

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة قاصدي مرباح ورقلة
كلية الرياضيات وعلوم المادة
قسم الكيمياء



مذكرة مقدمة ضمن استكمال متطلبات نيل شهادة ماستر أكاديمي
في كيمياء
التخصص: كيمياء المواد
من إعداد: طلاله وردة
بعنوان

رسكلة و تدوير المواد المستعملة في تصنيع كوابل التوصيل
الكهربائي

أمام لجنة المناقشة

رئيسا	جامعة قاصدي مرباح ورقلة	أستاذة	منال زاوي
مناقشا	جامعة قاصدي مرباح ورقلة	أستاذة	زنخري لويذة
مؤظرا	جامعة قاصدي مرباح ورقلة	أستاذ	موساوي ياسين

السنة الجامعية : 2025 / 2026

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة قاصدي مرباح ورقلة
كلية الرياضيات وعلوم المادة
قسم الكيمياء



مذكرة مقدمة ضمن استكمال متطلبات نيل شهادة ماستر أكاديمي
في كيمياء

التخصص: كيمياء المواد
من إعداد: طلاله وردة
بـعـنـوان

رسكلة و تدوير المواد المستعملة في تصنيع كوابل التوصيل
الكهربائي

أمام لجنة المناقشة

رئيسا	جامعة قاصدي مرباح ورقلة	أستاذة	منال زاوي
مناقشا	جامعة قاصدي مرباح ورقلة	أستاذة	زنخري لويذة
مؤطرا	جامعة قاصدي مرباح ورقلة	أستاذ	موساوي ياسين

السنة الجامعية : 2025 / 2026

ها أنا اليوم أقف في المكان الذي طالما تخيلت نفسي فيه في ليالي التعب
والسهر، أقف وأنا أحمل بين يدي سنوات من الصبر والدموع التي خبأتها خلف
ابتسامة الأمل. لم يكن الطريق سهلاً، لكن الإيمان بأن الله لا يضيع تعب أحد كان
كافياً لأكمل المسير.

اليوم لا أحتفل بتخرجي فقط...

بل أحتفل بكل لحظة ضعفت فيها ولم أستسلم، وبكل مرة شعرت أن الطريق صعب
فقلت لنفسي:

اصبري... فالله يرى.

إلى أبي الغالي علي طلاله...

أعلم أن هذا الإنجاز يحمل جزءاً منك، من دعائك ومن قلبك الذي كان يخاف علي
أكثر مما يخاف علي نفسه.

لو كان بإمكانني أن أهديك هذا اليوم كله لفعلت، فأنت السبب بعد الله في كل خطوة
وصلت إليها.

أمي الحبيبة فطيمة مقداد...

يا من كانت دعواتها تسبق خطوتي،

يا من كانت تقول دائماً: سيأتي يوم وتفرحين بنفسك،
ها هو اليوم قد جاء... وأتمنى أن أكون فخراً يليق بقلبك.

2
0
2
6

إلى إخوتي...
إلى من شاركوني تفاصيل هذه الرحلة، وكانوا سنداً لي في أوقات التعب قبل
الفرح، شكراً لكم من القلب.
إلى روح طيبة رافقتني بالدعاء والتشجيع، وإلى قلب كان يؤمن بنجاحي قبل أن
أراه أنا، أهدي هذه الكلمات بكل امتنان.

إلى صديقتي هناء عساس...

شكراً لأنك كنت دائماً صاحبة الكلمة الطيبة والموقف الجميل، ولأن وجودك كان
يخفف من صعوبة الأيام
إلى صديقتي في السكن الجامعي إسراء بوهريرة ومريم بوخلط...
إلى من شاركني أيام الدراسة بتعبها وفرحها، وضحكاتها وذكرياتها، شكراً لأنك
كنتن جزءاً من أجمل فصول هذه الرحلة.
إلى أصدقائي وزملائي الذين شاركوني لحظات التعب والضحك والقلق طيلة هذه
الفترة

شكراً لأنكم كنتم الضوء في أيامي الصعبة.
اليوم أود أن أقول لنفسي قبل أي أحد:
لقد فعلتها... رغم كل شيء.
وهذا ليس نهاية الطريق...
بل بداية حلم جديد، أكبر وأجمل بإذن الله.

2
0
2
6



شكر و عرفان

بسم الله الرحمن الرحيم

(وَمَا تَوْفِيقِي إِلَّا بِاللَّهِ عَلَيْهِ تَوَكَّلْتُ وَإِلَيْهِ أُنِيبُ)

الحمد لله الذي وفقني لإتمام هذا العمل، والصلاة والسلام على سيدنا محمد صلى الله عليه وسلم.

أتقدم بخالص الشكر والتقدير إلى الأستاذ موساوي ياسين على توجيهاته القيمة ومتابعته المستمرة، وعلى ما قدمه من نصائح وإرشادات ساهمت في إنجاز هذه المذكرة.

كما أتقدم بجزيل الشكر إلى أعضاء لجنة المناقشة، الأستاذة زاوي منال والأستاذة زنجري لويزة، لتفضلهما بقبول مناقشة هذا العمل وإثرائه بملاحظتهما العلمية القيمة.

وأخص بالشكر والعرفان الأستاذة زنجري لويزة التي كانت سنداً حقيقياً لي، ولم تبخل عليّ بالنصح والتشجيع والمرافقة طوال فترة إنجاز هذا البحث، فكان لوقوفها إلى جانبي أثر كبير في تجاوز مختلف الصعوبات.

كما أتوجه بالشكر إلى الأناستين أنيسة وحنان على مساعدتهما وتعاونهما داخل المخبر، وعلى كل التسهيلات التي قدمتها خلال الجانب التطبيقي من هذا العمل.

وفي الأخير، أتقدم بالشكر إلى كل من ساهم من قريب أو بعيد في إنجاز هذه المذكرة والحمد لله أولاً وآخراً.

قائمة الرموز و المختصرات

الرمز	الدلالة	التسمية الكاملة
PVC	بولي فينيل كلوريد	Polyvinyl Chloride
PET	بولي إيثيلين تيريفثالات	Polyethylene Terephthalate
HDPE	بولي إيثيلين عالي الكثافة	High-Density Polyethylene
LDPE	بولي إيثيلين منخفض الكثافة	Low-Density Polyethylene
PP	بولي بروبيلين	Polypropylene

Polystyrene	بولي ستايرين	PS
Tetrahydrofuran	رباعي هيدرو الفوران	THF
Dichloromethane	ثنائي كلورو الميثان	DCM
Toluene Diisocyanate	ثنائي إيزوسيانات التولوين	TDI
Ultraviolet–Visible Spectroscopy	مطيافية الأشعة فوق البنفسجية والمرئية	UV-Vis
Fourier Transform Infrared Spectroscopy	مطيافية الأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه	FTIR
Attenuated Total Reflectance	الانعكاس الكلي المخفف	ATR
Absorbance	الامتصاصية	Abs
Nanometer	نانومتر	nm
Wavenumber	العدد الموجي	cm ⁻¹
Gram	غرام	g
Milliliter	مليتر	mL
Degree Celsius	درجة مئوية	°C
Hour	ساعة	h
Polyethylene	بولي إيثيلين	PE
Hydroxyl Group	مجموعة الهيدروكسيل	OH
Carbon-Hydrogen Bond	رابطة كربون-هيدروجين	C–H
Carbon-Chlorine Bond	رابطة كربون-كلور	C–Cl
Carbonyl Group	مجموعة الكربونيل	C=O
Carbon-Oxygen Bond	رابطة كربون-أكسجين	C–O
Pi to Pi Star Transition	انتقال إلكتروني من π إلى π^*	$\pi \rightarrow \pi^*$
Non-bonding to Pi Star Transition	انتقال إلكتروني من n إلى π^*	$n \rightarrow \pi^*$
Density	الكثافة الظاهرية للرغوة	p
Mass	كتلة العينة	m
Volume	حجم العينة	V
Length	طول العينة	L

Width	عرض العينة	W
Height	ارتفاع العينة	h
Initial Mass	الكتلة الابتدائية للعينة	mi
Final Mass	الكتلة النهائية للعينة بعد الغمر	mf
Water Absorption	نسبة امتصاص الماء	Absorption (%)
Soxhlet Extractor	جهاز سوكسلي للاستخلاص	Soxhlet

قائمة الجداول

الصفحة	عنوان الجدول	رقم الجدول
08	المقارنة بين الاقتصاد الخطي والاقتصاد الدائري	(1-I)
12	مصادر النفايات البلاستيكية والكابلات الكهربائية	(2- I)
14	أنواع البلاستيك وخصائصه واستخداماته	(3- I)
25	الإحصائيات والتوجهات في سوق البلاستيك العالمي والبلاستيك المعاد تدويره	(4 - I)
30	حالات ناجحة عالمياً في إعادة تدوير البلاستيك والكابلات الكهربائية	(5 - I)
38	المواد والوسائل المستعملة في الدراسة	(1- II)
56	توزيع عينات تجارب الانحلالية والمذيبات المستعملة	(1- III)
73	نتائج اختبار امتصاص الماء للرغوات البوليمرية المحضرة	(2- III)
77	نتائج التحليل الكمي للعينة قبل الاستخلاص	(3- III)
78	نتائج التحليل الكمي للعينة بعد الاستخلاص	(4- III)

قائمة الأشكال

الصفحة	الشكل	الرقم
6	نموذج الية الاقتصاد الدائري	(1-I)
8	مخطط يمثل الفرق بين الاقتصاد الخطي و الدائري	(2-I)
10	العلاقة بين الاقتصاد الأخضر و التنمية المستدامة	(3-I)
39	ميزان الالكتروني حساس	(1- II)
40	مطحنة كهربائية	(2- II)
41	جهاز سوكسلي	(3- II)

41	مخطط سير العمل	(4- II)
42	جمع عينات البلاستيكية	(5- II)
42	تنظيف وتجفيف كوابل التوصيل الكهربائي المنزلية التالفة	(6- II)
43	الفصل الميكانيكي	(7- II)
43	عملية التقطيع	(8- II)
44	عملية غربلة البلاستيك المطحون	(9- II)
44	وزن كميات محددة من البلاستيك الداخلي والخارجي	(10- II)
45	عينة خارجية	(11- II)
45	عينة داخلية	(12- II)
46	صورة لمذيب العينة الخارجية بعد الاستخلاص	(13- II)
46	صورة لمذيب العينة الداخلية بعد الاستخلاص	(14- II)
47	تجارب الانحلالية	(15- II)
48	UV-Vis Spectrophotometer جهاز	(16- II)
50	جهاز مطيافية الأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه FTIR	(17- II)
58	نتائج تحليل العينة الخارجية قبل الاستخلاص	(1- III)
59	نتائج تحليل العينة الخارجية بعد الاستخلاص	(2- III)
60	نتائج تحليل العينة الداخلية قبل الاستخلاص	(3- III)
61	نتائج تحليل العينة الخارجية بعد الاستخلاص	(4- III)
62	نتائج تحليل مذيب السيكلو هكسان بعد استخلاص العينة الخارجية	(5- III)
63	نتائج تحليل مذيب السيكلو هكسان بعد استخلاص العينة الداخلية	(6- III)
65	تحليل العازل الداخلي قبل الاستخلاص	(7- III)
66	تحليل العازل الداخلي بعد الاستخلاص	(8- III)
67	تحليل العازل الخارجي قبل الاستخلاص	(9- III)
68	تحليل العازل الخارجي بعد الاستخلاص	(10- III)
70	شكل الرغوة مباشرة بعد التمدد	(11- III)
70	شكل الرغوة بعد 24 ساعة	(12- III)
75	صورة مجهرية لمركب (pvc/pu) قبل الاستخلاص عند تكبير 500	(13- III)
75	صورة مجهرية لمركب (pvc/pu) قبل الاستخلاص عند تكبير 100	(14- III)

76	صورة مجهرية لمركب (pvc/pu) بعد الاستخلاص عند تكبير 500	(15- III)
76	صورة مجهرية لمركب (pvc/pu) بعد الاستخلاص عند تكبير 100	(16- III)

الفهرس

ص	المحتوى
	الإهداء
I	شكر و عرفان
III	قائمة الجداول
IV	قائمة الأشكال
VI	قائمة الرموز
2	المقدمة العامة
3	المراجع
الفصل الأول:	
تدوير النفايات البلاستيكية والكابلات الكهربائية في إطار الاقتصاد الدائري	
6	1.I تمهيد
6	2. I الإطار المفاهيمي للاقتصاد الدائري والنفايات الصلبة
6	I . 2 . 1. تعريف الاقتصاد الدائري
7	I . 2 . 2. أهمية الاقتصاد الدائري
7	I . 2 . 3. الفرق بين الاقتصاد الخطي والدائري.
8	I . 2 . 4. دور الاقتصاد الأخضر في تحقيق التنمية المستدامة.
10	3. I ماهية النفايات البلاستيكية وكابلات الكهربائية
10	I . 3 . 1. تعريف النفايات البلاستيكية والكابلات الكهربائية

11	I . 3 . 2. تصنيف النفايات البلاستيكية
12	I . 3 . 3. مصادر النفايات البلاستيكية
14	I . 3 . 4. أنواع النفايات البلاستيكية
17	I . 4. الأثر البيئي والاقتصادي لهذه النفايات
17	I . 4 . 1. الأثر البيئي والصحي
17	I . 4 . 2. أثر النفايات على الاقتصاد
17	I . 5. تحويل النفايات إلى موارد أولية ثانوية في إطار الاقتصاد الدائري
17	I . 5 . 1. مفهوم "النفايات كمادة أولية ثانوية"
18	I . 5 . 2. تقنيات تدوير البلاستيك
18	I . 5 . 3. تقنيات تدوير الكابلات الكهربائية
24	I . 5 . 4. خصائص المواد المسترجعة PET، HDPE، النحاس، والألمنيوم ومجالات استخدامها
25	I . 6. التحليل الاقتصادي لتدوير النفايات البلاستيكية و الكابلات الكهربائية
25	I . 6.1 إحصائيات عالمية ومحلية عن حجم هذه النفايات.
27	I . 2.6 الإطار القانوني والتشريعي المحفز لتدوير النفايات.
28	I . 3.6 تحليل الجدوى الاقتصادية والبيئية (مقارنة التقنيات و أثرها)
29	I . 7. نماذج دراسة حالات ناجحة عالمياً في تدوير البلاستيك
30	I . 8. خلاصة الفصل
31	المراجع
الفصل الثاني الأدوات و الطرق	

38	II.1. تمهيد
38	II.2. المواد والوسائل المستعملة
39	II.3. الأجهزة المستعملة
41	II.4. طريقة العمل
41	II.4.1 مخطط سير العمل
41	II.2.4 تحضير العينة
45	II.5 عملية استخلاص ممهلات الذهب باستعمال جهاز السوكسلي
46	II.6 تجارب انحلالية
47	II.7 التحاليل الطيفية
47	II.7.1 التحليل الطيفي بالأشعة فوق البنفسجية والمرئية UV-Visible
48	II.7.2 التحليل بالأشعة تحت الحمراء FTIR
51	II.8 تثمين العينة البلاستيكية
51	II.8.1 تحضير الرغوة البوليمرية
52	II.8.2 توصيف الرغوة المحضرة
53	II.2.8 تحليل المجهر الإلكتروني الماسح MEB/SEM
الفصل الثالث: النتائج والمناقشة	
57	III.1. تجارب الانحلالية :
58	III.2. تحليل نتائج الأشعة البنفسجية UV VIS
58	III.2.1. تحليل العينة الخارجية قبل الاستخلاص
59	III.2.1. تحليل العينة الخارجية بعد الاستخلاص
60	III.3.2. تحليل العينة الداخلية قبل الاستخلاص
61	III.4.2. تحليل العينة الداخلية بعد الاستخلاص
62	III.5.2. تحليل مذيب السيكلوهكسان بعد استخلاص العينة الخارجية

63	6.2.III تحليل مذيب السيكلوهكسان بعد استخلاص العينة الداخلية
64	III 3. مطيافية الأشعة تحت الحمراء
65	III 1.3. تحليل عينة بلاستيك الداخلي
67	III 2.3. تحليل عينة بلاستيك الخارجي
69	III 3.3. الاستنتاج العام لتحليل FTIR
70	III 4. الملاحظة العينية للرقعة المحضرة
71	III 1.4. مناقشة النتائج
74	III 5. الخصائص الفيزيوميكانيكية لهندسة الخلايا في رقعة البولي يوريثان:
75	III 1.5. التوصيف المورفولوجي والظاهري بواسطة المجهر الإلكتروني الماسح (MEB)
76	III 2.5. التحليل الكيميائي و النوعي بواسطة مطيافية الأشعة السينية المشتتة من الطاقة edx
79	الخلاصة العامة
82	الملخص
83	الملاحق

المقدمة

مقدمة:

في ظلّ التحوّلات العالمية المتسارعة التي يشهدها العالم في العقود الأخيرة، برزت قضايا البيئة والتنمية المستدامة كأحد أهم التحديات التي تواجه البشرية، خاصة مع تزايد تأثيرات تغير المناخ وارتفاع معدلات التلوث الناتجة عن الأنشطة الصناعية والاستهلاكية. وقد أدت الأزمات المتداخلة المرتبطة بالغذاء والطاقة والمياه العذبة إلى تعميق الفجوة التنموية بين الدول، لا سيما في الدول النامية، حيث تتأثر بشكل أكبر بضعف البنية التحتية البيئية والاقتصادية. كما ساهم النمو السكاني المتسارع والتوسع العمراني في زيادة حجم النفايات الصلبة، خاصة البلاستيكية والإلكترونية، مما أدى إلى تفاقم الضغوط على الموارد الطبيعية وتهديد النظم البيئية، وهو ما يتعارض مع أهداف الأمم المتحدة المتعلقة بالتنمية المستدامة [1-2].

وفي هذا السياق، أصبح تبني استراتيجيات فعّالة لإدارة النفايات وإعادة تدويرها ضرورة حتمية لتحقيق التوازن بين النمو الاقتصادي وحماية البيئة، حيث تُمثل النفايات البلاستيكية والكابلات الكهربائية نسبة معتبرة من إجمالي المخلفات الصلبة، نظرًا لارتفاع استهلاكها وصعوبة تحللها في الطبيعة. ويساهم سوء إدارة هذه النفايات في التسبب بمخاطر صحية وبيئية جسيمة، من بينها تلوث التربة والمياه وانبعاث الغازات السامة. بالمقابل، يتيح تدوير هذه النفايات فرصًا اقتصادية واعدة من خلال استرجاع المواد الأولية وتقليل الاعتماد على الموارد الطبيعية، وهو ما يتماشى مع مبادئ الاقتصاد الدائري الذي يهدف إلى تقليل الفاقد وتعظيم الاستفادة من الموارد [3-4].

وانطلاقًا من هذه المعطيات، تتبلور إشكالية البحث في التساؤل التالي: كيف يمكن لتدوير النفايات البلاستيكية والكابلات الكهربائية أن يساهم في تعزيز الاقتصاد الأخضر وتحقيق نموذج الاقتصاد الدائري المستدام؟ ويهدف هذا البحث إلى تحليل دور إعادة التدوير في الحد من التلوث البيئي، وتقييم مساهمتها في خلق فرص اقتصادية جديدة، بالإضافة إلى إبراز أهم الآليات والسياسات التي يمكن اعتمادها لدعم هذا التوجه على المستويين المحلي والدولي. كما يسعى إلى توضيح العلاقة بين إدارة النفايات وتحقيق أهداف التنمية المستدامة، واقتراح حلول عملية لتعزيز التحول نحو اقتصاد أخضر قائم على الكفاءة في استخدام الموارد والاستدامة البيئية [5-6].

المراجع

- [1] United Nations. (2020). The Sustainable Development Goals Report 2020. New York: United Nations.
- [2] World Bank. (2019). What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. Washington, DC: World Bank.
- [3] Ellen MacArthur Foundation. (2017). A New Textiles Economy: Redesigning Fashion's Future.

[4] United Nations Environment Program (UNEP). (2021). From Pollution to Solution: A Global Assessment of Marine Litter and Plastic Pollution. Nairobi: UNEP.

[5] Organization for Economic Co-Operation and Development (OECD). (2020). Global Material Resources Outlook to 2060: Economic Drivers and Environmental Consequences. Paris: OECD Publishing.

[6] European Commission. (2020). Circular Economy Action Plan: For a Cleaner and More Competitive Europe. Brussels : European Commission.

الفصل الأول:
تدوير النفايات البلاستيكية والكابلات
الكهربائية في إطار الاقتصاد الدائري

1.1 تمهيد

تشكل البيئة الإطار الحيوي لاستمرار الحياة والتنمية، غير أن التوسع الصناعي والاستهلاكي أدى إلى تزايد النفايات، خاصة البلاستيكية والكهربائية، بما يفرض ضغوطاً متنامية على الموارد الطبيعية والنظم البيئية. وفي مواجهة هذه التحديات برز الاقتصاد الأخضر الدائري كنموذج يهدف إلى تقليل الهدر وتعظيم كفاءة استخدام الموارد عبر إعادة الاستخدام والتدوير وتحويل النفايات إلى قيمة اقتصادية [1].

2.1. الإطار المفاهيم للاقتصاد الدائري والنفايات الصلبة**1.2.1. تعريف الاقتصاد الدائري**

لربط علم الاقتصاد بعلم البيئة، استعملت عدة مصطلحات في المناقشات العامة الدولية والعربية منها التنمية المستدامة، الاقتصاد البيئي، النمو الأخضر النشاط الاقتصادي الإيكولوجي، التنمية الخضراء، الاقتصاد الأخضر، وأحدث هذه المصطلحات هو الاقتصاد الأخضر أو الاقتصاد الدائري [2].

ظهر مصطلح الاقتصاد الدائري سنة 1989 مع ظهور كتاب بعنوان "اقتصاديات الموارد الطبيعية والبيئة" الصادر عن مطبعة جامعة جونز هو يكثر الأميركية، لمؤلفيه ديفيد بيرس وأر كيري تيرمز، يبين هذا الكتاب العلاقة بين الاقتصاد والموارد الطبيعية والبيئة، وطبيعة التكامل بين النظام البيئي والاقتصادي وأهم ظواهر الانحراف في النظام البيئي وآثارها الاقتصادية، ويتميز المؤلفان فيه بين ما يسمى بالاقتصاد الخطي حيث يكون استهلاك الموارد مفتوحاً والاقتصاد الدائري [3]. وباعتبار هذا المفهوم حديث التداول فتح باباً واسعاً للبحث بين الاقتصاديين وجميع المهتمين في مدى جدواه وكونه آلية للحفاظ على البيئة، فقد تعددت الآراء والتعريفات حوله، وسنقتصر على بعض هذه التعاريف:

وقد عرف على أنه الاقتصاد الذي لا ينتج عنه نفايات نهائية إلا بكميات قليلة جداً وفي أضيق الحدود، ولا يترتب عليه أي آثار سلبية على البيئة، ويقوم على تدوير المكونات والمنتجات، وإعادة الاستخدام والتدوير بجودة عالية كما أن السلع والمنتجات تكون قابلة للإصلاح والتجديد من بداية تصميمها بما يضمن الاستفادة منها مرات عديدة، وبالتالي ضمان الاستخدام الأمثل والفعال للموارد المتاحة، وبما يحقق التنمية المستدامة. [3]

كما عرف الاقتصاد الدائري على أنه اقتصاد تصميمي يهدف إلى الحفاظ على المنتجات والمواد في أعلى فائدة وقيمة لها واستخدامها أكثر من مرة ولكن التعريف الأكثر ذكراً للاقتصاد الدائري على أنه نظام صناعي يتم ترميمه أو تجديده بواسطة البنية والتصميم وخلق نظام يستبدل مفهوم "نهاية الحياة" باستعادة التحول نحو استخدام الطاقة المتجددة، ويزيل استخدام المواد الكيميائية السامة، التي تعوق إعادة الاستخدام، وتهدف إلى القضاء على النفايات وتحويل النفايات من عبء مالي إلى مورد اقتصادي جديد [4].

الفصل الأول: تدوير النفايات البلاستيكية والكابلات الكهربائية في إطار الاقتصاد الدائري

من خلال ما سبق يمكننا تعريف الاقتصاد الدائري على أنه الاقتصاد الدائري هو نموذج اقتصادي يهدف إلى تقليل الهدر وتعظيم الاستفادة من الموارد من خلال إبقاء المنتجات والمواد قيد الاستخدام لأطول فترة ممكنة، عبر إعادة الاستخدام، والإصلاح، وإعادة التصنيع، وإعادة التدوير، بدلاً من نموذج "الاستخراج-الإنتاج-الاستهلاك-الرمي" التقليدي.



