

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة محمد خيضر – بسكرة
كلية العلوم الدقيقة
قسم علوم المادة



رقم الترتيب:.....

أطروحة

مقدمة من قبل:

سليمان محمد

لنيل شهادة الدكتوراه في العلوم

الشعبة : الكيمياء
التخصص: كيمياء المواد

العنوان:

دراسة فيزيو- ميكانيكية وديناميكية لمركبات قائمة على بولي كلوريد الفينيل (PVC).

تمت المناقشة علناً في: 14- 12 - 2025.

أمام لجنة المناقشة المتكونة من:

أ.د. نباش نادية	Pr.	جامعة بسكرة.	رئيسة
أ.د. مغزي أحمد	Pr.	جامعة بسكرة.	مشرفا
د. مفتاح يزيد	M.C.A.	المدرسة العليا للأساتذة - بوسعادة	ممتحنا
د. ماعو سميرة	M.C.A.	جامعة الشلف	ممتحنة

الإهداء

إلى زوجتي الكريمة وابنتي العزيزتين، اللواتي كنّ يحثنني بإصرار
ويشجّعنني باستمرار على إتمام هذه الأطروحة، أهدي هذا الجهد
المتواضع تقديراً لدعمهنّ المتواصل.

شكر

أتقدم بخالص عبارات الشكر والتقدير إلى أستاذي الفاضل الأستاذ الدكتور **مغزي أحمد**، مدير أطروحتي، لما قدّمه لي من توجيه ودعم علمي طوال فترة البحث، ولما لمستّه من خبرته الغنية، وصرامته الأكاديمية، وتفانيه الكبير.

كما أتوجّه بجزيل الشكر إلى الأستاذة الدكتورة **نباش نادية**، أستاذة بجامعة بسكرة، على تشريفها لي برئاسة لجنة المناقشة، وإلى الأستاذ **مفتاح يزيد**، أستاذ بالمدرسة العليا للأستاذة ببوسعادة، على قبوله الكريم المشاركة في لجنة التحكيم والمناقشة، مع أسمى آيات التقدير.

أشكر كذلك الأستاذة **ماعو سميرة**، أستاذة بجامعة الشلف، على فحصها وتقييمها العلمي لهذا العمل، ومشاركتها الكريمة في التحكيم و مناقشة الأطروحة.

ولا يفوتني أن أخص بالشكر مرة أخرى المدير السابق لمخبر الكيمياء التطبيقية (LCA) بجامعة بسكرة أ.د. **مغزي أحمد** الذي سخر لي إمكانات المخبر للبحث كما لا أنسى في هذا الشأن فريق العمل بمخبر شركة صناعات الكوابل ببسكرة (ENICAB) الذين لم يخلو علينا بكل ما نحتاج إليه أثناء فترة البحث.

وأخيراً، شكري موصول إلى كل من قدّم لي يد العون من مشورة علمية ودفع معنوي خلال مسيرتي البحثية، راجياً من الله أن يوفق الجميع لما فيه الخير والعلم النافع.

الفهرس

I	الإهداء
II	شكر
III	الفهرس
VI	قائمة الأشكال
XI	قائمة الجداول
XIII	المصطلحات
XVI	الإختصارات
XVIII	ملخص
20	مقدمة عامة
23	الفصل الأول: عموميات حول البوليمرات : طبيعتها وتصنيفها وخصائصها العامة
24	1. تعريف البوليمرات
25	2. الفئات المختلفة للبوليمرات
31	3. أنواع البوليمرات
34	4. استخدامات البوليمرات
36	الفصل الثاني: بنية وخواص المواد المركبة
37	1. تعريف المواد المركبة
37	2. تركيب المواد المركبة
43	3. بولي كلوريد الفينيل (PVC)
47	4. البولي إيثيلين منخفض الكثافة (LDPE)
49	5. مطاط الأكريلونيتريل بوتادين (NBR)
51	6. الألياف الطبيعية
59	7. الدراسات السابقة
63	الفصل الثالث: التقنيات التجريبية لتحضير المواد المركبة
64	1. المواد الأولية المستعملة و طرق تحضير الألياف
71	2. تحضير المواد المركبة
77	3. التقنيات المستخدمة لدراسة خصائص المواد المركبة
96	الفصل الرابع: النتائج والتفسيرات
97	1. المركبات القائمة على البولي كلوريد فينيل PVC و الألياف الطبيعية
97	1.1. نتائج حيود الأشعة السينية DRX

2.1. التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء FTIR	98
2.2.1. التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء لمسحوق الياف اوراق نخيل التمر (DPLF)	100
3.2.1. التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء لألياف اوراق نخيل التمر (DPLF) المعالجة بهيدروكسيد الصوديوم (NaOH)	102
4.2.1. التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء لألياف اوراق نخيل التمر (DPLF) المعالجة بالسيلان	103
5.2.1. التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء لنوى التمر	105
6.2.1. التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء لتفل القهوة	106
7.2.1. التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء للمركب (5% DPLF - 95% PVC)	108
8.2.1. التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء لـ (DPLF غير المعالجة 100% و DPLF المعالجة بـ NaOH 100 % والقهوة 100%)	110
9.2.1. طيف FTIR لـ (PVC 100%) و (PVC 95% قهوة) و (PVC 5% DPLF معالجة بالسيلان) و (95 PVC 5% DPLF معالجة بالسيلان) و (NaOH 5% PVC 5% DPLF معالجة بـ NaOH)	112
3.1. امتصاص الماء المقطر	114
1.3.1. تأثير نسبة الألياف على الامتصاص	114
1.1.3.1. تأثير نسبة ألياف أوراق نخيل التمر (DPLF) على الامتصاص	115
2.1.3.1. تأثير نسبة القهوة على الامتصاص	116
2.3.1. تأثير معالجة الألياف	118
3.3.1. تأثير طبيعة الألياف (DPLF/PVC ، PVC/قهوة)	122
4.1. نتائج الدراسة الميكانيكية	123
1.4.1. تأثير نسبة الإضافات على الخواص الميكانيكية	123
1.1.4.1. تأثير نسبة ألياف أوراق نخيل التمر (DPLF)	123
2.1.4.1. تأثير نسبة القهوة	127
3.1.4.1. تأثير نسبة ألياف نوى التمر	129
نوى التمر كمادة معززة طبيعية تتطلب تحسينات إضافية (مثل المعالجة الكيميائية أو التوزيع المتجانس) لتحقيق أداء ميكانيكي أفضل	132
2.4.1. تأثير المعالجة الكيميائية على الخصائص الميكانيكية	132
5.1. تفسير نتائج الاستقرار الحراري	135
1.5.1. تأثير نسبة الألياف على الخصائص الميكانيكية	135
2.5.1. تأثير المعالجة الكيميائية على الاستقرار الحراري	135
6.1. الدراسة المورفولوجية بواسطة المجهر الإلكتروني الماسح (MEB)	136
7.1. الدراسة الميكانيكية الديناميكية (DMA)	139
2. دراسة المركبات الثنائية (PVC-PE)-DPLF	144
1.2. نتائج ومناقشات تحليل حيود الأشعة السينية (DRX)	144
2.2. التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء FTIR	145
3.2. امتصاص الماء المقطر	147
4.2. امتصاص الماء المالح	151

154	5.2. تفسير النتائج الميكانيكية.....
158	3. دراسة المركب الثلاثي PVC-LDPE-NBR.....
158	1.3. الخصائص الميكانيكية للمركبات TDPF/PVC/LDPE/NBR.....
162	2.3. مورفولوجيا المركبات TDPF/PVC/LDPE/NBR.....
165	3.3. التحليل الحراري لمركبات TDPF/PVC/LDPE/NBR.....
168	الخاتمة.....
170	قائمة المصادر و المراجع.....
179	ملحق.....

قائمة الأشكال

الصفحة	الشكل
24	الشكل 1.I: تمثيل سلسلة بوليمر أحادي البعد
26	الشكل 2.I: تمثيل سلسلة بوليمر ثنائي الأبعاد (كربون الجرافيت)
26	الشكل 3.I: تمثيل سلسلة بوليمر ثلاثي الأبعاد (بوليمر مشبك بجسر ثنائي الكبريت يربط بين سلسلتين)
	الشكل 4.I: البوليمرات الخطية (a) بوليمر متجانس؛ (b) بوليمر مشترك إحصائي؛ (c) بوليمر مشترك متناوب؛ (d) بوليمر مشترك متسلسل
27	
30	الشكل 5.I: بوليمرات طبيعية
37	الشكل 1.II: مادة مركبة
39	الشكل 2.II: الأنواع المختلفة للمصفوفات
42	الشكل 3.II: مخطط تنظيمي لأنواع المركبات المدعمة المختلفة
43	الشكل 4.II: الصيغة العامة لبولي كلوريد الفينيل (PVC)
48	الشكل 5.II: البولي إيثيلين
49	الشكل 6.II: بنية محفز من نوع زيغلر-ناتا
52	الشكل 7.II: الألياف النباتية
53	الشكل 8.II: جزيء السليلوز
54	الشكل 9.II: بنية نوع من الزيولوجلوكان
54	الشكل 10.II: تمثيل تخطيطي لجزيء اللينين
55	الشكل 11.II: مخطط يوضح بنية الألياف النباتية
56	الشكل 12.II: رسم تخطيطي لسعة نخيل التمر
66	الشكل 1.III: مراحل تحضير مسحوق الياف ورق نخيل التمر
68	الشكل 2.III: الألياف المعالجة بهيدروكسيد الصوديوم (NaOH)
69	الشكل 3.III: الألياف المعالجة بالسيلان
70	الشكل 4.III: مسحوق نوى التمر المحضر
74	الشكل 5.III: آلة التقويم Schwabenthan Polymix 200
75	الشكل 6.III: تحضير أغشية المواد المركبة
76	الشكل 7.III: آلة التشكيل الهيدروليكية Schwabenthan Polystat 300 S
76	الشكل 8.III: الصفائح المحضرة
79	الشكل 9.III: مبدأ ظاهرة امتصاص وإصدار الفوتونات في مجال الأشعة تحت الحمراء
81	الشكل 10.III: مراحل تحضير العينة وخلطها بـ KBr
81	الشكل 11.III: جهاز التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء
	الشكل 12.III: عملية وزن العينات (m) بعد الغمر في الماء بميزان تحليلي
82	من نوع KERN ABT 320-4M بدقة 0.1mg

84	الشكل : 13.III آلة اختبار الشد من نوع Zwick/Roell
85	الشكل: 14.III تقطيع العينات الاختبارية
86	الشكل: 15.III عينة الاختبار موضوعة داخل آلة الشد
179	الشكل: 16.III وثيقة (PDF) المتحصل عليها من اختبار الشد
89	الشكل : 17.III اختبار صلادة شور.(Shore)
90	الشكل: 18.III اختبار الاستقرار الحراري.
91	الشكل: 19.III مجهر إلكتروني ماسح (MEB/EDX) من نوع TESCAN VEGA3.
92	الشكل: 20.III مبدأ عمل المجهر الإلكتروني الماسح
93	الشكل: 21.III جهاز الطلاء المعدني من نوع Cressington Sputter Coater 108 auto.
93	الشكل : 22.III جهاز التحليل الميكانيكي الديناميكي (DMA) من نوع DMA TA Q800
94	الشكل: 32.III العينات المحضرة للتحليل DMA
94	الشكل: 24.III تثبيت العينة داخل جهاز الاختبار
97	الشكل : 1.IV حيود الأشعة السينية (DRX) للسيليلوز
98	الشكل: 2.IV طيف الأشعة تحت الحمراء (FTIR) لعينة من كلوريد البولي فينيل (PVC 100%)
100	الشكل : 3.IV طيف FTIR لـ DPLF
102	الشكل : 4.IV طيف FTIR لألياف اوراق نخيل التمر (DPLF) المعالجة بهيدروكسيد الصوديوم (NaOH)
103	الشكل : 5.IV طيف الأشعة تحت الحمراء لألياف اوراق نخيل التمر (DPLF) المعالجة بالسيلان
104	الشكل : 6.IV طيف الأشعة تحت الحمراء لنوى التمر
106	الشكل : 7.IV طيف FTIR لتفل القهوة
108	الشكل : 8.IV طيف FTIR للمركب 5% PVC/DPLF
	الشكل : 9.IV طيف FTIR للمركب (DPLF غير المعالجة 100 % ، DPLF المعالجة بـ NaOH 100 %
110	، والقهوة 100 %)
	الشكل : 10.IV طيف FTIR لـ (PVC 100%) و (95% PVC 5%) و (95 % PVC 5% DPLF)
112	معالجة بالسيلان) و (95 % PVC 5% DPLF معالجة بـ NaOH)
	الشكل : 11.IV امتصاص الماء المقطر بمرور الزمن لمختلف النسب من PVC (100% PVC / DPLF ،
115	2.5% DPLF ، 5% DPLF ، 10% DPLF ، 15% DPLF
	الشكل : 12.IV امتصاص الماء المقطر بدلالة الزمن لـ PVC 100% ، PVC مع 2.5% قهوة ، PVC مع 5%
117	قهوة ، PVC مع 10% قهوة ، PVC مع 15% قهوة.
	الشكل : 13.IV امتصاص الماء المقطر بدلالة الزمن لـ PVC/DPLF غير المعالجة و PVC/DPLF
119	المعالجة بـ NaOH
	الشكل : 14.IV امتصاص الماء المقطر بمرور الوقت لـ PVC/DPLF غير المعالجة و PVC/DPLF
122	المعالجة بالسيلان.
	الشكل: 15.IV DPLF/PVC و قهوة/PVC

