



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

رقم الترتيب:.....

رقم التسلسل:..... جامعة الشهيد حمه لخضر بالوادي

كلية العلوم الدقيقة

قسم الكيمياء

مذكرة تخرج مقدمة لنيل شهادة

ماستر مهني

تخصص: كيمياء تحليلية

من إعداد الطالبة:

صباح حمادو وسارة شايب

تحت عنوان

دراسة وتقييم فعالية مادة ماصة حيوية طبيعية (الفحم النشط)
محضرة من مادة عضوية (عرجون النخيل)

نوقشت يوم: 2025/09/23

أمام لجنة المناقشة المكونة من الأساتذة:

رئيس اللجنة

مناقش

مؤطر

تركي بلقاسم

خلف عبد الحميد

حوات عمار

الدكتور

الدكتور

الدكتور

جامعة الوادي

جامعة الوادي

جامعة الوادي

الموسم الجامعي: 2025/2024

الاهداء

إلى كل من كَلَّلَ العرق جبينه، ومن علَّمَنِي أن النجاح لا يأتي إلا بالصبر والإصرار،
إلى النور الذي أنار دربي، والسراج الذي لا ينطفئ نوره في قلبي أبداً،
إلى من بذل الغالي والنفيس، واستمدت منه قوتي واعتازي بذاتي،
والذي لم يفرق روحي وذكراتي...

أبي رحمه الله.

إلى من جعلت الجنة تحت قدميها، وسهلت لي الشدائد بدعائها...
إلى الإنسانية العظيمة التي طالما تمنّت أن ترقّ عينها بهذا اليوم...

إلى حبيتي أمي.

إلى من شددت عضدي بهم، فكانوا ينابيع ارتوائي منها إلى خيرة أيامي وصفوفها، إلى قرة عيني...

أخوتي وأخواتي.

إلى أستاذه ومدرّسيه وقُدوتي، الذي كانت مسيرتي معه في كتابة مذكرتي ودراستي ليست علماً فقط، بل شملت دروس الحياة والعمل...

دكتور عمار حوات.

لكل من عاون وسند في هذا الطريق... الأصدقاء والأوفياء ورفقاء السنين،
إلى أصحاب الشدائد والأزمات،
إلى من أفاض عليّ بمشاعره ونصائحه الملمّصة...

إليكم عائلي.

أهديكم هذا لإنجازي وثمره نجاحي الذي لطالما تمنيته.
ها أنا اليوم أكملت وأتمّ أول ثمراته بفضل سببانه وتعالى،
فالحمد لله على ما وهبني، وأن يجعلني مباركاً أينما كنت.
فمن قال: "أنا لها"، نالها،

وأنا لها، وإن أبي رغباً عنها، يأتي بها الله.

فالحمد لله، شكراً وحباً وامتناناً على البدء والختام،

وآخر دعوانا أن الحمد لله رب العالمين.

سارة شايب

الإهداء

إلى من غاب جسداً وبقي أثره ودعاؤه،

إلى روح أبي الطاهرة محمد، رحمه الله، يا من غرست في نفسي القيم والمبادئ، أهديك هذا الإنجاز راجية أن يصل إلى مقامك دعاءً وصدقة جارية ووفاءً لا ينقطع...

إلى من كانت نبع الحنان وسند الحياة، رفيقة الدعاء التي سهرت لأجلي ودعت لي في حضوري وغيابي،

إلى أُمي الحبيبة مربوحة، رمز العطاء بلا حدود، لك أقدم ثمرة جهدي ونجاحي، هدية متواضعة أمام عظمتك...

إلى شريك دربي ورفيق مسيرتي،

إلى زوجي العزيز مصطفى، الذي كان خير داعم بحبه وصبره وتفهمه، كان سندي الحقيقي في كل خطوة،

لك كل التقدير والامتنان...

إلى فلذات كبدي، أبنائي الأحياء أسيل، منذر، ذاكر الرحمن، يا من تحملتم غيابي وواجهتم بعض المسؤوليات في صغر سنكم، أنتم نوري وفخري ومصدر قوتي...

إلى كل زملائي، وخاصة رفيقتي في هذا الإنجاز سارة،

وأساتذتي الأعزاء، وخاصة أستاذ المؤطر الفاضل الأستاذ حوات عمار، نعم القائد والموجه بعلمه، وصحح الأخطاء بلطفه خلال هذه الرحلة العلمية،

لكم مني كل الشكر والاحترام، فكنتم مشعلاً أثار طريقي...

إلى أبن أخي العزيز عبد العليم، رفيق اللحظات الصعبة بجهد ودعمه ومساعدته، لك مني كل التقدير والامتنان، فدورك لا يُنسى...

إلى كل أخوتي: الساسي، رضا، نسيم، نفيسة، وأبناء أخي، وابنة خالتي جهيدة،

وإلى كل أحبائي ومن دعمني ولو بكلمة طيبة أو دعوة صادقة،

لكم جميعاً أهدي هذا الإنجاز راجية من الله أن يكون بداية خير لما هو آتٍ...

صباح حمادو

الشكر والعرفان

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات، وبفضله وكرمه أتممت مسيرتي التعليمية، ووصلت إلى لحظة التخرج التي حلمت بها طويلاً.

وفي هذه المناسبة الغالية على قلبي، لا يسعني إلا أن أتقدم بجزيل الشكر وعظيم الامتنان لكل من كان له دور في هذا الإنجاز.

أشكر من أعماق قلبي كل دكتور ومعلم علمني حرفاً، وفتح أمامي أبواب العلم والمعرفة، وكان له بصمة في مسيرتي الأكاديمية. كلمات الشكر لا توفيكُم حقكم، فقد كنتم قدوة في العلم، ومصدرًا للإلهام والدعم.

كما لا أنسى الأصدقاء الأعزاء الذين كانوا سندًا لي في كل خطوة، من شجعوني وشاركوا معي لحظات التعب والفرح. وجودكم بجانبني كان له الأثر الكبير في استمراريتي ونجاحي. لكل من دعمني بكلمة، أو نصيحة، أو حتى دعوة صادقة في ظهر الغيب، أقول لكم: شكرًا من القلب.

هذا التخرج ليس إنجازي وحدي، بل هو ثمرة جهد مشترك ومحبة صادقة وتعاون نبيل. أسأل الله أن يجزيكم عني خير الجزاء، وأن يديم عليكم نعمة العطاء والنجاح. مع خالص التقدير والاحترام،

الفهارس

الفهرس

II	الفهرس
V	قائمة الأشكال
VI	قائمة الجداول
1	مقدمة
3	I- الجانب النظري
4	I-1- مقدمة
4	I-1-1- الأصباغ النسيجية
4	I-1-2- تعريف الكروموفور و الأوكسوكرومات
5	I-1-2-1- الأنواع المختلفة من الكروموفورات
5	I-1-2-1-1- المجموعات الكروموفورية (Chromophores)
6	I-1-2-1-2- المجموعات الأوكسوكرومية (Auxochromes)
6	I-2-1- تصنيف الأصباغ النسيجية
7	I-2.3.1- التصنيف الصبغي (التصنيف التينكتوري)
7	1. الأصباغ الحمضية أو الأنيونية
7	I-4-1- مخاطر تصريف الأصباغ النسيجية
8	I-2- معالجة المياه
8	I-2-1- معالجة المياه من الأصباغ
8	I-2-1-1- المعالجة الأولية
8	2. المعالجة الفيزيائية
9	1. المعالجة الكيميائية
9	I-4-1-2- المعالجة البيولوجية
9	I-3- عمليات إزالة الأصباغ
9	I-3-1- تعريف الامتزاز
9	I-3-2- الأنواع المختلفة للامتزاز
10	I-3-3- سعة الامتزاز
11	I-4-3- العوامل المؤثرة على الامتزاز
11	I-5-3- حركية الامتزاز
12	I-4- أنواع مختلفة من المواد المازة
12	I-4-1- الفحم النشط
12	I-4-1-2- أصل الفحم النشط
12	I-4-2- تحضير الفحم النشط:
13	I-4-2-1- التنشيط:
13	I-4-2-1-1- التنشيط الفيزيائي:
13	I-4-2-1-2- التنشيط الكيميائي:
13	I-4-2-2- الكربنة:
14	I-4-3- الأشكال المختلفة للفحم النشط
14	I-4-3-1- الفحم النشط الحبيبي (Granular Activated Carbon -GAC)
14	I-4-3-2- الفحم النشط النسيجي (Activated Carbon Fabric -ACF)

15	 (Powdered Activated Carbon -PAC) الفحم النشط المسحوق
15	 4-4-1 بنية الفحم النشط
16	 5-I مصدر للفحم النشط:
16	 1-5-1 شجرة النخيل (Phoenix dactylifera L.)
16	 2-5-1 تصنيف شجرة النخيل الى فئة النباتات الفلقة [30]
18	 3-5-1 التركيب الكيميائي وخصائص مقاومة الماء لعرجون النخيل
19	 II- الجانب العملي
20	 1-II مقدمة
20	 2-II اختيار الصبغة
21	 3-II المواد الكيميائية والمعدات المستخدمة
22	 4-II تحضير المحاليل
22	 5-II تحضير الفحم النشط على شكل مسحوق
24	 6-II طرق التحليل
24	 1-6-II قياس الرقم الهيدروجيني (pH)
24	 2-6-II التحليل بواسطة المطيافية فوق البنفسجية/المرئية (UV/Visible)
24	 3-6-II المعايرة (Étalonnage)
25	 7-II النمذجة باستخدام خطط تجارب تاغوتشي TAGUCHI
25	 1-7-II اختيار تصميم التجربة
26	 2-7-II تطبيق منهجية تاغوتشي TAGUCHI في تجربتنا
28	 III- تحليل ومناقشة النتائج
29	 1-III الدراسة الطيفية للصبغة
30	 2-III تحديد pH_{pzc} للفحم النشط المسحوق
32	 3-III دراسة زمن التلامس
33	 4-III العوامل المؤثرة على الامتزاز
33	 1-4-III تأثير التركيز الابتدائي للصبغة
35	 2-4-III تأثير الرقم الهيدروجيني (pH)
36	 3-4-III تأثير نسبة المادة الصلبة إلى السائل (S/L) – (جرعة الممتز)
38	 الملخص
41	 الخاتمة
44	 المراجع
47	 الملاحق

قائمة الأشكال

- الشكل I-1: المراحل المختلفة لانتقال مادة مذابة أثناء أمتزازها على مادة ميكروية المسام الخطوة الرابعة الامتزاز أو التثبيت.
12
- الشكل I-2: الفحم النشط الحبيبي (CAG)
14
- الشكل I-3: الفحم النشط النسيجي (CAT)
15
- الشكل I-4: الفحم النشط المسحوق (CAP)
15
- الشكل I-5: بنية الفحم النشط
16
- الشكل I-6: شجرة النحيل
18
- الشكل II-1: المراحل المختلفة لتحضير الفحم النشط على شكل مسحوق
23
- الشكل II-2: منحنى المعايرة للإيثيل البنفسجي
25
- الشكل III-1: طيف UV-Vis للإيثيل البنفسجي في محلول مائي
30
- الشكل III-2: تطور الطيف فوق البنفسجي-المرئي (UV-Vis) لمركب الإيثيل البنفسجي عند درجات حموضة مختلفة
30
- الشكل III-3: رقم pH عند نقطة الشحنة الصفرية (PZC) للفحم النشط المستخدم على شكل مسحوق
31
- الشكل III-4: حركية الامتزاز للإيثيل البنفسجي على الفحم النشط المسحوق. [EV] = pmm 25 ؛ الكتلة = 1 g/l ؛ T =
33 tours/min 250 = سرعة التحريك ؛ pH ؛ C°22 حر ؛
- الشكل III-5: تأثير التركيز الابتدائي للإيثيل البنفسجي على عملية الامتزاز
34
- الكتلة = 1 g/l ؛ T = 23 °C ؛ pH ؛ سرعة التحريك = 250 Tours/min
34
- الشكل III-6: تأثير الرقم الهيدروجيني (pH) على عملية امتزاز الإيثيل البنفسجي بواسطة الفحم النشط المسحوق، [EV] =
36 5ppm = pmm جزء في المليون؛ درجة الحرارة = 23 °C ؛ سرعة التحريك = 250 Tours/min ؛ الكتلة = 1 g/l
36
- الشكل III-7: تأثير نسبة S/L (كتلة الممتز) على عملية امتزاز الإيثيل البنفسجي بواسطة الفحم النشط المسحوق. [EV] =
37 15 pmm جزء في المليون؛ T = 22 °C ؛ pH ؛ سرعة التحريك = 250 Tours/min
37

قائمة الجداول

الجدول I-1: جدول يوضح مخاطر تصريف الأصباغ النسيجية	8
الجدول I-2: التصنيف الفيزيائي والكيمائي لشجرة النخيل	16
الجدول II-1: خصائص الفيزيائية والكيميائية لإثيل البنفسجي	20
الجدول II-2: المعلمات والمستويات الخاصة بالعملية التجريبية	26
الجدول III-1: نتائج قيم pH لتحديد قيمة pH_{pzc} لتجربة	31
الجدول III-2: تغيرات كمية امتزاز خلال الزمن مختلفة	32
الجدول III-3: تغيرات كمية الامتزاز بتغير التركيز الابتدائي للإيثيل البنفسجي مع مرور الزمن	34
الجدول III-4: تغيرات كمية امتزاز بتغير درجة حموضة الوسط التفاعلي مع مرور الزمن	35
الجدول III-5: تغيرات كمية امتزاز بتغير كمية الكربون النشط بتغير الزمن	37

قائمة الرموز

المصطلح	الرمز	الوحدة
معامل امتزاز لانجمير	a	—
الضوضاء	b (L/mg)	(L/mg)
التركيز الابتدائي للركيزة	C ₀	—
تركيز الصبغة في لحظة ما أثناء الامتزاز	C _t	—
التركيز المتبقي للمادة المذابة عند التوازن	C _e	—
تركيز الفحم النشط	C	—
الكثافة الضوئية	DO(cm ⁻¹)	cm ⁻¹
الإيثيل البنفسجي	EV	—
ثابت معدل التفاعل	K (m ⁻¹)	m ⁻¹
ثابت علاقة فريندلخ	k	—
ثابت توازن الامتزاز	kE-L (L/mol)	L/mol
ثابت مرتبط بطاقة الامتزاز الحرة المتوسطة	KD-L (mg ² /kJ ²)	mg ² /kJ ²
ثابت الانتشار داخل الجزيئات	KpL (mg/g·min)	mg/g·min
كتلة الدعامة أو الممتز	m-adsorbant (g)	g
الدقيقة	min	min
المولارية	M (L/mol)	L/mol
معامل معادلة فريندلخ	n	—
نانومتر	nm	nm
درجة الحموضة (الرقم الهيدروجيني)	pH	—
سعة الامتزاز عند التوازن	q _e (mg/g)	mg/g
أقصى سعة امتزاز	q _m (mg/g)	mg/g
تركيز الكتلة الدعامة	r (L/g)	L/g
معامل الارتباط	R ²	—
الإشارة	s	—
ثابت الانتشار داخل الجزيئات (مكرر في القائمة)	KpL (mg/g·min)	mg/g·min
الزمن	t	—
درجة الحرارة	T (°C)	°C
حجم محلول الركيزة	V (L)	L

