الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة الشهيد حمه لخضر الوادي

كلية التكنولوجيا

مذكرة التخرج لنيل شهادة

ماستر أكاديمي

ميدان : العلوم والتكنولوجيا

شعبة: هندسة الطرائق

تخصص: هندسة كيميائية

من إعداد الطالبة:

1- لغريب إخلاص

الموضوع

تصنيع وتوصيف مادة حيوية عالية المسامية من المخلفات الزراعية لتطبيقات المعالجة البيئية

نـــــوقـــــشـت فـــــي: 2026/06/14

أمام لـــــجنـــة المـنـاقـشـة:

سقني ليلى	أستاذ محاضر (ب)	رئيسا	جامعة الوادي
بن الصغير البشير	أستاذ محاضر (أ)	مناقشا	جامعة الوادي
د. زغود سمية	أستاذ محاضر (ب)	مشرفا	جامعة الوادي
د. بن عمر إلهام	أستاذ مساعد	مساعد مشرف	جامعة الوادي

الموسم الجامعي:2026/2025

بسم الله الرحمن الرحيم

ملخص:

ركزت هذه الدراسة على تصنيع وتوصيف مواد حيوية عالية المسامية مشتقة من المخلفات الزراعية، وذلك لتطبيقات المعالجة البيئية. تم اختيار قشور الفول السوداني كمادة أولية رئيسية نظرا لوفرتها وانخفاض تكلفتها وغناها بالسليلوز. خضعت الكتلة الحيوية للمعالجة قلوية باستخدام هيدروكسيد الصوديوم لإزالة المكونات غير السليلوزية، وتحسين تفاعلية السطح، وزيادة المسامية. بعد ذلك، تم تحضير أنواع مختلفة من الهلاميات الهوائية الحيوية الهجينة عن طريق تدعيم قشور الفول السوداني. تم توصيف المواد المحضرة باستخدام مطيافية الأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه (FTIR)، مما أكد حدوث تعديلات هيكلية وكيميائية كبيرة بعد المعالجة القلوية والتدعيم. كما أظهرت النتائج أن عوامل التدعيم ساهمت في استقرار البنية المسامية وتحسين التفاعلات بين الجزيئات داخل شبكة الهلام الهوائي. تم تقييم أداء امتصاص الهلاميات الهوائية الحيوية المحضرة من خلال إزالة صبغة أزرق الميثيلين من المحاليل المائية. أظهرت جميع العينات قدرات امتصاص فعّالة، مع ازدياد كفاءة الامتصاص تدريجيًا مع زيادة مدة التلامس. أثبتت النتائج نجاح تحويل المخلفات الزراعية إلى هلاميات حيوية مسامية عالية مستدامة وفعّالة، ذات إمكانات واعدة في معالجة مياه الصرف الصحي وتطبيقات المعالجة البيئية. يُبرز هذا العمل أهمية تطوير مواد صديقة للبيئة من موارد الكتلة الحيوية المتجددة كبديل للمواد الماصة الاصطناعية التقليدية.

الكلمات المفتاحية: مواد حيوية، الفول السوداني، الأشعة تحت الحمراء، إزالة الصبغة.

Abstract:

This study focused on the synthesis and characterization of highly porous biomaterials derived from agricultural waste for environmental remediation applications. Peanut shells were chosen as the primary raw material due to their abundance, low cost, and high cellulose content. The biomass underwent alkaline treatment using sodium hydroxide to remove non-cellulosic components, improve surface reactivity, and increase porosity. Subsequently, various hybrid aerogels were prepared by reinforcing the peanut shells. The prepared materials were characterized using Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), which confirmed significant structural and chemical modifications following the alkali treatment and reinforcing. The results also showed that the reinforcing agents contributed to stabilizing the porous structure and improving intermolecular interactions within the aerogel network. The adsorption performance of the prepared aerogels was evaluated by removing methylene blue dye from aqueous solutions. All samples exhibited effective adsorption capabilities, with adsorption efficiency increasing progressively with increasing contact time. The results demonstrated the successful conversion of agricultural waste into highly porous, sustainable, and efficient biogels, showing promising potential in wastewater treatment and environmental remediation applications. This work highlights the importance of developing environmentally friendly materials from renewable biomass resources as an alternative to traditional synthetic sorbents.

Keywords: Biogels, Peanuts, Infrared, Decolorization

الإهداء

بسم الله الإله الأكرم، الذي علّم بالقلم، وعمّنا بالفضل والهدى، ودلّنا على سبل العلم والحكمة. له الحمد ملء السماوات والأرض، كما ينبغي لجلال وجهه وعظيم سلطانه، حمدًا سرمدا يتردد مع أنفاس الورى، ويتعاظم مع الأكف المرفوعة بالابتهال في ساعات العسر والطلب، فالحمد لله الذي بفضله تبتدئ النعم، وبعونه تكتمل الغايات وتزدهر النهايات.

وفي غمرة هذا الامتنان الذي يغمر الوجدان، لا تملك الضمائر الحية إلا أن تلتفت بقلوب يعتصرها الأسى إلى غزة الأبية؛ حيث تُرتكب إبادةٌ يندى لها جبين الإنسانية، وتُبتر فيها أطراف الحياة، وتتفشى مجاعةٌ تنهش الأجساد في مشهدٍ تتقطع له القلوب. صرخاتٌ مكلومة تضيع في غياهب الظلمة، وجراحٌ تنزف بصمت، في ظل خذلانٍ دولي وصمتٍ عالمي بارد، لا تحركه شلالات الدماء، ولا توقظ ضميره صرخات الطفولة المستباحة.

اللهم يا قوي يا متين، كن لأهلنا في غزة عونًا وظهيرًا، ودرعًا وحاميًا. اللهم داوِ جرحاهم، وتقبل شهداءهم، واجبر كسرهم، وارفع عنهم البأس والبلاء، واجعل الدائرة على من ظلمهم وعاداهم، إنك أنت العزيز المنتقم المحيط بكل شيء عليم.

أهدي مثرة جهدي ونجاحي إلى:

من نطق بكلمة التوحيد لسانًا وصدقها قلبًا، إلى معلمنا الأعظم وقدوتنا الأكبر المصلح الجليل المبعوث رحمة للعالمين سيدنا محمد عليه افضل الصلاة والتسليم.

إلى التي أسكنتني القلب قبل أن تحملني وسقتني الحب قبل أن ترضعني وأعطتني الرضى قبل أن تنشأني،

إلى من رافقتني دعواتها فكانت أنيس وحدتي أطال الله في عمرها **أمي الغالية**.

إلى من أحمل اسمه بكل افتخار، إلى الموقر خالد الذكر، الذي فارقنا منذ أكثر من ثمانية عشر سنة، لكنّه لم يفارق القلب يومًا، إلى من غاب حضوره وبقي أثره الطيب ودعاؤه وسيرته نبراسًا يضيء دربي، إلى من تمنّيت حضوره في كل نجاح وخطوة وفرحة، أهدي ثمرة جهدي وتخرّجي، راجيةً من الله أن يجعلها نورًا في قبره، ورفعةً في درجاته، وأن يجمعني به في جنات النعيم، رحمك الله رحمةً واسعة يا **أبي الغالي**..

إلى من ترعرعت معهم وفي حضنهم، إلى من كانوا متكئًا لي أستند إليه **اختي العزيزة وأخي العزيز**.

إلى أكثر من يحبهم قلبي **جدتي وخالتي وبنات خالتي** بالأخص رفيقة دربي **دعاء**.

إلى من كان أنسهم ينسى التعب ويزيدني قوة صديقاتي: **وناسة، أسماء، حميدة، ملاك.**

إلى كل الصديقات اللواتي شاركنني الحياة الجامعية والتي لم يذكرهم قلمي لكن قلبي سيذكرهم دومًا.

إلى كل من جمعني معهم المشوار الدراسي من بدايته إلى نهايته، من كانوا معي على طريق النجاح والخير

زميلاتي طلبة دفعة ماستر 2026.

إخلاص

الشكر والعرفان

إن الشكرٌ والحمد لله كما ينبغي لجلال وجهه وعظيم سلطانه، نشكره ونحمده حمدا كثيرا مباركا فيه على جزيل عطائه وعظيم فضله

والصلاة السلام على حبيبنا محمد وعلى آله وصبحه ومن اقتدى بهديه إلى يوم القيامة

الشكر والحمد والثناء لله تعالى أولا وأخرا على منه علي بإتمام وإنجاز هذا البحث الأكاديمي

قال رسول الله : **(لا يَشْكُرُ اللّهَ مَنْ لا يَشْكُرُ النّاسَ)**

أتقدم بخالص شكري وامتناني للمشرفة **"الأستاذة الدكتورة زغود سمية"**، والتي لن أوفيها حقها على اخلاصها وجهدها وخاصة صبرها معي وتوجيهها الدائم طيلة انجاز هذا البحث، كما أتوجه بجزيل الشكر والامتنان الى مساعدة المشرفة **"الأستاذة الدكتورة بن عمر الهام"**، على مرافقتها العلمية ونصائحها القمة، ودعمها ومساهمتها في انجاز هذا البحث،

فاللهم أسألك بأسمائك العلا أن تجزيهما عني خير الجزاء، وان تجعل علمهما يخدم الامة ويرفعهم درجات في لدنيا والجنة.

كما أتقدم بجزيل شكري للأساتذة الأفاضل أعضاء لجنة المناقشة لتكرمهم بقبول مناقشة هذه الرسالة واثرائها وتقييمها .

ولا أنسى فرضا أن أشكر كل أساتذتي الكرام طيلة مشواري الدراسي دون أن استثني منهم أحدا، وأخص بالذكر

" الأستاذة الدكتورة همامي هادية"، "الأستاذة الدكتورة ثابت امينة"، "الاستاذ الدكتور نصرات صدام"

كما أتقدم بخالص شكري وعرفاني إلى كل الطاقم الإداري بكلية التكنولوجيا قسم هندسة كيميائية على تفانيهم في مساعدتنا وخدمة كل الطلبة وبالأخص رئيس القسم **" الأستاذ الدكتور زغود العيد"** و **"الأستاذ الدكتور العويني صلاح الدين"**

إلى كل هؤلاء وكل من كان له فضل في تعلمي ودراستي شكرا لكم وبارك الله فيكم وأعلى مقامكم في الدنيا والآخرة وجعلكم من أهل **(في مَقْعَدِ صِدْقٍ عِندَ مَلِيكٍ مُقْتَدِرٍ)** .

قـــــائـمة الجـــداول

رقم الجدول		الصفحة
الـفصل الأول: المخلفات الزراعية والمواد الحيوية عالية المسامية		
الجدول (1.I)	المكونات الكيميائية الرئيسية للمخلفات الزراعية وخصائصها	8
الجدول (2.I)	المكونات الكيميائية الرئيسية في قشور الفول السوداني وخصائصها	12
الجدول (3.I)	خصائص المواد الحيوية عالية المسامية	18
الفصل الثالث: الجزء العلمي /المواد والطرق		
الجدول (1.III)	المواد الكيميائية المستعملة	50
الجدول (2.III)	الأجهزة المستعملة	51
الجدول (3.III)	المجالات المميزة لاهم المجموعات الوظيفية للهلام الهوائي	56
الـفصل الرابع: الجزء العلمي /النتائج والمناقشة		
الجدول (1.IV)	مردود معالجة المواد الاساسية	62

قـــــائمـة الأشكـــــال

رقم الشكل		الصفحة
الـــفصل الأول: المخلفات الزراعية والمواد الحيوية عالية المسامية		
الشكل (1.I)	المكونات والبنية الكيميائية للكتلة الحيوية اللجنوسليلوزية	7
الشكل (2.I)	الفول السوداني	10
الشكل (3.I)	قشور الفول السوداني	11
الشكل (4.I)	أنواع المواد الحيوية عالية المسامية	15
الشكل (5.I)	طرق تصنيع المواد الحيوية عالية المسامية ومميزاتها	17
الشكل (6.I)	توصيف خصائص المواد الحيوية عالية المسامية	17
الشكل (7.I)	مخطط توضيحي لتصنيف المواد الحيوية عالية المسامية وتطبيقاتها الوظيفية المتعددة في بيئات معالجة المياه المختلفة	22
الـــفصل الثـــالث: المواد والطرق		
الشكل (1. III)	تحضير مسحوق قشور الفول السوداني	51
الشكل (2.III)	مرحلة المعالجة الاولية	52
الشكل (3.III)	مرحلة غسل وتنظيف العينة	52
الشكل (4.III)	تجفيف العينة المعالجة	53
الشكل (5.III)	العينات المدروسة	53
الشكل (6.III)	تعزيز البنية وتحفيز الهلام	54
الشكل (7.III)	الهلام الحيوي	54
الشكل (8.III)	مرحلة التجميد والتجفيف بالتجميد لعينات الهلام الحيوي الهوائي	55
الشكل (9.III)	مخطط يوضح مراحل انتاج الهلام الهوائي	55
الشكل (10.III)	تجربة امتصاص ازرق الميثيلين بالهلام الهوائي	57
الشكل (11.III)	جهاز مطيافية UV-vis	59
الـــفصل الرابع: النتائج والمناقشة		
الشكل (1. IV)	مسحوق قشور الكوكاو قبل المعالجة (K1) وبعد المعالجة (K2)	62
الشكل (2.IV)	أطياف FTIR للفول السوداني قبل وبعد المعالجة	65

قـــــائمـــة الأشكـــــال

الشكل (3.IV)	مختلف الهلاميات الحيوية الهوائية المحضرة	65
الشكل (4.IV)	أطياف FTIR للهلام الحيوي المحضر	66
الشكل (5.IV)	إزالة الصبغة لهلام K	68
الشكل (6.IV)	إزالة الصبغة لهلام Kb	68
الشكل (7.IV)	إزالة الصبغة لهلام Kc	68
الشكل (8.IV)	إزالة الصبغة لهلام Ks	69

قائمة الرموز

الرمز	المعنى
Aerogel	الهلام الهوائي
BET	تقنية لتحليل المساحة السطحية النوعية وحجم المسام
β	نوع ترتيب الارتباط بيتا
$C_{16}H_{18}ClN_3S$	الصيغة الكيميائية الجزيئية لصبغة أزرق الميثيلين
$C_{64}H_{124}O_{26}$	الصيغة الكيميائية للمستحلب التجاري Tween 80
C_e	تركيز الصبغة المتبقي في المحلول عند التوازن
C_t	تركيز الصبغة المتبقي في المحلول عند زمن معين
$C_6H_{10}O_5$	الصيغة الكيميائية الجزيئية لبوليمر السليلوز الخطي
C_5	السكريات الخماسية المتنوعة
C_6	السكريات السداسية المتنوعة
Cr^{+6} او Cr (VI)	أيونات معدن الكروم السداسي
Cu (II)	أيونات معدن النحاس الثنائي
Cd^{+2}	أيونات معدن الكادميوم
C_0	التركيز الابتدائي
D	الترتيب الفراغي
DMSO	مذيب عضوي ثنائي ميثيل سلفوكسيد
FTIR	مطيافية الأشعة تحت الحمراء بتحويل فورير
H_2O	الصيغة الكيميائية الجزيئية للماء المقطر
K1	مسحوق قشور الفول السوداني الخام قبل المعالجة
K2	مسحوق قشور الفول السوداني بعد المعالجة الكيميائية القلوية
KB	مسحوق قشور الفول السوداني بعد المعالجة مع مسحوق قشور البيض
KC	مسحوق قشور الفول السوداني بعد المعالجة مع أكسيد الكالسيوم
KS	مسحوق قشور الفول السوداني بعد المعالجة مع السيليكا
m	كتلة المادة الماصة
MB	صبغة أزرق الميثيلين
NaOH	الصيغة الكيميائية الجزيئية هيدروكسيد الصوديوم
pH	الأُس الهيدروجيني/ دالة الحموضة
q_e	سعة الامتزاز عند التوازن
λ_{max}	الطول الموجي الأعظمي لامتصاص
rpm	دورة في الدقيقة
SEM	المجهر الإلكتروني الماسح
UV-vis	مطيافية الأشعة فوق البنفسجية والمرئية
V	حجم محلول الصبغة المستخدم

قائمة الرموز

W_t%	النسبة المئوية الوزنية
XG	رابط حيوي صمغ الزانثان
XRD / DRX	تقنية حيود الأشعة السينية
سم	سنتيمتر
غ	غرام
ل	لتر
مل	مليلتر
مغ	مليغرام
%	نسبة مئوية
℃	درجة مئوية
ppm	وحدة قياس جزء في المليون
Tween 80	توين اسم تجاري لمادة كيميائية، 80 نوع الحمض الدهني المرتبط بالمركب

الفهرس

الإهداء			
الشكر والعرفان			
قائمة الجداول			
قائمة الأشكال			
قائمة الرموز			
الفهرس			
المقدمة العامة			**2**
الفصل الأول: المخلفات الزراعية والمواد الحيوية عالية المسامية			
.1.I	**المخلفات الزراعية**		**6**
.1.1.I	تعريف المخلفات الزراعية ومصادرها		**6**
.2.1.I	التركيب الكيميائي للمخلفات الزراعية		**6**
.3.1.I	الأثر البيئي للمخلفات الزراعية		**8**
.4.1.I	استراتيجيات تثمين المخلفات الزراعية		**9**
.2.I	**قشور الفول السوداني**		**10**
.1.2.I	تعريف الفول السوداني وتصنيفه العلمي		**10**
.2.2.I	الأسماء الشائعة		**10**
.3.2.I	قشور الفول السوداني		**11**
.4.2.I	مكونات قشور الفول السوداني		**11**
.5.2.I	فوائد واستخدامات قشور الفول السوداني		**12**
.3.I	**المواد الحيوية عالية المسامية**		**13**
.1.3.I	تعريف المواد الحيوية عالية المسامية		**13**
.2.3.I	أنواع المواد الحيوية عالية المسامية		**14**
.3.3.I	طرق تصنيع المواد الحيوية عالية المسامية		**16**
.4.3.I	توصيف خصائص المواد الحيوية عالية المسامية		**17**
.1.4.3.I	خصائص المواد الحيوية عالية المسامية		**18**
.2.4.3.I	تقنيات توصيف خصائص المواد الحيوية عالية المسامية		**19**
.3.4.3.I	العوامل المؤثرة على خصائص المواد الحيوية عالية المسامية		**20**
.5.3.I	التطبيقات البيئية للمواد الحيوية عالية المسامية		**21**
مراجع الفصل الأول			**25**
الفصل الثاني: دراسات سابقة			
.1.II	**الدراسة الأولى**		**29**
.2.II	**الدراسة الثانية**		**31**

.3.II	الدراسة الثالثة	32
.4.II	الدراسة الرابعة	34
.5.II	الدراسة الخامسة	36
.6.II	الدراسة السادسة	38
.7.II	الدراسة السابعة	40
.8.II	الدراسة الثامنة	42
.9.II	الدراسة التاسعة	44
.10.II	الدراسة العاشرة	46
مراجع الفصل الثاني		48
الفصل الثالث: المواد والطرق		
.1.III	المواد والأجهزة المستعملة	50
.1.1.III	المواد الكيميائية	50
.2.1.III	الأجهزة	50
.2.III	خطوات العمل	51
.1.2.III	جمع وتحضير العينة	51
.2.2.III	مرحلة المعالجة الكيميائية	52
.3.2.III	مرحلة تحضير الهلام	53
.4.2.III	المرحلة النهائية لانتاج الهلام الهوائي	55
.3.III	توصيف الهلام الهوائي بواسطة التحليل الطيفي للأشعة تحت الحمراء	56
.4.III	الدراسة التجريبية لإزالة صبغة أزرق الميثيلين (MB)	56
.5.III	التحليل الضوئي لامتصاص صبغة أزرق الميثيلين (MB)	58
مراجع الفصل الثالث		60
الفصل الرابع: النتائج والمناقشة		
.1.IV	المادة الاولية	62
.2.IV	المادة الأولية بعد المعالجة	62
.3.IV	مطيافية الأشعة تحت الحمراء لقشور الفول السوداني	63
.1.3.IV	المادة الأولية قبل وبعد المعالجة	63
.2.3.IV	الهلام الحيوي الهوائي	65
.4.IV	إزالة صبغة أزرق الميثيلين	67
مراجع الفصل الرابع		71
الخاتمة العامة		74

المقدمة

العامة

المقدمة العامة:

تمثل النفايات العضوية الناتجة عن الأنشطة الزراعية والصناعية والمنزلية أحد أبرز التحديات البيئية التي تواجه العالم المعاصر، حيث أدى التزايد المستمر في الإنتاج الزراعي وتصنيع الأغذية إلى تراكم كميات هائلة من المخلفات العضوية، بما في ذلك قشور الفاكهة، ومخلفات الخضراوات، وسيقان المحاصيل، والأغلفة، والقشور[1]. وفي العديد من الدول النامية، تلقى هذه النفايات غالبا في العراء أو تحرق دون إدارة سليمة، مما يسبب مشاكل بيئية وصحية خطيرة، يساهم التخلص غير المنظم من النفايات الزراعية في تلوث التربة والمياه، وانبعاثات غازات الاحتباس الحراري، وانتشار الكائنات الدقيقة الممرضة، يطلق تحلل هذه المخلفات أو حرقها كميات كبيرة من ثاني أكسيد الكربون والمركبات السامة في الغلاف الجوي، مما يفاقم المشكلات البيئية العالمية مثل تغير المناخ وتلوث الهواء[2].

على الرغم من هذه المخاوف البيئية، تمثل المخلفات الزراعية مصدرا وفيرا ومتجددا وقابلا للتحلل الحيوي وغير مكلف للكتلة الحيوية الليغنوسليلوزية القيمة، والتي يمكن تحويلها إلى منتجات عالية القيمة لتطبيقات صناعية وبيئية متنوعة[3]، حيث يهدف تثمين المخلفات منخفضة القيمة إلى تحويلها إلى مواد مفيدة، مواد كيميائية، أو منتجات حيوية، مع الحد من التلوث البيئي وتحسين كفاءة استخدام الموارد في الوقت نفسه. تتكون المنتجات الثانوية الزراعية بشكل أساسي من السليلوز والهيميسليلوز واللجنين والبروتينات والمعادن والمركبات النشطة بيولوجيا، مما يجعلها مواد أولية مناسبة لتصنيع مواد وظيفية مثل: الوقود الحيوي والبلاستيك الحيوي والكربون المنشط والهيدروجيلات والإيروجيلات[4].