نموذج آلية
الدائري

الاقتصاد

الشكل I-1:-
الاقتصاد

2.2.I. أهمية

الدائري

تتمثل أهمية الاقتصاد الدائري في [5]:

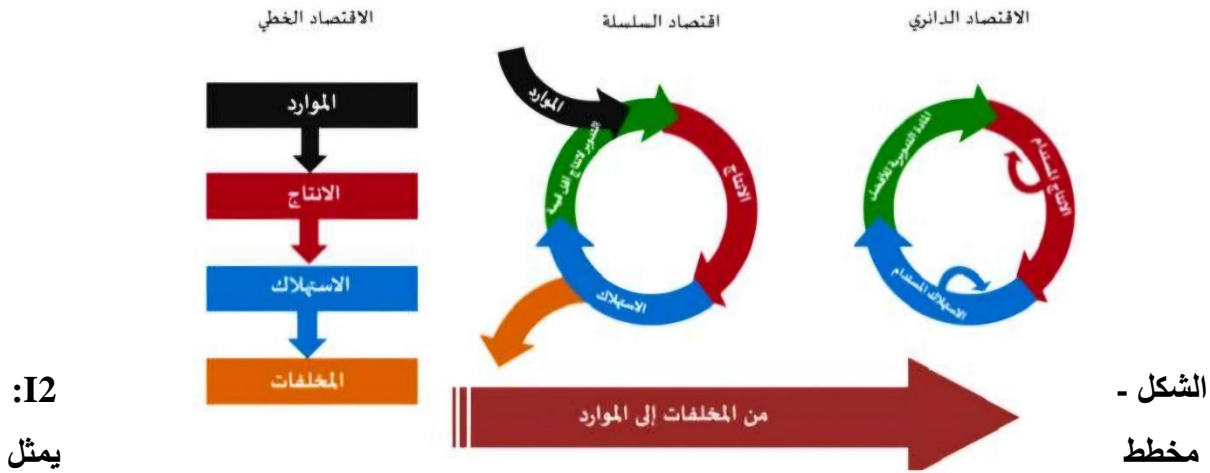
- حماية البيئة، فهو يقلل من الانبعاثات التي تزيد من آثار تغير المناخ، ويقلل من استهلاك الموارد الطبيعية، ويقلل من إنتاج النفايات وفقدان التنوع البيولوجي.
- يعود بالفائدة على الاقتصاد المحلي: من خلال التشجيع على إنتاج النماذج القائمة على إعادة استخدام الفاقد المحلي كمواد خام.
- يعزز نمو التوظيف: يحفز تطوير نموذج صناعي جديد أكثر ابتكاراً وتنافسية، ويعزز النمو الاقتصادي، ويزيد من فرص العمل.
- يعزز استقلالية الموارد: إذ أن إعادة استخدام الموارد المحلية يمكن أن يقلل من الاعتماد على المواد الخام المستوردة.
- يعزز من الرفاهية الاجتماعية والعدالة من خلال تحسين الوصول إلى السلع والخدمات.

3.2.I. الفرق بين الاقتصاد الخطي والدائري.

يعد التحول من الاقتصاد الخطي إلى الدائري خطوة أساسية لضمان الاستدامة البيئية والاقتصادية، لفترة طويلة من الزمن؛ كان اقتصادنا خطياً وهذا يعني أن المواد الخام تستخدم في صنع منتج، وبعد

الفصل الأول: تدوير النفايات البلاستيكية والكابلات الكهربائية في إطار الاقتصاد الدائري

استخدامه يتم التخلص من أي نفايات مثل التعبئة والتغليف في اقتصاد يقوم على إعادة التدوير؛ يتم إعادة استخدام المواد على سبيل المثال يتم استخدام نفايات الزجاج في صناعة زجاج جديد، ويتم استخدام نفايات الورق في صناعة ورق جديد لضمان وجود مواد خام كافية في المستقبل للطعام والملابس والتدفئة وغيرها من الضروريات، يجب أن يصبح اقتصادنا دائريا؛ وهذا يعني منع الهدر عن طريق جعل المنتجات والمواد أكثر كفاءة وإعادة استخدامها إذا كانت هناك حاجة إلى مواد خام جديدة، فيجب الحصول عليها بشكل مستدام حتى لا تتضرر البيئة الطبيعية والبشرية [6]. حيث الشكل الموالي يوضح عملية التحول من الاقتصاد الخطي إلى الاقتصاد الدائري:



I2:
يمثل

الفرق بين الاقتصاد الخطي والدائري

ويمكن توضيح الفرق بين الاقتصاد الخطي والدائري في الجدول التالي:

جدول (I1-): يوضح المقارنة بين الاقتصاد الخطي والاقتصاد الدائري

الاقتصاد الدائري	الاقتصاد الخطي	الجانب
إعادة استخدام-تدوير-تجديد	استخراج - إنتاج-نفايات	تدفق المواد
تحويل النفايات إلى موارد	التخلص النهائي	إدارة النفايات
تقليل انبعاثات بنسبة تصل إلى 39%	استنزاف موارد، تلوث عالي	التأثير البيئي
الاستدامة	إنتاج كميات كبيرة رخيصة	الهدف الاقتصادي

I.2.4. دور الاقتصاد الأخضر في تحقيق التنمية المستدامة.

يُعدّ الاقتصاد الأخضر ركيزة أساسية لتحقيق التنمية المستدامة، حيث يساهم في دعم النمو الاقتصادي وتقليل التلوث البيئي من خلال تحسين كفاءة استخدام الموارد والحد من الانبعاثات الضارة مثل ثاني أكسيد الكربون. وقد أصبح محور اهتمام الدول التي تسعى لإيجاد حلول فعالة لمشكلات التلوث واستنزاف الموارد [7].

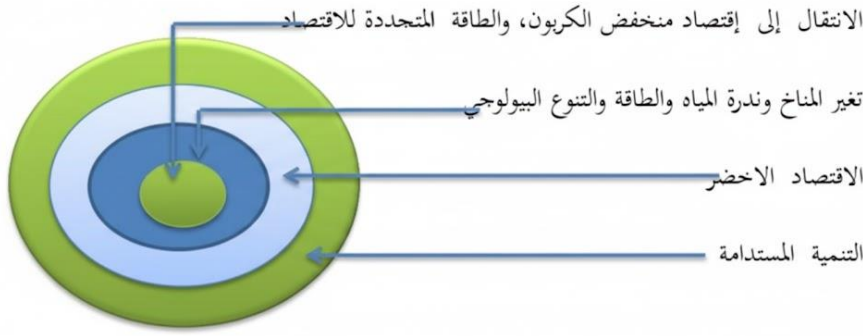
الفصل الأول: تدوير النفايات البلاستيكية والكابلات الكهربائية في إطار الاقتصاد الدائري

كما يعزّز الاقتصاد الأخضر التكامل بين الاقتصاد والبيئة، من خلال سياسات تهدف إلى حماية الموارد الطبيعية والحد من آثار التغيرات المناخية. وهو يُعد أداة عملية لتحقيق التنمية المستدامة وليس بديلاً عنها، حيث يساهم في تحويل أهدافها العامة إلى سياسات واستراتيجيات تطبيقية، وهو ما أكدته مؤتمر ريو+20 باعتباره من أهم الوسائل لتحقيق هذا الهدف [8].

يسعى الاقتصاد الأخضر إلى تحقيق التنمية المستدامة وذلك من خلال الحفاظ على البيئة والاستغلال الأمثل للموارد، ويتضح دوره فيما يلي [9]:

- مواجهة التحديات البيئية من خلال خفض انبعاثات غازات الاحتباس الحراري، وتحسين كفاءة استخدام الموارد، وتقليل حجم النفايات وإعادة تدويرها بطريقة صحيحة وسليمة، وحماية التنوع البيولوجي ووقف استنزاف الغابات والثروة السمكية.
- التخلص من الفقر من خلال تبني الاقتصاد الأخضر يمكن خلق فرص عمل كبيرة في مختلف القطاعات الاقتصادية، وذلك عن طريق إدارة الموارد الطبيعية بشكل رشيد، والحفاظ على النظم البيئية، لضمان استفادة مستدامة من هذه الموارد وتحسين أوضاع الفقراء مباشرة، بالإضافة إلى خلق فرص عمل جديدة في قطاعات الزراعة والطاقة والنقل والصحة.
- تحفيز النمو الاقتصادي من المتوقع أن تكون الاستثمارات الخضراء محفزا للنمو الاقتصادي، حيث ستساهم في تسريع النمو الاقتصادي العالمي على المدى الطويل بنسبة تفوق النمو الناتج عن السيناريو الحالي، هذا ما أشارت إليه منظمة الأمم المتحدة في عام 2011 في تقريرها.
- تحقيق التنمية المستدامة بأبعادها البيئية والاقتصادية والاجتماعية.

تنسجم العلاقة بين الاقتصاد الأخضر والتنمية المستدامة بالتكامل، حيث يساهم التحول نحو الاقتصاد الأخضر في دعم جوانب التنمية المستدامة كتحسين الكفاءة البيئية وتقليل تأثيرها البيئي من خلال الانبعاثات الكربونية وتحسين كفاءة استخدام الموارد [9]. فهي علاقة الجزء من الكل، فلا تتحقق التنمية المستدامة إلا من خلال تحقيق التأهل البيئي والحماية البيئية فهي تعتبر جزء لا يتجزأ من التنمية الاقتصادية [10] وهذا ما يوضحه الشكل التالي [11]:



الشكل I3-: العلاقة بين الاقتصاد الأخضر والتنمية المستدامة

3.I ماهية النفايات البلاستيكية وكابلات الكهرباء

1.3.I تعريف النفايات البلاستيكية والكابلات الكهربائية

البلاستيك (اسم) مادة لدائنية (مرنة) عضوية الأصل أو مركبة، يمكن سبكها تحت تأثير الحرارة أو الضغط، تقبل التشكيل، وتصنع منها أدوات مختلفة [12].

ولقد اشتق لفظ البلاستيك من كلمة أخرى هي " البلاستيسين " وهي كلمة تطلق على نوع من الصلصال سهل التشكيل ، والبلاستيك يخلق من مركبات عضوية مكلورة وغير مكلورة ذات أوزان جزيئية كبيرة جدا ، تتكون جزيئتها من سلاسل طويلة من مركب واحد في صورة متكررة ترتبط فيما بينها بروابط كيميائية تحت ضغط وحرارة عالية، لتكون ما يسمى بالبوليمرات Polymers وأشهر هذه البوليمرات هي " البولي فنيل كلوريد" أو ما يطلق عليه (PVC) ويضاف لعجينة المواد البلاستيكية مواد تمثل من 45-65% من العجينة الكلية، وهي عبارة عن مواد مثبتة ومستحلبات ومضادات للأكسدة، وهي التي تكسب البلاستيك الخام الليونة طول العمل ومقاومة الأكسدة، ومنع تكوين شحنات كهربية عليه وغيرها من الخواص المرغوبة، ويوجد أكثر من خمسين نوع من البلاستيكيات [12].

الكابلات الكهربائية هي الكابلات والأسلاك المستعملة أو المهملة الناتجة عن عمليات الصيانة، الهدم، أو نهاية العمر الافتراضي للأنظمة الكهربائية، والتي تحتوي على معادن ثمينة مثل النحاس والألومنيوم مغطاة بعوازل بلاستيكية أو مطاطية فهي تشكل جزءاً من النفايات الإلكترونية أو الكهربائية الخطرة بسبب إمكانية تسرب مواد سامة عند سوء التعامل [13].

2.3.I تصنيف النفايات البلاستيكية

عادة ما تصنف المواد البلاستيكية من حيث تركيبها الكيميائي العمود الفقري وسلاسل البوليمر الجانبية)، إلا أن التصنيف التكنولوجي للمواد البلاستيكية من حيث تأثير الحرارة عليها هو الأهم وينقسم إلى نوعان [14]:

- النوع الأول هو اللدائن المطاوعة للحرارية (thermoplastiques) وهي مجموعة من المواد البلاستيكية ذات البنية الجزيئية الخطية والتي تتلدن بالحرارة أثناء تسخينها وتتصلب بالبرودة أثناء تبريدها وتتميز هذه المواد بأنها لا تفقد لدونتها بتكرار التسخين والتبريد.
- النوع الثاني هو اللدائن المتصلدة بالحرارية (thermosetting) وهي مجموعة من المواد البلاستيكية ذات البنية الجزيئية المختلطة والتي تفقد لدونتها بعد تصلبها الأول ولا يمكن إعادة تسخينها وتشكيلها من جديد وإذا تم تسخينها على سبيل التجربة لدرجة حرارة فوق درجة حرارة انصهارها تتفحم وتنهار دون أن تتلدن.

3.3.I مصادر النفايات البلاستيكية

تتعدد مصادر مادة البلاستيك ضمن النفايات الصلبة، فقد تأتي من النفايات السكنية أو مخلفات المصانع والمؤسسات، أو نفايات الأنشطة التجارية، الجدول التالي يوضح ذلك [15]:

جدول (I2-): مصادر النفايات البلاستيكية والكابلات الكهربائية

النفايات البلاستيكية	
سكنية	نفايات المواد الغذائية والورق والكرتون الورق المقوى) البلاستيك المنسوجات الجلود، نفايات الحدائق، الخشب الزجاج المعادن الرماد، النفايات الخاصة النفايات كبيرة الحجم والالكترونيات الاستهلاكية الأدوات المنزلية المعمرة البطاريات الزيوت والإطارات والنفايات المنزلية الخطرة) [16].
صناعية	النفايات المتعلقة بالخدمات والتنظيف ونفايات التغليف ونفايات المواد الغذائية ونفايات مواد البناء والهدم والنفايات الخطرة والرماد والنفايات الخاصة [16].
تجارية	نفايات الأوراق والكرتون والمواد البلاستيكية، والخشب ونفايات المواد الغذائية والزجاج والمعادن والنفايات الخاصة والنفايات الخطرة [16].
مخلفات المنشآت والمؤسسات الهدم والبناء	نفايات الورق والورق المقوى والمواد البلاستيكية ونفايات المواد الغذائية والزجاج والمعادن والنفايات الخاصة والنفايات الخطرة والنفايات الطبية. نفايات الأخشاب والصلب والخرسانة وغيرها.
الناتجة عن خدمات البلدية	النفايات الناتجة عن كنس الشوارع وتهيئة المناظر الطبيعية وتقليم الأشجار ومخلفات النفايات العامة في المنتزهات والشواطئ وغيرها من المناطق [16].
الكابلات الكهربائية	
الشبكات الكهربائية والصيانة	خلال استبدال الكابلات القديمة في خطوط النقل والتوزيع، خاصة في المناطق الحضرية والصناعية [16].
التفكيك والإنشاءات	من الهدم في المباني والمصانع، حيث تُترك الكابلات مهجورة داخل الجدران أو على الرفوف.

النفايات الإلكترونية	كابلات الأجهزة المنزلية، السيارات، الشبكات، والاتصالات مثل كابلات الإنترنت والتلفزيون.
----------------------	--

4.3.I. أنواع النفايات البلاستيكية

تُصنف المواد البلاستيكية إلى سبعة أنواع رئيسية، يتميز كل منها بتركيب كيميائي فريد وخصائص مميزة تؤثر على استخداماته ومدى أمانه وقابليته لإعادة التدوير [17]. فيما يلي تفصيل لكل نوع:

الفصل الأول: تدوير النفايات البلاستيكية والكابلات الكهربائية في إطار الاقتصاد الدائري

جدول (I3-): أنواع البلاستيك

النوع	الصيغة الكيميائية	الخصائص	الاستخدامات الشائعة
PET أو PETE (Polyéthylène) Téréphtalate - بولي إيثيلين تيريفثالات)	يُعرف PET بشفافيته وقوته ومقاومته للمواد الكيميائية. وهو أحد أكثر أنواع البلاستيك استخدامًا في التعبئة والتغليف [17]. الصيغة الكيميائية: $(C_{10}H_8O_4)_n$ أو [-CO-C ₆ H ₄ -CO-O-CH ₂ -CH ₂ -O-] _n	شفاف، قوي، مقاوم للمواد الكيميائية، خفيف الوزن [18].	زجاجات المياه والمشروبات الغازية والعصائر، عبوات زيت الطهي، عبوات زبدة الفول السوداني، وتغليف الأطعمة الشفاف [19].
HDPE (High-Density) Polyéthylène - بولي إيثيلين عالي الكثافة)	يُعرف HDPE بمتانته وقوته وصلابته ومقاومته للرطوبة والمواد الكيميائية ودرجات الحرارة القصوى. يعتبر من أكثر أنواع البلاستيك أمانًا [18]. $(C_2H_4)_n$ أو [-CH ₂ -CH ₂ -] _n	قوي، صلب، مقاوم للظروف القاسية (الحرارة المرتفعة والمنخفضة)، مقاوم للرطوبة، سهل إعادة التدوير [17].	حاويات الحليب، علب المنظفات، زجاجات الشامبو، أنابيب المياه، ألعاب الأطفال، صناديق القمامة [19].
PVC (Polyvinyle Chloride) - بولي فينيل كلوريد)	يمكن أن يكون PVC مرناً أو صلباً، ويعرف بمقاومته للصدمات والتآكل والمواد الكيميائية. ومع ذلك، فإنه يُثير مخاوف صحية وبيئية. الصيغة الكيميائية [18]: $(C_2H_3Cl)_n$ أو [-CH ₂ -CHCl-] _n	شفاف، مقاوم للصدمات، مقاوم للتآكل، يمكن أن يكون صلباً أو مرناً [17].	أنابيب السباكة، عزل الأسلاك الكهربائية، بعض أنواع تغليف المواد الغذائية القوية، الأرضيات، إطارات النوافذ [19].



الفصل الأول: تدوير النفايات البلاستيكية والكابلات الكهربائية في إطار الاقتصاد الدائري

<p>الأكياس البلاستيكية (أكياس التسوق والقمامة)، أغلفة التغليف، الأفلام البلاستيكية، زجاجات الضغط (مثل زجاجات الكاتشب) [19].</p>	<p>مرن، ناعم، مقاوم للحرارة المنخفضة [17].</p>	<p>يتميز LDPE بمرونته وكونه أكثر ليونة من HDPE، ويستخدم غالبًا في المنتجات التي تتطلب درجة عالية من المرونة. الصيغة الكيميائية: $(C_2H_4)_n$ (مشابه لـ HDPE لكن بسلاسل متفرعة أكثر) [18].</p>	<p>LDPE (Low-Density Polyéthylène - بولي إيثيلين منخفض الكثافة)</p>
<p>عبوات تسخين الطعام في الميكروويف، حاويات الزبادي، أغذية الزجاجات، الحفاضات، الأدوية، بعض أكياس رقائق البطاطس، أدوات المائدة البلاستيكية [19].</p>	<p>متين، مقاوم للحرارة (حتى 100 درجة مئوية)، خالي من مادة BPA [17].</p>	<p>يُعرف PP بمتانته ومقاومته للحرارة، مما يجعله مثاليًا للعديد من التطبيقات التي تتطلب مقاومة لدرجات الحرارة المرتفعة [18].</p>	<p>PP (Polypropylène - بولي بربيلين)</p> 
<p>أكواب المشروبات الساخنة (الفوم)، أطباق وأدوات المائدة التي تستخدم مرة واحدة، علب الوجبات السريعة، مواد التغليف الواقية (حشوات)، حافظات الأقراص المدمجة [19].</p>	<p>صلب أو رغوي، خفيف الوزن، شفاف (عندما يكون صلبًا) [17].</p>	<p>يمكن أن يكون PS صلبًا وشفافًا أو رغويًا (المعروف باسم الستايروفوم)، ويتميز بخفة وزنه [18]. الصيغة الكيميائية: $(C_8H_8)_n$ أو $[-CH_2-CH(C_6H_5)-]_n$</p>	<p>PS (Polystyrène - بولي ستايرين)</p>
<p>زجاجات المياه الرياضية القابلة لإعادة الاستخدام (إذا كانت من PC)، أجزاء السيارات، إطارات النظارات، الهواتف المحمولة، الألواح البلاستيكية، العدسات البصرية [19].</p>	<p>متنوعة جدًا، وتشمل أنواعًا مثل البولي كربونات (PC)، البولي أميد (PA)، البلاستيك الحيوي (PLA)، والأكريليك. قد تحتوي بعضها على مواد ضارة مثل BPA [17].</p>	<p>تُشير هذه الفئة إلى جميع أنواع البلاستيك الأخرى التي لا تندرج تحت الفئات الست السابقة، بالإضافة إلى المخالط البلاستيكية [18].</p>	<p>Other (أخرى)</p> 

4.I الأثر البيئي والاقتصادي لهذه النفايات

1.4.I الأثر البيئي والصحي

تمثل النفايات البلاستيكية تحديًا بيئيًا وصحيًا واقتصاديًا كبيرًا، إذ قد تؤدي إلى أضرار صحية نتيجة تسرب المواد الكيميائية إلى الغذاء، خاصة عند الاستخدام غير السليم. بيئيًا، تساهم في تلوث الهواء والمياه والترربة، وتزيد من الاحتباس الحراري [20]، كما تتسبب في نفوق الكائنات الحية بسبب بطء تحللها، إضافة إلى مخاطر الكابلات التي تحتوي على معادن ثقيلة [21].

2.4.I أثر النفايات على الاقتصاد

اقتصاديًا، تؤدي هذه النفايات إلى خسائر كبيرة، خاصة في قطاعي السياحة والصيد البحري، نتيجة تدهور الشواطئ وتضرر الثروة السمكية، فضلًا عن ارتفاع تكاليف التنظيف والمعالجة. لذلك، تبرز أهمية تبني حلول مستدامة قائمة على إعادة التدوير وتقليل النفايات ضمن إطار الاقتصاد الأخضر [20].

5.I تحويل النفايات إلى موارد أولية ثانوية في إطار الاقتصاد الدائري

1.5.I مفهوم "النفايات كمادة أولية ثانوية"

يطلق عموماً مصطلح النفاية (Waste) على كل ما ينتج من استهلاك المواد الطبيعية بواسطة الإنسان وكافة الكائنات الحية الأخرى، أو المواد التي تنتج من استخدام الصناعات ولم يعد لها قيمة ومن ثمة يستوجب التخلص منها [22].

عرفها المشرع الجزائري على أنها: كل البقايا الناتجة عن عمليات الإنتاج أو التحويل أو الاستعمال وبصفة أعم كل مادة أو منتج وكل منقول يقوم المالك أو الحائز بالتخلص منه أو قصد التخلص منه أو يلزم بالتخلص منه أو بإزالته [23].

عرفت النفايات حسب مجموعة باحثين على أنها [24]:

- عبارة عن مخلفات الأنشطة الإنسانية المنزلية أي هي كل المنقولات المتروكة، أو المتخلي عنها في مكان ما، والتي تركها كما هي تسيء للصحة والسلامة العامة.
- أي مواد، أو أشياء يتم التخلص منها بطريقة آمنة طبقاً لأحكام القانون الدولي، والوطني، ومن أمثلة هذه النفايات العلب، وقوارير الماء البلاستيكية وغير ذلك.

2.5.I. تقنيات تدوير البلاستيك

تُعدّ عملية تدوير البلاستيك من العمليات التقنية المهمة في إطار الاقتصاد الدائري، حيث تهدف إلى استرجاع المواد الخام وتقليل الأثر البيئي للنفايات الصناعية. وتشمل هذه العملية مجموعة من التقنيات المتخصصة.

1.2.5.I تقنيات تدوير البلاستيك ميكانيكا

يُعدّ إعادة التدوير الميكانيكي للنفايات البلاستيكية من أهم التقنيات المستعملة عالمياً في إدارة النفايات، حيث يعتمد على تحويل البلاستيك المستعمل إلى مواد قابلة لإعادة الاستخدام دون تغيير بنيته الكيميائية، مما يجعله أقل استهلاكاً للطاقة مقارنة بطرق أخرى مثل التدوير الكيميائي، إعادة التدوير الميكانيكي هي عملية معالجة فيزيائية للنفايات البلاستيكية بهدف تحويلها إلى مواد أولية ثانوية (رقائق أو حبيبات) يمكن استخدامها في تصنيع منتجات جديدة. وتُعد هذه الطريقة الأكثر شيوعاً خاصة مع اللدائن الحرارية مثل: البولي بروبيلين (PP)، بولي إيثيلين تيريفثالات (PET)، وبولي إيثيلين (PE) عالي الكثافة وذلك لأنها يمكن صهرها وإعادة تشكيلها عدة مرات [25].