124	الشكل : 16.IV تطوّر مقاومة الكسر لتركيبات PVC/DPLF
125	الشكل : 17.IV تطوّر الإستطالة عند الكسر لتركيبات PVC/DPLF
126	الشكل : 18.IV تطوّر الصلادة حسب مقياس شور (Shore) لتركيبات PVC/DPLF
127	الشكل : 19.IV تطوّر مقاومة الشد عند الإنكسار لتركيبات PVC/قهوة
128	الشكل : 20.IV تغيير الإستطالة عند الكسر لتركيبات PVC/قهوة
129	الشكل : 21.IV تغيير صلادة شور لتركيبات PVC/قهوة
130	الشكل : 22.IV تغيير مقاومة الكسر لتركيبات نوى التمر/ PVC .
130	الشكل : 23.IV تغيير الإستطالة عند الكسر لتركيبات نوى التمر/ PVC
131	الشكل : 24.IV تغيير صلادة Shore لتركيبات نوى التمر/ PVC
133	الشكل : 25.IV المدرج البياني لمقاومة الكسر للمركبات PVC/DPLF المعالجة بـ NaOH
133	الشكل : 26.IV المدرج البياني لمقاومة الكسر للمركبات PVC/DPLF المعالجة بالسيلان.
134	الشكل : 27.IV المدرج البياني للإستطالة عند الكسر للمركبات PVC/DPLF المعالجة بـ NaOH
133	الشكل : 28.IV المدرج البياني للإستطالة عند الكسر للمركبات PVC/DPLF المعالجة بالسيلان.
134	الشكل : 29.IV تغيير الإستقرار الحراري لتركيبات نوى التمر/ PVC
136	الشكل: 30.IV صور ميكروغرافية بواسطة المجهر الإلكتروني الماسح (MEB) للمركب PVC/DPLF5% غير معالج
137	الشكل: 31.IV صور ميكروغرافية بواسطة المجهر الإلكتروني الماسح (MEB) للمركب PVC/DPLF5% معالجة بـ NaOH
137	الشكل: 32.IV صور ميكروغرافية بواسطة المجهر الإلكتروني الماسح (MEB) للمركب PVC/DPLF5% معالجة بالسيلان
138	الشكل: 33.IV صور ميكروغرافية بواسطة المجهر الإلكتروني الماسح (MEB) للمركب قهوة بنسبة 5 % / PVC
139	الشكل : 34.IV صور ميكروغرافية بواسطة المجهر الإلكتروني الماسح (MEB) للمركبين S121 (نوى التمر 15% / PVC) و S122 (نوى التمر 25% / PVC)
140	الشكل : 35.IV تغيير معامل الحفظ (MPa) ومعامل الفقد (MPa) حسب درجة الحرارة (°C) T لمركب PVC/DPLF بنسبة 10. %
140	الشكل : 36.IV تغيير معامل الحفظ (MPa) ومعامل الفقد (MPa) حسب درجة الحرارة (°C) T لمركب PVC بنسبة 100. %
142	الشكل : 37.IV تغيير معامل الحفظ (MPa) ومعامل الفقد (MPa) حسب درجة الحرارة (°C) T
143	الشكل : 38.IV تغيير (Tan δ) حسب درجة الحرارة (°C) T
144	الشكل : 39.IV تغيير (Tan δ) حسب درجة الحرارة (°C) T
	الشكل : 40.IV مخطط حيود أحادي البعد لعينة من البولي إيثيلين مع تحليل إلى المكونات غير المتبلورة والمتبلورة

- 144 الشكل: 41.IV حيود الأشعة السينية لمركب. PVC 20% PE 80%
- 145 الشكل: 42.IV طيف FTIR لمزيج PVC/PE 20/80
- 146 الشكل: 43.IV طيف FTIR لمركبات. PVC20%/PE80% /DPLF30%
- 147 الشكل: 44.IV امتصاص الماء المقطر بدلالة الزمن للمركبات 80PVC:20PE ، 20PVC:80PE و. DPLF10%
- 148 الشكل: 45.IV تغيير نسبة امتصاص الماء المقطر في المركبات 80PVC:20PE ، 20PVC:80PE و 50PVC/50PE DPLF 20% بدلالة الزمن.
- 149 الشكل: 46.IV تغيير نسبة امتصاص الماء المقطر في المركبات 80PVC:20PE ، 20PVC:80PE و 50PVC:50PE DPLF30% بدلالة الزمن.
- 150 الشكل: 47.IV تغيير امتصاص الماء المقطر في المركبات 20 PVC:80PE مع 10% ، 20% ، و DPLF30% بدلالة الزمن.
- 151 الشكل: 48.IV تغيير امتصاص الماء المقطر في المركبات 50 PVC:50PE مع 10% ، 20% ، و DPLF30% بدلالة الزمن.
- 152 الشكل: 49.IV تغيير امتصاص الماء المالح في المركبات 80PVC:20PE ، و 20PVC:80PE و DPLF10% بدلالة الزمن.
- 153 الشكل: 50.IV تغيير امتصاص الماء المالح في المركبات 80PVC:20PE ، و 20PVC:80PE ، و 80PVC:20PE بدلالة الزمن.
- 154 الشكل: 51.IV تغيير امتصاص الماء المالح في المركبات 80PVC:20PE مع DPLF0% ، DPLF10% ، و DPLF20% ، و DPLF30% بدلالة الزمن.
- 154 الشكل: 52.IV الإستطالة عند الكسر بدلالة نسبة البولي كلوريد الفينيل (PVC)
- 155 الشكل: 53.IV تغيير الإستطالة عند الكسر بتغير نسبة الألياف.
- 155 الشكل: 54.IV تغيير مقاومة الكسر حسب نسبة البولي كلوريد الفينيل (PVC)
- 156 الشكل: 55.IV مقاومة الكسر حسب نسبة الألياف.
- 157 الشكل: 56.IV صلادة شور حسب نسبة البولي كلوريد الفينيل (PVC)
- 157 الشكل: 57.IV صلادة شور حسب نسبة البولي كلوريد الفينيل (PVC).
- 158 الشكل: 58.IV صلادة شور حسب نسبة الألياف.
- 159 الشكل: 59.IV خصائص الشد لمركبات (C0 و C1 و C2 و C3 و C4) TDPF/PVC/LDPE/NBR
- 160 الشكل: 60.IV خصائص الانحناء لمركبات (C0 و C1 و C2 و C3 و C4) DPF/PVC/LDPE/NBR
- 161 الشكل: 61.IV الإستطالة عند الكسر لمركبات (C0 و C1 و C2 و C3 و C4) DPF/PVC/LDPE/NBR
- 162 الشكل: 62.IV صور المجهر الإلكتروني الماسح (MEB) لـ (a) مزيج (C0) PVC/LDPE و (b) مزيج PVC/LDPE/NBR (C1).
- 163 الشكل: 63.IV صور المجهر الإلكتروني الماسح (MEB) لمركبات (C2 و C4)

164	TDPF/PVC/LDPE/NBR
	الشكل: 64.IV منحنيات التحليل الحراري الوزني (ATG) لمركبات (C0, C1, C2, C3, C4).
165	TDPF/PVC/LDPE/NBR
	الشكل: 65.IV منحنيات التحليل الحراري الوزني التفاضلي (DTG) لمركبات (C0, C1, C2, C3, C4).
165	TDPF/PVC/LDPE/NBR

قائمة الجداول

33	الجدول: 1.I مقارنة بين البوليمرات الحرارية اللدنة والصلبة
45	الجدول: 1.II خصائص بولي كلوريد الفينيل (PVC)
52	الجدول : 2.II التركيب الكيميائي لبعض الألياف النباتية
57	الجدول : 3.II التركيب الكيميائي لألياف اوراق نخيل التمر
57	الجدول : 4.II التركيب العنصري لمسحوق القهوة
58	الجدول : 5.II التركيب الكيميائي لنوى التمر
72	الجدول : 1.III التراكيب المختلفة المعتمدة لتحضير العينات
99	الجدول : 1.IV الترددات المميزة لبولي كلوريد الفينيل (PVC100%)
100	الجدول : 2.IV الترددات المميزة لـ DPLF
102	الجدول : 3.IV الترددات المميزة لألياف اوراق نخيل التمر (DPLF) المعالجة بهيدروكسيد الصوديوم (NaOH)
103	الجدول : 4.IV الترددات المميزة لـ DPLF المعالجة بالسيلان
105	الجدول : 5.IV الترددات المميزة لنوى التمر
106	الجدول : 6.IV الترددات المميزة لتفل القهوة
108	الجدول : 7.IV الترددات المميزة للمركب 5% PVC/DPLF
110	الجدول : 8.IV الترددات المميزة للمركب (100% ، DPLF غير المعالجة و 100DPLF % المعالجة بـ NaOH ، والقهوة 100 %)
112	الجدول : 9.IV الترددات المميزة للمركبات (PVC 100%) و (95% PVC 5% DPLF معالجة بـ NaOH) و (95% PVC 5% DPLF معالجة بالسيلان)
124	الجدول : 10.IV الخواص الميكانيكية لتراكيب PVC/DPLF
127	الجدول : 11.IV الخصائص الميكانيكية لمركبات قهوة/PVC
129	الجدول: 12.IV الخصائص الميكانيكية لتراكيبات نوى التمر/PVC
133	الجدول: 13.IV الخصائص الميكانيكية لتراكيبات PVC/DPLF المعالجة بـ NaOH و السيلان.
135	الجدول : 14.IV الاستقرار الحراري لتراكيبات نوى التمر./PVC
136	الجدول : 15.IV تأثير المعالجة الكيميائية على الاستقرار الحراري.
139	الجدول : 16.IV قيم معامل الحفظ (E') ومعامل الفقد (E'') للمركبين S101 و S105 عند درجات حرارة مختلفة لـ PVC/DPLF T(°C)
141	الجدول : 17.IV قيم معامل الحفظ (E') ومعامل الفقد (E'') للمترابك M عند درجة حرارة (T °C) PVC/DPLF/NaOH
142	الجدول : 18.IV القيم القصوى لظل دلتا للمركبات (tan delta)
	الجدول : 19.IV تعيين نطاقات الامتصاص بالأشعة تحت الحمراء للمزيجين 20 PE80/PVC او

145	PE20/PVC80
146	الجدول: 20.IV تعيين نطاقات الامتصاص بالأشعة تحت الحمراء للمركب PVC/PE/ DPLF30%
	الجدول: 21.IV الخصائص الميكانيكية لمركبات (C0 و C1 و C2 و C3 و C4)
162	DPF/PVC/LDPE/NBR
166	الجدول: 22.IV درجات تحلل مركبات TDPF/PVC/LDPE/NBR

المصطلحات

العربية	الإنجليزية	الفرنسية
3-ميثوكسي سيلان	3-(Trimethoxysilyl) propyl methacrylate	3-(triméthoxysilyl) propyl méthacrylate (Silane)
أتاكتيكي (غير منتظم)	Atactic	Atactique
اختبار امتصاص الماء	Water Absorption Test	Test d'absorption d'eau
اختبار صلادة شور	Shore Hardness Test	Test de dureté Shore
اختبار الشد	Tensile Test	Test de traction
الألياف السليولوزية الدقيقة (CMF)	Cellulose Micro-Fibrils (CMF)	Microfibrilles de cellulose (CMF)
الإضافات / المواد المضافة	Additives	Les additifs
الإستومر	Elastomer	Élastomère
التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء (FTIR)	Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)	Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier(FTIR)
التحليل الميكانيكي الديناميكي (DMA)	Dynamic Mechanical Analysis (DMA)	Analyse mécanique dynamique (DMA)
المجهر الإلكتروني الماسح (MEB)	Scanning Electron Microscopy (SEM)	Microscopie électronique à balayage (MEB)
المسح الحراري التفاضلي (DSC)	Differential Scanning Calorimetry (DSC)	Analyse calorimétrique différentielle à balayage (DSC)
الياف اوراق نخيل التمر (DPLF)	Date palm leaf fiber (DPLF)	Fibres de Feuilles de palmier dattier
الياف نخيل التمر (DPFs)	Date Palm Fibers (DPFs)	Fibres de palmier dattier (FPDs)
الياف نخيل التمر المعالجة قلويا (TDPF)	alkali treated date palm fiber (TDPF)	fibres de palmier dattier traitées à l'alcali (TDPF)
الحشوات / المواد المألنة	Les charges	Fillers