ومن بين المخلفات الزراعية العديدة، تعد قشور الفول السوداني من المخلفات الحيوية المهمة التي تنتج بكميات كبيرة في جميع أنحاء العالم، على الرغم من محتواها العالي من السليلوز والكربون، وخصائصها الفيزيائية والكيميائية المواتية، إلا أن مخلفات قشور الفول السوداني لا تستغل بالشكل الأمثل، تحتوي قشور الفول السوداني على وفرة من المجموعات الوظيفية المحتوية على الهيدروكسيل والأكسجين، نتيجة لهذا حظيت قشور الفول السوداني باهتمام كبير باعتبارها مادة أولية منخفضة التكلفة لتحضير مواد ماصة وهياكل حيوية مسامية للتطبيقات البيئية[5]، غالبا ما يكون الاستخدام المباشر للكتلة الحيوية الخام محدودا بسبب صغر مساحة سطحها، ووجود اللجنين والهيميسليلوز اللذين يقللان من إمكانية الوصول إلى مواقع الامتزاز النشطة، تستخدم طرق التعديل الكيميائي والفيزيائي بشكل شائع لتحسين الخصائص البنيوية وخصائص الامتزاز للمواد الليغنوسليلوزية[6]. من بين تقنيات التعديل، تعد المعالجة القلوية باستخدام هيدروكسيد الصوديوم من أكثرها شيوعا نظرا لفعاليتها في إزالة اللجنين والهيميسليلوز والشموع

والمركبات المستخلصة من الكتلة الحيوية، تزيد هذه المعالجة من خشونة السطح، وتعزز المسامية، وتعرض ألياف السليلوز، تحسن هذه التعديلات الهيكلية بشكل ملحوظ قدرة الامتزاز والخصائص الفيزيائية والكيميائية للمواد الناتجة، نتيجة لهذا أصبح تطوير مواد عالية المسامية، مثل الهلاميات الهوائية والهيدروجيلات، من موارد الكتلة الحيوية مجالا بحثيا هاما نظرا لانخفاض كثافتها، ومساميتها العالية، ومساحة سطحها النوعية الكبيرة، وأدائها المتميز في الامتزاز [7].

تعتبر الهلاميات الهوائية الحيوية المشتقة من الكتلة الحيوية المتجددة بدائل واعدة للمواد الماصة الاصطناعية التقليدية في معالجة مياه الصرف الصحي، حيث تسمح بنيتها المسامية المترابطة بانتشار وامتصاص الملوثات، مثل الأصباغ والزيوت والمعادن الثقيلة[8]، يمكن أن يحسن دمج عوامل التقوية غير العضوية بشكل ملحوظ من المتانة الميكانيكية والاستقرار الحراري وكفاءة الامتصاص لهذه المواد[9]. يمثل تلوث المياه الناتج عن الأصباغ الصناعية مصدر قلق بيئي كبير نظرا لطبيعة هذه المركبات السامة، يعد أزرق الميثيلين أحد أكثر الأصباغ الكاتيونية شيوعا في صناعات النسيج والأدوية والورق، يمكن أن يؤدي تصريف هذه المواد في البيئات المائية إلى التأثير سلبا على الكائنات المائية وصحة الإنسان، ومنه أصبح تطوير مواد ماصة فعالة ومنخفضة التكلفة لإزالة الأصباغ هدفا علميا هاما[10].

ركزت هذه الدراسة على تصنيع وتوصيف هلاميات حيوية هجينة عالية المسامية مشتقة من مخلفات قشور الفول السوداني، وذلك لتطبيقات المعالجة البيئية، يهدف هذا العمل إلى المساهمة في استغلال المخلفات الزراعية من خلال تطوير مواد حيوية مستدامة ومنخفضة التكلفة وعالية المسامية، ذات تطبيقات بيئية واعدة. ومن المتوقع أن توفر الهلاميات الحيوية بدائل فعالة للمواد الماصة التقليدية، مع تعزيز إعادة تدوير النفايات واستعادة الموارد وحماية البيئة في الوقت نفسه.

حيث اشتملت الدراسة على أربعة فصول:

الفصل الأول: تناولنا فيه عموميات حول المخلفات الزراعية والمواد عالية المسامية.

الفصل الثاني: استعرضنا فيه دراسات سابقة.

الفصل الثالث: تطرقنا فيه الى أهم المواد والطرق المتبعة في هذا العمل.

الفصل الرابع: استعرضنا فيه النتائج والمناقشة.

ختاما الخلاصة العامة والتي تعرض مدى تحقيق الأهداف المرجوة من الدراسة وذلك من خلال النتائج المتحصل عليها.

مراجع المقدمة:

[1] M. N. Khan, T. A. Sial, A. Ali, and F. Wahid, "Impact of agricultural wastes on environment and possible management strategies," in *Frontier studies in soil science*, ed: Springer, 2024, pp. 79-108.

[2] H. Alyasi and R. Isaifan, "A review on pollution emissions and impact from waste treatment and disposal facilities," *Journal of Environmental and Toxicological Studies*, vol. 2, pp. 1-9, 2018.

[3] S. Oyedeji, N. Patel, R. Krishnamurthy, and P. O. Fatoba, "Agricultural wastes to value-added products: economic and environmental perspectives for waste conversion," in *Biowaste to Value-added Products: Economics and Technologies*, ed: Springer, 2024, pp. 215-248.

[4] T. Brito, M. L. Ferreira, and A. E. Fai, "Utilization of agricultural by-products: Bioactive properties and technological applications," *Food Reviews International*, vol. 38, pp. 1305-1329, 2022.

[5] C. S. Fermanelli, A. Chiappori, L. B. Pierella, and C. Saux, "Towards biowastes valorization: peanut shell as resource for quality chemicals and activated biochar production," *Sustainable Environment Research*, vol. 32, p. 3, 2022.

[6] Y. Liu, Y. Nie, X. Lu, X. Zhang, H. He, F. Pan, *et al.*, "Cascade utilization of lignocellulosic biomass to high-value products," *Green Chemistry*, vol. 21, pp. 3499-3535, .2019

[7] N. Asim, M. Badiei, M. A. Alghoul, M. Mohammad, A. Fudholi, M. Akhtaruzzaman, *et al.*, "Biomass and industrial wastes as resource materials for aerogel preparation: opportunities, challenges, and research directions," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 58, pp. 17621-17645, 2019.

[8] V. K. Tripathi, M. Shrivastava, J. Dwivedi, R. K. Gupta, L. K. Jangir, and K. M. Tripathi, "Biomass-based graphene aerogel for the removal of emerging pollutants from wastewater," *Reaction Chemistry & Engineering*, vol. 9, pp. 753-776, 2024.

[9] H. L. Liu, B. X. Wei, X. J. Wei, X. T. Yi, S. Z. Tang, Y. D. Huang, *et al.*, "High strength, high toughness, low thermal conductivity, and appropriate expansion capacity of hybrid organic/inorganic nanocomposites used for thermal protection," *Ceramics International*, vol. 47, pp. 34918-34926, 2021.

[10] I. Khan, K. Saeed, I. Zekker, B. Zhang, A. H. Hendi, A. Ahmad, *et al.*, "Review on methylene blue: its properties, uses, toxicity and photodegradation," *Water*, vol. ,14p. 242, 2022.

الجزء

النظري

الفصل الأول:

المخلفات الزراعية والمواد الحيوية عالية المسامية

في ظل التحديات البيئية المتزايدة، أصبح استغلال المخلفات الزراعية نهجا ضروريا لتحقيق التنمية المستدامة، تعد قشور البقوليات مثل: قشور الفول السوداني من بين المخلفات التي تمتلك إمكانيات واعدة لإعادة التدوير والاستفادة منها بطرق مبتكرة، ومن بين أهم التطبيقات المستدامة لهذه المخلفات يأتي إنتاج المواد الحيوية عالية المسامية، والتي تعد مادة فعالة في تطبيقات المعالجة البيئية وتنقيتها من الملوثات؛ يهدف هذا الفصل إلى دراسة خصائص قشور الفول السوداني وإمكانية تحويله إلى مادة مسامية ذات كفاءة عالية في الامتصاص.

I.1. المخلفات الزراعية

I.1.1. تعريف المخلفات الزراعية ومصادرها:

المخلفات الزراعية هي المواد المتبقية من نمو النباتات وما ينتج من المحاصيل الزراعية؛ كان في السابق يتم حرق هذه المخلفات الزراعية أو في ظل ظروف مناسبة يتم تحويلها طبيعيا إلى سماد عضوي[1]؛ اما في الجانب العلمي فتعتبر المخلفات الزراعية نواتج ثانوية غنية بالكتلة الحيوية (Biomass) تنتج طوال سلسلة الإنتاج الزراعي حيث تختلف مصادرها والتي تتمثل في[2]:

- **مصادر نباتية:** بقايا الحصاد منها القش، الأوراق.
- **مصادر صناعة زراعية:** بقايا المعالجة الصناعية بقايا قصب السكر، قشور الفواكه وبقايا الفواكه.
- **مصادر حيوانية:** فضلات الماشية، الروث والنفايات الأخرى من المزارع ودواجن البيوت[3].

I.1.2. التركيب الكيميائي للمخلفات الزراعية:

بما ان المخلفات الزراعية الناتجة عن النفايات أثناء أو بعد معالجة المحاصيل الزراعية تعد واحدة من الموارد الحيوية المتجددة والغنية باللجنوسليلوز والتي تتكون بشكل رئيسي من ثلاث بوليميرات الموضحة في **الشكل (I.1)** كما يبين **الجدول (I.1)** خصائص ونسب أهم المركبات الكيميائية في المخلفات الزراعية، وهي [4]:

- **السليلوز (Cellulose):**

هو المكون الرئيسي الموجود بكمية كبيرة في الكتلة الحيوية اللجنوسليلوزية، حيث تتراوح نسبته بين 35% و50% من الوزن الجاف للمادة النباتية[5]، ويوجد في صورة بوليمر خطي $(C_6H_{10}O_5)_n$ الذي

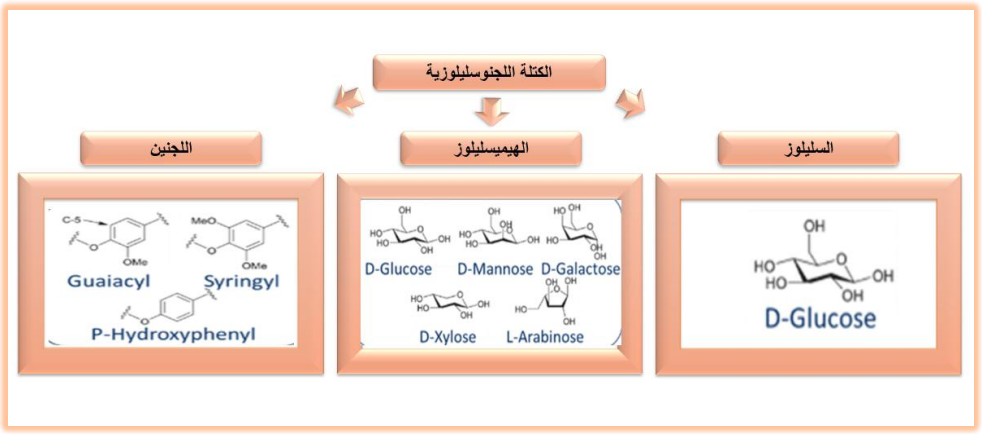
يتشكل عن طريق ربط ثنائيات السيلوبوز(cellobiose) وجزيئات الغلوكوز الاحادي(D-glucose) من خلال روابط جليكوسيدية β-1,4؛ عادة يكون السليلوز متبلورا، حيث يمكن ملاحظة مزيج من المناطق المتبلورة وغير المتبلورة في النباتات أو الكتلة الحيوية، حيث تعتمد درجة البلمرة على نوع الكتلة الحيوية اللجنوسليلوزية [6].

الهيميسليلوز (Hemicellulose):

هو ثاني أكثر البوليمرات الحيوية وفرة في الكتلة الحيوية اللجنوسليلوزية حيث يشكل عادة ما بين 20% و35% من الوزن الجاف للمادة النباتية [5] وهو بوليمر مغاير (Heteropolymer) يتكون من سلاسل قصيرة ومتفرعة؛ تتألف هذه السلاسل من سكريات خماسية C5 متنوعة مثل الزيلوز (Xylose) والأرابينوز (Arabinose)، بالإضافة إلى سكريات سداسية C6 مثل المانوز (Mannose) والجالاكتوز (Galactose)، ونظرا لطبيعته غير البلورية (Amorphous) وتفرعات سلاسله، يسهل حله في الماء أو تحلله تحت ظروف حمضية أو قاعدية معتدلة. يعمل الهيميسليلوز داخل الجدار الخلوي كعامل ربط يصل بين ألياف السيليلوز واللجنين مما يعزز تماسك البنية الهيكلية للنبات[6].

اللجنين (Lignin):

يشكل ما بين 10% و25% من الكتلة الحيوية اللجنوسليلوزية[5]، هو بوليمر عطري (Aromatic) معقد ثلاثي الأبعاد وغير كربوهيدراتي؛ يتكون من وحدات فينيل بروبانول (Phenylpropanoid units) الأساسية وهي كحول الـ p-coumaryl، كحول الـ coniferyl، وكحول الـ sinapyl، والتي ترتبط ببعضها عبر روابط كيميائية قوية من نوع C–C وC–O[6].



الشكل (1.I): المكونات والبنية الكيميائية للكتلة الحيوية اللجنوسليلوزية[6].

الجدول (1.I): المكونات الكيميائية الرئيسية للمخلفات الزراعية وخصائصها.

المركب الكيميائي	الخصائص والفوائد المركب الكيميائي	النسبة المئوية (%)
السليلوز	بنية بلورية صلبة، غير قابل للذوبان في الماء	50-35
الهيميسليلوز	اقل تبلور بنية غير منتظمة، قابل للذوبان جزئيا في الماء	35-20
اللجنين	مقاوم للتحلل البيولوجي، بنية عطرية معقدة تعطي صلابة	25-10

3.1.I. الأثر البيئي للمخلفات الزراعية:

تنتج الصناعات الزراعية مليارات الأطنان من المخلفات الناتجة عن زراعة ومعالجة المحاصيل المختلفة ويرتبط هذا التراكم الهائل للمخلفات الصناعية الزراعية (Agro-industrial residues) بمخاطر تلوث حقيقية نذكرها:

- **تلوث الهواء:** يعتبر التخلص غير السليم من المخلفات الزراعية وخاصة عن طريق الحرق المكشوف في الحقول مصدرا لانبعاث غازات الاحتباس الحراري والجسيمات الملوثة مما يؤدي إلى تفاقم مشكلة التغير المناخي وتدهور جودة الهواء المحيط، وبما أن الصناعة الزراعية تولد مليارات الأطنان من النفايات سنويا من معالجة محاصيل مثل: الأرز والذرة وفول الصويا وقصب السكر فإن حجم الانبعاثات الناتجة يمثل خطرا بيئيا كبيرا [7].
- **تلوث التربة:** يؤدي تراكم هذه المخلفات دون معالجة صحيحة إلى الإخلال بالتوازن الكيميائي والحيوي للتربة؛ ففي الوقت الذي يمكن فيه تثمين هذه البقايا كأسمدة حيوية (Biofertilizers)، فإن تركها في مكبات النفايات أو التخلص منها بعشوائية يؤدي الى تدهور الأراضي الزراعية وتلوث المياه الجوفية المرتبطة بها [8].
- **تلوث المياه:** تتسبب المواد العضوية المتحللة من المخلفات الزراعية في استنزاف الأكسجين المذاب في الماء مما يؤدي إلى ظاهرة الخنق البيئي للكائنات المائية. كما أن جريان مياه الأمطار فوق الأراضي التي تحتوي على نفايات زراعية متراكمة ينقل الملوثات الكيميائية والميكروبية إلى الأنهار والبحيرات مما يجعلها غير صالحة للاستخدام البشري أو الزراعي [9].

4.1.I. استراتيجيات تثمين المخلفات الزراعية:

في ظل الأزمات البيئية المتلاحقة ونفاذ موارد الطاقة التقليدية، لم تعد المخلفات الزراعية مجرد نفايات تتطلب التخلص منها، بل أصبحت كنزا حيويا ومادة خام أساسية لإنتاج الطاقة المتجددة؛ إن استراتيجيات التثمين تعتمد بشكل أساسي على تحويل هذه الكتلة الحيوية اللجنوسليلوزية إلى:

- **التحويل الى طاقة:** تشير الدراسات إلى أن المخلفات الزراعية إذا تم إدارتها بشكل صحيح يمكن أن تولد كميات كبيرة من الطاقة المتجددة مع الحد من ظاهرة الحرق المكشوف في الحقول وما يتبعها من تلوث هوائي حاد، ان توفر الكتلة الحيوية اللجنوسليلوزية في المخلفات الزراعية يجعلها الحل الأنسب لتقنيات تحويل الطاقة المختلفة. يمكن توظيف عدة تقنيات لاستخلاص الطاقة من المخلفات الزراعية، وتصنف إلى مسارين رئيسيين[9]:

- **التحويل الحراري الكيميائي (Thermochemical Conversion):** ويشمل الحرق المباشر (Combustion)، والتغويز (Gasification)، والتحلل الحراري (Pyrolysis)، وتعد هذه الطرق فعالة لإنتاج الكهرباء من المواد العضوية القابلة وغير القابلة للتحلل الحيوي.
- **التحويل الكيميائي الحيوي (Biochemical Conversion):** ويشمل الهضم اللاهوائي (Anaerobic Digestion) لإنتاج الميثان، والتخمير (Fermentation) لإنتاج الإيثانول الحيوي.

- **انتاج مواد حيوية:** يعتمد تحويل الكتلة الحيوية إلى منتجات ذات قيمة مضافة على تطبيق تقنيات معالجة متنوعة تشمل الطرق الفيزيائية والكيميائية، والحيوية، والحرارية التي تنتج[10]:

- **المواد الحيوية (Biomaterials):** تشمل البلاستيك الحيوي المنتج من قشور الأرز وقشور الفول السوداني وقشور القمح، والذي يستخدم في التغليف القابل للتحلل. كما يتم إنتاج الهيدروجيل من قش القمح وتفل قصب السكر لاستخدامه كمحسن للتربة الزراعية.
- **الفحم الحيوي (Biochar):** يبرز الفحم الحيوي كمنتج لا يعمل فقط كعازل للكربون، بل يساهم أيضا في تحسين جودة التربة وتقليل الاعتماد على المدخلات الصناعية.
- **المنتجات الحيوية (Bioproducts):** مثل الأحماض العضوية، والإنزيمات الصناعية، والمذيبات الخضراء التي تعمل كبدائل للمركبات البتروكيماوية.

I.2. قشور الفول السوداني

I.2.1. تعريف الفول السوداني وتصنيفه العلمي: [11]

الفول السوداني، المعروف علميا باسم *Arachis hypogaea L.* ويشار إليه في بعض مناطق العالم بـ "فستق العبيد" أو "الجوز الأرضي"، هو بذور صالحة للأكل (Fabaceae)، **الشكل (2.I)** يوضح بنيته؛ يتميز بقدرته على النمو في المناطق الاستوائية وشبه الاستوائية والمناخات المعتدلة الدافئة، يعكس اسمه العلمي الذي وضعه كارل لينيوس (Carolus Linnæus) خصائصه الفريدة، حيث تعني "Arachis" البقوليات، بينما تشير "Hypogaea" إلى نمو قرونه تحت سطح التربة. يعد الفول السوداني مصدرا غنيا بالبروتين النباتي، الدهون غير المشبعة، الألياف، ومجموعة واسعة من الفيتامينات والمعادن ومضادات الأكسدة، مما يجعله غذاء وظيفيا يساهم في الوقاية من الأمراض المزمنة وتحسين الصحة العامة؛ يصنف الفول السوداني علميا الى:

- الفصيلة: البقوليات
- الجنس: اراكيس
- النوع: هيبوجيا

الشكل (2.I): الفول السوداني.

I.2.2. الأسماء الشائعة: [12]

- الاسم العلمي: *Arachis hypogaea L*
- الاسم بالفرنسية: Arachide
- الاسم بالانجليزية: Peanut

- الاسم بالاسبانية:Man í
- الاسم بالايطالية: Arachide
- الاسم بالعربية: فول سوداني (كوكاو)

I.3.2. قشور الفول السوداني:

قشور الفول السوداني هي الغلاف الخارجي للقرون كما هو موضح في **الشكل (I.3)**، والتي تحتوي على تركيبة غنية بالألياف لاسيما السليلوز واللجنين، بالإضافة إلى البروتين الخام والمعادن الأساسية كالكالسيوم والفوسفور وعدد من المركبات الحيوية مثل: اللوتيولين (Luteolin) والفلافونويدات، مما يجعلها مصدرا هام في تعزيز صحة الحيوانات وحمايتها من الإجهاد التأكسدي كونها تعمل كمضاد للأكسدة والالتهابات. ايضا تبرز أهمية هذه القشور في الاستخدامات العلفية والصناعية نظرا لخصائصها الغذائية[12].

الشكل (I.3): قشور الفول السوداني.

I.4.2. مكونات قشور الفول السوداني:[13]

تحتوي قشور فول السوداني على مركبات كيميائية متنوعة تجعلها موردا قيما لإنتاج المواد الكيميائية الحيوية، نذكر منها:

- السليلوز (Cellulose) بنسبة تقارب 50%.
- اللجنين (Lignin) بنسبة تصل إلى 30%.
- الهيميسليلوز (Hemicellulose) بنسبة تبلغ 20%.

- تعد مصدرا غنيا بالكربون، مما يجعلها بديلا واعدا للموارد الأحفورية.
- تنتج عند معالجتها حراريا (التحلل الحراري) مجموعة واسعة من المركبات الأكسجينية مثل الفينولات، الألدهيدات، الكيتونات، الكحوليات، الفوران والاسترات.
- تحتوي على مركبات كيميائية دقيقة وعالية القيمة مثل الفرفورال (Furfural) و5-هيدروكسي ميثيل فرفورال (HMF-5).
- يمكن تحويلها إلى مركبات هيدروكربونية عطرية مهمة مثل الزايلين (Xylene) والتولوين (Toluene) والكومين (Cumene).

كما يوضح **الجدول (2.I)** خصائص ونسب المكونات الهيكلية الرئيسية في قشور الفول السوداني.

الجدول (2.I): المكونات الكيميائية الرئيسية في قشور الفول السوداني وخصائصها.

التركيب الكيميائي	خصائص وفوائد المركب الكيميائي	النسبة المئوية (%)
السليلوز	مصدر كربوني مستدام، ينتج كيماويات حيوية عالية القيمة.	50
الهيميسليلوز	مصدر حيوي متجدد، عنصر هيكلي مرن.	20
اللجنين	بوليمر عطري طبيعي، ينتج مركبات الفينول والهيدروكربونات العطرية.	30

5.2.I. فوائد واستخدامات قشور الفول السوداني:

أثبتت الدراسات والتجارب الحديثة أن لقشر الفول السوداني العديد من الفوائد على مختلف الأصعدة، نذكر منها:

- **معالجة المياه:** تعد قشور الفول السوداني مصدرا واعدا وغير مكلف في عالم المعالجة الحيوية للمياه، حيث يتم تحويل هذه المخلفات الزراعية إلى فلاتر حيوية (Biofilters) فعالة قادرة على تنقية المياه وإدارة المغذيات بطريقة صديقة للبيئة. وبدلا من التخلص منها كنفايات، أثبتت

الدراسات أن هذه القشور توفر حلا اقتصاديا ومستداما لمواجهة التلوث المائي الناتج عن التوسع الحضري والصناعي[14].

- **في الزراعة**

ان الزراعة الحديثة تعتمد على تقليل التكاليف، واستخدام قشور الفول السوداني يحقق ذلك بامتياز؛ فهي مصدر رخيص، غير سام، ومتوفر بكثرة (أكثر من 80 مليون طن سنويا)، بالأخص ان مكوناتها تجعل منها مادة مثالية لتحسين بنية التربة؛ بدلا من الاعتماد على مواد كيميائية باهظة الثمن ومعقدة التصنيع، توفر هذه القشور حلا طبيعيا يدعم لاقتصاد الدائري عبر إعادة تدوير المخلفات لخدمة الأرض[15].