تمرّ عملية إعادة التدوير الميكانيكي للنفايات البلاستيكية في بدايتها بمرحلتين أساسيتين تُعدّان حجر الأساس لنجاح باقي المراحل، وهما:

1. مرحلة الجمع:

تبدأ العملية بمرحلة الجمع (Collection)، والتي يتم فيها تجميع النفايات البلاستيكية من مصادر متعددة مثل المنازل، المؤسسات الصناعية، ومكبات النفايات. وتُعتبر هذه المرحلة تحدياً رئيسياً في إدارة النفايات، نظراً لتشتت مصادر البلاستيك وتنوعها، مما يتطلب أنظمة جمع فعّالة ومهيكلّة، سواء عبر الجمع الانتقائي أو من خلال شركات متخصصة في استرجاع النفايات. وتشير الدراسات إلى أن نجاح عملية إعادة التدوير يرتبط ارتباطاً وثيقاً بكفاءة أنظمة الجمع، حيث تؤثر هذه المرحلة بشكل مباشر على كمية وجودة المواد القابلة لإعادة التدوير [26].

2. مرحلة الفرز

وهي من أهم المراحل في إعادة التدوير الميكانيكي، حيث يتم فيها فصل النفايات البلاستيكية وفق معايير محددة مثل نوع البوليمر (كالبولي إيثيلين أو البولي بروبيلين)، اللون، والكثافة. ويهدف هذا الفرز إلى الحصول على مواد متجانسة تسهّل عمليات المعالجة اللاحقة. وتُبرز الدراسات أن هذه المرحلة تُعدّ حاسمة لضمان جودة المنتج النهائي، لأن خلط أنواع مختلفة من البلاستيك يؤدي إلى تدهور الخصائص

الميكانيكية للمادة المعاد تدويرها. كما تعتمد تقنيات الفرز الحديثة على وسائل متطورة مثل التحليل الطيفي والأشعة تحت الحمراء، مما يزيد من دقة الفصل ويُحسّن مردودية العملية [27].

3. مرحلة التنظيف

تُستكمل مراحل إعادة التدوير الميكانيكي للنفايات البلاستيكية بسلسلة من العمليات التقنية التي تهدف إلى تحسين جودة المادة وتحويلها إلى مادة أولية قابلة لإعادة الاستخدام الصناعي، وتبدأ هذه المراحل بعملية التنظيف. في هذه المرحلة يتم إزالة مختلف الشوائب العالقة بالبلاستيك مثل بقايا الطعام، المصقات، الزيوت، والأتربة، وذلك باستخدام الماء ومواد كيميائية أحياناً. وتُعد هذه الخطوة ضرورية لأنها تمنع تدهور خصائص البلاستيك أثناء المعالجة الحرارية اللاحقة، حيث تشير الدراسات إلى أن وجود الملوثات يؤثر سلباً على جودة المنتج النهائي ويؤدي إلى ضعف في خصائصه الميكانيكية [28].

4. مرحلة التقطيع

تلي ذلك مرحلة التقطيع (Shredding)، حيث يتم تحويل النفايات البلاستيكية إلى رقائق صغيرة أو قطع مجزأة باستعمال آلات خاصة، مما يسهل عمليات النقل والمعالجة الحرارية لاحقاً. وتكمن أهمية هذه المرحلة في زيادة المساحة السطحية للمادة، الأمر الذي يساعد على تحسين كفاءة الغسل والصهر، كما يضمن تجانساً أفضل أثناء العمليات اللاحقة [29].

5. مرحلة الغسل والتجفيف

بعد التقطيع، تمر المادة بمرحلة الغسل والتجفيف (Washing and Drying)، والتي تُعد استكمالاً لعملية التنظيف، حيث يتم غسل الرقائق البلاستيكية بشكل أكثر دقة لإزالة الشوائب الدقيقة، ثم تجفيفها للتخلص من الرطوبة التي قد تؤثر على جودة الصهر. وتؤكد الأبحاث أن التحكم في نسبة الرطوبة أمر أساسي لتفادي تكوّن فقاعات أو عيوب داخل المادة المعاد تدويرها [27].

6. مرحلة الصهر والبتق

تأتي مرحلة الصهر والبتق (Melting & Extrusion)، حيث يتم تعريض البلاستيك المجفف لدرجات حرارة مرتفعة داخل آلات البثق، فيذوب ويتحول إلى مادة لزجة يتم تشكيلها على شكل خيوط أو شرائط. وتُعتبر هذه المرحلة قلب عملية التدوير الميكانيكي، إذ يتم فيها إعادة تشكيل البوليمر دون تغيير بنيته الكيميائية، مع ضرورة التحكم في درجة الحرارة لتجنب تحلل المادة [27].

2.2.5.I تقنيات إعادة التدوير الكيميائي :

يعتبر إعادة التدوير الكيميائي للنفايات البلاستيكية من التقنيات الحديثة في مجال إدارة النفايات، حيث يقوم على تفكيك البوليمرات إلى مكوناتها الكيميائية الأساسية أو تحويلها إلى مواد كيميائية أو وقود، وذلك باستخدام عمليات حرارية أو كيميائية متقدمة. ويختلف هذا النوع من التدوير عن التدوير الميكانيكي في كونه يُحدث تغييرًا في البنية الجزيئية للبلاستيك، مما يسمح بمعالجة أنواع معقدة أو ملوثة لا يمكن إعادة تدويرها ميكانيكيًا. تتضمن عمليات إعادة التدوير الكيميائي عدة تقنيات رئيسية، من أبرزها التحلل الحراري (Pyrolysis)، والتغويز (Gasification)، وإزالة البلمرة (Depolymerization). ففي التحلل الحراري يتم تسخين البلاستيك في غياب الأكسجين لتفكيك سلسله الطويلة إلى جزيئات أصغر مثل الزيوت والغازات، بينما تعتمد عملية التغويز على تحويل البلاستيك إلى غاز تخليقي (Syngas) يمكن استخدامه في إنتاج مواد كيميائية أو وقود. أما إزالة البلمرة فتهدف إلى استرجاع المونومرات الأصلية التي تدخل في تصنيع بلاستيك جديد [30].

3.2.5.I تقنيات إعادة التدوير البلاستيك الحراري

تُعدّ تقنيات إعادة تدوير البلاستيك الحراري (Thermoplastics Recycling) من أكثر التقنيات انتشارًا، نظرًا لخاصية هذه المواد في الانصهار وإعادة التشكيل عدة مرات دون تغيير تركيبها الكيميائي، وهو ما يميزها عن اللدائن المتصلبة حراريًا. وتشمل هذه الفئة مواد مثل البولي إيثيلين (PE)، البولي بروبيلين (PP)، البولي إيثيلين تيرفثالات (PET)، والبولي ستايرين (PS)، وهي الأكثر استخدامًا في عمليات التدوير الميكانيكي. وتعتمد هذه التقنية على خاصية اللدائن الحرارية في إعادة الانصهار، لكنها تتطلب مواد نقية نسبيًا وخالية من التلوث لضمان جودة المنتج النهائي. وتُستخدم هذه الطريقة في إنتاج العديد من المنتجات مثل العبوات البلاستيكية، الأنابيب، والألياف الصناعية [31].

3.5.I تقنيات تدوير الكابلات الكهربائية

تُعدّ تقنيات تدوير الكابلات الكهربائية من أهم مجالات إعادة التدوير الصناعي، نظرًا لاحتوائها على مواد ذات قيمة عالية مثل النحاس والألمنيوم، إضافة إلى مواد بلاستيكية عازلة. وتعتمد هذه التقنيات أساسًا على فصل المعادن عن البلاستيك باستخدام عمليات ميكانيكية وفيزيائية مثل الطحن، والفرز المغناطيسي، والفصل الكهربائي.

1.3.5.I عملية فصل المعادن (النحاس أو الألمنيوم) عن الغلاف البلاستيكي

تعتمد عملية فصل المعادن (النحاس أو الألمنيوم) عن الغلاف البلاستيكي على الاختلاف في الخصائص الفيزيائية مثل الكثافة، التوصيلية الكهربائية، والمغناطيسية. وتشير الدراسات إلى أن هذه العملية تُعدّ المرحلة الأساسية في إعادة تدوير الكابلات، حيث لا يمكن إعادة استخدام المواد إلا بعد فصل مكوناتها بدقة [32]. كما تُستخدم عدة تقنيات لتحقيق هذا الفصل، منها:

- الفصل بالجاذبية (Gravity separation)
- الفصل الكهروستاتيكي (Electrostatic separation)
- الفصل بالتيارات الدوامية (Eddy current separation)

وقد أثبتت الدراسات أن هذه الطرق تسمح بالحصول على نقاوة عالية للمعادن المسترجعة، حيث يمكن أن تصل نسبة استرجاع النحاس إلى حوالي 97% في بعض العمليات الصناعية [33].

2.3.5.I تقنية الطحن (Shredding / Grinding)

تعدّ مرحلة الطحن أو التقطيع أول خطوة عملية في إعادة تدوير الكابلات، حيث يتم فيها تقليل حجم الكابلات إلى جزيئات صغيرة لفصل المكونات بسهولة. وتؤكد الدراسات أن هذه المرحلة ضرورية لتحرير الأسلاك المعدنية من الغلاف البلاستيكي، مما يسمح بزيادة كفاءة عمليات الفصل اللاحقة [34]. كما تُستخدم آلات مثل الكسّارات (Shredders)، المطاحن (Granulators) وتعمل هذه المعدات على إنتاج خليط من جزيئات النحاس والبلاستيك، يكون جاهزاً لعمليات الفصل الفيزيائي [35].

3.3.5.I الفرز المغناطيسي (Magnetic Separation)

يُستخدم الفرز المغناطيسي لفصل المعادن الحديدية (مثل الفولاذ) عن باقي مكونات الكابلات، حيث يعتمد على خاصية الانجذاب للمجال المغناطيسي. وتعدّ هذه التقنية فعالة بشكل خاص في إزالة الشوائب المعدنية قبل استرجاع النحاس أو الألمنيوم، مما يحسّن جودة المنتج النهائي. كما تشير الدراسات إلى أن التطورات الحديثة في أجهزة الفصل المغناطيسي عالية الشدة تسمح بتحسين كفاءة فصل المعادن حتى في النفايات المختلطة والمعقدة [36].

4.3.5.I تقنيات فصل متقدمة (مكملة)

إلى جانب الطحن والفصل المغناطيسي، تُستخدم تقنيات أخرى لرفع كفاءة الاسترجاع، مثل:

• الفصل الكهروستاتيكي

يعتمد على اختلاف التوصيلية الكهربائية بين المعادن والبلاستيك، حيث يتم فصل المواد تحت تأثير مجال كهربائي. وقد أظهرت الدراسات إمكانية تحقيق نقاوة تصل إلى أكثر من 98% للمواد المفصولة [32].

• الفصل بالجاذبية أو الهواء

يستغل الفرق في الكثافة بين النحاس والبلاستيك، حيث يتم فصل المواد باستخدام طاوولات اهتزازية أو تيارات هوائية [37].

4.5.I خصائص المواد المسترجعة PET، HDPE، النحاس، والألمنيوم ومجالات استخدامها

1.4.5.I خصائص واستخدامات مادة PET المعاد تدويرها

يتميز PET المعاد تدويره بصلاية جيدة ومقاومة للاهتراء وامتصاص منخفض للماء، مع احتفاظ نسبي بثبات أبعاده رغم انخفاض طفيف في خواصه بعد التدوير. ويُستخدم بشكل واسع في صناعة الألياف (البوليستر)، مواد التعبئة والتغليف، وبعض التطبيقات الصناعية ومواد البناء [38].

2.4.5.I خصائص واستخدامات HDPE المعاد تدويره

أما HDPE المعاد تدويره، فيتميز بكثافة عالية ومقاومة ممتازة للصدمات والمواد الكيميائية، إضافة إلى متانة جيدة حتى بعد عدة دورات تدوير. لذلك يُستعمل في الأنابيب، العبوات البلاستيكية، الصناديق، ومواد البناء [39].

3.4.5.I خصائص واستخدامات النحاس المعاد تدويره

ويُعدّ النحاس من أكثر المواد قابلية لإعادة التدوير دون فقدان خصائصه، حيث يحتفظ بموصلية الكهربائية والحرارية العالية وقابليته للتشكيل ومقاومته للتآكل. ويُستخدم أساسًا في الأسلاك والكابلات، الصناعات الإلكترونية، والأنابيب [40].

4.4.5.I خصائص واستخدامات الألمنيوم المعاد تدويره

يتميز الألمنيوم المعاد تدويره بخفة وزنه ومقاومته للتآكل وموصلية جيدة، مع إمكانية إعادة صهره دون فقدان كبير في الجودة، مما يجعله مناسبًا للتغليف (كالعلب)، وقطاع النقل، والبناء.

6.I التحليل الاقتصادي لتدوير النفايات البلاستيكية والكابلات الكهربائية

1.6.I إحصائيات عالمية ومحلية عن حجم هذه النفايات.

تشكل النفايات أضرار هائلة للبيئة والصحة على الرغم من تطبيقاتها الإيجابية المختلفة. في الواقع تستغرق الأكياس البلاستيكية حوالي 400 عام للتحلل، وعدم نفاذة يخلق ضيق في التنفس على مستوى النباتات لأنها لا تستطيع استكشاف الأعماق من خلال جذورها في التربة بحثًا عن الماء والمغذيات. بالإضافة إلى ذلك، فإن النفايات البلاستيكية لها عواقب وخيمة حقا على البيئة، في الواقع 5% فقط من 260 مليون طن من النفايات البلاستيكية يتم إعادة تدويرها يعني أننا نفرغ حوالي 247 مليون طن منها في الطبيعة كل عام مما أدى إلى خسائر لا مفر منها [41].

جدول (I4-): الإحصائيات والتوجهات في سوق البلاستيك العالمي والبلاستيك المعاد تدويره

الدولة	النفايات البلاستيكية يتم إعادة تدويرها	الحجم/الحصة (أحدث إحصائيات)
السعودية	3-4% حاليًا (1.49 مليون طن في 2020، يهدف إلى 95% بحلول 2030)؛ طلب في التغليف والسيارات والبناء	أكبر منتج في الشرق الأوسط؛ <2-3.4 مليون طن نفايات سنويًا
الإمارات العربية المتحدة	10% إقليميًا؛ توسع في التغليف الاستهلاكي والطبي؛ استرداد 130 مليون قنينة في 2024	أكبر مستورد بلاستيك في الشرق الأوسط وأفريقيا؛ ~1.5 مليون طن نفايات مُجمعة في 2020
مصر	60% من النفايات (1.5-2.5 مليون طن مُعاد تدويرها سنويًا)؛ توسع في الإلكترونيات والبناء؛ أول عربيًا	ثاني أكبر مستورد؛ 2.5 مليون طن نفايات، 5 ملايين طن استهلاك
الشرق الأوسط ككل	10% فقط؛ ثالث أكبر منتج بعد الصين والولايات المتحدة	جزء صغير من الإنتاج العالمي (~9% سابقًا، الآن أقل)؛ <50 مليون طن نفايات إقليميًا
الصين	أكبر منتج عالميًا	29-32% من الإنتاج العالمي (+400 مليون طن)
الولايات المتحدة	تغليف وسيارات واستهلاكي	17-20% من الإنتاج، 93.43 مليار دولار بحلول 2032
أوروبا	نمو مستقر	11% من الإنتاج
الهند	تحضر وبناء	جزء من آسيا (52.84% إقليميًا)

يقدم الجدول التالي ملخصًا لأبرز الإحصائيات والتوجهات في سوق البلاستيك العالمي والبلاستيك المعاد تدويره، بالإضافة إلى حجم التلوث الناتج عنه [42].

تنتج الجزائر كميات هائلة من النفايات سنويًا، مما يفرض ضرورة إعادة تدويرها واستغلالها في الصناعات التحويلية. تصل نسبة نفايات البلاستيك من نوع PET إلى 30% من إجمالي النفايات المنزلية، أي حوالي 390,000 طن سنويًا، بينما لا تتجاوز سعة منشآت تدوير هذا النوع 73,000 طن سنويًا، أي 19% فقط من الكمية المتاحة، مع معاناة هذه المنشآت من نقص المواد الخام. قدرت الوكالة الوطنية للنفايات حصة البلاستيك الكلي في النفايات المنزلية بنسبة 15% من إجمالي 13 مليون طن سنويًا، أي ما يقارب 2 مليون طن (وليس مليون طن كما ورد خطأ في النص الأصلي). ومع ذلك، لا يتجاوز معدل إعادة التدوير لهذه الكمية 9% فقط (حوالي 180,000 طن)، بينما يذهب الباقي (1.8 مليون طن) إلى مراكز الردم. [10]

2.6.I الإطار القانوني والتشريعي المحفز لتدوير النفايات.

عززت الجزائر إطارها القانوني البيئي منذ بداية الألفية لتحقيق مبادئ التنمية المستدامة، حيث يُعدّ القانون رقم 19-01 لسنة 2001 الأساس في تنظيم تسيير النفايات، من خلال التركيز على الوقاية من إنتاجها، وتنظيم عمليات الفرز والجمع والمعالجة، إضافة إلى تميمها عبر إعادة التدوير واسترجاع الطاقة، مع تعزيز التوعية البيئية وحماية الصحة العامة. ولتنفيذ هذا القانون، أصدرت الجزائر مجموعة من النصوص التطبيقية، من أبرزها: [43]

- المرسوم التنفيذي رقم 372-02 المؤرخ في 11 نوفمبر 2002 والمتعلق بنفايات التغليف
- المرسوم التنفيذي رقم 175-02 المؤرخ في 20 ماي 2002 المتضمن إنشاء الوكالة الوطنية للنفايات وتنظيمها وعملها؛
- القانون رقم 10-03 المؤرخ في 19 جويلية 2003 المتعلق بحماية البيئة في إطار التنمية المستدامة المرسوم التنفيذي رقم 199-04 المؤرخ في 19 جويلية 2004 والذي يحدد كيفية إنشاء النظام العمومي لمعالجة نفايات التغليف وتنظيمه وسيره وتمويله؛
- المرسوم التنفيذي رقم 477-03 المؤرخ في 9 ديسمبر 2003 والذي يحدد كيفية إجراءات إعداد المخطط الوطني لتسيير النفايات الخاصة ونشره ومراجعته، حيث تم نشر قرار مؤرخ في 15 مارس 2008 يتضمن تعيين أعضاء اللجنة المكلفة بإعداد المخطط الوطني لتسيير النفايات الخاصة
- المرسوم التنفيذي رقم 478-03 المؤرخ في 9 ديسمبر 2003 والذي يحدد كيفية تسيير النفايات العلاجية، والذي دعم بالقرار الوزاري المؤرخ في 4 أبريل 2011 والذي يحدد كيفية معالجة النفايات المتكونة من الأعضاء الجسدية
- المرسوم التنفيذي رقم 409-04 المؤرخ في 14 ديسمبر 2004 والذي يحدد كيفية نقل النفايات الخاصة بالخطرة
- المرسوم التنفيذي رقم 87-09 المؤرخ في 17 فيفري 2009 الذي يتعلق بالرسم على الأكياس البلاستيكية المستوردة و / أو المصنوعة محليا.
- المرسوم التنفيذي رقم 10-19 المؤرخ في 23 جانفي 2019 الذي ينظم تصدير النفايات الخاصة بالخطرة.

يعتمد النظام السويسري لإدارة النفايات الإلكترونية على مرسوم ORDEE الصادر في 14 جانفي 1998 (دخل حيّز التنفيذ في 01 جويلية 1998)، والذي يفرض إطاراً قانونياً صارماً لإرجاع واسترجاع الأجهزة الكهربائية والإلكترونية. [44]

- تنص المادة 03 على إلزامية إرجاع النفايات الإلكترونية، حيث يتوجب على كل شخص تسليمها إلى التاجر أو المصنع أو المستورد أو مراكز التجميع وإعادة التدوير.
- أما المادة 04 فتُلزم جميع الفاعلين في السوق (تجار، مصنعين، مستوردين) باسترجاع هذه النفايات مجاناً ضمن شروط محددة، إذ يلتزم التجار باستعادة الأجهزة المماثلة لما يبيعونه، بينما يتوجب على المصنعين والمستوردين استرجاع منتجاتهم، مع إمكانية تفويض جهة ثالثة لهذه المهمة. كما يشمل الالتزام نقاط البيع طوال ساعات العمل، باستثناء بعض المكونات الإلكترونية.

I.3.6 تحليل الجدوى الاقتصادية والبيئية (مقارنة التقنيات و أثرها)

يُظهر تحليل الجدوى أن تقنيات إعادة تدوير البلاستيك والكابلات الكهربائية تلعب دوراً مهماً ضمن إطار الاقتصاد الدائري من خلال تحقيق توازن بين الكفاءة الاقتصادية والحماية البيئية.

- من الناحية الاقتصادية:

يُعدّ التدوير الميكانيكي للبلاستيك الأكثر انخفاضاً في التكلفة لاعتماده على عمليات بسيطة، خاصة مواد مثل PET، بينما يتطلب التدوير الكيميائي استثمارات أعلى لكنه يتيح معالجة النفايات المعقدة. أما الكابلات الكهربائية، فتتمتع بجدوى اقتصادية مرتفعة بفضل احتوائها على معادن قيمة مثل النحاس والألمنيوم، مما يجعل استرجاعها مربحاً [28].

- من الناحية البيئية

يساهم التدوير الميكانيكي في تقليل استهلاك الطاقة والانبعاثات والتلوث البلاستيكي، في حين أن التدوير الكيميائي مفيد للنفايات غير القابلة للتدوير رغم استهلاكه العالي للطاقة. أما إعادة تدوير الكابلات فتُقلل من التعدين وتحدّ من استنزاف الموارد والانبعاثات، مما يجعلها خياراً بيئياً فعالاً [28].

I.7 نماذج دراسة حالات ناجحة عالمياً في تدوير البلاستيك

توجد حالات ناجحة عالمياً في تدوير البلاستيك والكابلات، تركز على الابتكار والشراكات لتحقيق اقتصاد دائري. أبرزها:

جدول (I5-): حالات ناجحة عالمياً في إعادة التدوير

المجال	الجهة / الدولة	النتائج المحققة	التقنية / المبادرة
تدوير البلاستيك	فنلندا Borealis	تحويل النفايات إلى منتجات ذات قيمة وتعزيز الاقتصاد الدائري	كراكر بالبخار لمعالجة البلاستيك صعب التدوير
	Precious Plastic	تمكين المجتمعات المحلية من إعادة التدوير وتقليل النفايات	آلات تدوير مفتوحة المصدر
	repurpose Global إندونيسيا/الهند	جمع أكثر من 239,000 رطل من النفايات البلاستيكية	جمع وإدارة النفايات بالشراكة مع المجتمع
تدوير الكابلات	إندونيسيا Bicycle	إنتاج حبيبات بلاستيكية عالية الجودة	تقنيات فرز متقدمة لإعادة تدوير LDPE
	Nexans + Sonepar فرنسا	جمع أكثر من 10 أطنان من الكابلات بمشاركة 300 عميل	برنامج CABLELOOP
	شركة اتصالات (الولايات المتحدة)	معالجة 10,000 طن سنوياً، خفض التكاليف 40% وزيادة أرباح المعادن	كسارات + فواصل كهروستاتيكية

تُظهر هذه الحالات أن نجاح إعادة التدوير عالمياً يعتمد على الابتكار التقني، الشراكات، وإشراك المجتمع، مما يساهم في تعزيز الاقتصاد الدائري وتحقيق الاستدامة البيئية والاقتصادية [45].

8.1 خلاصة الفصل

يُبرز الاقتصاد الأخضر الدائري كإطار حديث يوازن بين النمو الاقتصادي وحماية البيئة من خلال تقليل الهدر وتعظيم كفاءة استخدام الموارد. وفي هذا السياق، تمثل النفايات البلاستيكية والكابلات الكهربائية تحدياً بيئياً، لكنها في الوقت نفسه فرصة اقتصادية واعدة عبر استرجاع المواد القيمة وتعزيز الصناعات الخضراء وخلق فرص عمل. كما يُعدّ تدوير هذه النفايات ركيزة أساسية لتحقيق الاستدامة، إذ يساهم في تقليل التلوث والانبعاثات، والحد من استنزاف الموارد الطبيعية، خاصة من خلال استرجاع معادن مثل النحاس والألمنيوم. وبالتالي، فإن نجاح هذا التوجه يتطلب تكامل السياسات والابتكار التقني والوعي المجتمعي، لضمان انتقال فعال نحو تنمية مستدامة قائمة على الاستخدام الرشيد للموارد.

