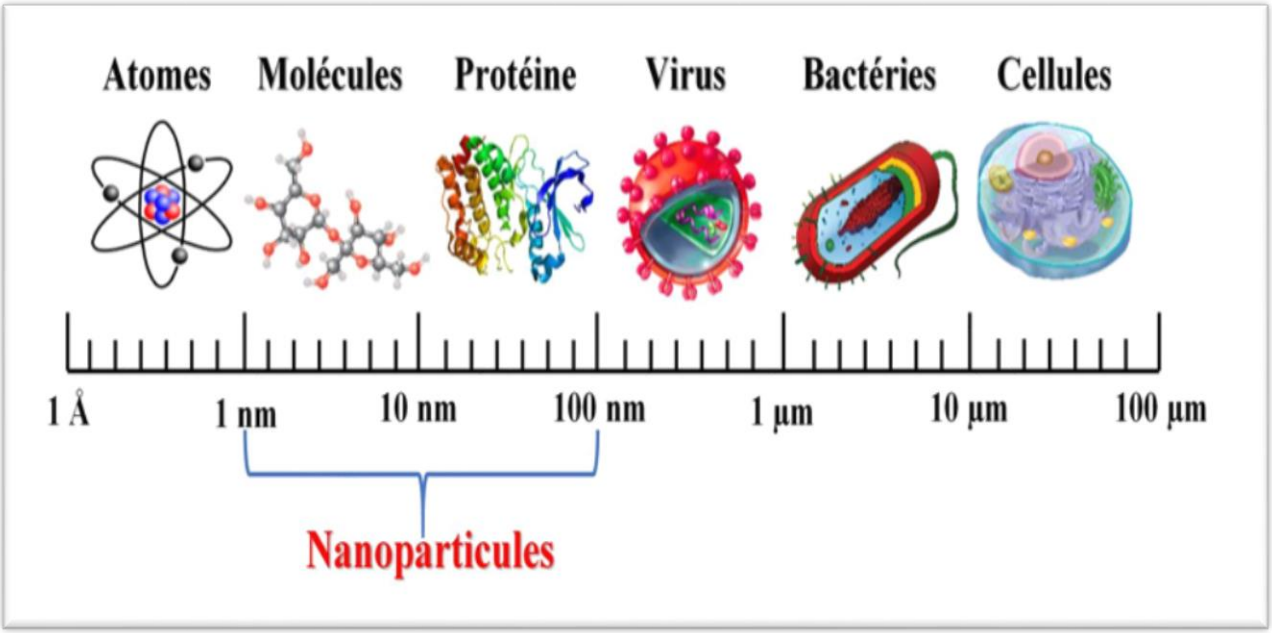
الشكل2: مقياس النانو [6]

5_تعريف الجسيمات النانوية :

بشكل عام، تُعرَّف **الجسيمات النانوية (NPs)** بأنها جسيمات يتراوح قطرها بين **1 و 100 نانومتر** (أي ≥ 0.1 ميكرومتر)، و تعتمد خصائصها الفريدة بشكل رئيسي على حجمها، مما يمنحها سلوكًا فيزيائيًا وكيميائيًا مميزًا مقارنةً بالمواد في حالتها السائبة [7].

6- الجسيمات النانوية المعدنية :

تُدرس الجسيمات النانوية المعدنية على نطاق واسع نظرًا لخصائصها الفيزيائية و الكيميائية الفريدة التي تتأثر بشكل مباشر بحجمها و شكلها. يمكن إنتاج هذه الجسيمات عبر عدة طرق، تشمل العمليات الكيميائية، الفيزيائية، و البيولوجية. غالبًا ما تتطلب التقنيات الكيميائية و الفيزيائية التقليدية استخدام مواد كيميائية سامة، إضافة إلى تكلفة مرتفعة و اعتمادها على أجهزة معقدة. في المقابل، يُعتبر التخليق البيولوجي أو البيئي للجسيمات النانوية بديلاً صديقًا للبيئة، حيث يتم باستخدام كيانات حية مثل النباتات، الطحالب، أو البكتيريا، مما يقلل من المخاطر البيئية و الصحية المرتبطة بالطرق التقليدية[7].



الشكل 3 : نطاق أحجام الجسيمات النانوية مقارنة بأحجام هياكل الكيميائية و البيولوجية[7]

6_1 الجسم النانوي (Nano-object):

هو جسم ذو أبعاد خارجية تقع ضمن المقياس النانوي. و بدلًا من استخدام مصطلح عام مثل "جسيم نانوي"، يُستعمل غالبًا توصيف أكثر دقة حسب الشكل الهندسي ؛ مثل قضيب نانوي (Nanorod) أو صفيحة نانوية (Nanosheet) ، و ذلك عندما تختلف أبعاد المحاور (الطول، العرض، السمك) بشكل ملحوظ [8] .

7-الخصائص الفيزيائية والكيميائية للجسيمات النانوية :

الجسيم النانوي هو جسيم يمكن أن يتخذ أي شكل، و يتميز بوجود بُعد يقل عن 100 نانومتر. على هذا المقياس، تختلف بعض القوانين الفيزيائية والكيميائية عن تلك المعروفة في الحالة الميكروية أو الماكروسكوبية.

من أبرز هذه الاختلافات انخفاض درجة انصهار المعادن عند تقليل حجم الجسيمات إلى المقياس النانوي. و يعود ذلك إلى أن تقليل قطر الجسيم يزيد نسبة الذرات الموجودة على سطح الجسيم مقارنةً بعدد الذرات في داخله، مما يقلل الطاقة اللازمة لانصهاره. نتيجة لذلك، يزداد التشتت (F) للجسيمات، ومع انخفاض هذا التشتت، تزداد المساحة السطحية النوعية [9]، مما يعزز خصائصها التفاعلية و الكيميائية.

$$F = \frac{\text{Nombre d'atomes de coeur}}{\text{Nombre d'atome total}}$$

8-مجالات التطبيق :

تُستخدم الجسيمات النانوية في ثماني مجالات رئيسية : الطب، الفضاء، الصناعة، الإلكترونيات و وسائل الاتصال، الزراعة و الغذاء، الطاقة، البيئة، و السلع الاستهلاكية [10] .

8-1 /المجال الطبي :

تلعب الجسيمات النانوية دورًا مهمًا في الطب الحيوي، حيث تُستخدم لأغراض متعددة مثل الحماية من الكائنات الدقيقة الضارة، التصوير البيولوجي، نقل الأدوية، علاج السرطان، التشخيص الطبي.

وتستند هذه التطبيقات إلى خصائصها الفريدة، مثل كونها عازلة، بصرية، مضادة للميكروبات والأكسدة، مانعة للانتشار، متوافقة حيويًا، مستقرة وسهلة التلاعب [11] .

8-2 /المجال الزراعي:

تتيح تكنولوجيا النانو تحسين الإنتاج الزراعي و معالجة الأغذية و تغليفها، و تطهير المياه و ضمان سلامة الغذاء، إضافة إلى تنظيف البيئة و تطوير المحاصيل و حماية النباتات. و من خلال أنظمة توصيل الأدوية، و توصيل الجينات المستهدفة، و النباتات و الحيوانات المحسنة وراثيًا، و المواد النانوية، يمكن زيادة الإنتاجية الزراعية بشكل كبير [5] .

8-3 /مجال الطاقة :

تساهم تكنولوجيا النانو في تعزيز مصادر الطاقة البديلة وتحسين كفاءة استخدام المصادر الحالية لتلبية الطلب العالمي المتزايد على الطاقة، عبر:

زيادة كفاءة إنتاج الوقود من المواد الخام القائمة على النفط من خلال التحفيز المحسن و تقليل الاحتكاك، مما يقلل استهلاك الوقود في السيارات و محطات الطاقة،

استخدام أغشية و أجهزة تنقية مصنوعة من أنابيب الكربون النانوية لإزالة ثاني أكسيد الكربون من العوادم،

تطوير خلايا شمسية نانوية أرخص في الإنتاج و أسهل في التركيب، لتحويل ضوء الشمس إلى كهرباء بكفاءة أكبر[5].

9-الأهمية العالمية لتكنولوجيا النانو :

1) تكمن أهمية تكنولوجيا النانو في قدرتها الاستثنائية على تقديم حلول فعّالة و مستدامة لمشكلات و تحديات عديدة تواجه البشرية، عبر تطبيقاتها المتنوعة في مختلف مجالات الحياة .

2) يُلاحظ قلة الأبحاث في مجال تكنولوجيا النانو في العالم العربي مقارنةً بالاهتمام العالمي بها .

3) تأتي الاستفادة من التوصيات الصادرة عن الندوات و المؤتمرات العلمية، مثل المؤتمر الدولي لتكنولوجيا النانو (الفرص و التحديات) 2008.

4) نظرًا لما تقدمه تكنولوجيا النانو من فوائد و مخاطر للمجتمع و البيئة والصحة العامة، فإنها تتطلب مستوى عالٍ من الوعي الفردي والجماعي لمواجهة التحديات المرتبطة بهذه الثورة التكنولوجية . [12]

10- تقنيات تخليق المواد النانوية :

10-1- أسلوب الأعلى إلى الأسفل (Top-down approach) :

يقوم أسلوب **الأعلى إلى الأسفل** على تفتيت أو تقطيع المواد كبيرة الحجم للحصول على جسيمات نانوية. في هذا النهج، تكون المادة الأولية عادةً في الحالة الصلبة، و يتم تقليص أبعادها تدريجيًا حتى الوصول إلى المقياس النانوي.

تعتمد هذه الطريقة بشكل أساسي على التقنيات الفيزيائية التي من أبرزها :

- **الطرق الميكانيكية :** و تشمل عمليات القطع، النقش، و الطحن، خاصة الطحن بالكرة، حيث يتم تقليل حجم الجسيمات عبر التأثيرات الميكانيكية المتكررة .

- **الطرق الطبوغرافية (الليثوغرافيا) :**مثل الطباعة الضوئية (Photolithography) و طباعة شعاع الإلكترون(Electron beam lithography) ، و التي تعتمد على تشكيل المادة بدقة عالية على المستوى النانوي [6] .

و رغم فعالية هذا الأسلوب في التحكم في شكل و أبعاد الجسيمات، إلا أنه قد يعاني من بعض القيود، مثل ارتفاع التكلفة، و صعوبة الحصول على توزيع حجمي متجانس، إضافةً إلى احتمال حدوث عيوب في البنية البلورية.

10-2- الأسلوب من الأسفل إلى الأعلى (Bottom-up approach) : [6]

يشير الأسلوب **من الأسفل إلى الأعلى** إلى بناء المواد النانوية انطلاقًا من وحدات صغيرة جدًا، مثل الذرات أو الجزيئات، حيث يتم تجميعها تدريجيًا لتكوين بنى نانوية منظمة. و يتم ذلك عبر عمليات ترسيب متتابعة (ذرة بعد ذرة أو جزيء بعد جزيء)، مما يؤدي إلى ظاهرة **التجميع الذاتي** (Self-assembly)، حيث تتشكل تجمعات نانوية قد تنتظم لاحقًا لتكوين طبقات أحادية على سطح الركيزة.

في هذا الأسلوب التصاعدي، تكون المادة الابتدائية عادة في الحالة الغازية أو السائلة، و يُعد هذا الأسلوب أكثر دقة من حيث التحكم في البنية و التركيب على المستوى الذري.

ينقسم هذا الأسلوب التصاعدي إلى نوعين رئيسيين:

أ)الطرق الفيزيائية :

تشمل مجموعة من التقنيات التي تعتمد على تحويل المادة إلى طور بخاري ثم ترسيبها، مثل:

- الترسيب البخاري الفيزيائي (PVD) ،
- التبخر (الحراري أو باستخدام شعاع الإلكترون)،
- الرش (Sputtering) ،
- قوس البلازما،
- الإزالة أو الاستئصال بالليزر (Laser ablation) .

ب)الطرق الكيميائية :

تعتمد على تفاعلات كيميائية تؤدي إلى تكوين المادة النانوية، و من أهمها :

- الترسيب البخاري الكيميائي (CVD) ،
- الترسيب البخاري الكيميائي المعزز بالبلازما (PECVD) ،
- الترسيب الكهربائي،
- طريقة السول–جيل (Sol-gel) ،
- التحلل الحراري .

ويتميز هذا الأسلوب بإمكانية الحصول على مواد نانوية ذات نقاوة عالية و توزيع حجمي متجانس، إلا أنه قد يتطلب تحكمًا دقيقًا في شروط التفاعل.

طريقة السول–جيل (Sol–Gel) :

تُعدّ طريقة **السول–جيل** تقنية كيميائية رطبة تعتمد على تحويل محلول غروي (Sol) إلى شبكة صلبة مسامية (Gel). تبدأ هذه العملية بتفاعل **التحلل المائي (Hydrolysis)** يليه تفاعل **التكاثف (Condensation)**، مما يؤدي إلى تكوين روابط كيميائية ثلاثية الأبعاد تُشكّل بنية صلبة متماسكة . [13]

تتميّز هذه الطريقة بعدة مزايا، من أهمها:

- تحقيق تجانس كيميائي عالٍ على المستوى الجزيئي،
- إمكانية التحكم في البنية المسامية للمادة،
- القدرة على تحضير مواد نقية وبدرجات حرارة منخفضة نسبيًا مقارنة بطرق أخرى.

الطريقة الحرارية المائية (Hydrothermal) :

تعتمد الطريقة **الحرارية المائية** على تصنيع المواد النانوية في أوساط مائية داخل مفاعلات مغلقة تُعرف بالأوتوكلاف(Autoclaves) ، و ذلك تحت ضغط عالٍ و درجات حرارة تتراوح عادةً بين 100 و300 درجة مئوية.

تُتيح هذه الظروف التفاعلية الخاصة الحصول على مواد نانوية ذات درجة بلورية عالية (Crystallinity)، مع إمكانية التحكم في الشكل البنيوي للجسيمات، مثل الأنابيب النانوية و الأسلاك النانوية. كما تتميز هذه الطريقة بإمكانية تحضير المواد دون الحاجة إلى درجات حرارة حرق مرتفعة، مما يجعلها مناسبة لإنتاج مواد ذات خصائص محددة بدقة [13].

11-التخليق الحيوي:

يعرَّف التخليق الحيوي عمومًا بأنه عملية إنتاج مواد أو جزيئات معقدة من الكائنات الحية أو مشتقاتها، مثل البكتيريا والفطريات والخمائر والإنزيمات. يُمثل هذا النهج بديلاً بيئيًا ومستدامًا للطرق الكيميائية والفيزيائية التقليدية. فهو صديق للبيئة، وغير سام، وآمن للاستخدام، كما أنه يُقلل من النفايات الخطرة الناتجة عن عمليات التصنيع. غالبًا ما تعتمد آلية هذه العملية على الأنشطة الإنزيمية داخل الخلايا أو خارجها، حيث تُحوّل الجزيئات الحيوية، مثل البروتينات والسكريات والإنزيمات، المواد الخام (مثل أيونات المعادن) إلى منتجات نهائية ذات خصائص محددة. بفضل هذه المزايا، يتمتع التخليق الحيوي بتطبيقات عديدة، لا سيما في المجالات الطبية والصناعية والزراعية، وخاصة في عمليات المعالجة الحيوية لإزالة الملوثات البيئية بفعالية[14].

12-تعريف اكاسيد الحديد :

تُعدّ أكاسيد الحديد من المركبات المعدنية الشائعة في الطبيعة، كما يمكن تحضيرها صناعيًا في المختبر بطرق مختلفة. و تتكون هذه المركبات من عنصري الحديد و الأكسجين، و تتميّز بتعدد بنياتها البلورية و اختلاف خصائصها البنيوية و المغناطيسية، مما يجعلها ذات أهمية كبيرة في العديد من التطبيقات العلمية و التكنولوجية [15].

13-أنواع أكاسيد الحديد :

توجد الجسيمات النانوية لأكاسيد الحديد (Iron Oxide Nanoparticles) (IONPs) في عدة أطوار بلورية، من أبرزها : الهيماتيت (hematite)(α-Fe_2O_3) ، و المغنيتيت (magnetite) (Fe_3O_4)،

و الماغيميت (maghemite) $(\gamma - Fe_2O_3)$. و تتميّز هذه الأنواع باختلاف خصائصها الفيزيائية، خاصةً الخصائص المغناطيسية.

يُعدّ كلّ من المغنيتيت و الماغيميت من أكثر الأنواع إثارةً للاهتمام، نظرًا لامتلاكهما خصائص مغناطيسية قوية (فيرومغناطيسية أو فائقة المغناطيسية على المستوى النانوي)، مقارنةً بالهيماتيت الذي يُظهر سلوكًا مغناطيسيًا أضعف [16] و سيتم في هذا العمل التركيز بشكل خاص على **المغنيتيت** (Fe_3O_4)، نظرًا لأهميته الكبيرة في التطبيقات المختلفة، خاصة في المجالات الطبية و البيئية.

14-ذرة الحديد :

يُعدّ الحديد عنصرًا انتقاليًا يملك العدد الذري $(\boldsymbol{Z = 26})$، و تكون بنيته الإلكترونية على الشكل : $\boldsymbol{[Ar]3d^6 4s^2}$. و يتميّز الحديد بإظهار حالتي أكسدة رئيسيتين و مستقرتين هما $\boldsymbol{(+2)}$و$\boldsymbol{(+3)}$.

يُعتبر الحديد عنصرًا ذا أهمية بيئية كبيرة نظرًا لوفرة وجوده في القشرة الأرضية، حيث يوجد في التربة بشكل أساسي على هيئة أكاسيد حديدية. كما يمكن أن ينتقل بسهولة في المياه الطبيعية على شكل مركبات جزيئية أو غروانية.

و تلعب عمليات ذوبان أكاسيد الحديد في الظروف الطبيعية دورًا مهمًا في دورة الحديد البيوجيوكيميائية، حيث تتأثر هذه العمليات بعدة عوامل، من بينها التفاعلات الحمضية-القاعدية، و تفاعلات الأكسدة-الإرجاع، إضافة إلى النشاط الميكروبي و التفاعلات الكيميائية الضوئية [17].

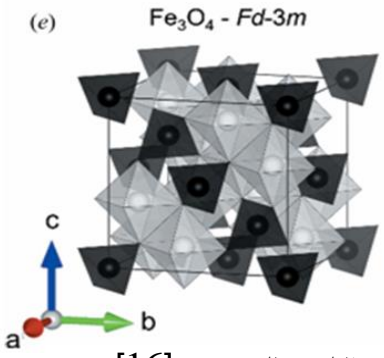
15-أكسيد الحديد المغناطيسي (Fe_3O_4) :

يُعدّ أكسيد الحديد المغناطيسي (Fe_3O_4) من أكثر أكاسيد الحديد شيوعًا، و يتميز ببنية بلورية من نوع **السبينيل العكسي (Inverse spinel)** ذات شبكة مكعبة. في هذه البنية، يشكّل الأكسجين شبكة مكعبة

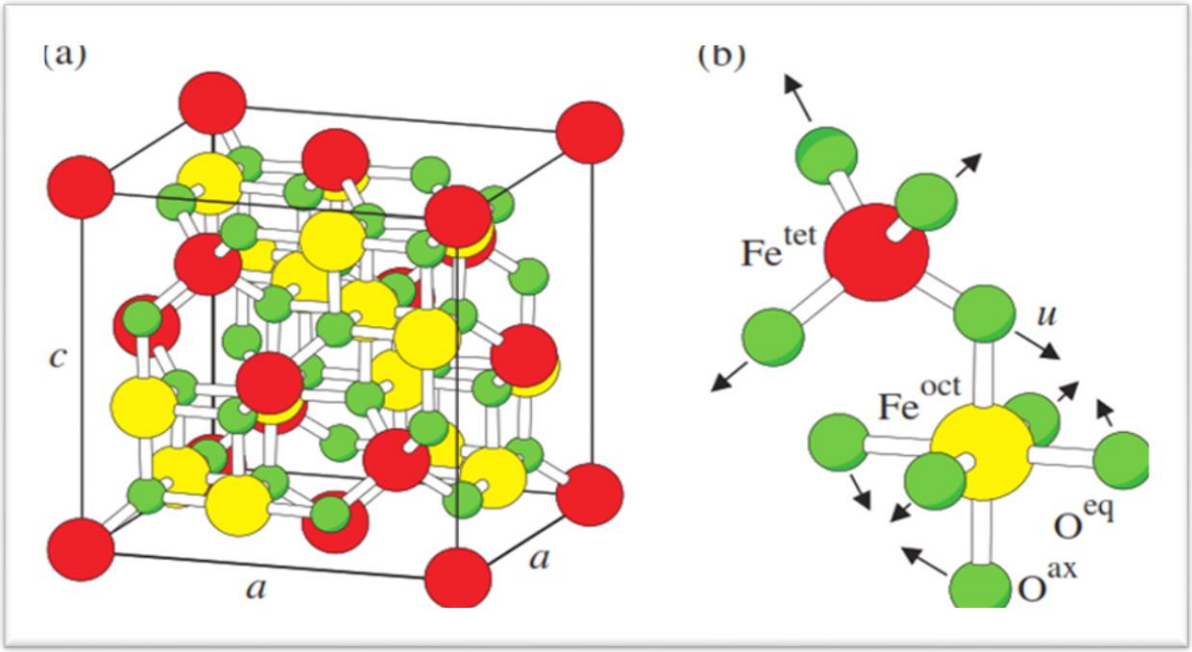
متمركزة على الوجوه (FCC)، بينما تتوزع كاتيونات الحديد (Fe^{2+}) و(Fe^{3+}) بين المواقع رباعية السطوح و المواقع ثمانيّة السطوح داخل الشبكة البلورية.

كما يتميز سطح (Fe_3O_4) بوجود حالات أكسدة مختلطة للحديد (Fe^{2+}/Fe^{3+}) مع وجود مواقع غير مكتملة، مما يساهم في إكسابه خصائص مغناطيسية مميزة، خاصة على المستوى النانوي [16]

يوضح الشكل أدناه التركيب البلوري للمغنيتيت (Fe_3O_4)، من نوع الإسبينيل المعكوس، حيث تشكل أيونات الأكسجين شبكة مكعبة مركزية الوجوه و تشغل أيونات (Fe^{2+}) و(Fe^{3+}) المواقع رباعية السطوح و ثمانية السطوح.



الشكل4:التركيب البلوري للمغنيتيت [16]



الشكل 5 : A_ابنية الإسبينيل المكعبة ممركزة الوجه.

B_تكبير لرباعي أوجه وثماني أوجه متجاورين يشتركان في ذرة أكسجين [16]

يُعدّ المغنتيت (Fe_3O_4) أحد أكثر أطوار أكسيد الحديد البلورية إثارةً للاهتمام، و ذلك بفضل تعدد بنيته البلورية و خصائصه المغناطيسية المميزة. إذ يتميز بسهولة تمغنطه واستجابته المغناطيسية العالية عند تعرضه لحقل مغناطيسي خارجي [15].

و قد حظيت جسيمات أكسيد الحديد النانوية باهتمام واسع في مختلف المجالات، نظرًا لخصائصه الفيزيائية و الكيميائية الفريدة على المقياس النانوي، إضافة إلى سلوكه المغناطيسي القوي. كما أن انخفاض سُمّيته نسبيًا يجعله مرشحًا واعدًا للعديد من التطبيقات، مثل الفصل المغناطيسي، و التسخين المغناطيسي(Magnetic hyperthermia) ، و مواد التباين المستخدمة في تقنيات التصوير بالرنين المغناطيسي (MRI)[16].

16-كلوريد الحديد :

يُعدّ كلوريد الحديد من المواد الكيميائية ذات الأهمية الكبيرة في العديد من القطاعات الصناعية، حيث يُستخدم على نطاق واسع في معالجة المياه و إزالة الشوائب من مياه الشرب و مياه الصرف الصحي. و يتميّز كلوريد الحديد و خاصة كلوريد الحديد الثلاثي($FeCl_3$) بفعاليته العالية في عمليات الترويب و التخثير، مما يجعله عاملًا أساسيًا في ترسيب الجسيمات العالقة و الملوثات. كما يُعتبر من أكثر مصادر الحديد تركيزًا و نقاوةً في التطبيقات الصناعية. و إضافة إلى دوره كمادة مُخثرة، فإنه يُستخدم أيضًا ككاشف كيميائي فعال في العديد من العمليات الكيميائية المرتبطة بتنقية المياه و معالجة النفايات السائلة [18].

المراجع باللغة العربية:

[1] "امكانية توظيف تقنية النانو في قطاعي الزراعة والطاقة الكهربائية في العراق،" لمجلة العراقية للعلوم الاقتصادية، vol. 84, p. 138

[3] ا. م. د. /. ا. يوسف، " تحقيق جودة واستدامة الاداء الوظيفي للملابس الجاهزة باستخدام تقنية النانو المجلة المصرية للدراسات المتخصصة2025، vol. 46 ,10–8 .pp ، ".