مقدمة

مقدمة

تُعتبر مشكلة تلوث المياه من أبرز التحديات البيئية والصحية التي تواجه العالم في العقود الأخيرة، إذ يتزايد الطلب على المياه النظيفة نتيجة للزيادة السكانية، التوسع العمراني، والتطور الصناعي والزراعي، بينما تُلقى كميات متزايدة من الملوثات في الموارد المائية السطحية والجوفية، مما يجعل معالجة مياه الصرف ضرورة حيوية لاستدامة هذا المورد الأساسي. من بين هذه الملوثات مستويات عالية من المركبات العضوية والغير عضوية، مثل الأصباغ الصناعية والمبيدات والمعادن الثقيلة والأيونات السامة، ما يشكل تهديدًا كبيرًا على الصحة العامة والنظم البيئية [1] [2]

تُستخدم الأصباغ الصناعية على نطاق واسع في صناعات عديدة كالنسيج، الورق، الجلود والبلاستيك، بسبب خواصها اللونية والمستقرة، إلا أن جزءًا مهمًا منها يُلقى في مياه الصرف خلال عمليات التصنيع والتلوين، ما يؤدي إلى تلوث بيئي واضح. في بعض الصناعات، قد تصل نسبة فقدان الصبغة إلى 10-20% من الصبغة المستخدمة — ما يزيد من معاناة المعالجة التقليدية خاصة عندما تكون الأصباغ مستقرة كيميائيًا ومقاومة للتحلل البيولوجي والضوء والحرارة [3]

لمواجهة هذه المشكلة، اعتمد البحث العلمي عدة تقنيات لمعالجة مياه الصرف الصناعي الملوثة بالأصباغ: منها الطرق الفيزيائية (كالترسيب، الترشيح، التبادل الأيوني)، والطرق الكيميائية (كالأكسدة المتقدمة والتخثير الكيميائي)، إضافة إلى المعالجة البيولوجية. غير أن هذه الطرق غالبًا ما تواجه قيودًا من حيث الفعالية أو التكلفة أو إنتاج مخلفات ثانوية ضارة. وبناءً عليه، برزت تقنية الامتزاز كخيار واعد، نظرًا إلى قدرتها العالية على إزالة الملوثات حتى عند تراكيزات منخفضة، وانخفاض تكلفتها مقارنة بالطرق الأخرى [4]. [5]

يُعد الفحم النشط من المواد الأكثر استخدامًا في تقنية الامتزاز، نظرًا لمساحته السطحية الكبيرة وبنية المسامية التي تمنحه قدرة عالية على احتجاز الملوثات العضوية وغير العضوية. لكن رغم كفاءته، غالبًا ما تكون تكلفته مرتفعة؛ ما دفع الباحثين إلى البحث عن بدائل منخفضة التكلفة ومتاحة محليًا — خاصة من المخلفات الزراعية — مع إمكانية تعديل خصائصها السطحية لتقارب في الفعالية الفحم المنشط التجاري ويُمثل استغلال المخلفات الزراعية خيارًا استراتيجيًا يتوافق مع مبادئ الاقتصاد الدائري والتنمية المستدامة: فهو يقلل من النفايات الزراعية ويوفر مادة ماصة فعالة وصديقة للبيئة في الوقت نفسه [2] [1].

من بين هذه المخلفات، يحظى عرجون النخيل باهتمام متزايد، خاصة في الدول التي تنتج التمور بشكل واسع كما في شمال أفريقيا والشرق الأوسط، لما يتمتع به من محتوى مرتفع من السليلوز واللجنين، وما يؤهله ليكون مادة أولية مناسبة لتحضير الفحم النشط بعد معالجة حرارية أو كيميائية [1] وبالتالي، فإن استخدام فحم نشط محضّر مخبريًا من عرجون النخيل يُعد حلًا عمليًا يجمع بين تقليل النفايات الزراعية والمحافظة على البيئة، وبين إنتاج مادة ماصة فعالة ومنخفضة التكلفة لمعالجة مياه الصرف الصناعي الملوثة.

يرتكز هذا البحث على تقييم فعالية الامتزاز باستخدام فحم نشط مسحوق محضّر من عرجون النخيل لإزالة صبغة صناعية (مثل Ethyl Violet) من المحاليل المائية. كما يهدف إلى دراسة تأثير المتغيرات التشغيلية المختلفة مثل التركيز الابتدائي للصبغة، كمية المادة الماصة، درجة الحموضة، وزمن التلامس على كفاءة الإزالة. إضافة إلى ذلك، سيتم توصيف الخصائص الفيزيائية والكيميائية للفحم المحضّر باستخدام تقنيات متقدمة لقياس المساحة السطحية، توزيع المسام، والمجموعات الوظيفية السطحية. تكمن أهمية الدراسة في توفير مادة ماصة محلية وصديقة للبيئة، فضلاً عن المساهمة في تعزيز الاقتصاد التدويري وتقليل النفايات الزراعية.

هيكل البحث يتوزع كما يلي: الفصل الأول يستعرض الأصباغ الصناعية، خصائصها وتأثيراتها البيئية، وطرق المعالجة المتاحة، مع التركيز على تقنية الامتزاز والمواد الماصة. الفصل الثاني يعرض المنهجية، تحضير الفحم النشط من عرجون النخيل، وتقنيات الامتزاز. الفصل الثالث يعرض النتائج والمناقشة. ثم تُختتم الدراسة باستنتاجات وتوصيات مستقبلية

1. Din, H., et al., *Synergizing date palm seeds-derived oxidized activated carbon: Sustainable innovation for enhanced water retention, efficient wastewater treatment, and synthetic dye removal*. Chemical Engineering Research and Design, 2024. **204**: p. 212.227-
2. Alharbi, H.A., et al., *Recent methods in the production of activated carbon from date palm residues for the adsorption of textile dyes*: A. 2022.
3. Alameddine, M., et al., *Comparative Assessment of Powdered versus Granular Activated Carbon for PFAS Removal in Drinking Water Treatment Plants*. ACS ES&T Water, 2025.
4. Homagai, P.L., et al., *Adsorption and removal of crystal violet dye from aqueous solution by modified rice husk*. Heliyon, 2022. **8**(4).
5. Kuyucu, A.E., et al., *Effective removal of dyes from aqueous systems by waste-derived carbon adsorbent: physicochemical characterization and adsorption studies*. Scientific Reports, 2025. **15**(1): p. 28835.

I- الجانب النظري

I-1-مقدمة

شهدت صناعة الأصباغ الاصطناعية تطوراً كبيراً منذ اكتشاف أول صبغة صناعية "موفين" على يد الكيميائي ويليام هنري بيركن في عام 1856، ما مهد الطريق لنمو سريع في استخدام الأصباغ ضمن قطاعات متعددة، خاصة صناعة النسيج والمنتجات الغذائية.

I-1-1-الأصباغ النسيجية

تعد الأصباغ الاصطناعية من المركبات العضوية القادرة على امتصاص الضوء ضمن نطاق الطيف المرئي الذي يتراوح بين 380 و750 نانومتر. ويعود السبب في ظهور هذه الألوان إلى وجود مجموعات كيميائية تعرف باسم "الكروموفورات" وهي المسؤولة عن امتصاص أطوال موجية محددة من الضوء مما يكسب المادة لوناً ظاهراً. وتختلف شدة اللون تبعاً لقدرة هذه الكروموفورات على الانتقال بين مستويات الطاقة عند تعرضها للإشعاع الضوئي فكلما زادت سهولة استثارة الجزيء أصبح اللون أكثر وضوحاً [1]

كما تعد الألفة التلوينية من الخصائص المهمة التي تحدد مدى قدرة الصبغة على الالتصاق بالألياف. وتعتمد هذه الخاصية على نوعية التفاعلات بين الصبغة وسطح الليف مثل التجاذب الكهروستاتيكي والروابط الهيدروجينية وقوى فان دير فالس. وتلعب هذه التفاعلات دوراً أساسياً في تحديد جودة ثبات اللون وقوته [2]

وتعد مقاومة الصبغة للتلاشي عند التعرض للضوء من أبرز المعايير المستخدمة لتقييم جودتها سواء في الضوء الطبيعي أو الاصطناعي. وتظهر الدراسات أن البنية الجزيئية للصبغة وتوزيع الإلكترونات في الكروموفور لهما تأثير مباشر على استقرار اللون. كما أن نوع الروابط بين الصبغة والألياف يسهم بدور مهم في منع تدهور اللون مع مرور الوقت [3]

I-2-1-تعريف الكروموفور والأكسوكرومات

يشير مصطلح "كروموفور" إلى الجزء من الجزيء العضوي المسؤول عن امتصاص الضوء ضمن نطاق الطيف المرئي، مما يمنح المركب لونه المميز. وقد اشتق هذا المصطلح من الكلمة اليونانية "chroma" التي تعني "لون" و"phore" التي تعني "يحمل"، أي "حامل اللون". تتكون الكروموفورات عادة من أنظمة إلكترونية مترافقة تحتوي على روابط مزدوجة ومفردة متناوبة، مما يتيح عدم تموضع للسحب الإلكترونية عبر الجزيء. هذه البنية تمكن الإلكترونات من امتصاص فوتونات الضوء بأطوال موجية محددة، مما يؤدي إلى انتقالات إلكترونية بين الحالة الأساسية والحالة المثارة، والتي تعرف بانتقالات $n \rightarrow \pi^*$ و $\pi \rightarrow \pi^*$ [4]

تلعب هذه الأنظمة الإلكترونية دوراً حاسماً في تحديد خواص اللون وفعالية أمتصاص الضوء في العديد من التطبيقات، بما في ذلك الأصباغ الصناعية والخلايا الشمسية العضوية، حيث تؤثر طبيعة الكروموفور وهيكله على مدى أمتصاص الطيف الضوئي [5].

إلى جانب الكروموفورات، تساهم مجموعات وظيفية تعرف باسم الأوكسوكرومات مثل OH- و NH_2- في تعزيز شدة اللون وتحسين القدرة الأمتصاصية للصبغة، ترتبط هذه المجموعات بالكروموفور وتعمل على توسيع النظام المترافق من خلال توفير أزواج إلكترونات غير رابطة، مما يزيد من احتمالية حدوث الانتقالات الإلكترونية ويعزز من أمتصاص الضوء في أطوال موجية أطول، كما أن هذه المجموعات تُضفي طابعاً قطبياً على الجزيء، مما يحسن من التفاعل بين الصبغة والوسط المحيط [6].

تختلف الأصباغ في ألوانها تبعاً لاختلاف ترتيب وتوزيع المدارات الجزيئية في الكروموفور. عند تعرض الجزيء للضوء، تمتص الكروموفورات أطوالاً موجية محددة، مما يؤدي إلى انتقالات إلكترونية بين مستويات طاقة معينة. تعرف هذه الظاهرة بعملية التلون، حيث يظهر اللون المرئي بناءً على الأطوال الموجية غير الممتصة [7]

I-1-2-1-1-الأنواع المختلفة من الكروموفورات

1. **كروموفور جذري:** هو عبارة عن ذرة واحدة غير مشبعة (أي أن غلافها الخارجي لا يحتوي على العدد الكامل من الإلكترونات). على سبيل المثال، ذرة كربون محاطة بسبعة إلكترونات بدلاً من ثمانية.
2. **كروموفور ثنائي الجذور:** يتكون من ذرتين غير مشبعتين، مثل المجموعة الأزوية التي اكتشفها Witt، والمتمثلة في الرابطة N=N- ، حيث لا تحيط بكل ذرة نيتروجين سوى سبعة إلكترونات.
3. **كروموفور أيوني:** مثل الموجود في ترايفينيل ميثيل $(\text{C}_6\text{H}_5)_3\text{C}^+$ ، حيث تكون ذرة الكربون عبارة عن كاتيون (أيون موجب) بسبب فقدانها لأحد إلكتروناتها المحيطية. في هذه الحالة، يشكل الكربون ثلاث أزواج إلكترونات فقط ويحاط بستة إلكترونات، وبالتالي يبقى غير مشبع.
4. **كروموفور ثنائي القطبية:** يتكوّن من ذرتين تختلفان في السالبية الكهربائية، كالمجموعة الكربونيلية C=O ، حيث تكون الرابطة المزدوجة أكثر انجذاباً نحو ذرة الأكسجين ذات السالبية الكهربائية الأعلى.

I-1-2-1-1-المجموعات الكروموفورية (Chromophores).

من أبرز مجموعات الكروموفورات المستخدمة في الصناعات الصبغية:

1. **مجموعة الأزو (N=N-):** تشكل نواة أمتصاص فعالة نتيجة لترافقها مع حلقات عطرية، وتظهر ألواناً تتراوح بين الأصفر والبرتقالي والأحمر، حسب نوع المجاميع المرتبطة بها.
2. **مجموعة النيترو (NO_2-):** تعمل كمجموعة ساحبة للإلكترونات، وتُظهر عادة ألواناً صفراء إلى برتقالية.

3. مجموعة النيتروزو (NO-): ذات قدرة أمتصاصية محدودة، وتنتج غالباً ألواناً صفراء باهتة.
 4. الرابطة المزدوجة الكربونية (C=C-): تساهم في تكوين أنظمة π مترافقة، ما يعزز الامتصاص في الأطوال الموجية الأقرب للضوء المرئي.
 5. مجموعة الكربونيل (C=O=): تسهم الإلكترونات غير المرتبطة على الأوكسجين في أمتصاص الضوء من خلال انتقالات $n \rightarrow \pi^*$ ، ما ينتج عنه ألوان من الأصفر إلى الأحمر.
 6. مجموعة الثيوني (C=S=): تُستخدم في تركيب الأصباغ الكبريتية، وتُظهر ألواناً داكنة كالأصفر والبرتقالي، نظراً لقدرة الكبريت على المشاركة في الترافق الإلكتروني الموسع.
- يرتبط اللون النهائي الناتج عن الصبغة بكل من طول سلسلة الترافق، وطبيعة المجاميع المانحة والساحبة، وشكل الجزيء ثلاثي الأبعاد، ما يجعل من فهم سلوك الكروموفورات ضرورة أساسية في تصميم الأصباغ الحديثة

[8]

I-1-2-1-2-المجموعات الأوكسوكرومية (Auxochromes)

من أبرز مجموعات الأكسوكرومية مستعملة

1. الأمينو (NH_2-): تعد مجموعات الأمينو مانحة للإلكترونات، وتحدث إزاحة في الأمتصاص نحو أطوال موجية أكبر، مما يؤدي إلى ظهور ألوان أكثر قتامة.
2. الميثيل أمينو (NHCH_3-): هذه المجموعات أيضاً مانحة للإلكترونات ولها تأثير مشابه لمجموعات الأمينو.
3. الدايميثيل أمينو ($\text{N(CH}_3)_2-$): هذه المجموعات مانحة قوية للإلكترونات، وتنتج تأثيراً مشابهاً لمجموعات الأمينو والميثيل أمينو.
4. الهيدروكسيل (OH-): تعمل كمجموعة مانحة للإلكترونات، وتؤدي إلى تأثير مشابه لتأثير الأمينو.
5. الألكوكسي (OR-): هذه المجموعات أيضاً مانحة للإلكترونات، ولها تأثير مماثل لتأثير الأمينو [9]

I-2-2-1-تصنيف الأصباغ النسيجية

تعد المصطلحات المستخدمة في تسمية الأصباغ العضوية معقدة وغير موحدة. ويمكن التمييز بين فئتين رئيسيتين من التصنيفات [10]:

I.1.3.1.1 التصنيف الكيميائي

يستند تصنيف الأصباغ حسب تركيبها الكيميائي إلى طبيعة المجموعة الكروموفورية [15]:

1. الأصباغ الأنثراكينونية

2. الأصباغ الإنديجونية

3. الأصباغ الزانثينية

4. الفثالوسيانينات

5. الأصباغ النيتروية والنيتروزية

I-1-3-2-التصنيف الصبغي (التصنيف التينكتوري)

يقوم المصنعون عادة بتصنيف الأصباغ بناءً على تركيبها الكيميائي، في حين يفضل خبراء الصباغة تصنيفها حسب مجالات الاستخدام. ويعد هذا التصنيف مهماً لأنه يحدد قابلية ذوبان الصبغة في حمام الصباغة، ومدى ارتباطها بأنواع الألياف المختلفة، وكذلك طبيعة تثبيتها على هذه الألياف.