العربية	الإنجليزية	الفرنسية
بلورات السليلوز الدقيقة (CMC)	Cellulose Micro-Crystals (CMC)	Micro-cristaux de cellulose (CMC)
بولي إيثيلين عالي الكثافة (HDPE)	High Density Polyethylene (HDPE)	Polyéthylène haute densité (HDPE)
بولي إيثيلين منخفض الكثافة (LDPE)	Low Density Polyethylene (LDPE)	Polyéthylène basse densité (LDPE)
بولي كلوريد الفينيل (PVC)	Polyvinyl Chloride (PVC)	Polychlorure de vinyle (PVC)
بلورات السليلوز الدقيقة (CMC)	Cellulose Micro-Crystals (CMC)	Micro-cristaux de cellulose (CMC)
بيروكسيد الديكوميل (DCP)	Dicumyl peroxide (DCP)	Peroxyde de dicumyle (DCP)
تقوية / تدعيم	Reinforcement	Renfort
جهاز FTIR نوع Agilent Cary 630	FTIR spectrometer (Agilent Cary 630)	Spectromètre FTIR Agilent Cary 630
جهاز DMA نوع TA, Q800	DMA instrument (TA Instruments, Q800)	Appareil d'analyse mécanique dynamique TA Instruments Q800
جهاز تحليل حراري SETARAM LABSYS	Thermo-analyzer (SETARAM LABSYS evo)	Thermo-Analyseur (SETARAM LABSYS evo)
حمض الأسيتيك	Acetic acid	Acide acétique
راتنج الإيبوكسي	Epoxy Resin	Résine époxy
راتنج بوليستر غير مشبع	Unsaturated Polyester Resin	Résine polyester insaturée
قولبة بالحقن	Injection Molding	Moulage par injection
كربونات الكالسيوم	Calcium Carbonate (CaCO ₃)	Carbonate de calcium (CaCO ₃)
لدائن حرارية	Thermoplastiques	Thermoplastics
لدائن صلبة بالحرارة	Thermodurcissables	Thermosets / Thermosetting plastics
مجهر إلكتروني نوع TESCAN VEGA3	SEM microscope (TESCAN VEGA3)	Microscope électronique à balayage TESCAN VEGA3
مركب/ متراكب	Composite	Composite

العربية	الإنجليزية	الفرنسية
ملدنات	Plasticizers	Plastifiants
مزلقات	Lubricants	Lubrifiants
مقاومة الانثناء	Flexural strength	Résistance en flexion
مقاومة الشد	Tensile strength	Résistance à la traction
مقاومة الزحف	Creep Resistance	Résistance au fluage
معامل الانثناء	Flexural modulus	Module de flexion
معامل الشد أو معامل يونغ	Tensile modulus	Module de traction ou Module d'élasticité (de Young)
مصفوفة/ مادة الأساس	Matrix	Matrice
معالجة بالسيلان	Silane Treatment	Traitement au silane
معالجة قلوية	Alkali Treatment	Traitement alcalin
مقياس صلادة Shore (Zwick/Roell)	Shore durometer (Zwick/Roell)	Duromètre Shore Zwick/Roell
مكبس حراري / قولبة بالضغط	Hot Press / Compression Molding	Presse chaude / Moulage par compression
ميثانول	Methanol	Méthanol
ميثيل إيثيل كيتون بيروكسيد	Methyl ethyl ketone peroxide (MEKP)	Peroxyde de méthyléthylcétone
هيدروكسيد الصوديوم	Sodium hydroxide (NaOH)	Hydroxyde de sodium

الإختصارات

الاختصار	العربية	الإنجليزية	الفرنسية
ASTM	الجمعية الأمريكية للاختبارات والمواد	American Society for Testing and Materials	Société Américaine pour les Essais et les Matériaux
DTG	التحلل الحراري الوزني التفاضلي (DTG)	Differential Thermogravimetry (DTG)	Thermogravimétrie Différentielle (DTG)
DRX	حيود الأشعة السينية	X-Ray Diffraction (XRD)	Diffraction des Rayons X
ATG/TGA	التحليل الحراري الوزني	Thermogravimetric Analysis (TGA)	Analyse Thermogravimétrique (ATG)
DCP	بيروكسيد الديكوميل (DCP)	Dicumyl peroxide (DCP)	Peroxyde de dicumyle (DCP)
DMA	التحليل الميكانيكي الديناميكي	Dynamic Mechanical Analysis	Analyse Mécanique Dynamique
DPLF	الياف اوراق نخيل التمر	Date palm leaf fiber (DPLF)	Fibres de Feuilles de palmier dattier
Endo	تفاعل ماص للحرارة	Endothermic	Endothermique
E'	معامل الحفظ	Storage Modulus	Module de conservation
E''	معامل الفقد/ الضياع	Loss Modulus	Module de perte
Exo	تفاعل باعث للحرارة	Exothermic	Exothermique
FTIR	التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء	Infrared Spectroscopy with Fourier Transform	Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier
SEM/MEB	المجهر الإلكتروني الماسح	Scanning Electron Microscope	Microscopie Électronique à Balayage
MEKP	ميثيل إيثيل كيتون بيروكسيد	Methyl Ethyl Ketone Peroxide	Peroxyde de Méthyléthylcétone
Mrés	الكتلة المتبقية	Residual Mass	Masse résiduelle
NBR	مطاط النتريل بوتادين	Nitrile Butadiene Rubber (NBR)	Caoutchouc nitrile-butadiène

الاختصار	العربية	الإنجليزية	الفرنسية
ND	نوى التمر	Date kernels	Noyaux de dates
PDPF	اللياف عنق سعف النخيل	Petiole Date Palm Fiber	Fibre pétiole du palmier dattier
PE	بولي إيثيلين	Polyethylene	Polyéthylène
PVC	بولي كلوريد الفينيل	Polyvinyl Chloride (PVC)	Polychlorure de vinyle (PVC)
Silane	سيلان	3-(Trimethoxysilyl) propyl methacrylate	3-(Triméthoxysilyl) propyl méthacrylate
Tan δ	ظل الزاوية دلتا	Damping factor (Tan Delta)	Tangente delta
TDPF	اللياف نخيل التمر المعالج قلويا (TDPF)	alkali treated date palm fiber (TDPF)	fibres de palmier dattier traitées à l'alcali (TDPF)
Tf	درجة النهاية للتحلل	Final decomposition temperature	Température finale de décomposition
Tmax	درجة الحرارة القصوى	Maximum Temperature	Température maximale

ملخص

تهدف هذه الأطروحة إلى دراسة الخصائص الفيزيائية والميكانيكية والديناميكية لمواد مركبة أساسها البولييمر (PVC)، مع تدعيمه بألياف طبيعية مستخرجة من نخيل التمر (DPLF)، بالإضافة إلى مواد مضافة أخرى مثل مسحوق نوى التمر، القهوة، والبوليمرات LDPE و NBR. تم تحضير بعض المركبات عن طريق التقويم والقولبة والأخرى بتقنية البثق في الحالة المنصهرة، مع إجراء عدة معالجات كيميائية على الألياف لتحسين التوافق مع المصفوفة البولييمرية.

أظهرت نتائج التحاليل البنيوية (DRX و FTIR) وجود روابط كيميائية مميزة تدل على نجاح إدماج الألياف. كما أظهرت دراسة الامتصاص المائي أن نسبة الألياف تؤثر بشكل كبير على قدرة المركب على امتصاص الماء. أما التحاليل الميكانيكية فقد بينت أن أفضل مقاومة للشد بلغت 32MPa عند استخدام 10% من الألياف المعالجة، في حين سجلت صلادة Shore A قيمة قصوى بلغت 94.53. تُبرز هذه النتائج أن دمج الألياف الطبيعية والبوليمرات التوافقية يُحسن من أداء المركب، مما يجعله مناسباً لتطبيقات صناعية تتطلب مواد عالية الأداء ومستدامة.

الكلمات المفتاحية: PVC, الياف طبيعية, FTIR, الشد, صلادة شور, دراسة ديناميكية.

Résumé

Cette thèse porte sur l'étude des propriétés physico-mécaniques et dynamiques de composites à base de polychlorure de vinyle (PVC), renforcés par des fibres naturelles issues du palmier dattier (DPLF), ainsi que par d'autres additifs comme la poudre de noyaux de dattes, le marc de café, et les polymères LDPE et NBR. Certains composites ont été préparés par calandrage et moulage, tandis que d'autres ont été élaborés par extrusion à l'état fondu, avec des traitements chimiques appliqués aux fibres pour améliorer leur compatibilité avec la matrice polymère.

Les analyses structurales (DRX et FTIR) ont confirmé l'intégration des fibres dans les matrices. L'étude d'absorption d'eau a montré que le taux de fibres influait fortement sur l'hydrophilie du matériau. Les tests mécaniques ont révélé une résistance maximale à la traction de 32 MPa pour 10 % de DPLF traitée, et une dureté Shore A atteignant 94.53. Par ailleurs. Ces résultats démontrent que l'utilisation de fibres naturelles et de polymères compatibilisants améliore significativement les performances des composites, ouvrant la voie à des applications industrielles exigeantes et durables.

Mots clé : PVC , Fibres naturelles, FTIR, Traction, Dureté Shore, Étude dynamique

Abstract

This thesis focuses on the study of the physico-mechanical and dynamic properties of composites based on polyvinyl chloride (PVC), reinforced with natural fibers from date palm leaves (DPLF), and other additives such as date seed powder, coffee grounds, and the polymers LDPE and NBR. The composites were prepared using calendering and molding techniques, while others were produced through melt extrusion, with chemical treatments applied to the fibers to improve their compatibility with the polymer matrix.

Structural analyses (XRD and FTIR) confirmed successful fiber incorporation. Water absorption studies indicated that fiber content significantly affects hydrophilicity. Mechanical tests showed a maximum tensile strength of 32 MPa with 10% treated DPLF, and a Shore A hardness of up to 94.53. These findings highlight that the integration of natural fibers and compatibilizing polymers can enhance composite performance, making them suitable for demanding and sustainable industrial applications.

Keywords: PVC, Natural fibers, FTIR, Tensile strength, Shore hardness, Dynamic study

مقدمة عامة

تُعد المواد المركبة من بين أهم المواد الهندسية الحديثة التي شهدت تطوراً ملحوظاً خلال العقود الأخيرة، وذلك بفضل خصائصها الفيزيائية والميكانيكية المتفوقة مقارنة بالمواد التقليدية. وقد مكّن هذا التطور من توسيع استعمال هذه المواد في مجالات عديدة كصناعة الطيران والفضاء، والسيارات، والإنشاءات، وحتى في التطبيقات البيئية والطبية. ومن بين البوليميرات الأكثر استعمالاً في مجال تحضير المواد المركبة نجد البولي كلوريد الفينيل (PVC) الذي يتميز بخصائص متعددة كالمقاومة الكيميائية، والصلابة، وسهولة التصنيع والتشكيل، بالإضافة إلى كونه مادة منخفضة التكلفة وواسعة الانتشار في الصناعات المختلفة [1-2].

يتميز البولي كلوريد الفينيل (PVC) بمقاومة عالية للعوامل الكيميائية، خاصة في حالته غير المدنة، كما أنه يمتلك قدرة عزل كهربائية جيدة، وخصائص حرارية مقبولة، مما يجعله قابلاً للإستعمال في بيئات وظروف مختلفة.

غير أن عملية تلدين البولي كلوريد الفينيل (PVC) باستخدام مواد مدنة مثل (DOP) تؤثر بشكل مباشر على خواصه، حيث تمنحه مرونة أكبر وتسهّل معالجته، لكنها في المقابل تجعله أكثر حساسية تجاه بعض المذيبات العضوية مثل المركبات العطرية، الكيتونية والكلورية. وبالإضافة إلى ذلك، فإن قابلية البولي كلوريد الفينيل (PVC) للتحلل عند درجات الحرارة المرتفعة وتحلله بإطلاق غاز كلور الهيدروجين HCl السام، تفرض تحديات إضافية في مجالات الاستخدام الصناعي [3-4].