"[4] تقانة النانو كخيار استراتيجي في القرن الحادي والعشرين للنهوض بواقع التصنيع العراقي واللحاق بالدول الصناعية المتقدمة، Journal of Economics and Administrative .2021 ,292 .p " Sciences

[10] ع. ا. س. ا. هـ. ا. جرار، " درجة تضمين كتب الكيمياء وعلوم الارض والبيئة للمرحلة الثانوية لتطبيقات النانو تكنولوجي والكيمياء الخضراء "مجلة مؤتة للدراسات الانسانية والاجتماعية. 2025,7. p,3. vol ،

[12] د. غ /ا، " مدى تظمن كتب الفيزياء بالمرحلة الثانوية في الجمهورية اليمنة لمتطلبات تكنولوجيا النانو مجلة العلوم التربوية والدراسات الانسانية. 7. p "،

المراجع باللغة الأجنبية :

[2] H. Nadia, " Synthèse Verte Des Nanoparticules A Effet Antibactérien," p. 1, 2024.

[5] H. B, " An overview of nanotechnology and its application 2023P1/ 5," pp. 1-5, 2023.

[6] R. H. e. Al, "Nanotechnology," *International Journal of Scientific Research and Reviews,* p. 64, 2023.

[7] B. S. e. C. Safa, " Biosynthèse des nanoparticules d'argent (AgNPs) et leur activité antibactérienne," 2022.

[8] B. Abderrhmane, " Optimisation de biosynthèse des nanoparticules d'oxyde de fer par l'utilisation de différents extraits des plantes et évaluation de leur activité biologique," p. 41, 2022.

[9] T. Michaud, " , Développement de nouvelles pâtes à base de nanoparticules métalliques pour du frittage basse temperature," p. 26, 2022.

[11] 2. A. A. G. S. İ. Hayrunnisa NADAROĞLU1, " Synthesis of Nanoparticles by Green Synthesis Method.," *International Journal of Innovative Research and Reviews,* p. 7.

[13] B. K. K. &. M. Gorgani, " Comparison of sol-gel and hydrothermal synthesis methods on the structural, optical and photocatalytic properties of Nb/Ag codoped TiO2 mesoporous nanoparticles," *International Journal of Environmental Analytical,* p. 7.

[14] J. M. a. A. Jaina*, " On Biological Synthesis of Nanoparticles and their Applications in Bioremediation," pp. 5-8, 2022.

[15] L. d. T. M.L. Bruschi, "Pharmaceutical Applications of Iron-Oxide Magnetic Nanoparticles," Magnetochemistry , vol. 5, p. 50, 2019.

[16] a. T. H. M. S. I. O. T. M. b. a. R. *. Md. Shamiull Alim Munna, "Multifunctional lanthanide-based iron oxide luminescent–magnetic nanoparticles: synthesis, properties and biomedical applications," royal society of chemistry, p. 11805, 2026.

[17] U. S. R.M. Cornell, " The iron oxides: structure, properties, reactions, occurrences and uses,," John Wiley & Sons2003..

[18] M. A. K. S. E. S. K. K. R. Khandanlou, " Studies on properties of rice straw/polymer nanocomposites based on polycaprolactone and Fe3O4 nanoparticles and evaluation of antibacterial activity,," International journal of molecular science, vol. 15(10), p. 18466, 2014.

الفصل الثاني

دراسة وصفية لخميرة *Saccharomyces cerevisiae* والسليلوز

1 – تمهيد

تُشير الدراسات الحديثة في مجال الكيمياء الخضراء إلى أن التوجه نحو استخدام البوليمرات الطبيعية والكائنات الدقيقة لم يعد خياراً ثانوياً، بل ضرورة تقنية لضمان استدامة المواد النانوية المصنعة. وبناءً على ما ورد في الأدبيات العلمية، فإن دمج الكائنات الحية الدقيقة مثل خميرة الخبز (*Saccharomyces cerevisiae*) مع الركائز البوليمرية مثل السليلوز، يفتح آفاقاً جديدة لتطوير مركبات نانوية هجينة (Bio nanocomposites) تتميز بخصائص تحفيزية فائقة."

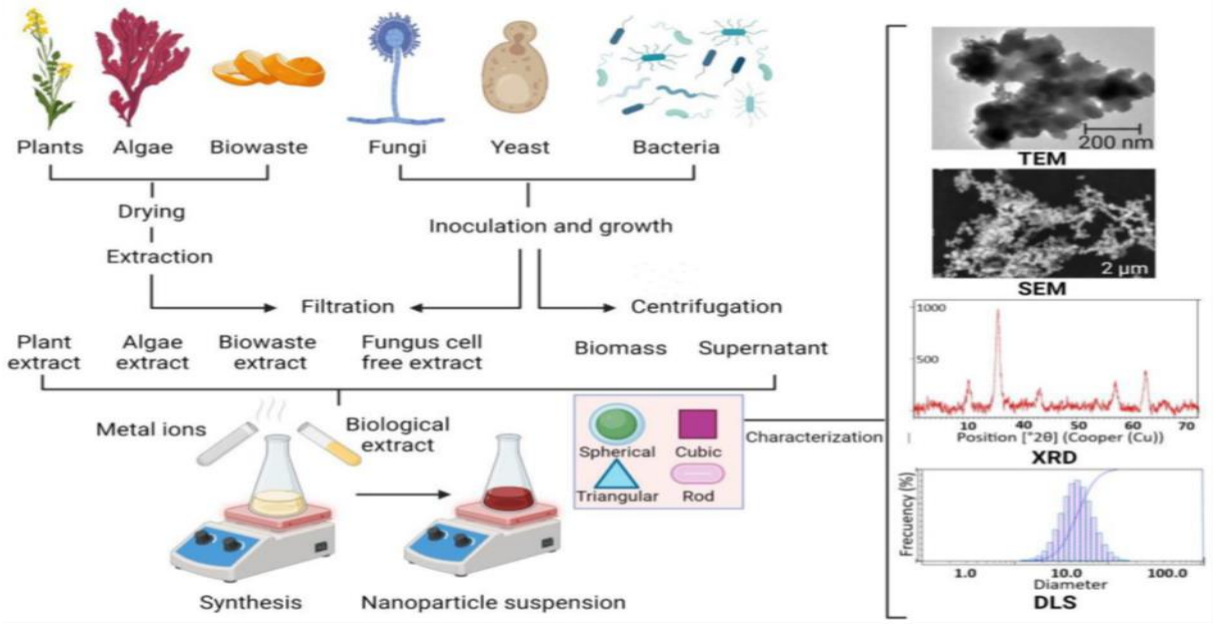
ومن هذا المنطلق، سيتم تسليط الضوء في هذا الفصل على البنية الوظيفية لكل منهما، ممهدين بذلك لفهم ميكانيكية عمل المركب الناتج في معالجة الملوثات العضوية.

الجزء الأول: خميرة الخبز او (*Saccharomyces cerevisiae*)

2–تخليق جسيمات أكسيد الحديد النانوية باستخدام الكائنات الحية الدقيقة:

يُعدّ البحث في دور الفطريات في مجال تكنولوجيا النانو ذا أهمية كبيرة، إذ استُخدمت على نطاق واسع في التخليق الحيوي للجسيمات النانوية، نظرًا للكفاءة العالية لمستقبلاتها الحيوية في إنتاج أنواع متعددة من هذه الجسيمات. ويُعزى هذا الاستخدام الواسع لمختلف سلالات الفطريات إلى قدرتها على إفراز كميات كبيرة من البروتينات والإنزيمات، إضافة إلى سهولة التعامل معها مخبريًا كما يوضح (الشكل1). علاوةً على ذلك، فقد حظيت الفطريات باهتمام متزايد في مجال التخليق البيولوجي للجسيمات النانوية المعدنية، نظرًا لقدرتها الملحوظة على تحمّل المعادن و تراكمها. كما تُعدّ قابلية تنميتها بسهولة ميزةً بارزة عند استخدامها في تخليق الجسيمات النانوية، حيث يمكن تحقيق ذلك باستخدام تقنيات التخمير على ركائز صلبة.

ونظرًا لقدرة الفطريات العالية على إفراز الإنزيمات خارج الخلية، فإن ذلك يوفّر وسطًا غنيًا بالعوامل الحيوية الفعّالة، مما يعزّز كفاءة عملية التخليق الحيوي. كما تُعدّ الجدوى الاقتصادية و سهولة استغلال الكتلة الحيوية من العوامل الداعمة لاعتماد النهج الأخضر في تخليق الجسيمات النانوية المعدنية باستخدام الفطريات. إضافةً إلى ذلك، تُظهر العديد من الأنواع الفطرية معدلات نمو سريعة، مما يجعل زراعتها و صيانتها في الظروف المخبرية أمرًا سهلًا و فعالًا. كما تتميز بقدرتها على تخليق الجسيمات النانوية والهياكل النانوية عبر نشاط إنزيمي مختزِل، سواء داخل الخلايا أو خارجها، فضلًا عن اعتمادها على آليات التمعدن الحيوي (Biomineralization) في تشكيل هذه البنى النانوية [1] .



الشكل1: تخليق الجسيمات النانوية باستخدام الكائنات الحية الدقيقة [1].

3- تعريف الخميرة:

تُعدّ الخميرة (*Saccharomyces cerevisiae*) كائنًا حيًا وحيد الخلية ينتمي إلى مملكة الفطريات. وتُعرف باسم "خميرة الخباز" نظرًا لاستخدامها الواسع في عمليات تخمير العجين. ويُشتق اسم الجنس

(*Saccharomyces*) من كلمتين يونانيتين : : (saccharo : سكر) و (myces : فطر)، في إشارة إلى قدرتها على استهلاك السكريات.

أما اسم النوع (*cerevisiae*)، فيرتبط بكلمة "سيرفواز"، وهي نوع من الجعة التقليدية التي كان يصنعها الغاليون من الشعير أو القمح المخمّر.و قد تم فك الشفرة الكاملة لجينوم هذه الخميرة سنة1996. [2]

حيث كُشف عن نحو 6000 جينا، يُعتقد أن حوالي 5570 منها تُشفّر بروتينات. و هذا يدل على أن الجزء الأكبر من الجينوم مخصص لإنتاج بروتينات وظيفية ضرورية لمختلف الأنشطة الحيوية للخلية .[3]

4- أصل وتاريخ خميرة (*Saccharomyces cerevisiae*):

تُعدّ الخميرة (*Saccharomyces cerevisiae*) من أقدم الكائنات الحية التي استُخدمت من قبل الإنسان، حيث استُغلت منذ آلاف السنين في صناعة الخبز و المشروبات المخمّرة، رغم عدم معرفة طبيعتها آنذاك.

في أواخر القرن الثامن عشر، لاحظ عالم الزراعة الإيطالي "أدامو فابروني" ظاهرة تحوّل السكريات في العنب إلى كحول، و افترض أن مادة حية مسؤولة عن عملية تخمير النبيذ.

و في عام 1857، أثبت "لويس باستور" بشكل قاطع أن التخمير الكحولي عملية حيوية تقوم بها كائنات دقيقة، مبيّنًا أن خميرة (*Saccharomyces cerevisiae*) تحوّل السكريات إلى إيثانول و ثاني أكسيد الكربون في ظروف لاهوائية (غياب الأكسجين). و قد شكّل هذا الاكتشاف نقطة تحوّل في فهم العمليات الحيوية و التخميرية.

و في نهاية القرن التاسع عشر، ساهمت أعمال "روبرت كوخ" و "يوليوس ريتشارد بيتري" في تطوير تقنيات الزرع النقي للكائنات الحية الدقيقة، مما أتاح عزل الخمائر و دراستها بشكل منهجي. و قد أدى ذلك إلى تحسين عمليات التخمير الصناعي من خلال اختيار سلالات محددة ذات خصائص مرغوبة.

ومنذ ذلك الحين، أصبحت خميرة (*Saccharomyces cerevisiae*) نموذجًا بيولوجيًا أساسيًا في الأبحاث العلمية، بالإضافة إلى دورها المحوري في الصناعات الغذائية والبيوتكنولوجية[4].

5-التصنيف العلمي لخميرة (*Saccharomyces cerevisiae*) :

تندرج خميرة (*Saccharomyces cerevisiae*) ضمن الكائنات حقيقية النوى، وتخضع للسُّلَّم التصنيفي المعتمد كما يلي [5] :

الجدول 1:التصنيف العلمي لخميرة الخبز

taxonomical Classification
• **Domain:** Eukarya • **Kingdom:** Fungi • **Subkingdom:** Dikarya • **Phylum:** Ascomycota • **Subphylum:** Saccharomycotina • **Class:** Saccharomycetes • **Order:** Saccharomycetales • **Family:** Saccharomycetaceae • **Genus:** Saccharomyces • **Species:** Cerevisiae

6-آلية تخليق الجسيمات النانوية باستخدام الكائنات الحية الدقيقة :

يمكن تخليق الجسيمات النانوية بالاعتماد على الكائنات الحية الدقيقة مثل البكتيريا، الفطريات، الخمائر و الطحالب، و ذلك عبر آليتين أساسيتين: التخليق خارج الخلايا و التخليق داخل الخلايا.

أ- الآلية خارج الخلية: (Extracellular)

تعتمد هذه الآلية على اختزال أيونات المعادن، مثل أيونات الحديد، بواسطة بروتينات و إنزيمات و مكونات جدار الخلية لدى الكائنات الدقيقة. و تعمل هذه المكونات كعوامل مختزلة و مثبّتة في الوقت نفسه، مما يساهم في منع تكتل الجسيمات النانوية لأكسيد الحديد.

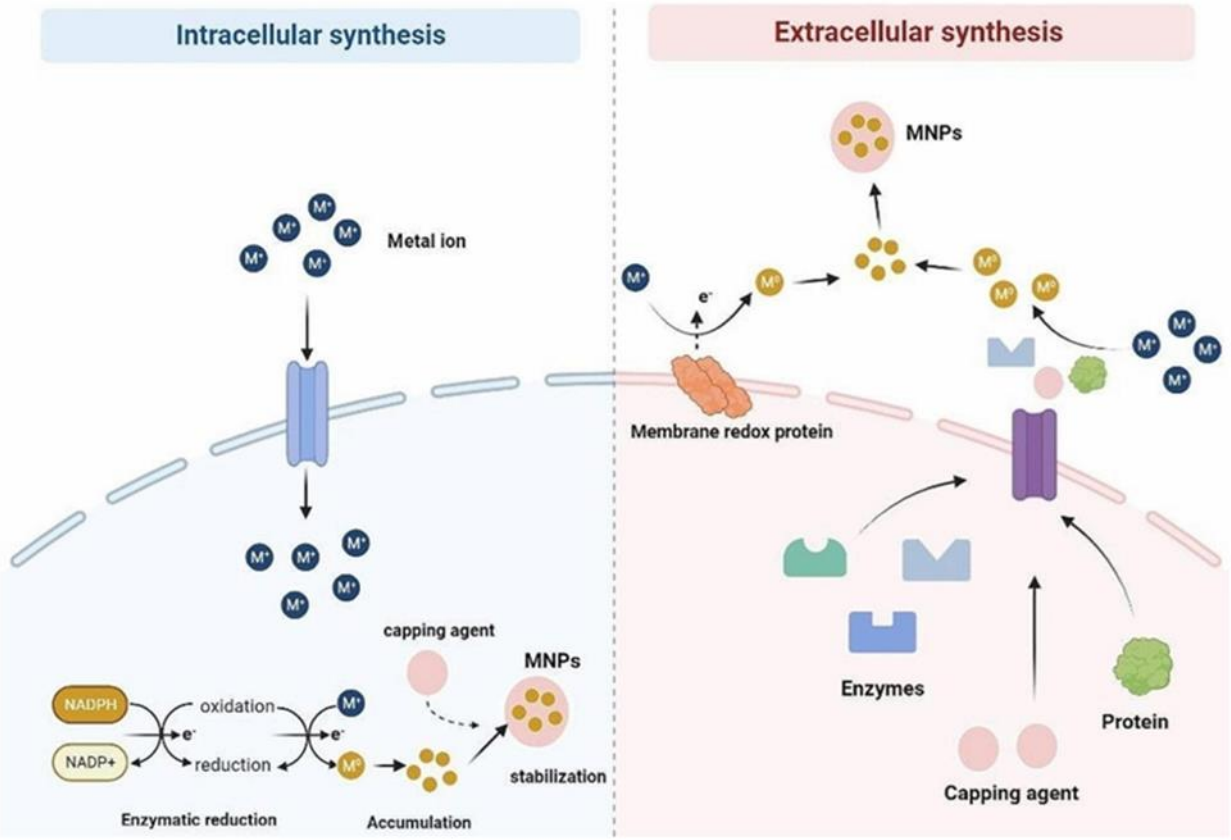
في هذا النوع من التخليق، تُزرع الكائنات الدقيقة في ظروف مثالية، ثم تُجمع المادة الطافية (supernatant) بعد الطرد المركزي، و تُخلط مع محلول مائي يحتوي على أملاح معدنية. و يُستدل على تكوّن الجسيمات النانوية من خلال حدوث تغير في لون الوسط. كما يمكن أن تتشكل هذه الجسيمات أيضًا عند ارتباط أيونات المعادن بسطح الخلية عبر تفاعلات كهروستاتيكية، ثم اختزالها بوساطة الإنزيمات.

ب- الآلية داخل الخلايا : (intracellular)

في هذه الآلية، يتم اختزال أيونات المعادن داخل الخلية بواسطة إنزيمات خلوية. تبدأ العملية بارتباط أيونات المعادن بشحنة سالبة على سطح جدار الخلية، خصوصًا مع المجموعات الوظيفية مثل مجموعة الكربوكسيل ($-COOH$) ، مما يسمح بدخولها إلى داخل الخلية.

بعد ذلك تنتشر أيونات المعادن داخل الخلية وتتفاعل مع الإنزيمات الحيوية، مما يؤدي إلى تكوين الجسيمات النانوية لأكسيد المعدن داخل الوسط الخلوي. في هذه الحالة، تُحضَّر الكتلة الحيوية للكائنات

الدقيقة في ظروف نمو مثالية، ثم تُغسل بالماء المعقم وتُحضن مع محلول الأملاح المعدنية، حيث يُلاحظ تغير اللون كدليل على تكوّن الجسيمات النانوية (الشكل2) [6].



الشكل2: الية تخليق الجسيمات النانوية داخل خلايا الكائنات الدقيقة[6].

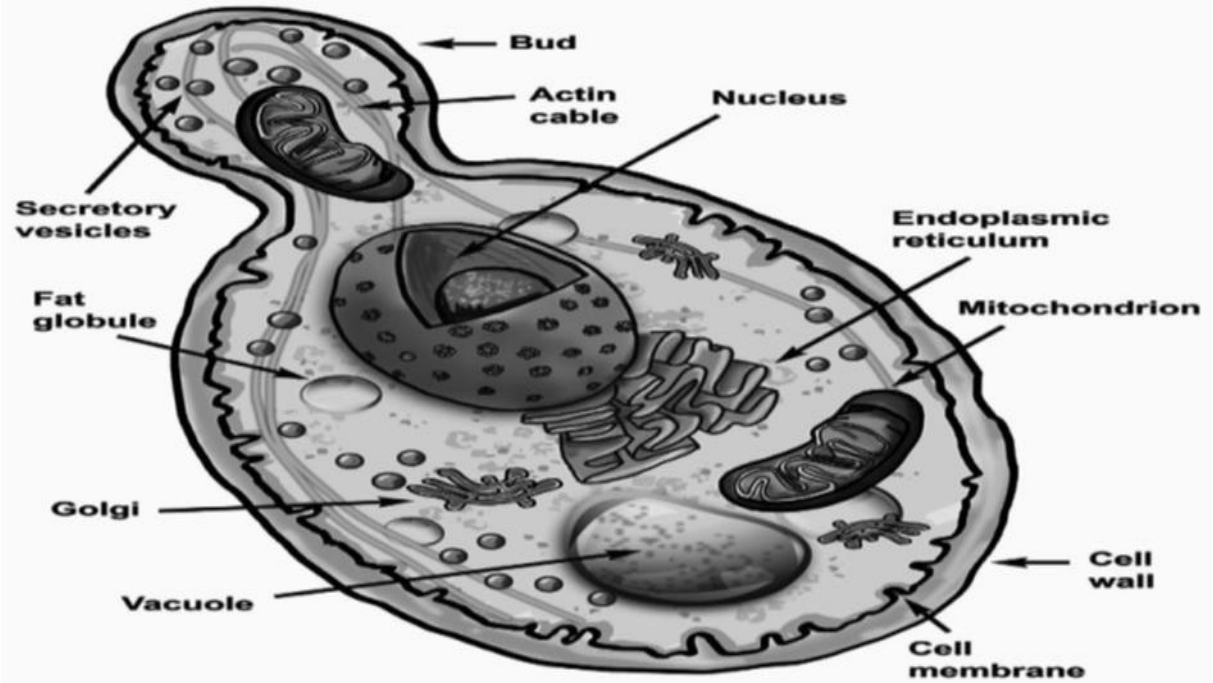
7- التركيب الخلوي لخميرة (*Saccharomyces cerevisiae*) :

تُعدّ خميرة (*Saccharomyces cerevisiae*) كائنًا وحيد الخلية غالبًا ما يتخذ شكلاً بيضاويًا، بقطر كبير يتراوح بين 5 و 10 ميكرومتر، و قطر أصغر يقارب 5 ميكرومتر. و تنتمي جميع أنواع الخمائر إلى مملكة الفطريات، و تمتاز ببنية خلوية دقيقة تشبه إلى حد كبير الخلايا حقيقية النواة المتقدمة.

تتكون الخلية الخميرية من مجموعة من البنى الأساسية، تشمل: جدارًا خلويًا صلبًا، و نواة حقيقية، و ميتوكوندريا، و شبكة إندوبلازمية، و جهاز غولجي، إضافة إلى الفجوات (vacuoles) ، و الأجسام

الدقيقة (microbodies)، والحويصلات الإفرازية. كما تتميز بوجود نظام غشائي داخلي و خارجي معقد يساهم في تنظيم التبادل الخلوي و الأنشطة الحيوية المختلفة (الشكل3).

و قد تناول» ووكر« علم الخلايا الخاص بـ (*Saccharomyces cerevisiae*) بشكل مفصل في دراساته [7].



الشكل 3 : التركيب الخلوي لخميرة الخبز[7].

8-البنية المجهرية والكيميائية لخميرة (*Saccharomyces cerevisiae*) :

تُظهر الدراسات باستخدام المجهر الإلكتروني و التحليل الكيميائي أن خلايا خميرة (*Saccharomyces cerevisiae*) محاطة بجدار خلوي مميز يتكون من ثلاث طبقات رئيسية. تتألف الطبقة الخارجية أساسًا من بروتينات المانان (mannoproteins) مع كميات قليلة من الكيتين، بينما تتكون الطبقة الوسطى بشكل رئيسي من الغلوكان .(Glucan) أما الطبقة الداخلية، فتتكون من مركبات غلوكانية مرتبطة

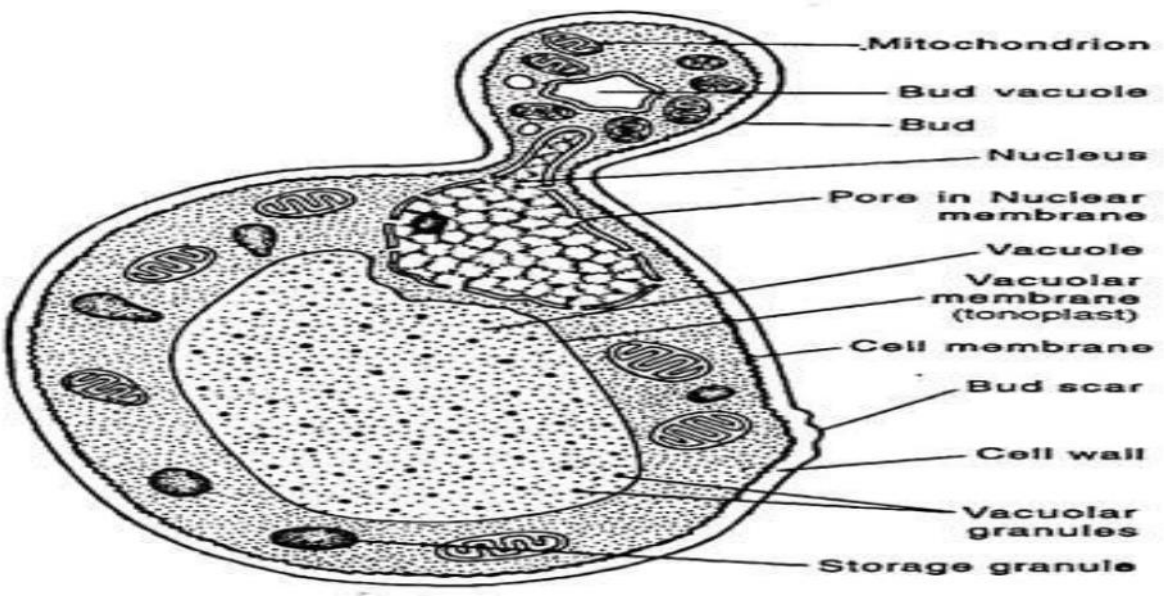
بالبروتينات. كما يحتوي الجدار الخلوي على نسب محدودة من الفوسفات و الدهون، في حين يغيب السليلوز عن تركيبه.