تختلف قوة تثبيت الصبغة باختلاف نوع الروابط التي تتكون بين الصبغة والركيزة، والتي قد تكون روابط أيونية، أو هيدروجينية، أو قوى فان دير فالس، أو روابط تساهمية. وتلعب المجموعات المساعدة على التلوين، أو ما يعرف بالاكسوكرومات، دوراً أساسياً في تحديد قوة تثبيت الصبغة على النسيج [11].

1. الأصباغ الحمضية أو الأنيونية

2. الأصباغ القاعدية أو الكاتيونية

3. الأصباغ الفاتية

4. الأصباغ المباشرة

5. الأصباغ الموردة

6. الأصباغ التفاعلية

7. الأصباغ المبعثرة

8. الأصباغ الكبريتية

I-1-4-مخاطر تصريف الأصباغ النسيجية

الجدول I-1: جدول يوضح مخاطر تصريف الأصباغ النسيجية

مخاطر الواضحة	مخاطر طويلة الأمد
الأثار الغذائية (ENTROPHISATION)	الاستدامة (مقاومة العالية لتحليل البيولوجي)
نقص الأكسجين (SOOU OXYGENATION)	التراكم الحيوي (BIOACCUMULATION)
اللون والعكارة والرائحة	النواتج الثانوية للكlor

I-2-معالجة المياه

معالجة المياه تشير إلى مجموعة العمليات التي تهدف إلى تحسين جودة المياه من خلال إزالة الملوثات الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية، بحيث تصبح المياه مناسبة للاستخدامات المختلفة مثل الشرب أو الصناعة أو الري. تتضمن هذه العمليات تقنيات متنوعة مثل الترسيب، الترشيح، والتعقيم، وتساعد على ضمان توافق المياه مع المعايير الصحية والبيئية المطلوبة [12]

I-2-1-معالجة المياه من الأصباغ

عندما لا تلتصق الأصباغ المستخدمة في صباغة الأقمشة أو المواد الأخرى جيدًا بالسطح، فإنها تنتهي في مياه الصرف الصناعي. وتشكل هذه الأصباغ خطرًا بيئيًا وصحيًا، لذا أصبحت إدارة مياه الصرف المحتوية على الأصباغ من التحديات الكبرى. تختلف نسبة تثبيت وفقدان الأصباغ حسب نوع الصبغة ونوع الألياف المستخدمة التي تتم معالجتها في مصحات صرف الصحي وتتك معالجتها في محطات الصرف الصحي نحو التالي

I-2-1-1-المعالجة الأولية

الهدف من المعالجة الأولية هو إزالة المواد غير الذائبة والملوثات الطافية التي قد تعيق كفاءة المراحل اللاحقة. وتشمل هذه العمليات:

- إزالة الأجسام الكبيرة: باستخدام شبكات أو فلاتر ميكانيكية لحجز الأجسام الكبيرة مثل قطع القماش أو البلاستيك.
- إزالة الرمال: يتم ذلك عن طريق الترسيب في أحواض خاصة للتخلص من الجسيمات الثقيلة مثل الحصى.
- إزالة الزيوت والشحوم: يتم ذلك استخدام فواصل تعتمد على فرق الكثافة أو أنظمة طفو.
- هذه المرحلة لا تزيل الملوثات الكيميائية، لكنها ضرورية لحماية وحدات المعالجة التالية [13].

I-2-1-2- المعالجة الفيزيائية والكيميائية

تستهدف هذه المرحلة إزالة الأصباغ، المواد العضوية المعقدة، والمعادن الثقيلة. وهي تنقسم إلى:

2- المعالجة الفيزيائية

التخثير والتلبد: بإضافة مواد كيميائية تسبب تجمع الجزيئات الدقيقة في كتل يمكن ترسيبها.

الامتزاز: باستخدام الكربون النشط أو مواد أخرى لأمتصاص الملوثات من المياه.

الترشيح الغشائي: مثل التناضح العكسي والترشيح الفائق لإزالة الملوثات الصغيرة جداً.

التحلل الحراري: معالجة الرواسب بطرق حرارية لإنتاج طاقة أو مواد غير ضارة.

1- المعالجة الكيميائية

الأكسدة التقليدية: باستخدام الأوزون أو بيروكسيد الهيدروجين لتكسير المركبات العضوية.

الاختزال الكيميائي: مثل استخدام ثنائي كبريتيت الصوديوم لتقليل المواد المؤكسدة الضارة.

عمليات الأكسدة المتقدمة: مثل H_2O_2/UV و Fenton لإنتاج جذور حرة فعالة في تدمير الملوثات العضوية المعقدة

[14، 15].

I-2-1-4-المعالجة البيولوجية

تعتمد هذه الطريقة على استخدام كائنات دقيقة لتحليل المواد العضوية. وتنقسم إلى نوعين:

1. **المعالجة الهوائية:** يتم استخدام بكتيريا هوائية لتحويل الملوثات العضوية إلى ثاني أكسيد الكربون وماء. لكنها

غالباً غير فعالة في معالجة مياه الصرف التي تحتوي على أصباغ أو مركبات مقاومة للتحلل. [16]

2. **معالجة اللاهوائية:** تستخدم بكتيريا تعمل دون أكسجين وتقوم بتحويل المركبات العضوية إلى غازات مثل

الميثان، ويمكن استغلالها لإنتاج الطاقة. وهي مناسبة للنفايات ذات التركيز العضوي العالي [15].

في بعض الحالات، يتم الجمع بين المعالجة الهوائية واللاهوائية لتحسين كفاءة إزالة الملوثات وتقليل إنتاج الحمأة [17].

I-3-2-عمليات إزالة الأصباغ

تعد مياه الصرف الناتجة عن صناعة النسيج من أبرز مصادر التلوث الصناعي، نظراً لأحتوائها على كميات كبيرة من

الأصباغ الاصطناعية، نتيجة لهذه التحديات، طورت العديد من التقنيات لإزالة الأصباغ من مياه الصرف، من بينها المعالجة

الكيميائية، الأكسدة المتقدمة، التبادل الأيوني، والترشيح الغشائي. ومع ذلك، يبقى الامتزاز من أكثر الطرق فعالية وانتشاراً.

I-3-1-تعريف الامتزاز

الامتزاز هو عملية فيزيائية-كيميائية يحدث فيها تراكم للجزيئات أو الذرات على سطح مادة صلبة، دون أن تنفذ إلى

داخلها. يمكن أن يكون هذا التراكم ناتجاً عن روابط فيزيائية مثل قوى فان دير فالس، أو روابط كيميائية أكثر تعقيداً مثل التشارك

الإلكتروني. تصل العملية إلى حالة من التوازن عندما تصبح معدلات الامتزاز والتحرر متساوي

I-3-2-الأنواع المختلفة للامتزاز

تصنف عملية الامتزاز إلى نوعين رئيسيين حسب طبيعة وقوة التفاعلات بين سطح المادة الصلبة والجزيئات الممتزة،

وهما الامتزاز الفيزيائي والامتزاز الكيميائي.

I-3-2-1-الامتزاز الفيزيائي (Physisorption)

يعتمد الامتزاز الفيزيائي على قوى تجاذب ضعيفة مثل قوى فان دير فالس والتفاعلات الكهروستاتيكية، التي تسمح بتجمع الجزيئات على سطح المادة الصلبة دون حدوث تغير كيميائي في طبيعتها. تتميز هذه العملية بسرعة الحدوث وقابليتها للعكس، وتسمح بتكوين طبقات متعددة من الجزيئات على السطح. تتراوح طاقة الترابط في الامتزاز الفيزيائي عادة بين 3 و 10 كيلو كالوري لكل مول، وتتأثر بشدة بمساحة السطح ودرجة الحرارة حيث تقل كفاءته مع ارتفاع الحرارة. [18، 19]

I-3-2-2-الامتزاز الكيميائي (Chemisorption)

يختلف الامتزاز الكيميائي بأنه يتضمن تكوين روابط كيميائية قوية، مثل الروابط التساهمية أو الأيونية، بين المادة الممتزة وسطح المادة الصلبة. غالبا ما تكون هذه العملية غير قابلة للعكس، وتؤدي إلى تغير في البنية الإلكترونية للجزيئات الممتزة. يقتصر الامتزاز الكيميائي على طبقة جزيئية واحدة فقط على السطح، وتكون حرارة التفاعل في نطاق 20 إلى 100 كيلو كالوري لكل مول، مما يدل على قوة الروابط المتكونة. يستخدم هذا النوع في التطبيقات التي تتطلب تفاعلات سطحية قوية مثل التحفيز غير المتجانس وتخزين الطاقة [20، 21]

I-3-3-سعة الامتزاز

سعة الامتزاز هي مقياس يدل على قدرة مادة صلبة على احتجاز مادة ملوثة موجودة في محلول مائي، وتُعبّر عن العلاقة بين كمية المادة الممتزة (مثل الصبغة أو المعدن الثقيل) على سطح المادة الصلبة، وكمية المادة المتبقية في المحلول بعد تحقيق التوازن. يتم التعبير عنها بالمعادلة التالية:

$$q = \frac{(c_0 - c_t)}{m_{adsorbant}} V$$

q : سعة الامتزاز للمادة الداعمة (g/mg).

c₀ : التركيز الابتدائي (l/mg) عند الزمن t=0.

c_t : تركيز المادة الملونة (l/mg) عند الزمن t من عملية الامتزاز.

V : حجم المحلول (l).

m_{adsorbante} : كتلة المادة الممتزة (g).

تتأثر سعة الامتزاز بعدة عوامل مثل حجم الجزيئات، درجة ذوبانها في الماء، نوع الروابط الكيميائية، إضافة إلى خصائص سطح المادة الممتزة مثل المسامية، المساحة السطحية النوعية، والبنية التركيبية. [21]

I-3-4-العوامل المؤثرة على الامتزاز

توجد مجموعة من العوامل التي تؤثر بشكل مباشر على كفاءة وسرعة عملية الامتزاز، وهي كما يلي:

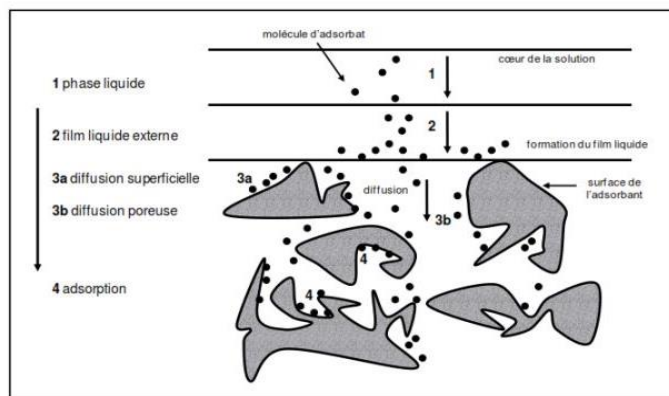
1. خصائص المادة الممتزة
2. خصائص الممتز
3. المساحة السطحية النوعية
4. تأثير درجة الحرارة
5. تأثير الرقم الهيدروجيني (pH)
6. البنية الجزيئية للمادة الممتزة الكتلة الجزيئية للمادة الممتزة

I-3-5-حركية الامتزاز

تمثل حركية الامتزاز دراسة سرعة انتقال الجزيئات الممتزة من الطور السائل إلى سطح المادة الصلبة. وتلعب هذه الظاهرة دوراً مهماً في تحديد فعالية الامتزاز، إذ ترتبط بسعة الامتزاز النهائية وسرعة الوصول إلى التوازن.

تنقسم عملية الامتزاز إلى أربع مراحل رئيسية:

1. الانتشار الخارجي: تبدأ العملية بانتقال جزيئات المادة المذابة من السائل المحيط إلى سطح الجسيمات الصلبة، ويحدث ذلك عبر الحمل والانتشار الحراري.
2. الانتقال إلى السطح الخارجي: تنتقل الجزيئات من الطبقة السائلة المحيطة إلى السطح الخارجي للمادة الممتزة، ويتحكم في هذه المرحلة معامل انتقال الكتلة الخارجي (k_f).
3. الانتشار داخل الجسيمات: تتحرك الجزيئات داخل مسام الجسيمات الصلبة بفعل تدرج التركيز، إما في حالتها الحرة داخل السائل الداخلي (بمعامل D_f) أو في حالتها الممتزة من موقع إلى آخر على السطح (بمعامل D_s).
التثبيت النهائي على السطح: في هذه المرحلة، تتفاعل الجزيئات مع السطح وتثبت عبر روابط فيزيائية أو كيميائية [22]



الشكل I-1: المراحل المختلفة لانتقال مادة مذابة أثناء امتزازها على مادة ميكروية المسام الخطوة الرابعة الامتزاز أو التثبيت.

I-4-أنواع مختلفة من المواد المازة

صنفت المواد المازة إلى خمسة أنواع رئيسية: الفحم النشط، الزيوليتات، الألومينات، هلام السليكا، والطين ويتميز الفحم النشط بمكانية الحصول عليه من مخلفات العضوية وغيرها وبمساحة سطحية واسعة وقدرة امتزازية عالية، تجعله من أكثر المواد استخدامًا في إزالة المركبات العضوية والغازات في تطبيقات معالجة المياه والهواء.

I-4-1-الفحم النشط

الكربون النشط هو مادة كربونية مسامية ذات مساحة سطحية عالية تستخدم في الامتزاز وإجهاض الملوثات من السوائل والغازات، ويتم تحضيره من مواد عضوية غنية بالكربون بواسطة عمليات الكربنة والتنشيط الحراري أو الكيميائي [23]

I-4-1-2-أصل الفحم النشط

الفحم النشط هو مادة مازة قديمة التصنيع، يتم إنتاجه من مصادر مختلفة غنية بالكربون وتنقسم إلى ثلاثة أنواع رئيسية [24]:

- فحم نشط من أصل معدني
- فحم نشط من أسود العظم
- فحم نشط من أصل نباتي

I-4-2-تحضير الفحم النشط:

الفحم النشط يخضع لعملية تفعيل مهمة تهدف إلى تحسين خصائصه الفيزيائية والكيميائية.