إن الإعتماد على البوليميرات فقط لا يكفي لتحقيق الأداء المطلوب في العديد من التطبيقات، مما استدعى تطوير مركبات مدمجة تجمع بين البوليميرات والمواد المألثة أو الألياف الطبيعية والصناعية لتحسين الخصائص الميكانيكية والحرارية والوظيفية لهذه المواد. ومن هذا المنطلق، أصبح توجه العديد من الباحثين نحو استعمال الألياف الطبيعية والمواد النباتية المسترجعة من النفايات الزراعية كمُعززات (مدعمات) داخل المصفوفات البوليمرية خياراً واعداً في إطار تطوير "المواد المركبة الخضراء" الصديقة للبيئة والمستدامة [5].

لقد أولت العديد من الدراسات السابقة اهتماماً كبيراً لإستعمال ألياف النخيل ومخلفات التمور، نظراً لتوفرها بكثرة في المناطق الصحراوية والواحات، وخصائصها الفيزيائية والميكانيكية التي توّهلها لتعويض الألياف الاصطناعية في بعض التطبيقات. على سبيل المثال، تناولت عدة أبحاث إمكانية إستغلال ألياف جريد النخيل، النوى، وحتى مسحوق التمر كدعامات طبيعية في مركبات البوليمر مثل البولي إستر غير المشبع، والإيبوكسي، والبولي إيثيلين، وذلك لتحسين مقاومتها الميكانيكية وتقليل التكلفة البيئية والإقتصادية. كما تطرقت بعض الدراسات إلى تأثير المعالجة الكيميائية لهذه الألياف مثل المعالجة بالسليانات أو القلويات لتحسين التماسك بين الألياف والمصفوفة البوليمرية، مما يزيد من فعالية هذه المركبات ويعزز أدائها [6-8].

وفي هذا السياق، جاءت هذه الدراسة لتساهم في هذا المجال البحثي، حيث تهدف إلى تحضير ودراسة الخواص الفيزيائية والميكانيكية والديناميكية لمركبات بوليمرية أساسها البولي كلوريد الفينيل (PVC)، مدعمة بمواد طبيعية مسترجعة محلياً مثل ليف جريد النخيل، نوى التمر، ومسحوق القهوة. وقد تم في جزء من هذا العمل أيضاً إدماج البولي إيثيلين منخفض

الكثافة (LDPE) كمادة إضافية مع البولي كلوريد الفينيل (PVC) والياق اوراق نخيل التمر DPLF ، كما تم تحضير تركيبات أخرى باستخدام مطاط الأكريلونتريل NBR مع البولي كلوريد الفينيل (PVC) والياق اوراق نخيل التمر DPLF لدراسة سلوكها الديناميكي والميكانيكي تحت ظروف مختلفة.

تمت جميع التجارب المخبرية المتعلقة بتحضير هذه المركبات ودراستها بمخبر الكيمياء التطبيقية (LCA) بجامعة بسكرة و شركة صناعات الكوابل ببسكرة UNICAB بالولاية ذاتها.

تشمل هذه الدراسة عدداً من التحاليل و التجارب الأساسية التي تسمح بتحديد وفهم سلوك هذه المركبات مثل التحليل بواسطة مطياف الأشعة تحت الحمراء بتحليل فورييه (FTIR) و حيود الأشعة السينية (DRX) ؛ التحاليل المورفولوجية باستعمال المجهر الإلكتروني الماسح (MEB) ، اختبارات الشد، صلادة شور، الاستقرار الحراري والاختبارات الديناميكية الميكانيكية (DMA) .

تهدف هذه الأطروحة من خلال هذه الدراسة المعمقة إلى استكشاف الإمكانيات التقنية لهذه المركبات الجديدة وتقييم أدائها مقارنة بالمواد التقليدية، مع إبراز الجدوى الاقتصادية والبيئية لاستعمال المخلفات الطبيعية المحلية كمعززات. كما تهدف إلى تقديم قاعدة علمية يمكن أن تشكل مرجعية للأبحاث المستقبلية في مجال تطوير المواد المركبة المستدامة، خصوصاً في البيئات الصحراوية التي تزخر بمصادر طبيعية مهمة لكنها غير مستغلة بالشكل الكافي.

ولتسهيل عرض هذا العمل البحثي وتحقيق أهدافه، تم تقسيم هذه الأطروحة إلى أربعة فصول رئيسية كما يلي:

الفصل الأول : مخصص لتقديم لمحة عامة حول البوليمرات، حيث يستعرض تعريفها، تصنيفاتها، أنواعها المختلفة، وخصائصها الفيزيائية والميكانيكية، بالإضافة إلى أهم تطبيقاتها الصناعية.

الفصل الثاني : يُعنى بدراسة المواد المركبة من حيث تركيبها وتصنيفها، كما يتطرق إلى طرق تعديل الألياف الطبيعية لتحسين توافقها مع المصفوفات البوليميرية، ويختتم بعرض لأهم الدراسات السابقة في هذا المجال، مع التركيز على استعمال الألياف الطبيعية في تحضير المواد المركبة.

الفصل الثالث :يتضمن وصفاً مفصلاً للمواد المستعملة في هذا العمل، مع شرح دقيق لمنهجية تحضير المركبات المختلفة. كما يتناول هذا الفصل تقنيات وطرق التشخيص والتحليل المعتمدة لدراسة خصائص هذه المركبات.

الفصل الرابع :مخصص لعرض وتحليل ومناقشة النتائج المتحصل عليها من مختلف التجارب، حيث يتم تقييم أداء المركبات المنتجة ومقارنتها مع المواد التقليدية، مع التركيز على تأثير الإضافات الطبيعية المتمثلة في الألياف الطبيعية المختلفة على الخصائص الميكانيكية والحرارية والديناميكية للمركبات.

وتُختتم هذه الأطروحة بخاتمة عامة تُلخص أهم النتائج المتوصل إليها، وتطرح آفاق البحث المستقبلية التي من شأنها تعميق الدراسة وتوسيع نطاق استعمال هذه المركبات في تطبيقات متنوعة، مما يُسهم في تـثمين الموارد الطبيعية المحلية وتقليل الأثر البيئي للمواد البلاستيكية التقليدية .

الفصل الأول: عموميات حول البوليمرات : طبيعتها وتصنيفها وخصائصها العامة

مقدمة الفصل

تعدّ البوليمرات من المواد الأساسية التي تتميز بخصائص ميكانيكية فريدة تجعلها ضرورية في العديد من التطبيقات اليومية والصناعية. فهي تلعب دورًا محوريًا في مجالات متنوعة، مثل الصناعات البلاستيكية، والهندسة، والطب، والإلكترونيات، وذلك بفضل مرونتها، وخفة وزنها، وقدرتها على التكيف مع متطلبات مختلفة.

في هذا الفصل الأول، سنسلط الضوء على المفاهيم الأساسية المتعلقة بالبوليمرات، بدءًا من تعريفها وخصائصها العامة، وصولًا إلى تصنيفاتها المختلفة وفقًا لبنيتها وتركيبها الكيميائي. كما سنتناول الأنواع المتعددة من البوليمرات، سواء كانت طبيعية أو اصطناعية، مع توضيح أهميتها ودورها في تطوير مواد جديدة ذات خصائص محسنة. وأخيرًا، سنستعرض أبرز تطبيقاتها العملية في مختلف القطاعات، مما سيساعد على فهم أوسع لدورها في الحياة اليومية والصناعة الحديثة.

1. تعريف البوليمرات

البوليمر، أو جزيء كبير (macromolécule)، هو مركب عضوي يتميز ببنية سلسلية كربونية تتشكل من تكرار وحدات أساسية مترابطة عبر روابط تساهمية تُعرف باسم "المونومرات (A)". يعتمد التركيب الكيميائي للبوليمر على طبيعة هذه المونومرات وطريقة ارتباطها، مما يضفي على المادة خصائصها الفريدة من حيث الصلابة، والمرونة، والقدرة على التحمل [10-9].

تُعدّ البوليمرات من أكبر الجزيئات المعروفة في الكيمياء، حيث تتكون من مئات أو حتى آلاف الذرات المترابطة. وهي تتألف عادةً من نوع واحد أو أكثر من الجزيئات الصغيرة التي تتفاعل فيما بينها لتشكل بنى سلسلية خطية أو متفرعة، وأحيانًا هياكل شبكية أكثر تعقيدًا. ويعود استقرار البوليمرات وخصائصها الفيزيائية إلى تأثير نوعين من التفاعلات الكيميائية:

- الروابط التساهمية القوية: وهي الروابط التي تربط الذرات داخل السلسلة البوليمرية، مما يمنحها قوة واستقرارًا بنيويًا.

- التفاعلات بين السلاسل البوليمرية: وهي الروابط الثانوية التي تتشكل بين الجزيئات المختلفة، وتشمل قوى فان دير فالس (Van Der Waals) الضعيفة، وروابط الهيدروجين، والتفاعلات الكهروستاتيكية، والتي تؤثر على الخواص الفيزيائية مثل المرونة والانصهار والتبلور [11].

بفضل هذه الخصائص، تدخل البوليمرات في عدد لا يحصى من التطبيقات الصناعية والطبية والهندسية، حيث يتم استخدامها في تصنيع البلاستيك، والألياف الصناعية، والمطاط، والمواد اللاصقة، وحتى في المجالات المتقدمة مثل الطب الحيوي والإلكترونيات.

2. الفئات المختلفة للبوليميرات

يمكن تصنيف البوليميرات بناءً على عدة معايير، مثل بنيتها، وتكوين سلسلتها البوليمرية، وأصلها.

1.2. التصنيف حسب البنية (الأبعادية)

تصنّف البوليميرات وفقاً لأبعاد بنيتها إلى ثلاث فئات رئيسية:

1.1.2. البوليميرات أحادية البعد (الخطية)

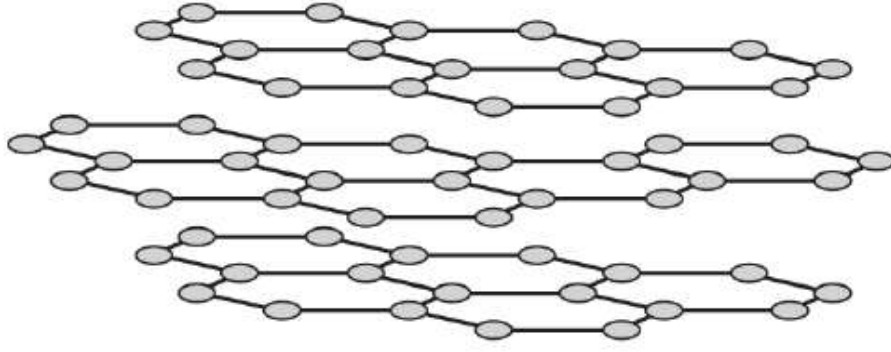
وفقاً لما ذكره Y. Gnanou وM. Fontanille، تتكوّن سلاسل المونومرات في هذا النوع من البوليميرات ضمن اتجاه واحد فقط في الفضاء، وهو الاتجاه الأساسي (الأولي). ويمكن تمثيل الجزيء الكبير الخطي بشكل مبسط على هيئة خط متصل مقسم إلى وحدات متتالية، بحيث تمثل كل وحدة مونومراً فردياً. تتشكل هذه البنية نتيجة عملية بلمرة لمونومرات ثنائية الوظيفة، حيث ترتبط كل وحدة كيميائية بوحدين آخرين فقط، مما يؤدي إلى تكوين سلاسل طويلة ومستقيمة [12]. الشكل الموالي يوضح تمثيلاً تخطيطياً لسلسلة بوليمر أحادي البعد.



الشكل 1.I: تمثيل سلسلة بوليمر أحادي البعد [12]

2.2.2. البوليميرات ثنائية الأبعاد (المتفرعة)

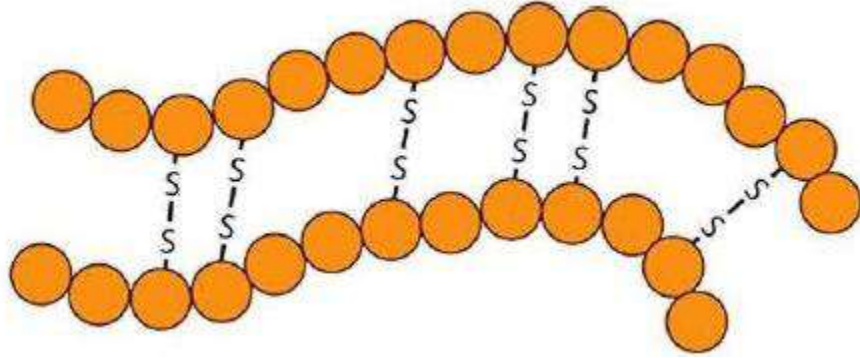
وفقاً لـ Chen وآخرين، يمكن تعريف البوليميرات ثنائية الأبعاد على أنها طبقات أحادية أو صفائح تساهمية تتكون من وحدات مونومرية مترابطة بشكل دوري في بعدين. أما Colson وآخرون، فقد عرّفوا هذا النوع من البوليميرات على أنه شبكة من المونومرات المترابطة بروابط تساهمية، بحيث تمتد هذه الروابط بشكل دوري في اتجاهين متعامدين. توفر هذه البنية للبوليميرات خصائص ميكانيكية متميزة نظراً لقدرتها على تكوين شبكات قوية ومستقرة. الشكل I.2 يوضح تمثيلاً تخطيطياً لسلسلة بوليمر ثنائي الأبعاد [13-14].