المراجع

- [1] برنامج الأمم المتحدة للبيئة، (2011) ، نحو اقتصاد أخضر: مسارات إلى التنمية المستدامة والقضاء على الفقر، نيروبي: برنامج الأمم المتحدة للبيئة.
- [2] فاطمة بكدي، الاقتصاد الأخضر من النظري الى التطبيق، مركز الكتاب الأكاديمي، 2020، ص 29
- [3] عبد الرزاق حواس، علاء الدين محدوبة، الاقتصاد الدائري كنظام لحماية البيئة ، مجلة أفاق للبحوث والدراسات سداسية دولية محكمة – المركز الجامعي ايليزي، العدد 04 جوان 2019 ، ص 288
- [4] د. أحمد سعيد كرم البكل ، ريهام عبد الغني متولي مطاوع ، الاقتصاد الدائري بين النظرية والتطبيق دراسة حالة للاقتصاد المصري ،مجلة الدراسات السياسية والاقتصادية - كلية العلوم السياسية والاقتصادية – جامعة السويس ، العدد 01 ، 2023 ص 164
- [5] فاتح غلاب، الاقتصاد الدائري ... مفاهيم وتجارب مختارة ، مجلة أبحاث ودراسات التنمية المجلد (08) ، العدد (2) ، ديسمبر 2021، ص 447
- [6] أفاق حباري، الاقتصاد الدائري: ما هو؟ كيف يُطبَّق؟ ولماذا هو مهم؟ ، تمت المعاينة بتاريخ 15 أكتوبر 2023 ، <https://solarabic.com> ، اطلع يوم 12 فيفري 2026
- [7] أنية حبيب وأحمد حنيش ، أهمية البني الاقتصاد الأخضر كمدخل لتحقيق التنمية المستدامة والتنوع الاقتصادي الوطني، مجلة اقتصاد المال والأصول العدد 2، المجلد 5، أوت 2021 ، ص 305
- [8] الأحرش جناة، بالحبيب عائشة، سماعيل فوزية، دور الاقتصاد الأخضر في تحقيق التنمية المستدامة - دراسة حالة الجزائر ،مذكرة مقدمة لنيل شهادة ماستر في العلوم السياسية ، التخصص: سياسة عامة ،كلية الحقوق والعلوم السياسية ،جامعة الشهيد حمه لخضر بالوادي ، 2023/2024 ، ص 20
- [9] د. إيمان محمد النمر، د. على ناصر الخطاب ،دور الاقتصاد الأخضر حول تحقيق أهداف التنمية المستدامة في البنوك التجارية الأردنية، مجلة Scopus Journal للعلوم التربوية والاجتماعية والقانونية ، 2024 ، ص 129 - 130
- [10] بلحسين حكيم ، شيخ نورين عبد القادر دور الإقتصاد الأخضر في تحقيق التنمية المستدامة التخصص بيئة وتنمية مستدامة، مذكرة تخرج تدخل ضمن متطلبات نيل شهادة الماستر الشعبة الحقوق، جامعة ابن خلدون تيارت ، 2021-2022 ، ص84
- [11] أمينة بديار ، محمد توفيق مزيان، أثر الاقتصاد الأخضر على النمو والتنمية المستدامة، دراسة قياسية على مجموعة من الدول المتقدمة والنامية مجلة الدراسات المالية، المحاسبية والإدارية، المجلد 06 ، العدد 01 جوان 2019 جامعة مستغانم، الجزائر، ص: 311

- [12] دينا إبراهيم أمين عبد المجيد، النظام التشريعي لحماية البيئة من النفايات البلاستيكية، بحث مقدم إلى مؤثر دور منظمات المجتمع المدني في تحقيق التنمية المستدامة رؤية، مصر 2020 – 2030، مجلة البحوث القانونية والاقتصادية، عدد خاص بالمؤتمر الدولي السنوي الحادي والعشرون، ص 1170
- [13] النفايات الإلكترونية، نشر بتاريخ أكتوبر 2024 <https://www.who.int> 15 فيفري 2026
- [14] محمد رشيد العود، صالح محمد قشوط، احمد محمد سلامة، فتحي عبد العزيز مسعود، النفايات البلاستيكية وآثارها على البيئة والإنسان والطرق الحديثة للاستفادة والتخلص منها مجلة علوم البحار والتقنيات البيئية، المجلد (1)، العدد (2) ديسمبر، 2015، ص 47
- [15] شركة رعدان القابضة، أرقام البلاستيك من 1 إلى 7: دليلك الشامل لفهم رموز حاويات الطعام وأنها آمن للاستخدام والتسخين، تمت المعاينة يوم 6 جانفي 2016، <https://raghdan.sa/ar/news/plastic-numbers-1-to-7>، اطلع يوم 22 افريل 2026
- [16] الوكالة الأوروبية للبيئة، تصنيف النفايات، 2024، <https://www.eionet.europa.eu>، شوه يوم 15 فيفري 2026.
- [17] علمي حمزة، إعادة تدوير البلاستيك خدمة للتنمية المستدامة: انتقال من الاقتصاد الخطي إلى الاقتصاد الدائري، المجلة الجزائرية للأبحاث الاقتصادية والمالية، المجلد 5 العدد 1 جوان (2022)، ص 62 - 63
- [18] Types of Plastic: Key Differences Among PP, HDPE and PET, publié le 2023-12-08, <https://sometwang.com/>, visité le 22.avril.2026
- [19] أنواع البلاستيك حسب كود التصنيع، وتأثير كل منها على الصحة، تمت المعاينة 09-04-2017 [/https://www.tqmagazine.net](https://www.tqmagazine.net)، شوه يوم 22 افريل 2026
- [20] مرام سمير عباس، فداء فهد العيسى، النفايات البلاستيكية أثرها على الصحة العامة، واقتراح طريقة فعالة لإعادة استخدامها) مجلة جامعة المنارة – مجلد (3) العدد (2) السنة (2023)، ص 2
- [21] تقرير جديد شامل عن التأثير البيئي العالمي للبلاستيك يكشف عن أضرار جسيمة للمناخ، نشر على 15 أيار 2019، [-/https://www.breakfreefromplastic.org/ar](https://www.breakfreefromplastic.org/ar)
- [22] ط. د. صبرينة بلغيث / د. محمد رضا التميمي، النظام القانوني لتسيير النفايات الصناعية في الجزائر، مجلة العلوم الإنسانية لجامعة أم البواقي، المجلد 7، العدد 1 – مارس 2020،
- [23] قانون رقم 01-19 ماضي في 27 رمضان 1422 الموافق 12 ديسمبر 2001، يتعلق بتسيير النفايات ومراقبتها وإزالتها، ص 10

[24] نورس حيدر محمود، اثر استخدام النفايات البلاستيكية في الأشغال اليدوية لتنمية مهارات التفكير الإبداعي لدى طلبة قسم التربية الفنية، مجلة كلية التربية الأساسية، المجلد 22 ، العدد 93 ، 2016 ، ص 273

[25] دليل 2026 كيف تتم إعادة تدوير البلاستيك ؟ ميكانيكي مقابل كيميائي مقابل إذابة مقابل (عضوي)،energycycle.com

[26]Katarzyna Bernat,Post-Consumer Plastic Waste Management : From Collection and Sortation to Mechanical Recycling,Department of Environmental Biotechnology, Faculty of Geoengineering, University of Warmia and Mazury in Olsztyn, Sloneczna 45 G, 10-709 Olsztyn, Poland Energies 2023, 16(8)

[27]Ricardo Júnior de Oliveira Silva ,Karin Graf & Maria Lúcia Leite Ribeiro Okimoto, Plastic waste recycling : an overview of the mechanical, chemical, and thermal technologies, Journal of Engineering and Applied Science,Volume 72, article number 251(2025) ,

[28]Hopewell, J., Dvorak, R., & Kosior, E. (2009). Plastics recycling : challenges and opportunities. Philosophical Transactions of the Royal Society B, 364(1526), 2115–2126.

[29]Canice C. Uzosike 1D, Lachlan H. Yee 1,2,* and Ricardo Vasquez Padilla,.,Small-Scale Mechanical Recycling of Solid Thermoplastic Wastes : A Review of PET, PEs, and PP,Energies 2023, 16(3), 1406

[30]Recycled plastics : Creating value from waste, <https://gpcachem.org/2021/10/10/>, visité le 26 mars 2026

[31]Fatma Arslan,Cansu Celik,Cuneyt Arslan,Recycling of waste electrical cables January 2019 Material Science & Engineering , International Journal 3(4),pp108

[32]Shigeki Koyanaka, Hitoshi Ohya, Shigehisa Endoh, Hiroyuki Iwata b, Pavel Ditl,Recovering copper from electric cable wastes using a particle shape separation technique,Advanced Powder Technology,Volume 8, Issue 2, 1997, p 104

[33]Granulators and Shredders for Recycling, [HTTPS://www.cmg-granulators.com](https://www.cmg-granulators.com), visited le 28 mars 2026

[34]Gordan Bedeković,Rajko Trbovićb,Electrostatic separation of aluminium from residue of electric cables recycling process,Waste Management,Volume 108, 1 May 2020, p23

[35]Best Way to Separate Copper from Plastic Cables : Air vs Electrostatic Methods,public march 18, 2026,<https://www.recyclegroups.com/industry-news>, visited 29 .03.2026

[36]Taofik Oladimeji Azeez ,Thermoplastic Recycling : Properties, Modifications, and Applications,CHAPTER METRICS OVERVIEW,Published : 27 September 2019

- [37] Recycled High-Density Polyethylene (rHDPE) – Properties, Applications, and Benefits, <https://www.ambiomaterials.com>, visited 27 mars 2026
- [38] HPengcheng Zhu, Elizabeth H. Driscoll, Bo Dong, Roberto Sommerville, Anton Zorin,
- [39] Peter R. Slater, Emma Kendrick, Direct Reuse of Aluminium and Copper Current Collectors from Spent Lithium-ion Batteries, Submitted on 14 Oct 2022
- [40] د. عمر الطاهر عمر الهلاك، حصر النفايات البلاستيكية بمكب نفايات الزنتان وتأثيره على البيئة والانسان والنبات، مجلة العلوم الإنسانية والطبيعية، العدد 07، المجلد 04، 2023، ص 188
- [41] Beth jones, Global plastic waste hits 225 million tonnes in 2025, September 8, 2025, <https://www.letsrecycle.com>
- [42] هنية شريف، التنظيم القانوني لتسيير النفايات في الجزائر، مجلة الاجتهاد للدراسات القانونية والاقتصادية، المجلد: 09 العدد: 01 السنة 2020، ص 116 – 119
- [43] ملاك نور الدين، تومي ميلود، اليات تثمين النفايات الالكترونية دراسة مقارنة بين الجزائر وسويسرا، مجلة أبحاث اقتصادية وإدارية، المجلد 17، العدد 2، 2023، ص 67 – 68
- [44] Turning Trash into Treasure : 10 Inspiring Plastic Recycling Success Stories
- [45] Wire and Cable Recycling : How to Recycle and the Best Equipment, <https://www.recyclingtoday.org>.

**الفصل الثاني:
الأدوات و الطرق**

1.II. تمهيد

يهدف هذا الفصل إلى دراسة إمكانية إعادة رسكلة بلاستيك كوابل التوصيل الكهربائي من خلال تحضير العينات وإجراء مجموعة من التجارب والتحليل الفيزيائية والكيميائية، والمتمثلة في الاستخلاص بجهاز سوكلسي، تجارب الانحلالية، وتحليل UV-Vis و FTIR، وذلك للتعرف على خصائص البلاستيك وإمكانية تثمينه وإعادة استخدامه.

2.II. المواد و الوسائل المستعملة

جدول (1-II): الوسائل و المواد المستعملة

المواد المستعملة	الوسائل المستعملة
<ul style="list-style-type: none"> • رباعي هيدرو الفوران (C₄H₈O) • ثنائي كلورو الميثان (CH₂Cl₂) • ثنائي إيثيل إيثر (C₄H₁₀O) • السيكلوهكسان (C₆H₁₂) • الماء المقطر (H₂O) • الأسيتون (CH₃COCH₃) • Toluene diisocyanate • Polyols • N,N-dimethyltrimethylenediamine • Tin Ethylhexanoate • trichloropropyl Phosphate • Siloxane-Polyether Copolymer 	<ul style="list-style-type: none"> • بيشر، قمع زجاجي، • حوالة، ماصة، مخبار مدرج • ملعقة، سكين، ورق ترشيح • أنابيب اختبار، ورق ألمنيوم • غربال، محرار، دورق • خرطوشة، قطن، علب بلاستيكية • ميزان إلكتروني حساس

3.II. الأجهزة المستعملة :

اعتمدت الدراسة التطبيقية المنجزة في هذا العمل على مجموعة من الأجهزة المخبرية التي ساهمت في تحضير العينات ومعالجتها وتحليلها بدقة. وقد استُخدمت هذه الأجهزة في مختلف مراحل التجربة، بدايةً من وزن العينات وطحنها، وصولاً إلى عملية استخلاص ممهلات اللهب من مادة الـ PVC باستعمال جهاز السوكسلي. وتكمن أهمية هذه الأجهزة في ضمان الحصول على نتائج دقيقة وموثوقة تساعد على دراسة الخصائص الفيزيائية والكيميائية للعينات المدروسة.

- ميزان إلكتروني حساس

يُعد الميزان الإلكتروني الحساس من الأجهزة الأساسية في المخابر الكيميائية، حيث يُستخدم لقياس كتل المواد والعينات بدقة عالية تصل إلى أجزاء صغيرة جدًا من الغرام. وقد استُعمل في هذه الدراسة لوزن عينات البلاستيك والمذيبات قبل وبعد عمليات التحضير والاستخلاص، مما يسمح بالحصول على قياسات دقيقة تساهم في تحسين موثوقية النتائج التجريبية.



الالكتروني حساس

كهربائية مخبرية

الشكل II-1: ميزان

• مطحنة

الكهربائية المخبرية لطحن

تُستخدم المطحنة

العينات الصلبة وتحويلها إلى مسحوق ناعم ومتجانس، وذلك لتسهيل عمليات التحليل والاستخلاص. وفي هذه الدراسة استُعملت لطحن عينات الـ PVC الداخلي والخارجي بهدف زيادة مساحة السطح وتحسين تلامس العينة مع المذيب أثناء عملية الاستخلاص، مما يساعد على رفع مردود استخلاص مهمات اللهب.



كهربائية
سوكسلي (Soxhlet)

الشكل II-2: مطحنة

• جهاز

:(Extractor)

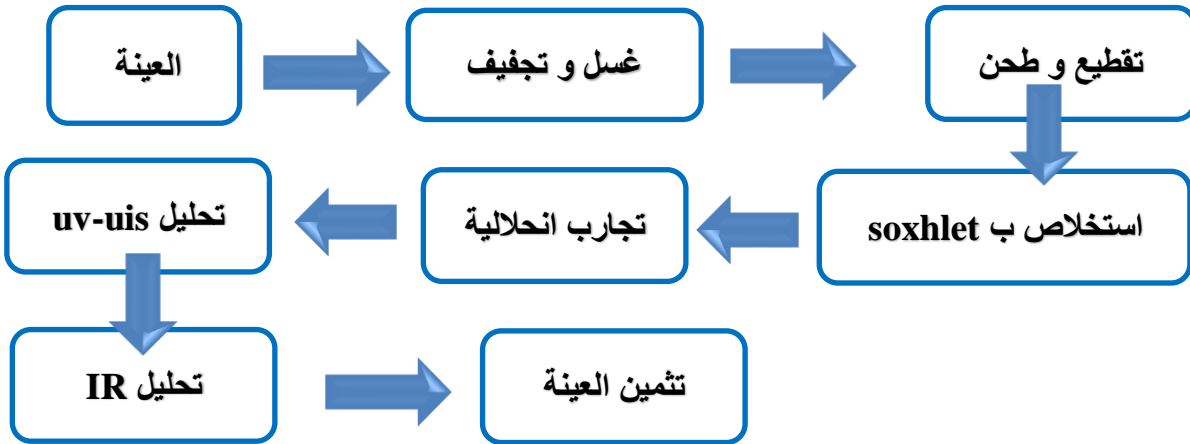
يُعتبر جهاز السوكسلي من أهم أجهزة الاستخلاص المستعملة في الكيمياء التحليلية، حيث يُستخدم لاستخلاص المركبات القابلة للذوبان من المواد الصلبة باستعمال مذيب مناسب وتحت عملية تسخين مستمرة. وقد استعمل في هذه الدراسة لاستخلاص مبهلات اللهب من عينات الـ PVC باستعمال مذيب السيكلوهكسان، وذلك من خلال تكرار عملية التبخير والتكاثف بشكل آلي، مما يسمح بالحصول على استخلاص فعال ودقيق للمركبات المراد دراستها.



سوكسلي (Soxhlet)

الشكل II - 3 : جهاز
(Extractor
4.II. طريقة العمل

1.4.II مخطط سير العمل



الشكل II - 4 : مخطط سير العمل

2.4.II تحضير العينة

1.2.4.II جمع العينة

تم جمع عينات البلاستيك من كوابل التوصيل الكهربائي المنزلية التالفة، حيث تم اختيارها بعناية لضمان تمثيل جيد للمادة المدروسة.



كوابل التوصيل
التالفة
وتجفيف العينة

الشكل II - 5:
الكهربائي المنزلية
2.2.4.II تنظيف

تم غسل العينات بالماء لإزالة الشوائب، ثم بالماء المقطر، وبعد ذلك تُركت لتجف في درجة حرارة الغرفة لمدة 24 ساعة.



الشكل II - 6: تنظيف و تجفيف كوابل التوصيل الكهربائي المنزلية التالفة
الميكانيكي

3.2.4.II الفصل

تم تقطيع الكوابل وفصل البلاستيك عن النحاس ميكانيكيًا، وذلك بنزع الغلاف الخارجي ثم إزالة العازل الداخلي، مما سمح بالحصول على البلاستيك بشكل منفصل.

الشكل II -7: الفصل الميكانيكي



II.4.2.4 التقطيع والطحن

بعد الفصل، تم تقطيع البلاستيك إلى قطع صغيرة، ثم طحنه باستعمال جهاز الطحن للحصول على مسحوق بلاستيكي.



عملية



الشكل II -8: تقطيع

II.4.2.5

الغربلة

تم إخضاع المسحوق البلاستيكي لعملية الغربلة باستعمال منخل مناسب، بهدف الحصول على حبيبات ذات حجم متجانس.



غربلة البلاستيك المطحون



6.2.4.II الوزن

بعد الغربلة، تم وزن كميات محددة من البلاستيك الداخلي والخارجي كل على حدة باستعمال ميزان إلكتروني دقيق، وذلك لضبط الكتلة المستعملة في



التجارب اللاحقة.



الشكل II - 10: وزن كميات محددة من البلاستيك الداخلي والخارجي

5.II. عملية استخلاص مهمات الذهب باستعمال جهاز السوكسلي

تعتبر هذه المرحلة أساسية لتنقية العينات البلاستيكية من المضافات الكيميائية غير (مهمات الذهب)، تم اتباع البروتوكول التجريبي التالي :

- تم وزن 20g من عينة العازل الداخلي و 20g من عينة العازل الخارجي باستخدام ميزان حساس.
- تم وضع كل عينة في خرطوشة ورقية مع إغلاقها بإحكام بواسطة سدادة قطنية لمنع خروج حبيبات البلاستيك أثناء دوران المذيب.
- تم استعمال ورق (Ballon) بسعة 250ml يحتوي على 150ml من مذيب السيكلو هكسان لكل جهاز.
- تم ضبط درجة الحرارة عند 60°C مع المراقبة المستمرة لمدة 5 ساعات لدرجة الحرارة وتدفق مياه التبريد في المكثف لضمان تكثف أبخرة المذيب ورجوعها للخرطوشة.
- بعد انتهاء عملية الاستخلاص، تركت العينات لتجف.

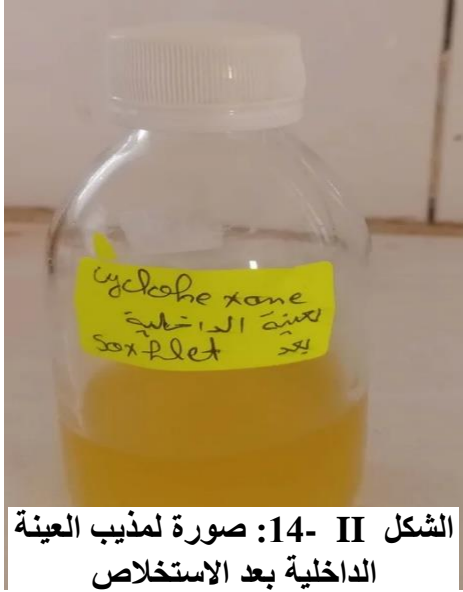


الشكل II -12: عينة داخلية

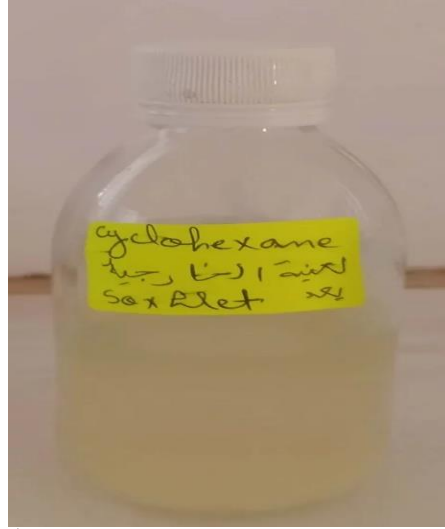


الشكل II -11: عينة خارجية





الشكل II -14: صورة لمذيب العينة الداخلية بعد الاستخلاص



الشكل II -13: صورة لمذيب العينة الخارجية بعد الاستخلاص

6.II. تجارب انحلالية

تُعدّ تجارب الانحلالية من الاختبارات المهمة في دراسة المواد البوليمرية، حيث تسمح بتقييم سلوك البوليمر تجاه مختلف المذيبات العضوية والمساهمة في التعرف على طبيعته الكيميائية. في هذه الدراسة أُجريت تجارب الانحلالية على عينات بلاستيك الكوابل الكهربائية بعد عملية الاستخلاص بجهاز السوكسلي، وذلك بهدف دراسة قابلية ذوبانها ومتابعة تأثير المذيبات المختلفة على البنية البوليمرية للعينة.

- تم استعمال عينات بلاستيك الكوابل الكهربائية بعد عملية الاستخلاص بجهاز السوكسلي.
- تم وزن حوالي 0.1 g من كل عينة ووضع في أنابيب اختبار منفصلة.
- تم أضيف إلى كل أنبوب حوالي $V = 10 \text{ ml}$ من المذيب العضوي.
- تم استعمال المذيبات التالية:

• رباعي هيدرو الفوران (THF)

• ثنائي كلورو الميثان (DCM)

• الأسيتون

• ثنائي إيثيل الإيثر

• السيكلوهكسان

- تم تحريك الأنابيب باستعمال قضيب زجاجي لضمان التلامس بين العينة والمذيب.
- غُطيت الأنابيب بورق ألومنيوم لتقليل تبخر المذيبات المتطايرة.
- ثم تركت العينات لمدة 24 ساعة في درجة حرارة الغرفة.



الشكل II - 15: تجارب الانحلالية

7.II التحاليل الطيفية

1.7.II التحليل الطيفي بالأشعة فوق البنفسجية والمرئية UV-Visible

تم إجراء التحليل الطيفي بالأشعة فوق البنفسجية والمرئية باستعمال جهاز UV-Vis Spectrophotometer من نوع Shimadzu UV-1900i بهدف دراسة المركبات المستخلصة من العينات البلاستيكية والكشف عن التغيرات الناتجة بعد عملية الاستخلاص. تعتمد هذه التقنية على قياس امتصاص المحاليل للأشعة فوق البنفسجية والمرئية عند أطوال موجية مختلفة، مما يسمح بتحديد وجود المركبات العضوية المذابة في المذيب المستعمل.



جهاز UV-Vis

الشكل II - 16:

Shimadzu UV-1900i من نوع Spectrophotometer

• تحضير العينات:

تم استعمال السيكلوهكسان كمذيب للتحليل، وتم تحضير العينات كما يلي:

- عينة السيكلوهكسان النقي (Blank).
- مذيب البلاستيك الداخلي بعد الاستخلاص.
- مذيب البلاستيك الخارجي بعد الاستخلاص.
- محلول البلاستيك الداخلي قبل الاستخلاص.
- محلول البلاستيك الداخلي بعد الاستخلاص.
- محلول البلاستيك الخارجي قبل الاستخلاص.
- محلول البلاستيك الخارجي بعد الاستخلاص.