تتم عملية التفعيل بطريقتين رئيسيتين: التفعيل الحراري والتفعيل الكيميائي [25]

I-4-2-1-التنشيط:

تعد عملية تنشيط الفحم النشط خطوة حاسمة لتحسين خصائصه السطحية وزيادة قدرته على الامتزاز، حيث تهدف إلى تطوير المسامية وإنشاء مواقع فعالة على سطح المادة. ويمكن تنفيذ هذه العملية من خلال طريقتين رئيسيتين: التنشيط الفيزيائي والتنشيط الكيميائي.

I-4-2-1-1-التنشيط الفيزيائي:

يتم تسخين الفحم عند درجات حرارة تتراوح بين 800 و 1000 درجة مئوية بوجود غازات مؤكسدة مثل بخار الماء أو ثاني أكسيد الكربون.

I-4-2-1-2-التنشيط الكيميائي:

يعتمد على معالجة المادة الأولية بمركبات كيميائية مثل حمض الفوسفوريك أو كلوريد الزنك، ثم يتم تسخينها عند درجات حرارة أقل نسبيًا (بين 400 و 800 درجة مئوية) في بيئة خالية من الأكسجين. تسهم هذه الطريقة في تكسير الروابط داخل الهيكل الكربوني ينتج عن كلتا الطريقتين فحم نشط ذو بنية مسامية متنوعة تتراوح بين المسام الدقيقة والواسعة، مما يتيح أمتصاص مجموعة واسعة من الملوثات، سواء كانت عضوية أو غير عضوية. هذا التنوع في حجم وشكل المسام هو عامل أساسي لتحقيق أداء امتزازي [26]

I-4-2-2-الكربنة:

عملية التفحيم (الكربنة) في إنتاج الفحم النشط تعد عملية التفحيم، أو الكربنة، خطوة أساسية في تصنيع الفحم النشط، حيث يتم تحويل المواد العضوية إلى مواد كربونية صلبة من خلال التحلل الحراري في بيئة خالية من الأكسجين.

الخطوات الأساسية للتفحيم:

1. **التحلل الحراري:** تسخن المادة الأولية تدريجيًا إلى درجات حرارة تتراوح بين 400 و 800 درجة مئوية في بيئة خالية من الأكسجين، مما يؤدي إلى تفكك المركبات العضوية وإزالة المواد المتطايرة.
 2. **تكوين الفحم الصلب:** ينتج عن هذه العملية مادة كربونية صلبة تُعرف بالفحم الخام، والتي تحتوي على نسبة عالية من الكربون وبنية مسامية محدودة.
 3. **التحسين اللاحق:** نظرًا لأن الفحم الخام الناتج من التفحيم يمتلك مساحة سطحية منخفضة (حوالي 10 م²/جم)، فإنه يتطلب عملية تنشيط لاحقة (فيزيائية أو كيميائية) لزيادة المسامية وتحسين خصائص الامتزاز.
- درجة حرارة التفحيم مؤثر بشكل كبير على خصائص الفحم الناتج، حيث تؤدي درجات الحرارة المرتفعة إلى زيادة في نسبة الكربون وتحسين في الاستقرار الحراري، ولكنها قد تقلل من بعض الخصائص السطحية المهمة للامتزاز.

I-4-3-الأشكال المختلفة للفحم النشط

هناك أكثر من 100 نوع من الفحم النشط لتلبية جميع التطبيقات [27].

نذكر ثلاث أنواع رئيسية شهيرة

I-4-3-1-الفحم النشط الحبيبي (Granular Activated Carbon -GAC)

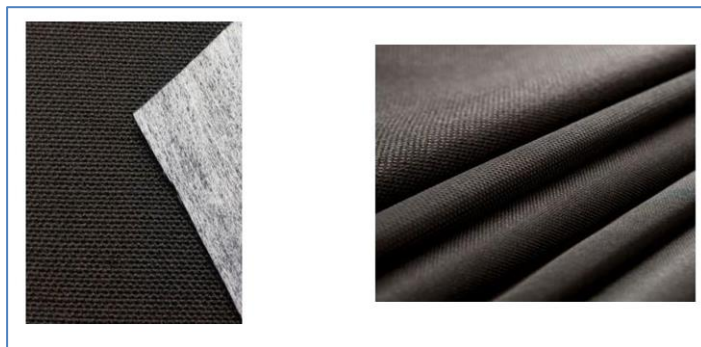
الفحم النشط الحبيبي ينتج على شكل حبيبات يزيد حجمها عن 1 ملليمتر. يتميز هذا النوع بمساحة سطح داخلية كبيرة ومساحة سطح خارجية صغيرة نسبيًا. نتيجة لذلك، تكون ظواهر الانتشار داخل المسام ذات أهمية كبيرة في عمليات الامتزاز، مما يؤدي إلى بطء سرعة الامتزاز مقارنةً بالفحم النشط المسحوق. يستخدم هذا النوع بشكل واسع في معالجة المياه والهواء، وأشارت الدراسات الحديثة إلى أن زمن الوصول إلى حالة التوازن في الامتزاز قد يصل إلى 12 ساعة، مع ساعات امتزاز تتراوح بين 76 و206 ملليغرام لكل غرام من الفحم. [28]



الشكل I-2: الفحم النشط الحبيبي (GAC)

I-4-3-2-الفحم النشط النسيجي (Activated Carbon Fabric -ACF)

يحضّر الفحم النشط النسيجي من ألياف نباتية أو صناعية مثل الرايون أو اللجنين، ويتميز ببنية ميكروية متطورة جدًا ومساحة سطحية عالية جدًا قد تصل إلى 3110 متر مربع لكل غرام. هذه البنية تجعله أكثر كفاءة مقارنةً بالأنواع الأخرى في عمليات الامتزاز، لما يتمتع به من سرعات أعلى وساعات امتزاز أكبر. يستخدم في تطبيقات متعددة مثل معالجة المياه وتنقية الهواء. [29]



الشكل I-3: الفحم النشط النسيجي (CAT)

I-3-4-3-الفحم النشط المسحوق (Powdered Activated Carbon -PAC)

يتكون الفحم النشط المسحوق من جسيمات دقيقة يتراوح حجمها بين 1 و 100 ميكرومتر. تتميز هذه الجسيمات بسطح خارجي واسع ومساحة سطحية عالية تتراوح بين 500 و 1500 متر مربع لكل غرام، مما يمنحه سرعة امتزاز مرتفعة. يستخدم الفحم النشط المسحوق بشكل شائع في معالجة المياه الصناعية ومياه الصرف، وقد أظهرت الدراسات أنه قادر على إزالة حتى 99.9% من المضادات الحيوية من المياه خلال 120 دقيقة. [12]

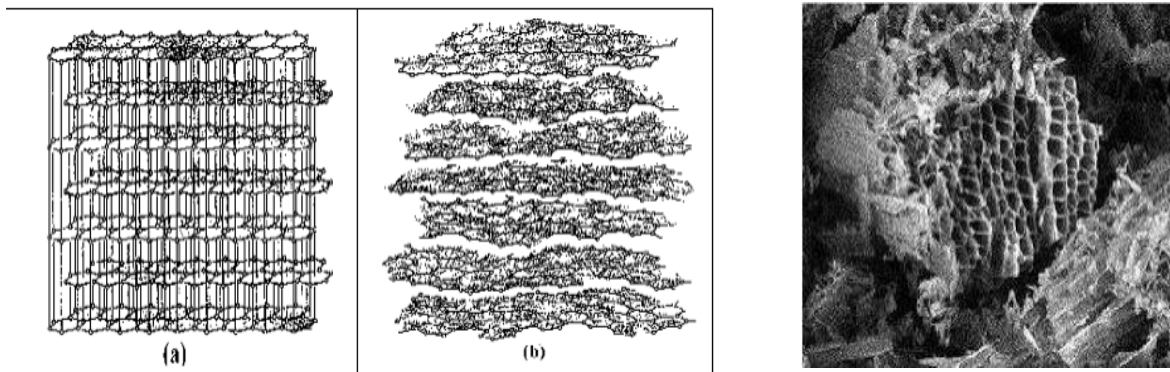


الشكل I-4: الفحم النشط المسحوق (CAP).

قبل اختيار نوع الفحم النشط الأنسب لتطبيق معين، من الضروري فهم مزايا وعيوب كل نوع.

I-4-4-بنية الفحم النشط

تتكون بنية الفحم النشط من صفائح كربونية غير منتظمة تعرف باسم الغرافين، وهي طبقات ثنائية الأبعاد من ذرات الكربون المرتبة على شكل شبكة سداسية تشبه خلية النحل. تترتب هذه الصفائح بشكل عشوائي، مما يؤدي إلى تشكل مسام متعددة الأحجام، تشمل المسام الدقيقة (micropores)، والمسامات المتوسطة (mesopores)، والمسام الكبيرة (macropores).



الشكل 5-I بنية الفحم النشط

5-I-مصدر للفحم النشط:

تعددت مصادر تحضير الفحم النشط لتشمل العديد من المواد الطبيعية الغنية بالكربون مثل الخشب، قشور جوز الهند، نوى الزيتون، وبقايا المحاصيل الزراعية. ومن بين هذه المصادر يبرز عرجون النخيل كمادة أولية واحدة نظراً لتوفره بكميات كبيرة وإنخفاض تكلفته، إضافة إلى قابليته للتحويل إلى مادة ماصة فعالة قادرة على المساهمة في تنقية المياه ومعالجة الملوثات البيئية.

5-I-1-شجرة النخيل (*Phoenix dactylifera* L)

تُعتبر من الأشجار المثمرة القديمة والمهمة التي تزرع بشكل واسع في المناطق الجافة والحارة، خاصة في الشرق الأوسط وشمال إفريقيا. تتميز هذه الشجرة بقدرتها العالية على تحمل الظروف البيئية القاسية مثل الجفاف وارتفاع درجات الحرارة، مما يجعلها ذات أهمية اقتصادية وزراعية كبيرة في المناطق الصحراوية. يبلغ ارتفاع النخلة عادة ما بين 15 إلى 30 متراً، وتنمو بجذع أسطوانيين متين، وتُتَوَّج بأوراق ريشية الشكل. تبدأ النخلة في إنتاج الثمار بعد حوالي 4 إلى 8 سنوات من الزراعة، وتستمر في الإثمار لأكثر من 60 عاماً، حيث تصل إلى ذروة إنتاجها بين 30 و40 عاماً. ثمار النخيل، وهي التمور، غنية بالكربوهيدرات والألياف والمعادن، وتُعد مصدراً مهماً للطاقة في المناطق التي تزرع فيها. تستخدم التمور أيضاً في العديد من الصناعات الغذائية التقليدية مثل صناعة العجوة والدبس. تنتشر زراعة النخيل في مناطق واسعة تمتد من شبه الجزيرة العربية إلى شمال إفريقيا وجنوب آسيا، وتعتمد على موارد مائية محدودة بفضل قدرة النخيل على التكيف مع الظروف الصحراوية القاسية [30]

5-I-2- تصنيف شجرة النخيل الي فئة النباتات الفلقة [30]

الجدول 2-I: التصنيف الفيزيائي والكيميائي لشجرة النخيل

التصنيف الوصفي لعرجون النخيل		
النباتات	المملكة	
البذور	الشعبة مغطاة	

ثنائية الفلقة	الطائفة	التصنيف النباتي
الفوفليات	الرتبة	
الفوفلية	العائلة	
النخيل	الجنس	
العرجون	النوع	
دائمة الخضار يمكن أن تصل الي أكثر من 20مترا ارتفاع النخلة الكامل	أشجار	تصنيف الوصفي
ريشة طويلة خضرا تحمل أزواجا من الوريقات الحادة	الأوراق	
أحادية الجنس حيث توجد أزهار مذكرة ومؤنثة على نباتات منفصلة	الأزهار	
تمر يتحول خلال نضجه الي مراحل مختلفة منها مرحلة العرجون حيث يصبح العنقود جافا ومنحنيا قليلا	الثمار	
لمكوّن الرئيسي لجدران الخلايا النباتية، ويوفر القوة والدعامة لبنية العرجون الجافة.	السليولوز	التصنيف الكيميائي
مجموعة من السكريات المرتبطة بالسليولوز، تسهم في صلابة العرجون.	الهيميسليولوز	
بوليمر معقد يعمل على ربط ألياف السليولوز، مما يكسب العرجون الصلابة ومقاومة الرطوبة	اللجنين	
مواد صمغية قليلة نسبياً، قد تساهم في حماية العرجون من الحشرات والظروف البيئية.	الراتنجات	
مركبات تمنح العرجون رائحته الخفيفة المميزة عند جفافه.	المركبات العطرية	
مركبات عضوية خفيفة متبخرة، قليلة الوجود في العرجون مقارنة بالثمار الناضجة.	الزيوت الأساسية	
مركبات عضوية حلقة تسهم جزئياً في النكهة والرائحة الطبيعية للعرجون المجفف.	التربينويدات	
مركبات عضوية تحتوي على حلقة بنزين ومجموعة هيدروكسيل، قد تسهم في الخصائص المضادة للأكسدة للعرجون.	الفينولات	

I-3-5-التركيب الكيميائي وخصائص مقاومة الماء لعرجون النخيل

يتألف عرجون النخيل بشكل رئيسي من السليلوز والهيميسليلوز واللجنين، حيث يمثل اللجنين 20-30% من الكتلة الجافة. يعتبر اللجنين المكون الأساسي المسؤول عن مقاومة العرجون للرطوبة بسبب طبيعته الكارهة للماء. كما يحتوي العرجون على نسب صغيرة من المركبات الشمعية والمواد الكارهة للرطوبة بنسبة تتراوح بين 1-3%. رغم ذلك، يحد التركيز العالي للسليلوز والهيميسليلوز، اللذين يمتلكان قدرة عالية على امتصاص الماء، من مقاومة العرجون للرطوبة مقارنة ببعض الأخشاب التي تحتوي على راتنجيات طبيعية أكثر، مثل خشب الصنوبر. لذلك غالبًا ما يتطلب الاستخدام الصناعي للعرجون معالجات إضافية مثل التشريب بالراتنجيات أو الطلاء بمواد مقاومة للماء لتحسين أداء العرجون في البيئات الرطبة. [31]



الشكل I-6 شجرة النخيل

II- الجانب العملي

II-1-مقدمة

قدم هذا الفصل دراسة تجريبية حول امتزاز صبغة ثلاثية الفينيل ميثان، الإيثيل البنفسجي، على مادة طبيعية، وهي الفحم النشط المسحوق المستخرج من عرجون النخيل.

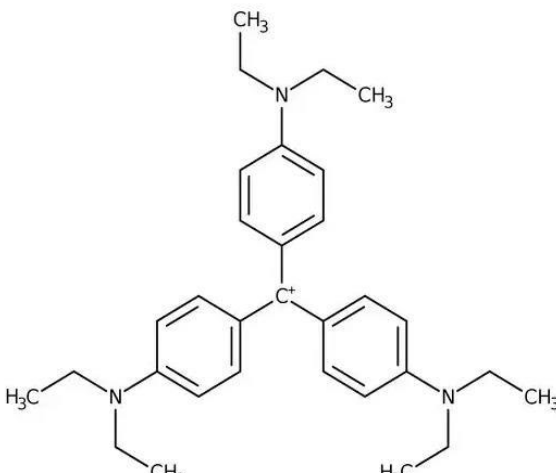
II-2-اختيار الصبغة

تم استيفاء المعايير التالية لأختيار الصبغة:

- ذوبانية عالية في الماء.
- ضغط بخار منخفض أو منعدم.
- ثباتية طويلة الأمد.