الشكل 2.I: تمثيل سلسلة بوليمر ثنائي الأبعاد (كربون الجرافيت) [12]

3.1.2. البوليمرات ثلاثية الأبعاد (المشبكة)

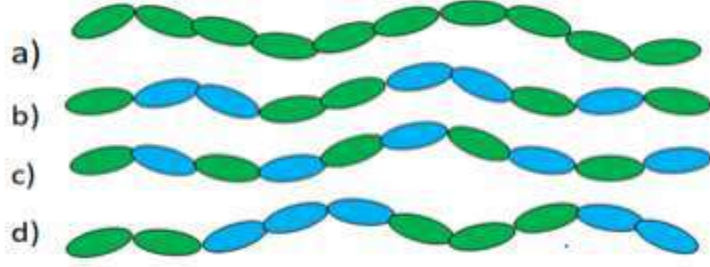
تشير عملية التشابك الكيميائي إلى تكوين روابط تساهمية في اتجاهات متعددة خلال عملية بلورة البوليمرات الخطية، مما يؤدي إلى تشكيل شبكة ثلاثية الأبعاد مترابطة. يوفر هذا التركيب للبوليمر خصائص ميكانيكية محسنة، مثل الصلابة والاستقرار الحراري. يوضح الشكل: 3.I تمثيلاً تخطيطياً لسلسلة بوليمر ثلاثي الأبعاد [15].



الشكل 3.I: تمثيل سلسلة بوليمر ثلاثي الأبعاد (بوليمر مشبك بجسر ثنائي الكبريت يربط بين سلسلتين) [12]

2.2. التصنيف حسب تركيب السلسلة البوليمرية

يعتمد تصنيف البوليمرات على طبيعة الوحدات المتكررة في السلسلة البوليمرية، حيث يمكن تقسيمها إلى البوليمرات المتجانسة (Homopolymères) والبوليمرات المشتركة (Copolymères)، وذلك وفقاً لتركيبها الكيميائي وترتيب المونومرات داخل بنيتها. تؤثر هذه البنية على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية والحرارية للبوليمر، مما يجعله مناسباً لمجالات تطبيقية مختلفة، مثل صناعة البلاستيك، والمواد اللاصقة، والألياف الصناعية.



الشكل: 4.I. البوليمرات الخطية a) بوليمر متجانس؛ b) بوليمر مشترك إحصائي؛ c) بوليمر مشترك متناوب؛ d) بوليمر مشترك متسلسل.

1.2.2. البوليمرات المتجانسة (Homopolymères)

البوليمرات المتجانسة هي تلك التي تتكون بالكامل من نوع واحد من المونومرات المتكررة على طول السلسلة البوليمرية. أي أن بنيتها يمكن تمثيلها بالشكل: A-A-A-A-A , يؤدي هذا التجانس في التركيب إلى خصائص فيزيائية وكيميائية متجانسة، مثل درجة انصهار محددة وصلابة متناسقة [16] .

1.1.2.2. خصائص البوليمرات المتجانسة

- تمتاز بانتظام بنيتها مما يجعلها تمتلك استقرارًا حراريًا ومكانيًا عاليًا.
- غالبًا ما تكون قابلة للتبلور بسهولة، مما يمنحها صلابة وقدرة على مقاومة التآكل.
- خصائصها الميكانيكية تعتمد على نوع الروابط الكيميائية بين المونومرات، والتي يمكن أن تكون تساهمية قوية أو ضعيفة مثل روابط فان دير فالس.

2.1.2.2. أمثلة على البوليمرات المتجانسة

- البولي إيثيلين (Polyéthylène) وهو بوليمر يستخدم على نطاق واسع في صناعة الأكياس البلاستيكية، والأنابيب، وعوازل الأسلاك. يتميز بمرونته ومقاومته الكيميائية العالية .

الصيغة الكيميائية: $-(CH_2-CH_2)_n-$

- البولي ستايرين (Polystyrène) يُستخدم في صناعة العبوات البلاستيكية، والعزل الحراري، والتعبئة والتغليف.
- البولي كلوريد الفينيل (Polychlorure de vinyle) يدخل في صناعة الأنابيب، والنوافذ البلاستيكية، وكابلات العزل الكهربائي.

2.2.2. البوليمرات المشتركة (Copolymères)

تتكون البوليمرات المشتركة من أكثر من نوع واحد من المونومرات، والتي تتحد معًا في نفس السلسلة البوليمرية. يتم تحديد خصائص البوليمر المشترك بناءً على ترتيب هذه المونومرات داخل السلسلة، مما يؤثر على مرونتها، وتبلورها، وقابليتها للذوبان في المذيبات المختلفة.

1.2.2.2. أنواع البوليمرات المشتركة

تُصنّف البوليمرات المشتركة وفقًا لترتيب توزيع المونومرات داخل السلسلة إلى ثلاثة أنواع رئيسية:

أ. البوليمرات المشتركة المتناوبة (Copolymères alternés)

يُطلق على البوليمر المشترك اسم البوليمر المتناوب عندما تتعاقب الوحدات المكونة له بشكل منتظم داخل السلسلة. في هذا النوع، يرتبط كل مونومر من النوع A بمونومر من النوع B وفق النمط: A-B-A-B-A-B [17]

خصائص البوليمرات المشتركة المتناوبة

- تمتاز ببنية منظمة مما يجعلها تمتلك خصائص فيزيائية متوازنة بين كلا النوعين من المونومرات.
- يمكن أن تكتسب مزيجًا من الخصائص الكيميائية لكلا النوعين، مثل مقاومة الحرارة والمرونة العالية.
- غالبًا ما تُستخدم في التطبيقات الهندسية حيث تكون هناك حاجة إلى مواد تجمع بين مقاومة كيميائية جيدة ومرونة ميكانيكية.

أمثلة على البوليمرات المشتركة المتناوبة [18]

- بوليمرات أسيتات الفينيل و أنهيدريد الماليك
- بوليمرات التكاثف بين ثنائيات الأمين والأحماض ثنائية الوظيفة

ب. البوليمرات المشتركة المتتابعة (Copolymères séquencés)

يُطلق على البوليمر اسم البوليمر المتتابع عندما تتجمع المونومرات من نفس النوع في سلاسل طويلة متتالية داخل التركيب البوليمري، بحيث يتم ترتيبها وفق النمط التالي: A-A-A-B-B-B-A-A-A-B-B-B [19]

خصائص البوليمرات المشتركة المتتابة

- تمتاز بقدرتها على تكوين مناطق مختلفة داخل المادة، مما يسمح لها بأداء وظائف متعددة.
- تُستخدم في التطبيقات التي تحتاج إلى مقاومة عالية للتآكل أو بيئات قاسية.
- يمكن التحكم في خصائصها الحرارية والميكانيكية من خلال التحكم في نسبة كل مونومر داخل السلسلة.

أمثلة على البوليمرات المشتركة المتتابة [18]

- البوليمرات ثنائية الكتل مثل ستايرين-بوتاديين، والتي تُستخدم في صناعة الإطارات والمطاط الصناعي.
- البوليمرات ثلاثية التسلسل مثل ستايرين-بوتاديين-ستايرين، التي تُستخدم في صناعة المواد اللاصقة والمطاط الصناعي المرن.

ج. البوليمرات المشتركة العشوائية (Copolymères statistiques)

يُطلق على البوليمر اسم البوليمر العشوائي عندما يتم توزيع المونومرات بشكل غير منتظم داخل السلسلة البوليمرية، بحيث لا يوجد نمط محدد لتكرار المونومرات.

خصائص البوليمرات المشتركة العشوائية

- تمتاز بمرونتها العالية بسبب عدم انتظام البنية، مما يجعلها أكثر مقاومة للكسر.
- تُستخدم في التطبيقات التي تتطلب مواد ذات خواص ميكانيكية متغيرة حسب ظروف التشغيل.
- غالبًا ما تمتلك قابلية عالية للذوبان بسبب التوزيع غير المتجانس للوحدات المكونة لها.

أمثلة على البوليمرات المشتركة العشوائية: [18]

- مطاط ستايرين-بوتاديين: يُستخدم في صناعة إطارات السيارات، حيث يوفر مزيجًا من الصلابة والمتانة.
- مطاط ستايرين-أكريلونيتريل: يُستخدم في صناعة الأجزاء البلاستيكية المقاومة للتأثيرات الكيميائية والفيزيائية.

2.2.2.2. أهمية تصنيف البوليمرات حسب تركيبها

يُعد تصنيف البوليمرات حسب تركيبها الكيميائي ضروريًا لفهم خصائصها وتحديد أفضل استخدام لها في التطبيقات الصناعية. فبينما تُفضل البوليمرات المتجانسة عندما تكون هناك حاجة إلى مواد متجانسة ومستقرة، تُستخدم البوليمرات المشتركة عندما يكون من الضروري دمج خصائص متعددة في مادة واحدة. إن التحكم في توزيع المونومرات داخل البوليمر

يسمح بتعديل خصائصه لتلبية متطلبات محددة، مما يجعله أكثر كفاءة في تطبيقات مثل الطباعة ثلاثية الأبعاد، وصناعة الأغشية الذكية، والتطبيقات الطبية المتقدمة.

3.2. التصنيف حسب المصدر

يمكن تصنيف البوليمرات بناءً على مصدرها إلى ثلاثة أنواع رئيسية: البوليمرات الطبيعية، والبوليمرات الاصطناعية، والبوليمرات المُصنَّعة بالكامل. يعتمد هذا التصنيف على ما إذا كان البوليمر موجودًا في الطبيعة أو تم تعديله كيميائيًا أو تم تصنيعه بالكامل في المختبر باستخدام التفاعلات الكيميائية.

1.3.2. البوليمرات الاصطناعية

البوليمرات الاصطناعية هي بوليمرات يتم الحصول عليها من خلال تعديل البوليمرات الطبيعية كيميائيًا، بهدف تحسين أو تغيير خصائصها الفيزيائية والكيميائية لتناسب تطبيقات محددة. يتم تعديل البوليمرات الطبيعية عن طريق إضافة مجموعات كيميائية أو تغيير التركيب الجزيئي للمادة الأصلية. [12]

أمثلة على البوليمرات الاصطناعية

- إسترات السليلوز مثل النيتروسيليلوز وأسينات السليلوز، وهي مواد لها أهمية صناعية كبيرة، حيث تُستخدم في صناعة الأغشية، والدهانات، ومواد الطلاء.
- المطاط المعالج كيميائيًا، مثل المطاط المبركن (Vulcanized Rubber)، الذي يتم تعديله بالكبريت لتحسين مرونته ومقاومته للتآكل.

2.3.2. البوليمرات الطبيعية

البوليمرات الطبيعية هي تلك التي يتم إنتاجها بشكل طبيعي من قبل الكائنات الحية، سواء من مصادر نباتية أو حيوانية [20]. تُعتبر هذه البوليمرات ضرورية في الأنظمة البيولوجية، حيث تلعب دورًا أساسيًا في العمليات الحيوية مثل تخزين الطاقة، ودعم الهياكل الخلوية، ونقل المعلومات الوراثية [12].



الشكل: 5.I بوليمرات طبيعية

أمثلة على البوليمرات الطبيعية

- البروتينات مثل الصوف والحرير، وهي بوليمرات طبيعية تتكون من سلاسل من الأحماض الأمينية، وتُستخدم في صناعة الأقمشة والمواد الطبية الحيوية.
- متعدد السكاريد (Polysaccharides) مثل السليلوز والنشا، وهما مركبان نباتيان يلعبان دورًا رئيسيًا في تخزين الطاقة وتكوين الهياكل الخلوية للنباتات.
- المطاط الطبيعي، وهو بوليمر مشتق من عصارة أشجار المطاط، ويُستخدم في صناعة الإطارات والمنتجات المطاطية الأخرى.

3.3.2. البوليمرات المُصنَّعة بالكامل

البوليمرات المُصنَّعة بالكامل هي تلك التي يتم تحضيرها عن طريق تفاعلات كيميائية في المختبر أو على نطاق صناعي، دون الاعتماد على المواد الخام الطبيعية مباشرة. يتم تصنيع هذه البوليمرات عن طريق بلورة المونومرات المختلفة، مما يسمح بتصميم مواد بخصائص مخصصة لتلبية احتياجات التطبيقات الصناعية المختلفة [12].