- **انتاج المواد الحيوية عالية المسامية:** تمثل قشور الفول السوداني مادة أولية واعدة لإنتاج مواد حيوية عالية المسامية، حيث يمكن تحويل هذه النفايات الزراعية الوفيرة إلى كربون مسامي ذو بنية هرمية فريدة ومساحة سطحية كبيرة تصل إلى 554.528 م²/غ، وذلك عبر عمليات تحلل حراري بسيطة واقتصادية دون الحاجة لمنشطات كيميائية. ونظرا لغنى تركيبها بمجموعات وظيفية أكسجينية وقدرتها العالية على احتواء مسام دقيقة ومتوسطة، فإنها تبرز كخيار مثالي لتطبيقات الامتزاز ومعالجة المياه، محققة كفاءة إزالة استثنائية تصل إلى 96.5% لأيونات الرصاص و 97.1% لصبغة الميثيلين الأزرق[16].

I.3. المواد الحيوية عالية المسامية

I.3.1. تعريف المواد الحيوية عالية المسامية:

تعد المواد الحيوية عالية المسامية (High-Porosity Biomaterials) بأنها هياكل ثلاثية الأبعاد تتميز بوجود فراغات مادية (مسام) مترابطة عبر ممرات دقيقة تعرف بـ "أعناق" (Throats)، وتصنف تبعا لأقطارها إلى كبيرة (أكبر من 50 نانومتر)، ومتوسطة (بين 2 و50 نانومتر)، ودقيقة (أقل من 2 نانومتر)[17]. وفي سياق التوجه نحو الاستدامة، برزت المواد المشتقة من الكتلة الحيوية (مثل النفايات الزراعية) كبديل تقني رائد؛ حيث تتميز هذه المواد بمسامية قابلة للضبط ومساحة سطحية عالية، مما يجعلها مرشحة مثالية لتطبيقات امتصاص الملوثات والمعالجة البيئية[18].

I.2.3. أنواع المواد الحيوية عالية المسامية:

تعد تطبيقات المعالجة البيئية تحديا عالميا يتطلب حلولا مستدامة وفعالة؛ وفي هذا السياق، برز استخدام "المواد الحيوية عالية المسامية من المخلفات الزراعية" كتوجه علمي وتقني واعد، بديل للمواد التقليدية، وهي أنواع كما موضح في **الشكل (4.I)** نذكر منها:

- **الهلام المائي (Hydrogel)**

الهلام المائي (Hydrogel) " الهيدروجيل " هو عبارة عن شبكة بوليمرية ثلاثية الأبعاد محبة للماء، تتكون من سلاسل بوليمرية مترابطة قادرة على امتصاص وحفظ كميات كبيرة من الماء داخل بنيتها دون أن تذوب. تعتمد هذه القدرة على وجود مجموعات وظيفية محبة للماء مرتبطة بالعمود الفقري للبوليمر، بينما تضمن خاصية التشابك (cross-links) تماسك الشبكة ومنعها من الذوبان، كما تمنحها درجة من المرونة تشبه أنسجة الجسم الطبيعية بفضل محتواها المائي المرتفع.

ومع التطور التقني، حلت الأنواع الاصطناعية محل الهيدروجيلات الطبيعية نظرا لما توفره من عمر خدمة أطول، وقدرة فائقة على الامتصاص، وقوة جل أكبر، بالإضافة إلى إمكانية تعديل هياكلها للحصول على خصائص تحلل وظيفية دقيقة، ولا تقتصر أهميتها على امتصاص الماء فحسب، بل تتميز بقدرتها على الاستجابة للمؤثرات البيئية الخارجية، للهيدروجيل خصائص فريدة تجعله من الأنظمة المتطورة التي تتألف من شبكات معقدة تملأ الفراغات بين جزيئاتها الكبيرة، مما يفتح آفاقا واسعة لاستخدامها في العديد من التطبيقات العلمية والتقنية[19].

- **الهلام الهوائي (Aerogels)**

يعد الهلام الهوائي (Aerogels) " الإيروجيل " مادة من المواد ثلاثية الأبعاد مميزة وفريدة من نوعها[20]، وهي مادة تعرف بأنها تمتلك أدنى كثافة على وجه الأرض، حيث تتكون بنسب تقريبية تصل إلى 95% من الهواء. وتتميز هذه البنية الناتجة عن تجفيف الهيدروجيل بسطحها الواسع ومساميتها العالية، مما يمنحها قدرة فائقة على الامتصاص والتطبيقات البيئية المختلفة[21]. تكتسب هذه المواد أهميتها من خصائصها الاستثنائية؛ فهي تتميز بكثافة منخفضة للغاية، وموصلية حرارية منخفضة، بالإضافة إلى درجة عالية من المسامية ومساحة سطح نوعية هائلة.

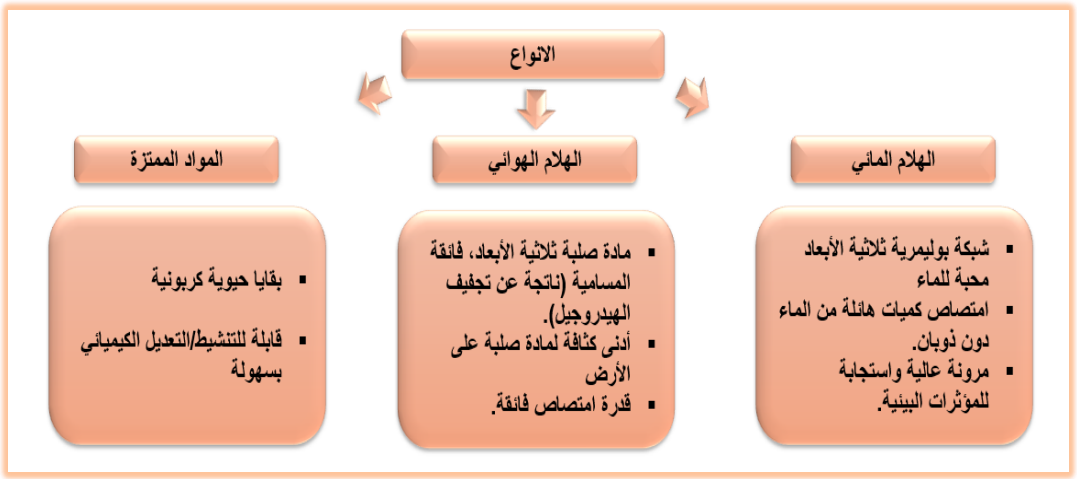
الهلام الهوائي القائم على الكتلة الحيوية (Biomass-based aerogels) يشتق من المواد الخام الحيوية، مما يمنحها تميزا هيكليا مقارنة بالإيروجيل الغير عضوي التقليدي مثل إيروجيل الكربيد، وأكاسيد المعادن، والكبريتيدات وتبرز قيمته في كونه يمثل بديلا "أخضر" ومستداما في علوم المواد.

تتميز هذه المادة بخصائص بيئية استثنائية، فهي تكتسب أهميتها من توافقها الحيوي العالي ووجود مجموعات وظيفية متعددة على سطحها؛ بخلاف الهيكل الهش للإيروجيل التقليدي؛ تتمتع هذه المادة بمرونة جيدة، إلى جانب تكلفة إنتاجها المنخفضة وقدرتها على التحلل الحيوي خلال فترة تتراوح بين 3 إلى 12 شهرا، مما يجعلها ركيزة أساسية لتوجهات التنمية الخضراء.

يمثل الإيروجيل المستمد من الكتلة الحيوية نقلة نوعية في علم المواد؛ إذ يجمع بين الأداء الوظيفي المتقدم والاستدامة البيئية، ليصبح بذلك بديلا استراتيجيا واعدا يقلل الاعتماد على المواد القائمة على الوقود الأحفوري[22].

المواد الممتزة (Adsorbent materials)

تعد المواد الممتزة المشتقة من المخلفات الزراعية بقايا حيوية ناتجة عن الأنشطة الزراعية والصناعات المرتبطة بها، مثل: قشور الفواكه والبذور وألياف النباتات. تندرج هذه المواد تحت مسمى المواد الكربونية أو "اللجنوسليلوزية"، وتمتلك خصائص بنيوية تؤهلها للعمل كممتزات فعالة لإزالة المعادن الثقيلة من المياه والمياه العادمة، حيث تعتمد كفاءتها على خصائصها الفيزيائية والكيميائية، مثل: المساحة السطحية وحجم المسام والمجموعات الوظيفية السطحية، والتي يمكن تعزيزها عبر تعديلات كيميائية بسيطة باستخدام الأحماض أو القواعد[23].



الشكل (4.I): أنواع المواد الحيوية عالية المسامية.

I.3.3. طرق تصنيع المواد الحيوية عالية المسامية:

يمكن تصنيع المواد الحيوية عالية المسامية من المواد التي تحتوي على كتلة حيوية اللجنوسليلوزية المتواجدة في المخلفات الزراعية ومن بين طرق التصنيع ندرج ما يلي:

- **طريقة sol-gel** [24]

تعد طريقة "سول جل" (Sol-Gel) واحدة من التقنيات الرائدة والمتميزة في مجال علم المواد، حيث تكتسب شهرتها من مرونتها الفائقة وبساطتها، بالإضافة إلى كونها تقنية فعالة من حيث التكلفة والوقت، تعتمد هذه الطريقة بشكل أساسي على خلط المواد الأولية على المستوى الذري، وهو ما يوفر تجانسا هيكليا عاليا وتركيبا كيميائيا دقيقا للمنتجات، مما يسهل عملية تصنيع مواد عالية الجودة عند درجات حرارة منخفضة.

تتميز هذه التقنية بتنوع تطبيقاتها، حيث تفتح آفاقا واسعة لاستخدامها في مجالات متعددة تشمل الإلكترونيات، والإلكترونيات الضوئية، والحفز الكيميائي، والطب الحيوي، وغيرها من التخصصات. ومن الناحية الفيزيائية، يتيح هذا النهج الفريد إمكانية تحضير المواد في أشكال متنوعة، سواء كانت مساحيق أو أغشية رقيقة؛ إضافة إلى ذلك، توفر طريقة "سول–جل" سهولة كبيرة في تعديل وتوظيف الخصائص النهائية للمواد المنتجة. وعلى الرغم من أن الاستخدام التقليدي لهذه الطريقة يتركز بشكل أساسي في تصنيع المواد الأكسيدية، إلا أنها تتيح أيضا إمكانية تخليق الهاليدات.

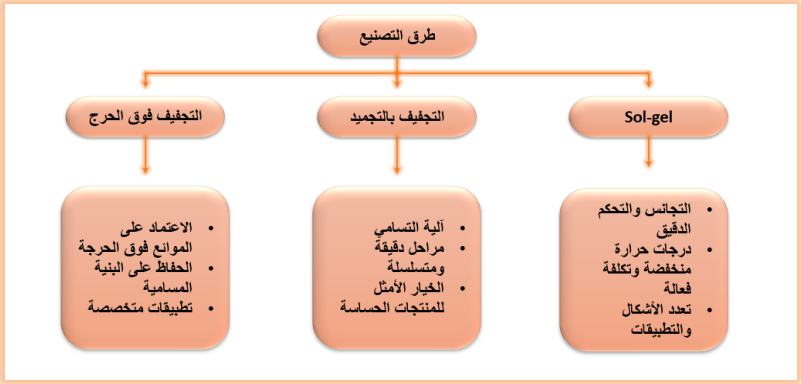
- **التجفيف بالتجميد**[25]

تعد تقنية التجفيف بالتجميد (Freeze-Drying)، والمعروفة أيضا باسم "التحويل إلى الحالة الصلبة" (Lyophilization)، واحدة من أكثر طرق تجفيف المواد تطورا في العصر الحديث، تعتمد هذه التقنية بشكل أساسي على الجمع بين عمليتي التجميد والتجفيف، حيث يتم إزالة الرطوبة من المواد عن طريق التسامي (Sublimation)، وهو التحول المباشر للثلج من الحالة الصلبة إلى الحالة الغازية (بخار) دون المرور بالحالة السائلة، وذلك عند ضغوط منخفضة جدا، تمر هذه التقنية بمراحل دقيقة تبدأ بالمعالجة الأولية لتعزيز الكفاءة، تليها مرحلة التجميد التي تحدد حجم البلورات الثلجية وتؤثر على معدل التجفيف، ثم التجفيف الأولي والثانوي لخفض نسبة الرطوبة المتبقية وضمان استقرار المنتج؛ لا تزال تقنية التجفيف بالتجميد تمثل الخيار الأمثل للمنتجات عالية القيمة والحساسة للحرارة.

التجفيف فوق الحرج [26]

تعد تقنية "التجفيف الحرج للهلام" (Supercritical gel drying) إحدى العمليات المتقدمة التي تعتمد على الموائع فوق الحرجة، وتستخدم بشكل رئيسي في عدة مجالات، حيث تهدف هذه التقنية إلى إنتاج هياكل بوليمرية مسامية على المستوى النانوي والميكروي مع الحفاظ على سلامة البنية الداخلية للهلام.

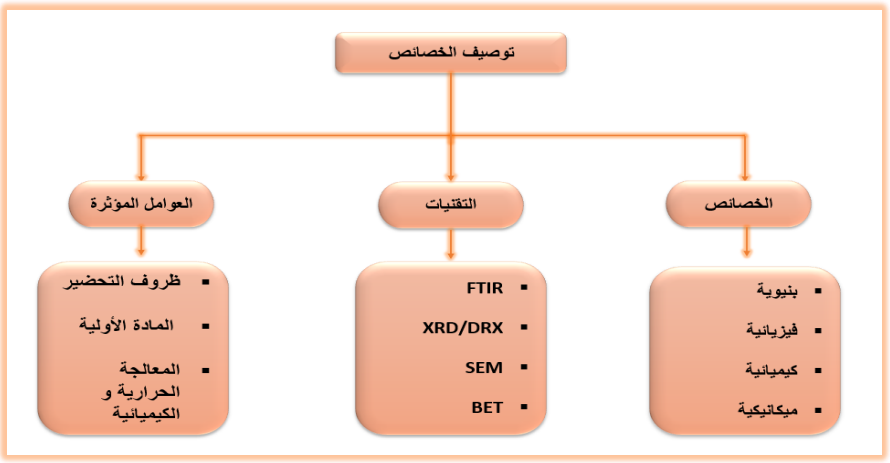
كما يوضح **الشكل (5.I)** طرق تصنيع المواد الحيوية عالية المسامية ومميزات كل منها.



الشكل (5.I): طرق تصنيع المواد الحيوية عالية المسامية ومميزاتها.

4.3.I. توصيف خصائص المواد الحيوية عالية المسامية:

يتم توصيف المواد الحيوية عالية المسامية ودراسة خصائصها والتأكد من تركيبتها من قبل تقنيات القياس العلمية الموضحة في **الشكل (6.I)** :



الشكل (6.I): توصيف خصائص المواد الحيوية عالية المسامية.

I.1.4.3. خصائص المواد الحيوية عالية المسامية:

ان **الجدول (I.3)** يوضح أهم الخصائص للمواد الحيوية عالية المسامية

الجدول (I.3): خصائص المواد الحيوية عالية المسامية.

الخصائص		الوصف	المرجع
البنيوية	المسامية (Porosity)	بنيتها عالية المسامية تتراوح نسبتها الإجمالية في المواد الحيوية بين 65% إلى 82% اعتماد على ظروف التحضير. ويشغل الهواء في هذه البنية حجما هائلا يتراوح بين 80% إلى 99.8% من إجمالي حجم الهيكل.	[28 ,27]
	حجم المسام (Pore size)	تقع أقطار مساماتها في النطاق النانومتري (بين 2 إلى 50 نانومتر)	[28]
	مساحة السطح النوعية (Specific surface area)	تتراوح مساحتها السطحية الداخلية بين 10 إلى 2000 م²/غ، مما يمنحها عدداً هائلاً من المواقع النشطة الحاضنة للتفاعلات الكيميائية والتحفيزية	[28]
الفيزيائية	الكثافة (Density)	انخفاض شديد في كثافة المواد الحيوية عالية المسامية خاصتا الهلام الهوائي.	[27]
	النفاذية (Permeability)	تحدد مدى سهولة تدفق السوائل والغازات عبر شبكته المسامية المترابطة.	[27]
	العزل الحراري (Thermal insulation)	موصلية حرارية فائقة الانخفاض تتراوح بين 0.005 إلى 0.1 و/م.ك، مما يجعله قادراً على العمل كحاجز حراري ممتاز.	[28]
	التركيب الكيميائي (Chemical	مصفوفة سيلولوزية مشابهة كيميائيا. الى جانب الكتلة اللجنوسليلوزية تتكون من الكربون	[30]

الكيميائية	composition)	(51.4%) والأكسجين (47.5%). تحتوي على كمية ضئيلة جدا من المعادن.	
	المجموعة الوظيفية النشطة (Active functional group)	مجموعات الأمين الكيميائية النشطة (NH_2) مجموعات الكربوكسيل (-COOH) المكونة: مجموعة الهيدروكسيل (-OH) مجموعة الكربونيل (C=O)	[32 ,31]
	الاستقرار الكيميائي Chemical) (stability	قدرة المادة على تحمل درجات الحرارة العالية دون أن تتفكك روابطها الكيميائية أو تتحلل إلى مركبات أخرى.	[32]
الميكانيكية	مقاومة الانضغاط Compressive) (strength	تعتمد مقاومة المادة لضغوط الركيزة المحيطة على الخصائص الفيزيائية والبنيوية، كذلك إدخال بعض المكونات المدعمة كالسيليكا في الأنظمة الهجينة.	[28]
	المرونة (Flexibility)	العودة كليا او جزئيا الى شكلها الأصلي بعد الانضغاط.	[28]
	الصلابة والمتانة Hardness and) (toughness	هشاشة وانخفاض المتانة للمواد الحيوية عالية المسامية التقليدية.	[28]

I.2.4.3. تقنيات توصيف خصائص المواد الحيوية عالية المسامية

- **مطيافية تحويل فورير بالأشعة تحت الحمراء (FTIR)** [27]

تعد مطيافية الأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه (FTIR) واحدة من أهم الأدوات التحليلية غير المدمرة في كيمياء المواد، وتلعب دورا محوريا في تتبع التغيرات الكيميائية وفهم طبيعة الروابط داخل شبكة الإيروجيل (Aerogel)، تتيح لنا هذه التقنية التحقق من نجاح دمج البوليمرات المختلفة وتقييم مدى تأثير عمليات التصنيع على الاستقرار الكيميائي للمادة الناتجة مثل تبادل المذيبات والتجفيف.

- **حيود الأشعة السينية (XRD/DRX)** [29]

يتم الاعتماد بشكل أساسي على تقنية حيود الأشعة السينية (XRD)؛ تتيح هذه التقنية المتقدمة تحليل بنية الايروجيل من خلال دراسة أنماط الحيود الناتجة عن اختراق الأشعة السينية للعينة، مما يساهم في تحديد المكونات المعدنية والبلورية بدقة عالية.

- **تقنية تحليل المساحة السطحية (BET)** [30]

تعتمد هذه التقنية في جوهرها على حساب المساحة السطحية الخارجية النوعية والمعروفة بمساحة (BET)، والتي تشتق من الامتصاص أحادي الطبقة للغاز على الهيكل الصلب للمادة. ومن الميزات الكبرى لهذه التقنية أن قيم المساحة السطحية المحسوبة بواسطة صيغة BET لا تتأثر بالتشوهات الميكانيكية أو الانضغاطية التي قد تطرأ على العينة أثناء القياس، شريطة التأكد من تحقيق التوازن التام في منطقة الضغوط النسبية المنخفضة ($p/p_0 < 0.3$) عند وجود مسام دقيقة (Micropores).

- **تقنية المجهر الالكتروني الماسح (SEM)**[31]

يستخدم المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) لدراسة الهياكل السطحية والمقاطع العرضية للأيروجيل، حيث تظهر الصور ثنائية الأبعاد (D2) تفاصيل دقيقة عن توزيع المسام وترتيبها الفراغي، مما يمنح الباحثين تقديرا تقريبيا وسريعا لشكليتها السطحية.

I.3.4.3. العوامل المؤثرة على خصائص المواد الحيوية عالية المسامية:[32]

تعد المواد الحيوية عالية المسامية من المواد الفريدة التي تحظى باهتمام واسع في النطاقات البحثية والتطبيقية، وذلك لكثافتها المنخفضة للغاية، ومساميتها المرتفعة، ومساحتها السطحية النوعية الهائلة. وتتأثر الخصائص النهائية لهذه المواد بشكل صارم ومباشر بظروف التركيب والمقاييس التشغيلية المتبعة عبر مراحل تصنيعها المختلفة؛ نذكر منها:

- **نوع وتركيز المادة الأولية (Precursor Type and Concentration):**

يؤثر النوع الجزيئي والتركيز تأثيرا بالغا على كثافة وبنية المواد الناتجة. يؤدي استخدام تركيزات منخفضة جدا إلى شبكات هشة تعاني من انكماش حجمي حاد أثناء التجفيف، بينما تسهم التركيزات المرتفعة في تسريع تفاعلات التكثيف وبناء هياكل أكثر كثافة وترابطا.

- **طبيعة السائل المسامي والمذيب (Pore Liquid/Type of Solvent):**

تتدخل قطبية المذيب ولزوجته في تحديد معدل تفاعلات تشكيل الشبكة، حيث أظهرت الدراسات أن طول سلسلة المذيب وتفرعها يتناسب طرديا مع زمن تشكيل الهلام.

- **نوع المحفز والأس الهيدروجيني (Catalyst Type and pH):**

يتحكم الرقم الهيدروجيني (pH) في حركية التحلل المائي والتكثيف، مثال في أوساط السيليكا الحامضية المنخفضة الـ pH، تتخذ الجسيمات تراكيب خطية ذات تفرعات محدودة لينتج جل مسامي وضعيف ميكانيكيا. أما في الأوساط القاعدية (pH مرتفع)، تزداد روابط التشبيك وتتفرع الشبكة، مما يقلل زمن تشكيل الهلام ويسهم في تقوية الهيكل الجاف.

- **المواد الخافضة للتوتر السطحي (Surfactants):**

تدمج هذه المواد كاستراتيجية لزيادة المسامية؛ حيث تعمل الفقاعات الهوائية المحتبسة بفضل العامل الخافض للتوتر السطحي على خلق مسامات واسعة في البنية النهائية.

- **درجة حرارة وزمن تشكيل الهلام (Gelation Temperature and Time):**

تعمل زيادة درجة الحرارة على تسريع الحركية الكيميائية وتقليص زمن تشكيل الهلام بشكل ملحوظ. ومع ذلك، فإن تجاوز درجات حرارة معينة قد يتسبب في انكماش حجمي للمادة نتيجة الطرد السريع للمذيب من مسامات الهلام.