يلي الجدار الخلوي غشاء البلازما (الغشاء الخلوي)، و هو غشاء ذو بنية مميزة يتميز بوجود انغمادات أو تجاويف سطحية ضحلة ذات شكل مستطيل (الشكل4)، مما يعكس نشاطًا ديناميكيًا في عمليات النقل و التبادل الخلوي.

في مركز الخلية توجد فجوة عصارية كبيرة محاطة بغشاء مفرد يُعرف بالغشاء الفجوي (tonoplast) ، وتحتوي على محلول مائي إضافة إلى حبيبات من متعدد ميتافوسفات و مواد دهنية.

أما السيتوبلازم، فيتميز ببنية حبيبية و يحتوي على العديد من العضيات الخلوية، مثل النواة، و الميتوكوندريا، و جهاز غولجي، و الشبكة الإندوبلازمية، و الريبوسومات. كما يضم مواد ادخارية مثل أجسام الجليكوجين، و حبيبات الفولوتين (volutin) ، و قطرات دهنية، إضافة إلى مكونات أخرى.

و يحتوي السيتوبلازم أيضًا على مجموعة من الإنزيمات المحللة، مثل البروتياز، و الإستراز، و الريبونوكلياز، و التي تلعب دورًا مهمًا في العمليات الأيضية. تقع النواة، المحاطة بغشاء مزدوج مثقّب، بالقرب من الفجوة العصارية، و تتكون من منطقتين : منطقة رئيسية موجبة لصبغة فولجن (Feulgen–positive) تدل على احتوائها على المادة الوراثية، و منطقة أصغر سالبة الصبغ [8].



الشكل 4 : دراسة مجهرية لخميرة (*Saccharomyces cerevisiae*) [8].

9- آلية إنتاج الطاقة عند خميرة (Saccharomyces cerevisiae) :

تتمكن خميرة الخبز (*Saccharomyces cerevisiae*) من إنتاج الطاقة اللازمة لنموها و تكاثرها عبر مسارين استقلابيّين مختلفين، و ذلك حسب توفر الأكسجين في الوسط :

أ- **المسار الهوائي (التنفس الخلوي) :**

في وجود الأكسجين، تقوم الخميرة بأكسدة الجلوكوز أكسدةً تامةً، مما يؤدي إلى إنتاج ثاني أكسيد الكربون (CO_2) و الماء، مع توليد كمية كبيرة من الطاقة على شكل (ATP)، كما يمكن للخميرة، بعد استهلاك الجلوكوز، أن تستعمل الإيثانول كمصدر للكربون و الطاقة بوجود الأكسجين، و هي ظاهرة تُعرف بالتحول ثنائي الطور .(Diauxic shift)

ب- **المسار اللاهوائي (التخمر الكحولي):** في غياب الأكسجين، تعتمد الخميرة على التخمر الكحولي، حيث يتحول الجلوكوز إلى إيثانول و ثاني أكسيد الكربون، مع إنتاج كمية أقل من (ATP) مقارنة بالتنفس الهوائي[9].

الجزء الثاني: السليلوز

1-تعريف السليلوز :

يُعدّ السليلوز (cellulose) سكّرًا متعددًا (polysaccharide) متكونا من عدد كبير (N) من وحدات الجلوكوز المرتبطة ببعضها البعض، كما يُعتبر المكوّن الأساسي للجدار الخلوي في الخلايا النباتية، مما يمنحه دورًا بنيويًا مهمًا في دعم النبات وحمايته.

السليلوز هو بوليمر حيوي من نوع السكريات المتعددة المتجانسة (homopolysaccharide) إذ يتكون حصريًا من وحدات (β-D-) غلوكوز مرتبطة بروابط غليكوسيدية من نوعβ (1 → 4) ، و قد يصل عدد هذه الوحدات إلى عدة آلاف، مكوِّنًا سلاسل طويلة و مستقيمة.

كما يُعد السليلوز المادة الخام الأساسية في العديد من الصناعات، مثل صناعة الورق و السلوفان، إضافة إلى تطبيقات أخرى في المجالات النسيجية والكيميائية.

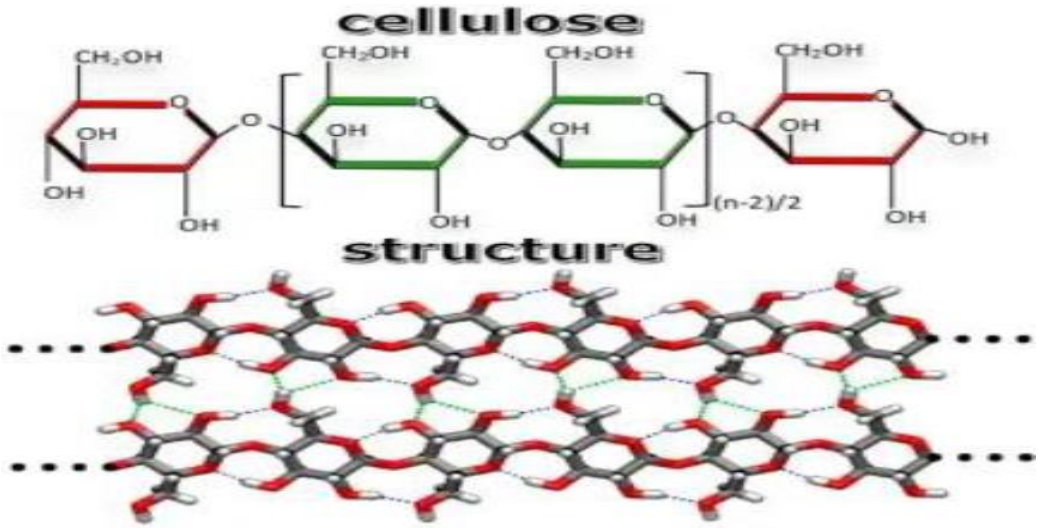
و يُعتبر السليلوز أكثر الجزيئات العضوية الحيوية وفرة على سطح الأرض، حيث يشكل الجزء الأكبر من الكتلة الحيوية في الأنظمة البيئية البرية.

2-بنية السليلوز:

السليلوز هو سكر متعدد خطي يتميز ببنية شبه بلورية ومساميّة ثلاثية الأبعاد، ويتكون من وحدات متكررة من (D-glucose) . ترتبط هذه الوحدات بروابط غليكوسيدية من نوع β (1→ 4) بين ذرتي الكربون C1 و C4 في الوحدات المتجاورة، مما يؤدي إلى تكوين سلاسل طويلة و مستقيمة.

تُسهم هذه الروابط في تعزيز تكوين شبكة كثيفة من الروابط الهيدروجينية داخل السلسلة الواحدة (روابط داخل جزيئية) و بين السلاسل المختلفة (روابط بين جزيئية)، و هو ما يمنح السليلوز صلابة عالية وثباتًا بنيويًا مميزًا.

نتيجة لذلك، يتنظم السليلوز في مناطق بلورية منتظمة و أخرى غير بلورية (غير متبلورة)، حيث تتجمع السلاسل المتوازية لتكوّن خيوطًا دقيقة (microfibrils) ، و التي بدورها تتجمع في ألياف أكبر. تصطف هذه السلاسل بشكل منتظم لتشكّل أليافًا نانوية، تتجمع لاحقًا في حزم تُعرف بالألياف الدقيقة[10].



الشكل 5 : بنية السيليلوز[10].

3-مصادر السيليلوز :

تُعدّ النباتات، إلى جانب المخلفات الزراعية، المصدر الرئيسي للسليلوز، و تشمل النباتات الخشبية و غير الخشبية مثل القطن و القنب، إضافة إلى بعض الطحالب و الأعشاب البحرية مثل .(Posidonia oceanica)

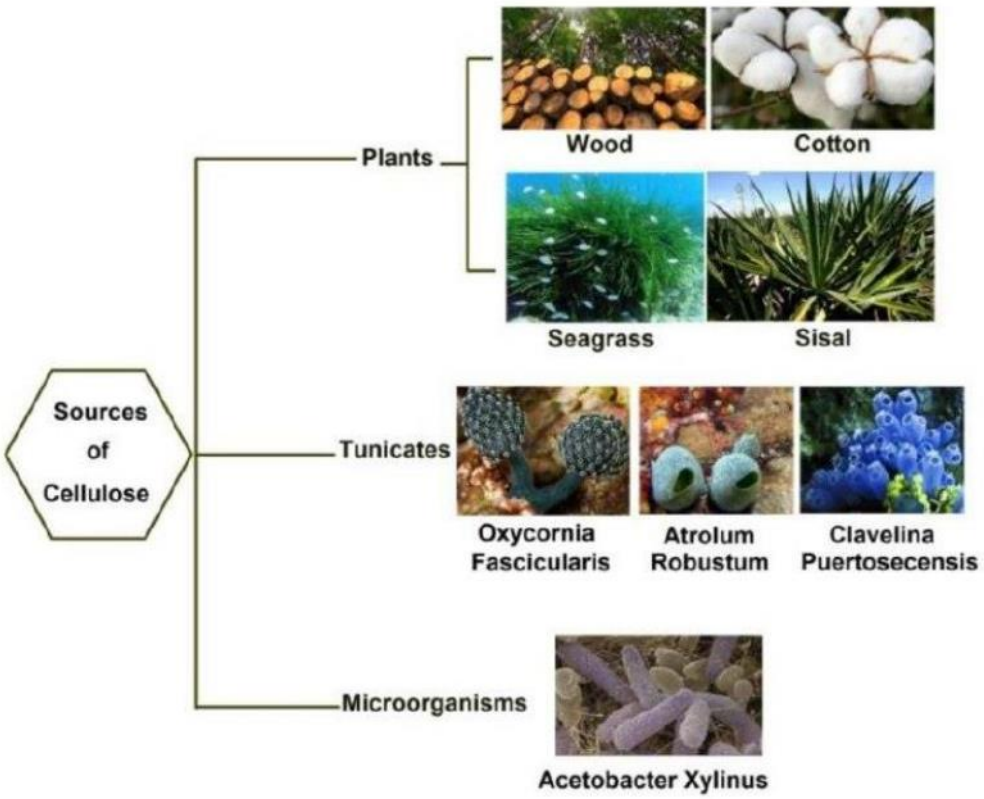
في النباتات، يتكوّن جدار الخلية من شبكة دقيقة ذات بنية أنبوبية مكوّنة من ألياف نانوية من السليلوز ملتفّة بشكل حلزوني. يتراوح قطر هذه الألياف بين 1.5 و 3.5 نانومتر، بينما قد يتجاوز طولها 1 ميكرومتر. و تُعرف هذه البنى باسم الألياف النانوية السليلوزية (cellulose nanofibrils)، و هي تتكون من تنظيم شبه بلوري لسلاسل جزيئية من السليلوز.

تنتظم هذه السلاسل في مجالات بلورية نتيجة الروابط الهيدروجينية القوية بينها، مما يؤدي إلى تكوين بنية عالية التنظيم تجمع بين المناطق البلورية و غير البلورية، و هو ما يمنح السليلوز خصائصه الميكانيكية المميزة.

ا- **مصادر الكائنات الدقيقة** : إلى جانب النباتات، يمكن إنتاج السليلوز باستخدام العديد من الكائنات الدقيقة، سواء في الظروف الطبيعية (داخل الكائن الحي) أو عبر الزراعة المخبرية. و يُعدّ ما يُعرف بـ السليلوز البكتيري من أهم هذه الأنواع، كما تم الكشف عن وجود السليلوز في بعض فئات الطحالب الخضراء، مما يوسّع نطاق مصادره الحيوية. و يتميّز السليلوز الميكروبي بنقاوته العالية وخصائصه الفيزيائية المميزة مقارنة بالسليلوز النباتي.

ب- **المصادر الحيوانية** :

يوجد السليلوز أيضاً في بعض الكائنات الحيوانية البحرية، خاصةً في الأغشية الخارجية لكائنات تُعرف بالأسيديات (ascidians) ، أو ما يُسمّى بالكيسيات أو بخاخات البحر. و بعد إزالة البروتينات بعمليات كيميائية مثل التبييض، يمكن استخلاص السليلوز الذي يساهم في تدعيم البنية الهيكلية للغلاف الخارجي لهذه الكائنات. و يتميّز هذا النوع من السليلوز بدرجة بلورية مرتفعة و خصائص ميكانيكية متميزة[11].



الشكل 5 : مصادر السيليلوز[11].

4 – الخصائص الفيزيائية والكيميائية للسليلوز :

أولاً : الخصائص الفيزيائية:

- الأبعاد: يتراوح قطر ألياف السليلوز عادةً بين 15 و 30 ميكرومتر، و يختلف ذلك باختلاف المصدر (نباتي، بكتيري، ...) وطريقة الاستخلاص أو التصنيع .
- الصلابة والعزل: يتميّز السليلوز بصلابة ميكانيكية عالية، كما يُعدّ عازلاً جيداً للحرارة والصوت.
- الامتزاز: يمتلك قدرة جيدة على الامتزاز (adsorption)، ما يجعله مناسباً لتطبيقات الترشيح والتنقية.

- البنية: تحدّد البنية الفراغية و التنظيم شبه البلوري (مناطق بلورية و غير بلورية) الخصائص الفيزيائية و الكيميائية للسليلوز، خاصةً من حيث المتانة و التفاعل مع الوسط الخارجي.

ثانياً : الخصائص الكيميائية:

- التحلل الحراري : يبدأ السليلوز في التحلل تدريجياً عند درجات حرارة تقارب 100 °م عبر نزع البلمرة، مع تسارع التحلل عند درجات أعلى.

- الاستقرار الحراري: في الهواء الجاف، يبقى السليلوز النقي مستقراً نسبياً حتى حوالي 300 °م قبل أن يتفكك بشكل ملحوظ.

- الذوبان: السليلوز غير قابل للذوبان في الماء أو معظم المذيبات العضوية التقليدية، بسبب الروابط الهيدروجينية القوية بين سلاسله.

- المقاومة الكيميائية : يُظهر مقاومة جيدة تجاه الأحماض المخففة و القلويات الضعيفة، لكنه قد يتأثر بالأحماض أو القواعد المركزة .

- المقاومة الحيوية : يقاوم نسبياً التآكل الحيوي، و بعض الحشرات (مثل العثة) و العفن، خاصة في حالته النقية أو المعالجة .

- الإذابة في مذيبات خاصة : يتطلب إذابة السليلوز استخدام أنظمة مذيبات معقّدة، مثل:

- المحاليل المركزة جداً من الأحماض (مثل حمض الكبريتيك أو النيتريك) أو القواعد القوية .
- أنظمة قائمة على . (N-methylmorpholine N-oxide : NMMO)
- أنظمة تحتوي على أملاح مثل كلوريد الليثيوم (LiCl) في مذيبات عضوية مناسبة [12].

5- السليلوز النانوي (nanocellulose):

يُعرّف السليلوز النانوي بأنه مادة يتم الحصول عليها من تفتيت الألياف السليلوزية الطبيعية إلى أبعاد نانوية، مما يؤدي إلى تحسين خصائصه الفيزيائية و الكيميائية. و يُستخلص أساساً من مصادر نباتية مثل الخشب، القطن، و المخلفات الزراعية، كما يمكن إنتاجه أيضاً من بعض الكائنات الدقيقة.

يتميّز السليلوز النانوي بنسبة مساحة سطحية عالية، و قوة ميكانيكية كبيرة، و خفة الوزن، إضافة إلى قابليته للتعديل الكيميائي، مما يجعله مادة واعدة في العديد من التطبيقات الحديثة.

6- أنواع السليلوز النانوي (Nanocellulose) :

تتعدد أشكال السليلوز النانوي تبعاً لطريقة الاستخلاص والمعالجة، إذ تؤدي كل تقنية إلى بنية مميزة (بلورية أو غير بلورية، ليفية أو قضيبيّة)، مما يمنح كل نوع خصائص مختلفة من حيث الصلابة و المرونة و التفاعل الكيميائي، و هو ما ينعكس مباشرةً على تنوع تطبيقاته و استخداماته.

- **البلورات النانوية للسليلوز NCC أو CNC :**

يتم الحصول عليها عادةً عن طريق التحلل الحمضي، حيث تُزال المناطق غير المتبلورة من ألياف السليلوز، و تبقى الأجزاء البلورية عالية الانتظام. يتميز هذا النوع ببنية صلبة ذات شكل إبر أو قضبان نانوية، و درجة بلورية مرتفعة، مما يمنحه خصائص ميكانيكية ممتازة.

- **الألياف النانوية للسليلوز NFC أو CNF :**

تُنتج عبر المعالجة الميكانيكية (مثل الطحن أو التجانس عالي الضغط)، حيث يتم تفكيك الألياف إلى خيوط طويلة و مرنة. تتميز هذه الألياف ببنية شبكية متشابكة، مرونة عالية، و قدرة كبيرة على الاحتفاظ بالماء.

• **السليلوز النانوي غير المتبلور (NCA):**

يتكون أساساً من المناطق غير البلورية للسليلوز، ويتميّز بمرونة أعلى وخصائص فيزيائية مختلفة مقارنةً بالأنواع البلورية، مما يجعله مناسباً لتطبيقات تتطلب ليونة أو تفاعلية كيميائية أكبر.

• **السليلوز البكتيري (BC) :**

يُنتج بواسطة بعض الكائنات الدقيقة، ويتميّز بنقاوة عالية جداً وبنية ثلاثية الأبعاد منتظمة، إضافةً إلى خصائص ميكانيكية وبيولوجية متميزة.

7- الخصائص الميكانيكية والكيميائية المتميزة للسليلوز النانوي:

• القوة والصلابة العالية:

يتميّز السليلوز النانوي بمتانة ميكانيكية استثنائية مقارنةً بوزنه الخفيف، حيث تُعدّ قوته النوعية مرتفعة جداً، وقد تنافس أو تتجاوز بعض المواد التقليدية مثل الفولاذ.

• التعزيز الهيكلي للمواد:

عند إضافته إلى المواد البوليمرية، يعمل السليلوز النانوي كدعامة داخلية (هيكل تقويتي)، مما يحسّن من صلابة المادة ومقاومتها لقوى الشد، ويسمح بتصنيع مواد خفيفة الوزن وعالية الأداء.

• المساحة السطحية العالية:

يمتلك السليلوز النانوي مساحة سطحية نوعية كبيرة جداً، مما يعزز قدرته على التفاعل والارتباط مع مواد أخرى مثل البوليمرات، المعادن، والجسيمات النانوية.

• النشاط السطحي والتفاعل الكيميائي:

نظراً لارتفاع نسبة السطح إلى الحجم، يُظهر السليلوز النانوي نشاطاً سطحياً كبيراً، ما يجعله مناسباً لتطبيقات التحفيز الكيميائي وتسريع التفاعلات.

• خصائص الامتزاز والتنقية:

تُستغل المساحة السطحية الكبيرة في عمليات الامتزاز، حيث يمتلك السليلوز النانوي قدرة عالية على إزالة الملوثات مثل المعادن الثقيلة من المياه، عبر جذبها والارتباط بها.

• الاحتفاظ بالسوائل وتثبيت المستحلبات:

يتميز السليلوز النانوي بقدرة كبيرة على امتصاص السوائل والاحتفاظ بها، كما يساهم في استقرار المستحلبات، ما يجعله مهماً في الصناعات الغذائية، الدوائية، والتجميلية [13].

8- السيليلوز النانوي كدعامة في المواد المركبة :

يُستخدم السيليلوز، وخاصة النانوسيليلوز، كدعامة أو قالب هيكلي (template) عالي الكفاءة في تصميم المواد المركبة. ويمكن تلخيص أدواره الأساسية فيما يلي:

• مساحة سطحية عالية جدًا:

تتميز ألياف النانوسيليلوز بمساحة سطحية كبيرة نتيجة لأبعادها النانوية وبنيتها المتفرعة، مما يوفر عددًا كبيرًا من مواقع الارتباط النشطة، ويساهم في توزيع متجانس ومنظم للجسيمات المضافة داخل المادة المركبة.

• الحد من التكتل (aggregation):

بفضل بنيته الليفية المسامية، يعمل النانوسيليلوز كحاجز فيزيائي يعيق تجمع الجسيمات النانوية، مما يحافظ على تشتتها الجيد واستقرارها، وبالتالي يحسن من الخصائص الكيميائية والفيزيائية للمادة.

• تعزيز الخواص الميكانيكية:

يضفي النانوسيليلوز صلابة ومتانة عالية على المادة المركبة، حيث تشكل شبكة الألياف بنية داعمة (هيكلية) تعمل كعمود فقري يحمل الجسيمات الموزعة، مما يؤدي إلى تحسين مقاومة الإجهاد وسهولة معالجة واسترجاع المادة.

9-الوظائف الكيميائية :

يحتوي السيليلوز على مجموعات هيدروكسيل (–OH) نشطة على سطحه، تمثل مواقع تفاعل فعّالة قادرة على تكوين روابط هيدروجينية أو تأثرات كيميائية مع الجسيمات المضافة. هذا التفاعل يعزز تثبيت هذه الجسيمات على الدعامة ويحدّ من انفصالها أثناء العمليات التجريبية أو التطبيقية.

10- الاستدامة والمسامية :

باعتباره مادة طبيعية حيوية، يتميز السيليلوز ببنية مسامية تسمح بانتقال السوائل والغازات عبره بسهولة، مما يتيح تفاعلها مع الجسيمات المحملة على سطحه أو داخله. هذه الخاصية تجعله مناسبًا بشكل خاص لتطبيقات الترشيح، التنقية، ومعالجة المياه والملوثات البيئية [14].

المراجع :

[1] A. A. E.-R. H. A. A. M. S. H. W. N. &. M. R. Eweis ،"Green Fabrication of Nanomaterials Using Microorganisms as Nano-Factories،" Journal of Cluster Science ،p. 2149–2176،2024 .

[2] A. e. a. Goffeau ،"Life with 6000 Genes،" Science ،pp. 546-567 ،1996.

[3] V. e. a. Wood ،"Re-annotation of the Saccharomyces cerevisiae génome Comparative and Functional Genomics،" pp. 143-154،2001 .

[4] "Understanding Saccharomyces cerevisiae yeast،" Lesaffre 13 ،MAY 2020 .

[5] A. Hussein Ali ،"Saccharomyces cerevisiae،" Hawassa University, MSc in Clinical Laboratory،2018.

[6] A. A. E.-R. H. A. A. M. S. H. W. N. &. M. R. Eweis ،"Green Fabrication of Nanomaterials Using Microorganisms as Nano-Factories.،" Journal of Cluster Science ،p. 2149–2176،2024 .

[7] G. M. &. S. G. G. B. Walker ،"Saccharomyces cerevisiae in the production of fermented beverages،" Beverages،2016.

[8] S. (n.d.) ،"Saccharomyces Cerevisiae Structure & Life Cycle،" Scribd Available: [https://share.google/motNkWgeG8WJBpqQH] .5APRIL 2026.

[9] Z. e. a. Salvadó ،""Temperature Adaptation Markedly Determines Evolution within the Genus Saccharomyces،" Applied and Environmental Microbiology ،pp. 2292-2302.،2011 .

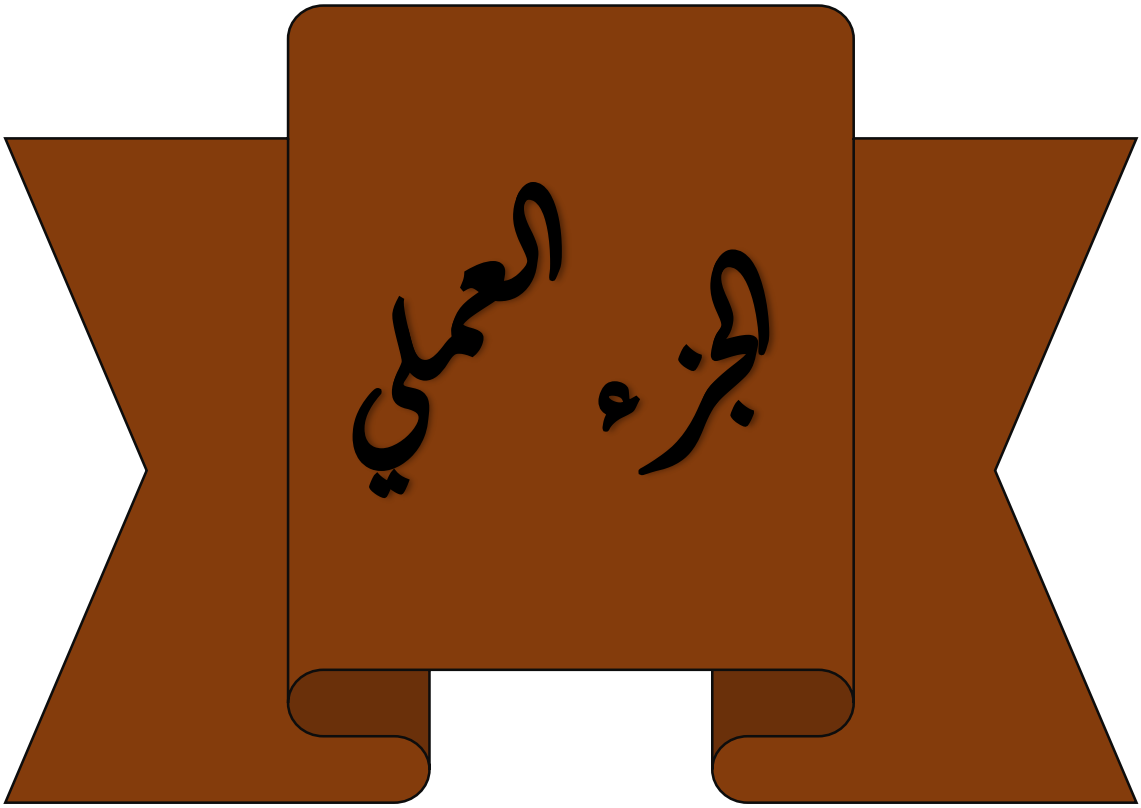
[10] A. Por tail ،"Cellulose: Définition et explications. Dans Dictionnaire de biologie.،" 2024.