● **طريقة العمل:**

- شُغِّل جهاز UV-Vis وترك لمدة معينة حتى يستقر.
- تم تنظيف خلايا القياس (Cuves) جيداً باستعمال السيكلوهكسان وتجفيفها.
- استُعمل السيكلوهكسان النقي كعينة مرجعية (Blank) لمعايرة الجهاز وضبط خط الأساس.
- وُضع كل محلول داخل خلية القياس الشفافة مع تجنب وجود فقاعات هوائية.
- أُدخلت الخلية داخل حجرة القياس بالجهاز وأُغلق الغطاء بإحكام.
- تم إجراء مسح طيفي كلي (Full Scan) لجميع العينات ضمن المجال الطيفي للأشعة فوق البنفسجية والمرئية.
- سُجلت أطياف الامتصاص الخاصة بكل عينة عند الأطوال الموجية المختلفة.
- أُعيدت العملية لجميع العينات المحضرة تحت نفس الشروط التجريبية لضمان دقة النتائج.
- بعد كل تحليل تم تنظيف خلايا القياس باستعمال السيكلوهكسان لتجنب تلوث العينات.
- حُفظت الأطياف الناتجة

2.7.II التحليل بالأشعة تحت الحمراء FTIR

تم استعمال جهاز مطيافية الأشعة تحت الحمراء بتحويل فوربييه (FTIR) من نوع Agilent Technologies Cary 630 FTIR قصد التعرف على المجموعات الوظيفية والبنية الكيميائية للعينات البلاستيكية المدروسة، وذلك قبل وبعد عملية الاستخلاص بجهاز السوكسلي. تعتمد هذه التقنية على امتصاص الروابط الكيميائية للأشعة تحت الحمراء عند أعداد موجية مميزة، مما يسمح بتحديد التغيرات الكيميائية الحاصلة على المادة البلاستيكية بعد إزالة المضافات ومهلات اللهب.



الشكل II - 17: جهاز مطيافية الأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه (FTIR) من نوع Agilent Technologies Cary 630 FTIR

طريقة العمل:

- تم تنظيف سطح جهاز FTIR والبلورة المستعملة للتحليل جيداً لتجنب تلوث العينات.
- شُغل الجهاز وتم إجراء المعايرة الأولية (Background) باستعمال الهواء.
- حضرت عينات البلاستيك الداخلي والخارجي قبل وبعد الاستخلاص، حيث تم طحنها إلى أجزاء صغيرة ومتجانسة.
- وُضعت كمية صغيرة من العينة مباشرة فوق بلورة ATR الخاصة بالجهاز.
- أُغلقت وحدة الضغط بإحكام لضمان تماس جيد بين العينة والبلورة.
- تم تسجيل الطيف في مجال الأشعة تحت الحمراء المناسب لتحليل البوليمرات.
- أُعيدت العملية لجميع العينات المدروسة:
- البلاستيك الداخلي قبل الاستخلاص.
- البلاستيك الداخلي بعد الاستخلاص.
- البلاستيك الخارجي قبل الاستخلاص.
- البلاستيك الخارجي بعد الاستخلاص.

بعد انتهاء كل تحليل تم تنظيف البلورة باستعمال مذيب مناسب لتفادي انتقال آثار العينات السابقة.
تم حفظ الأطياف الناتجة.

8.II تمييز العينة البلاستيكية

بعد عملية استخلاص ممهلات اللهب من البلاستيك المسترجع من الكابلات الكهربائية، تم تمييز المادة البوليمرية المحصل عليها من خلال تحويلها إلى رغوة بوليمرية، بهدف دراسة إمكانية إعادة استعمال هذه النفايات في تطبيقات ذات قيمة مضافة. تعتمد هذه العملية على تحضير بنية رغوية خفيفة ذات مسامية داخلية، تسمح بالحصول على مادة ذات خصائص فيزيائية مميزة مثل انخفاض الكثافة وقابلية امتصاص السوائل.

1.8.II تحضير الرغوة البوليمرية

تم تحضير رغوة بولي يوريثان انطلاقاً من البلاستيك المسترجع من عوازل الكابلات الكهربائية بعد عملية الاستخلاص، وذلك بهدف تمييز النفايات البلاستيكية وإعادة استعمالها في تحضير مادة رغوية ذات خصائص فيزيائية قابلة للدراسة.

اعتمد بروتوكول التحضير على المراحل التالية:

تم وزن 4g من البلاستيك الداخلي المسترجع، كما تم وزن 4g من البلاستيك الخارجي المسترجع باستعمال ميزان إلكتروني دقيق.

في كأس بلاستيكي، تم تحضير المزيج الأولي بإضافة:

- 20mL من الـ Polyols.
- 0.4mL من ثلاثي كلورو بروبييل الفوسفات (Trichloropropyl phosphate).
- 1mL من الماء.
- 0.4mL من Silicone-polyether copolymer
- 0.1mL من Tin ethylhexanoate.
- 0.1mL من N,N-dimethyltrimethylenediamine

خلطت المكونات جيداً باستعمال التحريك للحصول على وسط متجانس. بعد ذلك، أُضيف البلاستيك المسترجع إلى المزيج، ثم استمر التحريك إلى غاية تجانس المادة.

أُضيف بعد ذلك 12 mL من ثنائي إيزوسينات التولواين (TDI) مع التحريك السريع والمستمر.

مباشرة بعد إضافة الـ TDI، صُب المزيج داخل قالب من الألمنيوم.

2.8.II توصيف الرغوة المحضرة

بعد تحضير الرغوة البوليمرية، خضعت العينات المحصلة إلى مجموعة من الاختبارات الفيزيائية بهدف تقييم خصائصها ودراسة مدى تأثير نوع البلاستيك المسترجع على البنية الرغوية المتشكلة. تمثلت هذه الاختبارات في:

1.2.8.II قياس الكثافة الظاهرية

تم تحديد الكثافة الظاهرية للرغوة من خلال قياس كتلة كل عينة وحجمها، وذلك بهدف تقييم خفة البنية الرغوية ومدى تجانسها..

$$\rho = \frac{m}{v}$$

حيث:

ρ : الكثافة الظاهرية للرغوة.

m: كتلة العينة.

V: حجم العينة.

2.2.8.II اختبار امتصاص الماء

أُجري اختبار امتصاص الماء لدراسة قدرة الرغوة على امتصاص السوائل، حيث تم غمر كل عينة داخل الماء لمدة دقيقة واحدة، ثم أُزيل الماء السطحي وأُعيد وزن العينات مباشرة بعد الغمر. تم حساب نسبة امتصاص الماء باستعمال العلاقة التالية:

$$Absorption (\%) = \frac{m_f - m_i}{m_i} \times 100$$

حيث:

m_i الكتلة الابتدائية للعينة قبل الغمر.

m_f الكتلة النهائية للعينة بعد الغمر.

سمحت هذه الاختبارات بتقييم الخصائص الفيزيائية للرغوة المحضرة ومقارنة سلوك الرغوة المحضرة من البلاستيك الداخلي والخارجي.

3.8.II تحليل المجهر الإلكتروني الماسح (MEB/SEM)

تمت دراسة البنية المورفولوجية لعينات رغوة البولي يوريثان المحشوة بمسحوق PVC باستعمال المجهر الإلكتروني الماسح (MEB). قبل التحليل، جُففت العينات جيدًا للتخلص من الرطوبة المتبقية، ثم قُطعت إلى أجزاء صغيرة مناسبة لحجرة الجهاز وثُبتت على حوامل معدنية باستعمال شريط كربوني موصل. ونظرًا للطبيعة غير الموصلة للبوليمرات، تم طلاء سطح العينات بطبقة رقيقة من الذهب (Au) أو الذهب/البلاديوم (Au/Pd) لتحسين التوصيلية الكهربائية وتقليل ظاهرة شحن السطح أثناء التصوير. بعد

ذلك أُجريت الملاحظات الميكرسكوبية عند تكبيرات مختلفة لدراسة شكل الخلايا الرغوية وتوزع جسيمات

PVC وتأثير المعالجة بالاستخلاص Soxhlet على البنية السطحية للعينة.

**الفصل الثالث:
النتائج والمناقشة**

1.III تجارب الانحلالية:

أُجريت تجارب الانحلالية على عينتين من بلاستيك كوابل التوصيل الكهربائي بعد عملية استخلاص ممهلات اللهب، حيث تمثلت العينة الأولى في البلاستيك الداخلي للكوابل (الأنابيب 1-5)، بينما مثلت العينة الثانية البلاستيك الخارجي (الأنابيب 6-10). استُعملت نفس المذيبات لكلا العينتين من أجل مقارنة سلوكهما الفيزيائي والكيميائي تجاه المذيبات العضوية المختلفة. تم ترتيب المذيبات كما يلي:

جدول (1-III): توزيع عينات تجارب الانحلالية والمذيبات المستعملة

رقم الأنبوب	نوع العينة	المذيب
1	البلاستيك الداخلي	Ether
2	البلاستيك الداخلي	Cyclohexane
3	البلاستيك الداخلي	Acetone
4	البلاستيك الداخلي	DCM
5	البلاستيك الداخلي	THF
6	البلاستيك الخارجي	Ether
7	البلاستيك الخارجي	Cyclohexane
8	البلاستيك الخارجي	Acetone
9	البلاستيك الخارجي	DCM
10	البلاستيك الخارجي	THF

العينات لمدة 24 ساعة
الغرفة، أظهرت النتائج

بعد ترك
في درجة حرارة

اختلافًا واضحًا في درجة الانحلال والعيارة والترسب بين العينة الداخلية والخارجية.

بالنسبة للأنبوبين (1) و(6) المحتويين على الإيثر (Ether)، لوحظ عدم حدوث انحلال حقيقي للعينة سواء الداخلية أو الخارجية، حيث بقيت أجزاء من البوليمر مترسبة في قاع الأنبوب مع بقاء الوسط شبه شفاف. ويعود ذلك إلى أن الإيثر مذيب ضعيف القطبية، في حين أن PVC بوليمر ذو قطبية نسبية بسبب وجود ذرات الكلور، وبالتالي لا يحدث توافق كافٍ يسمح بالذوبان.

أما الأنبوبان (2) و(7) المحتويان على السيكلوهكسان (Cyclohexane)، فقد أظهرنا كذلك ضعفًا كبيرًا في الانحلال مع بقاء ترسبات واضحة في القاع. ويُفسر ذلك بالطبيعة غير القطبية للسيكلوهكسان، مما يجعله غير قادر على تفكيك الروابط والتجاذبات الموجودة بين السلاسل البوليمرية للـ PVC. في الأنبوبين (3) و(8) المحتويين على الأسيتون (Acetone)، لوحظ حدوث انتفاخ جزئي للعينة مع ظهور عكارة خفيفة دون ذوبان كامل. ويعود ذلك إلى أن الأسيتون مذيب متوسط القطبية، يستطيع التأثير

على بعض المدنات والمضافات العضوية الموجودة داخل البلاستيك، لكنه لا يملك قدرة كافية لإذابة PVC بصورة كاملة في الظروف العادية.

أما الأنبوبان (4) و(9) المحتويان على ثنائي كلورو الميثان (DCM)، فقد أظهرتا تفاعلاً أوضح مع العينة، حيث أصبح الوسط أكثر عكارة مع ملاحظة تفكك جزء معتبر من البوليمر، خاصة في العينة الداخلية. ويُفسر هذا السلوك بقدرة DCM على اختراق البنية البوليمرية وتقليل قوى التجاذب بين السلاسل، لذلك يُعتبر من المذيبات الجيدة نسبياً لمادة PVC.

في الأنبوبين (5) و(10) المحتويين على رباعي هيدرو الفوران (THF)، سُجّلت أعلى درجة من الانحلال مقارنة ببقية المذيبات، حيث أصبح الوسط أكثر تجانساً وداكن اللون مع اختفاء جزء كبير من العينة، خصوصاً في البلاستيك الداخلي. ويرجع ذلك إلى التوافق الكبير بين قطبية THF والبنية الكيميائية للـ PVC، مما يسمح بفك السلاسل البوليمرية وحدوث الذوبان بصورة أفضل.

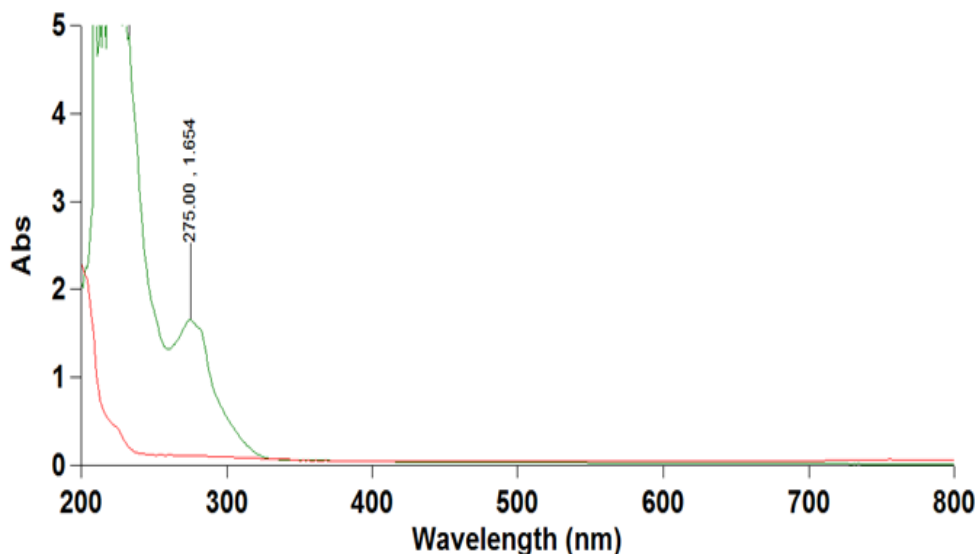
كما لوحظ أن العينة الداخلية (1-5) أظهرت تفاعلاً أكبر مع المذيبات مقارنة بالعينة الخارجية (6-10)، خاصة مع DCM و THF. ويمكن تفسير ذلك باختلاف التركيب الكيميائي ونسبة المضافات الصناعية بين الطبقتين، حيث يحتوي الغلاف الخارجي غالباً على نسبة أعلى من المواد المألثة والمثبتات وممهلّات اللهب، مما يزيد من مقاومته للانحلال ويجعله أكثر صلابة واستقراراً تجاه المذيبات.

تؤكد هذه النتائج أن العينتين تنتميان غالباً إلى بوليمر PVC المستعمل في عزل الكوابل الكهربائية، وذلك اعتماداً على قابليتهما للانحلال في THF و DCM وعدم ذوبانهما في المذيبات غير القطبية مثل الإيثر والسيكلوهكسان. كما تدل الفروقات المسجلة بين البلاستيك الداخلي والخارجي على اختلاف نسب الإضافات الصناعية المستعملة في كل طبقة وفق الوظيفة المطلوبة لكل جزء من الكابل الكهربائي.

2.III تحليل نتائج الأشعة البنفسجية UV VIS :

تم إجراء تحليل UV-Visible للعينات الداخلية والخارجية قبل وبعد الاستخلاص بجهاز السوكسلي، إضافة إلى تحليل مذيب السيكلوهكسان بعد عملية الاستخلاص، وذلك من أجل دراسة التغيرات الحاصلة على المركبات العضوية القابلة للذوبان داخل العينات البلاستيكية.

1.2.III تحليل العينة الخارجية قبل الاستخلاص



الشكل III-1: تحليل العينة الخارجية قبل الاستخلاص

ظهرت قمة امتصاص واضحة في المجال فوق البنفسجي عند: 275 nm وهي قمة تدل على وجود انتقالات إلكترونية من نوع: $\pi \rightarrow \pi^*$ الناتجة عن وجود روابط مزدوجة مترافقة أو حلقات عطرية داخل العينة.

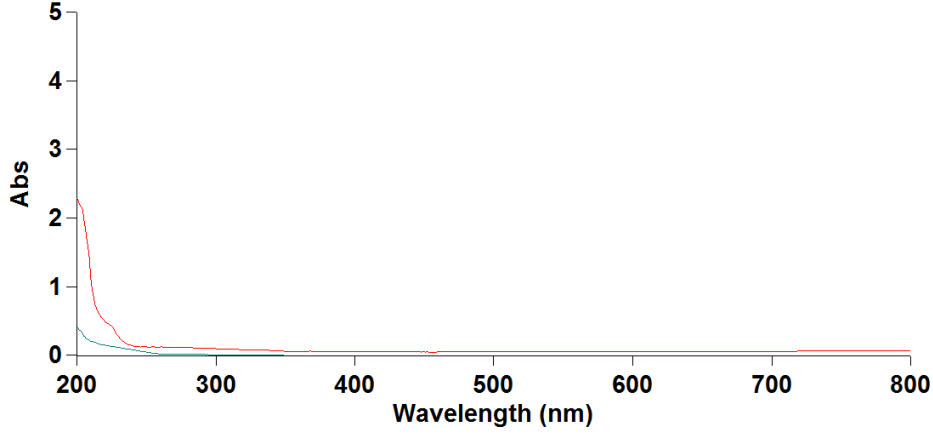
كما لوحظ امتصاص مرتفع بين 200 و 300 nm ، مما يدل على وجود مركبات عضوية وإضافات صناعية داخل المادة البلاستيكية مثل الملدنات والمثبتات الحرارية.

• الاستنتاج

تشير النتائج إلى أن العينة الخارجية تحتوي على:

- مركبات عضوية عطرية.
- روابط مزدوجة مترافقة.
- إضافات صناعية قابلة للاستخلاص.
- مواد عضوية تمتص في المجال فوق البنفسجي.

2.2.III تحليل العينة الخارجية بعد الاستخلاص



الشكل III - 2: تحليل العينة الخارجية بعد الاستخلاص

بعد إجراء الاستخلاص بالسوكسلي ظهرت تغيرات واضحة على الطيف.

1. المجال 200–300 nm

انخفضت شدة الامتصاص بشكل كبير مقارنة بالعينة قبل الاستخلاص. كما اختفت القمة المسجلة عند 275 nm. مما يدل على انتقال جزء كبير من المركبات العضوية إلى مذيب السيكلوهكسان أثناء عملية الاستخلاص.

2. المجال 300–800 nm

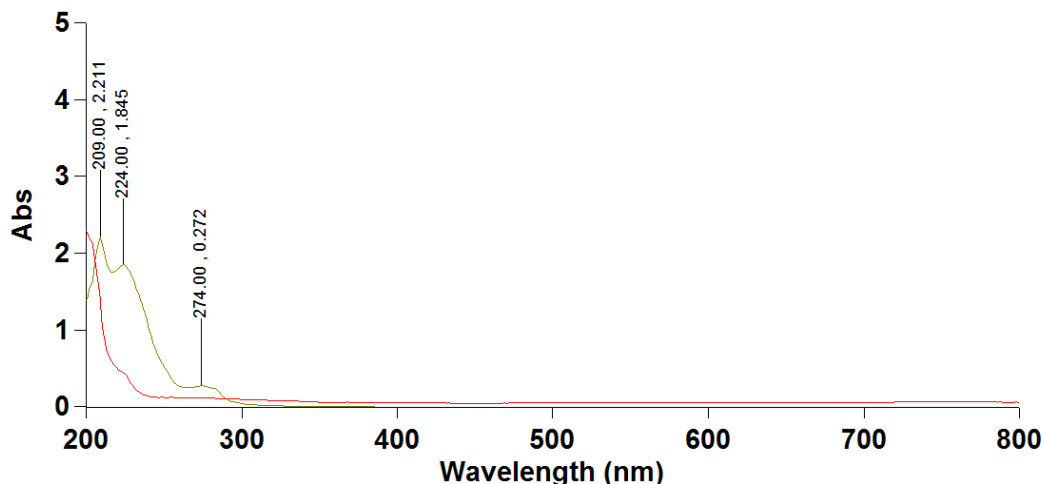
لم تظهر قمم امتصاص واضحة في هذا المجال، حيث أصبح الامتصاص ضعيفاً جداً.

الاستنتاج

تشير النتائج إلى:

- انخفاض كمية المركبات العضوية داخل العينة بعد الاستخلاص.
- إزالة جزء معتبر من المواد القابلة للذوبان.
- فعالية جهاز السوكسلي في استخلاص المركبات العضوية من العينة الخارجية.

3.2.III تحليل العينة الداخلية قبل الاستخلاص



الشكل III-3 : تحليل العينة الداخلية قبل الاستخلاص

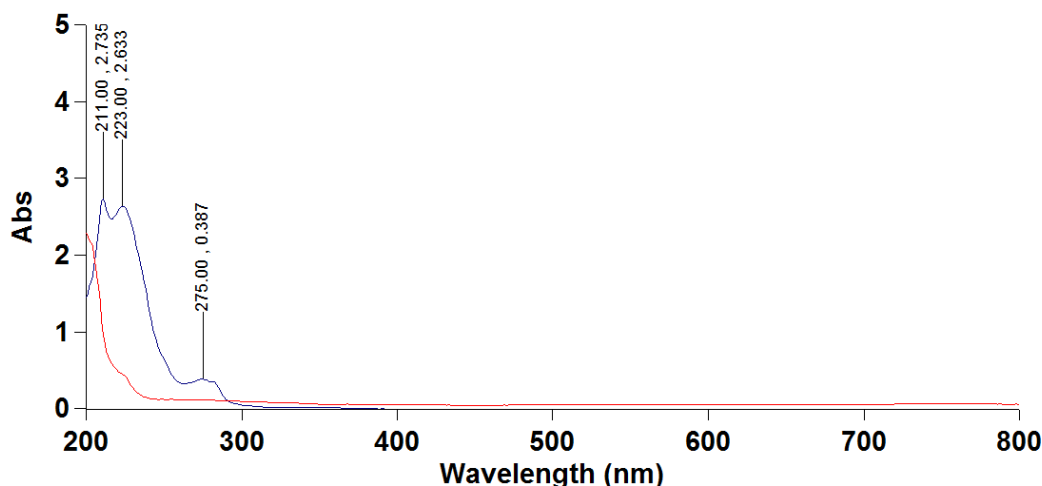
أظهر الطيف امتصاصاً مرتفعاً في المجال فوق البنفسجي خاصة بين 200 و 300 nm ، مما يدل على وجود كمية معتبرة من المركبات العضوية داخل العينة. كما يرتبط هذا الامتصاص بانتقالات إلكترونية من

نوع: π π^* و n π^*

وهي انتقالات مميزة للمركبات المحتوية على روابط مزدوجة ومجموعات وظيفية عضوية.

- الاستنتاج
- تشير النتائج إلى أن العينة الداخلية تحتوي على:
- مركبات عضوية قابلة للاستخلاص.
- روابط مزدوجة مترافقة.
- مجموعات وظيفية عضوية ممتصة للأشعة فوق البنفسجية.
- نسبة إضافات عضوية أكبر مقارنة بالعينة الخارجية.

4.2.III تحليل العينة الداخلية بعد الاستخلاص



الشكل III-4: تحليل العينة الداخلية بعد الاستخلاص

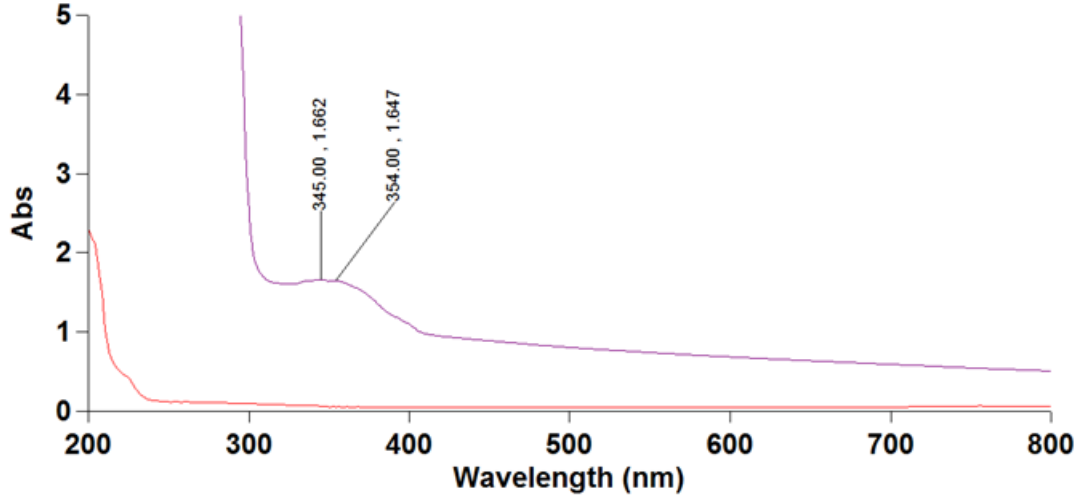
- بعد إجراء الاستخلاص بالسوكسلي انخفضت شدة الامتصاص مقارنة بالعينة قبل الاستخلاص.
 - ظهرت قمم ضعيفة عند: 220 nm ، 231nm
 - كما ظهرت قمة منخفضة الشدة عند: 275 nm
- مما يدل على بقاء كمية قليلة من المركبات العضوية داخل العينة بعد الاستخلاص. كما اختلف أغلب الامتصاص بعد 300 nm ، وهو ما يدل على انخفاض تركيز المركبات الممتصة للأشعة فوق البنفسجية.