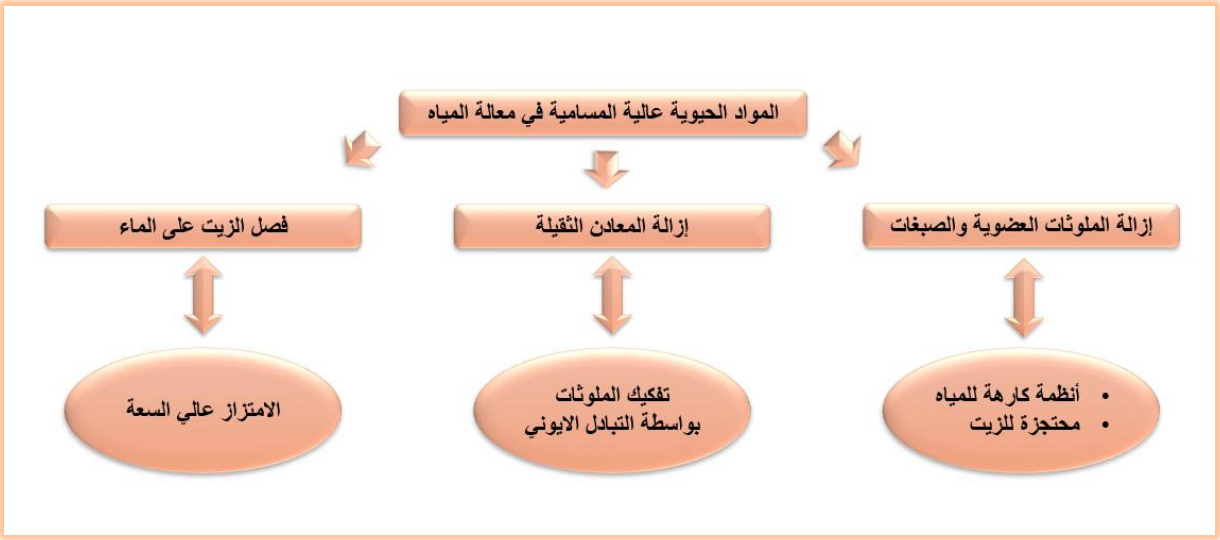
I.5.3. التطبيقات البيئية للمواد الحيوية عالية المسامية [33]

شهد العالم في العقود الأخيرة نموا حضريا وصناعيا متسارعا بشكل غير مسبوق، ومثلما جلب هذا النمو الرخاء، فقد ألقى بظلاله الثقيلة على سلامة النظام البيئي، مسببا تلوثا واسع النطاق يشمل الهواء، التربة، والمياه. لمواجهة هذا التحدي البيئي الداهم، تم تطوير المواد الحيوية عالية المسامية في التطبيقات البيئية وذلك لقدرتها على الامتزاز العزل، ومن أهم تطبيقاتها البيئية:

- **معالجة المياه:** تعتمد المواد الحيوية عالية المسامية في معالجة المياه على آليات ميكانيكية، تتعدد وظائفها بناء على طبيعة المادة الخام المستخدمة في تحضيرها، وطريقة تجفيفها، بالإضافة إلى خصائص سطحها الكيميائية وقابليتها للضبط كما يوضح **الشكل (7.I)** تصنيف المواد الحيوية عالية المسامية (الايروجيل) وتطبيقاتها المتنوعة في معالجة المياه:

- **ازالة الصبغات والملوثات العضوية:** تستطيع شبكات الأيروجيل القائمة على الكربون أو البوليمرات المعدلة كيميائيا امتزاز صبغات مثل الميثيلين الأزرق (MB) والروادامين (RhB) بكفاءات عالية جدا.
- **إزالة المعادن الثقيلة:** اصطياد أيونات المعادن الثقيلة عبر تزيين أسطح الأيروجيل بمجموعات وظيفية نشطة (مثل مجموعات الأمين أو الكبريت)، يتم اقتناص أيونات المعادن السامة كمركبات الرصاص Pb (II) والكروم Cr (VI) والنحاس Cu (II) من خلال آليات التنسيق والتبادل الأيوني. وتعد الهياكل العضوية المعدنية القائمة على الأيروجيل (MOFA) من أبرز الأمثلة التي سجلت أرقاما قياسية في تنقية المياه من هذه السموم.
- **فصل الزيت عن الماء واحتجاز الانسكابات النفطية (Oil/Water Separation):** تعد بقع النفط والانسكابات الزيتية من أخطر الكوارث البيئية، هنا يتم توظيف الأيروجيل بعد تعديل سطحه كيميائيا ليصبح كاره جدا للمياه ومحب جدا للزيوت.

هذه الهندسة السطحية تسمح للأيروجيل بامتصاص المذيبات العضوية غير القطبية والزيوت بكفاءة تصل إلى عشرات أو مئات أضعاف وزنه الجاف، مع السماح بالمرور الكامل للمياه دون أن يمتص منها قطرة واحدة، مما يسهل عملية الفصل المباشر.



الشكل (7.I): مخطط توضيحي لتصنيف المواد الحيوية عالية المسامية وتطبيقاتها الوظيفية المتعددة في بيئات معالجة المياه المختلفة.

- **معالجة الهواء:** تعمل المواد الحيوية عالية المسامية (الايروجيل) على تنقية الغلاف الجوي من الانبعاثات السامة بفضل مساميتها العالية وقابليتها للتعديل السطحي:

- **امتزاز واحتجاز الغازات الدفيئة والسامة:** تستخدم الإيروجيلات الكربونية وتلك القائمة على المواد المعدنية العضوية (MOFs) كمنصات ممتازة لامتزاز وتخزين الغازات مثل ثاني أكسيد الكربون (CO_2)، والمخلفات الغازية الصناعية. المساحة السطحية الضخمة تتيح حبس الجزيئات الغازية داخل القنوات النانوية ومنع انطلاقها إلى الغلاف الجوي.
- **الفلترة الكيميائية والميكروبية العالية:** تظهر المواد الهجينة المدعومة بالإيروجيل قدرة فائقة على العمل كمرشحات دقيقة (Micro-filters) قادرة على اقتناص المركبات العضوية المتطايرة (VOCs) والأبخرة السامة الناجمة عن المذيبات الصناعية. بالإضافة إلى ذلك، فإن دمج النانو تكنولوجي في الإيروجيل يساهم في حجز الجسيمات الدقيقة وحتى العوامل البيولوجية الممرضة العالقة في الهواء.
- **المحفزات الضوئية لتفكيك ملوثات الهواء:** لا تقتصر وظيفة الإيروجيل على الاحتجاز الفيزيائي فقط؛ كذلك تمتد إلى التفكيك الكيميائي. عند تطعيم الإيروجيل بأكاسيد المعادن مثل ثاني أكسيد التيتانيوم (TiO_2) أو أكسيد الفضة (Ag_2O)، يتحول الهيكل إلى محفز ضوئي نشط. بمجرد تعرضه للضوء، يقوم بتوليد جذور حرة قوية تؤكسد الغازات السامة وتحولها إلى مركبات غير ضارة.

- **معالجة التربة:** تتعرض التربة للتلوث المستمر نتيجة الأنشطة المطبقة، الإسراف في الأسمدة، والمبيدات الحشرية، والانسكابات النفطية الناتجة عن التنقيب. هنا، تتدخل المواد الحيوية عالية المسامية (الايروجيل) عبر:

- **اقتناص المعادن الثقيلة من محاليل التربة:** تتحرك المعادن الثقيلة السامة (مثل الرصاص Pb^{+2}، والكادميوم Cd^{+2}، والكروم Cr^{+6}) عبر رطوبة التربة لتصل إلى النباتات والمياه الجوفية. الإيروجيلات العضوية المستدامة، مثل تلك المشتقة من الشيتوزان أو السليلوز المعدل، تمتلك قدرة تبادل أيوني مذهلة. تقوم هذه الشبكات باحتجاز أيونات المعادن الثقيلة بكفاءة عالية جدا وتثبيتها كيميائيا، مما يمنع النباتات من امتصاصها ويقلل من سمية التربة.
- **علاج انسكابات الهيدروكربونات والمبيدات:** تتميز بعض أنواع الإيروجيل (مثل إيروجيل السليلوز المعالج بالسيليكا أو المواد الكربونية) بخاصية كارهة للماء شديدة ومحبة للزيت والمواد

العضوية (Oleophilic/Hydrophobic). عند تطبيقها على التربة الملوثة بالبقع النفطية أو رواسب المبيدات الحشرية المستعصية، تقوم هذه المواد بامتصاص الهيدروكربونات بشكل مباشر فائق دون امتصاص الرطوبة الحيوية للتربة، مما يسهل من عملية عزل الملوثات العضوية وتطهير البيئة الأرضية.

- **التحرير المحكوم للمغذيات والمبيدات:** في إطار الزراعة المستدامة، يستغل الإيروجيل كمنصة مسامية لتوصيل المواد بشكل محكوم (Controlled delivery system). بدلا من غسل الأسمدة والمبيدات مع مياه الري وتلوث التربة بها، يقوم الإيروجيل بحفظها داخل مسامه وإطلاقها ببطء شديد وبمعدلات متزنة تناسب حاجة النبات، مما يحمي التربة من الإشباع الكيميائي الضار.

محفزات بيئية: يعمل الإيروجيل كمحفز بيئي مع مجموعة واسعة من التطبيقات في معالجة المياه وتنقية البيئة من الملوثات المستعصية. وتعود هذه الكفاءة العالية بشكل أساسي إلى خصائصه البنيوية الفريدة، وخاصة مساحته السطحية الهائلة وثلاثية الأبعاد التي تمنحه قدرة استثنائية على العمل كمنصة تدعم وتشتت الجزيئات النشطة والمحفزات النانوية لمنع تكتلها وضمان تعرضها الأقصى للملوثات والضوء.

تناول هذا الفصل دراسة المخلفات الزراعية مثل قشور الفول السوداني، واستغلاله في إنتاج المواد الحيوية عالية المسامية مع تحليل خصائصها وطرق تصنيعها؛ كما تمت مناقشة العوامل المؤثرة على خصائصها، إضافة إلى طرق توصيفها وتطبيقاتها المختلفة، مما يؤكد دورها المحوري كحلول خضراء ومستدامة في حماية البيئة.

مراجع الفصل:

[1]K. Harshwardhan and K. Upadhyay, "Effective Utilization of Agricultural Waste: Review," Journal of Fundamentals of Renewable Energy and Applications, vol. 07, no. 05, 2017, doi: 10.4172/2090-4541.1000237.

[2]J. O. Gonçalves et al., "A Comprehensive Review of Agricultural Residue-Derived Bioadsorbents for Emerging Contaminant Removal," Jul. 01, 2025, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). doi: 10.3390/w17142141.

[3]V. Sujatha, K. Mounika, and K. Arunapriya, "Agricultural Waste Management System," 2022, doi: 10.32628/IJSRST.

[4]J. K. Saini, R. Saini, and L. Tewari, "Lignocellulosic agriculture wastes as biomass feedstocks for second-generation bioethanol production: concepts and recent developments," Aug. 03, 2015, Springer Verlag. doi: 10.1007/s13205-014-0246-5.

[5]F. H. Isikgor and C. R. Becer, "Lignocellulosic biomass: a sustainable platform for the production of bio-based chemicals and polymers," Polym. Chem., vol. 6, no. 25, pp. 4497–4559, Jul. 2015, doi: 10.1039/c5py00263j.

[6]B. Segers et al., "Lignocellulosic biomass valorisation: a review of feedstocks, processes and potential value chains and their implications for the decision-making process," Oct. 10, 2024, Royal Society of Chemistry. doi: 10.1039/d4su00342j.

[7]M. Oleszek, I. Kowalska, T. Bertuzzi, and W. Oleszek, "Phytochemicals Derived from Agricultural Residues and Their Valuable Properties and Applications," Jan. 01, 2023, MDPI. doi: 10.3390/molecules28010342.

[8]G. Šelo, M. Planinić, M. Tišma, S. Tomas, D. Koceva Komlenić, and A. Bucić-Kojić, "A comprehensive review on valorization of agro-food industrial residues by solid-state fermentation," May 01, 2021, MDPI AG. doi: 10.3390/foods10050927.

[9]M. Lackner and M. Besharati, "Agricultural Waste: Challenges and Solutions, a Review," Waste, vol. 3, no. 2, p. 18, Jun. 2025, doi: 10.3390/waste3020018.

[10] N. Said, R. Alrowais, M. M. Abdel-Daiem, and N. A. Mostafa, "Bio-Waste to Bioenergy: Critical Assessment of Sustainable Energy Supply Chain in Egypt," Resources, vol. 14, no. 8, Aug. 2025, doi: 10.3390/resources14080131.

[11] B. P. Almeida et al., "Agricultural Biomass as a Resource for Biomaterials, Biofertilizers, and Bioproducts: A Systematic Review," Dec. 01, 2025, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). doi: 10.3390/agrochemicals4040023.

[12] B. Melo, J. Robalo, F. Ramos, and A. Sanches Silva, "Peanuts (Arachis hypogaea L.) and Mycotoxins: Analytical Approaches, Prevalence, and Innovative Detoxification †," Mar. 01, 2025, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). doi: 10.3390/foods14050902.

[13] M. Zhang et al., "Resource Utilization of Peanut Shells: Nutritional Characteristics, Regulation of Antinutritional Factors, and Application Potential in Livestock and Poultry Production," Dec. 01, 2025, John Wiley and Sons Inc. doi: 10.1002/fsn3.70994.

[14] C. S. Fermanelli, A. Chiappori, L. B. Pierella, and C. Saux, "Towards biowastes valorization: Peanut shell as resource for quality chemicals and activated biochar production," Sustainable Environment Research, vol. 32, no. 1, Dec. 2022, doi: 10.1186/s42834-021-00112-9.

[15] D. S. Thorat, Y. V. Ushir, and S. Singh, "Value-added-peanut shell as potential source for biofilters: an eco-friendly way to clean water and manage nutrients," Biotechnology for Sustainable Materials, vol. 2, no. 1, Jul. 2025, doi: 10.1186/s44316-025-00034-1.

[16] H. M. Hashem, M. El-Maghrabey, and R. El-Shaheny, "Inclusive study of peanut shells derived activated carbon as an adsorbent for removal of lead and methylene blue from water," Sci. Rep., vol. 14, no. 1, Dec. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-63585-9.

[17] S. Bai, T. Wang, Z. Tian, K. Cao, and J. Li, "Facile preparation of porous biomass charcoal from peanut shell as adsorbent," Sci. Rep., vol. 10, no. 1, Dec. 2020, doi: 10.1038/s41598-020-72721-0.

[18] J. L. Hernandez and K. A. Woodrow, "Medical Applications of Porous Biomaterials: Features of Porosity and Tissue-Specific Implications for Biocompatibility," May 01, 2022, John Wiley and Sons Inc. doi: 10.1002/adhm.202102087.

[19] G. Li, J. He, and J. Yao, "A Review of Recent Advances in Biomass-Derived Porous Carbon Materials for CO2 Capture," Dec. 01, 2025, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). doi: 10.3390/c11040092.

[20] E. M. Ahmed, "Hydrogel: Preparation, characterization, and applications: A review," 2015, Elsevier B.V. doi: 10.1016/j.jare.2013.07.006.

[21] P. Franco, S. Cardea, A. Tabernero, and I. De Marco, "Porous aerogels and adsorption of pollutants fromwater and air: A review," Molecules, vol. 26, no. 15, Aug. 2021, doi: 10.3390/molecules26154440.

[22] A. Demir and M. Kaya, "Fabrication and Characterization of Bio-Aerogel from Mandarin Peel-Based Agricultural Waste," Fibers and Polymers, vol. 26, no. 7, pp. 3217–3226, Jul. 2025, doi: 10.1007/s12221-025-01005-z.

[23] X. Yang, W. Miao, X. Sun, and Y. T. Pan, "Recent advances in sustainable biomass-based aerogels: a review," Oct. 01, 2025, Royal Society of Chemistry. doi: 10.1039/d5su00497g.

[24] T. K. Sen, "Agricultural Solid Wastes Based Adsorbent Materials in the Remediation of Heavy Metal Ions from Water and Wastewater by Adsorption: A Review," Jul. 01, 2023, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). doi: 10.3390/molecules28145575.

[25] A. Zarkov, "Sol–Gel Technology Applied to Materials Science: Synthesis, Characterization and Applications," Jan. 01, 2024, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). doi: 10.3390/ma17020462.

[26] A. Uwineza and X. Zhang, "Application of Freeze-Drying Technology in the Food Industry: A Review," Feb. 01, 2026, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). doi: 10.3390/foods15040790.

[27] L. Baldino, S. Cardea, and E. Reverchon, "Natural aerogels production by supercritical gel drying," Chem. Eng. Trans., vol. 43, pp. 739–744, 2015, doi: 10.3303/CET1543124.

[28] C. S. A. Bento, B. Agostinho, A. Teixeira, M. S. Reis, H. C. de Sousa, and M. E. M. Braga, "Alcogel formation analysis: An important step for scCO2 aerogel production," Journal of Supercritical Fluids, vol. 211, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.supflu.2024.106321.

[29] K. H. Lee et al., "Porous Aerogel Structures as Promising Materials for Photocatalysis, Thermal Insulation Textiles, and Technical Applications: A Review," Sep. 01, 2023, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). doi: 10.3390/catal13091286.

[30] Ş. Sözcü et al., "Effect of drying methods on Acetobacter xylinum bacterial cellulose aerogels and cryogels," Sci. Rep., vol. 16, no. 1, Dec. 2026, doi: 10.1038/s41598-026-42244-1.

[31] R. Valentin, B. Bonelli, E. Garrone, F. Di Renzo, and F. Quidnard, "Accessibility of the functional group of chitosan aerogel probed by FT-IR-monitored deuteration," Biomacromolecules, vol. 8, no. 11, pp. 3646–3650, Nov. 2007, doi: 10.1021/bm070391a.

[32] G. Horvat, M. Pantić, Ž. Knez, and Z. Novak, "Preparation and characterization of polysaccharide - silica hybrid aerogels," Sci. Rep., vol. 9, no. 1, Dec. 2019, doi: 10.1038/s41598-019-52974-0.

[33] L. Borella, A. Rozo, C. Perfetti, and C. S. Iorio, "Characterization of Composite Freeze-Dried Aerogels with Simulant Lunar Regolith for Space Applications," Materials, vol. 16, no. 17, Sep. 2023, doi: 10.3390/ma16175797.

[34] G. Reichenauer, "Characterization of Aerogels – Challenges and Prospects," in 13th International Ceramics Congress - Part E, Trans Tech Publications Ltd, Oct. 2014, pp. 54–63. doi: 10.4028/www.scientific.net/ast.91.54.

[35] G. Horvat, M. Pantić, Ž. Knez, and Z. Novak, "A Brief Evaluation of Pore Structure Determination for Bioaerogels," Jul. 01, 2022, MDPI. doi: 10.3390/gels8070438.

[36] O. Payanda Konuk et al., "The effect of synthesis conditions and process parameters on aerogel properties," 2023, Frontiers Media SA. doi: 10.3389/fchem.2023.1294520.

[37] R. Ganesamoorthy, V. K. Vadivel, R. Kumar, O. S. Kushwaha, and H. Mamane, "Aerogels for water treatment: A review," Dec. 20, 2021, Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129713.

الفصل الثاني:

دراسات سابقة

تعد المواد الحيوية عالية المسامية (Bio-Aerogels) تقنية واعدة في مجال المعالجة البيئية والاستدامة، حيث تنتج من تحويل المخلفات الزراعية عبر عمليات فيزيائية وكيميائية متقدمة تتميز بقدرتها الفائقة على امتزاز الملوثات بفضل بنيتها المسامية الثلاثية الأبعاد ومساحتها السطحية الكبيرة، كما تلعب دورا مهما في إزالة المعادن الثقيلة والملونات العضوية من الأوساط الملوثة مما يجعلها أداة فعالة في مواجهة التحديات البيئية المعاصرة، كما تختلف فعالية هذه المواد باختلاف نوع المخلفات الأولية وظروف التصنيع؛ وعلى ضوء ما تقدم، تطرقنا في هذا الفصل إلى مراجعة عدة دراسات تمحورت حول تصنيع المواد الحيوية عالية المسامية وتطبيقاتها في معالجة الملوثات.

II.1. الدراسة الأولى: [1]

استنادا إلى العمل المنجز من طرف الباحثين:

Ha Vu Le et al.

والذي جاء بعنوان:

Bacterial Cellulose Aerogels Derived from Pineapple Peel Waste for the Adsorption of Dyes

إيروجيلات السليلوز البكتيري المشتقة من نفايات قشور الأناناس لامتزاز الأصباغ

الهدف من هذه الدراسة:

تثمين نفايات قشور الأناناس لإنتاج سليلوز بكتيري وتحويله إلى إيروجيلات خفيفة الوزن لاستخدامها كمواد مازة فعالة وصديقة للبيئة، وإزالة الأصباغ العضوية من مياه الصرف الصحي.

لخصت هذه الدراسة إلى ما يلي:

تحضير إيروجيل السليلوز البكتيري:

- **أولا:** جمع مستخلص قشور الأناناس وترشيحه، ثم تلقيحه ببكتيريا Acetobacter xylinum ليتخمر لمدة 7 أيام تحت ظروف هوائية حتى تتكون طبقة هيدروجيل (Nata de pina) بسمك 2 سم.
- **ثانيا:** غمر الهيدروجيل في محلول هيدروكسيد الصوديوم (1 مولاري) لمدة 12 ساعة ثم غسله بالماء حتى التعادل وتقطيعه إلى مكعبات صغيرة.

- **ثالثا:** خلط قطع السليلوز بالماء بنسبة (1/1) وطحنها باستخدام خلاط يدوي لفترات تتراوح بين (1-5 دقائق) للحصول على معلق بتركيز سليلوز محدد (0.24 - 0.80% وزنيا).
- **أخيرا:** تجميد المعلق عند درجة حرارة°C20- لمدة 24 ساعة، ثم تطبيق التجفيف بالتجميد (Freeze-drying) عند ضغط 0.5 مل زئبق لمدة 48 ساعة لإنتاج الإيروجيل النهائي.

دراسة امتزاز الأصباغ:

- **أولا:** وضع حوالي 20 مغ من الإيروجيل في 10 مل من محلول صبغة "ازرق الميثيلين" (بتركيز 50 جزء في المليون).
- **ثانيا:** إجراء عملية الامتزاز عند درجة حرارة 30 ℃ مع التقليب المستمر لمدة 30 دقيقة.
- **ثالثا:** دراسة تأثير متغيرات مختلفة مثل (درجة الحرارة 20-60 ℃ ودرجة الحموضة pH 3-11، والتركيز الابتدائي للصبغة حتى 400 جزء في المليون).
- **أخيرا:** فصل الإيروجيل بالترشيح وقياس تركيز الصبغة المتبقي باستخدام مطيافية الأشعة فوق البنفسجية والمرئية(UV-vis) .

تجديد الإيروجيل وإعادة استخدامه:

غسل الإيروجيل المستخدم باستخدام الأسيتون المحتوي على 5% من حمض الهيدروكلوريك(HCl) لخمس مرات لإزالة الصبغة ثم غسله بالماء وتكرار عملية التجميد والتجفيف بالتجميد لاستعادة خصائصه.

نتائج الدراسة:

- أظهر الإيروجيل قدرة امتزاز عالية للأصباغ الموجبة (مثل ازرق الميثيلين) وصلت إلى حوالي 31.1 مل/غ.
- وجد أن عملية الامتزاز طاردة للحرارة وتتبع نموذج "لانغمويير (Langmuir)" مما يشير إلى تشكل طبقة أحادية من الصبغة على سطح الإيروجيل.
- تبين أن زيادة درجة الحموضة (pH) تحسن من كفاءة الامتزاز بسبب التجاذب الكهروستاتيكي بين سطح الإيروجيل والصبغة.