[11] B. Sciences ،"Cellulose: Définition, Structure, Fonction, Sources et Utilisations،" 2026.

[12] U. M. S. (. C. s. Scribd ،La Cellulose ،Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Département de Biologie Consulté sur Scribd .

[13] M. R. S. S. P. J. J. M. P. C. I. &. K. A. Sanjay ،"A comprehensive review of natural fibers and their composites: An eco-friendly alternative to conventional materials،" Results in Engineering ،p. 19 101،2023 .

[14] Y. W. A. &. Y. R. Zheng ،International Journal of Biological Macromolecules ،p. 1013–1019.2012 .


الجزء العملي

الفصل الاول

الطرق والمواد المستعملة

1- المواد و الأجهزة :

مكان اجراء التجارب:

أجريت جميع التجارب المخبرية الخاصة بهذا البحث في مخبر الكيمياء العضوية (مخبر 6) في كلية العلوم الدقيقة جامعة الشهيد حمه لخضر حيث توفرت جميع الظروف التقنية والأجهزة اللازمة لإتمام مراحل العمل التجريبي اما بخصوص تحاليل النشاط ضد ميكروبي فقد تم اجراءه في مخبر المجد للتحاليل الطبية الشط – الوادي.

1-1 المواد :

خميرة الخبز: تم اختيار خميرة الخبز كعامل اختزال وتثبيت حيوي في إطار الكيمياء الخضراء لتصنيع جسيمات أكسيد الحديد النانوية. يستند هذا الاختيار الى الدراسات التي اجريت على هذه الخميرة من طرف مختبرات سابقة حيث تم شرائها من متجر محلي (بن ساسي) في بلدية الوادي

الاوراق: تم جمع اوراق مستعملة من ارشيف الكلية وتم قصها الى قطع صغيرة جدا والغسل عدة مرات بالماء المقطر للحصول على ألياف السيليلوز (Cellulose fibers) كمادة داعمة للمركب النانوي.

1-2/ المواد الكيميائية (Chemical Reagents):

تم استخدام مواد كيميائية ذات درجة نقاء عالية (Analytical Grade) دون الحاجة إلى تنقية إضافية، وهي تشمل:

الأملاح: كلوريد الحديد الثنائي ($FeCl_2$) وكلوريد الحديد الثلاثي ($FeCl_3$) كمصادر لأيونات الحديد.

العامل المرسب: هيدروكسيد الصوديوم (NaOH) بتركيز M 1 لضبط الهيدروجين الأسي (pH).

جدول 1 : المواد الكيميائية

اسم المادة	الصيغة	الشركة	الكتلة المولية g/mol
كلوريد الحديد الثنائي	$FeCl_4H_2O$	biochem	198,81
كلوريد الحديد الثلاثي	$FeCl_3$	biochem	126,20
هيدروكسيد الصوديوم	NaOH	biochem	40
ماء مقطر	H_2O	mablab	18
كلوريد الصوديوم	NaCl	biochem	58,44
حمض الهيدروكلوريك	HCl	biochem	36,5

2/الأجهزة والمعدات (Instrumentation):

- لإتمام مراحل التخليق والتصنيع، تم استخدام المعدات المخبرية التالية:
- الميزان التحليلي (Analytical Balance): بدقة (0.0001g) لوزن العينات الصلبة.
- المخلاط المغناطيسي المزود بالتسخين (Magnetic Stirrer with Hot Plate): لضمان تجانس التفاعلات والتحكم في درجة الحرارة.
- جهاز قياس درجة الحموضة (pH-meter): لمراقبة وتعديل الوسط القاعدي أثناء الترسيب.
- حمام الموجات فوق الصوتية: لتشتيت ألياف السيليلوز ومنع تكتل الجسيمات النانوية.
- جهاز الطرد المركزي (Centrifuge): لفصل الرواسب النانوية عن الوسط السائل بسرعة تصل إلى 4500rpm.
- المجفف الحراري (Oven): لتجفيف العينات عند درجات حرارة ثابتة.

- فرن التكليس (Muffle Furnace): لإجراء عملية الحرق عند درجات حرارة عالية لتعزيز الطور البلوري.

3 / تحضير المحاليل:

تم تحضير محلول مختلط من أملاح الحديد بتركيزات دقيقة لضمان النسبة الستوكيومترية المطلوبة لتخليق أكسيد الحديد. أذيب0,54 g من كلوريد الحديد الثنائي اللامائي (FeCl2) مع 1,8 من كلوريد الحديد الثلاثي (FeCl3) في حجم 50ml من الماء المقطر (Deionized Water). خضع المحلول لعملية رج ميكانيكي مستمر حتى الحصول على محلول متجانس تماماً وخالٍ من الرواسب.

3-1مستخلص الخميرة :

تم وزن 5 g من خميرة الخبز واضافتها الى 100 ml من الماء المقطر مع التحريك لمدة نصف ساعة عند 60 C مئوية ،تم ترشيح الخليط تحت الفراغ والحصول على مستخلص الخميرة .

3-2مستخلص السيليلوز :

- قمنا بغسل وتنقية الاوراق بالماء المقطر للتخلص من الشوائب .
- معالجة الاوراق المستعملة بقاعدة قوية NaoH لمدة ساعة عند 60C .
- غسل الخليط بالماء المقطر لتعديل درجة الحموضة حتى الوصول الئ (PH=7)والتخلص من الحبر .
- تصفية الناتج بواسطة صفاي.
- تجفيف السيليلوز الناتج في المجفف لمدة 24 h عند60 C.

4-التخليق الأخضر لجسيمات أكسيد الحديد النانوية (IONPs):

اعتُمدت طريقة الترسيب المشترك المدعومة حيوياً (Bio-assisted Co-precipitation) لتخليق الجسيمات وفق الخطوات التالية:

- المزج الحيوي: تم خلط 50ml من مستخلص الخميرة (Yeast Extract) الذي يعمل كعامل مختزل ومثبت مع 50ml من محلول أملاح الحديد المحضر مسبقاً مع الرج المستمر.
- الترسيب الكيميائي: تمت معالجة الوسط بإضافة قطرات من هيدروكسيد الصوديوم (NaOH) بتركيز 1M تحت مراقبة دقيقة لدرجة الحموضة حتى الوصول إلى (pH=9)، وهي النقطة المثالية لترسيب هيدروكسيدات الحديد.
- المعالجة الحرارية الأولية: وضع الخليط في حمام مائي عند درجة حرارة 60C° لمدة ساعتين مع الرج لضمان اكتمال التفاعل ونمو البلورات النانوية.
- الفصل والتنقية: فُصل الراسب باستخدام جهاز الطرد المركزي (Centrifugation) بسرعة4500 rpm لمدة10 دقيقة. غُسل الراسب مراراً بالماء المقطر حتى الوصول إلى التعادل (pH=7) لإزالة الأملاح الزائدة والبقايا غير المتفاعلة.
- التجفيف والتكليس (Calcination): جُففت العينة عند55 C° لمدة 24 ساعة، ثم خضعت لعملية تكليس في فرن حراري عند 500C°لمدة 5ساعات لتعزيز البنية البلورية وإزالة الشوائب العضوية، متبوعة بطحن يدوي للحصول على مسحوق ناعم.

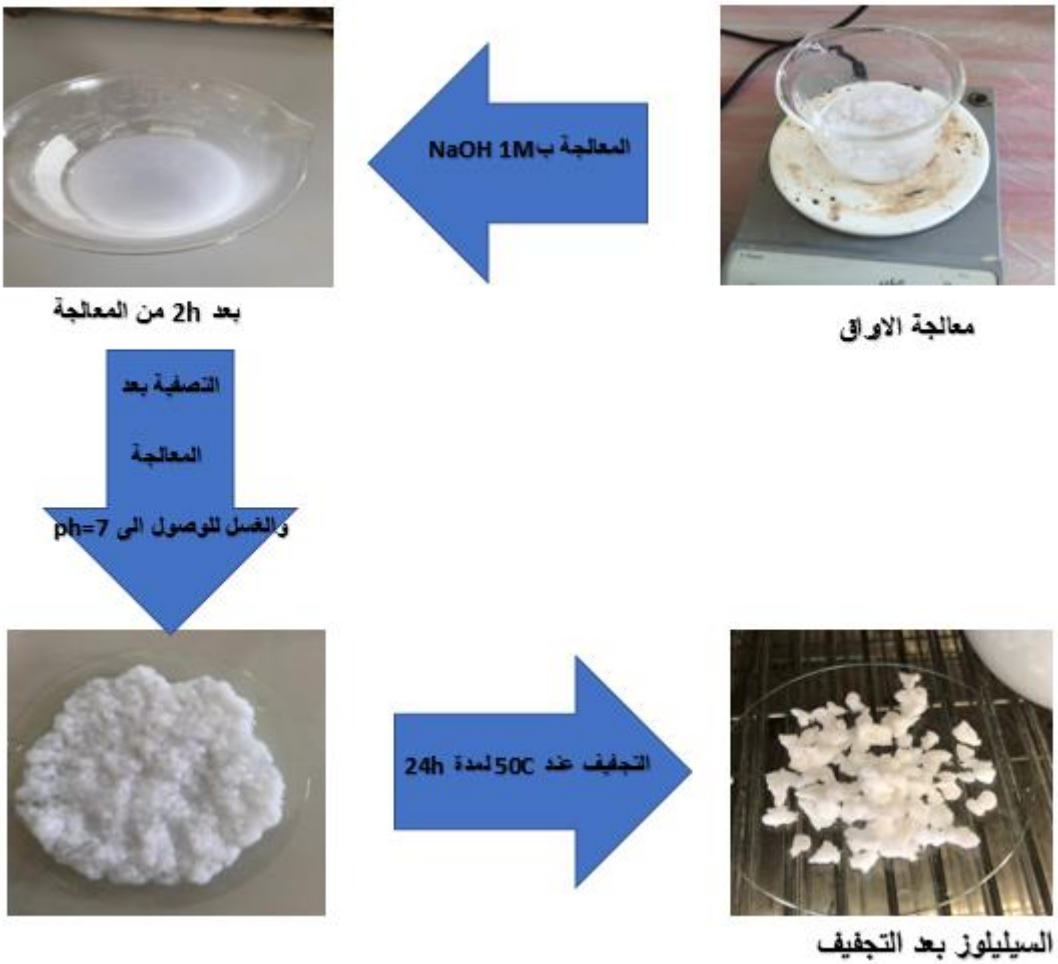
5- تحضير المركب النانوي الهجين (Fe_3O_4-Cellulose Composite)

لدمج جسيمات أكسيد الحديد مع المصفوفة السيليلوزية، اتبعت الخطوات التالية:

- تشتيت السيليلوز: أذيب 5 g من ألياف السيليلوز في 50 ml الماء المقطر، ثم عرض المحلول للموجات فوق الصوتية باستخدام جهاز (Ultrasonic Bath) لمدة 30 دقيقة لضمان تفكك الألياف ومنع تكتلها.
- التطعيم النانوي: أضيف 0.05g من مسحوق أكسيد الحديد النانوي المحضر إلى معلق السيليلوز.
- التفاعل والتجانس: استمرت عملية الخلط والمغنطة عند درجة حرارة 50C° لمدة ساعتين لضمان التوزيع المتجانس للجسيمات على سطح الألياف.
- الاستخلاص النهائي: جُمع المركب الناتج بالطرد المركزي 4500rpm لمدة 10ثم جُفف نهائياً عند 55C° لمدة 24 ساعة للحصول على المنتج النهائي الجاهز للتوصيف (Characterization).

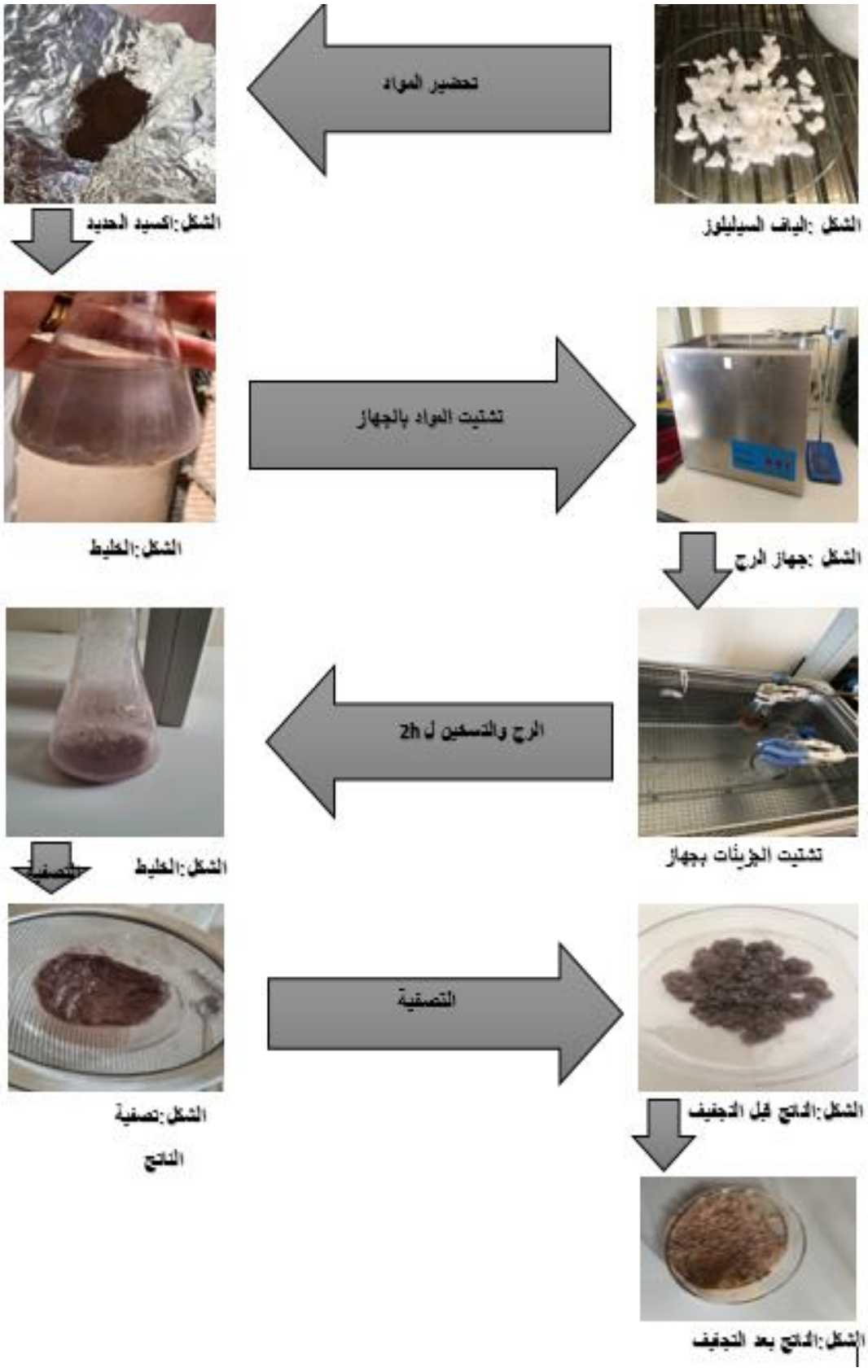
الشكل1 : مجموعة من الصور الفوتوغرافية للبروتوكول المتبع في تحضير الجسيمات النانوية

6-بروتوكول تحضير السيليلوز:



الشكل2 : مجموعة من الصور الفوتوغرافية لتحضير السيليلوز

7-بروتوكول تحضير المركب اكسيد الحديد – سيليلوز:

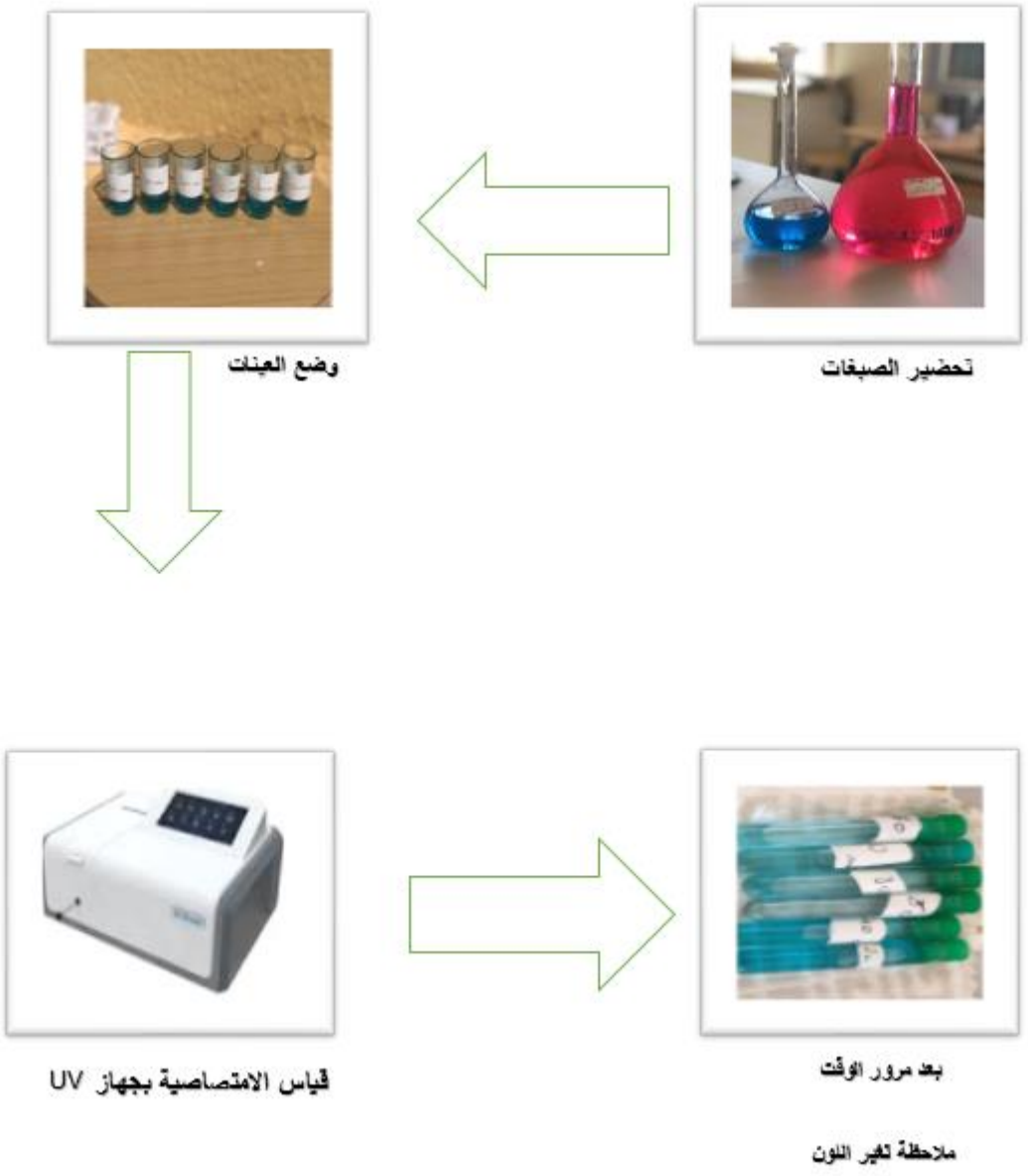


الشكل3: مجموعة من الصور الفوتوغرافية لتحضير مركب اكسيد الحديد – سيليلوز

8-التحفيز الضوئي:

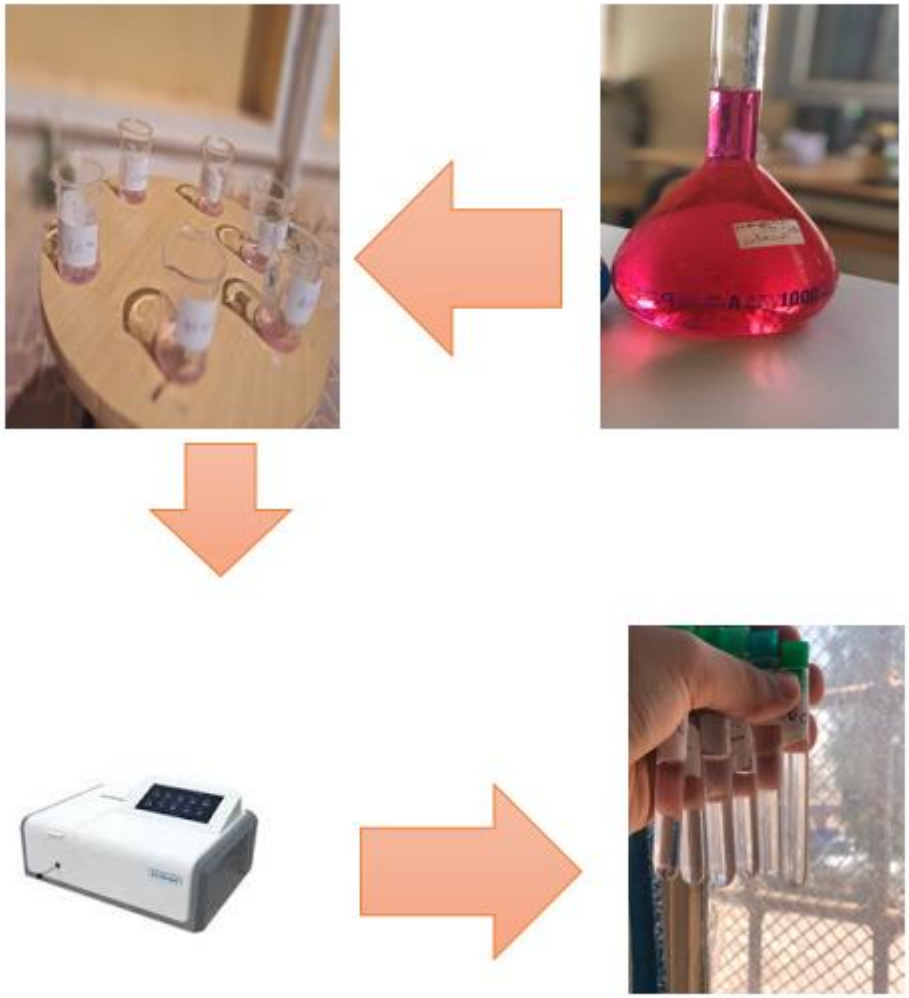
البروتوكول:

تم تحضير صبغتي ازرق الميثيلين ووردية البنغال بتركيز 5mgl وتم اخذ منها 8ml ووضعها في بيشرات مصغرة كما موضح في الصور وتم وزن 2mg من الاكسيد والمركب الهجين واضافتها لمحلول الصبغة كل على حدا مع تحديد الوقت 0 20 40 60 80 120 min وقياس التركيز والامتصاصية .