• الاستنتاج

تشير النتائج إلى:

- انخفاض تركيز المركبات العضوية بعد الاستخلاص.
- انتقال جزء معتبر من المواد القابلة للذوبان إلى المذيب.
- فعالية عملية السوكسلي في إزالة المركبات العضوية من العينة الداخلية.

5.2.III تحليل مذيب السيكلوهكسان بعد استخلاص العينة الخارجية



الشكل III- 5: تحليل مذيب السيكلوهكسان بعد استخلاص العينة الخارجية

- ظهرت قمم امتصاص واضحة عند: 345 nm ، 354 nm

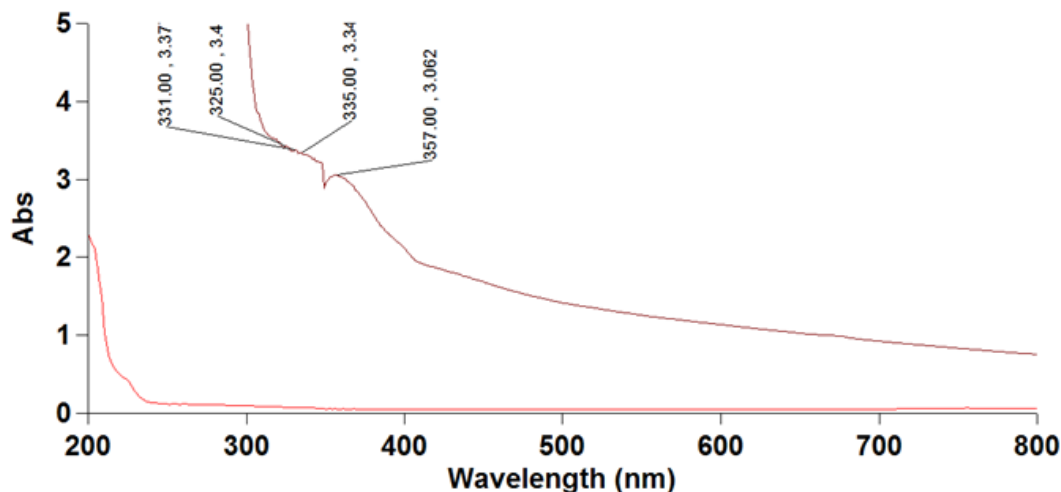
وهي قمم تدل على انتقال مركبات عضوية من العينة البلاستيكية إلى المذيب بعد عملية الاستخلاص. كما يشير ظهور هذه القمم إلى وجود مركبات تحتوي على روابط مزدوجة مترافقة أو حلقات عطرية قابلة للذوبان في السيكلوهكسان.

- الاستنتاج

تشير النتائج إلى:

- احتواء المذيب على مركبات عضوية مستخلصة من العينة الخارجية.
- وجود إضافات صناعية قابلة للذوبان.
- نجاح عملية الاستخلاص بالسوكسلي.

6.2.III تحليل مذيب السيكلوهكسان بعد استخلاص العينة الداخلية



الشكل III-6 : تحليل مذيب السيكلوهكسان بعد استخلاص العينة الداخلية

ظهرت قمم امتصاص واضحة عند: 357 nm، 331 nm، 325 nm مع قيم امتصاص مرتفعة

تجاوزت 3 Abs.

يدل ذلك على انتقال كمية معتبرة من المركبات العضوية من العينة الداخلية إلى مذيب السيكلوهكسان أثناء عملية الاستخلاص. كما أن ارتفاع شدة الامتصاص مقارنة بمذيب العينة الخارجية يدل على أن العينة الداخلية تحتوي على كمية أكبر من المركبات العضوية القابلة للاستخلاص.

• الاستنتاج

تشير النتائج إلى:

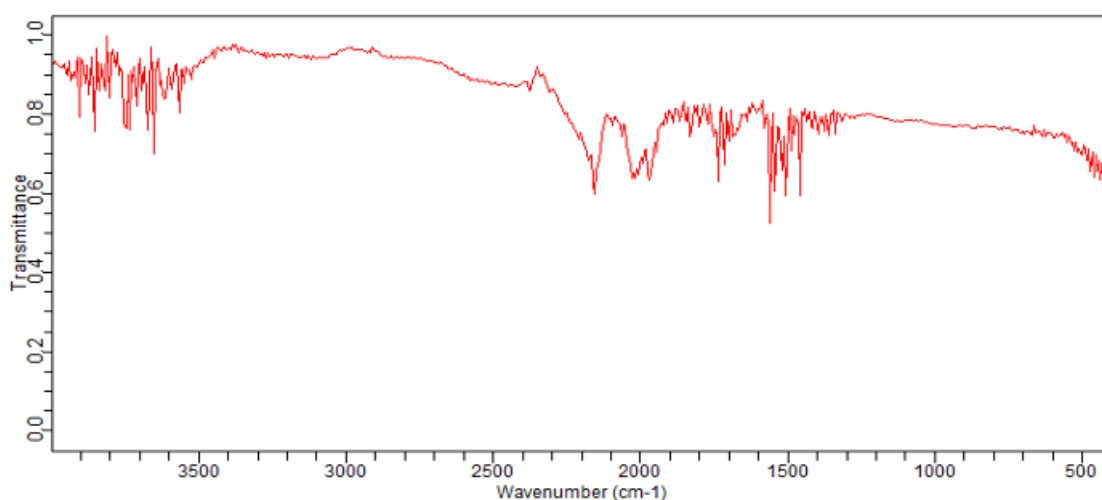
- وجود كمية معتبرة من المركبات العضوية داخل العينة الداخلية.
- انتقال المركبات القابلة للذوبان إلى المذيب أثناء الاستخلاص.
- فعالية السيكلوهكسان في استخلاص المركبات العضوية غير القطبية.
- نجاح عملية الاستخلاص بجهاز السوكسلي.

3.III مطيافية الأشعة تحت الحمراء:

تم إجراء تحليل FTIR على عينات البلاستيك المستخرجة من عوازل الكوابل الكهربائية قبل وبعد الاستخلاص بجهاز السوكسلي، وذلك بهدف التعرف على المجموعات الوظيفية الموجودة داخل العينة ومتابعة التغيرات الكيميائية الناتجة عن عملية الاستخلاص.

1.3.III تحليل عينة بلاستيك الداخلي

1. تحليل العازل الداخلي قبل الاستخلاص (Soxhlet INT avant)



الشكل III -7: تحليل العازل الداخلي قبل الاستخلاص

أظهر الطيف عدة قمم مميزة أهمها:

- النطاق $3600-3200 \text{ cm}^{-1}$

ظهرت حزمة عريضة حوالي: 3400 cm^{-1} وترتبط بمجموعات OH الناتجة عن الرطوبة أو بعض المركبات العضوية.

- النطاق $3000-2800 \text{ cm}^{-1}$

ظهرت قم عند: 2920 cm^{-1} و 2850 cm^{-1} وتعود إلى اهتزازات روابط C-H في المجموعات الأليفاتية.

- النطاق $1500-1400 \text{ cm}^{-1}$

ظهرت قمة واضحة عند: 1430 cm^{-1} تقريباً مرتبطة باهتزازات CH_2

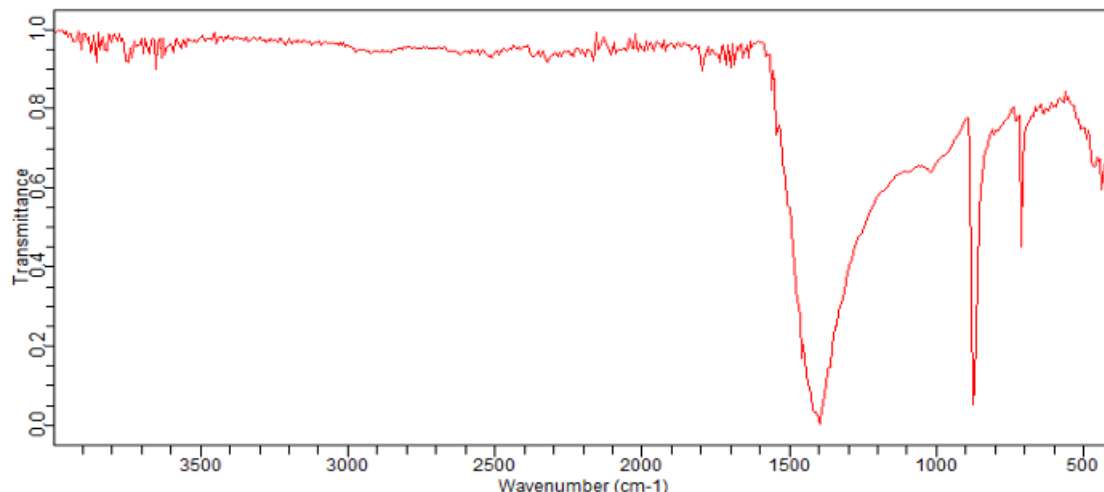
- النطاق $700-600 \text{ cm}^{-1}$

ظهرت قمة قوية جداً تعود إلى رابطة C-Cl المميزة لبوليمر PVC .

الاستنتاج

تشير النتائج إلى وجود: مجموعات OH، روابط C-H، وروابط C-Cl، كما تدل كثرة القمم على احتواء العينة على عدة إضافات صناعية ومثبتات حرارية..

2. تحليل العازل الداخلي بعد الاستخلاص



الشكل III -8: تحليل العازل الداخلي بعد الاستخلاص

بعد الاستخلاص لوحظت تغيرات في شدة بعض القمم.
- النطاق $3600-3200 \text{ cm}^{-1}$

انخفضت شدة حزمة بشكل واضح.

- النطاق $1750-1700 \text{ cm}^{-1}$

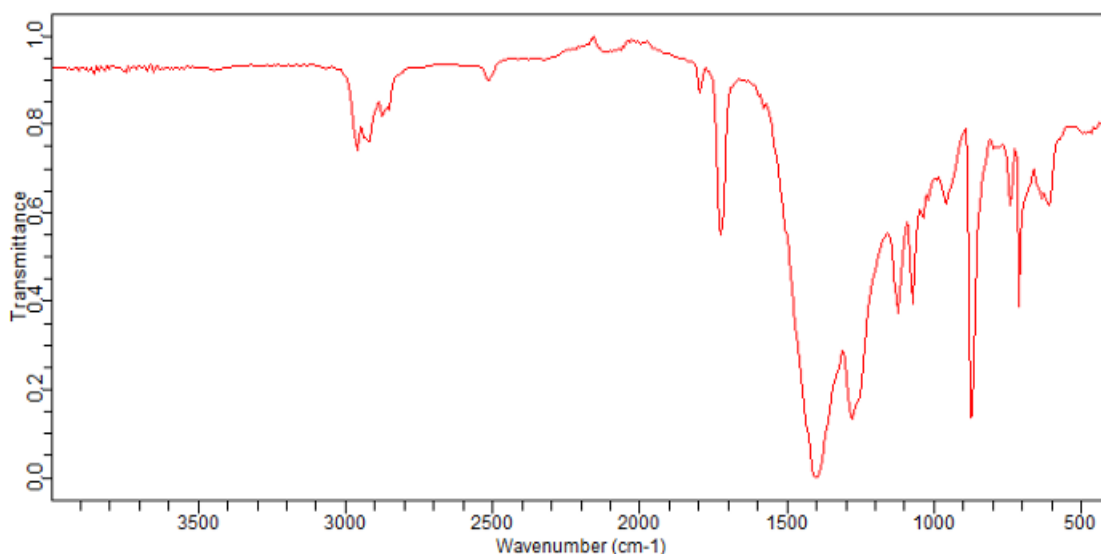
انخفضت قم الكربونيل مقارنة بالعينة قبل الاستخلاص.

- النطاق $700-600 \text{ cm}^{-1}$

بقيت قمة واضحة، مما يدل على استقرار البنية الكيميائية للـ PVC.

2.3.III تحليل عينة بلاستيك الخارجي

1. تحليل العازل الخارجي قبل الاستخلاص (Soxhlet EX avant)



الشكل III -9: تحليل العازل الخارجي قبل الاستخلاص

يبين طيف FTIR الخاص بالعينة قبل الاستخلاص وجود عدة قمم مميزة يمكن تفسيرها كما يلي:
- **النطاق $3000-2800 \text{ cm}^{-1}$**

ظهرت قمم واضحة عند: 2920 cm^{-1} و 2850 cm^{-1} وتعود هذه القمم إلى اهتزازات روابط في مجموعات الميثيل والميثيلين ، مما يدل على وجود سلاسل هيدروكربونية داخل البنية البوليمرية.

- **النطاق $1750-1700 \text{ cm}^{-1}$**

ظهرت قمة قوية حوالي: 1710 cm^{-1} ، تشير إلى وجود رابطة وهي مرتبطة غالبًا بالمجموعات الكربونيلية الموجودة في الملدنات أو الإضافات العضوية المستعملة في تصنيع الكوابل.

- **النطاق $1500-1400 \text{ cm}^{-1}$**

ظهرت قمم امتصاص عند: 1425 cm^{-1} تقريبًا ، وترتبط باهتزازات انحناء روابط المميزة لبوليمر PVC.

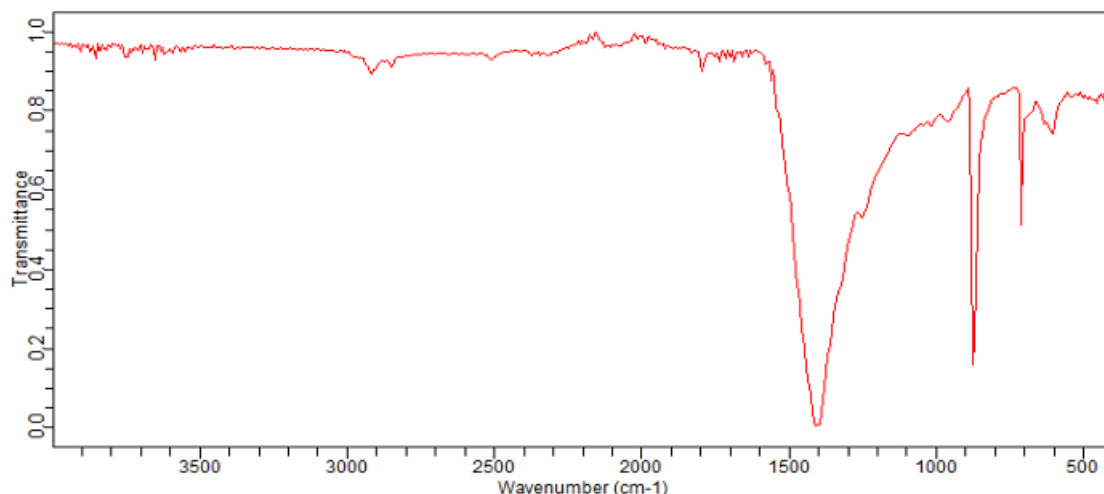
- **النطاق $1250-1000 \text{ cm}^{-1}$**

ظهرت عدة قمم مثل: 1100 cm^{-1} و 1050 cm^{-1} ، وتعود إلى اهتزازات روابط مما يدل على وجود مركبات عضوية وإضافات صناعية.

- **النطاق $700-600 \text{ cm}^{-1}$**

ظهرت قمة قوية جدًا حوالي: 650 cm^{-1} وهي مميزة لرابطة التي تؤكد وجود بوليمر PVC داخل العينة.

2. تحليل العازل الخارجي بعد الاستخلاص (Soxhlet EX après)



الشكل III-10: تحليل العازل الخارجي بعد الاستخلاص (Soxhlet EX après)

بعد إجراء الاستخلاص بالسوكسلي ظهرت تغيرات واضحة على الطيف.

- النطاق $3000 - 2800 \text{ cm}^{-1}$

بقيت قم C-H ظاهرة لكن بشدة أقل مقارنة بالعينة قبل الاستخلاص.

- النطاق $1750 - 1700 \text{ cm}^{-1}$

انخفضت شدة قمة: 1710 cm^{-1} ما يدل على إزالة جزء من المركبات العضوية والملدنات بواسطة المذيب.

- النطاق $1500 - 1400 \text{ cm}^{-1}$

استمرت قمم بالظهور، مما يدل على بقاء البنية الأساسية للبوليمر.

- النطاق $700 - 600 \text{ cm}^{-1}$

بقيت قمة: 650 cm^{-1} واضحة وقوية، وهو ما يؤكد استمرار وجود PVC بعد المعالجة.

• الاستنتاج

يدل انخفاض شدة بعض القمم بعد الاستخلاص على نجاح عملية السوكسلي في إزالة جزء من الملدنات،

الزيوت، والإضافات العضوية. بينما لم تتأثر البنية الأساسية لل PVC.

تشير النتائج إلى أن العينة تحتوي على: روابط C-H الأليفاتية، مجموعات كربونيل C=O، روابط C-O. رابطة C-Cl المميزة لل PVC. كما تدل كثافة القمم على وجود كمية معتبرة من الملدنات وممهلات

اللهب داخل العازل الخارجي.

3.3.III الاستنتاج العام لتحليل FTIR

- من خلال مقارنة الأطياف قبل وبعد الاستخلاص يتبين أن:
- عملية السوكسلي ساهمت في إزالة جزء من المركبات العضوية والإضافات الصناعية.
 - البنية الأساسية للبوليمر بقيت مستقرة بعد المعالجة.
 - استمرار ظهور قمة C-Cl يؤكد أن البوليمر الأساسي هو PVC.
 - اختلاف شدة القمم بين العينات الداخلية والخارجية يدل على اختلاف تركيبة الإضافات الصناعية المستعملة في كل طبقة من طبقات العازل الكهربائي.

4.III الملاحظة العينية للرغوة المحضرة



أظهرت الرغوة المحضرة تمدا جيدا داخل قالب مع تكون بنية خلوية متجانسة نسبيا و بعد 24 ساعة

الشكل III-12 : شكل الرغوة بعد 24 ساعة

من التصلب حافظت الرغوة على شكلها العام مع ظهور بعض الانكماش الموضعي الناتج عن استقرار البنية الخلوية و تحرر الغازات المتكونة اثناء التفاعل.

1.4.III مناقشة النتائج

1.1.4.III نتائج ومناقشة الكثافة الظاهرية

تم حساب الكثافة الظاهرية للرغوة المحضرة باستعمال العلاقة التالية:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{حيث :}$$

ρ : الكثافة الظاهرية (g/cm^3)

m : كتلة العينة (g)

V: حجم العينة (cm^3)

1- العينة قبل الاستخلاص

المعطيات:

- الكتلة : $m = 2.2444 \text{ g}$

- الأبعاد $L = 5.2 \text{ cm}$ $W = 3.9 \text{ cm}$ $h = 3.7 \text{ cm}$

حساب الحجم : $V = L \times W \times h = 5.2 \times 3.9 \times 3.7$

$$V = 75.036 \text{ cm}^3$$

حساب الكثافة:

$$\rho = \frac{2.2444}{75.036}$$

$$\rho = 0.0299 \text{ g/cm}^3$$

2- العينة بعد الاستخلاص

المعطيات:

- الكتلة: $m = 0.8431 \text{ g}$

- الأبعاد : $L = 6.2 \text{ cm}$ $W = 3.5 \text{ cm}$ $h = 2.2 \text{ cm}$

$$V = L \times W \times h = 6.2 \times 3.5 \times 2.2 \quad \text{حساب الحجم :}$$

$$V = 47.74 \text{ cm}^3$$

حساب الكثافة:

$$\rho = \frac{0.8431}{47.74}$$

$$\rho = 0.0177 \text{ g/cm}^3$$

مناقشة النتائج

أظهرت النتائج أن العينة قبل الاستخلاص تمتلك كثافة ظاهرية أعلى مقارنة بالعينة بعد الاستخلاص. ويرجع ذلك إلى وجود المركبات والمضافات داخل البلاستيك قبل عملية الاستخلاص، والتي ساهمت في تكوين بنية أكثر تماسكًا.

أما بعد الاستخلاص، فقد انخفضت الكثافة الظاهرية نتيجة إزالة جزء من المركبات القابلة للذوبان، مما أدى إلى تشكل رغوة أخف وأكثر مسامية. كما لوحظ أن العينة بعد الاستخلاص أصبحت أقل استقرارًا من الناحية الشكلية بعد مرور 24 ساعة، وهو ما يعكس ضعف التماسك الداخلي للبنية الخلوية.

2.1.4.III نتائج ومناقشة اختبار امتصاص الماء

تم حساب نسبة امتصاص الماء باستعمال العلاقة التالية:

$$\text{absorption (\%)} = \frac{m_f - m_i}{m_i}$$

$$\rho = 0.0299 \text{ g/cm}^3$$

حيث:

m_i : الكتلة الابتدائية للعينة.

m_f : الكتلة النهائية بعد الغمر.

جدول (2-III): نتائج امتصاص الماء العينة

نسبة الامتصاص (%)	الكتلة بعد الغمر M (g)	الكتلة الجافة m (g)	حالة العينة
580.1	15.2642	2.2444	قبل الاستخلاص

بعد الاستخلاص	0.8431	15.0948	1690.9
---------------	--------	---------	--------

• مناقشة النتائج

أظهرت نتائج اختبار امتصاص الماء أن العينة بعد الاستخلاص سجلت نسبة امتصاص مرتفعة جداً مقارنة بالعينة قبل الاستخلاص. ويُفسر ذلك بارتفاع المسامية وانخفاض الكثافة الظاهرية للعينة بعد إزالة المواد القابلة للاستخلاص، مما أدى إلى تشكل بنية أكثر انفتاحاً وقدرةً على احتجاز الماء داخل الفراغات الداخلية.

أما العينة قبل الاستخلاص فقد سجلت امتصاصاً أقل نسبياً، وهو ما يدل على أن بنيتها أكثر تماسكاً وأقل انفتاحاً مقارنة بالعينة بعد الاستخلاص.

كما أن القيم المرتفعة المسجلة تبقى ممكنة بالنسبة للرغوات البوليمرية ذات الكثافة المنخفضة جداً، لأن الكتلة الابتدائية للعينة تكون صغيرة، في حين تستطيع البنية الخلوية للرغوة امتصاص كمية كبيرة من الماء داخل المسامات، مما يؤدي إلى ارتفاع نسبة الامتصاص بشكل كبير.

5.III الخصائص الفيزيوميكانيكية لهندسة الخلايا في رغوة البولي يوريثان:

تتحكم الطبوغرافية الفراغية للخلايا الداخلية لرغوة البولي يوريثان (PU) في تحديد الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للمركب النهائي وفق المحددات التالية:

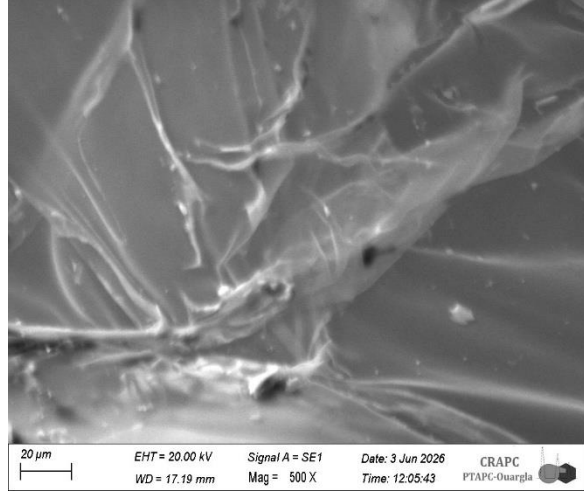
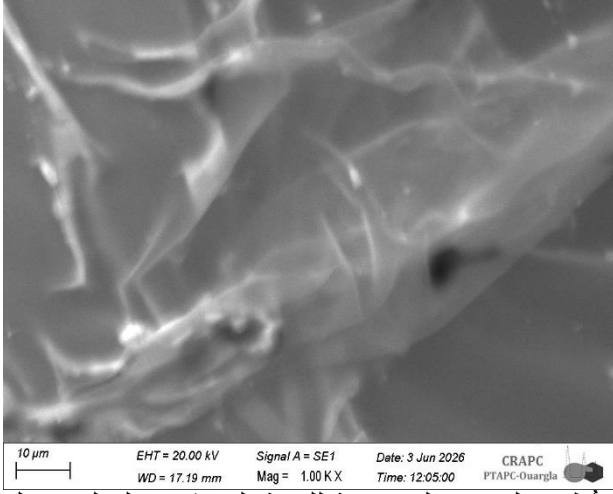
آلية امتصاص الماء: تسمح بنية الخلايا المفتوحة والمترابطة بنفاذ جزيئات السوائل وحركتها بحرية داخل الهيكل الخلوي بفعل الخاصية الشعرية، مما يرفع معدل الامتصاص المائي. في المقابل، تحبس الخلايا المغلقة الغازات بداخلها وتمنع جدرانها المصمتة تغلغل السوائل، مما يمنحها مقاومة عالية للامتصاص والنفادية.