جميع خصائص الإيثيل البنفسجي ملخصة في الجدول (II.1).

II-1: خصائص الفيزيائية والكيميائية لإيثيل البنفسجي

تعريف المادة	
الإيثيل البنفسجي (EV) Ethyle violet	أسم الشائع
(N-(4-(bis (4-(diethylamino) phényle •Ethanaminium ،-5-cyclo hexadien-1-ylidine)-N-éthyle ،méthylène)-2 chlorure	أسم الكيميائي
C ₃₁ H ₄₂ ClN ₃	الصبغة الجزائية
492.158 g	الكتلة المولية
	
البنية الكيميائية	

الخصائص الفيزيائية	
الكثافة	1.10
المظهر	صلب بلون الخضر بنفسجي داكن
امتصاص	أقصى امتصاص عند طول موجي nm596
الرائحة	عديم الرائحة
التطاير	ضئيل جدا مهمل
السلوك مع تغير الأس الهيدروجيني (PH)	
من 0.1 الي 3.5 ينتقل اللون من أصفر الى أزرق من 3.5 الي 14 ينتقل اللون من أزرق الى بنفسجي	
الاستخدامات	يستخدم لصبغات القمشة

II-3-المواد الكيميائية والمعدات المستخدمة

أدت التجارب المنجزة خلال هذه الدراسة وتحت ظروف مختلفة إلى استخدام المواد ذات الجودة التحليلية التالية:

- الإيثيل بنفسجي ($C_{31}H_{42}ClN_3$)
- الدعائم: الفحم النشط المسحوق
- حمض الفوسفوريك (H_3PO_4) من شركة Honeywell Fluka (كثافة = 1.71)
- هيدروكسيد الصوديوم (NaOH) من شركة Speccilab
- كلوريد الصوديوم (NaCl) من نوع Analar Nomapur حمض الكبريتيك (H_2SO_4) بتركيز 98%
- الأجهزة والمواد المستعملة
- تم استخدام الأدوات والأجهزة التالية أثناء إجراء التجارب:
- جهاز التبلور (Cristallisoir)
- حاضنة (Étuve)
- مطحنة كهربائية (Broyeur électrique)
- ميزان حرارة (Thermomètre)
- ميزان تحليلي (Balance analytique)
- ملعقة مختبرية (Spatule)

- جهاز طرد مركزي (Centrifugeuse)
- محرك ميكانيكي مزود بمزدوجة حرارية (Agitateur à thermocouple)
- بوتقات خزفية (Creusets)
- فرن موفل (Four à moufle)
- ورق ترشيح (Papier filtre)
- قنينة غسل (Pissette)
- مكثف (Réfrigérant)
- خلية كوارتز (Cuve en quartz)
- جهاز قياس الرقم الهيدروجيني (pH-mètre)
- أنابيب قياس مدرجة مخبريا (Éprouvettes)
- دورق إيرلنماير (Erlenmeyer)
- بيشرات (Béchers)
- قضيب التحريك المغناطيسي (Barreaux magnétiques)
- جهاز مطياف الامتصاص للأشعة فوق البنفسجية-المرئية (Spectrophotométrie UV-Visible)

II-4- تحضير المحاليل

تم تحضير المحلول الأم من الإيثيل البنفسجي (100 جزء في المليون) عن طريق إذابة كمية مناسبة من ملح في ماء مقطر. أما المحاليل الفرعية اللازمة للتحليل فقد تم تحضيرها من خلال تخفيف المحلول الأم تدريجياً للوصول إلى التراكيز المطلوبة.

لضمان دقة القياسات، تم إنشاء منحنى معايرة يمثل العلاقة بين الكثافات الضوئية (DO) المقاسة عند أقصى طول موجي لأمتصاص اللون، والتراكيز الابتدائية للمحاليل. وقد استخدم هذا المنحنى لاحقاً لتحديد التراكيز المتبقية للصبغة.

II-5- تحضير الفحم النشط على شكل مسحوق

تم جمع عراجين النخيل لشهر فيفري لعام 2025. تم تجفيف كل من عرجون لمدة أسبوعين كاملاً في وسط خالي من أشعة الشمس وتم عرضه على شمس خفيفة لمدة ساعتين ثم طحنه بمطحنة خاصة ورشه بقليل من الماء وتنعيمها باستخدام غرابيل

تم تجفيف المادة الصلبة الناتجة في فرن عند 100 درجة مئوية لمدة 24 ساعة، ثم تم طحنها وتنعيمها باستخدام غرابيل معيارية، مع اختيار حجم جسيمات لا يتجاوز قطرها 2nm.

تمت عملية التنشيط الكيميائي للمسحوق الناتج باستخدام حمض الفوسفوريك (H_3PO_4) بتركيز 30%. حيث تم غمر المسحوق في محلول الحمض الساخن لمدة ساعتين، ثم تُرك منقوعاً في نفس المحلول لمدة 24 ساعة إضافية.

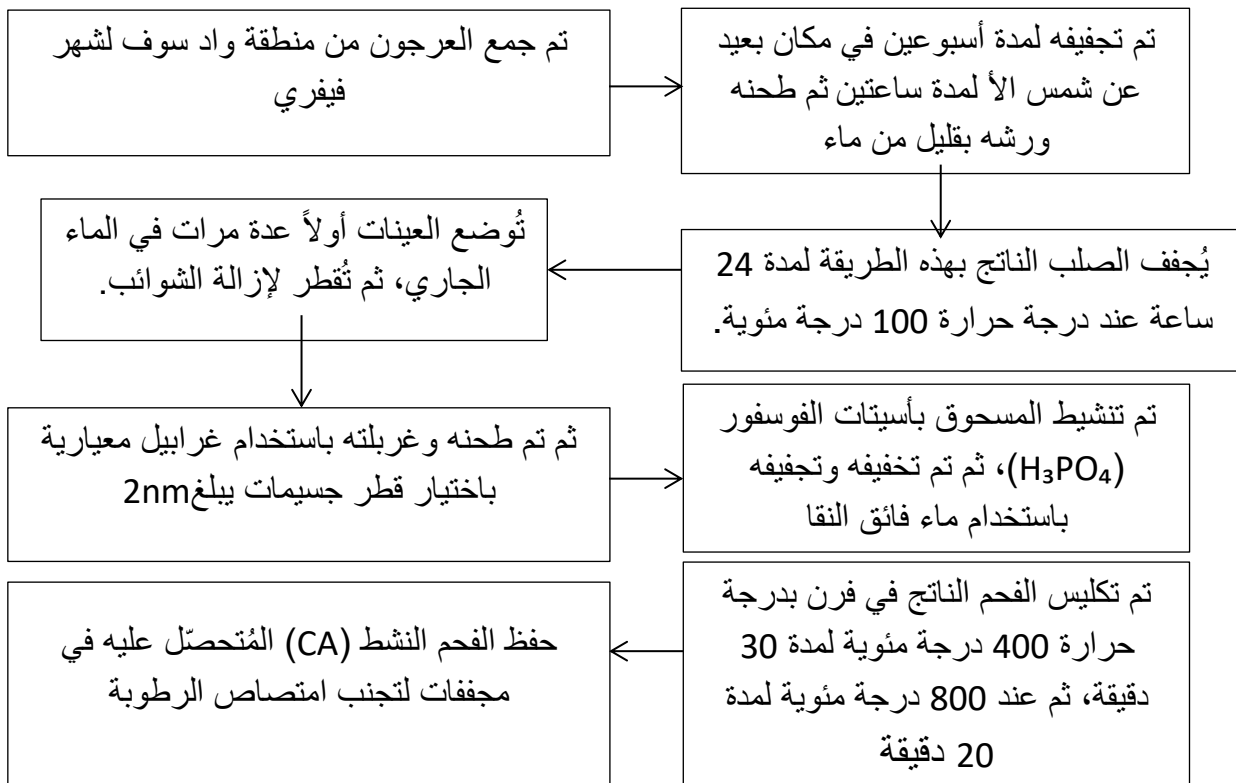
بعد ذلك، تمت إزالة الحمض الزائد بواسطة الترسيب والغسل المتكرر بالماء فائق النقاء لإزالة بقايا الحمض. ثم جففت العينة وأخضع لعملية الكلسنة في فرن موفل، حيث تم تسخينه على مرحلتين:

- عند 400 درجة مئوية لمدة 30 دقيقة،

- ثم عند 800 درجة مئوية لمدة 20 دقيقة.

- تم حفظ الفحم النشط الناتج في مجففات خاصة (Dessiccateurs) لتجنب امتصاص الرطوبة قبل استخدامه في

تجارب الامتزاز.



الشكل II-1: المراحل المختلفة لتحضير الفحم النشط على شكل مسحوق

تتضمن خطوات إجراء تجارب الامتزاز ما يلي:

✓ تحضير محاليل الإيثيل البنفسجي.

✓ إضافة المادة الداعمة (الفحم النشط المسحوق) إلى الدوايق المخروطية (Erlenmeyers).

✓ وضع المحاليل تحت التحريك الميكانيكي بسرعة 25 (tours/s) عند درجة حرارة الغرفة.

✓ أخذ عينات في أوقات تفاعل محددة باستخدام أنابيب الطرد المركزي وجهاز طرد مركزي من نوع (NAHITA 2615) للفصل بين الطورين الصلب والسائل.

✓ تحليل الراشح (filtrat) باستخدام جهاز مطياف الأشعة فوق البنفسجية/المرئية (UV/Visible).

II-6- طرق التحليل

II-6-1- قياس الرقم الهيدروجيني (pH)

تم قياس قيمة pH باستخدام جهاز قياس pH مزود بنظام حاسوب معالج من نوع MILWAUKEE. وقد تم معايرة الجهاز باستخدام محاليل معيارية ذات $pH = 4$, $pH = 7$, $pH = 10$.

تم تعديل قيم pH المختلفة باستعمال حمض الكبريتيك (H_2SO_4) بتركيز ($10^{-2}M$).

وهيدروكسيد الصوديوم (NaOH) بنفس التركيز.

II-6-2- التحليل بواسطة المطيافية فوق البنفسجية/المرئية (UV/Visible)

أستخدم جهاز مطياف الأشعة فوق البنفسجية/المرئية (SHIMADZU UV-3600 PLUS) لإجراء القياسات والتحكم بها عبر نظام حاسوبي.

تمت عمليات المسح الطيفي في المدى بين 200 و 800 نانومتر، باستخدام خلايا كوارتز عرضها يبلغ 1cm.

تم حساب التراكيز المتبقية عبر عملية الاستدلال من منحنى المعايرة.

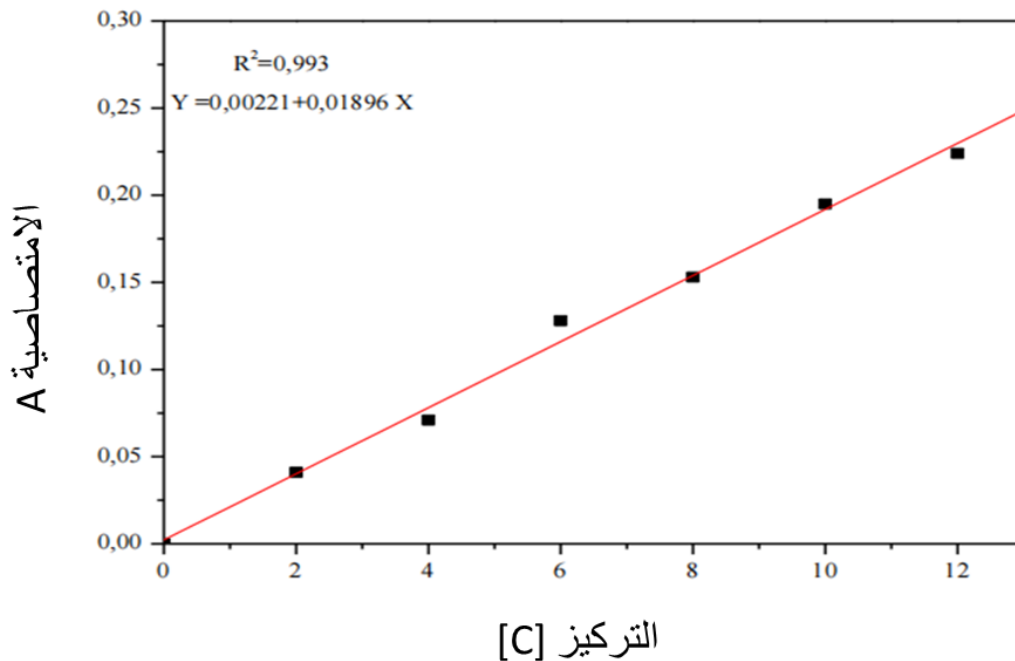
II-6-3- المعايرة (Étalonnage)

أنجزت عملية المعايرة بطريقة بسيطة تعتمد على تحضير سلسلة من المحاليل ذات تراكيز معروفة، تليها عملية القياس الطيفي.

تم رسم منحنى المعايرة الذي يربط بين الكثافة الضوئية (D.O) المسجلة عند طول الموجة الأقصى، والتركيز

الابتدائي للمحاليل (C) بوحدة جزء في المليون (ppm).

يستخدم هذا المنحنى لاحقاً لحساب تراكيز المحاليل المجهولة بالاعتماد على مبدأ الامتزاز.



الشكل II-2: منحنى المعايرة للإيثيل البنفسجي

II-7- النمذجة باستخدام خطط تجارب تاغوتشي TAGUCHI

تتعد طريقة تاغوتشي (Taguchi) في تصميم التجارب أداة فعالة و منظمة لتحسين أداء وجودة العمليات، خاصة في مجال الامتزاز باستخدام الفحم النشط. تساهم هذه الطريقة في تقليل عدد التجارب المطلوبة من خلال استخدام مصفوفات متعامدة (Orthogonal Arrays)، مما يؤدي إلى تقليص التكاليف التجريبية، وتحديد تأثير كل عامل، وتقدير الشروط المثلى للتشغيل، بالإضافة إلى إمكانية التنبؤ بالنتائج لمستويات مختلفة.

في هذا القسم، نسلط الضوء على تطبيق طريقة تاغوتشي في نمذجة حركيات الامتزاز على الفحم النشط، مع التركيز على اختيار تصميم التجربة المناسب.

II-7-1 اختيار تصميم التجربة

تعد طريقة تاغوتشي منهجاً فعالاً لتحسين التصميمات من حيث الأداء والجودة، إذ تساهم في تقليل عدد التجارب المطلوبة عبر استخدام مصفوفات متعامدة، مما يؤدي إلى تقليص التكاليف التجريبية، مع تحديد تأثير كل عامل، وتقدير الشروط المثلى للتشغيل، بالإضافة إلى إمكانية التنبؤ بالنتائج لمستويات مختلفة. تعتمد طريقة تاغوتشي على ترميز المتغيرات بثلاثة مستويات:

المستوى (1-) يمثل القيمة الأدنى للمتغير،

المستوى (0) يمثل القيمة المتوسطة،

المستوى (1+) يمثل القيمة العليا للمتغير.