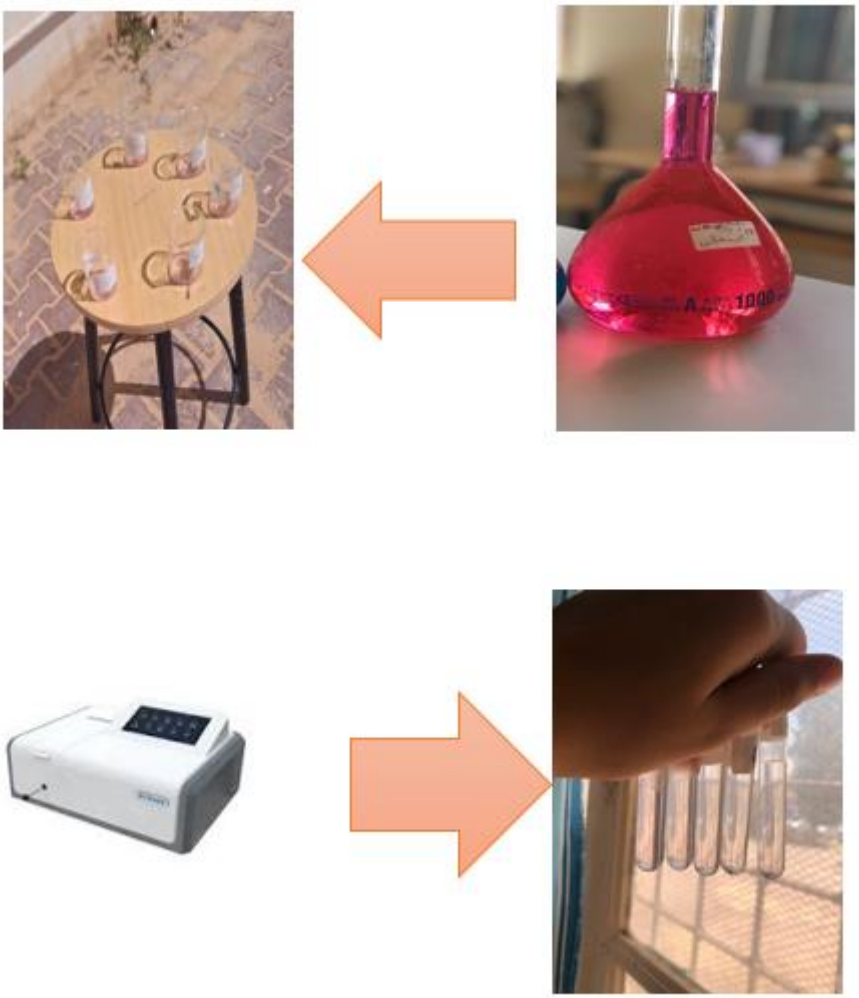


الشكل4: مجموعة من الصور الفوتوغرافية بروتوكول التحفيز الضوئي للمركب اكسيد الحديد –سيليلوز باستخدام ازرق الميثيلين

الشكل5: مجموعة من الصور الفوتوغرافية التحفيز الضوئي لاكسيد الحديد باستخدام صبغة ازرق الميثيلين



الشكل6: مجموعة من الصور الفوتوغرافية التحفييز الضوئي لمركب اكسيد الحديد – سيليلوز باستخدام وردية البنغان



الشكل7: مجموعة من الصور الفوتوغرافية للتحفيز الضوئي لاكسيد الحديد باستخدام صبغة وردية البنغال

9-بروتوكول النشاط المضاد للبكتيريا:

تم تقييم النشاط المضاد للميكروبات لأكسيد الحديد و المركب قائمة اكسيد الحديد –السليلوز باستخدام طريقة الانتشار في الآبار على وسط الآجار

تم تقييم النشاط المضاد للميكروبات لعينتين اختباريتين Fe_3O_4 و Fe_3O_4–Cell باستخدام طريقة الانتشار في الآبار على وسط الآجار ضد أربعة سلالات بكتيرية مرجعية: الإشريكية القولونية ATCC 25922، والزائفة الزنجارية ATCC 27853، والمكورات العنقودية الذهبية ATCC 25932، والعصوية الرقيقة ATCC 25973، بالإضافة إلى سلالة الفطريات المرجعية المبيضة البيضاء ATCC 10231. استُخدم وسط مولر–هينتون أجار (MHA) كوسط زرع قياسي لجميع الاختبارات البكتيرية، بينما استُخدم وسط سابورو ديكستروز أجار (SDA) لاختبار فعالية مضادات الفطريات ضد المبيضات البيضاء. تم تحضير كلا الوسطين وتعقيمهما وسكبهما في أطباق بتري وفقًا للإجراءات الميكروبيولوجية القياسية.

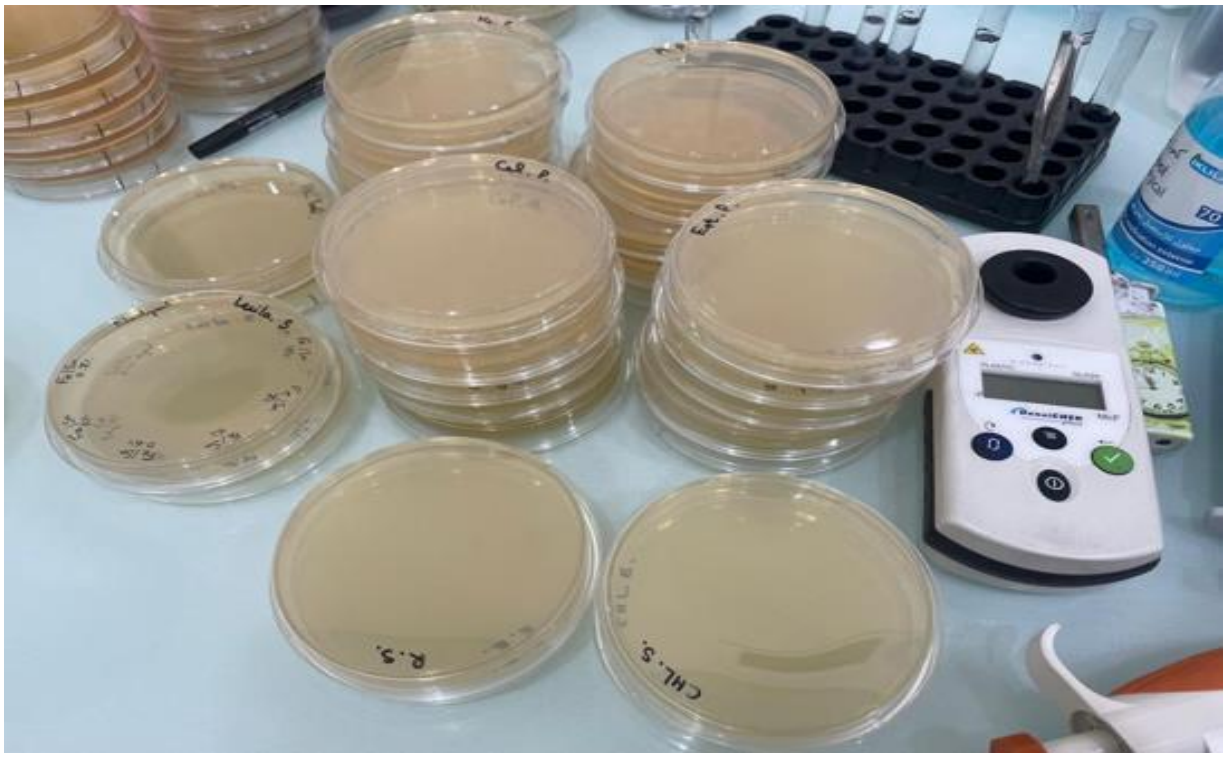
تم ضبط عكارة كل من مزارع بكتيرية طازجة (عمرها 24 ساعة) مُنمّاة في مرق مولر–هينتون، ومزرعة فطرية طازجة من المبيضات البيضاء مُنمّاة في مرق سابورو ديكستروز، بحيث تُعادل عكارة كل منهما معيار ماكفارلاند 0.5، أي ما يُعادل تقريبًا

1×10^6 وحدة تشكيل مستعمرة/مل، باستخدام محلول ملحي فسيولوجي معقم (0.9% كلوريد الصوديوم). تم تلقيح كل طبق بشكل متجانس باستخدام مسحة قطنية معقمة لضمان نمو متجانس للميكروبات على كامل سطح الأجار.

تم تحضير محاليل مركزة من كل من إكستاسيبت وسيلفيوسين وتخفيفها للحصول على أربعة تراكيز عاملة: 80، 40، 20، و10 ملغم/مل. بعد تجفيف الأطباق الملقحة في ظروف معقمة، تم حفر آبار

بقطر 6 مم في سطح الآجار باستخدام مثقب فلين معقم. وُضع حجم 50 ميكرولتر من كل تركيز Fe_3O_4 و Fe_3O_4–Cell في الآبار المخصصة. أُضيف محلول ملحي فسيولوجي معقم كعينة تحكم سلبية في كل طبق لاستبعاد أي تأثير مثبط ناتج عن المذيب، مما يضمن أن مناطق التثبيط المرصودة ناتجة حصريًا عن النشاط المضاد للميكروبات لعينات الاختبار.

حُضنت أطباق البكتيريا عند درجة حرارة 37 درجة مئوية لمدة 24 ساعة، بينما حُضنت أطباق المبيضات البيضاء عند درجة حرارة 35–37 درجة مئوية لمدة 48 ساعة، وفقًا لإرشادات معهد المعايير السريرية والمخبرية (CLSI). بعد التحضين، حُدد النشاط المضاد للميكروبات بقياس قطر مناطق التثبيط (مم) المحيطة بكل بئر باستخدام مقياس رقمي. تم اعتبار مناطق التثبيط التي يزيد قطرها عن 6 مم مؤشراً على النشاط المضاد للميكروبات [1].

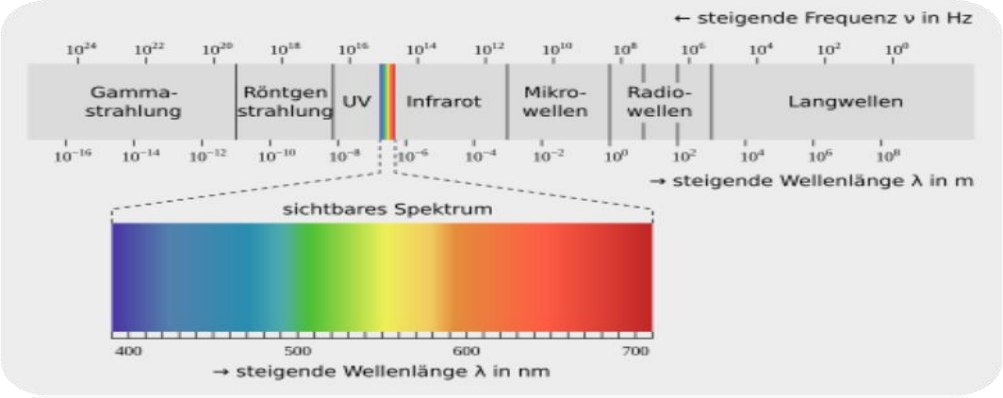


صورة فوتوغرافية لمزارع البكتيريا

10- اساليب التحليل والوصف العملي:

10-1مطيافية الاشعة تحت الحمراء:

تُعد مطيافية الأشعة تحت الحمراء وتحويل فوريه (FT-IR) من أهم التقنيات التحليلية المعتمدة في توصيف المواد العضوية وغير العضوية وتحديد مجموعاتها الوظيفية بدقة عالية. ويقوم مبدأ عمل هذه التقنية على دراسة قدرة الجزيئات على امتصاص أطوال موجية محددة من الأشعة تحت الحمراء، وهو الامتصاص الذي يؤدي إلى إثارة الاهتزازات الجزيئية (كالتمطط والانحناء) للروابط الكيميائية، حيث يشترط حدوث تغير في عزم ثنائي القطب للجزيء لظهور الإشارة الطيفية. وتُركز هذه التقنية غالباً على منطقة الأشعة تحت الحمراء المتوسطة، والتي تتراوح أعدادها الموجية ما بين 4000 و 400 سم$^{-1}$، إذ تظهر فيها 'البصمة الطيفية' الفريدة لكل مادة، مما يسمح بتمييز بنيتها بدقة فائقة. ويتميز جهاز FT-IR الحديث عن الأجهزة التقليدية بسرعته العالية وحساسيته المرتفعة، نظراً لقدرته على قياس جميع الأطوال الموجية في آن واحد وبشكل متزامن. وتتعدد تطبيقات هذه التقنية لتشمل التحليل البنيوي للمركبات، ومراقبة الجودة في الصناعات الدوائية والكيميائية، بالإضافة إلى دورها الحيوي في علوم المواد والتشخيص الطبي[2].



الشكل8 :موقع حيز الاشعة تحت الحمراء في طيف الموجات الكهرومغناطيسية

الشكل 9: صورة فوتوغرافية لجهاز الاشعة تحت الحمراء مخبر كلية العلوم الدقيقة جامعة الوادي

10-2حيود الاشعة السينية XRD:

تُعد تقنية حيود الأشعة السينية (XRD) من أهم التقنيات التحليلية غير الإتلافية المستخدمة في توصيف المواد الصلبة، حيث تهدف بشكل أساسي إلى تحديد التركيب البلوري، والمسافات البينية للشبكة الذرية، وتقدير حجم الحبيبات البلورية. يعتمد مبدأ عمل هذه التقنية على تسليط حزمة من الأشعة السينية على العينة، مما يؤدي إلى تشتت الأشعة عند اصطدامها بالذرات وتداخلها بناءً على قانون براغ $n\lambda = 2d\sin\theta$؛ حيث ينتج عن هذا التداخل نمط حيود فريد يمثل 'بصمة' مميزة للتركيب الداخلي للمادة. وتوفر هذه التقنية معلومات دقيقة تشمل تحديد الأطوار البلورية المختلفة (Phase Identification)، ومعرفة نوع النظام البلوري (كالمكعب أو السداسي)، بالإضافة إلى الكشف عن العيوب والإجهادات الداخلية في الشبكة. ونظراً لدقتها، تبرز أهمية الـ XRD بشكل واسع في علوم المواد والمعادن، خاصة في دراسة المواد النانوية، والتحليلات الجيولوجية، والصناعات الصيدلانية، مما يجعلها أداة لا غنى عنها في التحقق من نقاوة وبنية المركبات المحضرة[3].

الشكل10 :جهاز XRD

10-3مطيافية الاشعة المرئية وفوق البنفسجية UV-VIS:

تُعد مطيافية الأشعة فوق البنفسجية والمرئية (UV–Vis) من أبرز التقنيات التحليلية التي تعتمد على قياس كمية الضوء الممتص بواسطة عينة كيميائية عند تعرضها لأطوال موجية محددة. يرتكز مبدأ عملها على إثارة الإلكترونات ونقلها من مستويات الطاقة المستقرة إلى مدارات أعلى نتيجة امتصاص الفوتونات، حيث يغطي هذا الفحص نطاق الأشعة فوق البنفسجية (200 – 400 نانومتر) المفيد في الكشف عن الروابط المزدوجة، والنطاق المرئي (400 – 800 نانومتر) المخصص للمركبات الملونة.تستند هذه التقنية في تحليلها الكمي إلى قانون بير–لامبرت، الذي يحدد علاقة طردية بين الامتصاصية (A) وتركيز المادة (c) وطول مسار الضوء (l) وفق المعادلة: $A = \varepsilon . c . l$

حيث يمثل ε معامل الامتصاص المولي[4].

الشكل 11: جهاز UV–VIS

10-4المجهر الالكتروني الماسح SEM:

يعتبر المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) أداة بحثية متطورة تُستخدم لفحص أسطح المواد بدقة نانوية متناهية. على عكس المجاهر الضوئية، يعتمد SEM على تسليط حزمة مركزة من الإلكترونات بدلاً من الضوء، مما يسمح بتكبير العينات مئات آلاف المرات. تُنتج هذه العملية صوراً ثلاثية الأبعاد مذهلة تظهر تفاصيل التضاريس السطحية والتركيب الكيميائي للمواد، مما يجعله ركيزة أساسية في مجالات النانو تكنولوجي، الطب الشرعي، وعلوم المعادن.

الشكل12: المجهر الالكتروني الماسح SEM

المراجع بالاتينية :

[1] B. H. J. &. P. J. Bonev, " Principles of assessing bacterial susceptibility to antibiotics using the agar diffusion method.," *Journal of antimicrobial chemotherapy,* vol. 61, 2008.

المراجع بالعربية :

[2] بواسطة االشعة السينية واألشعة تحت الحمراء وأشعة trimethoxybenzaldehyde 2.4.5-دراسة المادة " ,طيطي .م ومقارنتها مع visible.UV وRAMAN DFT ,7," pp. 16-17.

[3] بوزيد .ض ,"بطريقة ريتفلد ABB'X4دراسة تطور الخصائص البنيوية لمركبات " pp. 14-20, 2021.

[4] ب .ا .س .ر ,ليلى " , ,"في تقدير المركبات الفعالة وفعاليتها UV-VISتطبيقات مطيافية الاشعة المرئية وفوق البنفسجية pp. 20-23, 2022.

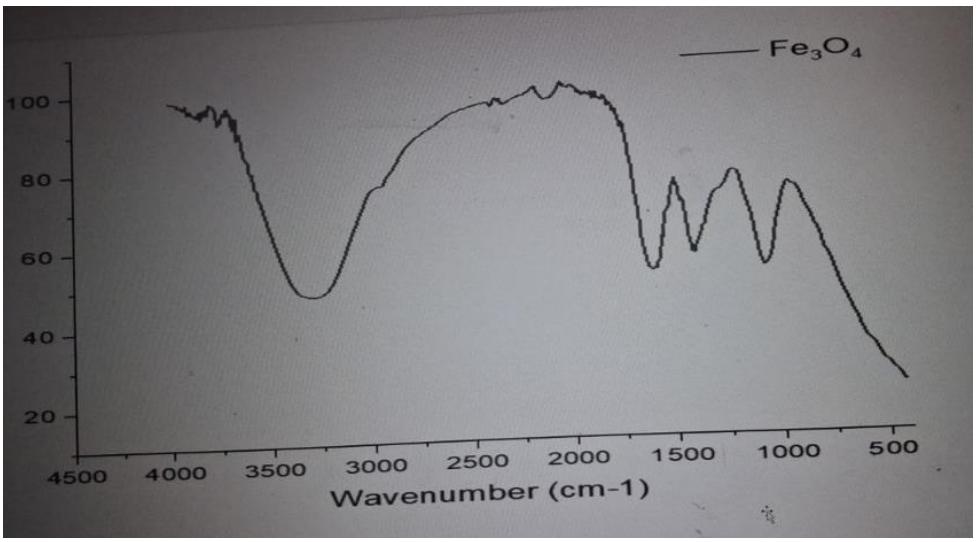
الفصل الثاني

النتائج والمناقشة

تمهيد

تم اجراء تحاليل مطيافية الاشعة تحت الحمراء، الاشعة فوق البنفسجية ،المجهر الماسح، الاشعة السينية لكل من اكسيد الحديد النانوي والمركب الهجين ودراسة تطبيقاته المتمثلة في النشاط المضاد للميكروبات والتحفيز الضوئي وكانت النتائج كالتالي :

مناقشة وتحليل طيف الأشعة تحت الحمراء (*FTIR*) لمركب أكسيد الحديد بطريقة التصنيع الأخضر قبل الحرق :



الشكل a-1 : طيف FTIR لمركب Fe_3O_4

تحليل وتفسير الحزم الامتصاصية الرئيسية:

- ✓ **النطاق الممتد بين (3600 – 3200 cm):**
  - تظهر حزمة امتصاص عريضة وقوية متمحورة حول 3300 تقريباً، وتعود هذه الحزمة إلى **اهتزاز الاستطالة المميز لمجموعات الهيدروكسيلOH.**
- ✓ **النطاق عند (1630 – 1620cm):**

- تظهر قمة امتصاص حادة نسبياً حول 1630، وهي تعود إلى **اهتزاز الانحناء التماثلي لجزيئات الماء OH**

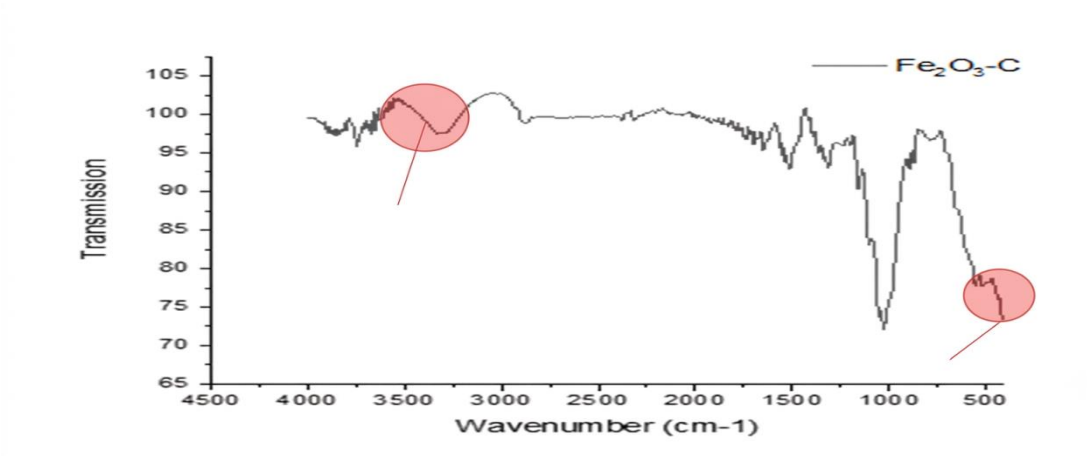
✓ **القمم بين (1400 – 1000cm):**

- تظهر قمتان أو تشوهات طيفية واضحة (حول 1380 و 1050).
- في حالة تحضير الجسيمات عبر **طرق كيميائية خضراء** أو باستخدام عوامل اختزال حيوية (مثل السكريات أو المستخلصات الحيوية كـ السيلولوز أو الخميرة)، تعود هذه القمم لاهتزازات الروابط الكربونية مثل اهتزاز الاستطالة للرابطة (C–O).

✓ **النطاق الكربوني الممتد (600 – 500cm):**

- يلاحظ هبوط حاد ومستمر في الطيف يبدأ بالتشكل بوضوح تحت 600 ممتداً نحو 500 وما دونه.
- هذه الحزمة هي **البصمة المميزة لروابط المعدن–أكسجين Fe–O** في الشبكة البلورية لـ Fe_3O_4.
- تعود القمة الحادة والعميقة في هذا النطاق تحديداً إلى اهتزاز الروابط الاهتزازية لذرات الحديد في المواقع ثمانية السطوح ورباعية السطوح ضمن بنية السبينل (Spinel structure) المميزة للمغنيتيت..

مناقشة وتحليل طيف الأشعة تحت الحمراء (*FTIR*) لمركب أكسيد الحديد – سيليلوز بطريقة التصنيع الأخضر:



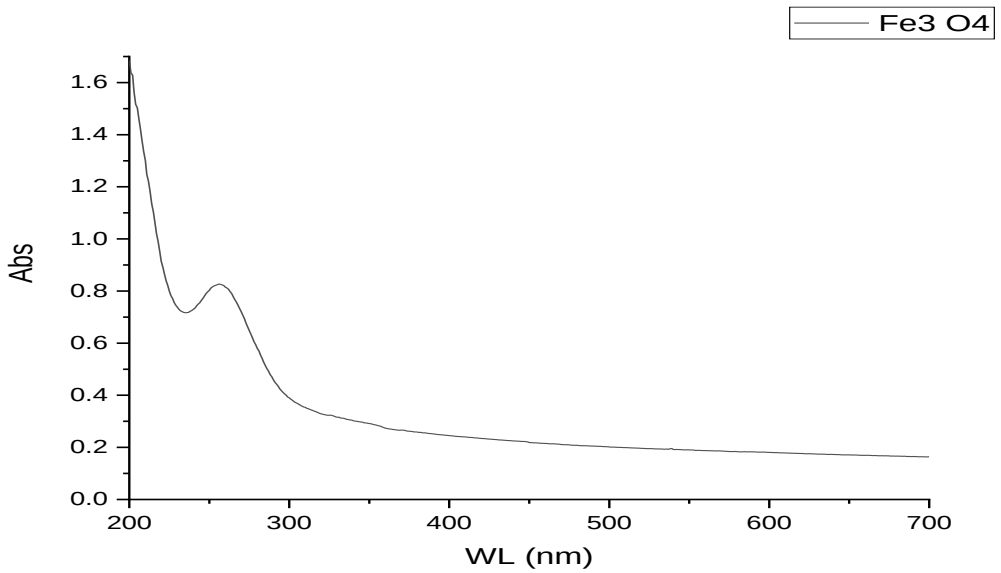
الشكل b–1 : طيف FTIR لمركب Fe_3O_4_ Cell

تحليل النطاقات والقمم الامتصاصية: يمكن تقسيم مناطق الامتصاص إلى ما يلي

- ✓ منطقة الهيدروكسيل والروابط الهيدروجينية: القمة العريضة عند $3400–3300cm^{-1}$ تعود لاهتزازات استطالة مجموعات الهيدروكسيل (O–H) الحرة والمرتبطة، وهي سمة أساسية في هيكل السليلوز، كما تشير إلى وجود بقايا الفينولات أو السكريات المشتقة من مستخلص الخميرة.
- ✓ منطقة الروابط الكربونية والبروتينية: القمة عند $1630cm^{-1}$ تُعزى إلى اهتزازات الانحناء لجزيئات الماء الممتصة، أو قد تمثل رابطة الكربونيل (C=O)، مما يشير إلى وجود بقايا بروتينية من الخميرة ساهمت في استقرار الجسيمات النانوية.
- ✓ القمة عند $1420cm^{-1}$: ترتبط باهتزازات الانحناء لمجموعات (OCH) (CH)في هيكل السليلوز.