الصلابة الميكانيكية: تظهر الرغوات ذات الخلايا المفتوحة مرونة عالية وصلابة انضغاطية منخفضة نتيجة خروج الغازات بسهولة عبر القنوات المتصلة عند خضوعها لإجهاد ميكانيكي خارجي. أما الخلايا المغلقة فتوفر صلابة مرتفعة نظراً لمقاومة الغاز المحبوس داخلها للتشوهات الهيكلية.

التأثير القطري للخلايا: يؤدي اتساع أقطار الخلايا (المسامية الكبيرة) إلى تقليل مساحة السطح النوعي للجدران الداعمة، مما يخفض المقاومة الميكانيكية ويسرع الامتصاص المائي. بينما يؤدي صغر الأقطار الخلوية (المسامية الدقيقة) إلى توزيع الإجهادات على عدد أكبر من الدعامات، مما يرفع الصلابة ويبطئ التدفق الشعري.

1.5.III التوصيف المورفولوجي والظاهري بواسطة المجهر الإلكتروني الماسح (MEB)

1.1.5.III البنية الظاهرية للمركب قبل الاستخلاص (العينة الخام)



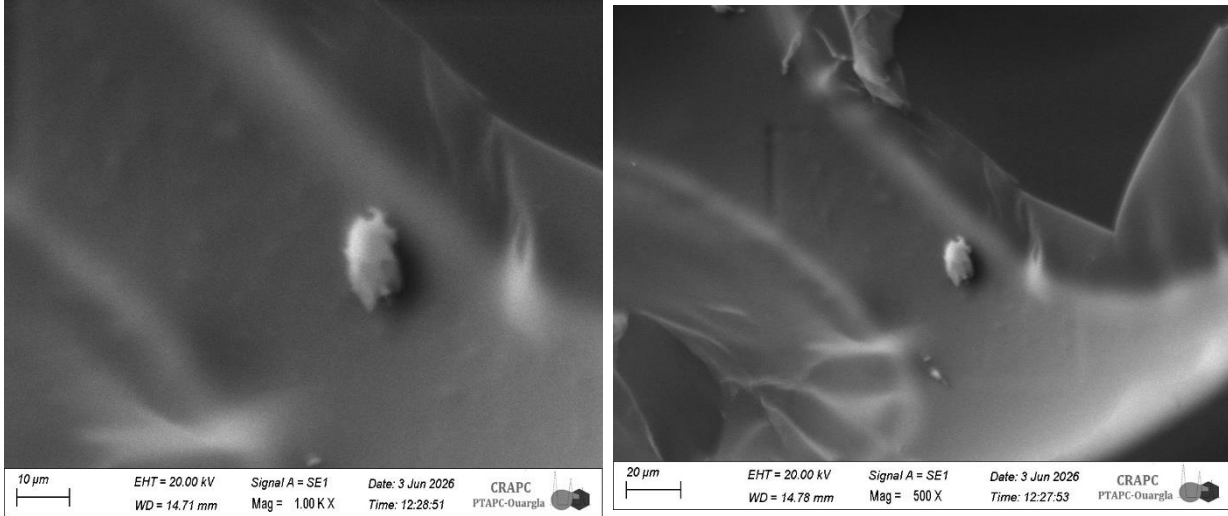
تظهر الصور المجهرية للعينة المحشوة بالبولي فينيل

الشكل III-14: صورة مجهرية لمركب (pvc/pu) قبل لاستخلاص عند تكبير 100

الشكل III-13: صورة مجهرية لمركب (pvc/pu) قبل لاستخلاص عند تكبير 500

كلورايد (PVC) التجاري قبل معالجته بالاستخلاص الحراري تحولاً كبيراً في هندسة الخلايا المفتوحة الأصلية. عند التكبير المنخفض ($100\times$)، يُلاحظ أن البنية الخلوية للرغوة قد تعرضت لانسداد وتراكم جزئي كثيف، حيث تبدو جدران الرغوة ودعاماتها الهيكلية ذات سمك مرتفع جداً نتيجة تكثف الطور البلاستيكي المضاف في الفراغات البينية، مما يحولها ميكانيكياً إلى بنية شبه مغلقة. (الشكل III-13) وعند الانتقال إلى التكبيرات العالية ($500\times$)، يتضح أن الأسطح الخارجية للدعامات مغطاة بالكامل بطبقة بوليمرية مستمرة تفتقر إلى التجانس والنعومة، وتتميز بوجود خشونة طبوغرافية حادة وتجاويف ميكرومترية بارزة ناتجة عن إجهادات التبريد والخلط (الشكل III-14). يُعزى هذا المظهر الكتلي إلى الالتصاق الفيزيائي العشوائي للبلاستيك التجاري المستعمل بمضافاته وملدناته، مما تسبب في غلق القنوات المفتوحة، رافعاً من صلابة المركب الأولية ومخفضاً من قدرته على امتصاص الماء.

III. 2.1.5. البنية الظاهرية للمركب بعد الاستخلاص بالسوكسلي



الشكل III -16: صورة مجهرية لمركب (pvc/pu) بعد لاستخلاص عند تكبير 100

الشكل III -15: صورة مجهرية لمركب (pvc/pu) بعد لاستخلاص عند تكبير 500

أدى إخضاع المركب لمعالجة الاستخلاص الكيميائي بواسطة جهاز السوكسلي إلى حدوث تحول بنيوي جوهري، حيث يكشف الفحص المجهرى عن استرجاع الرغوة لبنيتها الخلوية ذات المسامية المفتوحة واختفاء الانسدادات الفجوية الكبيرة في الهيكل البوليمري (الشكل III -15).

وعند درجتي التكبير 200× و 500×، تبدو أسطح جدران المسامات وأقطار الخلايا أكثر تجانساً ونقاءً. وتكشف مناطق الكسر المستعرض عن مظهر شبه زجاجي مستمر وخالٍ من الشقوق البينية أو الانفصال الطوري الحاد عند الواجهة بين البوليمرين (PU/PVC) (الشكل III -16). وتثبت هذه الملاحظات المجهرية أن التأثير المزدوج للمذيب العضوي والارتجاع الحراري المستمر داخل جهاز السوكسلي قد أزال بنجاح الفائض الميكانيكي المتكثف والمضافات التجارية الكثيفة التي سدت الخلايا سابقاً، مما سمح بإعادة فتح المسامات المفتوحة لتستعيد المادة قدرتها المتوازنة على الامتصاص والنفادية، مع الاحتفاظ بطبقة رقيقة ومتجانسة التوزيع من البولي فينيل كلورايد المنقى والمستخلص على طول الهيكل الداعم للرغوة.

III. 2.5. التحليل الكيميائي والنوعي بواسطة مطيافية الأشعة السينية المشتتة من الطاقة (EDX)

تم الاعتماد على قياس التطور الكيميائي العنصري الكمي لسطح المركب البوليمري، مع التركيز على عنصر الكلور (Cl) باعتباره العنصر الدليل الحصري والمميز للبولي فينيل كلورايد (-CH₂-CHCl-)، لتحديد مدى نقاء أطوار المادة وتأكيد كفاءة عملية الفصل الكيميائي بجهاز السوكسلي.

جدول (III-3): نتائج التحليل الكمي للعينة قبل الاستخلاص

Elément	% de masse	% atomique	Kratio	Z	A	F
C K	64.05	73.15	0,3495	1.0294	0.5301	1.0000
O K	28.43	24.37	0,0458	0.9843	0.1638	1.0000
NaK	1.74	1.04	0,0071	0.8933	0.4535	1.0007
MgK	0.36	0.21	0,0020	0.9084	0.6112	1.0013
SiK	0.25	0.12	0,0019	0.8937	0.8575	1.0039
MoL	0.00	0.00	0,0000	0.6832	1.1419	1.0002
S K	0.26	0.11	0,0022	0.8750	0.9536	1.0097
ClK	1.32	0.51	0,0108	0.8323	0.9769	1.0129
K K	0.38	0.13	0,0033	0.8282	1.0001	1.0258
CaK	0.49	0.17	0,0043	0.8433	1.0078	1.0328
AuL	2.72	0.19	0,0145	0.5010	1.0399	1.0277

قبل الاستخلاص (العينة الخام): أظهر الجدول التحليلي الكمي للعينة (الجدول III-3) تسجيل نسبة مرتفعة لعنصر الكلور السطحي بلغت % 1.32 ما يعادل نسبة ذرية قدرها % 0.51 تثبت هذه النسبة المرتفعة نجاح عملية الحشو الأولية وتكدس كميات معتبرة من الشحنة البلاستيكية الخام المشبعة بالمضافات فوق جدران الرغوة، وهو ما يتطابق مع الانسداد الخلوي الملاحظ في صور المجهر الإلكتروني السابقة.

جدول (III-4): نتائج التحليل الكمي للعينة بعد الاستخلاص

Elément	% de masse	% atomique	Kratio	Z	A	F
C K	66.72	75.61	0,4109	1.0291	0.5984	1.0000
O K	26.91	22.89	0,0415	0.9841	0.1565	1.0000
NaK	1.03	0.61	0,0041	0.8933	0.4423	1.0007
MgK	0.36	0.20	0,0020	0.9084	0.6070	1.0012
NbL	0.28	0.04	0,0023	0.6910	1.1582	1.0001
ClK	0.71	0.27	0,0058	0.8325	0.9757	1.0140
PdL	0.37	0.05	0,0028	0.6665	1.1494	1.0009
SnL	0.39	0.05	0,0029	0.6411	1.1445	1.0014
CaK	0.21	0.07	0,0018	0.8436	1.0087	1.0305
AuL	3.01	0.21	0,0162	0.5014	1.0403	1.0274

بعد الاستخلاص بالسوكسلي: سجل الجدول التحليلي الكيميائي للعينة المعالجة (الجدول III-4) انخفاضاً حاداً في النسبة الكتلية لعنصر الكلور لتستقر عند % 0.71 ما يعادل نسبة ذرية قدرها % 0.27 . يُعد هذا الانخفاض الرقمي بنسبة تقارب النصف برهاناً كيميائياً مباشراً على كفاءة بروتوكول التنقية بجهاز السوكسلي؛ حيث نجحت العملية في إذابة وفصل زوائد البلاستيك والمضافات الكلورية الذائبة غير المرتبطة ميكانيكياً، مع الحفاظ على الفراكسيون المتداخلة والمثبتة كفيلم رقيق ومنتظم يدعم جدران الخلايا المفتوحة دون غلق مساميتها الوظيفية.

الخلاصة العامة

في ظل التزايد المستمر للنفايات البلاستيكية الناتجة عن الكابلات الكهربائية وما تسببه من آثار بيئية واقتصادية سلبية، هدفت هذه الدراسة إلى تثمين هذه النفايات من خلال استرجاع مادة بولي فينيل كلوريد (PVC) وإعادة استخدامها كمادة مألوفة في تحضير رغوة البولي يوريثان، في إطار مقارنة تعتمد على مبادئ الاقتصاد الدائري وإعادة التدوير.

اعتمد العمل التجريبي على معالجة نفايات الكابلات الكهربائية واستخلاص المواد المضافة القابلة للذوبان باستعمال جهاز السوكسلي، ثم توصيف المادة المسترجعة بواسطة تقنيات FTIR و UV-Visible للتأكد من طبيعتها الكيميائية ومدى نقاوتها. وقد أكدت النتائج أن المادة المسترجعة تحتفظ بالخصائص البنيوية المميزة للـPVC، مما يدل على إمكانية إعادة استغلالها في تطبيقات صناعية جديدة ذات قيمة مضافة.

كما تم إدماج الـPVC المسترجع في تركيب رغوة البولي يوريثان ودراسة تأثيره على بعض الخصائص الفيزيائية والبنيوية للرغوة. أظهرت نتائج الكثافة وامتصاص الماء أن إضافة الـPVC ساهمت في تعديل البنية الداخلية للرغوة وتحسين بعض خصائصها الوظيفية. وأكدت تحاليل (SEM) MEB وجود توزيع جيد لجزيئات الـPVC داخل المصفوفة البولييمرية مع تغيرات واضحة في مورفولوجية الخلايا والمسافات، في حين بينت تحاليل EDX وجود العناصر الكيميائية المميزة لمكونات الرغوة والـPVC، مما يؤكد نجاح عملية الدمج بين المادتين.

بصفة عامة، أثبتت هذه الدراسة أن نفايات الكابلات الكهربائية لا تمثل عبئاً بيئياً فحسب، بل يمكن اعتبارها مورداً ثانوياً قيماً قابلاً للتثمين والاستغلال. كما أظهرت النتائج إمكانية إنتاج مواد مركبة ذات خصائص واعدة انطلاقاً من مواد معاد تدويرها، وهو ما يساهم في تقليل كمية النفايات الموجهة للردم أو الحرق، والحد من استهلاك المواد الأولية، وتعزيز مفهوم الاستدامة في الصناعات البوليمرية. وعليه، يمكن اعتبار هذا العمل خطوة مهمة نحو تطوير حلول مبتكرة لإعادة تدوير نفايات PVC وتحويلها إلى مواد ذات قيمة مضافة، بما يدعم التوجهات الحديثة للاقتصاد الدائري ويعزز الجهود الرامية إلى حماية البيئة وتحقيق تنمية صناعية مستدامة.

الآفاق المستقبلية

انطلاقاً من النتائج المحققة في هذه الدراسة، يمكن اقتراح مجموعة من الآفاق المستقبلية التي من شأنها تطوير هذا العمل وتوسيع مجالات الاستفادة من نفايات الكابلات الكهربائية المحتوية على PVC:

- دراسة تأثير نسب مختلفة من PVC المسترجع على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية لرغوة البولي يوريثان بهدف تحديد النسبة المثلى للإضافة.
- إجراء اختبارات ميكانيكية متقدمة مثل مقاومة الانضغاط، مقاومة الشد، والصلادة لتقييم الأداء الحقيقي للرغوة المحضرة في التطبيقات الصناعية.

- دراسة الخصائص الحرارية للرغوات المركبة باستعمال تقنيات مثل TGA و DSC لتحديد تأثير PVC المسترجع على الاستقرار الحراري وسلوك التحلل.
- تقييم مقاومة اللهب للرغوة المحضرة نظراً لاحتواء PVC على عنصر الكلور المعروف بدوره في تحسين مقاومة الاشتعال.
- تطوير مواد عازلة حرارياً وصوتياً اعتماداً على رغوات البولي يوريثان المحشوة بـ PVC المعاد تدويره واستكشاف إمكانية استخدامها في قطاع البناء والعزل.
- توسيع نطاق الدراسة ليشمل أنواعاً أخرى من النفايات البلاستيكية الناتجة عن الكابلات الكهربائية ومقارنة تأثيرها على خصائص الرغوة.
- دراسة الجدوى الاقتصادية والصناعية لإنتاج هذه الرغوات المركبة على نطاق واسع وتقييم مساهمتها في خفض تكاليف المواد الأولية.
- تطبيق منهجية الاقتصاد الدائري من خلال إنشاء سلسلة متكاملة لاسترجاع ومعالجة وتثمين نفايات الكابلات الكهربائية وتحويلها إلى منتجات ذات قيمة مضافة.
- استكشاف إمكانية استخدام PVC المسترجع في تطبيقات بوليمرية أخرى مثل المواد المركبة، الألواح العازلة، ومواد التغليف التقنية.
- إجراء تقييم بيئي شامل (Life Cycle Assessment - LCA) لقياس الأثر البيئي لهذه العملية مقارنة بالطرق التقليدية للتخلص من نفايات PVC.

المخلص

يهدف هذا العمل إلى تثمين نفايات الكابلات الكهربائية المحتوية على بولي فينيل كلوريد (PVC) من خلال إعادة استخدامها كمادة مالئة في رغوة البولي يوريثان. تم استخلاص الملدنات من الـ PVC باستخدام جهاز السوكسلي، ثم توصيف العينات بواسطة تقنيات FTIR و UV-Vis قبل وبعد المعالجة. كما تم دراسة البنية المورفولوجية للرغوة باستخدام المجهر الإلكتروني الماسح (MEB). أظهرت النتائج نجاح عملية الاستخلاص مع الحفاظ على البنية الأساسية للـ PVC وتحسن تجانس الحشو داخل الرغوة. تؤكد هذه الدراسة إمكانية إعادة تدوير نفايات الكابلات الكهربائية وتحويلها إلى مواد ذات قيمة مضافة في إطار الاقتصاد الدائري.

الكلمات المفتاحية: الكابلات الكهربائية، السوكسلي، البولي يوريثان، MEB، FTIR، إعادة التدوير، PVC.

Abstract

This work aims to valorize electrical cable waste containing PVC by reusing it as a filler in polyurethane foam. Plasticizers were extracted using Soxhlet extraction, and the samples were characterized by FTIR and UV-Vis analyses before and after treatment. The morphology of the resulting foam was investigated using SEM. The results confirmed successful extraction while preserving the PVC structure and improving filler dispersion within the foam. This work demonstrates the potential of recycling electrical cable waste into value-added materials within the circular economy framework.

Keywords: PVC, Electrical Cable Waste, Soxhlet Extraction, Polyurethane Foam, SEM, FTIR, Recycling.

الملاحق

Scan Analysis Report

Report Time : Mon 18 May 04:28:02 PM 2026

Method:

Batch: C:\Users\DELL\Desktop\Master\TALALA WARDA\SCAN CYCLOHEX APRE SOXLET.BSW

Software version: 4.20(470)

Operator:

Sample Name: Sample CYCLO APRE SOXLET

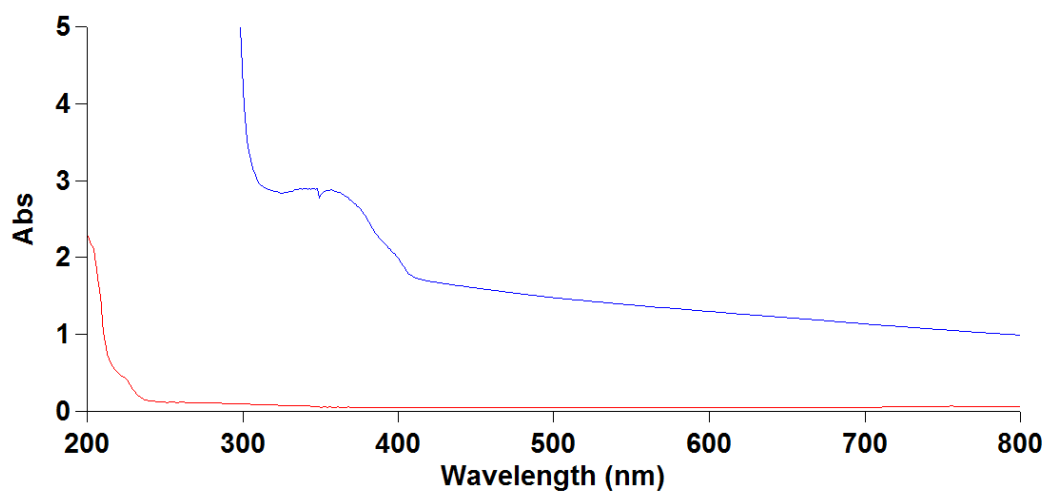
Collection Time 18-May-26 4:28:12 PM

Peak Table

Peak Style	Peaks
Peak Threshold	0.0100
Range	800.00nm to 200.00nm

Wavelength (nm)	Abs
-----------------	-----

357.00 2.880
 345.00 2.900
 339.00 2.901



Scan Analysis Report

Report Time : Mon 18 May 04:36:24 PM 2026

Method:

Batch: C:\Users\DELL\Desktop\Master\TALALA WARDA\SCAN CYCLOHEX APRE SOXLET rep.BSW

Software version: 4.20(470)

Operator:

Sample Name: Sample CYCLO APRE SOXLET rep

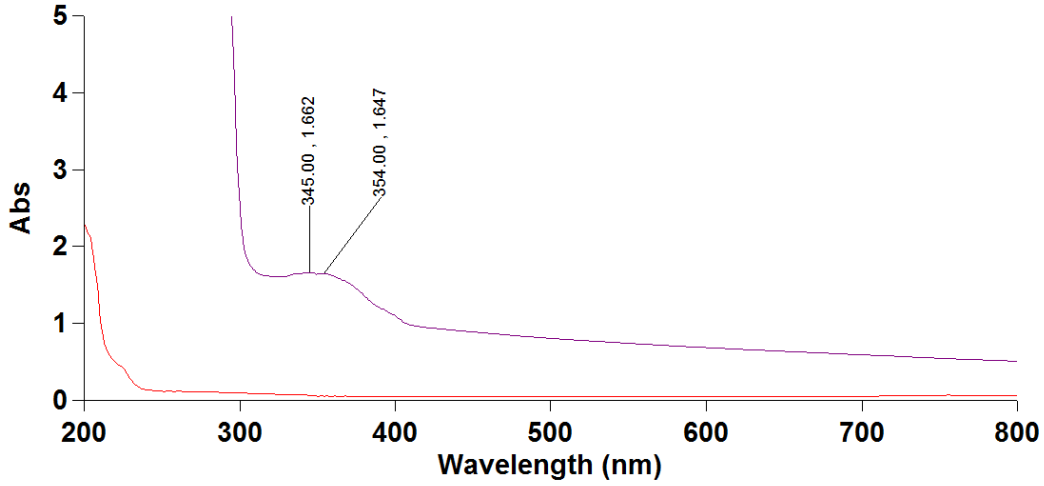
Collection Time 18-May-26 4:36:34 PM

Peak Table

Peak Style Peaks
 Peak Threshold 0.0100
 Range 800.00nm to 200.00nm

Wavelength (nm) Abs

354.00	1.647
345.00	1.662



Scan Analysis Report

Report Time : Mon 18 May 04:43:45 PM 2026

Method:

Batch: C:\Users\DELL\Desktop\Master\TALALA WARDA\SCAN CYCLOHEX APRE SOXLET interieur.BSW

Software version: 4.20(470)

Operator:

Sample Name: Sample CYCLO APRE SOXLET inter

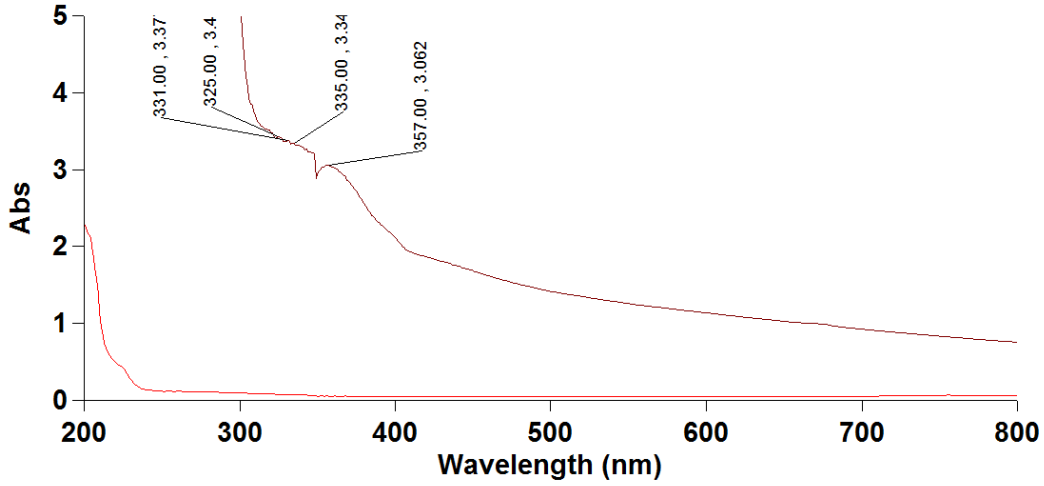
Collection Time 18-May-26 4:43:54 PM

Peak Table

Peak Style Peaks
 Peak Threshold 0.0100
 Range 800.00nm to 200.00nm

Wavelength (nm) Abs

357.00	3.062
335.00	3.341
331.00	3.377
325.00	3.425



Scan Analysis Report

Report Time : Mon 18 May 04:47:42 PM 2026

Method:

Batch: C:\Users\DELL\Desktop\Master\TALALA WARDA\SCAN SIMPLE AVAN SOXLET exter.BSW

Software version: 4.20(470)

Operator:

Sample Name: Sample AVAN SOXLET EXTER

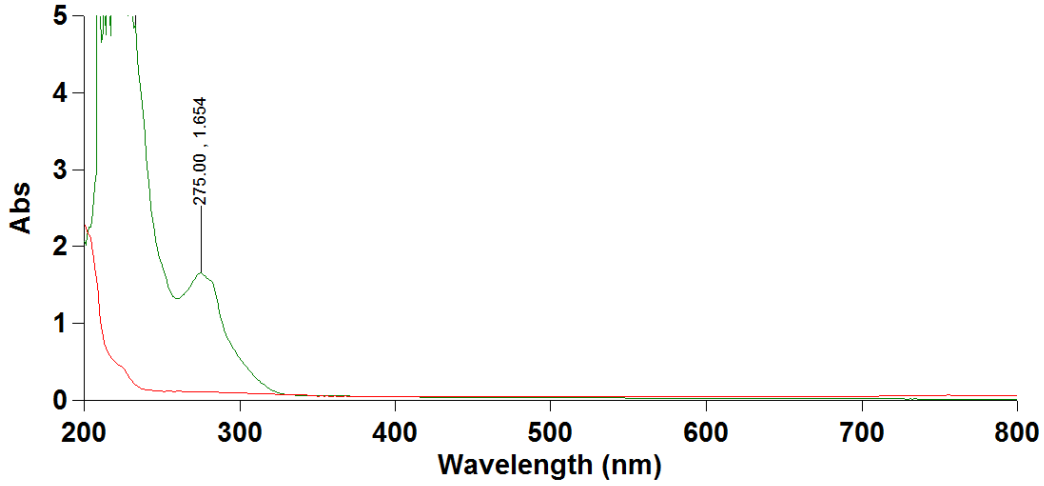
Collection Time 18-May-26 4:47:51 PM

Peak Table

Peak Style	Peaks
Peak Threshold	0.0100
Range	800.00nm to 200.00nm

Wavelength (nm)	Abs
-----------------	-----

275.00	1.654
233.00	4.873
229.00	10.000
225.00	10.000
218.00	10.000
216.00	10.000
213.00	10.000
210.00	10.000



Scan Analysis Report

Report Time : Mon 18 May 04:52:48 PM 2026

Method:

Batch: C:\Users\DELL\Desktop\Master\TALALA WARDA\SCAN SIMPLE AVAN SOXLET INTER.BSW

Software version: 4.20(470)

Operator:

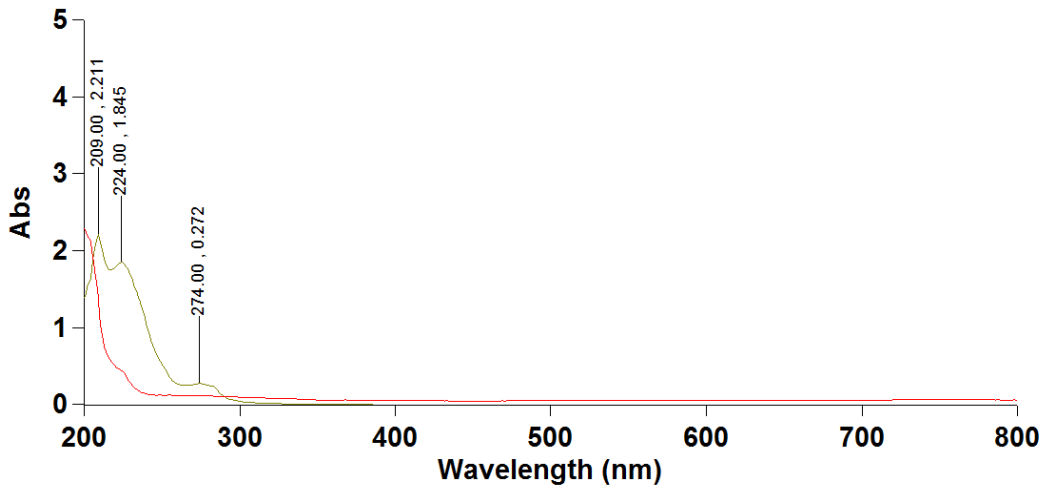
Sample Name: Sample AVAN SOXLET INTER

Collection Time 18-May-26 4:52:58 PM

Peak Table

Peak Style Peaks
 Peak Threshold 0.0100
 Range 800.00nm to 200.00nm

Wavelength (nm)	Abs
274.00	0.272
224.00	1.845
209.00	2.211



Scan Analysis Report

Report Time : Mon 18 May 04:56:58 PM 2026

Method:

Batch: C:\Users\DELL\Desktop\Master\TALALA WARDA\SCAN SIMPLE APRE SOXLET INTER.BSW

Software version: 4.20(470)

Operator:

Sample Name: Sample APRE SOXLET INTER

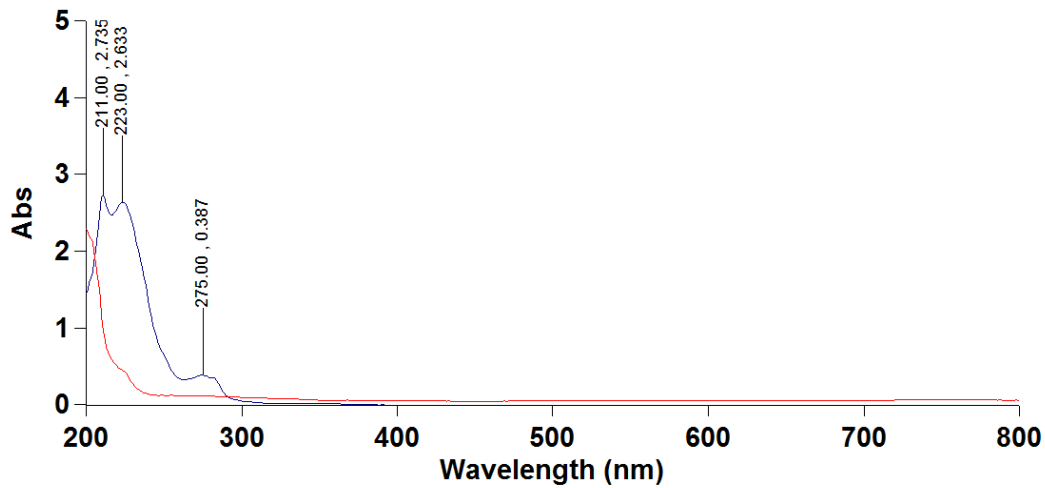
Collection Time 18-May-26 4:57:08 PM

Peak Table

Peak Style	Peaks
Peak Threshold	0.0100
Range	800.00nm to 200.00nm

Wavelength (nm)	Abs
-----------------	-----

275.00	0.387
223.00	2.633
211.00	2.735



Scan Analysis Report

Report Time : Mon 18 May 05:01:37 PM 2026

Method:

Batch: C:\Users\DELL\Desktop\Master\TALALA WARDA\SCAN SIMPLE APRE SOXLET EXTER.BSW

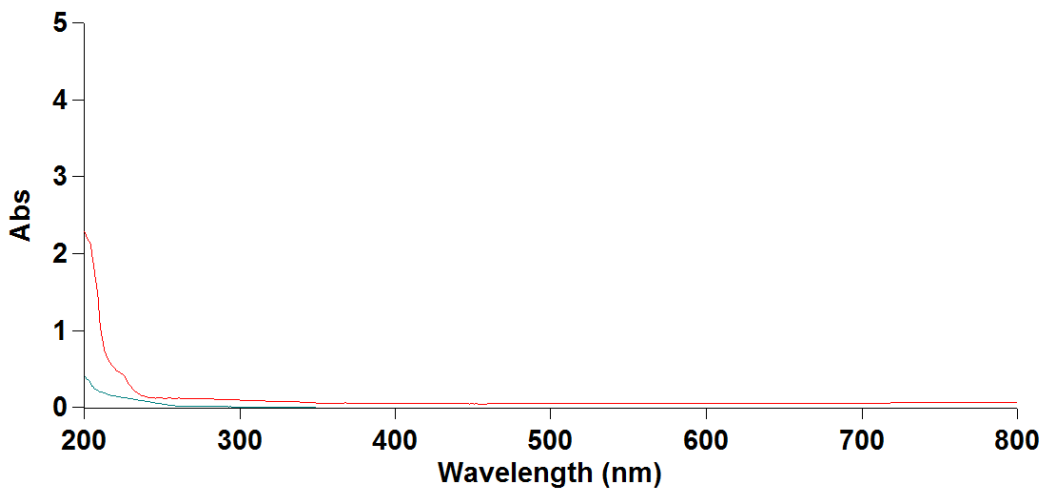
Software version: 4.20(470)

Operator:

Sample Name: Sample APRE SOXLET EXTER

Collection Time 18-May-26 5:01:47 PM

Peak Table
Peak Style Peaks
Peak Threshold 0.0100
Range 800.00nm to 200.00nm



No peak found above threshold



Sample ID: Soxhlet EX avant

Sample Scans: 140

Background Scans: 140

Resolution: 4

System Status: Good

File Location: C:\Users\Public\Documents\Agilent\MicroLab\Results\FileLocationSoxhlet EX avant_2026-04-29T03-02-43.a2r

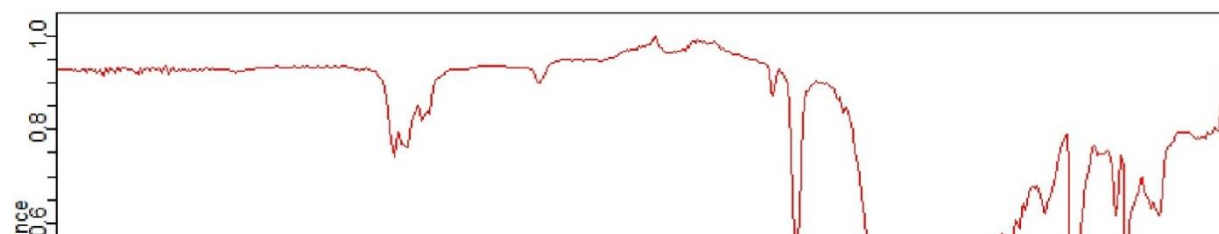
Method Name: Pathlength_ATR

User: UNIV

Date/Time: 04/29/2026 3:02:43 AM

Range: 4000 - 400

Apodization: Happ-Genzel





Agilent Technologies

Sample ID: Soxhlet EX apres
Sample Scans: 140

Background Scans: 140
Resolution: 4

System Status: Good

File Location: C:\Users\Public\Documents\Agilent\MicroLab\Results\FileLocationSoxhlet EX
apres_2026-04-29T02-55-31.a2r

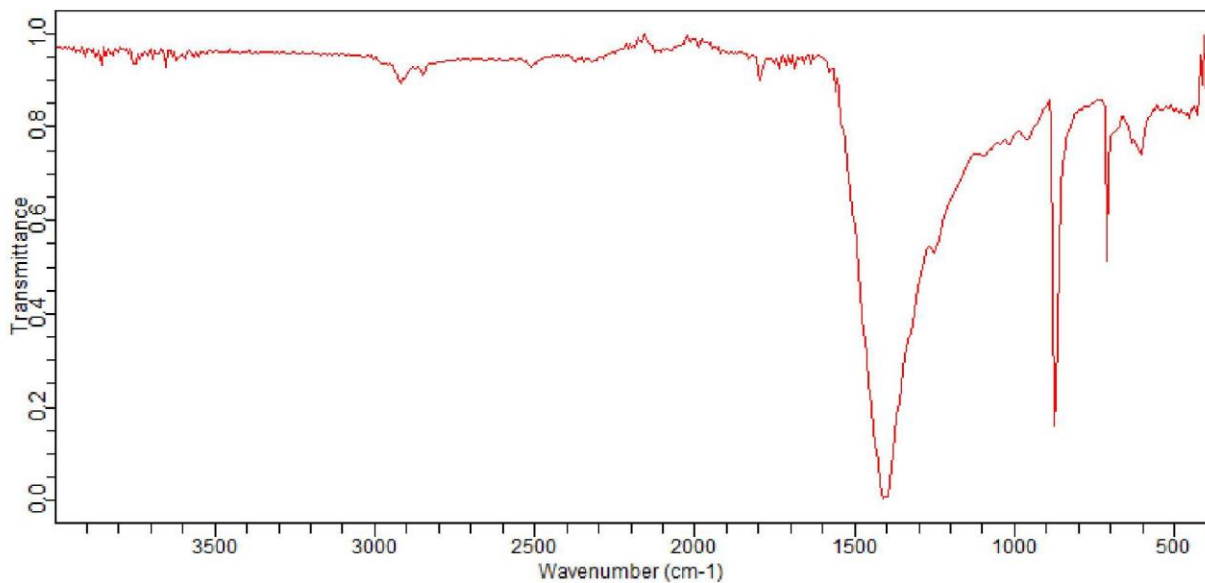
Method Name: Pathlength_ATR

User: UNIV

Date/Time: 04/29/2026 2:55:31 AM

Range: 4000 - 400

Apodization: Happ-Genzel



Quality

Library

CAS#

Name



Agilent Technologies

Sample ID: Soxhlet INT avant

Sample Scans: 140

Background Scans: 140

Resolution: 4

System Status: Good

File Location: C:\Users\Public\Documents\Agilent\MicroLab\Results\FileLocationSoxhlet INT avant_2026-04-30T02-48-15.a2r

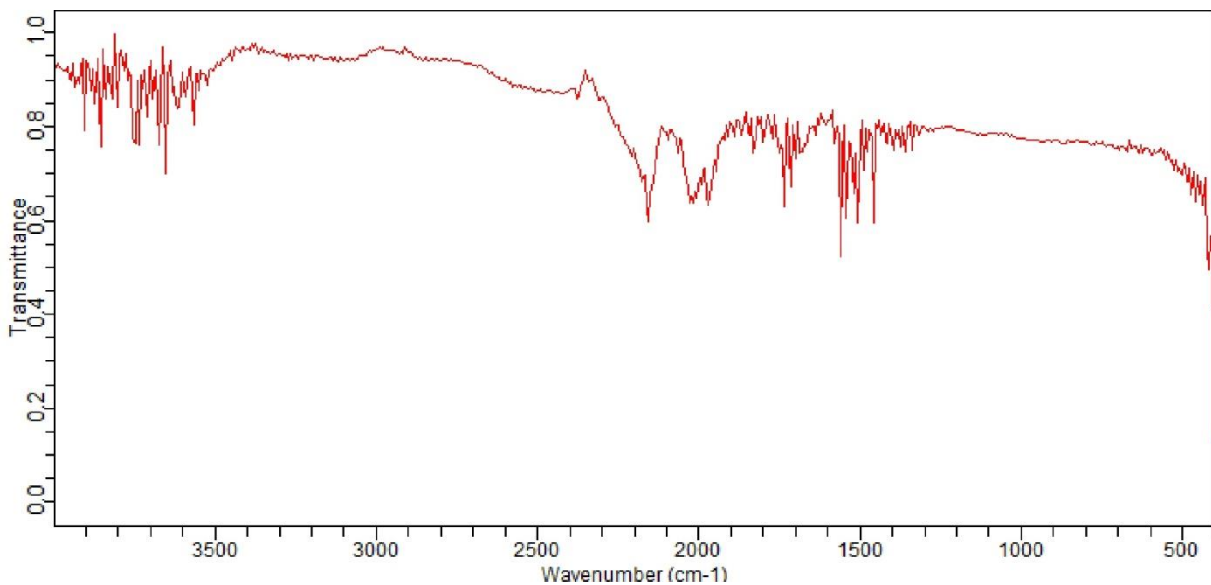
Method Name: Pathlength_ATR

User: UNIV

Date/Time: 04/30/2026 2:48:15 AM

Range: 4000 - 400

Apodization: Happ-Genzel



Agilent Technologies

Sample ID: Soxhlet INT apres

Sample Scans: 140

Background Scans: 140

Resolution: 4

System Status: Good

File Location: C:\Users\Public\Documents\Agilent\MicroLab\Results\FileLocationSoxhlet INT apres_2026-04-29T03-08-02.a2r

Method Name: Pathlength_ATR

User: UNIV

Date/Time: 04/29/2026 3:08:02 AM

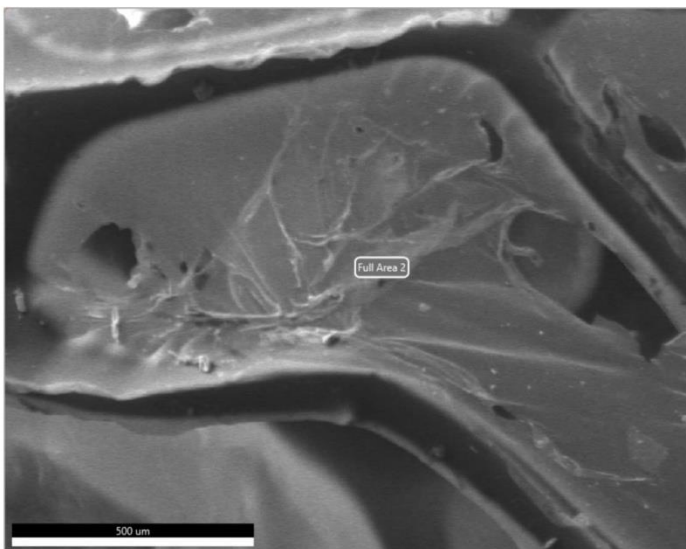
Range: 4000 - 400

Apodization: Happ-Genzel

PTAPC OUARGLA

Auteur : CRAPC Operator
Création : 06/03/2026 12:07:18
Nom de l'échantillon : Nouvel échantillon

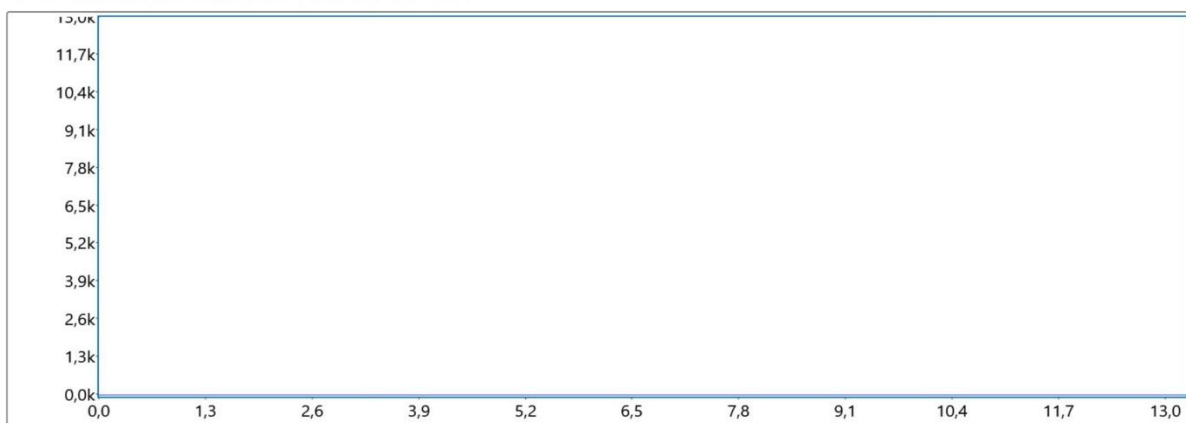
Zone 913



Zeiss SmartEDX

Full Area 1

kV 20 Grossissement : 200 Takeoff: 35 Live Time(s): 1 Amp Time(μs): 3,84 Resolution:(eV) 130,7



Zeiss SmartEDX

Full Area 2

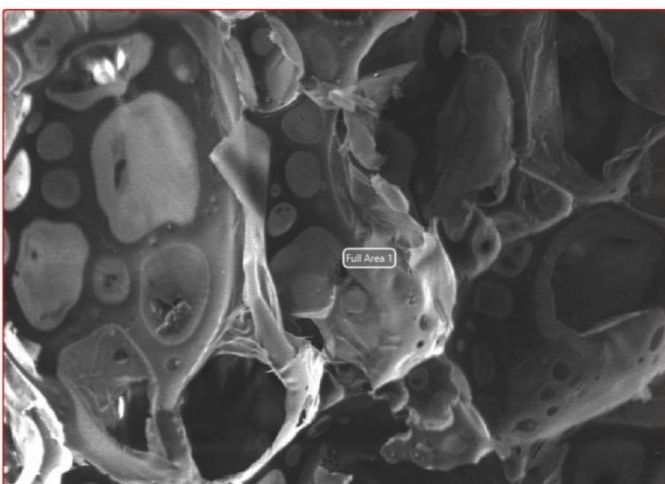
kV 20 Grossissement : 200 Takeoff: 42,5 Live Time(s): 20 Amp Time(μs): 3,84 Resolution:(eV) 130,7



PTAPC OUARGLA

Auteur : CRAPC Operator
Création : 06/03/2026 12:29:30
Nom de l'échantillon : Nouvel échantillon

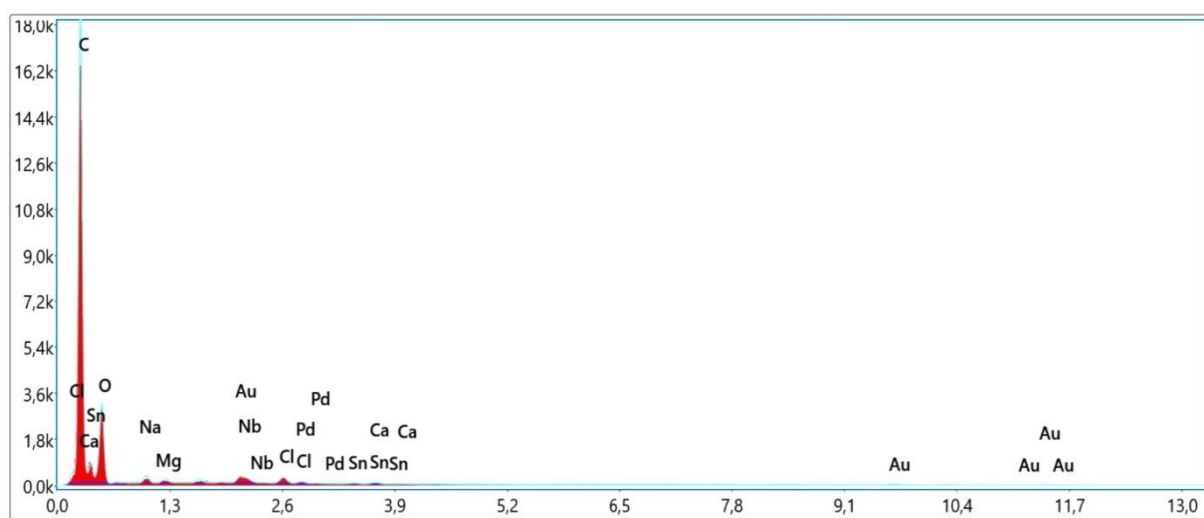
Zone 914



Zeiss SmartEDX

Full Area 1

kV 20 Grossissement : 33 Takeoff: 42,5 Live Time(s): 20 Amp Time(μs): 3,84 Resolution:(eV) 130,7



Résultats quantitatifs intelligents

Elément	% de masse	% atomique	Kratio	Z	A	F
C K	66.72	75.61	0,4109	1.0291	0.5984	1.0000
O K	26.91	22.89	0,0415	0.9841	0.1565	1.0000
NaK	1.03	0.61	0,0041	0.8933	0.4423	1.0007
MgK	0.36	0.20	0,0020	0.9084	0.6070	1.0012
NbL	0.28	0.04	0,0023	0.6910	1.1582	1.0001
ClK	0.71	0.27	0,0058	0.8325	0.9757	1.0140
PdL	0.37	0.05	0,0028	0.6665	1.1494	1.0009
SnL	0.39	0.05	0,0029	0.6411	1.1445	1.0014
CaK	0.21	0.07	0,0018	0.8436	1.0087	1.0305
AuL	3.01	0.21	0,0162	0.5014	1.0403	1.0274