في دراستنا، تم اعتماد ثلاث متغيرات مستقلة وهي:

- التركيز الابتدائي للمادة الممتزة،

- جرة المادة الممتزة (الفحم النشط)،

- قيمة pH للمحلول.

II-7-2 تطبيق منهجية تاغوتشي TAGUCHI في تجربتنا

تم تصميم الخطة التجريبية لتناسب مع تجربة الامتزاز بنظام دفع دفعة واحدة (batch system).

شمل التصميم دراسة تأثير ثلاثة عوامل، كل منها على ثلاثة مستويات مختلفة، بهدف تحسين إزالة مادة الإيثيل

بنفسجي (EV) من المحلول المائي باستخدام الفحم النشط المحضر.

وقد تم توظيف مصفوفة متعامدة من نوع L9، مما استلزم إجراء تسع (9) تجارب فقط لتغطية جميع التركيبات الممكنة

للعوامل والمتغيرات المختارة.

يعرض تفصيل المتغيرات التشغيلية ومستوياتها المعتمدة في الجدول II.3، والذي يتضمن القيم الدنيا والمتوسطة

والعليا لكل عامل مدروس.

الجدول II-2: المعلومات والمستويات الخاصة بالعملية التجريبية

عوامل	المستويات		
	1	2	3
pH	6	8	10
$[EV]Pmm$	10	15	20
$[CA]mg$	0.05	0.10	0.15

بالإضافة إلى ذلك، تم تحليل النتائج التجريبية باستخدام نسبة الإشارة إلى الضوضاء (S/N) وفقاً لقاعدة "الأكبر هو

الأفضل" (larger-is-better)، كما هو موضح بالمعادلة (Eq. ...)

$$\frac{s}{B} = -10 \log \left[\left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \right]$$

ويرجع ذلك إلى أن الهدف الأساسي من عملية التحسين في هذه الدراسة هو تحقيق أقصى كفاءة إزالة ممكنة.

يعد معامل الإشارة إلى الضوضاء (S/N) مؤشرًا لا بعديًا (sans dimension)، يستخدم لقياس مدى اقتراب
الاستجابة الفعلية من القيمة المثلى المستهدفة.

III- تحليل ومناقشة النتائج

III-تحليل ومناقشة النتائج

وهنا سنعرض نتائج دراسة امتزاز الإيثيل البنفسجي على الفحم النشط المحضر.

ولتحقيق هذا الهدف، قمنا باتباع الخطوات التالية:

- دراسة الطيف الضوئي للصبغة في أوساط مختلفة: حمضي، طبيعي، وقاعدي.
- تحديد زمن التلامس اللازم للوصول إلى حالة التوازن أو التشبع للوسط الماز (المدعم).
- دراسة تأثير عدة عوامل مثل التركيز الابتدائي للركيزة، نسبة المادة الصلبة إلى السائلة (S/L)، قيمة الـ pH وجود الأملاح، وذلك لتقييم فعالية الوسط الماز تحت هذه الشروط.

III-1-الدراسة الطيفية للصبغة

تم تسجيل طيف الامتصاص لمحلول مائي يحتوي على 10 جزء بالمليون (ppm) من الإيثيل البنفسجي عند pH طبيعي (6.59)، وقد أظهر الطيف وجود ثلاث حزم امتصاص بأطوال موجية مختلفة وبشدة متفاوتة:

- الحزمة الرئيسية ظهرت عند 595 نانومتر.
 - الحزمة الثانية عند 310 نانومتر.
 - والحزمة الثالثة، ذات الامتصاص الأضعف، عند 255 نانومتر.
- قمنا بتسجيل معاملات الامتصاص المولارية لهذه النطاقات كانت على توالي

$$\bullet \epsilon = 19 \times 10^3 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \text{ عند } 595 \text{ nm}$$

$$\bullet \epsilon = 4.5 \times 10^3 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \text{ عند } 310 \text{ nm}$$

$$\bullet \epsilon = 4 \times 10^3 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \text{ عند } 255 \text{ nm}$$

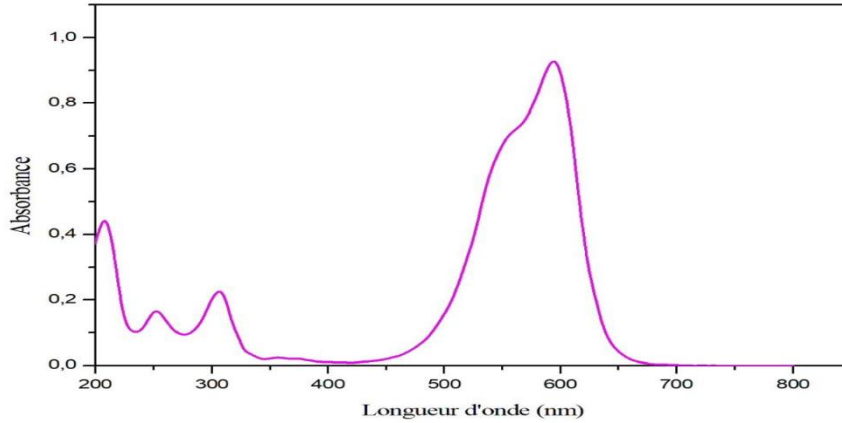
قمنا بتسجيل أطياف UV-Visible للصبغة الإيثيل بنفسجي عند درجات حموضة مختلفة (0.55، 1.43، 2.25، 10.43، 11.30، 12) لتقييم تأثير الوسط pH عند قيم UV-Visible .

لقد تبين أن سلوك الإيثيل البنفسجي يتأثر بشكل كبير بالـ pH، خصوصًا في الوسط الحمضي (pH=4.5)، حيث لوحظ تغير مرئي في لون المحلول من البنفسجي إلى الأصفر (عند pH= 0.55) مرورًا بالأخضر (عند pH = 1.43) والأزرق (عند pH 2.25).

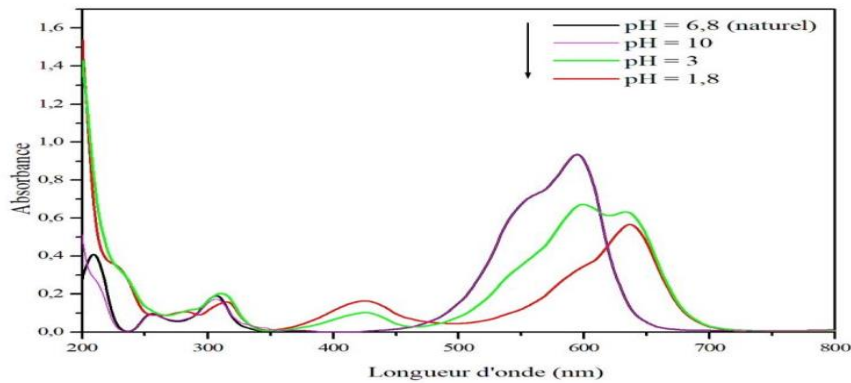
في هذا الوسط الحمضي (عند pH = 2.25)، لاحظنا اتساعا وتحولا في النطاق الرئيسي للطيف من 595 rad (shafit) نانومتر إلى 641 نانومتر، بالإضافة إلى انخفاض ملحوظ في معامل الامتصاص، حيث أعطى حساب بسيط قيمة

$$\epsilon=7.2\text{cm.l mol}$$

ويفسر هذا التحول الطيفي والانخفاض في الامتصاصية يعكسان تغيرات في درجة بروتنة المجموعات الأمينية أو الأروماتية للصبغة، مما يؤثر على الامتدادات الإلكترونية ويؤدي إلى إعادة توزيع للمدارات الجزيئية.



الشكل III-1: طيف UV-Vis الإيثيل البنفسجي في محلول مائي



الشكل III-2: تطور الطيف فوق البنفسجي-المرئي (UV-Vis) لمركب الإيثيل البنفسجي عند درجات حموضة مختلفة

III-2-تحديد pH_{pzc} للفحم النشط المسحوق

يوجد pH محدد يصبح عنده سطح المادة الداعمة (الناقل) متعادلاً كهربائياً في المحلول، أي أن مجموع الشحنات السطحية يساوي صفر. يُعرف هذا الحيود بـ نقطة الشحنة الصفرية (pH_{pzc}) وهي خاصية مهمة تحدد طبيعة شحنة السطح الممتز. [32]

تم تحديد قيمة pH_{pzc} باستخدام طريقة انجراف التوازن (Equilibrium Drift Method)، التي تتضمن ما يلي:

تم ملاسة 0.1 غرام من الفحم النشط المسحوق مع محاليل كلوريد الصوديوم (NaCl) بتركيز

0.2mol⁻¹.L، ذات قيم pH مبدئية تتراوح بين 2 و 14.

III-تحليل ومناقشة النتائج

تم تعديل قيم pH للمحاليل باستخدام جهاز pH متر، مع الاستعانة بمحاليل هيدروكسيد الصوديوم NaOH تركيز (2N) وحمض الكبريتيك H_2SO_4 تركيز (2N).

بعد ذلك، وضعت الخلائط تحت تحريك مغناطيسي لمدة 24 ساعة لضمان الوصول إلى التوازن.

عقب فترة التحريك، تمت ترشيح المعلق باستخدام ورق ترشيح، وتم قياس pH النهائي لكل محلول.

تحدد قيمة pH_{pzc} من خلال رسم العلاقة بين pH النهائي كدالة في pH الابتدائي، وتؤخذ النقطة التي يتقاطع فيها المنحنى مع الخط المرجعي $pH = pH_{pzc}$.

تفسير النتائج حسب موضع pH بالنسبة لـ pH_{pzc} :

عند قيم pH أقل من 7.6 يكون سطح المادة ذا شحنة موجبة نتيجة حدوث البروتنة، مما يعزز امتزاز الأيونات السالبة.

أما عند قيم pH أعلى من 7.6 فيصبح السطح ذا شحنة سالبة نتيجة نزع البروتونات، وهو ما يؤدي إلى تعزيز امتزاز الأيونات الموجبة مثل صبغة الإيثيل البنفسجي.

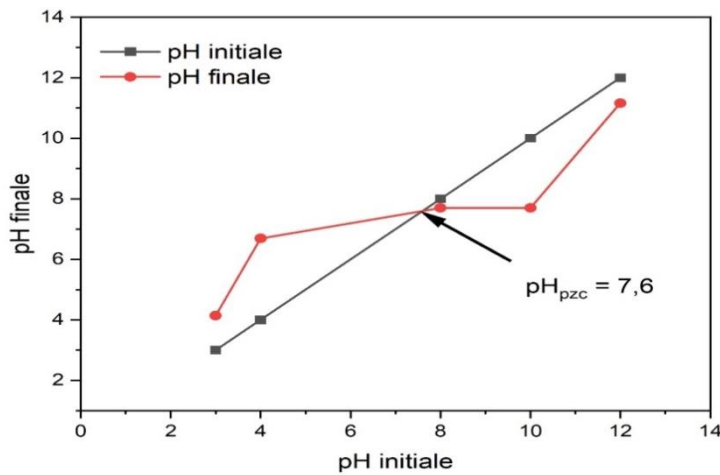
وتعد هذه النتيجة مهمة كونها تفسر السلوك الامتزازي اللاحق حيث يزداد ارتباط الصبغة مع السطح عند القيم المرتفعة

من pH كما هو موضح في الشكل III.3.

الجدول III-1: نتائج قيم pH لتحديد قيمة pH_{pzc} لتجربة

pH initiale	3	4	8	10	12
pH (24 h)	4.14	6.69	7.70	7.70	11.16

يمثل الجدول III-1 القيم pH الابتدائية، حيث نلاحظ المحلول الذي يساعد على تحديد نقطة pH_{pzc} .



الشكل III-3: رقم pH عند نقطة الشحنة الصفرية (PZC) للفحم النشط المستخدم على شكل مسحوق

III-3-دراسة زمن التلامس

يعد تحديد زمن التلامس من العوامل الأساسية في تقييم كفاءة عملية الامتزاز، إذ يؤثر بشكل مباشر على معدل إزالة الملوثات وتحديد الزمن اللازم للوصول إلى حالة الاتزان. في هذه الدراسة، تم استخدام طريقة الدفعات (Batch Method) لتحديد الزمن الأمثل لتلامس محلول صبغة الإيثيل البنفسجي مع المادة المازة.

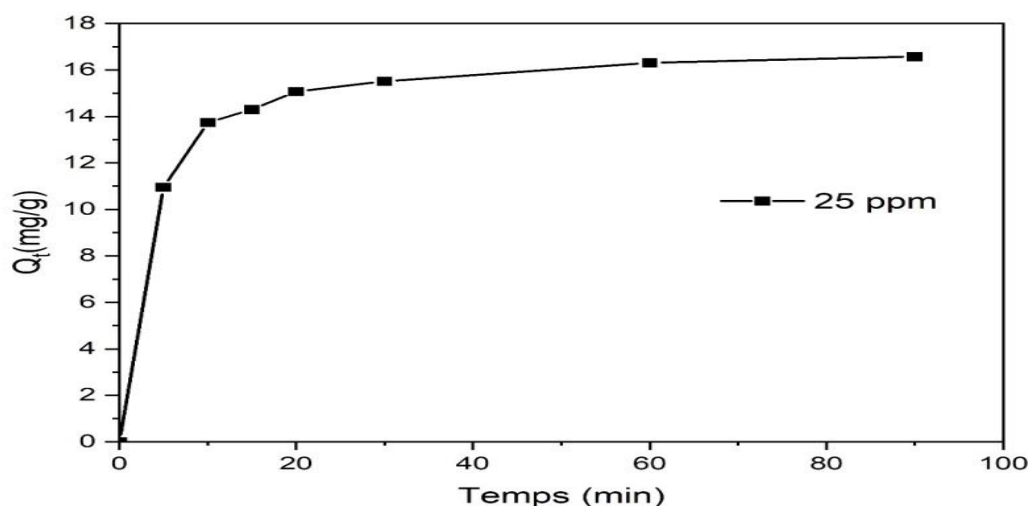
تمت التجربة على محلول مائي بتركيز ابتدائي يبلغ 25 l/mg (ppm) من الإيثيل البنفسجي، حيث تم مزجه من 0.05 g من الكربون النشط المحضر من عرجون النخيل، في حجم إجمالي مقداره 150 ml مل. وضعت العينات في جهاز هزاز بدرجة حرارة ثابتة، وتم أخذ عينات من المحلول عند فترات زمنية مختلفة (مثل 5، 10، 20، 30، 60، 90، 120 دقيقة...) لدراسة التغير في تركيز المادة الممتزة مع الزمن.

تم تحليل التراكيز المتبقية من الإيثيل البنفسجي في المحلول باستخدام جهاز مطيافية الأشعة فوق البنفسجية-المرئية (UV-Visible Spectrophotometer) عند الطول الموجي المناسب لامتصاص الصبغة. وبناءً على النتائج، تم رسم منحنى الامتزاز الذي يوضح العلاقة بين كمية الإيثيل البنفسجي الممتزة لكل وحدة كتلة من الكربون النشط والزمن. يساهم هذا التحليل في تحديد الزمن اللازم للوصول إلى حالة الاتزان، والذي يمثل النقطة التي لا يطرأ عندها تغير ملحوظ في تركيز الصبغة الممتزة..