استنتاجات الدراسة:

يعد ايروجيل السليلوز البكتيري المشتق من قشور الأناناس مادة مازة مستدامة منخفضة التكلفة وقابلة للتحلل الحيوي. تميزت المادة ببنيتها المسامية الثلاثية الأبعاد وكفاءتها العالية في معالجة المياه الملوثة بالأصباغ، مع إمكانية تجديدها وإعادة استخدامها دون فقدان كبير في الأداء.

2.II. الدراسة الثانية: [2]

استنادا إلى العمل المنجز من طرف الباحثين:

Adem Demir and Mehmet Kaya

والذي جاء بعنوان:

Fabrication and Characterization of Bio-Aerogel from Mandarin Peel-Based Agricultural Waste

تصنيع وتوصيف الإيروجيل الحيوي من النفايات الزراعية القائمة على قشور اليوسفي

الهدف من هذه الدراسة:

تطوير طريقة مبتكرة لتحويل قشور اليوسفي إلى ايروجيلات حيوية مستدامة واستخدامها في امتزاز الأصباغ (مثل ميثيل البرتقال) من المحاليل المائية والملوثات البيئية.

لخصت هذه الدراسة إلى ما يلي:

تحضير الايروجيل الحيوي:

- **أولا:** غسل قشور اليوسفي الخام بالماء منزوع الأيونات، وتجفيفها عند 105 °C لمدة 8 ساعات ثم طحنها ونخلها بحجم(70-100 mesh) .
- **ثانيا:** معالجة المسحوق بمحلول هيدروكسيد الصوديوم (NaOH) بتركيز 4% بنسبة (1/10) عند45 °C لمدة 5 ساعات لإزالة المكونات غير السليلوزية.
- **ثالثا:** خلط 2 غرام من المسحوق المعالج مع الماء وإضافة 3 مل من مادة (Tween 80)كمستحلب، مع التقليب المستمر لمدة 30 دقيقة.
- **رابعا:** صب المعلق في قالب وتجميده عند - 18 °C لمدة 24 ساعة.

- **أخيرا:** تطبيق التجفيف بالتجميد (Freeze-drying) عند – 92 ℃ لمدة 48 ساعة للحصول على ايروجيل اليوسفي (MBA).

تطبيق الايروجيل في امتصاص الأصباغ:

- **أولا:** وضع كميات محددة من الايروجيل في محاليل صبغة "ميثيل البرتقال" بتركيزات مختلفة.
- **ثانيا:** دراسة قدرة الايروجيل على امتصاص السوائل العضوية المختلفة (مثل الإيثانول، الأسيتون، والديزل) لتقييم قدرته على التنظيف البيئي.
- **ثالثا:** استخدام تقنيات التوصيف مثل (SEM) لفحص البنية المجهرية و (FT-IR) لتحديد المجموعات الوظيفية المسؤولية عن الامتزاز.
- **أخيرا:** قياس الزاوية الملامسة للماء (Contact Angle) لتحديد مدى ألفة المادة للماء أو كرهها له.

نتائج الدراسة:

- أظهر الإيروجيل بنية مسامية ثلاثية الأبعاد بقطر مسام يتراوح بين 10–20 ميكرومتر.
- حقق الإيروجيل كفاءة عالية في إزالة صبغة ميثيل البرتقال حيث وصلت سعة الامتزاز القصوى إلى 137.4 مل/غ.
- أظهرت المادة قدرة ممتازة على امتصاص المذيبات العضوية مما يجعلها مرشحة قوية لمعالجة مياه الصرف الصناعي.

استنتاجات الدراسة:

- أثبتت الدراسة إمكانية إنتاج إيروجيلات عالية الجودة من قشور اليوسفي باستخدام طرق خضراء (تعتمد على البكتين الذاتي).
- تميزت المادة الناتجة بخصائص فيزيائية وكيميائية فائقة مما يوفر حلا مزدوجا: التخلص من النفايات الزراعية وإنتاج مواد منخفضة التكلفة وفعالة جدا في مكافحة التلوث المائي.

II.3. الدراسة الثالثة: [3]

استنادا إلى العمل المنجز من طرف الباحثين:

Uloaku Michael-Igolima et al.

والذي جاء بعنوان:

A Novel Preparation and Application of Orange Peel Aerogel for Removal of Oil Contaminants in Soils

تحضير وتطبيق مبتكر لإيروجيل قشور البرتقال لإزالة الملوثات النفطية في التربة

الهدف من هذه الدراسة:

استقصاء قدرة امتصاص الزيت بواسطة الهلام الهوائي (Aerogel) المصنع من نفايات قشور البرتقال كطريقة مستدامة وفعالة لمعالجة التربة الملوثة بالنفط.

لخصت هذه الدراسة إلى ما يلي:

تحضير إيروجيل قشور البرتقال:

- **أولا:** غسل قشور البرتقال الطازجة، تجفيفها في الفرن عند درجة حرارة 75 °C لمدة 48 ساعة، ثم طحنها ونخلها بحجم 300 ميكرومتر.
- **ثانيا:** نقع 150 غ من المسحوق في خليط من هيدروكسيد الصوديوم (NaOH) والإيثانول لمدة 24 ساعة، ثم غسل العينة بالماء المقطر حتى الوصول لدرجة حموضة (pH= 7) وتجفيفها.
- **ثالثا:** كربنة القشور المعدلة كيميائيا في فرن عند درجة حرارة 500 ° C لمدة ساعة واحدة لزيادة قدرة الامتزاز.
- **أخيرا:** خلط 5 غ من القشور المعدلة مع الماء ومسحوق الاجار (كعامل ربط)، ثم تجميد الخليط عند 0 ° C لمدة 24 ساعة، يليه تجفيف بالتجميد (Freeze-drying) لمدة 48 ساعة.

تطبيق الإيروجيل في التربة:

- **أولا:** تعبئة تربة رملية وأخرى طينية في أوعية بلاستيكية وتركها تتماسك لمدة أسبوعين.
- **ثانيا:** حفر ثقوب في التربة ووضع الإيروجيل (مغلفا بمنديل ورقي لمنع التصاق حبيبات التربة به) داخل هذه الثقوب.

- **ثالثا:** سكب 200 مل من زيت دوار الشمس بانتظام على التربة وترك الإيروجيل لمدة تماس تصل إلى 60 دقيقة.
- **أخيرا:** إزالة الإيروجيل ووزنه لتحديد كمية الزيت الممتص، وإجراء الاختبارات في ثلاث مكررات لضمان الدقة.

نتائج الدراسة:

- أظهر إيروجيل قشور البرتقال كفاءة عالية في امتزاز الزيت بفضل مساميته التي وصلت إلى 99% وكثافته الخفيفة جدا.
- بلغت سعة الامتزاز القصوى 13.55 مل/غ في التربة الرملية و9.60 مل/غ في التربة الطينية.
- أثبتت اختبارات إعادة الاستخدام أن المادة مستدامة ويمكن استخدامها لعدة دورات معالجة.

استنتاجات الدراسة:

يؤثر قوام التربة وخصائص الإيروجيل بشكل مباشر على كفاءة المعالجة حيث كانت النتائج أفضل في التربة الرملية مقارنة بالطينية، حيث تؤكد الدراسة أن تحويل المخلفات الزراعية إلى إيروجيل يمثل حلا اقتصاديا وصديقا للبيئة يدعم مبادئ الاقتصاد الدائري ويساهم في المعالجة السريعة للمواقع الملوثة بالنفط.

II.4. الدراسة الرابعة:[4]

استنادا إلى العمل المنجز من طرف الباحثين:

M. Chen et al.

والذي جاء بعنوان:

Direct preparation of green and renewable aerogel materials from crude bagasse.

تحضير مباشر لمواد إيروجيل خضراء ومتجددة من تفل قصب السكر الخام

الهدف من هذه الدراسة:

تطوير طريقة مباشرة لتحويل تفل قصب السكر الخام (Bagasse) إلى إيروجيلات حيوية سليلوزية لجنينية ذات مساحة سطحية عالية، وذلك باستخدام أنظمة مذيبات خضراء وتقنيات تجفيف اقتصادية.

لخصت هذه الدراسة إلى ما يلي:

تحضير الإيروجيل الحيوي:

- **أولا:** إزالة الشمع من تفل قصب السكر باستخدام مخلوط التولوين والإيثانول لمدة 12 ساعة، ثم طحنه باستخدام مطحنة كروية لمدة 4 ساعات لتقليل بلورية الألياف.
- **ثانيا:** إذابة المسحوق في نظام المذيبات (DMSO/LiCl) بتركيز 6% من كلوريد الليثيوم عند درجة حرارة 110 C ° مع التقليب المستمر لمدة 5 ساعات لضمان الذوبان الكامل.
- ثالثا: صب المحلول في قوالب زجاجية وتعريضه لأربع دورات من التجميد والتحلل (freezing-thawing)؛ حيث يتم التجميد عند – 35 °C لمدة 5 ساعات ثم الإذابة في درجة حرارة الغرفة لمدة 5 ساعات.
- **رابعا:** غمر المحلول الناتج في الماء (حمام التخثر) للحصول على الهيدروجيل، ثم إجراء التبادل المذيب للماء بالإيثانول ثم بـ "ثالثي بوتانول(t-butanol) "
- **أخيرا:** تطبيق التجفيف بالتجميد (Freeze-drying) للحصول على إيروجيل قصب السكر النهائي

توصيف الإيروجيل:

- **أولا:** استخدام تقنية SEM لفحص المورفولوجيا.
- **ثانيا:** استخدام تقنية FT-IR للتأكد من وجود السليلوز، واللجنين، والهيميسليلوز داخل شبكة الإيروجيل.
- **ثالثا:** تحليل امتصاص النيتروجين لقياس المساحة السطحية (BET) وحجم المسام، مع دراسة تأثير تركيز المادة الخام على هذه الخصائص.
- **أخيرا:** استخدام حيود الأشعة السينية (XRD) لدراسة التغير في التركيب البلوري للمادة بعد الإذابة والتحويل إلى إيروجيل.

نتائج الدراسة:

- أظهرت الإيروجيلات مساحة سطحية عالية وصلت في أقصاها إلى 185م²/غ وحجم مسام كلي بلغ 0.46 سم³/غ.
- تتراوح مسامية المادة بين 84.4% و94.2%، مع كثافة تتراوح بين 0.088 و0.236غ/سم³.
- تبين أن زيادة تركيز تفل القصب إلى 10% تؤدي إلى انخفاض المساحة السطحية بسبب تكتل المادة.

استنتاجات الدراسة:

تثبت الدراسة إمكانية إنتاج إيروجيلات لجنوسليلوزية عالية الجودة مباشرة من تفل قصب السكر دون الحاجة لعزل السليلوز النقي، مما يقلل من استخدام الكيماويات الضارة، حيث تعد هذه المواد مرشحة قوية للاستخدام كحوامل وظيفية في التطبيقات الصناعية بفضل مساحتها السطحية العالية وبنيتها المسامية المستقرة.

II.5. الدراسة الخامسة: [5]

استنادا إلى العمل المنجز من طرف الباحثين:

Ngoc Tram Thi Nguyen et al

والذي جاء بعنوان:

Synthesis of Cellulose Aerogels from Coir Fibers via a NaOH/Urea Method for Methylene-blue Adsorption

تصنيع إيروجيلات السليلوز من ألياف جوز الهند بواسطة هيدروكسيد الصوديوم/اليوريا لامتزاز ميثيلين الأزرق.

الهدف من هذه الدراسة:

تطوير طريقة مستدامة لاستخدام ألياف جوز الهند (نفايات زراعية) في تصنيع إيروجيلات سليلوزية ذات كفاءة عالية وتكلفة منخفضة، واستخدامها في معالجة مياه الصرف الصحي من خلال امتزاز صبغة "ازرق الميثيلين".

لخصت هذه الدراسة إلى ما يلي:

تحضير الإيروجيل الحيوي:

- **أولا:** معالجة ألياف جوز الهند بمحلول هيدروكسيد الصوديوم (NaOH %6) عند 90 °C لإزالة جزء من اللجنين، ثم تكرار العملية بمحلول تركيزه NaOH %4 لاستخلاص اللب.
- ثانيا: تبييض اللب الناتج باستخدام خليط من H_2O_2 و NaOH بتركيز 10% عند 80 °C لمدة ساعتين للحصول على لب ألياف مبيض.
- **ثالثا:** إذابة اللب المبيض في محلول مختلط من (NaOH/Urea) بنسبة (12/7 %wt) مبرد إلى – 10 °C مع التقليب المستمر لمدة 30 دقيقة.
- رابعا: تجميد النظام الهلامي الناتج لمدة 24 ساعة، ثم استبدال الماء بداخل الهيدروجيل بالإيثانول لمدة 24 ساعة أخرى.
- **أخيرا:** تطبيق تقنية التجفيف بالتجميد (Freeze-drying) لمدة 48 ساعة للحصول على إيروجيل السليلوز النهائي.

تطبيق الإيروجيل في امتصاص الأصباغ:

- **أولا:** تحضير محاليل صبغة "ميثيلين الأزرق" بتركيز 50 ppm واستخدام عينات إيروجيل بتركيزات ألياف مختلفة (2-6 %wt).
- **ثانيا:** إجراء تجارب الامتزاز بوضع 0.05 غ من المادة في 25 مل من المحلول ومراقبة النتائج عبر فترات زمنية تصل إلى 150 دقيقة.
- **ثالثا:** استخدام تقنيات التوصيف مثل FTIR لتحديد الروابط الهيدروجينية والمجموعات الوظيفية، و SEM لفحص البنية المسامية ثلاثية الأبعاد، و TGA لتقييم الاستقرار الحراري.

نتائج الدراسة:

- أظهرت النتائج أن الإيروجيلات المصنعة تتميز بكثافة منخفضة جدا (0.0099 – 0158.0 غ/سم³) ومسامية عالية جدا تصل إلى 99.35%.
- كشف فحص SEM عن وجود شبكة ثلاثية الأبعاد مترابطة من ألياف السليلوز المتجانسة بقطر يتراوح بين 20–200.

- بالنسبة للامتزاز، حققت العينات ذات تركيز الألياف المنخفض (2 wt%) أفضل كفاءة امتزاز أولية بلغت 17.68 ملغ/غ خلال أول 15 دقيقة.

استنتاجات الدراسة:

أثبتت الدراسة نجاح استخدام ألياف جوز الهند كمصدر وفير ومستدام لإنتاج إيروجيلات السليلوز. وأكدت النتائج أن الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمادة تعتمد بشكل كبير على تركيز الألياف، حيث تزداد القوة الميكانيكية والحرارية بزيادة المحتوى الليفي، بينما تزداد كفاءة الامتزاز مع زيادة المسامية في التركيزات الأقل، مما يجعلها حلا فعالا لمعالجة تلوث المياه بالألوان.

II.6. الدراسة السادسة: [6]

استنادا إلى العمل المنجز من طرف الباحثين:

H. Wang et al.

والذي جاء بعنوان:

Aerogel-based oil sorbents derived from pomelo (Citrus grandis L.) peels as potential gel matrices for food applications: Formation, properties and in-vitro oral processing

ماصات الزيوت القائمة على الإيروجيل المشتق من قشور البوملي (Citrus grandis L.) كقوالب هلامية محتملة للتطبيقات الغذائية: التكوين، الخصائص، والمعالجة الفموية المخبرية

الهدف من هذه الدراسة:

تحويل قشور البوملي (PP) إلى قوالب إيروجيل لاستخدامها كامتزاز فعال لزيت نخالة الأرز، وإنتاج مواد ماصة زيتية تعمل كبدائل للدهون في التطبيقات الغذائية الوظيفية.

لخصت هذه الدراسة إلى ما يلي:

تحضير الإيروجيل الحيوي:

- **أولا:** غسل قشور البوملي اليدوية وتقطيعها إلى قطع (2–3 سم)، ثم تجفيفها في الفرن عند 70 C ° لمدة 72 ساعة، وطحنها ونخلها للحصول على أحجام جسيمات (125 و250 ميكرومتر).
- **ثانيا:** خلط مسحوق القشور مع الماء المقطر بتركيزات مختلفة 5-10% لتكوين مستحلبات.
- **ثالثا:** معالجة المستحلبات حراريا مائيا عند 95 C ° لمدة ساعتين مع التقليب المستمر (1400 دورة في الدقيقة) لتحفيز الهلام الحراري وتحسين قدرة الامتزاز.
- **رابعا:** تجميد المستحلبات المعالجة عند - 80 °C طوال الليل.
- **أخيرا:** تطبيق التجفيف بالتجميد (Freeze-drying) عند – 80 °C لمدة 72 ساعة للحصول على قوالب الإيروجيل(Aerogel templates) .

تطبيق الإيروجيل في امتصاص الزيوت:

- **أولا:** غمر قوالب الإيروجيل في زيت نخالة الأرز لمدة 10 دقائق حتى ثبات الوزن، ثم إزالة الزيت الزائد للحصول على ماصات الزيت القائمة على الإيروجيل (ABOS).
- **ثانيا:** دراسة الخصائص الفيزيائية مثل الكثافة، المسامية، ومساحة السطح النوعية (BET).
- **ثالثا:** استخدام تقنيات التوصيف مثل SEM وCLSM لفحص البنية المجهرية، وFTIR لتتبع التغيرات في الروابط الكيميائية خلال مراحل التصنيع والامتزاز.
- **أخيرا:** إجراء محاكاة للمعالجة الفموية (In-vitro oral processing) من خلال خلط المادة مع لعاب اصطناعي ودراسة الخصائص الاحتكاكية (Tribology) واللزوجة لتقييم الملمس الفموي.

نتائج الدراسة:

- أظهر الإيروجيل بنية مسامية عالية (90.54% إلى 96.51%)، حيث تميزت التركيزات المنخفضة (5-7%) بقدرة فائقة على الاحتفاظ بالزيت وبنية تطغى عليها المسام المتوسطة.
- أثبت تحليلFTIR ان عملية امتصاص الزيت هي عملية فيزيائية في المقام الأول.

- أظهرت المادة بتركيزات منخفضة سلوكا احتكاكيا مشابها للهلام التقليدي، مما يجعلها مناسبة كبديل للدهون.

استنتاجات الدراسة:

تؤكد الدراسة فعالية تحويل النفايات النباتية منخفضة القيمة (قشور البوملي) إلى مواد وظيفية عالية القيمة باستخدام طرق معالجة حرارية مائية. توفر الإيروجيلات الناتجة حلا مبتكرا لإنتاج بدائل دهون غنية بالألياف ومنخفضة السعرات الحرارية، مع الحفاظ على خصائص ملمس فموي مقبولة، مما يساهم في تطوير أغذية صحية ومستدامة.

II.7. الدراسة السابعة:[7]

استنادا إلى العمل المنجز من طرف الباحثين:

V. Chung et al.

والذي جاء بعنوان:

Fabrication of Cellulose Aerogel from Waste Paper and Banana Peel for Water Treatment

تصنيع إيروجيل السليلوز من نفايات الورق وقشور الموز لمعالجة المياه

الهدف من هذه الدراسة:

تطوير مادة إيروجيل هجينة منخفضة التكلفة باستخدام نفايات الورق المكتبي والمخلفات الزراعية (قشور الموز) لتعزيز الخصائص الميكانيكية، واستخدامها في إزالة الزيوت، الأصباغ (مثل ازرق الميثيلين)، وأيونات المعادن الثقيلة (Cu^{+2}) من المياه.

لخصت هذه الدراسة إلى ما يلي:

تحضير الإيروجيل (WPBP):

أولا: تقطيع نفايات الورق المكتبي ونقعها في محلول حمض الهيدروكلوريك (HCl) بنسبة 1% لمدة 24 ساعة، ثم غسلها حتى التعادل وتجفيفها عند 60 °C.

- **ثانيا:** تجفيف القشور وطحنها، ثم تبييض المسحوق باستخدام محلول بيروكسيد الهيدروجين (H_2O_2) بنسبة 1% عند pH=11 ودرجة حرارة 50 °C لإزالة اللجنين والهيميسليلوز.
- **ثالثا:** خلط 1 غ من الورق المعالج مع 0.5 غ من قشور الموز في الماء، مع إضافة الكحول البولي فينيلي (PVA) كمادة رابطة بنسب كتلية مختلفة (1/3، 1/6، 1/12).
- **رابعا:** تقليب الخليط ثم تجميده في الثلاجة لمدة 24 ساعة.
- **أخيرا:** تطبيق عملية (Freeze-drying) عند 40 °C لمدة 48 ساعة للحصول على الإيروجيل المسامي.

تطبيق الإيروجيل في معالجة المياه:

- **أولا:** طلاء الإيروجيل بطبقة كارهة للماء باستخدام (MTMS) واختبار قدرته على امتصاص زيت المحركات وزيت الصويا.
- **ثانيا:** وضع الإيروجيل في محاليل صبغة أزرق الميثيلين وأيونات النحاس (Cu^{+2}) بتركيزات محددة وقياس كفاءة الامتزاز.
- **ثالثا:** استخدام SEM لفحص البنية المسامية، وFT-IR لتحديد الروابط الهيدروجينية والمجموعات الوظيفية، وTGA لتقييم الاستقرار الحراري.
- **رابعا:** قياس معامل "يونغ" (Young's modulus) لتقييم قوة الضغط وهيكل المادة الثلاثي الأبعاد.

نتائج الدراسة:

- تتميز الإيروجيلات المحضرة بكثافة منخفضة جدا (0.0235 – 0297.0 غ/سم³) ومسامية فائقة تصل إلى 98.37%.
- أظهرت النتائج قدرة امتصاص عالية للزيوت تتراوح بين 27.27 و32.86 غرام/غرام. وفيما يخص الملوثات المائية، حقق الإيروجيل سعة امتزاز لأيونات النحاس بلغت 85.45 ملغ/غ وسعة لصبغة ميثيلين الأزرق وصلت إلى 6.69 ملغ/غ.
- ساهمت إضافة الـ PVA وقشور الموز في تعزيز القوة الهيكلية للمادة بشكل ملحوظ مقارنة بإيروجيلات الورق النقي.

استنتاجات الدراسة:

تؤكد الدراسة نجاح تحويل النفايات الورقية والزراعية إلى مادة "خضراء" ذات قيمة مضافة عالية، حيث يعمل السليلوز كمكون أساسي بينما تعزز بروتينات وبكتين قشور الموز الهيكل البنائي، مما ينتج مادة صديقة للبيئة، فعالة، ومنخفضة التكلفة لاستخدامها في تنظيف تسربات الزيوت ومعالجة مياه الصرف الصناعي.

II.8. الدراسة الثامنة:[8]

استنادا إلى العمل المنجز من طرف الباحثين:

Giulia Gaggero et al.

والذي جاء بعنوان:

Organic Bio-Based Aerogel from Food Waste: Preparation and Hydrophobization

تحضير هلام هوائي عضوي حيوي من نفايات الطعام ومعالجته بمواد كارهة للماء.

الهدف من هذه الدراسة:

تحضير وتوصيف أنواع جديدة من الهلام الهوائي (Aerogels) العضوي من نفايات الطعام (تفل القهوة وبقايا التفاح المعصور)، وتعديل خصائصها لتصبح كارهة للماء لتعزيز استقرارها في الأوساط المائية.