أمثلة على البوليمرات المُصنَّعة بالكامل

- البولي إيثيلين (Polyéthylène)، وهو بوليمر يستخدم على نطاق واسع في صناعة البلاستيك والتعبئة والتغليف.
- بولي كلوريد الفينيل (PVC)، ويستخدم في الأنابيب والعزل الكهربائي.
- البولي يوريثان (Polyuréthane)، والذي يُستخدم في صناعة الرغوات المرنة والعوازل الحرارية.

أهمية تصنيف البوليمرات حسب مصدرها

يساعد تصنيف البوليمرات حسب مصدرها في اختيار المواد المناسبة لكل تطبيق بناءً على توفرها، وتكلفتها، وخصائصها البيئية. فالاعتماد على البوليمرات الطبيعية يُعتبر خيارًا مستدامًا وصديقًا للبيئة، في حين توفر البوليمرات المُصنَّعة بالكامل خصائص ميكانيكية وكيميائية محسنة تناسب الصناعات الحديثة مثل الطيران، وصناعة السيارات، والإلكترونيات.

3. أنواع البوليمرات

يُصنَّف البوليمر حسب استجابته للحرارة إلى نوعين رئيسيين: البوليمرات الحرارية اللدنة (الثرموپلاستيكية) والبوليمرات الحرارية الصلبة (الثرموصلبة). يتميز كل نوع بخصائصه الفيزيائية والكيميائية التي تحدد استخداماته وتطبيقاته الصناعية.

1.3. البوليمرات الحرارية اللدنة (thermoplastiques)

1.1.3. تعريفها

البوليمرات الحرارية اللدنة هي مواد بوليمرية تتكون من سلاسل جزيئية مستقيمة أو متفرعة، مترابطة عبر روابط تساهمية. ومع ذلك، فإن هذه السلاسل تُحافظ على تماسكها من خلال قوى ضعيفة مثل روابط فان دير فالس والروابط الهيدروجينية، مما يسمح لهذه البوليمرات بالانصهار عند التسخين والتصلب عند التبريد. هذه الخاصية تمنحها القدرة على إعادة التشكيل عدة مرات دون أن تفقد خصائصها الميكانيكية، مما يجعلها قابلة لإعادة التدوير. [15]

2.1.3. خصائص البوليمرات الحرارية اللدنة

- * قابلة لإعادة التشكيل والتدوير.
- * تذوب أو تلتين عند التسخين وتصلب عند التبريد.
- * تمتلك مرونة عالية وتستخدم على نطاق واسع في التطبيقات الصناعية.
- * قابلة للذوبان في بعض المذيبات العضوية.

3.1.3. أمثلة على البوليمرات الحرارية اللدنة

- *البولي كلوريد الفينيل (PVC) يُستخدم في أنابيب المياه، العزل الكهربائي، الأرضيات، والنوافذ.
- *البوليستيرين (PS) يُستخدم في العبوات الغذائية، مواد العزل الحراري، وأكواب المشروبات الساخنة.
- *البولي إيثيلين (PE) يدخل في تصنيع الأكياس البلاستيكية، القوارير، والأنابيب [21]

4.1.3. تطبيقات البوليمرات الحرارية اللدنة

- *صناعة التغليف والتعبئة بسبب سهولة تشكيلها.
- * تصنيع قطع غيار السيارات والأجهزة الكهربائية.
- *الصناعات الطبية، مثل صناعة الحقن البلاستيكية والأنابيب الطبية.

2.3. البوليمرات الحرارية الصلبة (thermodurcissables)

1.2.3. تعريفها

البوليمرات الحرارية الصلبة هي مواد بوليمرية تتكون من سلاسل جزيئية مستقيمة تتشابك فيما بينها بروابط تساهمية قوية، مكونة شبكة ثلاثية الأبعاد غير قابلة للذوبان أو الانصهار بعد التصلب. عند تسخينها أثناء عملية التشكيل الأولية، تحدث تفاعلات كيميائية تؤدي إلى تصلب دائم، مما يجعلها مقاومة للحرارة والتشوه (Déformation) [15].

2.2.3. خصائص البوليمرات الحرارية الصلبة

- * تتميز بصلابة عالية وقوة ميكانيكية كبيرة.
- * مقاومة ممتازة للحرارة والعوامل الكيميائية.
- * لا يمكن إعادة تشكيلها أو إذابتها بعد تصلبها.
- * تمتلك مقاومة عالية للكسر والتآكل، مما يجعلها مناسبة للاستخدامات الهندسية المتطلبة. [22]

3.2.3. أمثلة على البوليمرات الحرارية الصلبة

- * راتنجات البوليستر غير المشبعة : (UP) تُستخدم في تصنيع القوارب، خزانات المياه، وهياكل السيارات.
- * راتنجات الإيبوكسي : تُستخدم في المواد اللاصقة، الطلاءات العازلة، والمركبات الفضائية.
- * الباكليت : (Bakelite) يُستخدم في العوازل الكهربائية ومقابض أواني الطهي.

4.2.3. تطبيقات البوليمرات الحرارية الصلبة

- * صناعة الطائرات والسيارات نظرًا لمقاومتها العالية للحرارة.
- * إنتاج المواد اللاصقة والطلاءات الصناعية.
- * صناعة الأدوات الكهربائية والعوازل بسبب خواصها العازلة. [23]

3.3. المقارنة بين البوليمرات الحرارية اللدنة والصلبة

الجدول: 1.I مقارنة بين البوليمرات الحرارية اللدنة والصلبة

الخاصية	البوليمرات الحرارية اللدنة	البوليمرات الحرارية الصلبة
إمكانية إعادة التشكيل	نعم، يمكن إعادة تسخينها وتشكيلها	لا، لا يمكن إعادة تشكيلها بعد التصلب
القابلية للذوبان	قابلة للذوبان في بعض المذيبات	غير قابلة للذوبان بعد التصلب
المقاومة الحرارية	منخفضة إلى متوسطة	عالية جدًا
الاستخدامات	التغليف، الصناعات الطبية، الإلكترونيات	صناعات الطيران، السيارات، العزل الكهربائي

البوليمرات الحرارية اللدنة تمتاز بقابليتها لإعادة التشكيل والتدوير، مما يجعلها مناسبة للصناعات التي تتطلب مرونة في التصميم والتصنيع.

البوليمرات الحرارية الصلبة تتميز بصلابتها ومقاومتها العالية للحرارة والمواد الكيميائية، مما يجعلها مثالية للتطبيقات الهندسية المتطلبة.

الاختيار بين النوعين يعتمد على التطبيق المطلوب، حيث توفر البوليمرات الحرارية اللدنة مرونة وسهولة في التصنيع، بينما تقدم البوليمرات الحرارية الصلبة متانة واستدامة في البيئات القاسية.

4. استخدامات البوليمرات

تلعب البوليمرات دورًا أساسيًا في مختلف مجالات الحياة اليومية، وأصبحت جزءًا لا غنى عنه في العديد من الصناعات. فبفضل التحسينات المستمرة في خصائصها الفيزيائية والكيميائية، لم تعد البوليمرات تعاني من السمعة السلبية التي كانت تلاحقها في الماضي، بل أصبحت من أكثر المواد استخدامًا في العصر الحديث [12]

منذ اكتشافها، أحدثت البوليمرات ثورة في العديد من القطاعات الصناعية، مثل الصناعات الطبية الحيوية، وقطاع النقل، والصناعات الفضائية، والإلكترونيات الدقيقة، وذلك بفضل تنوعها وخصائصها الفريدة [23-24]. تمتلك البوليمرات خصائص حرارية، ميكانيكية، كهربائية، بصرية، وكيميائية متنوعة، مما يجعلها مناسبة لمجموعة واسعة من التطبيقات.

و من أهم مجالات استخدام البوليمرات :

صناعة التغليف والتعبئة

تُستخدم البوليمرات على نطاق واسع في صناعة العبوات والتغليف، سواء لحفظ المواد الغذائية، أو المنتجات المنزلية، أو لتسهيل عمليات النقل والتخزين، نظرًا لخفتها ومقاومتها العالية [25]

قطاع البناء والتشييد

يتم دمج البوليمرات في مواد البناء مثل الأنابيب البلاستيكية، العوازل الحرارية، الطلاءات، المواد اللاصقة، والنوافذ، حيث توفر مقاومة عالية للعوامل البيئية وقدرة على التحمل لفترات طويلة.

صناعة الأجهزة المنزلية والإلكترونيات

تدخل البوليمرات في تصنيع الأجهزة الكهربائية والإلكترونية، مثل الهواتف المحمولة، أجهزة التلفاز، الكابلات العازلة، ولوحات الدوائر المطبوعة، نظرًا لقدرتها على العزل الكهربائي وخفة وزنها.

صناعة السيارات وقطاع النقل

تستخدم البوليمرات في تصنيع أجزاء السيارات، مثل المصدات، المقاعد، التنجيد الداخلي، والإطارات، مما يساهم في تقليل الوزن وتحسين كفاءة استهلاك الوقود. كما تُستخدم في صناعات الطائرات والمركبات الفضائية بفضل مقاومتها العالية للحرارة والمواد الكيميائية.

الصناعات الطبية والصيدلانية

تستخدم البوليمرات الحيوية في صناعة الأجهزة الطبية، والأطراف الصناعية، والعدسات اللاصقة، والمحاقن، وأكياس الدم، بفضل توافقها الحيوي مع الجسم البشري.

الزراعة والمنسوجات

يتم استخدام البوليمرات في الزراعة في أنظمة الري بالتنقيط، وأغلفة البيوت البلاستيكية، والمبيدات الحشرية المغلفة، كما تدخل في صناعة الأقمشة الاصطناعية المستخدمة في الملابس والمنتجات النسيجية المختلفة.

مجالات الترفيه والرياضة

تُستخدم البوليمرات في تصنيع الأدوات الرياضية، وألواح التزلج، والخوذ الواقية، والمعدات الرياضية الأخرى نظراً لخفتها وقدرتها على امتصاص الصدمات.

تُعد البوليمرات من أكثر المواد انتشاراً في مختلف الصناعات، ويعتمد عليها العالم اليوم بفضل مرونتها، خفتها، وقابليتها للتكيف مع الاحتياجات المختلفة.

خاتمة الفصل

تحتل البوليمرات اليوم مكانة أساسية في العديد من المجالات، وذلك بفضل تنوع خصائصها وقدرتها على التكيف مع مختلف التطبيقات. في هذا الفصل، تم استعراض المفاهيم الأساسية المرتبطة بالبوليمرات، بدءاً من تعريفها وتصنيفاتها المختلفة وفقاً لبنيتها، وتكوينها، وأصلها، بالإضافة إلى التمييز بين البوليمرات الحرارية اللدنة والبوليمرات المتصلدة حرارياً.

إن تنوع تركيبها الكيميائي وهيكليها يمنحها خصائص ميكانيكية وحرارية وبصرية مميزة، مما يفسر انتشارها الواسع في الصناعات والتطبيقات التكنولوجية. سواء في مجالات التغليف، البناء، السيارات، الإلكترونيات، أو الطب الحيوي، فقد أحدثت البوليمرات ثورة في حياتنا اليومية، ولا تزال تتطور بفضل التقدم العلمي والابتكارات الحديثة في علوم المواد.

وبالتالي، فإن فهم البوليمرات وخصائصها يُعد أمراً ضرورياً لتحسين استخدامها، وتطوير مواد جديدة ذات أداء عالٍ وأكثر توافقاً مع متطلبات الاستدامة البيئية.

الفصل الثاني: بنية وخواص المواد المركبة

مقدمة الفصل

يهدف هذا الفصل إلى دراسة مجموعة واسعة من المواد المركبة التي تُستخدم في مجالات متنوعة، حيث تتميز بتعدد خصائصها وإمكانات استخدامها. يمكن تصنيف هذه المواد وفقاً لمعايير مختلفة، مثل طبيعة المادة المصفوفة وطبيعة عناصر التقوية التي تدخل في تركيبها. كما نسلط الضوء على الاستخدامات الشائعة لمادة PVC، التي تُعد من أكثر البوليمرات انتشاراً نظراً لخصائصها الفيزيائية والكيميائية المميزة، مما يجعلها مادة أساسية في العديد من التطبيقات الصناعية والبنائية.