الجدول III-2: تغيرات كمية امتزاز خلال الزمنة مختلفة

Temps (min)	q_t (mg/g)
0	0
5	10, 95637
10	13, 73819
15	14, 2976
20	15, 07061
30	15, 51306
60	16, 3115
90	16, 57595

يخصّ الجدول عن تجارب كمية امتزاز عند الأزمنة المختلفة المحددة، حيث يتم الحصول على زمن احتمال امتزاز وأشبه احتمال لعملية امتزاز.



الشكل III-4: حركية الامتزاز الإيثيل البنفسجي على الفحم النشط المسحوق. [25 ppm = EV]؛ الكتلة = 1 g/l؛

T = 22°C؛ pH حر؛ سرعة التحريك = 250 tours/min

وما تظهره نتائج يفسر بأن الامتزاز يتبع غالباً حركية شبه من الدرجة الثانية (pseudo-second-order)، حيث تكون عملية الامتزاز محكومة بالتفاعلات الكيميائية بين جزيئات الصبغة والمجموعات الوظيفية على سطح الفحم

III-4- العوامل المؤثرة على الامتزاز

يمكن أن تؤثر عوامل مختلفة على طريقة امتزاز الإيثيل البنفسجي على الفحم النشط المسحوق، مثل التركيز الابتدائي للصبغة، نسبة الصلب إلى السائل (S = الممتز، L = المادة الممتزة)، سرعة التحريك، الرقم الهيدروجيني (pH)، ودرجة الحرارة.

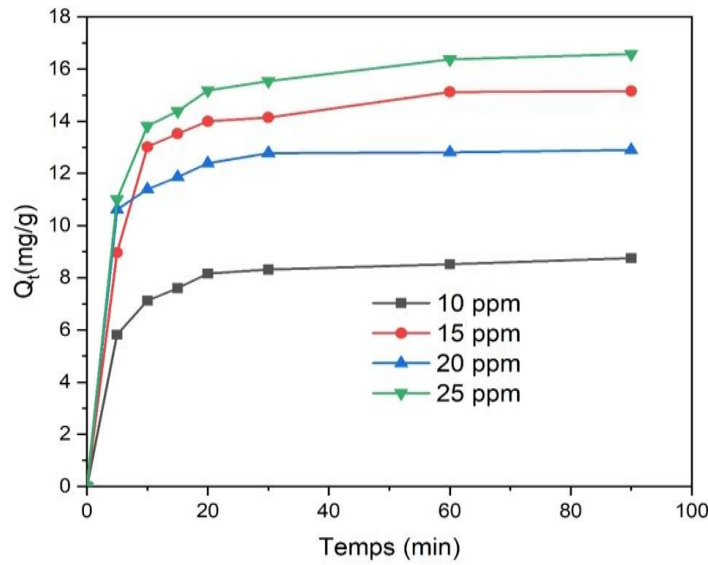
III-4-1- تأثير التركيز الابتدائي للصبغة

التركيز الابتدائي عامل مهم جداً لامتزاز فعال. من أجل إبراز تأثير تركيز الصبغة على الامتزاز، أجريت تجارب عند تراكيزات مختلفة (10، 15، 20، و 25 ppm).

تم وضع الصبغة على تماس مع كتلة مقدارها 0.05 g من الممتز في حجم 150 ml من المحلول، لمدة 90 دقيقة عند درجة حرارة 23°C

وفقاً للشكل ونتائج، نلاحظ أن زيادة التركيز الابتدائي للمادة الأساسية يؤدي إلى زيادة الكمية الممتزة.

تظهر هذه النتيجة بوضوح أنه عندما يكون تركيز الإيثيل البنفسجي في المحلول مرتفعاً، سيكون هناك المزيد من الجزيئات التي تنتشر نحو سطح جزيئات الداعم، مما يؤدي إلى زيادة ملحوظة في الاحتفاظ أي زيادة التدرج في التركيز الذي يدفع الجزيئات نحو سطح الممتز (قوة دافعة أكبر للانتقال).



الشكل III-5: تأثير التركيز الابتدائي للإيثيل البنفسجي على عملية الامتزاز

الكتلة = 1 g/l؛ $T = 23^\circ\text{C}$ ؛ pH حر؛ سرعة التحريك = 250 Tours/min

الجدول III-3: تغيرات كمية الامتزاز بتغير التركيز الابتدائي للإيثيل البنفسجي مع مرور الزمن.

Temps (min)	Qt(mg/g)			
	$C_0 = 10 \text{ ppm}$	$C_0 = 15 \text{ ppm}$	$C_0 = 20 \text{ ppm}$	$C_0 = 25 \text{ ppm}$
0	0	0	0	0
5	5, 82293	8, 96302	10, 62	11, 00892
10	7, 12579	13, 01919	11, 39	13, 81821
15	7, 59909	13, 52303	11, 86	14, 38312
20	8, 164	13, 99633	12, 39	15, 18214
30	8, 31159	14, 14392	12, 78	15, 53839
60	8, 52025	15, 12107	12, 81	16, 36794
90	8, 75436	15, 1516	12, 9	16, 5766

تم جمع النتائج المتوصل إليها في الجدول III-3، الذي يمثل تجارب كمية أمتزاز لمرور الزمن لتغير التركيز بتأثير المحلول

أو الدليل اللوني.

III-4-2-تأثير الرقم الهيدروجيني (pH)

يعد الرقم الهيدروجيني الابتدائي (pH) لمحاليل الصبغة عاملاً أساسياً في تنظيم عملية الامتزاز.

تتأثر الكمية الممتزة بهذا العامل، نظراً لتأثيره على شحنة سطح الممتز، ومستوى تأين المادة الممتزة، أو درجة تفكك المجموعات الوظيفية في المواقع النشطة للممتز.

في الدراسة التجريبية لتأثير هذا المعامل، تم تعديل قيم pH باستخدام حمض الكبريتيك (H_2SO_4) بتركيز $C=2N$ أو هيدروكسيد الصوديوم (NaOH) بتركيز $C=2N$ ، مع الحفاظ على تركيز ثابت للمادة الأساس (5 ppm). وكانت النتائج

كتالي

الجدول III-4: تغيرات كمية امتزاز بتغير درجة حموضة الوسط التفاعلي مع مرور الزمن

Temps (min)	Qt(mg/g)		
	pH naturel	pH = 8	pH = 10
0	0	0	0
5	10, 69613	11, 36644	12, 53469
10	11, 25632	11, 70159	13, 43002
15	11, 70159	12, 20432	13, 67899
20	12, 17559	12, 59214	14, 0716
30	12, 6496	12, 89857	14, 37803
60	12, 73099	13, 03742	14, 73712
90	12, 78844	13, 1236	14, 84724

تم الحصول على النتائج الموضوعة في الجدول III-4 الذي يتم عن كمية أمتزاز عند تغير الوسط للعملية أمتزاز

لمرور الزمن.

تُظهر الشكل III_6 أن كمية الإيثيل البنفسجي الممتزة على سطح الممتز تزداد بزيادة pH المحلول.

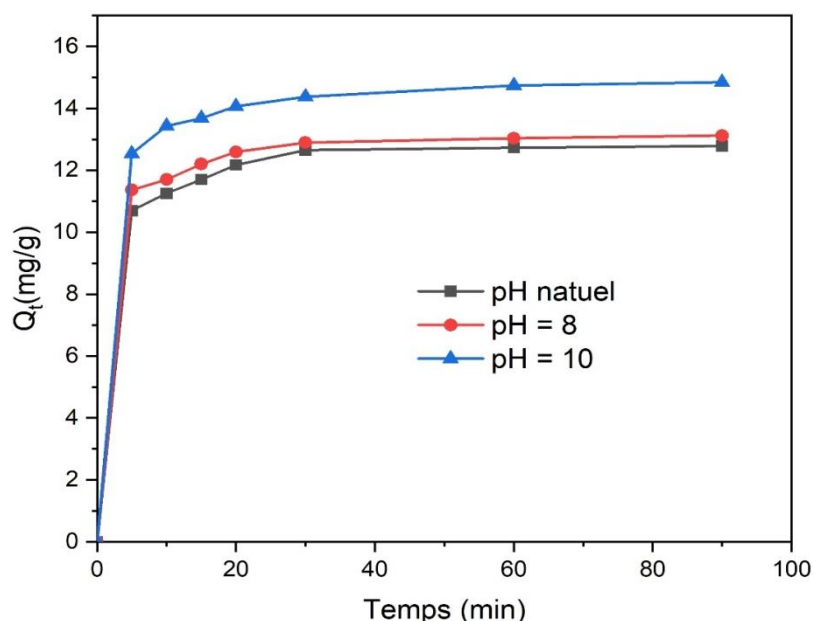
وهذا يفسر أنه عند القيم المنخفضة من pH يكون سطح الفحم نشطاً ذا شحنة موجبة، مما يؤدي إلى حدوث تنافر

كهروستاتيكي مع الكاتيونات مثل صبغة الإيثيل البنفسجي، وهو ما يفسر الانخفاض في كفاءة الامتزاز.

في المقابل، عند ارتفاع قيمة pH يكتسب السطح شحنة سالبة، الأمر الذي يعزز التجاذب الكهروستاتيكي مع الصبغة

الكاتيونية ويساهم في زيادة سعة الامتزاز.

هذا السلوك ينسجم بشكل واضح مع قيمة pH_{pzc} المقدرة بـ 7.6، حيث يتحول السطح من موجب الشحنة الى سالب الشحنة عند تجاوز هذه القيمة.



الشكل III-6: تأثير الرقم الهيدروجيني (pH) على عملية امتزاز [EV 5ppm=pmm] جزء في المليون؛ درجة

الحرارة = 23°C؛ سرعة التحريك = 250 Tours/min؛ الكتلة = 1 g.

III-3-4-تأثير نسبة المادة الصلبة إلى السائل (S/L) – (جرعة الممتز)

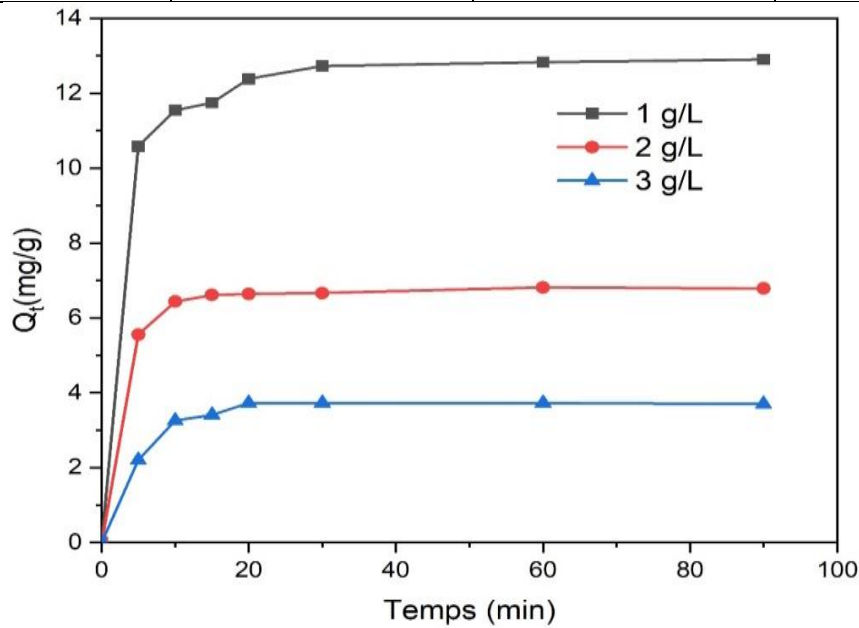
يُبين الشكل III.7 ونتائج موضح في الجدول III-5: تأثير كمية الفحم النشط المسحوق على كفاءة امتزاز صبغة الإيثيل فيولييه.

تشير النتائج إلى أن زيادة كتلة الفحم النشط في الوسط التفاعلي تؤدي إلى انخفاض في كمية الصبغة الممتزة لكل غرام، أي أن العلاقة بين الكتلة والامتزاز عكسية. وبصبغة أوضح، فإن تقليل كمية الممتز يساهم في تحسين كفاءة الامتزاز بشكل ملحوظ.

ويعزى ذلك إلى أن زيادة كمية الممتز تؤدي إلى زيادة عدد مواقع الامتزاز المتوفرة، ما يؤدي إلى توزيع الصبغة على سطح أكبر، وبالتالي تقليل كمية الممتزة لكل وحدة كتلة من الممتز عند زيادة كتلة المادة الماصة تتوفر مواقع أكثر لامتزاز الصبغة، لكن لأن الجزيئات تتوزع على مساحة السطحية أكبر فإن كمية الصبغة الممتزة لكل غرام من المادة (mg/g) تصبح أقل. ومع ذلك، فإن زيادة في الكتلة المضافة تؤدي فعليا إلى إزالة كمية أكبر من الصبغة من المحلول، مما يخفض تركيزها النهائي بشكل أوضح.

الجدول III-5: تغيرات كمية امتزاز بتغير كمية الكربون النشط بتغير الزمن

Temps (min)	Qt(mg/g)		
	[Charbon actif] = 1g/L	[Charbon actif] = 2g/L	[Charbon actif] = 3g/L
0	0	0	0
5	10, 58394	5, 55344	2, 20119
10	11, 54597	6, 43918	3, 26069
15	11, 74515	6, 61294	3, 40902
20	12, 38509	6, 63837	3, 72687
30	12, 72836	6, 6638	3, 72687
60	12, 83008	6, 81213	3, 72687
90	12, 90212	6, 7867	3, 70568



الشكل III-7: تأثير نسبة S/L (كتلة الممتز) على عملية امتزاز الإيثيل البنفسجي بواسطة الفحم النشط المسحوق.

[EV جزء في المليون؛ $T = 22^{\circ}\text{C}$ ؛ pH حر؛ سرعة التحريك = 250 Tours/min]

الملخص

هذا البحث يهدف إلى دراسة فعالية الفحم النشط المحضّر من عرجون النخيل كمادة ماصة طبيعية وصديقة للبيئة لإزالة الصبغات الملوثة من المياه.

تم اختيار صبغة "الإيثيل البنفسجي" كنموذج للتجارب نظرًا لانتشارها في الصناعات النسيجية وخطورتها البيئية. استُخدمت منهجية الامتزاز كحل بسيط وفعال لمعالجة المياه الملوثة.

شملت الدراسة تحضير الفحم النشط من بقايا عرجون النخيل بعد معالجته كيميائيًا وتجفيفه.

تم إجراء قياسات باستخدام تقنيات طيفية (UV-Vis) ومعايير كيميائية دقيقة.

ركزت التجارب على تأثير عدة عوامل: زمن التلامس، قيمة pH، تركيز الصبغة الابتدائي، وجرعة المادة الماصة.

أظهرت النتائج أن كفاءة الإزالة تتحسن مع زيادة زمن التلامس وجرعة الفحم النشط.

كما تبين أن الوسط الحمضي يعزز من الامتزاز مقارنة بالوسط القاعدي.

أثبتت التجارب قدرة عالية للفحم النشط من عرجون النخيل على إزالة الأصباغ بنسبة فعالة.

يعكس هذا إمكان استغلال المخلفات الزراعية المحلية كمواد معالجة قليلة التكلفة.

تُبرز الدراسة دور هذا الحل في الحد من التلوث الصناعي وحماية الموارد المائية.