لخصت هذه الدراسة إلى ما يلي:

تحضير الهلام الهوائي(Aerogel):

- **أولا:** جمع المواد الخام (تفل القهوة وبقايا التفاح) من مصادر محلية، وشطف مسحوق القهوة بالماء الساخن، وإزالة البذور من بقايا التفاح.
- **ثانيا:** إجراء عملية "تبادل المذيبات" بغمر العينات في خليط من الإيثانول والماء بتركيزات متزايدة (60%، 90%، إلى غاية 100%).

- **أخيرا:** تطبيق عملية التجفيف فوق الحرج باستخدام ثاني أكسيد الكربون (CO_2) للحصول على الهلام الهوائي في صورته النهائية.

تعديل السطح:

- الطريقة الأولى (المرحلة السائلة LPM): غمر العينات قبل تجفيفها في محلول من مادة MTMS بتركيز 5% في الإيثانول لمدة 3 ساعات عند درجة حرارة 60 درجة مئوية.
- الطريقة الثانية (المرحلة الغازية GPM): وضع الهلام الهوائي الجاف في وعاء مغلق مع مادة MTMS والماء المقطر، ووضعه في فرن عند درجة حرارة 80 °C لمدة 5 ساعات (لترسيب البخار الكيميائي).

القياسات والتحاليل:

- **أولا:** دراسة البنية المجهرية باستخدام المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) لقياس حجم المسام والشكل العام.
- **ثانيا:** قياس الكثافة الظاهرية، ومساحة السطح النوعية (BET)، ودرجة امتصاص بخار الماء عند رطوبة 80%.
- **ثالثا:** قياس زاوية التلامس (Contact Angle) لتحديد مدى قدرة المادة على طرد الماء.
- **أخيرا:** تحليل الاستقرار الحراري TGA والتركيب الكيميائي FTIR للتأكد من ارتباط المواد المعدلة بسطح الهلام.

نتائج الدراسة:

- أظهر الهلام الهوائي من القهوة بنية "قرص النحل" المتماسكة، بينما بدا هلام التفاح كرقائق عشوائية.
- لم تنجح المعالجة في المرحلة السائلة (LPM) في منح خصائص كارهة للماء بشكل فعال؛ في المقابل، نجحت المعالجة بالمرحلة الغازية (GPM) بشكل كبير مع هلام التفاح، حيث زادت زاوية التلامس إلى 100 درجة مئوية، مما منحه قدرة عالية على طرد الماء والحفاظ على هيكله من الانهيار.

استنتاجات الدراسة:

يمكن تحويل نفايات الطعام إلى مواد مسامية ذات قيمة مضافة عالية؛ حيث يؤثر نوع المادة الخام وطريقة التعديل الكيميائي بشكل حاسم على خصائص المنتج النهائي، بينما تعتبر المعالجة بالطور الغازي أكثر فاعلية لتحسين مقاومة الماء في الهلام الهوائي المشتق من بقايا التفاح مقارنة بتفل القهوة.

9.II. الدراسة التاسعة: [9]

استنادا إلى العمل المنجز من طرف الباحثين:

Kim H. Ho et al.

والذي جاء بعنوان:

Green Fabrication of Bio-based Aerogels from Coconut Coir for Heat Insulation and Oil Removal

تصنيع أخضر للهلام الهوائي (الإيروجيل) الحيوي من ألياف جوز الهند للعزل الحراري وإزالة الزيوت.

الهدف من هذه الدراسة:

تطوير طريقة تصنيع سريعة وصديقة للبيئة لإنتاج ايروجيل من ألياف جوز الهند (CF) باستخدام روابط قابلة للتحلل الحيوي، واستخدامه كعازل حراري ومادة ماصة للزيوت.

لخصت هذه الدراسة إلى ما يلي:

تحضير ومعالجة ألياف جوز الهند(CF):

- **أولا:** غسل ألياف جوز الهند الخام وطحنها لتصل إلى أبعاد أولية (قطر 125 ميكرومتر وطول 5 ملم).
- **ثانيا:** إزالة اللجنين باستخدام محلول هيدروكسيد الصوديوم (NaOH) بنسبة 6% عند درجة حرارة 90 C ° لمدة 4 ساعات مع التحريك المستمر.
- **ثالثا:** غسل اللب الناتج بالماء المقطر لإزالة المنتجات الثانوية ثم تجفيفه عند 80 °C.

- **أخيرا:** طحن اللب الجاف مرة أخرى للحصول على ألياف دقيقة (قطر 50-125 ميكرومتر وطول 1ملم) لتكون مادة أولية للتصنيع.

تصنيع الهلام الهوائي (الأيروجيل):

- **أولا:** تشتيت الألياف المعالجة بتركيزات مختلفة(1 ، 2، 3 wt%) في محلول رابط يحتوي على كحول البولي فينيل (PVA) وصمغ الزانثان (XTG) لمدة ساعة عند 30 °C.
- **ثانيا:** استخدام الموجات فوق الصوتية لمدة 30 دقيقة للمجانسة وإزالة الهواء، ثم الحضانة عند 70 ° C لمدة ساعتين لتعزيز الروابط الهيدروجينية.
- **ثالثا:** تجميد الخليط ببطء عند – 5 °C لمدة 24 ساعة، ثم استخدام التجفيف بالتجميد (Freeze - drying) لإزالة الماء وتكوين بنية مسامية.
- **أخيرا:** تعديل سطح الإيروجيل كيميائيا باستخدام مادة MTMS في فرن عند 70 ° C لمدة 5 ساعات لجعله كارها للماء ومحبا للزيت.

قياس الخصائص الفيزيائية والميكانيكية:

- **أولا:** قياس الكثافة والمسامية، حيث أظهرت النتائج مسامية عالية جدا تتراوح بين 96.30% و97.76%.
- **ثانيا:** اختبار الضغط باستخدام جهاز (Instron 5500) لتقييم المتانة، ووجد أن معامل "يونغ" يزداد مع زيادة محتوى الألياف(7.63-12.96 kPa) .
- **ثالثا:** قياس الموصلية الحرارية باستخدام محل (C-Therm TCi)، وسجلت قيم منخفضة جدا (0.040-0.041 واط/ (م.ك)).
- **أخيرا:** قياس زاوية تلامس الماء (WCA) لتقييم نجاح عملية التعديل السطحي، ووصلت الزاوية إلى 135°، مما يؤكد كفاءة طلاءMTMS .

نتائج الدراسة:

– أظهر الأيروجيل المطور قدرة ممتازة على امتصاص الزيوت تتراوح بين 13.29 و20.32 غ/غ، مع سرعة امتصاص عالية تصل لحالة الاتزان في أقل من 40 ثانية.

– أثبتت النتائج أن المادة تمتلك خصائص عزل حراري تضاهي المنتجات التجارية مثل الصوف الصخري والبوليسترين.

استنتاجات الدراسة:

نجحت الدراسة في ابتكار طريقة "خضراء" وسريعة لتصنيع ايروجيل من مخلفات جوز الهند، حيث اختصرت الوقت بمقدار مرتين مقارنة بالطرق التقليدية، حيث يعد هذا المنتج مادة متعددة الاستخدامات وواعدة للتطبيقات البيئية (تنظيف تسرب الزيوت) والتطبيقات الإنشائية (العزل الحراري) نظرا لانخفاض تكلفتها ومصدرها الطبيعي المستدام.

II.10. الدراسة العاشرة:[10]

استنادا إلى العمل المنجز من طرف الباحثين

J. Li et al.

والذي جاء بعنوان

Fabrication of cellulose aerogel from wheat straw with strong absorptive capacity

تصنيع هلام هوائي (ايروجيل) من سليلوز قش القمح ذو قدرة امتصاص قوية.

الهدف من هذه الدراسة:

تطوير طريقة فعالة وصديقة للبيئة لاستخراج السليلوز من نفايات قش القمح وتصنيع هلام هوائي (ايروجيل) خفيف الوزن بخصائص امتصاص عالية للزيت والأصباغ.

لخصت هذه الدراسة إلى ما يلي:

تحضير السليلوز وتصنيع الإيروجيل:

- **أولا:** جمع قش القمح، تنظيفه، طحنه وتجفيفه عند 60 °C.
- **ثانيا:** استخلاص السليلوز ومعالجته كيميائياً باستخدام بنزين/إيثانول ثم محاليل الكلوريت ($NaClO_2$) وهيدروكسيد الصوديوم (NaOH) وحمض الهيدروكلوريك (HCl) لإزالة اللجنين والهيميسليلوز.

- **ثالثا:** إذابة السليلوز النقي في محلول (NaOH/PEG) بنسب كتلية مختلفة، وتجميد الخليط عند – 15 °C، ثم إذابته مع التحريك المستمر لتشكيل هلام مائي (هيدروجيل).
- أخيرا: تجفيف الهلام الناتج بالتجميد (Freeze-drying) عند 30 °C لمدة 48 ساعة للحصول على الإيروجيل المسامي.

التعديل الكيميائي للإيروجيل:

- **أولا:** تعديل سطح الإيروجيل باستخدام مادة TMCS عبر طريقة ترسيب البخار الكيميائي لإضفاء خاصية كره الماء (Hydrophobicity).
- **ثانيا:** تعريض العينات لبخار المادة لمدة 24 ساعة في درجة حرارة الغرفة.

نتائج الدراسة:

- أظهر الإيروجيل المحضر بنية شبكية ثلاثية الأبعاد بمسامية عالية وكثافة منخفضة جدا (حوالي 40 ملغ/سم³)، ومساحة سطحية كبيرة بلغت 101 م²/غ.
- أظهرت النتائج أن الإيروجيل المعدل كيميائيا يمتلك قدرة امتصاص فائقة، حيث يمكنه امتصاص الزيوت والأصباغ) مثل رودامين B والميثيل البرتقالي (بسعة تتراوح ما بين 16.8 إلى 18.7 ضعف وزنه).

استنتاجات الدراسة:

يعد قش القمح مصدرا واعدا لإنتاج ايروجيل سليلوز عالي الجودة باستخدام نظام مذيب (NaOH/PEG) غير سام وصديق للبيئة، إن الخصائص الفيزيائية والكيميائية المتميزة لهذا الإيروجيل تجعله مرشحا مثاليا للاستخدام في معالجة مياه الصرف الصحي وتنظيف انسكابات الزيوت.

أظهرت مراجعة الدراسات السابقة أن للإيروجيل الحيوي إمكانيات واعدة كحلول مستدامة في المعالجة البيئية، نظرا لخصائصه البنيوية الفريدة كالمسامية العالية والمساحة السطحية الكبيرة؛ وتتفاوت كفاءة هذه المواد في الأداء الوظيفي، باختلاف المصدر النباتي لمادة السليلوز، وتقنيات المعالجة الكيميائية والحرارية المتبعة، وظروف التجفيف بالتجميد.

مراجع الفصل:

[1] H. V. Le *et al.*, "Bacterial Cellulose Aerogels Derived from Pineapple Peel Waste for the Adsorption of Dyes," *ACS Omega*, vol. 8, no. 37, pp. 33412–33425, Sep. 2023, doi: 10.1021/acsomega.3c03130.

[2] A. Demir and M. Kaya, "Fabrication and Characterization of Bio-Aerogel from Mandarin Peel-Based Agricultural Waste," *Fibers and Polymers*, vol. 26, no. 7, pp. 3217–3226, Jul. 2025, doi: 10.1007/s12221-025-01005-z.

[3] U. Michael-Igolima, S. J. Abbey, A. O. Ifelebuegu, R. B. Jumbo, and K. Sam, "A Novel Preparation and Application of Orange Peel Aerogel for Removal of Oil Contaminants in Soils," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 18, no. 5, Mar. 2026, doi: 10.3390/su18052388.

[4] M. Chen, X. Zhang, A. Zhang, C. Liu, and R. Sun, "Direct preparation of green and renewable aerogel materials from crude bagasse," *Cellulose*, vol. 23, no. 2, pp. 1325–1334, Apr. 2016, doi: 10.1007/s10570-015-0814-9.

[5] N. T. T. Nguyen *et al.*, "Synthesis of Cellulose Aerogels from Coir Fibers via a NaOH/Urea Method for Methylene-blue Adsorption," *Chem. Eng. Trans.*, vol. 89, pp. 565–570, 2021, doi: 10.3303/CET2189095.

[6] H. Wang, P. Wang, S. Kasapis, and T. Truong, "Aerogel-based oil sorbents derived from pomelo (Citrus grandis L.) peels as potential gel matrices for food applications: Formation, properties and in-vitro oral processing," *J. Food Eng.*, vol. 394, Jul. 2025, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2025.112532.

[7] V. N. Chung, T. S. Nguyen, K. P. Ha Huynh, and N. Do Quyen Chau, "Fabrication of Cellulose Aerogel from Waste Paper and Banana Peel for Water Treatment," *Chem. Eng. Trans.*, vol. 97, pp. 337–342, 2022, doi: 10.3303/CET2297057.

[8] G. Gaggero, R. P. Subrahmanyam, B. Schroeter, P. Gurikov, and M. Delucchi, "Organic Bio-Based Aerogel from Food Waste: Preparation and Hydrophobization," *Gels*, vol. 8, no. 11, Nov. 2022, doi: 10.3390/gels8110691.

[9] K. H. Ho, P. X. T. Nguyen, N. H. N. Do, K. A. Le, and P. K. Le, "Green Fabrication of Bio-based Aerogels from Coconut Coir for Heat Insulation and Oil Removal," *Chem. Eng. Trans.*, vol. 88, pp. 709–714, 2021, doi: 10.3303/CET2188118.

[10] J. Li, C. Wan, Y. Lu, and Q. Sun, "Fabrication of cellulose aerogel from wheat straw with strong absorptive capacity," *Front. Agric. Sci. Eng.*, vol. 1, no. 1, pp. 46–52, Feb. 2014, doi: 10.15302/J-FASE-2014004.

الجزء

العملي

الفصل الثالث:

المواد والطرق

نتطرق في هذا الفصل الى تحضير مادة حيوية عالية المسامية "الهلام الهوائي" من مخلف زراعي "قشور الفول السوداني"، توصيف العينات باستخدام تقنيات التحليل الطيفية ودراسة تأثير العينات على امتصاص صبغة ازرق الميثيلين، حيث تم إجراء الجانب العملي للموضوع في مخبر وحدة الطاقات المتجددة، ومخبر البتروكيمياء، كلية التكنولوجيا، بجامعة الشهيد حمه لخضر بالوادي.

1.III. المواد والأجهزة المستعملة

1.1.III. المواد الكيميائية:

نعرض في **الجدول (1.III)** أهم المواد الكيميائية المستعملة في العمل التجريبي.

الجدول (1.III): المواد الكيميائية المستعملة.

المواد	الصيغة الكيميائية	الكتلة المولية (g/mol)	الشركة المنتجة
الماء المقطر	H_2O	18	/
هيدروكسيد الصوديوم	NaOH	40	SARL UMIR
أزرق الميثيلين	$C_{16}H_{18}ClN_3S$	319.85	BIOCHEM Chemopharma
المستحلب Tween 80	$C_{64}H_{124}O_{26}$	1310	Merck
أكسيد الكالسيوم	CaO	56.08	/
ثاني أكسيد السيليكون (Silica)	SiO_2	60.08	Adwan Chemical Industries
قشور الفول السوداني			
قشور البيض			

2.1.III. الأجهزة:

نستعرض في **الجدول (2.III)** أهم الأجهزة المستعملة في العمل التجريبي.

الجدول (2.III): الأجهزة المستعملة.

اسم الجهاز	النوع
جهاز pH متر	JosLiki Digital PH Meter
ميزان إلكتروني حساس	OHAUS
مسخن كهربائي	AREX (Heating Magnetic Stirrer)
جهاز الأشعة تحت الحمراء (FTIR)	HERMO SCIENTIFIC NICOLET is5 BINDER/USA
مجفف كهربائي	NICOLET IS5 BINDER/USA
جهاز Freeze-drying	Freeze Dryer
جهاز طحن كهربائي	Nima Electric Grinder
جهاز الاشعة فوق البنفسجية	UV–Visible Spectrophotometer (PRO UV1200-PC, Frederiksen)

2.III. خطوات العمل [1]

1.2.III. جمع وتحضير العينة:

جمعت مخلفات قشور الفول السوداني من المنازل، حيث تم غسلها بالماء المقطر لإزالة الشوائب، ثم وضعت في فرن هوائي ساخن لتجفيفها عند درجة حرارة 105 °C، ثم طحنت القشور المجففة بواسطة جهاز طحن كهربائي، وثم غربلتها، ومن ثم الحصول على مسحوق ناعم، كما هو موضح في **الشكل (1.III)**، وحفضها الى حين وقت الاستعمال.

الشكل (1.III): تحضير مسحوق قشور الفول السوداني.

2.2.III. مرحلة المعالجة الكيميائية:

تم تحضير 500 مل من محلول هيدروكسيد الصوديوم بتركيز 4%، تمت إضافة 25غ من مسحوق قشور الفول السوداني كما هو موضح في **الشكل (2.III)**، مع التحريك المستمر عند درجة حرارة C ° 45 لمدة 5 ساعات لإزالة المكونات غير السليلوزية مثل: اللجنين والهيميسليلوز، بعدها يتم الترشيح والغسل المتكرر للعينة بالماء المقطر الى غاية الوصول الى pH=7، **الشكل (3.III)** يبين مراحل التحضير والمعالجة.

الشكل (2.III) :المرحلة المعالجة الأولية.

الشكل (3.III) : مرحلة غسل وتنظيف العينة.

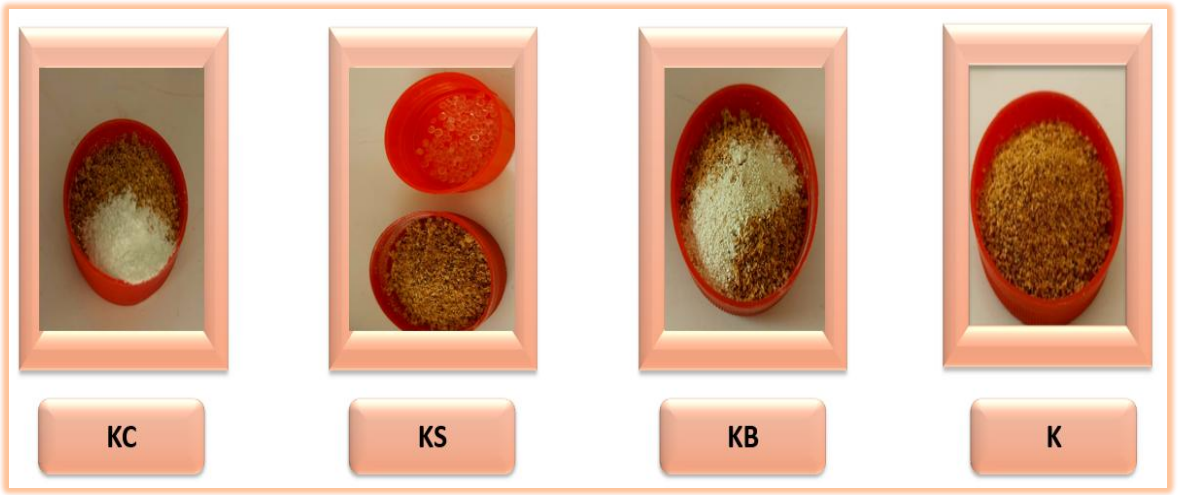
بعد عملية ترشيح العينة، تجفف عند C °50 لمدة 24 ساعة كما في **الشكل (4.III)**.

الشكل (4.III): تجفيف العينة المعالجة.

3.2.III. مرحلة تحضير الهلام:

من أجل تقييم وتحسين الأداء البنيوي والوظيفي للهلام الهوائي النهائي، تم اعتماد منهجية تجريبية قائمة على تقسيم المادة المحضرة إلى أربع عينات مختلفة كما هو موضح في **الشكل (5.III)**؛ تم تدعيم العينات الثلاث الأخرى بمواد مختلفة بهدف دراسة تأثيرها على خصائص الهلام الهوائي؛ حيث تمثل:

- **العينة الأولى (K)** : 2غ من العينة المعالجة (نموذج مرجعي).
- **العينة الثانية (KB)** : 2غ من العينة المعالجة + 0.5غ من مسحوق قشور البيض.
- **العينة الثالثة (KS)** : 2غ من العينة المعالجة + 0.5غ من Silica .
- **العينة الرابعة (KC)** : 2غ من العينة المعالجة + 0.5غ من CaO .



الشكل (5.III): العينات المدروسة.

لتحسين البنية المسامية وزيادة المساحة السطحية النوعية، يخلط 15 مل ماء مقطر مع 3 مل من المستحلب Tween 80، والذي يعتبر مادة محفزة للمسامية، وهو ما يتوقع أن ينعكس إيجابا على كفاءة الامتصاص وتحسين الأداء في التطبيقات البيئية، خاصة في معالجة المياه وامتصاص الملوثات.

يتم إضافة الخليط لكل العينات مع التحريك المستمر لمدة نصف ساعة عند درجة حرارة الغرفة، حيث يوضح **الشكل (6.III)** مراحل تحضير الهلام الحيوي.

الشكل (6.III): تعزيز البنية وتحفيز الهلام.

يتم وضع العينات في قوالب وتغلف لتوضع في الثلاجة للتجميد كما هو موضح في **الشكل (7.III)**.

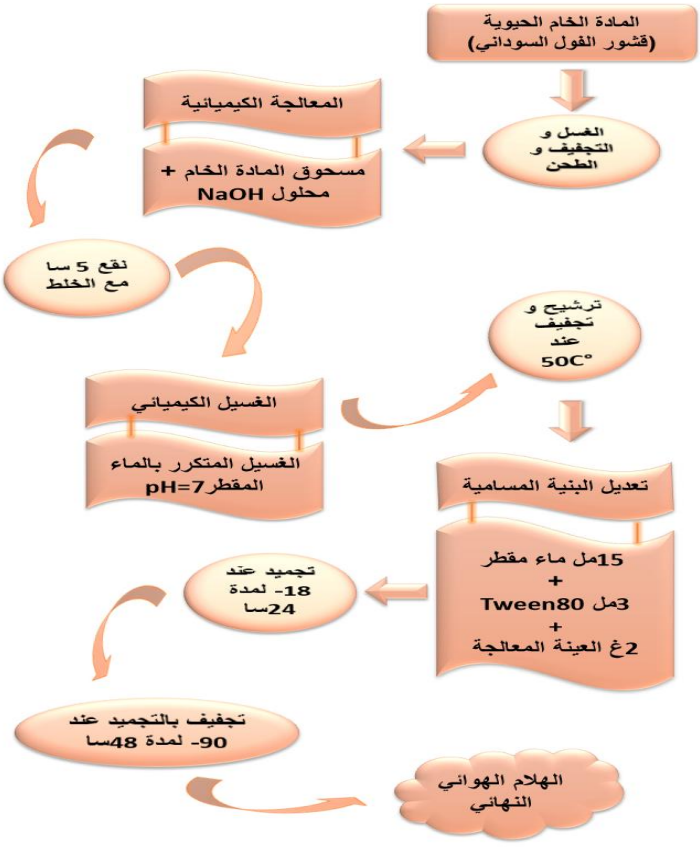
الشكل (7.III): الهلام الحيوي.