- ✓ بصمة السليلوز: القمة الحادة والامتصاص القوي عند $1025cm^{-1}$ تمثل اهتزازات الامتطاط للرابطة C–O–C (الجليكوسيدية) والروابط C–O و C–C المميزة لبنية السليلوز. قوة هذه القمة تؤكد احتفاظ السليلوز ببنيته الأساسية بعد الدمج.
- ✓ منطقة أكسيد الحديد: القمة في المدى القريب من $550cm^{-1}$ وهي الدليل المباشر على نجاح التخليق، حيث تعود لاهتزازات الامتطاء للرابطة المعدنية–الأكسجينية (Fe–O)، وهي تميز أكسيد الحديد الثلاثي . [3] [4]

مناقشة وتحليل طيف الأشعة فوق البنفسجية (UV) لعينة أكسيد الحديد النانوي ومركب أكسيد الحديد – سيليلوز بطريقة التصنيع الأخضر :



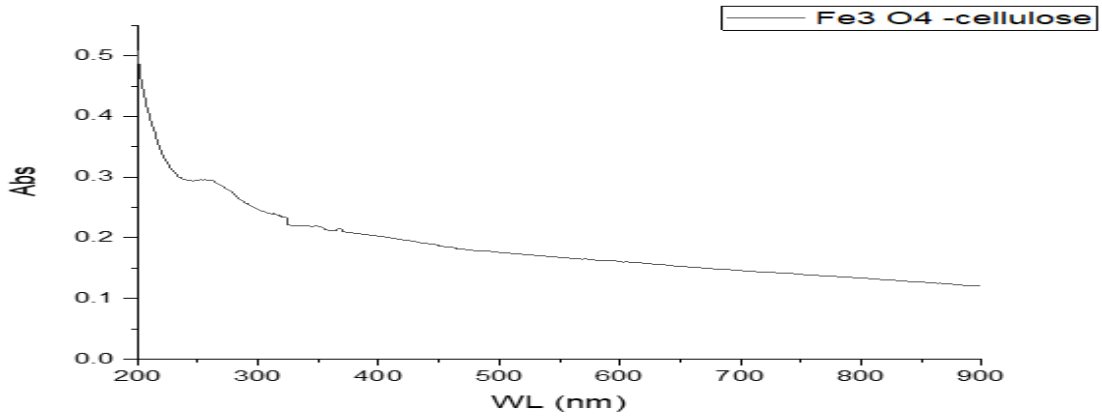
الشكل 2: طيف الأشعة فوق البنفسجية (UV) لعينة Fe_3O_4

- ✓ يظهر المنحنى ذروة امتصاص واضحة تقع تقريباً في النطاق بين 260 إلى 270 نانومتر (nm) قد تشير هذه الذروة إلى تكوّن الجسيمات النانوية، و يؤكد ذلك بالاعتماد على نتائج XRD و FTIR.

- ✓ الارتفاع الحاد في الامتصاصية (Absorbance) عند الطول الموجي القريب من 200 نانومتر يعود غالباً إلى وجود بقايا المكونات العضوية أو الجزيئية الحيوية المستخدمة في عملية الاستخلاص (مثل المركبات أو المستخلصات الحيوية التي تحتوي على روابط ثنائية أو مجموعات كربونيل)، و التي تندمج كعوامل استقرار أو تغليف (Capping agents) حول الجسيمات النانوية.
- ✓ الخلاصة:

هذا الطيف يقدم دليلاً بصرياً ومخبرياً مؤكداً على النجاح في توليد (Synthesis) جسيمات أكسيد الحديد النانوية، حيث تمثل الذروة عند ~265 نانومتر إشارة طيفية محتملة مرتبطة بوجود الجسيمات النانوية. [3] [4]

تحليل طيف الأشعة فوق البنفسجية (UV) لمركب Fe_3O_4_ Cell:



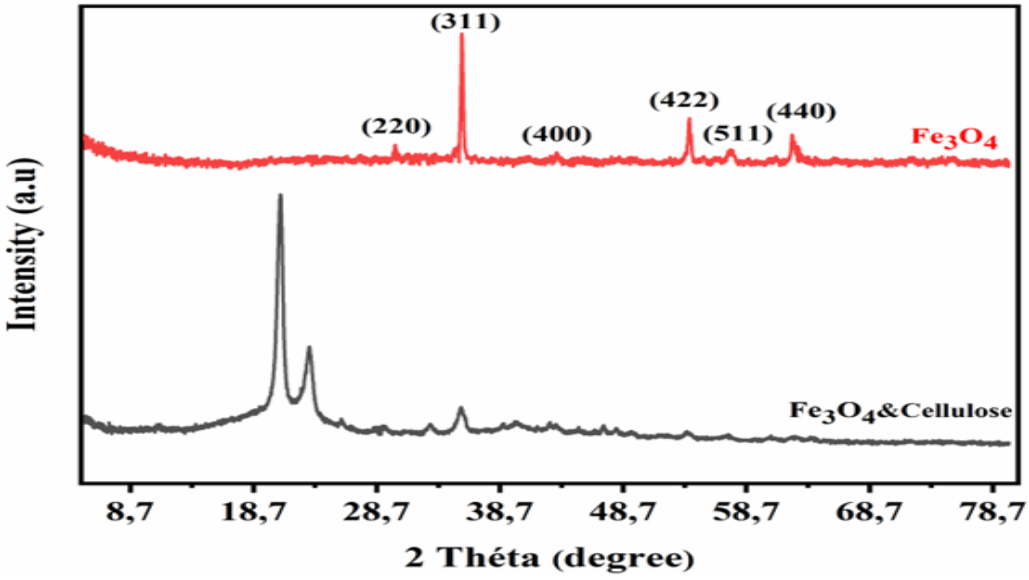
الشكل 3: طيف الأشعة فوق البنفسجية (UV) لمركب Fe_3O_4_ Cell:

- ✓ نلاحظ أن قيمة الامتصاصية (Absorbance) عند قمة المنحنى قد انخفضت بشكل ملحوظ لتصل إلى حوالي 0.3 بعد أن كانت تتجاوز 0.8 في المنحنى السابق.

- ✓ **تغير شكل القمة (Broadening and Flattening):**
- ✓ القمة الحادة التي كانت تظهر بوضوح عند النطاق الموجي (260 – 270 نانومتر) تحولت هنا إلى قمة عريضة ومسطحة نسبيًا (Broad peak) أو شبه هضبة تمتد بين 250 إلى 280 نانومتر دلالة على حدوث تفاعل وترابط فيزيائي أو كيميائي بين المجموعات الوظيفية للسيليلوز (مثل روابط الهيدروكسيل OH) وسطح أكسيد الحديد النانوي.
- ✓ **السلوك الطيفي بعد 300 نانومتر :**
- ✓ يستمر المنحنى بالانخفاض التدريجي والمستمر في منطقة الضوء المرئي (فوق 400 نانومتر)، وهو السلوك النموذجي و المميز لـ Fe_3O_4 لمصنع حيوياً، حيث يختفي الامتصاص تقريباً في الأطوال الموجية الطويلة. [4] [3]
- ✓ **خلاصة:**

السيليلوز يعمل كمصفوفة بوليمرية طبيعية (Polymeric matrix) تحيط بجسيمات أكسيد الحديد وتغلفها. هذا التغليف يؤدي إلى تخفيف شدة الامتصاصية (Absorbance) لأن الجسيمات النانوية أصبحت "مدمجة" ومقيدة داخل شبكة السيليلوز، ولم تعد حرة بالكامل.

3-تحليل حيود الأشعة السينية (XRD Analysis) :



الشكل (4): أنماط حيود الأشعة السينية (XRD) لجسيمات Fe_3O_4 النانوية والمركب النانوي Fe_3O_4/Cellulose .

يوضح الشكل (X) أنماط حيود الأشعة السينية (XRD) لجسيمات Fe3O4 النانوية والمركب النانوي Fe_3O_4/Cellulose. أظهرت جسيمات Fe_3O_4 قمم حيود مميزة عند الزوايا °30.2 =2θ، °35.6، °43.3، °54، °57.6، و°62.4، و التي تعود إلى المستويات البلورية (220)، (311)، (400)، (422)، (511)، و(440) على التوالي، مما يؤكد تكوين التركيب البلوري المكعب المميز لأكسيد الحديد المغناطيسي Fe_3O_4، كما هو موضح في الجدول (1).

الجدول (1): بيانات قمم XRD لجسيمات Fe_3O_4 النانوية

(°)FWHM	الشدة	hkl	(°)2θ
0.157	4921,4	(220)	30.2
0.098	33850,83	(311)	35.6
0.315	2292.17	(400)	43.3
0.079	11636,52	(422)	54.0
0.551	2783,7	(511)	57.6
0.118	7127,01	(440)	62.4

أما بالنسبة للمركب النانوي Fe3O4/Cellulose، فقد ظهرت قمم Fe_3O_4 نفسها ولكن بشدة أقل واتساع أكبر مقارنة بجسيمات Fe_3O_4 النقية، وذلك راجع إلى تفاعل الجسيمات النانوية مع السيليلوز وانخفاض درجة التبلور بعد تكوين المركب النانوي. كما لوحظ ظهور نطاقات عريضة في المجال $2\theta \approx 16° - 23°$. تعود إلى الطبيعة شبه غير المتبلورة للسيليلوز، مما يؤكد نجاح دمج السيليلوز مع جسيمات Fe_3O_4 النانوية. إضافة إلى ذلك، أظهرت قيم FWHM المدرجة في الجدول (2) زيادة في اتساع القمم للمركب النانوي مقارنة بالنانو Fe_3O_4 النقي، مما يشير إلى انخفاض الحجم البلوري بعد دمج السيليلوز.

الجدول (2): بيانات قمم XRD للمركب النانوي Fe_3O_4/Cellulose.

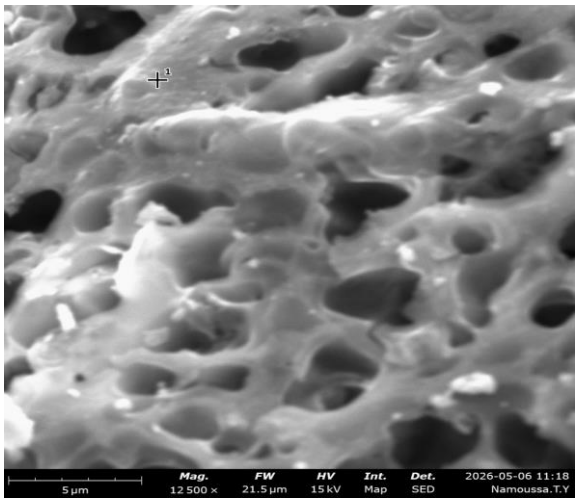
(°)FWHM	الشدة	hkl	(°)2θ
0.551	6099.91	(311)	35.5
0.945	1268.28	(400)	43.03
0.630	1170.75	(422)	53.9
0.787	858.07	(511)	57.2
0.787	824.96	(440)	62.6

تم حساب الحجم البلوري باستخدام معادلة ديباي–شيرر (Debye–Scherrer) اعتمادًا على القمة الرئيسية (311) عند $2\theta = 35.5°$. وقد بلغ الحجم البلوري لجسيمات Fe_3O_4 النقية حوالي 85nm ، بينما انخفض إلى حوالي 15 nm في المركب النانوي Fe_3O_4/Cellulose، مما يشير إلى أن وجود السيليلوز ساهم في تقليل تكتل الجسيمات النانوية والحد من نموها البلوري [4] [3]

دراسة و مناقشة نتائج التحليل المجهري والإلكترونيSEMEDX

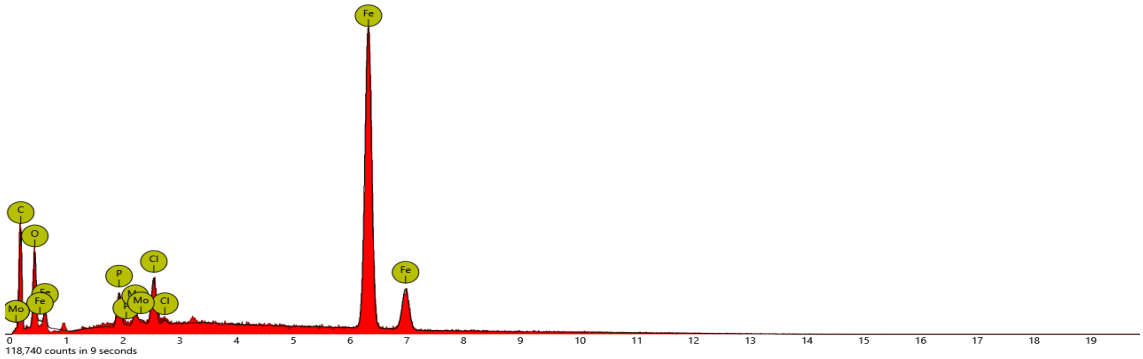
أولا أكسيد الحديد النانوي

1. spot

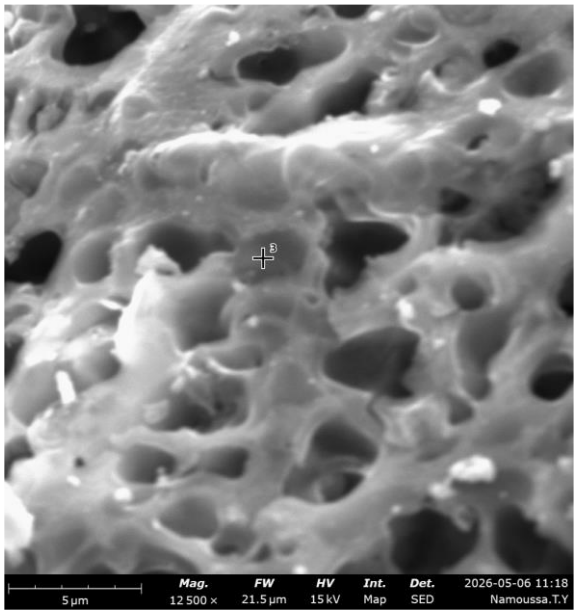


Element Symbol	Atomic Conc.	Weight Conc.	Oxide Symbol	Stoich. wt Conc.
Fe	41.72	73.10	Fe_2O_3	82.28
C	45.54	17.16		
O	8.76	4.39		
Cl	1.98	2.21		
Mo	0.59	1.77		
P	1.41	1.37		

FOV: 21.5 µm, Mode: 15kV - Map, Detector: SED, Time: MAY 6 2026 11:18

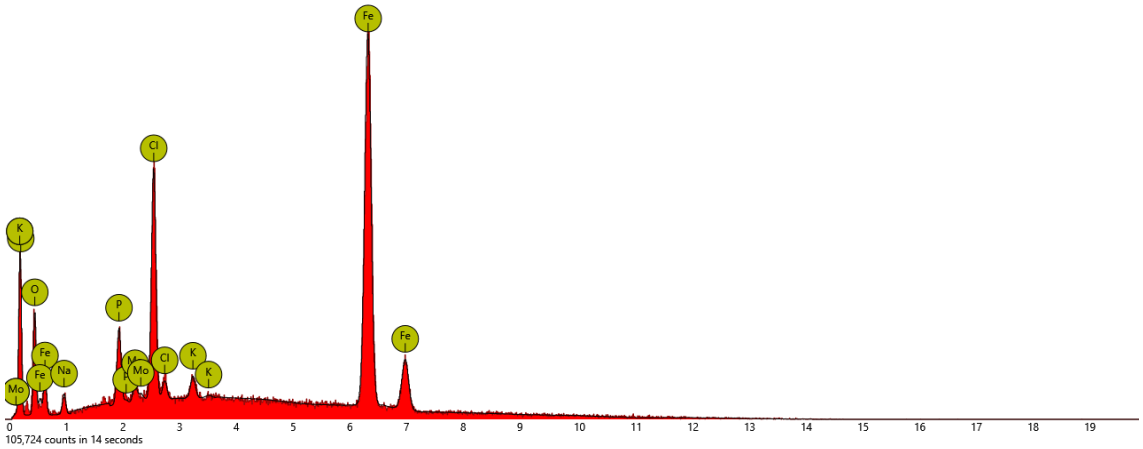


الشكل 5: يمثل نتائج SEM EDX لأكسيد الحديد النانوي Spot 1



Element Symbol	Atomic Conc.	Weight Conc.	Oxide Symbol	Stoich. wt Conc.
Fe	31.71	61.65	Fe_2O_3	72.32
C	49.31	20.62		
Cl	5.92	7.30		
O	8.87	4.94		
P	1.88	2.03		
Mo	0.49	1.65		
Na	1.17	0.94	Na_2O	1.04
K	0.65	0.88		

FOV: 21.5 µm, Mode: 15kV - Map, Detector: SED, Time: MAY 6 2026 11:18



الشكل 6: يمثل نتائج SEM EDX لأكسيد الحديد النانوي (Spot2)

أولاً: تحليل الشكل المورفولوجي (SEM)

تظهر صور SEM في كل من (Spot 1) و (Spot 2) بنية ذات مسامية عالية (Highly Porous Structure) حيث تظهر المادة كشبكة متداخلة تحتوي على فجوات و مسامات دقيقة.

ثانياً: التحليل الكيميائي (EDX)

يوفر جدول العناصر والمنحنى البياني (Spectrum) معلومات حول التركيب النوعي و الكمي للمكونات الرئيسية:

- الحديد (Fe) والأكسجين (O): هما المكونان الأساسيان، مما يؤكد تكوّن أكسيد الحديد. في (Spot 1)، تبلغ النسبة الوزنية للحديد حوالي 73.10%، وفي (Spot 3) حوالي 61.65%.
- أكاسيد الحديد المتوقعة: يشير الجدول إلى صيغة Fe_2O_3 الهيماتيت ($\alpha-Fe_2O3$) او الماجيميت ($\gamma-Fe_2O_3$) و هي الصيغ الأكثر استقراراً لأكاسيد الحديد النانوية.

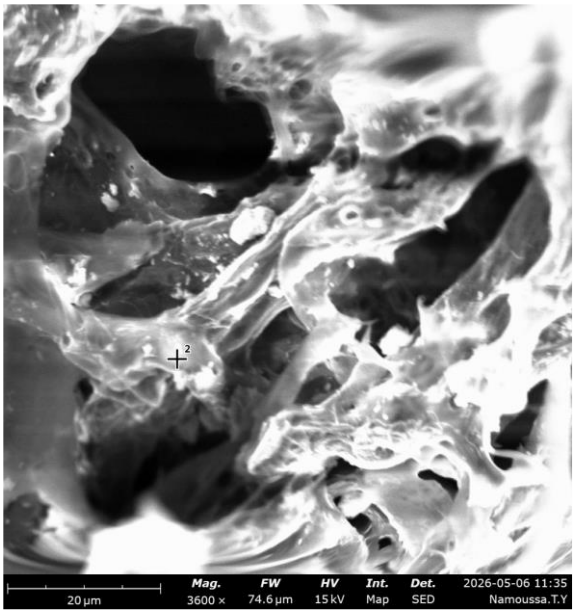
2. الشوائب والعناصر الأخرى :

- الكربون (C): يظهر بنسبة عالية (17% – 20%). قد يعود مصدره إلى الشريط اللاصق الكربوني المستخدم لتثبيت العينة أثناء الفحص، أو بقايا مواد عضوية من عملية التحضير.
- الكلور (Cl)، الفسفور (P)، والموليبدينوم (Mo): تظهر بنسب ضئيلة. وجود الكلور قد يشير إلى استخدام سلائف كيميائية مثل كلوريد الحديد ($FeCl_3$) وعدم غسل العينة بشكل كافٍ.
- الصوديوم (Na) والبوتاسيوم (K): ظهرا في (Spot 3)، مما قد يشير إلى تلوث موضعي أو استخدام قواعد تحتوي على هذه العناصر لترسيب الأكسيد. [4] [3] [4] [5]

الاستنتاج العلمي :

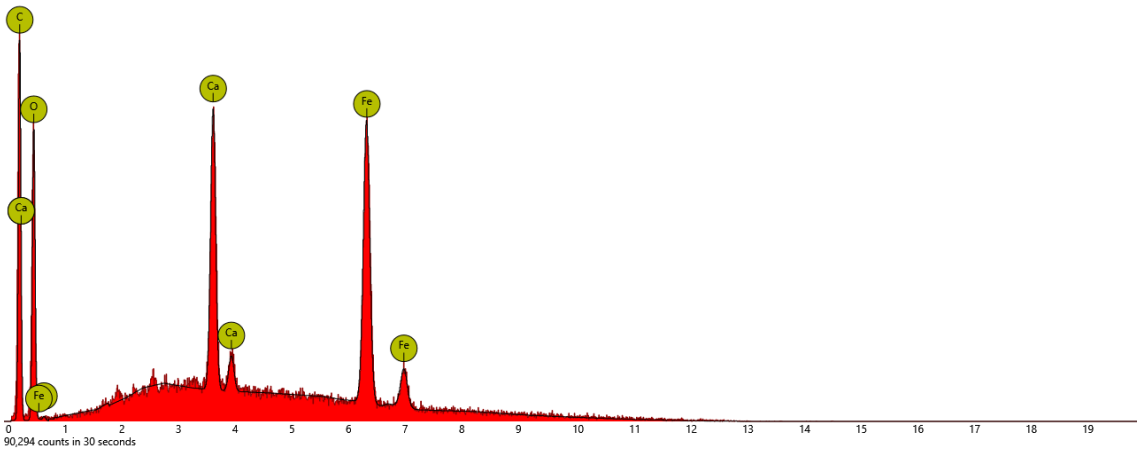
النتائج تؤكد بنجاح تحضير أكسيد حديد نانوي ذي بنية مسامية. القمم الحادة في منحنى EDX عند طاقات الحديد المميزة (حوالي 6.4 keV و 0.7 keV) تؤكد هوية العنصر بوضوح.

ثانيا مركب أكسيد الحديد– سليلوز

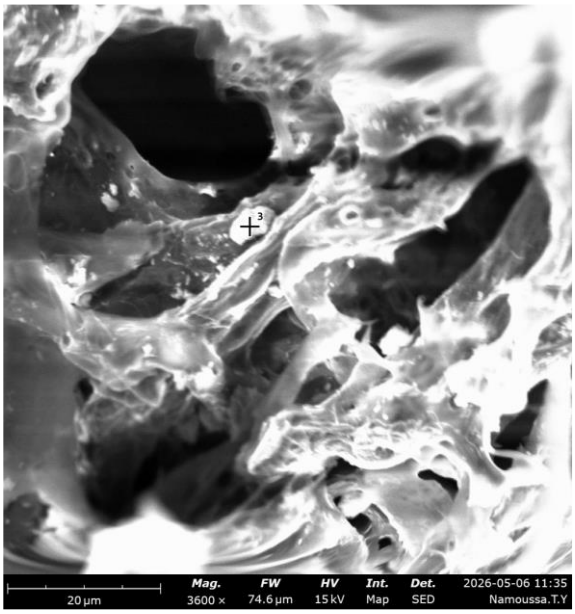


Element Symbol	Atomic Conc.	Weight Conc.	Oxide Symbol	Stoich. wt Conc.
Fe	18.69	45.28	Fe_2O_3	59.61
C	51.79	26.98		
O	22.58	15.67		
Ca	6.94	12.07	CaO	15.55

FOV: 74.6 µm, Mode: 15kV - Map, Detector: SED, Time: MAY 6 2026 11:35

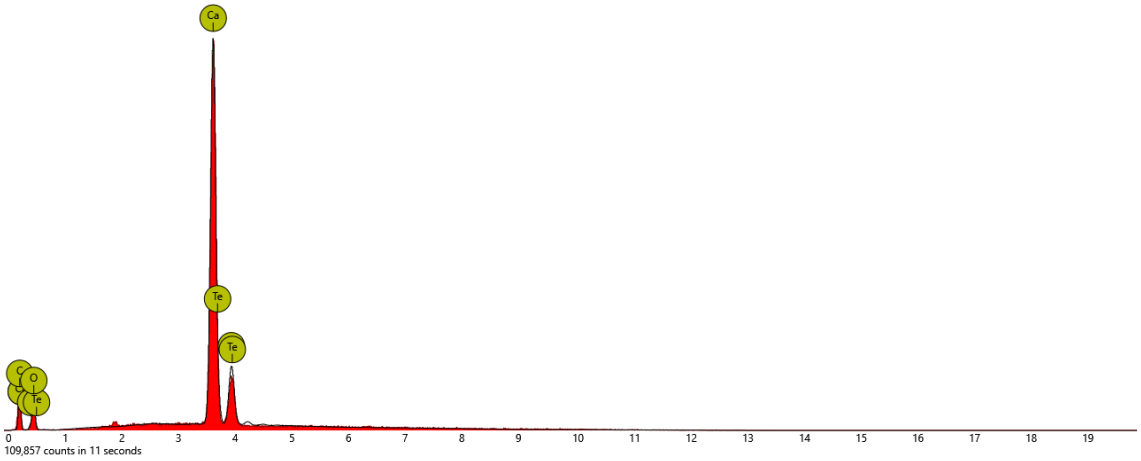


الشكل 7: يمثل نتائج SEM EDX لمركب أكسيد الحديد النانوي –سليلوز (Spot 1)



Element Symbol	Atomic Conc.	Weight Conc.	Oxide Symbol	Stoich. wt Conc.
Ca	51.99	62.59	CaO	77.28
Te	4.95	18.96		
O	24.26	11.66		
C	18.81	6.79		

FOV: 74.6 µm, Mode: 15kV - Map, Detector: SED, Time: MAY 6 2026 11:35



الشكل 8: يمثل نتائج SEM EDX لمركب أكسيد الحديد النانوي –سليلوز (Spot 2)

أولاً: تحليل المورفولوجيا السطحية (SEM)

- ✓ تظهر صور SEM في (Spot 1) و (Spot 2) بنية معقدة للغاية و تختلف عن أكسيد الحديد المنفرد:
- ✓ الملاحظة: تظهر المادة ككتل ليفية أو ورقية متداخلة مغطاة أو مدمجة بجسيمات أصغر. البنية مسامية جداً وذات فجوات كبيرة (Macropores). يمكن ملاحظة من الشكل أن

Fe_3O_4 النقي كان عبارة عن تجمع لجسيمات نانوية شبيهة بالكرات. مما يدل على أن وجود السليلوز قلل من تجمع جسيمات Fe_3O_4 النانوية ، تم توزيع جسيمات Fe_3O_4 النانوية بشكل متساوٍ على سطح السليلوز. ووفّر مواقع للتفاعل لنمو جسيمات Fe_3O_4 النانوية في مكانها، مما أدى إلى تكوين تجانس بين السليلوز وجسيمات Fe_3O_4 النانوية.