وتوصي بتوسيع الأبحاث المستقبلية نحو التطبيقات الميدانية لتعزيز الاستدامة البيئية.

الكلمات المفتاحية: إيثيل البنفسجي، الكربون النشط، الممتز، الماز، مادة عضوية، مادة طبيعية عملية امتزاز.

Abstract

This research aims to study the effectiveness of activated carbon prepared from palm frond residues as a natural and eco-friendly adsorbent for removing pollutant dyes from water.

The dye “crystal violet” was chosen as a model for the experiments due to its widespread use in textile industries and its environmental hazards.

Adsorption methodology was employed as a simple and effective solution for treating contaminated water.

The study involved preparing activated carbon from palm frond residues after chemical treatment and drying.

Measurements were carried out using spectroscopic techniques (UV-Vis) and precise chemical titrations.

The experiments focused on the effects of several factors: contact time, pH value, initial dye concentration, and adsorbent dosage.

The results showed that removal efficiency improves with increased contact time and activated carbon dosage.

It was also found that an acidic medium enhances adsorption compared to an alkaline medium.

The experiments demonstrated a high ability of palm frond-based activated carbon to remove dyes with significant efficiency.

This reflects the potential of utilizing local agricultural waste as low-cost treatment materials.

The study highlights the role of this solution in reducing industrial pollution and protecting water resources.

It also recommends expanding future research toward field applications to promote environmental sustainability..

Keywords: Ethyl Violet, activated carbon, adsorbate, adsorbent, organic material, natural

الابعاد التطبيقية والافاق المستقبلية

تؤكد نتائج هذه الدراسة الامكانية الكبيرة لاستغلال المخلفات الزراعية المحلية، مثل عرجون النخيل، في انتاج فحم نشط عالي الكفاءة يشكل بديلا اقتصاديا وبيئيا للمواد الماصة التجارية المستوردة. ويعد اختيار صبغة الإيثيل البنفسجي نموذجا عمليا لتمثيل الصبغات الكاتيونية واسعة الانتشار في الصناعات النسيجية والغذائية والدوائية، الأمر الذي يضيف بعدا تطبيقيا مهما على هذه النتائج.

على المستوى التطبيقي، يمكن اعتماد هذه المادة في محطات معالجة المياه الصناعية، خاصة في البيئات ذات الموارد المحدودة حيث يمثل عامل التكلفة المنخفضة عاملا حاسما في نجاح مشاريع المعالجة. كما يمكن تطوير خصائص المادة الماصة من خلال اجراء تعديلات فيزيائية او كيميائية، مثل التنشيط الكيميائي باستخدام الاحماض او القواعد، او تعديل السطح بإضافة مجموعات وظيفية، بما يسهم في زيادة المساحة السطحية وتحسين الانتقائية تجاه ملوثات محددة

الجوانب العلمية والبحثية المكملة

تفتح هذه النتائج افقا واسعا أمام دراسات مستقبلية يمكن أن تركز على عدة محاور أساسية، من بينها:

1. دراسة حركيات الامتزاز وتطبيق النماذج الرياضية مثل لأنغموير وفروندلش لتحديد طبيعة العملية وما اذا كانت أحادية الطبقة او متعددة الطبقات.
2. تحليل الديناميكيات الحرارية عبر حساب معاملات الطاقة الحرة ΔG° والأنثالبي ΔH° والانتروبيا ΔS° لتوضيح تلقائية العملية وكونها ماصة او باعثة للحرارة.
3. توسيع نطاق الاستخدام ليشمل ملوثات اخرى مثل المعادن الثقيلة (الرصاص، الكاديوم، الزنك) او الصبغات الأنيونية.
4. اختبار كفاءة المادة في معالجة عينات مياه حقيقية مأخوذة من مصبات صناعية تحتوي على خليط معقد من الملوثات.

الخاتمة

في ختام هذا العمل البحثي، الذي تناول دراسة وتقييم فعالية مادة ماصة حيوية طبيعية وهي الفحم النشط المحضر من عرجون النخيل، يمكن القول إن النتائج المتوصل إليها تؤكد الأهمية الكبيرة لهذه المادة في مجال معالجة المياه الملوثة بالأصبغ الصناعية. فقد أظهرت التجارب أن الفحم النشط المحضر محلياً يتميز بخصائص فيزيائية وكيميائية مناسبة تجعله قادراً على امتزاز صبغة الإيثيل البنفسجي بكفاءة معتبرة، وذلك ضمن ظروف تشغيلية محددة تم التحكم فيها عبر تصميم التجارب باستخدام منهجية "تاغوتشي".

لقد سمحت هذه الدراسة بإبراز العلاقة المباشرة بين العوامل المؤثرة على عملية الامتزاز، مثل التركيز الابتدائي للصبغة، كمية الفحم النشط المستعمل، ودرجة الحموضة، وبين كفاءة الإزالة النهائية. ومن خلال التحاليل الطيفية والقياسات الميدانية، تبين أن الظروف المثلى تتحقق عند توازن مدروس لهذه العوامل، مما يفتح المجال أمام اعتماد هذا النوع من المواد كبديل فعال واقتصادي للفحم النشط التجاري مرتفع التكلفة.

تكتسي هذه النتائج أهمية خاصة في ظل التحديات البيئية التي يفرضها التلوث الصناعي، حيث تمثل الأصباغ النسيجية إحدى أخطر الملوثات العضوية نظراً لثباتها وصعوبة تحليلها بيولوجياً. ومن هذا المنطلق، يبرز استغلال المخلفات الزراعية – وخاصة عرجون النخيل المتوفر بكثرة في منطقتنا – كخيار استراتيجي يحقق بعدين متكاملين: أولهما بيئي يتمثل في تقليل حجم النفايات وتحويلها إلى موارد نافعة، وثانيهما اقتصادي يتمثل في الحصول على مواد مازة فعالة ومنخفضة التكلفة يمكن توظيفها محلياً في محطات معالجة المياه.

إن النتائج المحصلة لا تمثل نهاية المطاف، بل تشكل نقطة انطلاق نحو دراسات أوسع وأكثر تفصيلاً، يمكن أن تشمل اختبار أنواع أخرى من الأصباغ أو الملوثات، ودراسة الخصائص البنوية للمادة الماصة باستخدام تقنيات تحليل متقدمة مثل الأشعة السينية (XRD) والمجهر الإلكتروني (SEM). كما يمكن مستقبلاً التركيز على تطبيقات صناعية واسعة النطاق، من خلال تصميم وحدات امتزاز تعتمد على الفحم النشط المستخلص من عرجون النخيل، ومقارنة أدائها بالأنظمة التجارية الحالية من حيث الكفاءة والتكلفة والاستدامة.

وعلى الصعيد الأكاديمي، تمثل هذه المذكرة تجربة علمية غنية مكنتنا من ربط الجانب النظري بالجانب التطبيقي، ومن استثمار المعارف الكيميائية في مواجهة تحدي بيئي واقعي. كما أنها تسهم في إثراء مجال البحث حول الطاقات البديلة والمواد الحيوية الصديقة للبيئة، بما يتماشى مع توجهات التنمية المستدامة.

وبذلك يمكن القول إن هذا العمل، رغم ما قد يشوبه من نقائص، قد ألقى الضوء على إمكانية تحويل مورد طبيعي مهم إلى أداة فعالة لمعالجة مشكلة بيئية معقدة. ويبقى الأمل معقوداً على أن تساهم هذه النتائج في تشجيع المزيد من الأبحاث التطبيقية في هذا المجال، بما يخدم مصلحة المجتمع والبيئة معاً.

قائمة المراجع

المراجع

1. Alegbe, E.O. and T.O. Uthman, *A review of history, properties, classification, applications and challenges of natural and synthetic dyes*. Heliyon, 2024.
2. Ketema, A. and A. Worku, *Review on intermolecular forces between dyes used for polyester dyeing and polyester fiber*. Journal of Chemistry, 2020. **2020**(1): p. 6628404.
3. Harsito, C., et al., *Enhancement stability and color fastness of natural dye: A review*. Open Engineering, 2021. **11**(1): p. 548-555.
4. Kumar, S., et al., *Banana Peels Derived Biochar-Modified Mg Ferrite Magnetically Recoverable Composite for Photocatalytic Degradation of Crystal Violet Dye*. Available at SSRN 5239179.
5. Aumaitre, C., et al., *Visible and near-infrared organic photosensitizers comprising isoindigo derivatives as chromophores: synthesis, optoelectronic properties and factors limiting their efficiency in dye solar cells*. Journal of Materials Chemistry A, 2018. **6**(21): p. 10074-10084.
6. Devi, M., et al., *A comprehensive review on synthesis, biological profile and photophysical studies of heterocyclic compounds derived from 2, 3-diamino-1, 4-naphthoquinone*. Journal of Molecular Structure, 2022. **1269**: p. 133786.
7. Topbas, O., et al., *Photochromic microcapsules by coacervation and in situ polymerization methods for product-marking applications*. Iranian Polymer Journal, 2020. **29**(2): p. 117-132.
8. Cai, S., Z. An, and W. Huang, *Recent advances in luminescent hydrogen-bonded organic frameworks: structures, photophysical properties, applications*. Advanced Functional Materials, 2022. **32**(41): p. 2207145.
9. Bentley, J. and G.P.A. Turner, *Introduction to paint chemistry and principles of paint technology*. 1997: CRC press.
10. Satake, M. and Y. Mido, *Chemistry of colour*. 1995: Discovery Publishing House.
11. Pereira, R.C., et al., *Thioindigo, and sulfonated thioindigo derivatives as solvent polarity dependent fluorescent on-off systems*. Dyes and Pigments, 2018. **158**: p. 259-266.
12. Zhang, X., et al., *Performance evaluation of powdered activated carbon for removing 28 types of antibiotics from water*. Journal of Environmental Management, 2016. **172**: p. 193-200.
13. Lafi, R., et al., *Treatment of textile wastewater by a hybrid ultrafiltration/electrodialysis process*. Chemical Engineering and Processing-Process Intensification, 2018. **132**: p. 105-113.

14. Loshchinina, E.A., E.P. Vetchinkina, and M.A. Kupryashina, *Diversity of biogenic nanoparticles obtained by the fungi-mediated synthesis: A review*. Biomimetics, 2022. **8**(1): p. 1.
15. Tyagi, P.K., et al., *Research Article Synthesis of Silver and Gold Nanoparticles: Chemical and Green Synthesis Method and Its Toxicity Evaluation against Pathogenic Bacteria Using the ToxTrak Test*. 2021.
16. Chollom, M.N., et al., *The applicability of nanofiltration for the treatment and reuse of textile reactive dye effluent*. Water Sa, 2015. **41**(3): p. 398-405.
17. Bogale, F.M., B. Teffera, and T.A. Aragaw, *Recent developments in the integrated anaerobic/aerobic (A/O) process for the treatment of textile industry wastewater: a critical review*. Journal of Hazardous Materials Advances, 2024: p. 100438.
18. Adeyemo, A.A., I.O. Adeoye, and O.S. Bello, *Metal organic frameworks as adsorbents for dye adsorption: overview, prospects and future challenges*. Toxicological & Environmental Chemistry, 2012. **94**(10): p. 1846-1863.
19. Musah, M., et al., *Adsorption kinetics and isotherm models: a review*. CaJoST, 2022. **4**(1): p. 20-26.
20. Aljamali, N.M., R. Khdur, and I.O. Alfatlawi, *Physical and chemical adsorption and its applications*. International Journal of Thermodynamics and Chemical Kinetics, 2021. **7**(2): p. 1-8.
21. Al-Ghouti, M.A. and D.A. Da'ana, *Guidelines for the use and interpretation of adsorption isotherm models: A review*. Journal of hazardous materials, 2020. **393**: p. 122383.
22. Castilla-Martinez, C.A., P.C. Meléndez-González, and U.B. Demirci, *Borocarbonitrides for Decarbonization: From CO₂ Utilization to Renewable Fuel Synthesis*. Nanoenergy Advances, 2025. **5**(2): p. 6.
23. Alazmi, A., et al., *Activated carbon from palm date seeds for CO₂ capture*. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021. **18**(22): p. 12142.
24. Baby, R., et al., *Functionalized activated carbon derived from palm kernel shells for the treatment of simulated heavy metal-contaminated water*. Nanomaterials, 2021. **11**(11): p. 3133.
25. Xiao, L., et al., *Enhanced methane production by granular activated carbon: a review*. Fuel, 2022. **320**: p. 123903.
26. Heidarinejad, Z., et al., *Methods for preparation and activation of activated carbon: a review*. Environmental Chemistry Letters, 2020. **18**: p. 393-415.

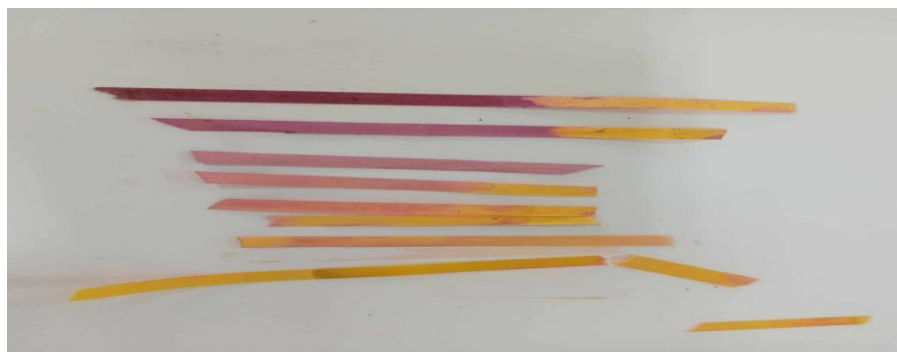
27. ELbasyouni, D., :*charbon actif – nanoparticules d'argent – catalyseur – noyaux de dattes - Escherichia coli - Pseudomonas aeruginosa – eau - activité antimicrobienne*, in *Mémoires de Master*. 2019, Univ Blida1.
28. Lee, S.-H ,N. Kim, and D. Park, *Insights into the Adsorption Performance of Emerging Contaminants on Granular Activated Carbon*. Separations, 2023. **10**(9): p. 501.
29. Hina, K., et al., *Preparation and performance comparison of cellulose-based activated carbon fibres* .Cellulose, 2018. **25**: p. 607-617.
30. Al-Khayri, J.M., S.M. Jain, and D.V. Johnson, *Date palm genetic resources and utilization*. Vol. 1. 2015: Springer.
31. Khalil, H.A., A. Bhat, and A.I. Yusra, *Green composites from sustainable cellulose nanofibrils: A review*. Carbohydrate polymers, 2012. **87**(2): p. 963-979.
32. Maleki, F., G. Di Liberto, and G. Pacchioni, *pH-and facet-dependent surface chemistry of TiO2 in aqueous environment from first principles*. ACS Applied Materials & Interfaces, 2023. **15**(8): p. 11.11224-216



الملحق رقم 1: عملية الترسيب بعد تنقيع الفحم النشط في حمض الفوسفوريك



الملحق رقم 1: الفحم النشط في بعد عملية الترسيب



الملحق رقم 3: الوراق PH متري لتاكّد من وسط إيثيل البنفسجي في تجربة تأثير الرقم الهيدروجيني على عملية امتزاز



الملحق رقم 2: الفحم النشط بعد عملية التنشيط