4.2.III. المرحلة النهائية لانتاج الهلام الهوائي:

يتم تجميد القوالب عند درجة حرارة 18- °C لمدة 24 ساعة، ثم تجفيفه بالتجميد عند درجة حرارة 90- °C في جهاز Freeze-drying لمد 48 ساعة، يلخص **الشكل (8.III)** هذه المراحل.

الشكل (8.III): مرحلة التجميد والتجفيف بالتجميد لعينات الهلام الحيوي الهوائي.

الشكل **(9.III)** يلخص مراحل انتاج الهلام الهوائي.



الشكل (9.III): مخطط يوضح مراحل انتاج الهلام الهوائي.

III.3. توصيف الهلام الهوائي بواسطة التحليل الطيفي للأشعة تحت الحمراء (FTIR)

تم توصيف الهلام الهوائي باستعمال تقنية الأشعة تحت الحمراء، والتي تعد أهم الأدوات التحليلية لفهم البنية الكيميائية والمجموعات الوظيفية السطحية للمواد الهلامية الهوائية (Aerogels)[2]، وهي من أهم الطرق الطيفية، ذات فائدة كبيرة لتوصيف المركبات، حيث تعتبر تقنية متعددة الاستخدامات وغير متلفة تقوم بتحليل العينات في جميع الحالات الفيزيائية، ومن خلال مطيافية الأشعة تحت الحمراء، يمكن استخلاص استنتاجات دقيقة حول الطبيعة الكيميائية والمجموعات الوظيفية المكونة للمادة [3].

استخدم التحليل FTIR للتحقق من البنية الكيميائية للهلام الهوائي المحضر، وكذلك للكشف عن المجموعات الوظيفية المتواجدة به، إضافة الى ذلك دراسة تأثير الإضافات المختلفة على التركيبة الكيميائية بالمسبة لعينة النموذج المرجعي.

كما يوضح **الجدول (3.III)** المجالات لأهم المجموعات الوظيفية للهلام الهوائي[4].

الجدول (3.III): المجالات المميزة لأهم المجموعات الوظيفية للهلام الهوائي.

الرابطة	المجموعة الوظيفية	العدد الموجي (cm^{-1})
O-H	Hydroxyl	3479.2889
C-H	Alkanes	3479.2889
C-O	Ether	1095
N-H	Amine	1101.3468
C=O	Carbonyl	1750.1600

III.4. الدراسة التجريبية لإزالة صبغة أزرق الميثيلين (MB)

تم تقييم كفاءة العينات الأربعة للهلام الهوائي المحضر وذلك بإزالة صبغة أزرق الميثيلين من محلول مائي، وذلك بدراسة تأثير الزمن على عملية الازالة.

تم تحضير محلول ازرق الميثيلين بتركيز 6×10^{-5} مولاري كما هو موضح في **الشكل (10.III)**، حيث أخذ 10 مل من محلول الصبغة مع إضافة كتلة ثابتة من مختلف عينات الهلام الهوائي قدرت بحوالي 0.015غ لكل تجربة.

أجريت الدراسة بدلالة الزمن حيث تم اختيار أزمنة تماس مختلفة، كما يلي:

(0، 10، 25، 40، 55، 70، 85 ، 100، 120) دقيقة.

وضعت العينات تحت أشعة الشمس من أجل دراسة إزالة الصبغة بدلالة الزمن.

عند انتهاء كل فترة زمنية، تم إيقاف التفاعل بعزل العينات وتغطيتها مباشرة بورق الألمنيوم لتجنب استمرار التأثير الضوئي.

لتتبع حركية تفاعل الامتصاص الكيميائي الضوئي لصبغة أزرق الميثيلين، عرض خليط التفاعل لكل مدة زمنية لقياس الامتصاصية باستخدام مطيافية الأشعة فوق البنفسجية والمرئية (UV-vis) عند طول موجي قدره $\lambda_{max} = 663$ وذلك لمراقبة تضاؤل شدة اللون الأزرق وتحديد كفاءة الاختزال[5].

الشكل (10.III): تجربة امتصاص ازرق الميثيلين بالهلام الهوائي.

5.III. التحليل الضوئي لإمتصاص صبغة ازرق الميثيلين (BM)

أظهرت عملية التحفيز الضوئي باستخدام الهلام الهوائي (Aerogel) المحضر، كفاءة العالية في امتصاص الصبغات السامة مثل (MB)، وفي تفكيكها أيضا. وتعد هذه التقنية صديقة للبيئة كونها تحاكي الطبيعة؛ حيث يحفز ضوء الشمس توليد جذور حرة وأنواع أكسجين تفاعلية قادرة على تحطيم الروابط الكيميائية للصبغة. ونتيجة لذلك، تؤدي هذه العملية إلى التمعدن الكامل (Mineralization) للصبغات وتحويلها إلى جزيئات بسيطة وآمنة، مما يجعلها حلا فعالا ومستداما لمعالجة المياه[6].

بهدف تقدير القدرة الاستيعابية للامتصاص، جرى تتبع التباين في تركيز صبغة MB من خلال قياس الفارق بين التركيز الأولي للمحلول المائي والتراكيز المتبقية بعد الخضوع لعملية التحلل الضوئي باستخدام العلاقة [7]:

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{m} \dots\dots (1)$$

q_e : سعة الامتصاص عند التوازن (مغ/غ).

C_0 : التركيز الابتدائي (مغ/ل).

C_e : التركيز عند التوازن (مغ/ل).

V : حجم المحلول (ل).

m : كتلة المادة الماصة (غ).

جرت مراقبة تطور تفاعل الاختزال كيميائيا بواسطة مطيافية UV-Vis الموضحة في **الشكل (11.III)** حيث يؤدي دمج الهلام الهوائي في المحلول إلى تحفيز عملية اختزال الصبغة ضوئيا، ولتقييم كفاءة الازالة للمادة المحفزة، استخدمت المعادلة (2) لتعيين كفاءة التحلل الضوئي مئويا (%) [8] :

$$\text{Degradation ratio (\%)} = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} \times 100 \dots\dots (2)$$

C_0 : التركيز الابتدائي (مغ/ل).

C_t : التركيز عند زمن t (مغ/ل).

الشكل (11.III): جهاز مطيافية UV-vis.

تشكل بروتوكولات تحضير الهلام الهوائي وآليات التوصيف المعتمدة، الركيزة التجريبية الأساسية لضمان دقة العمل وموثوقيته، وتؤسس هذه المنهجية منطلق موضوعي للانتقال نحو الفصل الموالي، والذي سيخصص لعرض وتحليل النتائج المستخلصة، ومناقشة الكفاءة التطبيقية للمواد الحيوية عالية المسامية.

مراجع الفصل:

[1] A. Demir and M. Kaya, “Fabrication and Characterization of Bio-Aerogel from Mandarin Peel-Based Agricultural Waste,” Fibers and Polymers, vol. 26, no. 7, pp. 3217–3226, Jul. 2025, doi: 10.1007/s12221-025-01005-z.

[2] Q. Chen, H. Wang, and L. Sun, “Preparation and characterization of silica aerogel microspheres,” Materials, vol. 10, no. 4, Apr. 2017, doi: 10.3390/ma10040435.

[3] J. A. Lopes and C. Sousa, “Hyperspectral Analysis for Plant Characterization and Discrimination,” in Comprehensive Analytical Chemistry, vol. 80, Elsevier B.V., 2018, pp. 281–289. doi: 10.1016/bs.coac.2018.03.013.

[4] S. Al Husain, L. Febrian, M. Ismail, S. A. Putri, M. F. Al Baihaqi, and W. Ramadhan, “Synthesis of Sustainable Dual-Function Aerogels from Water Hyacinth Cellulose and Shrimp Shell Nano-Chitosan for Heavy Metal Removal and Coliform Bacteria Filtration in Polluted Water,” in BIO Web of Conferences, EDP Sciences, Jan. 2025. doi: 10.1051/bioconf/202414701009.

[5] X. Chen, Z. Wu, D. Liu, and Z. Gao, “Preparation of ZnO Photocatalyst for the Efficient and Rapid Photocatalytic Degradation of Azo Dyes,” Nanoscale Res. Lett., vol. 12, no. 1, Dec. 2017, doi: 10.1186/s11671-017-1904-4.

[6] V. Navakoteswara Rao et al., “Synergistic integration of MXene nanosheets with CdS@TiO2 core@shell S-scheme photocatalyst for augmented hydrogen generation,” Chemical Engineering Journal, vol. 471, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.cej.2023.144490.

[7] S. Khedri, E. Sadeghi, M. Rouhi, Z. Delshadian, A. M. Mortazavian, J. de Toledo Guimarães, et al., "Bioactive edible films: Development and characterization of gelatin edible films incorporated with casein phosphopeptides," Lwt, vol. 138, p. 110649, 2021.

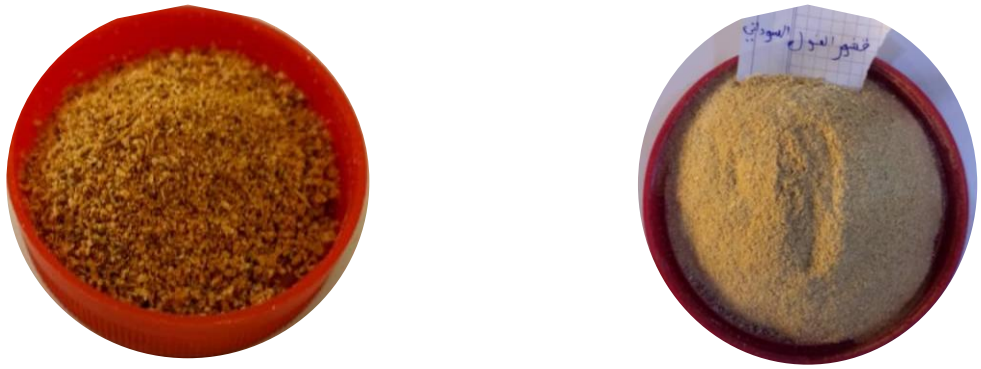
[8] G. V. Sree and P. Nagaraaj, "Enhancement of PVA packaging properties using calcined eggshell waste as filler and nanonutrient," Materials Chemistry and Physics, vol. 291, p.2022 ,126611 .

الفصل الرابع:

النتائج والمناقشة

1.IV. المادة الأولية:

يظهر **الشكل (1.IV)** مسحوق قشور الفول السوداني قبل المعالجة (K_1) وبعد المعالجة (K).



قبل المعالجة (K_1) بعد المعالجة (K)

الشكل (1.IV): مسحوق قشور الفول السوداني قبل المعالجة (K_1) وبعد المعالجة (K).

2.IV. المادة الأولية بعد المعالجة:

يوضح **الجدول (1.IV)** مردود معالجة المواد الأساسية بمحلول هيدروكسيد الصوديوم.

الجدول (1.IV): مردود معالجة المواد الأساسية.

المادة	الكتلة الابتدائية (غ)	الكتلة النهائية (غ)	المردود (%)
الكاوكاو	25	13.52	54.08

أدت المعالجة القلوية لقشور الفول السوداني باستخدام هيدروكسيد الصوديوم (NaOH) إلى خفض كتلة الكتلة الحيوية من 25 غراما إلى 13.52 غراما، أي بنسبة استخلاص بلغت 54.08%، يرجع هذا الانخفاض إلى إذابة وإزالة المكونات غير السليلوزية، مثل: الهيميسليلوز واللجنين والشموع والبكتين، وغيرها من المواد المستخلصة الموجودة طبيعيا في مصفوفة اللجنين السليلوزية لقشور الفول السوداني، حيث يعمل NaOH على كسر روابط الإستر والإيثر التي تربط اللجنين والهيميسليلوز بألياف السليلوز، مما يؤدي إلى إزالة جزئية للجنين وإذابة الهيميسليلوز، وقد أشارت دراسات حديثة إلى نتائج مماثلة، حيث أدت المعالجة القلوية إلى تغيير ملحوظ في البنية الصلبة للكتلة الحيوية لقشور الفول السوداني، وتحسين خصائصها الفيزيائية والكيميائية لتطبيقات الامتزاز [1].

تشير نسبة المردود المحققة إلى أن التركيز القلوي المستخدم كان فعالا بما يكفي لإزالة جزء كبير من المركبات غير المتبلورة مع الحفاظ على البنية الليفية الغنية بالسليلوز. ووفقا ليانغ وآخرون (2023)[2]، فإن المعالجة القلوية لقشور الفول السوداني عززت وفرة المجموعات الوظيفية المحتوية على الأكسجين وحفزت نمو المسام.

علاوة على ذلك، من المعروف أن المعالجة القلوية تزيد من انكشاف مجموعات الهيدروكسيل في السليلوز عن طريق إزالة طبقات اللجنين المحيطة بألياف السليلوز الدقيقة، حيث تحسن هذه العملية خاصية الاسترطاب وتعزز التفاعل بين سطح المادة الماصة والملوثات المائية مثل: صبغة أزرق الميثيلين، وقد لوحظ تأثير مماثل في الفحم الحيوي المصنوع من قشور الجوز والمعالج مسبقا بالقلويات، حيث زادت المعالجة بهيدروكسيد الصوديوم من خاصية الاسترطاب لسطح المسام وكفاءة الامتصاص[3].

أظهرت الدراسات الحديثة أن المعالجة القلوية للمواد المشتقة من قشور الفول السوداني تحسن قدرات الامتزاز نتيجة لتكوين بنى مسامية ومجموعات وظيفية نشطة، وقد أظهرت أنواع الكربون المنشط المحضرة من قشور الفول السوداني كفاءة امتزاز عالية جدا للأصباغ، لأن المعالجة الكيميائية زادت من مساحة السطح وحجم المسام[4]. وبناء على ذلك، تتوافق نتائج الدراسة مع ما ورد في الدراسات السابقة، وتؤكد أن المعالجة بمحلول هيدروكسيد الصوديوم تحسن بشكل فعال الخصائص البنيوية والامتزازية لكتلة قشور الفول السوداني الحيوية، مع الحفاظ على إنتاجية مقبولة للمادة.

بالإضافة إلى ذلك، تشير نسبة المردود إلى الحفاظ النسبي على السليلوز بعد المعالجة، وهو عامل مهم في تصنيع مواد هلامية حيوية مستقرة ومواد مسامية. وقد أشارت الدراسات التي أجريت على المواد الماصة الحيوية من اللجنين السليلوزي إلى أن التركيزات القلوية المعتدلة هي الأفضل، لأن الظروف القلوية الشديدة قد تؤدي إلى تفكك السليلوز وتدهور الكتلة الحيوية بشكل مفرط[5].

3.IV. مطيافية الأشعة تحت الحمراء لقشور الفول السوداني (الكاوكاو)

1.3.IV. المادة الأولية قبل وبعد المعالجة:

يظهر الشكل (2.IV) التحليل الطيفي FTIR لعينات قشور الفول السوداني قبل (K_1) وبعد المعالجة القلوية (K) تعديلات هيكلية وكيميائية ملحوظة في المصفوفة الليغنوسليلوزية. في العينة غير المعالجة K_1، يرجع نطاق الامتصاص العريض الملاحظ حول 3200–3500 سم$^{-1}$ إلى اهتزاز التمدد لمجموعات الهيدروكسيل (-OH) المرتبطة بالسليلوز والهيميسليلوز واللجنين وجزيئات الماء الممتصة.

بعد المعالجة القلوية K، أصبح هذا النطاق أقل كثافة وطرأت عليه تعديلات طفيفة، مما يشير إلى تغيرات في الروابط الهيدروجينية نتيجة للإزالة الجزئية لأجزاء الهيميسليلوز واللجنين، حيث أثبتت الدراسة[6] أن المعالجة القلوية تغير شبكة الروابط الهيدروجينية للكتلة الحيوية الزراعية عن طريق كشف ألياف السليلوز وتقليل المكونات غير المتبلورة.

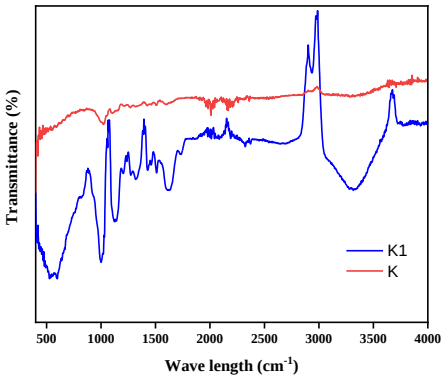
تفسر القمم الواقعة قرب 2850–2920 سم$^{-1}$ في العينة غير المعالجة إلى اهتزازات تمدد الرابطة C-H للمجموعات الأليفاتية الموجودة في اللجنين والهيميسليلوز، حيث يؤكد انخفاض شدة هذه الحزم بعد المعالجة تحلل وانحلال المركبات غير السليلوزية أثناء التحلل المائي القلوي، ووفقا لدراسات حديثة على المواد الليغنوسليلوزية المعدلة قلويا، يزيل NaOH بفعالية الشموع والزيوت والبنى الأليفاتية المرتبطة باللجنين، مما يؤدي إلى انخفاض حزم امتصاص الرابطة C-H وزيادة انكشاف السليلوز[7].

في منطقة البصمة الطيفية، يظهر طيف K_1 حزما شديدة الكثافة حول 1600–1730 سم$^{-1}$، والتي تعود عموما إلى اهتزازات تمدد الرابطة C=O لمجموعات الأسيتيل وإستر اليورونيك من الهيميسليلوز، بالإضافة إلى اهتزازات الهيكل العطري للجنين. بعد المعالجة القلوية، انخفضت هذه القمم بشكل ملحوظ أو اختفت في طيف K، مما يشير إلى انكسار روابط الإستر وإزالة اللجنين جزئيا من بنية قشرة الفول السوداني، تتوافق هذه النتيجة مع النتائج التي وردت في الدراسة[8]، حيث لوحظ اختفاء القمم المرتبطة بالكربونيل واللجنين بعد المعالجة بهيدروكسيد الصوديوم نتيجةً لإذابة الهيميسليلوز وإزالة اللجنين.

علاوة على ذلك، ترتبط نطاقات الامتصاص المرصودة بين 1000 و1200 سم$^{-1}$ باهتزازات روابط C–O وC–O–C و β–جليكوسيدية، وهي خصائص مميزة للسليلوز والسكريات المتعددة، يشير استمرار هذه القمم بعد المعالجة إلى أن هيكل السليلوز ظل مستقرا نسبيا رغم التعديل القلوي، كما يدل ازدياد حدة بعض النطاقات المرتبطة بالسليلوز في العينة المعالجة على زيادة نقاء السليلوز وبلوريته بعد إزالة مكونات الهيميسليلوز غير المتبلورة واللجنين، وقد وصف سلوك مشابه في طيف FTIR في دراسات حديثة أجريت على قشور الفول السوداني المعالجة قلويا ومخلفات زراعية أخرى مخصصة لإنتاج المواد الماصة والهيدروجيل[9].

تظهر أطياف FTIR بوضوح أن المعالجة القلوية بـ NaOH أحدثت تغييرات كيميائية كبيرة في الكتلة الحيوية لقشور الفول السوداني، وذلك بإزالة الهيميسليلوز واللجنين والمواد المستخلصة مع الحفاظ

على البنية الغنية بالسليلوز، تعد هذه التعديلات الهيكلية مفيدة للغاية لتحسين المسامية، والتفاعل السطحي، وأداء الامتزاز، لا سيما للتطبيقات البيئية مثل: إزالة الصبغة وتصنيع الهلام.



الشكل (2.IV): أطياف FTIR للفول السوداني قبل وبعد المعالجة.

2.3.IV. الهلام الحيوي الهوائي:

بعد تحضير الهلام الحيوي انطلاقا من قشور الفول السوداني (K)، هلام حيوي من قشور الفول السوداني مدعم بقشور البيض (Kb)، هلام مدعم أكسيد الكالسيوم (Kc)، وهلام مدعم بالسيليكا (Ks)، حيث يمثل **الشكل (3.IV)** صور مختلف الهلاميات الحيوية الهوائية المحضرة.

الفول السوداني (K)

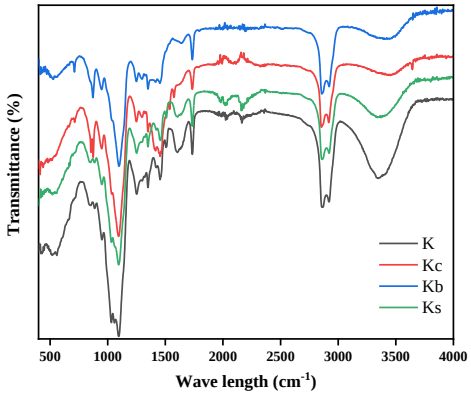
الفول السوداني – قشور البيض (Kb)

الفول السوداني – اكسيد الكالسيوم (Kc)

الفول السوداني – سيليكا (Ks)

الشكل (3.IV): مختلف الهلاميات الحيوية الهوائية المحضرة.

يكشف الشكل (4.IV) أطياف FTIR للهلاميات الحيوية المحضرة بوضوح نجاح دمج عوامل التقوية المختلفة في مصفوفة قشرة الفول السوداني، وتكشف عن تعديلات هيكلية ملحوظة في المجموعات الوظيفية للمواد، حيث يلعب توين 80، وهو مستحلب غير أيوني غني بمجموعات الهيدروكسيل والإستر الوظيفية، دورا حاسما في تثبيت الشبكة البوليمرية أثناء تكوين الهلام وتجفيفه.



الشكل (4.IV): أطياف FTIR للهلام الحيوي المحضر.

تعزى نطاقات الامتصاص العريضة الملاحظة حول 3200–3500 سم$^{-1}$ في جميع العينات بشكل رئيسي إلى اهتزازات تمدد الرابطة O-H الناتجة عن السليلوز والهيميسليلوز والماء الممتص ومجموعات الهيدروكسيل الموجودة في توين 80، حيث تشير الزيادة في عرض وشدة هذه النطاقات مقارنة بالكتلة الحيوية غير المعالجة إلى تعزيز تفاعلات الروابط الهيدروجينية بين جزيئات المستحلب والمصفوفة الليغنوسليلوزية، لوحظت نتائج مماثلة في الهلاميات الهوائية القائمة على عديدات السكاريد والمعدلة بمواد فعالة سطحية، حيث عزز توين 80 التفاعلات بين الجزيئات وحسن التجانس البنيوي[10]. تتوافق القمم المكتشفة بالقرب من 2850–2920 سم$^{-1}$ مع اهتزازات تمدد الرابطة C-H الأليفاتية، ويرتبط هذا الارتفاع بسلاسل الهيدروكربون الطويلة للمادة الفعالة السطحية الممتصة على سطح الهلام الحيوي، حيث ساهم توين 80 في تعديل التركيب الكيميائي للسطح، تشير الاختلافات الملحوظة بين العينات K وKb وKc وKs إلى أن اضافة المستحلب (توين 80) سهلت التفاعل بين البوليمرات الحيوية لقشرة الفول السوداني والمواد المضافة غير العضوية المقوية.