- ✓ المناقشة: يعمل السليلوز هنا كقالب (Template) أو كعامل داعم (Support matrix) يمنع تجمع (Aggregation) جسيمات أكسيد الحديد النانوية. هذه البنية المسامية تعزز من قدرة المركب على حبس الملوثات في تطبيقات معالجة المياه، حيث يوفر السليلوز مواقع ارتباط كيميائية بينما يوفر أكسيد الحديد القدرة على الفصل المغناطيسي.
- ✓ **ثانياً: التحليل الكيميائي وتوزيع العناصر (EDX)**

يظهر جدول العناصر تغيراً جوهرياً يؤكد نجاح عملية الدمج و المكونات الأساسية للمركب :

- ✓ الكربون (C): ارتفعت نسبته بشكل ملحوظ (تصل إلى 51.79% في Spot 1)، وهذا دليل قطعي على وجود السليلوز كعنصر عضوي رئيسي في المركب.
- ✓ الحديد (Fe) والأكسجين (O): بقاء قمم الحديد والأكسجين يؤكد وجود طور أكسيد الحديد داخل شبكة السليلوز.
- ✓ الكالسيوم (Ca): يظهر بنسبة واضحة (حوالي 12%)، وقد يعود ذلك إلى استخدام السليلوز من مصدر طبيعي يحتوي على أملاح كلسية، أو نتيجة لعملية الترسيب الكيميائي المستخدمة.

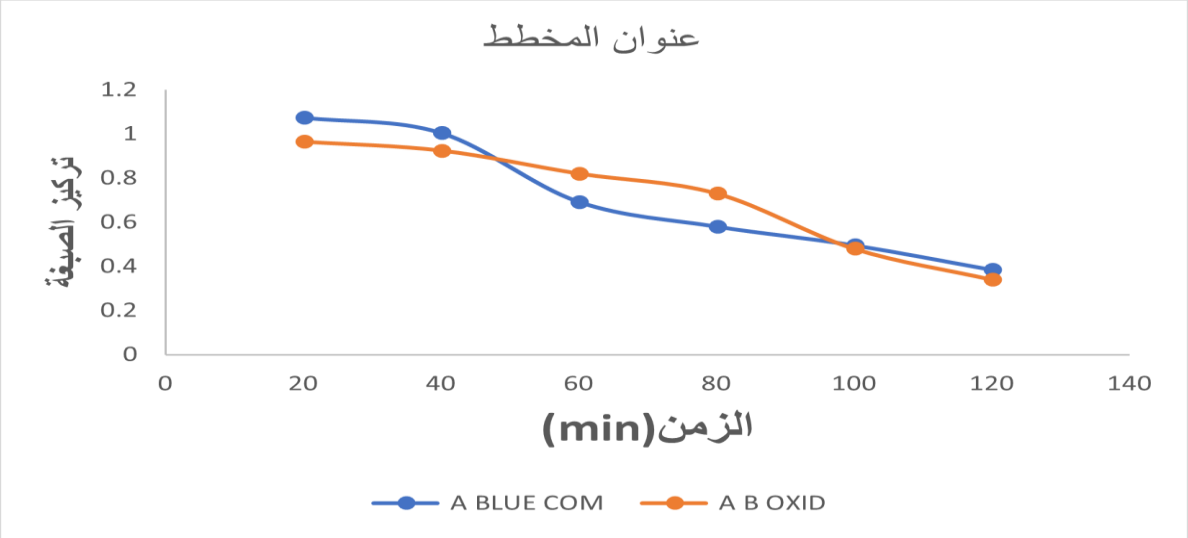
2-تحليل Spot 2 (المنطقة الغنية بالكالسيوم):

- ✓ نلاحظ في (Spot 2) هيمنة عنصر الكالسيوم (62.59%)، مما قد يشير إلى ترسب موضعي لكربونات الكالسيوم أو أكسيد الكالسيوم ضمن النسيج، وهو ما يعزز الطبيعة الهجينة للمادة. [4] [3]

خلاصة:

إن تداخل المادة العضوية (السليلوز) مع المعدن (الحديد) يمنح هذه الجزيئات استقراراً فيزيائياً؛ حيث تعمل جزيئات السليلوز كدروع محيطة تمنع الأكسدة الزائدة أو النمو البلوري غير المنضبط. هذه البنية المسامية تجعل من هذا المركب مرشحاً قوياً لاستخدامه كـ ممتز حيوي (Biosorbent) فعال لإزالة المعادن الثقيلة أو الصبغات، نظراً لتعدد مراكز الامتزاز النشطة على سطحه.

مناقشة وتحليل قدرة أكسيد الحديد النانوي (B-OXID) ومركب أكسيد الحديد-سليلوز (B-COM) على إزالة صبغة ازرق الميثيلين عبر طريقة التحفيز الضوئي:



الشكل 9: يمثل منحنى إزالة صبغة ازرق الميثيلين بواسطة أكسيد الحديد النانوي ومركب أكسيد الحديد-سليلوز

التقييم الحركي لعملية التحلل (Degradation Kinetics)

من خلال تتبع المنحنيات البيانية يمكن تقسيم سلوك النظام التحفيزي إلى فترتين زمنيتين متمايزتين:

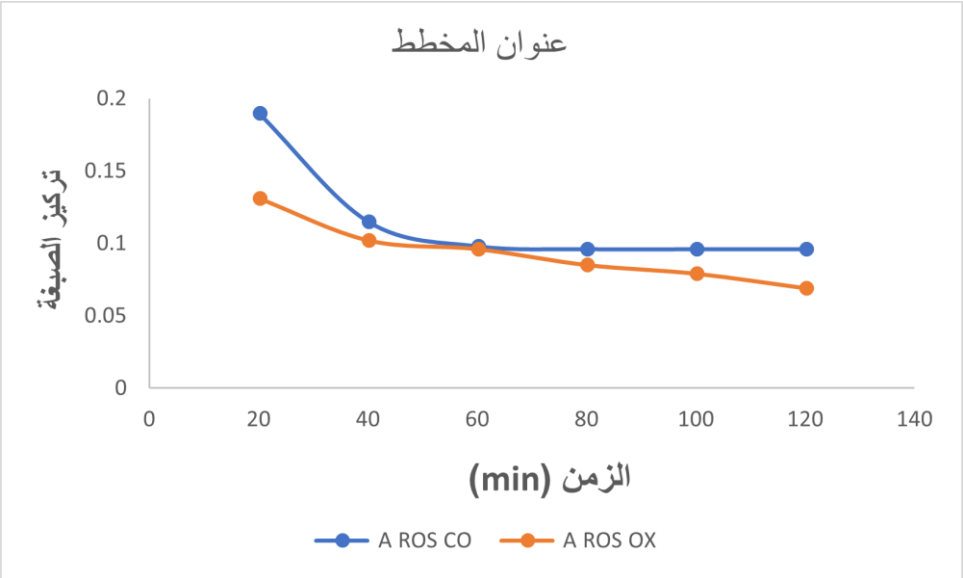
- ✓ فترة التفاعل السريع (20-60 دقيقة): أظهرت العينة مركب أكسيد الحديد-سليلوز (B-COM) انخفاضاً ملحوظاً في قيم الامتصاصية من 1.073 إلى 0.692. يعزى هذا التناقص الحاد إلى التوافر العالي للمواقع النشطة على سطح المركب في بداية التفاعل، مما سمح بحدوث عمليات أكسدة مكثفة لجزيئات الصبغة بواسطة الجذور الحرة.
- ✓ فترة الاستقرار النسبي (80-120 دقيقة): لوحظ ميل المنحنيات نحو الاستقرار (Plateau) عند نهاية التجربة، حيث سجلت العينة B-OXID أدنى قيمة امتصاصية وهي 0.34. يشير

هذا التباطؤ إلى انخفاض تدريجي في المواقع الفعالة نتيجة تشبع السطح بمنتجات التفكك العضوية، أو تناقص عدد التصادمات الفعالة نتيجة انخفاض تركيز الصبغة في المحلول

الدور البنيوي للسليلوز في المركب الهجين (Synergistic Effect) :

- ✓ تشير المقارنة بين عينة الاكسيد B-OXID والمركب B-COM إلى فاعلية استخدام السليلوز كدعامة (Support Matrix):
- ✓ توزيع الجسيمات: يعمل السليلوز على تحسين تشتت جسيمات أكسيد الحديد ومنع تكتلها بفعل القوى المغناطيسية، مما يضمن بقاء مساحة السطح النوعية متاحة لاستقبال الضوء والتفاعل مع الصبغة.
- ✓ كفاءة المسار الضوئي: بالرغم من اختلاف سرعات إزالة الصبغة، إلا أن تقارب النتائج النهائية عند الزمن120 دقيقة (0.34 مقابل 0.384) يثبت أن السليلوز لا يعيق نفاذ الضوء إلى مراكز التحفيز، بل يدعم ثباتية المحفز في الوسط المائي.
- ✓ **الميكانيكية المقترحة للتحلل:**
- ✓ تعتمد آلية العمل الموضحة بالنتائج على قدرة أكسيد الحديد في المركب على امتصاص الطاقة الضوئية وتوليد أزواج (إلكترون/فجوة). تتفاعل هذه الشحنات مع الوسط لإنتاج جذور الهيدروكسيل(OH) التي تهاجم الروابط الكيميائية لصبغة أزرق الميثيلين، محولة إياها إلى جزيئات أصغر وأقل امتصاصاً للضوء، وهو ما يفسر التلاشي التدريجي لتركيز الصبغة المرصود في الشكل.[8] [7] [6]

مناقشة وتحليل قدرة أكسيد الحديد النانوي ومركب أكسيد الحديد–سليلوز على إزالة صبغة وردي البنغال عبر طريقة التحفيز الضوئي :



الشكل 10: يمثل منحنى إزالة صبغة وردي البنغال بواسطة أكسيد الحديد النانوي ومركب أكسيد الحديد–سليلوز

الحركية الضوئية ومعدلات التفاعل (Photocatalytic Kinetics):

- ✓ الانخفاض الحاد الأولي: نلاحظ أن العينة مركب أكسيد الحديد–سليلوز A ROS CO شهدت تناقصاً سريعاً جداً في الامتصاصية في الدقائق الأولى (من 0.19 عند الزمن 20 دقيقة إلى 0.115 عند الزمن 40 دقيقة). هذا السلوك يشير إلى نشاط سطحي عالٍ للمركب الهجين تجاه صبغة وردي البنغال، مما يعكس ألفة كيميائية قوية في مراحل التفاعل الأولى.
- ✓ مرحلة التباطؤ والتشبع: يبدأ المنحنى للمركب A ROS CO بالاستقرار (Plateau) عند قيمة 0.096 ابتداءً من الدقيقة 80 وحتى نهاية التجربة. في المقابل، استمرت العينة أكسيد الحديد النانوي A ROS OX في الانخفاض التدريجي لتصل إلى 0.069 عند الدقيقة

120. هذا الاختلاف يشير إلى أن المواقع النشطة في المركب الهجين قد وصلت إلى حالة تشبع أسرع مقارنة بالأكسيد النقي في ظل الظروف التجريبية المحددة.

ميكانيكية التفاعل وتأثير بنية المركب (Degradation Mechanism)

- ✓ تعتمد كفاءة الإزالة لصبغة وردي البنغال، وهي صبغة أنيونية (Anionic dye)، على طبيعة التفاعلات السطحية:
- ✓ التآزر بين أكسيد الحديد والسليلوز: بالرغم من أن الأكسيد النقي أظهر قيمة إزالة نهائية أفضل بقليل، إلا أن المركب الهجين أثبت فاعلية ملحوظة في تقليل التركيز بنسبة كبيرة باستخدام كمية أقل من المادة الفعالة (بسبب وجود السليلوز). السليلوز هنا يعمل كإطار داعم يحافظ على توزيع جزيئات أكسيد الحديد، مما يسهل وصول الفوتونات الضوئية لإنتاج الجذور الحرة (OH) الضرورية لكسر الحلقات العطرية لصبغة وردي البنغال.
- ✓ طبيعة الامتزاز: الطبيعة المسامية للسليلوز قد تساهم في امتزاز جزيئات الصبغة أولاً، ثم تأتي مرحلة التحلل الضوئي فوق جزيئات أكسيد الحديد المغروسة، وهو ما يفسر الانخفاض السريع في بداية التفاعل. [7] [6] [8]

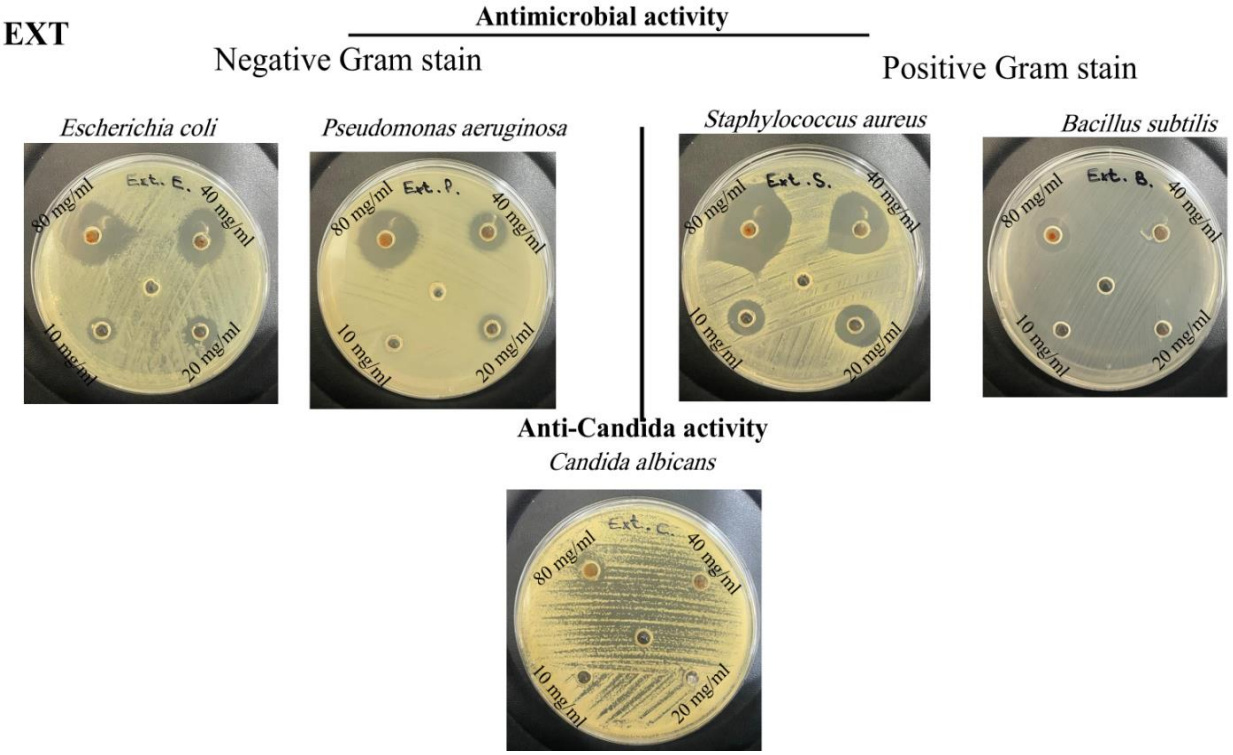
المقارنة التحليلية بين العينات:

- ✓ تظهر البيانات عند الدقيقة 120 تقارباً في الأداء الوظيفي، حيث يساهم استخدام المستخلص الحيوي (الخميرة) في تغليف جزيئات الأكسيد بطبقة حيوية (Capping agents) تزيد من ثباتيتها وتمنع ترسبها السريع، وهو ما يظهر في استمرارية التفاعل طوال مدة التجربة.

تقييم القدرة المضادة للبكتيريا:

1 تقييم القدرة المضادة للميكروبات للعينتين أكسيد الحديد النانوي EXT ومركب أكسيد الحديد _سيليلوز CELL:

أولا: أكسيد الحديد النانوي EXT



الشكل 11: صورة مخبرية توضح فحص النشاط ضد ميكروبي بطريقة الانتشار لأكسيد الحديد النانوي

جدول 3: نتائج اختبار الفاعلية المضادة للبكتيريا لأكسيد الحديد النانوي

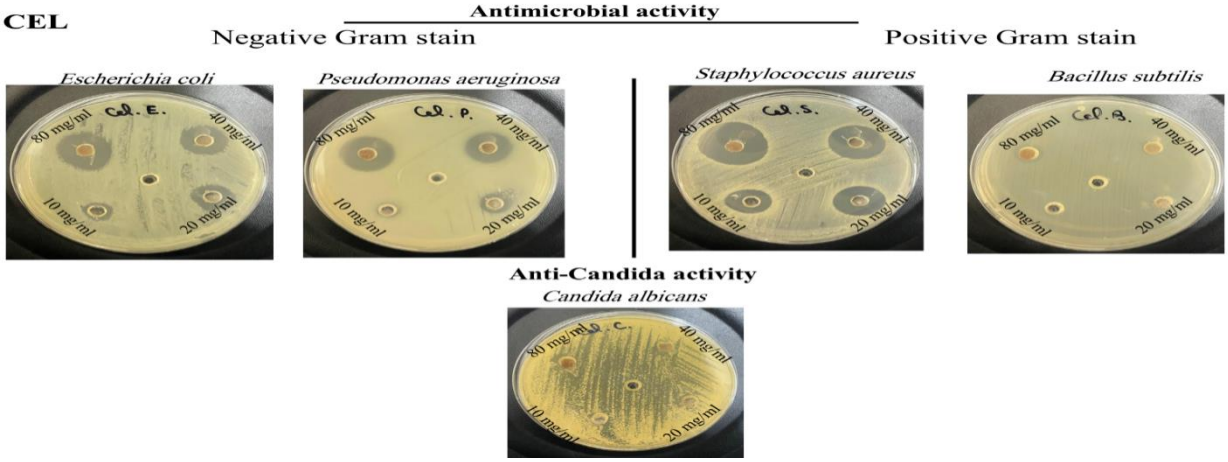
	Microbial inhibition (mm) EXT				Co . Neg.
mg/mL	80	40	20	10	
Escherichia coli ATCC 25922	28	23	16	11	NI
Pseudomonas aeruginosa ATCC 27853	26	15	11	NI	NI
***Staphylococcus aureus* ATCC 25932**	33	26	22	17	NI
Bacillus subtilis ATCC 25973	14	8	NI	NI	NI
	Anti-Candida activity				
Candida albicans ATCC 10231	NI	NI	NI	NI	NI

تحليل ومناقشة النشاط المضاد للميكروبات لأكسيد الحديد النانوي:

- ✓ **تقييم الكفاءة التثبيطية (Inhibition Efficiency) :**
- ✓ تظهر النتائج الواردة أن أكسيد الحديد النانوي يمتلك قدرة تثبيطية متفاوتة تعتمد بشكل مباشر على التركيز وعلى نوع السلالة الميكروبية:
- ✓ تأثير التركيز (Concentration–Dependent): لوحظ وجود علاقة طردية واضحة؛ فكلما زاد التركيز من 10 إلى 80 ملغ/مل، زاد قطر هالة التثبيط (Inhibition Zone). فعلى سبيل المثال، سجلت بكتيريا *Staphylococcus aureus* زيادة من 17 ملم إلى 33 ملم عند الرفع من التركيز الأدنى إلى الأعلى.
- ✓ الحساسية النوعية: أظهرت البكتيريا موجبة الغرام (*S. aureus*) حساسية أعلى تجاه جزيئات أكسيد الحديد مقارنة بالبكتيريا سالبة الغرام، بينما سجلت *Bacillus subtilis* أقل استجابة، ولم تظهر فطرية *Candida albicans* أي تأثر ملحوظ (NI – No Inhibition) في جميع التراكيز المختبرة.
- ✓ **التفسير الميكانيكي للنشاط المضاد للبكتيريا:**
- ✓ يمكن إرجاع الفاعلية البيولوجية لأكسيد الحديد النانوي إلى عدة آليات فيزيائية وكيميائية:
- ✓ الإجهاد التأكسدي (Oxidative Stress): قدرة الجزيئات النانوية على توليد أنواع الأكسجين التفاعلية (ROS) مثل جذور الهيدروكسيل، والتي تسبب تلفاً في الغشاء الخلوي، وتؤكسد البروتينات، وتدمر الحمض النووي (DNA) للبكتيريا.
- ✓ التفاعل الإلكتروستاتيكي: تنجذب الجزيئات النانوية (ذات الشحنة الموجبة غالباً في محاليل معينة) إلى جدران الخلايا البكتيرية سالبة الشحنة، مما يؤدي إلى اختراق الجدار الخلوي وفقدان المحتوى السيتوبلازمي.

- ✓ الفرق بين موجبة وسالبة الغرام: التثبيط العالي في *S. aureus* (33 ملم) مقارنة بـ *E. coli* (28 ملم) عند تركيز 80 ملغ/مل يعزى إلى اختلاف بنية الجدار الخلوي؛ حيث تمتلك سالبة الغرام غشاءً خارجياً إضافياً يعمل كحاجز نفاذية يحد من دخول الجزيئات النانوية.
- ✓ غياب الفاعلية ضد الفطريات (Anti-Candida Activity) :
- ✓ عدم وجود نشاط ضد كانديدا ألبكانز تفسر هذه الظاهرة أكاديمياً بأن الخلايا الفطرية حقيقية النواة تمتلك جداراً خلوياً مكوناً من الكايتين والبيتا-جلوكان، وهو أكثر تعقيداً وصلابة من الجدار البكتيري، مما يتطلب تراكيز أعلى أو آليات عمل مختلفة لا يوفرها أكسيد الحديد المنفرد في هذه التراكيز.[10] [9]

ثانيا: مركب أكسيد الحديد _سيليلوز CELL.



الشكل 12: صورة مخبرية توضح فحص النشاط ضد ميكروبي بطريقة الانتشار لمركب أكسيد الحديد النانوي- سليلوز

جدول 4: نتائج اختبار الفاعلية المضادة للبكتيريا لمركب أكسيد الحديد النانوي– سليلوز

	Microbial inhibition (mm) CEL				Co . Neg.
mg/mL	80	40	20	10	
Escherichia coli ATCC 25922	22	20	17	11	NI
Pseudomonas aeruginosa ATCC 27853	22	19	13	9	NI
***Staphylococcus aureus* ATCC 25932**	29	27	25	18	NI
Bacillus subtilis ATCC 25973	12	NI	NI	NI	NI
Anti-Candida activity					
Candida albicans ATCC 10231	NI	NI	NI	NI	NI

NI = No Inhibition

تحليل ومناقشة النشاط الميكروبي لمركب (أكسيد الحديد/سيليلوز):

- ✓ أظهرت استجابة تثبيطية واضحة تعتمد على الجرعة (Dose–dependent response) لجميع السلالات البكتيرية المختبرة:
- ✓ الحساسية الميكروبية: سجلت بكتيريا *Staphylococcus aureus* أعلى قطر تثبيط وصل إلى 29 ملم عند تركيز 80 ملغ/مل، متبوعة بـ *Escherichia coli* و *Pseudomonas aeruginosa* بقطر 22 ملم.
- ✓ الحد الأدنى للتثبيط: لوحظ أن بكتيريا *Bacillus subtilis* أبدت مقاومة عالية، حيث لم يظهر النشاط إلا عند التركيز الأعلى (80ملغ/مل) بقطر 12 ملم، بينما غاب التأثير تماماً في التراكيز الأقل.
- ✓ النشاط الفطري: استمر غياب النشاط التثبيطي ضد *Candida albicans* في جميع التراكيز، وهو ما يؤكد تخصصية المركب تجاه الخلايا البكتيرية.

دور السيليلوز في تعزيز النشاط الحيوي:

- ✓ عند مقارنة هذه النتائج بالنتائج السابقة لأكسيد الحديد وحده، نلاحظ أن وجود السيليلوز كدعامة (Support Matrix) يؤدي وظائف حيوية هامة:
- ✓ منع التكتل (Anti-aggregation): يعمل السيليلوز على تحسين تشتت جزيئات أكسيد الحديد النانوية، مما يحافظ على صغر حجم الجسيمات ويزيد من مساحة السطح النوعية الملامسة للجدار الخلوي للبكتيريا.
- ✓ التحكم في الانطلاق: يعمل الهيكل المسامي للسيليلوز على تنظيم معدل انتشار الأيونات أو الجزيئات النانوية في الوسط الزرعي، مما يوفر تأثيراً تثبيطياً مستداماً.
- ✓ الارتباط بالخلية: قد تساهم مجموعات الهيدروكسيل في السيليلوز في تكوين روابط هيدروجينية مع مكونات جدار الخلية البكتيرية، مما يسهل التصاق المركب النانوي بالسطح الخلوي وبدء عملية التدمير التأكسدي.