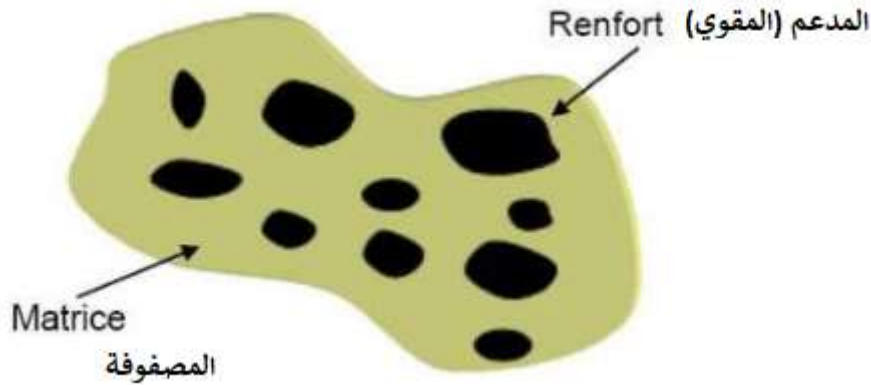
1. تعريف المواد المركبة

تتكون المواد المركبة من عدة مراحل أساسية، تُعرف بالعناصر المعززة والمصفوفة. تتميز هذه المواد بتركيبها الفريد الذي يجمع بين خصائص المكونات المختلفة لتحقيق أداء محسّن في التطبيقات المختلفة.

عندما يكون المركب في حالته السليمة، تكون العلاقة بين المصفوفة والعناصر المعززة متينة ومحكمة، مما يمنع حدوث أي انفصال أو انزلاق بين مكوناته. تأخذ العناصر المعززة شكل ألياف مستمرة أو غير مستمرة، ويكمن دورها الأساسي في تعزيز مقاومة المادة للقوى والضغط الميكانيكية. أما المصفوفة، فهي التي تضمن تماسك هذه الألياف وتوزيع الإجهادات الميكانيكية بشكل متوازن عبر المادة، مما يساهم في تحسين أدائها العام واستدامتها في البيئات المختلفة [26].

2. تركيب المواد المركبة

تتكون أي مادة مركبة من مكونين أساسيين : المصفوفة (matrice) والعنصر المعزّز (renfort).



الشكل : 1.II مادة مركبة

1.2. المصفوفة

تمثل المصفوفة الهيكل الأساسي للمادة المركبة، وهي غالبًا ما تكون مصنوعة من مادة بلاستيكية، مثل الراتنجات الحرارية اللدنة أو الصلبة، حيث تلعب دورًا رئيسيًا في ضمان التماسك البنيوي للمادة [27].

1.1.2. المصفوفة المستمرة

تعد المصفوفة المستمرة الطور الأساسي في المادة المركبة، وتؤدي وظائف متعددة، من بينها [28].

*ربط العناصر المعززة ببعضها البعض لضمان توزيع الإجهادات الميكانيكية بشكل متوازن، مما يقلل من خطر الانكسار المفاجئ.

*حماية العناصر المعززة من التأثيرات الخارجية والعوامل البيئية القاسية التي قد تؤثر على أدائها.

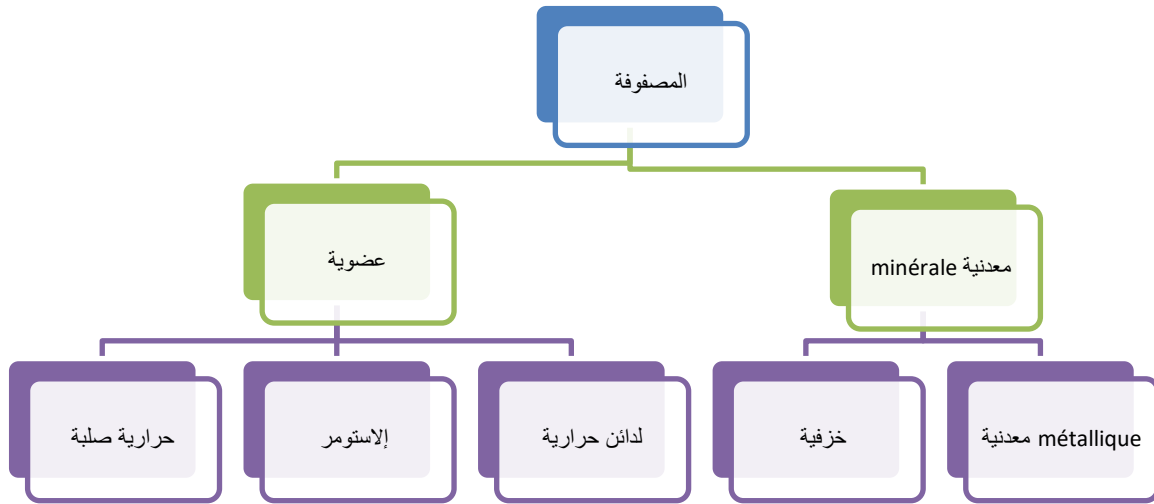
*تحديد الشكل الهندسي للقطعة وضمان خصائصها الميكانيكية والبنيوية.

2.1.2. الأنواع المختلفة للمصفوفات

تنقسم المصفوفات المستخدمة في المواد المركبة إلى فئتين رئيسيتين:

- المصفوفات العضوية
- المصفوفات غير العضوية (المعدنية)

يوضح الشكل: II.2 أنواع المصفوفات المختلفة.



الشكل : 2.II الأنواع المختلفة للمصفوفات [27]

1.2.1.2. المصفوفة العضوية

تنقسم المصفوفات العضوية إلى نوعين رئيسيين:

المصفوفة الحرارية الصلبة (Thermodurcissable)

تتكون المواد ذات المصفوفة الحرارية الصلبة من مكونين على الأقل يتمتعان بخصائص متكاملة، حيث تعتمد هذه المصفوفة على بوليمر حراري صلب كمادة أساسية. تمتاز هذه المصفوفات بقدرتها على التحول بشكل لا رجعة فيه من الحالة السائلة إلى الحالة الصلبة [29].

ومن بين الأنواع الرئيسية لهذه المصفوفات، نجد:

- مصفوفات البوليستر: تُستخدم على نطاق واسع في التطبيقات العامة.
- مصفوفات الإيبوكسي: تتميز بمقاومتها العالية ميكانيكياً وكيميائياً.
- مصفوفات الفينيل إستر: توفر مقاومة جيدة ضد العوامل الكيميائية.
- مصفوفات الفينول: تُعرف بقدرتها العالية على مقاومة الحريق.
- مصفوفات البولي يوريثان: تتميز بكثافة وقساوة متغيرة حسب الحاجة.
- مصفوفات البولي إيميد: تتحمل درجات حرارة تتجاوز 260°C .
- مصفوفات السيليكون: تُستخدم في التطبيقات التي تتطلب مرونة ومقاومة حرارية عالية.

المصفوفة اللدنة حراريًا (Thermoplastique)

تتميز المصفوفات أو الراتنجات اللدنة حراريًا بقدرتها على التحول بشكل عكسي من الحالة الصلبة إلى الحالة العجينية عند التعرض للحرارة، مما يسمح بإعادة تشكيلها وإصلاحها بسهولة [29].

المزايا

- سرعة وسهولة في التصنيع.
- إمكانية إعادة التشكيل والاستخدام.
- تمتاز بمقاومة ميكانيكية جيدة وتحملها للصدمات.

العيوب

- قدرتها المحدودة على تحمل درجات الحرارة المرتفعة.
- ضعف مقاومتها لبعض المذيبات الكيميائية.

أهم أنواع المصفوفات اللدنة حراريًا المستخدمة في تصنيع المواد المركبة [30].

- البولي أميد (Polyamides): يتميز بخصائص ميكانيكية جيدة بشكل عام.
- البوليستر المشبع (Polyesters saturés): يتميز بصلابة عالية وخصائص كهربائية عازلة جيدة.
- البولي أوليفين (Polyoléfines): يتمتع بمقاومة ممتازة للمذيبات وقوة ميكانيكية عالية.
- البولي كربونات (Polycarbonates): شفاف ومقاوم للصدمات بشكل جيد.
- البولي أسيتال (Polyacétals): يتميز بصلابة جيدة وخصائص كهربائية متفوقة.

2.2.1.2 المصفوفات غير العضوية (المعدنية)

هي مواد تُستخدم كأساس في تصنيع المركبات المتقدمة، حيث تُعزز بمواد أخرى مثل الألياف أو الجسيمات لتحسين خصائصها الميكانيكية والفيزيائية. تمتاز هذه المصفوفات بقدرتها العالية على تحمل درجات الحرارة المرتفعة، ومقاومتها الممتازة للتآكل والعوامل البيئية القاسية، مما يجعلها مثالية في العديد من التطبيقات الصناعية.

أهم أنواع المصفوفات غير العضوية:

✓ المصفوفات المعدنية (Metal Matrix Composites - MMCs): تتكون من معادن مثل الألمنيوم، التيتانيوم، أو المغنيسيوم، وتُعزز عادةً بألياف السيراميك أو كربيد السيليكون، مما يمنحها صلابة أكبر ووزنًا أقل.

✓ المصفوفات السيراميكية (Ceramic Matrix Composites - CMCs): تعتمد على مواد خزفية مثل كربيد السيليكون أو أكسيد الألمنيوم، وتتميز بمقاومتها العالية للحرارة والاحتكاك، مما يجعلها مثالية في صناعة المحركات وأجزاء الطائرات الفضائية.

التطبيقات الرئيسية للمصفوفات المعدنية:

- صناعة الطائرات والمركبات الفضائية
- الصناعات النووية والمفاعلات الحرارية
- أنظمة الفرامل والتوربينات عالية الأداء

تمثل المصفوفات المعدنية مستقبل المواد المتقدمة، حيث تسهم في تطوير هياكل خفيفة الوزن وقوية تتحمل الظروف القاسية، مما يفتح آفاقاً جديدة في مجالات التصنيع والتكنولوجيا المتقدمة.

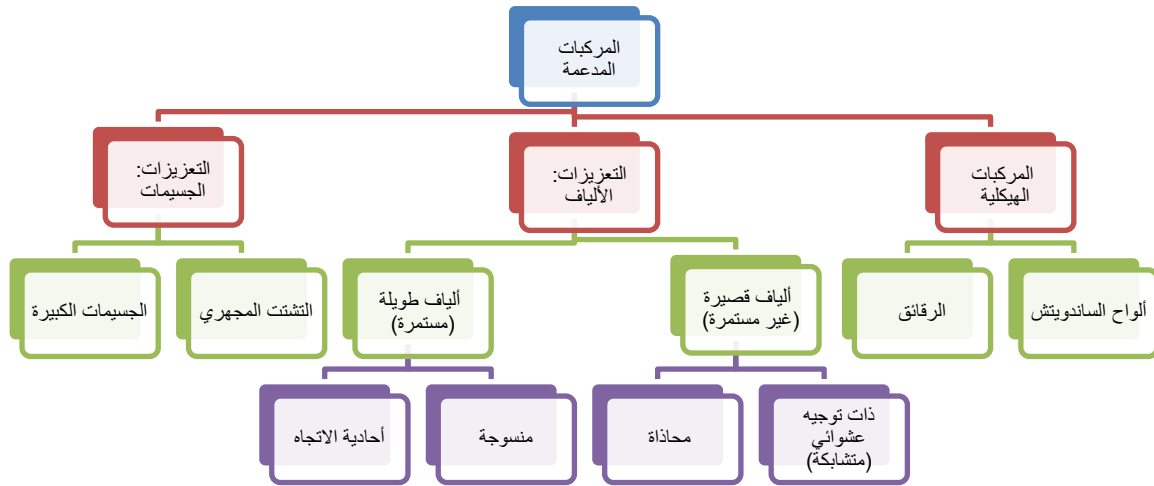
2.2. العنصر المعزز أو المدعم (Renfort)

يُعتبر العنصر المعزز الهيكل الداعم الأساسي في المادة المركبة، حيث يحدد الخصائص الميكانيكية مثل الصلابة، ومقاومة الكسر، والمتانة [31]. كما يساهم في تحسين بعض الخصائص الفيزيائية مثل السلوك الحراري، مقاومة الحرارة، والخصائص الكهربائية.

يتخذ التعزيز شكل هيكل ليفي يمكن أن يكون عضويًا أو غير عضوي، ومن بين أهم أنواع الألياف المستخدمة نجد

[32].

- ألياف الزجاج
- ألياف الكربون
- ألياف الأراميد
- الألياف الطبيعية



الشكل : 3.II مخطط تنظيمي لأنواع المركبات المدعمة المختلفة. [33]

3.2. المواد المالئة (Les charges)

المواد المالئة هي جزيئات صلبة غير قابلة للامتزاج تُضاف إلى البوليمر الأساسي، حيث تساهم في تعديل الخصائص الميكانيكية أو الكهربائية أو الحرارية بشكل كبير، وذلك بهدف تحسين المظهر السطحي أو تقليل تكلفة التصنيع [34].

المواد المالئة المعززة يتم إدخال المواد المالئة المعززة في التركيبة بهدف تحسين الخصائص الميكانيكية للمادة الراتنجية [35].

المواد المالئة غير المعززة تلعب المواد المالئة غير المعززة دورًا مزدوجًا، فإما أن تُستخدم لتقليل تكلفة إنتاج الراتنجات مع الحفاظ على أدائها، أو لتحسين بعض خصائصها الفيزيائية والكيميائية [35].