في حالة الهلام الحيوي الهوائي Kb، ظهرت تعديلات طيفية ملحوظة، خاصة حول 1400–1500 سم$^{-1}$ وأقل من 900 سم$^{-1}$، ترتبط هذه الحزم بمجموعات الكربونات (CO_3^{-2}) المشتقة من كربونات الكالسيوم، المكون المعدني الرئيسي لقشر البيض. حيث أشارت الدراسة[11] عن قمم امتصاص مماثلة

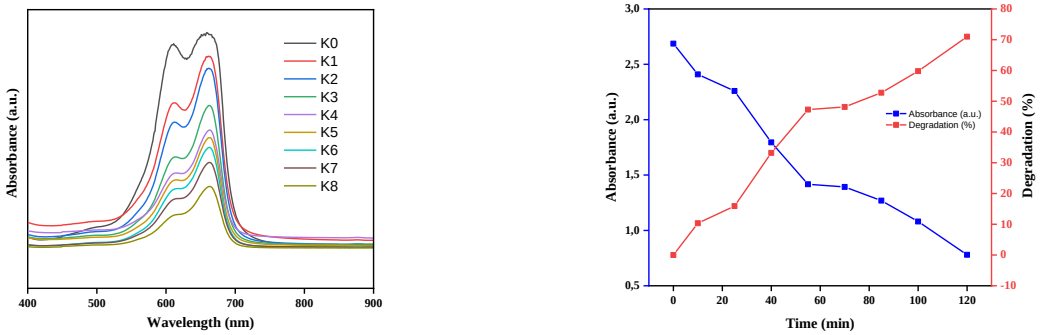
للكربونات قرب 875 سم$^{-1}$ و1420 سم$^{-1}$ في أنظمة البوليمرات الحيوية المدعمة بكربونات الكالسيوم. بالإضافة إلى ذلك، يشير الانخفاض الطفيف في شدة حزمة الهيدروكسيل إلى وجود تفاعلات بين أيونات الكالسيوم ومجموعات الهيدروكسيل في السليلوز، مما قد يعزز الروابط بين الجزيئات ويحسن الاستقرار الميكانيكي لشبكة الهلام الهوائي. كما أظهر طيف Kc تعديلات ملحوظة مقارنة بالهلام الهوائي غير المعالج، وقد يشير انخفاض شدة قمة اللجنين السليلوزي وزيادة شدة الحزم حول 3400 سم$^{-1}$ و1630 سم$^{-1}$ إلى تكون أنواع هيدروكسيد الكالسيوم بعد ترطيب أكسيد الكالسيوم. علاوة على ذلك، من المحتمل أن تكون التفاعلات بين أيونات الكالسيوم (Ca^{+}) والمجموعات الوظيفية المحتوية على الأكسجين قد عززت الترابط الأيوني داخل بنية الهلام الهوائي، لاحظ باحثون نتائج مماثلة في هيدروجيلات السليلوز المعدلة بالكالسيوم، حيث حسنت إضافات الكالسيوم الصلابة الهيكلية وأداء الامتزاز من خلال تعزيز التفاعلات بين الجزيئات[12]. في الهلام الهوائي Ks، ظهرت اهتزازات التمدد المميزة لروابط Si–O–Si وSi–O بين 1000 و1100 سم$^{-1}$، مما يؤكد نجاح دمج جزيئات السيليكا في مصفوفة قشرة الفول السوداني، قد ينتج اتساع هذه المنطقة وزيادة شدتها مقارنة بالهلام الهوائي النقي K عن تداخل اهتزازات C–O في السليلوز مع روابط السيلوكسان. ترجع الحزم الضعيفة حول 800 سم$^{-1}$ إلى اهتزازات التمدد المتناظرة لـ Si–O–Si، وصف سلوك مشابه في طيف FTIR في الهلامات الهوائية الحيوية المعدلة بالسيليكا التي طورها تشين وآخرون (2023)، حيث حسن دمج السيليكا الاستقرار الحراري وتجانس المسام والسلامة الهيكلية من خلال تكوين شبكات هجينة عضوية–غير عضوية[13].

يؤكد تحليل FTIR أن جميع عوامل التقوية تفاعلت بنجاح مع مصفوفة الهلام الهوائي المصنع من قشور الفول السوداني عبر الروابط الهيدروجينية، والتفاعلات الأيونية، أو تكوين شبكة غير عضوية، تشير التغيرات الطيفية الملحوظة إلى إعادة هيكلة جزئية للمصفوفة الليغنوسليلوزية وتكوين مواقع نشطة إضافية، مما قد يعزز المسامية، والمقاومة الميكانيكية، والاستقرار الحراري، وكفاءة امتصاص الهلاميات الهوائية الحيوية المحضرة.

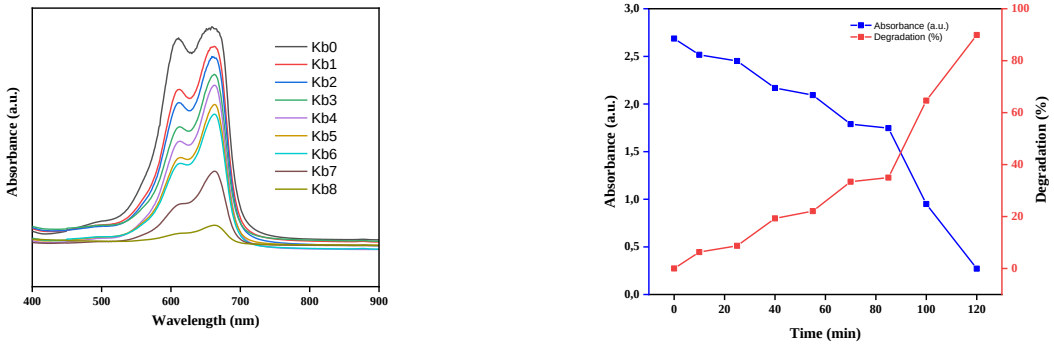
4.IV. إزالة صبغة أزرق الميثيلين

تظهر الأشكال (8.7.6.5.IV) نتائج امتزاز صبغة الميثيلين الأزرق (MB) باستخدام الهلاميات الحيوية الهوائية المحضرة (K، Kb، Kc، Ks) بوضوح أن كفاءة الإزالة تزداد تدريجيا مع زمن التلامس، بينما تنخفض قيم الامتصاص في الوقت نفسه، يؤكد هذا السلوك الامتزاز التدريجي لجزيئات الصبغة على سطح الهلاميات الحيوية الهوائية حتى الوصول إلى حالة التوازن، يشير انخفاض

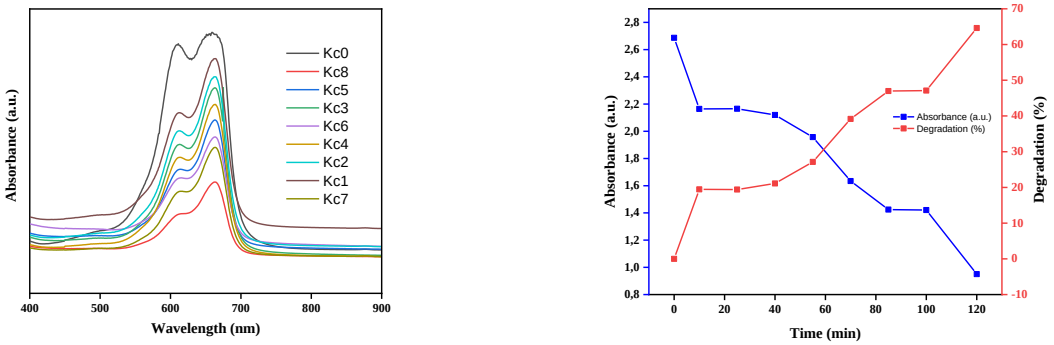
الامتصاص إلى انخفاض تركيز الصبغة في المحلول المائي نتيجة لتوافر مواقع امتزاز نشطة داخل البنية المسامية للهلاميات الهوائية، وقد تم الإبلاغ على نطاق واسع عن سلوك امتزاز مماثل للهلاميات الحيوية الهوائية الليغنوسليلوزية والمواد الممتزة الحيوية المشتقة من المخلفات الزراعية، حيث يحدث الامتزاز في البداية بسرعة بسبب وفرة المواقع النشطة الشاغرة، يليه مرحلة أبطأ تتعلق بانتشار المسام وتوازن الامتزاز [14].



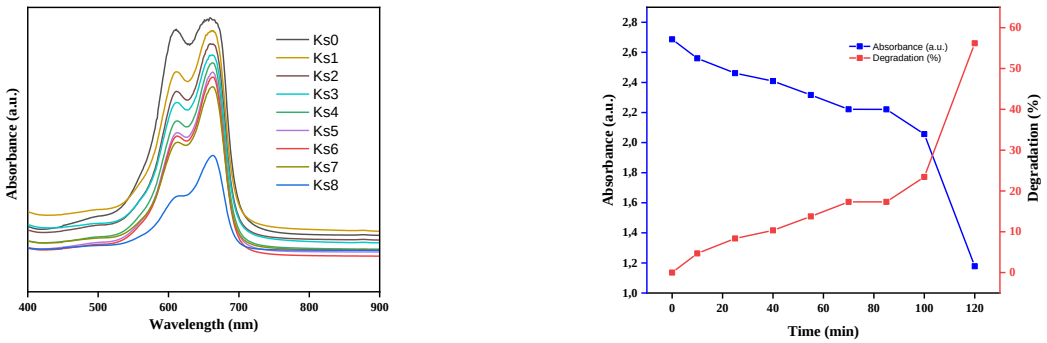
الشكل (5.IV): إزالة الصبغة لهلام K.



الشكل (6.IV): إزالة الصبغة لهلام Kb.



الشكل (7.IV): إزالة الصبغة لهلام Kc.



الشكل (8.IV): إزالة الصبغة لهلام Ks.

من بين جميع العينات، أظهر الهلام Kc أعلى كفاءة في إزالة الميثيلين الأزرق، حيث بلغت حوالي 70% بعد 120 دقيقة. يعزى هذا الأداء المتميز إلى التفاعل القوي بين أيونات الكالسيوم (Ca^{+2}) والمجموعات الوظيفية المحتوية على الأكسجين الموجودة في مصفوفة الليغنوسليلوز، من المرجح أن أكسيد الكالسيوم قد عزز قلوية السطح، وزاد من سهولة الوصول إلى المسام، وعزز التجاذب الكهروستاتيكي بين مواقع الامتزاز سالبة الشحنة وجزيئات الميثيلين الأزرق الموجبة الشحنة، إضافة إلى ذلك، ربما يكون تدعيم أكسيد الكالسيوم قد حسن من الصلابة الهيكلية للهلام، مما منع انهيار المسام أثناء التجفيف الهوائي وحافظ على مساحة سطح نوعية أكبر. وقد لاحظ باحثون في دراسة أن المواد الامتزاز الحيوية المعدلة بالكالسيوم أظهرت قدرات امتزاز محسّنة تجاه الأصباغ الموجبة الشحنة نتيجةً لتحسين الشحنة السطحية وكثافة المواقع النشطة[15].

أظهر الهلام الهوائي Kb كفاءة امتصاص عالية جدا، حيث بلغت نسبة الإزالة ما يقارب 90% بعد 120 دقيقة، حيث تتكون قشور البيض بشكل أساسي من $CaCO_3$، والتي تساهم في الامتصاص من خلال التبادل الأيوني والتفاعلات الكهروستاتيكية وزيادة خشونة السطح، من المرجح أن دمج جزيئات قشور البيض قد ولد قنوات مسامية ومواقع امتصاص إضافية داخل مصفوفة الهلام الهوائي الحيوي. علاوة على ذلك، ربما سهلت مجموعات الكربونات التفاعلات مع جزيئات أزرق الميثيلين من خلال آليات تكوين معقدات سطحية. وقد أثبتت دراسة تحسينات مماثلة في أداء امتصاص الصبغة بعد دمج كربونات الكالسيوم مع مواد مختلفة تحسن بشكل ملحوظ امتصاص أزرق الميثيلين نظرا لبنيتها المسامية وسطحها المعدني التفاعلي[16].

أظهر الهلام الحيوي K أداء متوسطا في الامتزاز، حيث بلغت كفاءة الإزالة حوالي 70% بعد 120 دقيقة، تؤكد هذه النتيجة أن الكتلة الحيوية لقشور الفول السوداني تمتلك قدرة امتزاز طبيعية نظرا لوجود

السليلوز والهيميسليلوز واللجنين ومجموعات وظيفية تحتوي على الهيدروكسيل، والتي تتفاعل مع جزيئات الصبغة من خلال الروابط الهيدروجينية والتجاذب الكهروستاتيكي. مع ذلك، بالمقارنة مع Kb، قد يعزى انخفاض الكفاءة إلى محدودية عدد المواقع النشطة وضعف الاستقرار البنيوي بعد التجفيف الهوائي. وقد سجلت كفاءات امتزاز مماثلة للهلامات الهوائية الليغنوسليلوزية غير المعالجة والمشتقة من المخلفات الزراعية[17]. على النقيض من ذلك، أظهر الهلام الهوائي Ks أدنى كفاءة في إزالة الصبغة بين العينات المحضرة، حيث بلغت حوالي 55–60% فقط بعد 120 دقيقة، على الرغم من أن إضافة السيليكا تحسن عموما الثبات الحراري والقوة الميكانيكية، إلا أن زيادة محتوى السيليكا قد تسد المسام جزئيا أو تقلل من إمكانية الوصول إلى مواقع الامتزاز العضوية المسؤولة عن تثبيت أزرق الميثيلين. علاوة على ذلك، فإن أسطح السيليكا عادة ما تكون أقل تفاعلا مع الأصباغ الكاتيونية ما لم تعالج كيميائيا. لذا، يشير انخفاض الامتزاز الملاحظ في Ks إلى أن طور السيليكا غير العضوي قد قلل من عدد تفاعلات الامتزاز الفعالة المتاحة داخل مصفوفة الليغنوسليلوز، حيث أفادت دراسة بأن إضافة السيليكا إلى الهلام الهوائي الحيوي قد تقلل من امتزاز الصبغة عند انسداد المسام أو حدوث تغطية غير عضوية زائدة[18].

تظهر النتائج المتحصل عليها أن أداء الامتزاز للهلاميات الحيوية المحضرة يعتمد اعتمادا كبيرا على طبيعة المادة المقوية والتعديلات البنيوية التي تحدث أثناء التحضير، يشير الأداء الممتاز لـ Kc وKb إلى أن الإضافات المحتوية على الكالسيوم قد حسنت بشكل ملحوظ المسامية، والتفاعل السطحي، والتفاعلات الكهروستاتيكية مع جزيئات أزرق الميثيلين. بالإضافة إلى ذلك، من المرجح أن استخدام المستحلب أثناء تحضير الهلام قد ساهم في تحسين استقرار المسام وتشتيت الإضافات، مما يحسن كفاءة الامتزاز حتى بعد التجفيف بالهواء. تؤكد هذه النتائج إمكانية استخدام الهلاميات الحيوية المقواة المصنوعة من قشور الفول السوداني كمواد ماصة مستدامة وفعالة لتطبيقات معالجة المياه.

تظهر النتائج المتحصل عليها فعالية استغلال المخلفات الزراعية في إنتاج هلاميات حيوية هوائية هجينة مستدامة ذات تطبيقات بيئية واعدة، لا سيما في معالجة مياه الصرف الصحي وعمليات إزالة الأصباغ.

مراجع الفصل:

[1]Q. Li, Q. Huang, X. Y. Pan, H. Yu, and Z. T. Zhao, "Adsorption behavior of Cr (VI) by biomass-based adsorbent functionalized with deep eutectic solvents (DESs)," *BMC chemistry*, vol. 16, p. 41, 2022.

[2]X. Yang, L. Wang, J. Tong, X. Shao, Y. Feng, J. Zhou, *et al.*, "Alkaline ball-milled peanut-hull biosorbent effectively removes aqueous organic dyes," *Chemosphere*, vol. 313, p. 137410, 2023.

[3]M. R. Barr, L. Forster, C. D'agostino, and R. Volpe, "Alkaline pretreatment of walnut shells increases pore surface hydrophilicity of derived biochars," *Applied Surface Science*, vol. 571, p. 151253, 2022.

[4]M. T. Uddin, M. Rukanuzzaman, and M. A. Islam, "Enhanced adsorption performance of activated carbon prepared from peanut shell for the adsorption of dyes from aqueous solution," *Desalination and Water Treatment*, vol. 280, pp. 60-75, 2022.

[5]J. Kaima, I. Preechawuttipong, R. Peyroux, P. Jongchansitto, and T. Kaima, "Experimental investigation of alkaline treatment processes (NaOH, KOH and ash) on tensile strength of the bamboo fiber bundle," *Results in engineering*, vol. 18, p. 101186, 2023.

[6]L. Zhang, X. Liu, W. Liu, H. Du, and J. Guo, "Hierarchical porous biochar with Fe/Zn co-activation derived from orange waste: enhanced methylene blue adsorption and mechanistic insights," *Biochar X*, vol. 2, 2026.

[7]B. Liu, W. Li, X. Zhuang, X. Pan, H. Qiao, and Y. Feng, "Effect of the Alkali Pretreatment on the Structure and Properties of Bamboo-Based Porous Molding Materials," *Polymers*, vol. 17, p. 3166, 2025.

[8]M. Sulaiman, F. A. Rabbani, T. Iqbal, M. A. Kazmi, S. Yasin, M. Mujtaba, *et al.*, "Impact of eco-friendly chemical pretreatment on physicochemical and surface mechanical properties of sustainable lignocellulosic agricultural waste," *Algal Research*, vol. 71, p. 103051, 2023.

[9]M. S. Al-Hazeef, A. Aidi, L. Hecini, G. G. Hasan, J. Hu, and M. Althamthami, "Unveiling the efficiency of peanut shell-derived porous composite for water denitrification: Characterization, kinetic, isotherm and thermodynamic studies," *Journal of Molecular Liquids*, vol. 410, p. 125668, 2024.

[10] Y. Sun, T. Wang, C. Han, X. Lv, L. Bai, X. Sun, *et al.*, "Facile synthesis of Fe-modified lignin-based biochar for ultra-fast adsorption of methylene blue: Selective adsorption and mechanism studies," *Bioresource Technology*, vol. 344, p. 126186, 2022.

[11] K. P. Vieira, A. A. Reichert, G. M. Cholant, D. Marin, C. A. G. Beatrice, and A. D. d. Oliveira, "Sustainable composites of eco-friendly polyethylene reinforced with eggshells and bio-calcium carbonate," *Pol ́meros*, vol. 33, p. e20230026, 2023.

[12] P. Wang, X. Qin, F. Wang, J. Sun, Z. Fu, Y. Zhang, *et al.*, "Calcium-Modified Coal-Based Humin Waste Residue: Enhanced Cadmium Remediation in Combined Soil-Plant Systems," *Available at SSRN 5240704*, 2026.

[13] E.-T. Moldoveanu, A.-G. Niculescu, D. A. Florea, T. Hadibarata, A.-M. Grumezescu, and D.-E. Mihaiescu, "Bridging Material Innovation and Environmental Safety: Aerogel-Based Magnetic Nanocomposites as Emerging Platforms for Water Decontamination," *Toxics*, vol. 14, p. 115, 2026.

[14] L. M. Sanchez, E. Rincón, J. de Haro Niza, R. M. Martín, E. Espinosa, and A. Rodríguez, "Vegetable lignocellulosic residues and chitosan as valuable resources in the superabsorbent bio-aerogel development for food conservation," *Food and Bioprocess Technology*, vol. 17, pp. 1231-1246, 2024.

[15] C. He, L. Shi, S. Lou, B. Liu, W. Zhang, and L. Zhang, "Synthesis of spherical magnetic calcium modified chitosan micro-particles with excellent adsorption performance for anionic-cationic dyes," *International journal of biological macromolecules*, vol. 128, pp. 593-602, 2019.

[16] D. Jahani, A. Nazari, J. Ghourbanpour, and A. Ameli, "Polyvinyl alcohol/calcium carbonate nanocomposites as efficient and cost-effective cationic dye adsorbents," *Polymers*, vol. 12, p. 2179, 2020.

[17] S. Ahmed and S. Janaswamy, "Lignocellulose-enriched aerogels: Towards developing biomass-based sustainable and environmental sorbents for oil spill management," *Industrial Crops and Products*, vol. 229, p. 120987, 2025.

[18] R. K. V. Chola, S. Palliyalil, and B. M. Chelaveettil, "A green engineered sulphur-infused alginate/silica/biochar hybrid for enhanced dye removal: A study on adsorption dynamics and mechanism," *Surfaces and Interfaces*, p. 108563, 2026.

الخاتمة العامة

الخاتمة العامة:

أثبتت هذه الدراسة بنجاح إمكانية تحويل المخلفات الزراعية إلى مواد حيوية عالية المسامية، مخصصة لتطبيقات المعالجة البيئية، حيث استخدمت قشور الفول السوداني بكفاءة كمادة أولية غنية باللجنين والسليلوز لتحضير الهلاميات الحيوية الهجينة من خلال المعالجة القلوية، والتدعيم بمواد مضافة غير عضوية، والتجفيف الهوائي، لعبت المعالجة القلوية دورا هاما في تعديل التركيب البنيوي للكتلة الحيوية عن طريق إزالة جزء من اللجنين والهيميسليلوز، مما عزز سهولة الوصول إلى المجموعات الوظيفية للسليلوز، وحسن مسامية المواد المحضرة.

أكدت نتائج التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء وجود مجموعات وظيفية مهمة، وأظهرت التفاعل الناجح بين مصفوفة قشور الفول السوداني وعوامل التدعيم، وهي مسحوق قشر البيض، وأكسيد الكالسيوم، والسيليكا، حيث ساهم دمج هذه المواد المضافة في إحداث تعديلات بنيوية ملحوظة، وتحسين الخصائص الفيزيائية والكيميائية للهلاميات الحيوية المحضرة. بالإضافة إلى ذلك، ساهم استخدام مادة توين 80 كعامل مثبت في الحفاظ على البنية المسامية أثناء عملية التجفيف الهوائي، وقلل من انهيارها.

أظهرت تجارب الامتزاز أن جميع الهلاميات الهوائية الحيوية المحضرة تتمتع بقدرات امتزاز واعدة لإزالة صبغة أزرق الميثيلين من المحاليل المائية، حيث أظهر الهلام الهوائي المدعم بأكسيد الكالسيوم أعلى كفاءة امتزاز، يليه الهلام الهوائي المدعم بقشر البيض، بينما أظهرت العينة المدعمة بالسيليكا أداء أقل نسبيا، تعود هذه الاختلافات بشكل رئيسي إلى التباينات في التركيب الكيميائي للسطح، وسهولة الوصول إلى المسام، وتوافر مواقع الامتزاز النشطة، أكدت النتائج المتحصل عليها أن الإضافات المحتوية على الكالسيوم تحسن بشكل ملحوظ سلوك الامتزاز للمواد.

بشكل عام، يسلط هذا العمل الضوء على أهمية تثمين المخلفات الزراعية كاستراتيجية مستدامة لتطوير مواد ماصة منخفضة التكلفة، وصديقة للبيئة، وفعالة، أظهرت الهلاميات الهوائية الحيوية الهجينة المحضرة إمكانات كبيرة في تطبيقات معالجة مياه الصرف الصحي والإصلاح البيئي. علاوة على ذلك، تفتح هذه الدراسة آفاقا واعدة للتحقيقات المستقبلية التي تركز على تحسين ظروف التحضير، وتحسين الخصائص الميكانيكية وخصائص الامتصاص، وتوسيع نطاق تطبيق هذه المواد المسامية الحيوية لإزالة الملوثات البيئية المختلفة.