الميكانيكية البيولوجية المقترحة:

- ✓ يعزى النشاط الملحوظ إلى تداخل الجزيئات النانوية مع الاستقرار الغشائي للبكتيريا:
- ✓ اختراق الجدار: تتفاعل الجزيئات النانوية الموزعة على السيليلوز مع البروتينات والدهون الفسفورية في جدار الخلية.
- ✓ الإجهاد التأكسدي: تحفز جسيمات أكسيد الحديد تكوين أنواع الأكسجين التفاعلية (ROS)، مما يؤدي إلى أكسدة مكونات الخلية وتوقف العمليات الحيوية.
- ✓ التفوق ضد موجبة الغرام: يفسر التأثير القوي ضد *S. aureus* (29 ملم) ببساطة بنية جدارها الخلوي مقارنة بسالبة الغرام التي تمتلك غشاءً خارجياً يعيق جزئياً نفاذ المركبات الكبيرة. [10] [9]

مراجع

[3] A. Azizi ،"Green Synthesis of Fe3O4 Nanoparticles and Its Application in Preparation ofFe3O4/Cellulose Magnetic Nanocomposite:A Suitable Proposal for Drug Delivery Systems "،*Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials* ،p. 1_8 3 7 ، .2020

[4] Y. Z. 1. ,. H. H. QuanLu1 ،"In Situ Synthesis of a Stable Fe3O4@Cellulose Nanocomposite for Efficient Catalytic Degradation of ofMethylene Blue "،*nanomaterials* .2019 ،

[6] e. a. R. Saravanan ،"Photocatalytic degradation of Rose Bengal and Methyl Orange by $ZnO-Fe_2O_3$ nanocomposites،" 2013.

[7] e. a. T. Zhang ،"Cellulose-supported photocatalysts for the degradation of organic pollutants: Preparation and efficiency،" 2011.

[8] e. a. V.K. Gupta ،""Photocatalytic degradation of organic dyes using iron oxide nanostructures: A review،" 2016.

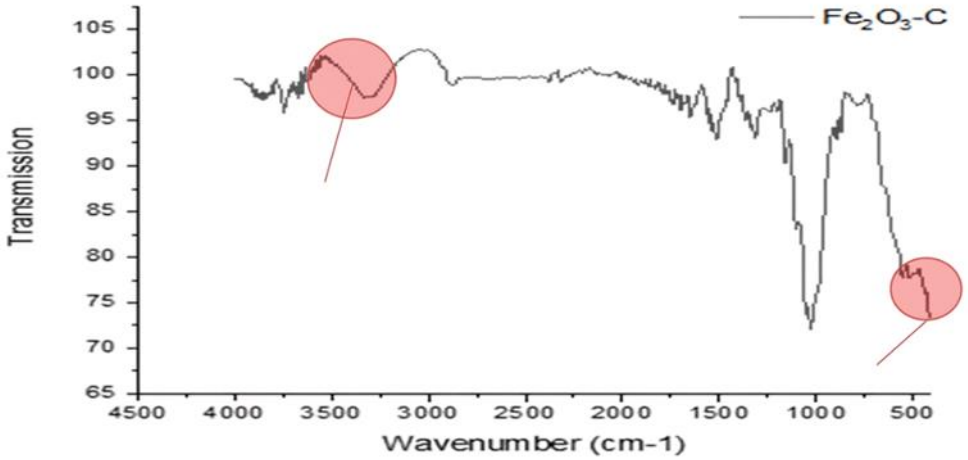
[9] R. e. a. Dadi ،" "Antibacterial activity of Fe_3O_4 nanoparticles: Influence of size and concentration "،".*ournal of Applied Nanoscience* .2019 ،

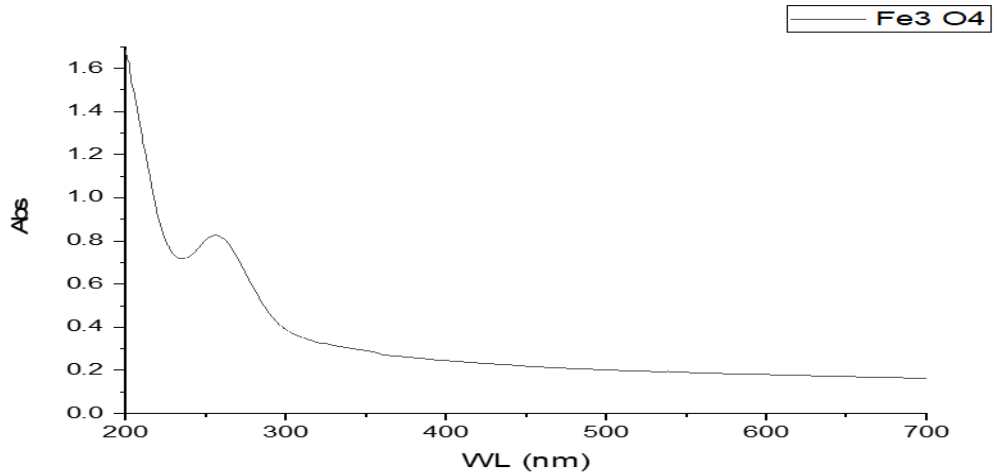
[10] M. e. a. Arakha ،"Antimicrobial activity of iron oxide nanoparticles." *Nano-Micro Letters "، .(2015)

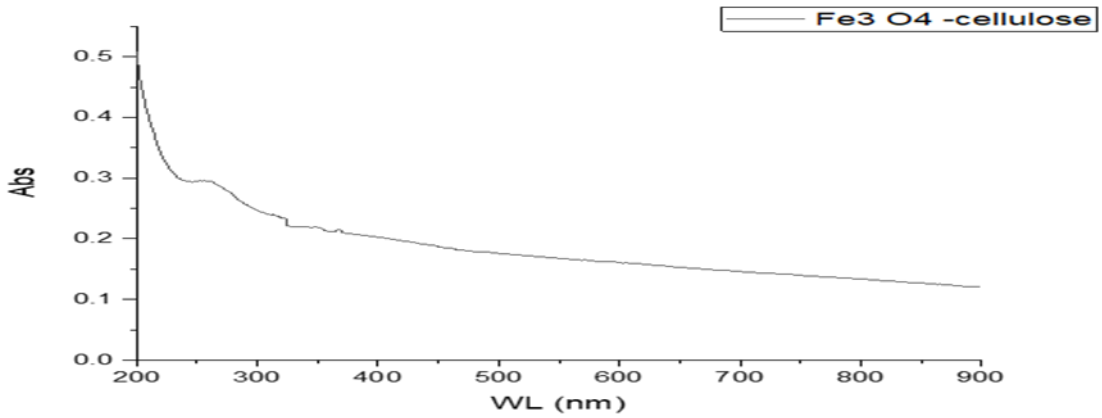
الخاتمة

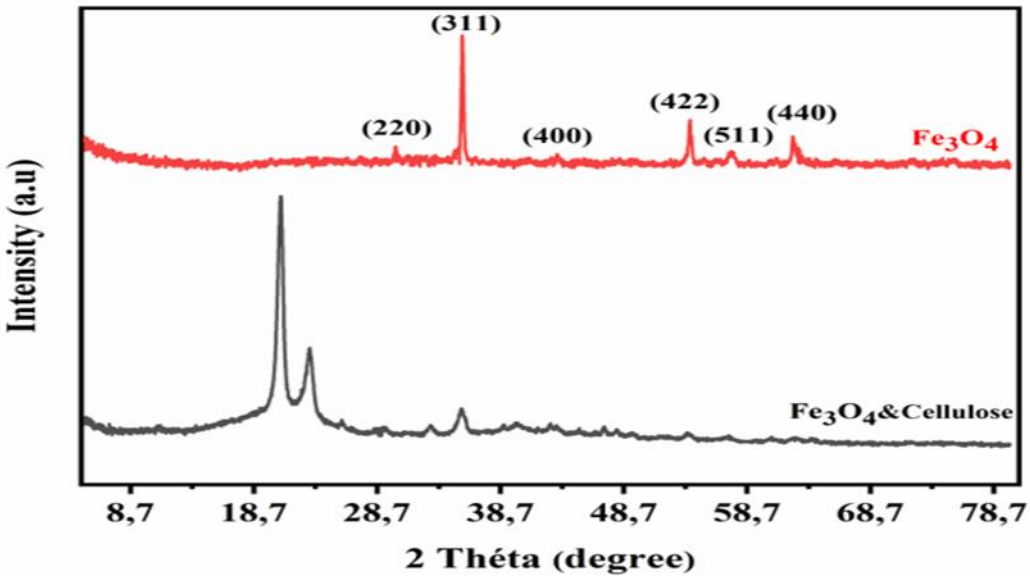
تُمثّل هذه الدراسة خطوة واعدة في مجال الكيمياء الخضراء وتكنولوجيا النانو البيئية، حيث نجحت في تحقيق الأهداف المسطرة من خلال تطوير طريقة اصطناع صديقة للبيئة واقتصادية لإنتاج جسيمات أكسيد الحديد المغناطيسية النانوية Fe_3O_4 باستخدام مستخلص خميرة الخبز كعامل مختزل وحيوي، ومن ثمّ دمجها بنجاح مع السليلوز لتشكيل متراكب نانوي هجين ومستدام، أثبتت تقنيات التوصيف المتقدمة **UV–Vis, FTIR** و **XRD**، **SEM–EDX** كفاءته البنيوية والمورفولوجية من خلال الحصول على بنى نانوية كروية الشكل بمتوسط حجم يبلغ 15 نانومتر؛ وقد أسفر التقييم التطبيقي للمواد المحضرة عن فعالية تثبيطية ممتازة وملحوظة ضد بكتيريا **Staphylococcus aureus** مقارنة بعجزها التام ضد الفطريات (**Candida albicans**)، إلى جانب إثبات المتراكب الهجين (أكسيد الحديد/سليلوز) لقدرة عالية في التحفيز الضوئي لتفكيك الأصباغ العضوية (أزرق الميثيلين ووردية البنغال) تحت الإشعاع الضوئي متفوقاً في بعض الأحيان أو محافظاً على نفس كفاءة الأكسيد النقي، وهو ما يؤكد في النهاية نجاح السليلوز كدعامة حيوية مستدامة تحافظ على الأداء التحفيزي والمغناطيسي مع تقليل كمية المواد غير العضوية المستخدمة، مما يفتح آفاقاً تطبيقية واعدة لهذه المتراكبات في معالجة المياه وتنقية البيئة.

الملاحق

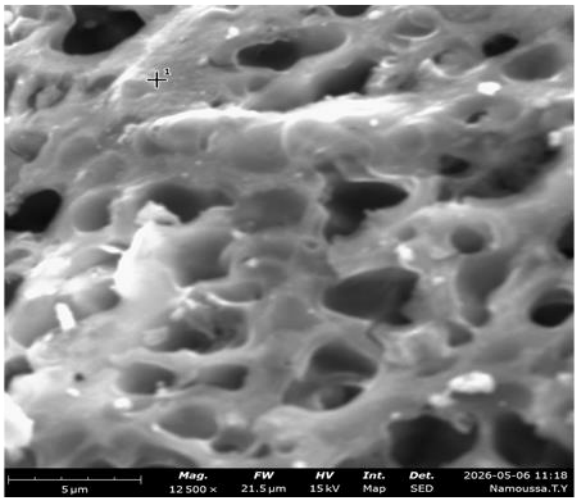

Fe2O3-C
Transmission
105
100
95
90
85
80
75
70
65
4500
4000
3500
3000
2500
2000
1500
1000
500
Wavenumber (cm-1)


Fe3 O4
Abs
1.6
1.4
1.2
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
200
300
400
500
600
700
WL (nm)


Fe3 O4 -cellulose
Abs
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0.0
200
300
400
500
600
700
800
900
WL (nm)

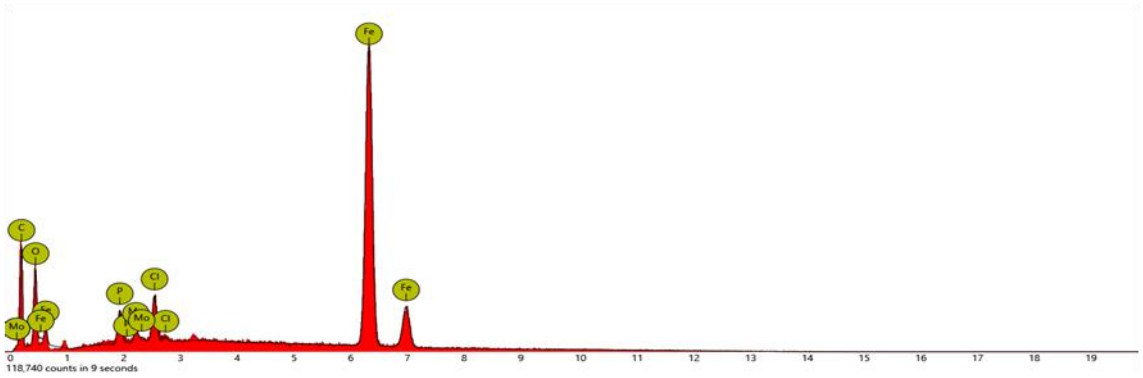


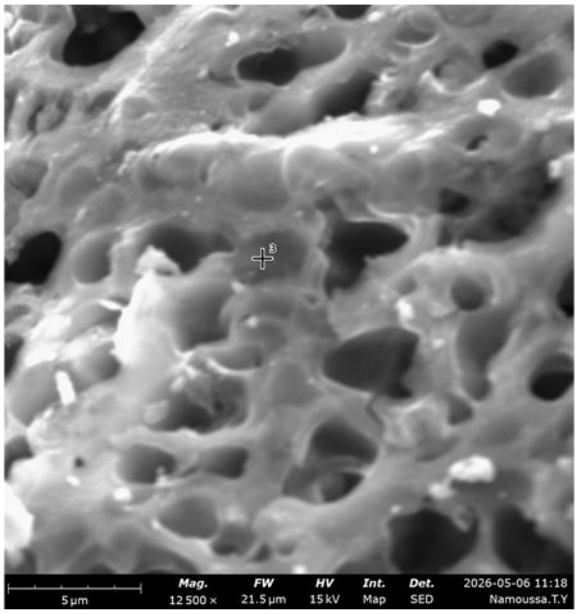
1. spot



Element Symbol	Atomic Conc.	Weight Conc.	Oxide Symbol	Stoich. wt Conc.
Fe	41.72	73.10	Fe_2O_3	82.28
C	45.54	17.16		
O	8.76	4.39		
Cl	1.98	2.21		
Mo	0.59	1.77		
P	1.41	1.37		

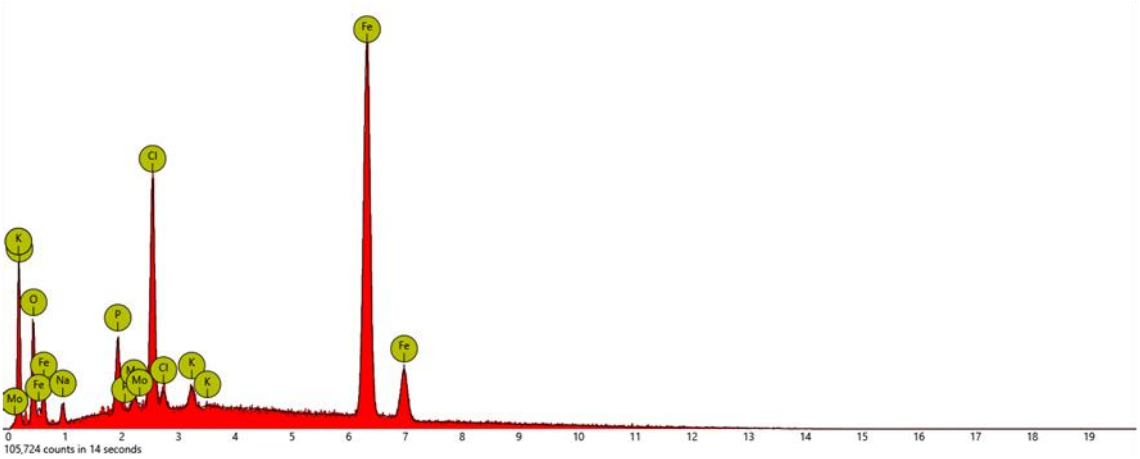
FOV: 21.5 µm, Mode: 15kV - Map, Detector: SED, Time: MAY 6 2026 11:18

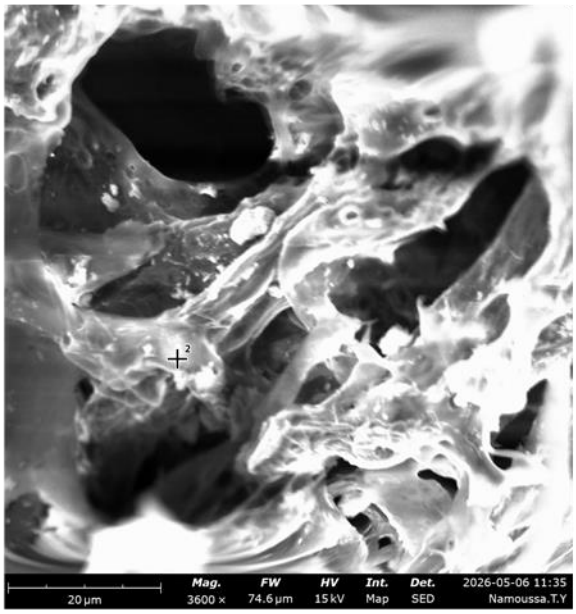




Element Symbol	Atomic Conc.	Weight Conc.	Oxide Symbol	Stoich. wt Conc.
Fe	31.71	61.65	Fe_2O_3	72.32
C	49.31	20.62		
Cl	5.92	7.30		
O	8.87	4.94		
P	1.88	2.03		
Mo	0.49	1.65		
Na	1.17	0.94	Na_2O	1.04
K	0.65	0.88		

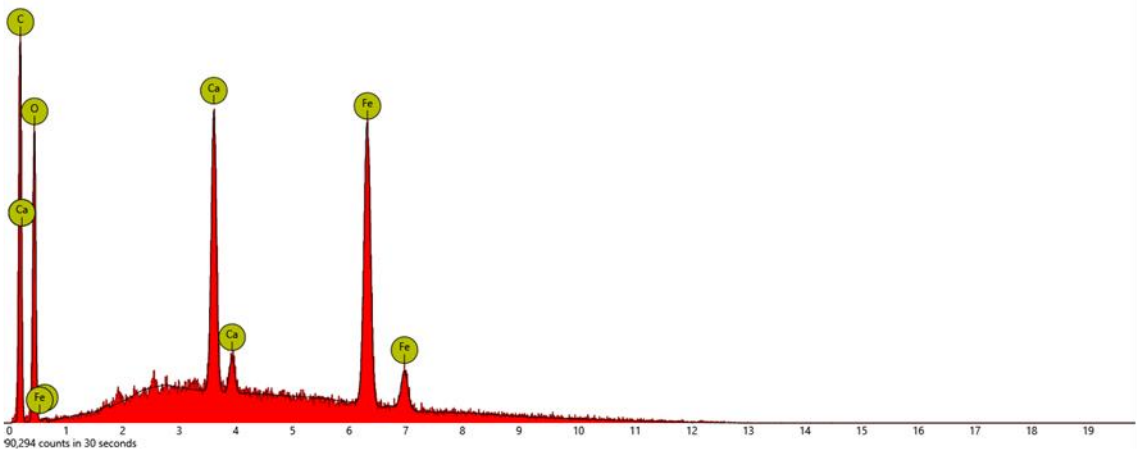
FOV: 21.5 µm, Mode: 15kV - Map, Detector: SED, Time: MAY 6 2026 11:18

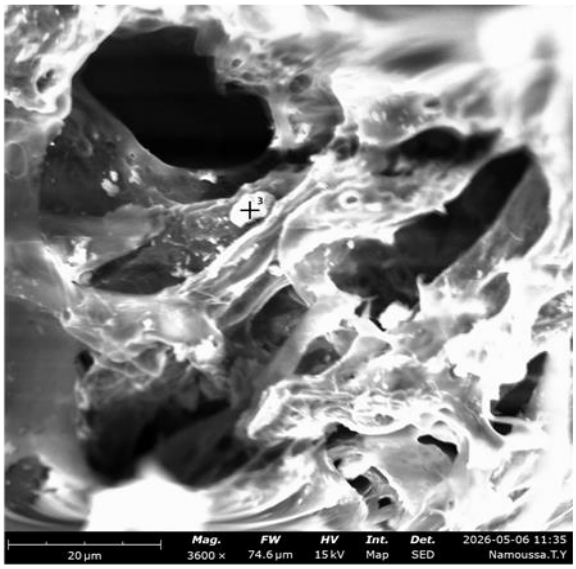




Element Symbol	Atomic Conc.	Weight Conc.	Oxide Symbol	Stoich. wt Conc.
Fe	18.69	45.28	Fe_2O_3	59.61
C	51.79	26.98		
O	22.58	15.67		
Ca	6.94	12.07	CaO	15.55

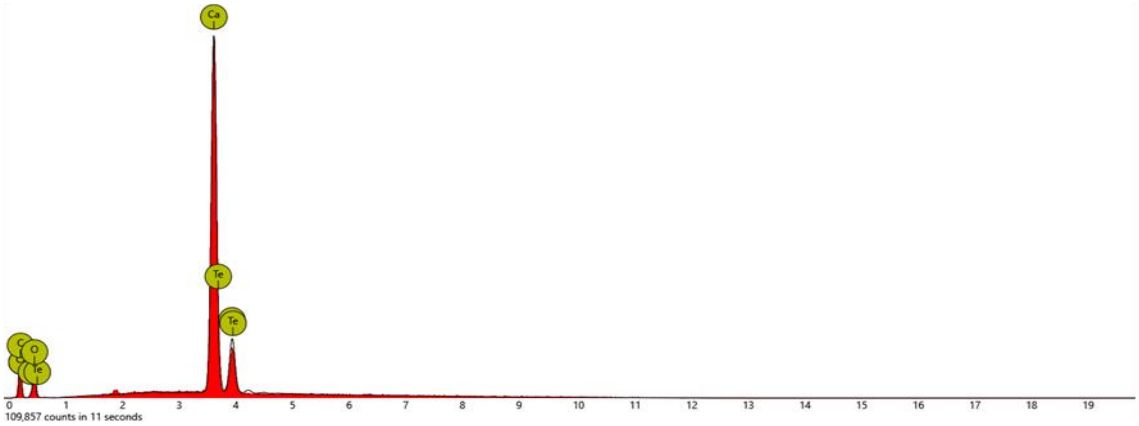
FOV: 74.6 µm, Mode: 15kV - Map, Detector: SED, Time: MAY 6 2026 11:35





Element Symbol	Atomic Conc.	Weight Conc.	Oxide Symbol	Stoich. wt Conc.
Ca	51.99	62.59	CaO	77.28
Te	4.95	18.96		
O	24.26	11.66		
C	18.81	6.79		

FOV: 74.6 µm, Mode: 15kV - Map, Detector: SED, Time: MAY 6 2026 11:35

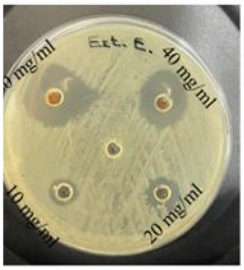


Antimicrobial activity

Negative Gram stain

Positive Gram stain

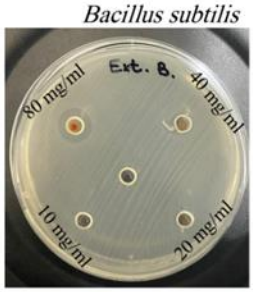
Escherichia coli



Pseudomonas aeruginosa

Staphylococcus aureus

Bacillus subtilis



Anti-Candida activity

Candida albicans

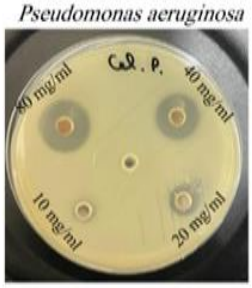
Antimicrobial activity

Negative Gram stain

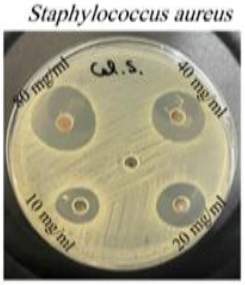
Positive Gram stain

Escherichia coli

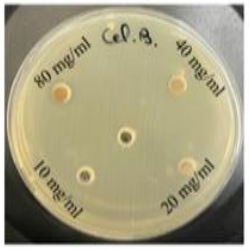
Pseudomonas aeruginosa



Staphylococcus aureus



Bacillus subtilis



Anti-Candida activity

Candida albicans

الحمد لله