4.2. الإضافات (Les additifs)

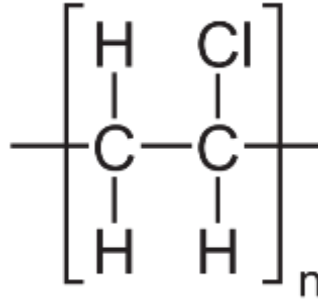
توجد الإضافات بنسب ضئيلة جدًا (بضع نسب مئوية أو أقل)، وتُستخدم لتحسين المظهر الخارجي أو الخصائص النهائية للمنتج [36].

أهم الإضافات المستخدمة:

- الأصباغ (لتحسين اللون).
- المزلقات (لتسهيل عمليات التصنيع).
- عوامل مقاومة الانكماش.
- عوامل الحماية من الأشعة فوق البنفسجية (UV).
- العوامل المضادة للميكروبات.
- العوامل المثبطة للاشتعال.

من بين المواد ذات المصفوفة اللدنة حراريًا نجد بولي كلوريد الفينيل (PVC) ، والذي يُستخدم على نطاق واسع في مختلف التطبيقات الصناعية.

3. بولي كلوريد الفينيل (PVC)



الشكل : 4.II الصيغة العامة لبولي كلوريد الفينيل (PVC) [37]

1.3. تعريفه

يعد البولي كلوريد الفينيل (PVC) من البوليمرات اللدنة حراريًا واسعة الاستخدام، وهو بوليمر غير متبلور أو ضعيف التبلور. يُعرف اختصارًا بـ PVC بالإنجليزية. Poly-vinyl-chloride

يتكون البولي كلوريد الفينيل (PVC) بشكل أساسي من 57% من الملح و43% من النفط، مما يجعله المادة البلاستيكية الوحيدة التي تحتوي على أكثر من 50% من المواد الخام المعدنية المتوفرة بكثرة في الطبيعة. يوضح الشكل: 4.II الصيغة العامة البولي كلوريد الفينيل (PVC) [38].

2.3. خصائص بولي كلوريد الفينيل (PVC)

1.2.3. الخصائص الفيزيائية

يعتبر البولي كلوريد الفينيل (PVC) بوليمراً أتاكتياً (Atactic) وبالتالي فهو غير متبلور في الغالب، ولكن في بعض المقاطع القصيرة يأخذ ترتيباً سنديو تاكتيكياً (Syndiotactic)، مما يسمح له بالتنظيم الذاتي في طور بلوري، ومع ذلك، لا تتجاوز نسبة التبلور 10 إلى 15 % [38].

تبلغ الكتلة الحجمية لمادة البولي كلوريد الفينيل (PVC) حوالي 1.38 g/cm^3 ، مما يجعله من البوليمرات ذات الكثافة العالية نسبياً. يتميز الـ PVC في حالته غير المتبلورة بالشفافية وبقدر معين من النفاذية تجاه بخار الماء، وهو ما يجعله مناسباً لبعض التطبيقات التي تتطلب خصائص بصرية جيدة مع حماية جزئية من الرطوبة.

أما متوسط الكتلة الجزيئية البولي كلوريد الفينيل (PVC)، فهو يُقاس عادةً بما يُعرف بـ "قيمة" K، وهي مؤشر مهم يعكس درجة البلمرة وجودة المادة. فكلما زادت قيمة K، ازدادت معها المرونة والقدرة على امتصاص الصدمات، كما تتحسن الاستقرارية الأبعادية عند التعرض للحرارة وتزداد مقاومة الزحف والتشوه تحت الأحمال المستمرة. غير أن ارتفاع هذه القيمة يؤدي في المقابل إلى صعوبة أكبر في عمليات التصنيع والتشكيل بسبب زيادة اللزوجة وتعقيد معالجة المادة [38].

يتميز البولي كلوريد الفينيل (PVC) في حالته الفيزيائية بأنه شفاف (كريستالي) بطبيعته، وفي معظم الأحيان يكون غير متبلور. عند درجة حرارة $23-25^\circ\text{C}$ ، تكون المرحلة غير المتبلورة صلبة، ولكن عند درجات حرارة أعلى من 90°C يصبح مرناً ومطاطياً، مع انخفاض في المقاومة الميكانيكية وارتفاع في التشوه [39].

2.2.3. الخصائص الكيميائية

يُعرف البولي كلوريد الفينيل (PVC) غير الملدّن بمقاومته العالية للعديد من المواد الكيميائية، حيث يُظهر صلابة كبيرة تجاه الأحماض، القلويات، ومعظم المركبات العضوية، مما يجعله خياراً مثالياً للاستخدام في البيئات الصناعية القاسية التي تتطلب مقاومة كيميائية فعالة. ولهذا السبب، يُستخدم على نطاق واسع في تصنيع الأنابيب، الخزانات، وأنظمة العزل، حيث تشكل مقاومته الكيميائية ميزة رئيسية في هذه التطبيقات.

أما الـ PVC الملدّن، فبينما يحتفظ بجزء من هذه الخصائص، إلا أنه يُصبح أكثر حساسية عند التعرض لبعض المذيبات العضوية مثل المركبات العطرية، المركبات الكيتونية، والمركبات الكلورية، وذلك نتيجة وجود المواد الملدنة التي تؤثر على استقراره الكيميائي وقد تتفاعل مع هذه المذيبات أو تذوب جزئياً عند التماس معها [40].

وبالإضافة إلى مقاومته الكيميائية، يتميز البولي كلوريد الفينيل (PVC) بقدرته الجيدة على مقاومة الضوء والتآكل الطبيعي، خاصة عند تعزيز تركيبه بإضافة مواد واقية من الأشعة فوق البنفسجية (UV) واختيار أصباغ وملونات خاصة تزيد من تحمله للظروف الجوية القاسية. هذه الإجراءات تساهم في تحسين مقاومته للشيخوخة والتغيرات الضوئية، مما يسمح باستخدامه في التطبيقات الخارجية دون الخوف من التدهور أو تغير اللون مع مرور الوقت [40].

3.2.3. الخصائص الميكانيكية

يتم عرض الخصائص الميكانيكية لبولي كلوريد الفينيل (PVC) في الجدول التالي.

جدول: 1.II خصائص بولي كلوريد الفينيل (PVC) [38].

الخصائص	PVC الصلب	PVC المرن	الوحدة
الكثافة الحجمية	1.38	1.7 - 1.3	g/cm ³
إجهاد الكسر	50	20 – 10	MPa
الاستطالة عند الكسر	50 – 10	500 – 200	%
مقاومة الانحناء	80 – 70	—	MPa
معامل الشد	2400	—	MPa
معامل الانحناء	2000	—	MPa
المتانة	200 – 50	—	J/m

4.2.3. الخصائص الكهربائية

يُعد البولي كلوريد الفينيل (PVC) من البوليميرات التي تمتلك خصائص عزل كهربائي ممتازة، مما يجعله من أكثر المواد استخدامًا في صناعة الكابلات والعوازل الكهربائية. وتُعزى هذه الخاصية إلى تركيبته الجزيئية التي تمنع انتقال التيار الكهربائي عبر المادة، مما يضمن حماية فعالة من التسربات الكهربائية [41].

وعلى الرغم من قدرته العالية على العزل، إلا أن البولي كلوريد الفينيل (PVC) يتميز أيضًا بخاصية فريدة تتمثل في قدرته على فقدان كمية معينة من الطاقة الكهربائية عند تعرضه للحقول الكهربائية المتناوبة، وهو ما يُعرف بالخسائر العازلية أو فقدان العزل الكهربائي. وتُعتبر هذه الخسائر مفيدة في بعض التطبيقات الصناعية، حيث تُمكن من استخدام مادة البولي كلوريد الفينيل (PVC) في عمليات اللحام بالترددات العالية (HF Welding).

في هذه التقنية، تُستخدم الموجات عالية التردد لإحداث تسخين موضعي داخل المادة نتيجة هذه الخسائر الكهربائية، مما يؤدي إلى تليين البولي كلوريد الفينيل (PVC) ولحام الأجزاء ببعضها البعض دون الحاجة إلى مصدر حرارة خارجي مباشر. وهذا ما يجعل البولي كلوريد الفينيل (PVC) مادة مميزة تجمع بين العزل الكهربائي الجيد وإمكانية المعالجة الحرارية بواسطة الحقول الكهربائية عالية التردد، وهو ما يوسع من مجالات استخدامه في الصناعات الكهربائية والإلكترونية وصناعة المفروشات والمستلزمات الطبية.

5.2.3. الخصائص الحرارية

يتميز بولي كلوريد الفينيل (PVC) بمجموعة من الخصائص الحرارية التي تحدد مدى تحمله للحرارة وقدرته على العزل الحراري، مما يجعله مادة واسعة الاستخدام في العديد من التطبيقات الصناعية والهندسية.

- **التوصيلية الحرارية:** تُعد التوصيلية الحرارية لبولي كلوريد الفينيل (PVC) منخفضة نسبيًا، إذ تقدر بحوالي 0.2 W/mK ، مما يمنحه قدرة جيدة على العزل الحراري ويحد من انتقال الحرارة عبره.
- **السعة الحرارية النوعية:** تبلغ السعة الحرارية النوعية لبولي كلوريد الفينيل (PVC) حوالي $1046 \text{ J/Kg} \cdot ^\circ\text{K}$ ، مما يعني أنه يحتاج إلى كمية لا بأس بها من الطاقة الحرارية لرفع درجة حرارته، وهو ما يسهم في استقراره الحراري أثناء الاستخدام.
- **القيمة الحرارية:** بالنسبة لبولي كلوريد الفينيل (PVC) غير الملدن، فإن القيمة الحرارية تقارب 17 KJoul/Kg ، بينما ترتفع هذه القيمة بنسب متفاوتة حسب نوعية وكمية المواد الملدنة الداخلة في تركيب الـ PVC الملدن.
- **معامل التمدد الخطي:** يتراوح معامل التمدد الخطي لبولي كلوريد الفينيل (PVC) غير الملدن بين 5×10^{-5} إلى $10^{-5} \text{ } ^\circ\text{K}^{-1}$ ، مما يدل على تمدده المحدود عند ارتفاع درجات الحرارة، في حين تكون هذه القيمة أقل وضوحًا في الـ PVC الملدن.
- **درجة التلين وفق اختبار فيكات:** (Vicat) تتراوح درجة حرارة التلين لبولي كلوريد الفينيل (PVC) غير الملدن بين 65 و 85 درجة مئوية. أما بالنسبة للخليط الذي يحتوي على PVC كلوري، فقد تصل درجة التلين إلى أكثر من 100 درجة مئوية، مما يعزز من مقاومته للحرارة.
- **درجة الانحناء تحت الحمل:** هذا الاختبار يخص فقط البولي كلوريد الفينيل (PVC) غير الملدن، حيث تتراوح درجة حرارة الانحناء تحت تأثير الحمولة بين 55 و 70 درجة مئوية، ويمكن أن تصل إلى 90 درجة مئوية عند إضافة الـ PVC الكلوري، مما يزيد من صلابته ومقاومته للتشوه الحراري.

السلوك عند التعرض للنار:

عند تعرض الـ PVC للهيب، يبدأ في التحلل مطلقًا غاز حمض الهيدروكلوريك (HCl)، إلا أن من مميزاته أنه ذاتي الانطفاء، أي يتوقف عن الاحتراق بمجرد إزالة مصدر اللهب. أما البولي كلوريد الفينيل (PVC) الملدن فهو أكثر قابلية للاشتعال مقارنة بالأنواع غير الملدنة بسبب وجود المواد الملدنة التي تؤثر على مقاومته للنار [42].

بفضل هذه الخصائص، يُستخدم البولي كلوريد الفينيل (PVC) بشكل واسع في مجالات تتطلب مقاومة للحرارة والعزل الحراري والكهربائي، مع مراعاة تركيبته عند الاستخدام في بيئات معرضة للحرارة أو اللهب.

3.3. مجالات استخدام بولي كلوريد الفينيل (PVC)

يُستخدم بولي كلوريد الفينيل (PVC) في العديد من المجالات الصناعية نظرًا لخصائصه الفيزيائية والكيميائية المميزة، حيث ينقسم إلى نوعين رئيسيين: البولي كلوريد الفينيل (PVC) الصلب و البولي كلوريد الفينيل (PVC) المرن (المُلدّن)، ويتميز كل منهما بمجموعة واسعة من التطبيقات.

PVC الصلب يُستخدم بشكل واسع في:

- صناعة أنابيب المياه والصرف الصحي بفضل تكلفته المنخفضة، وخموله الكيميائي، وقدرته على تحمل درجات الحرارة المحيطة.
- مجال التعبئة والتغليف الغذائي لما يتمتع به من مقاومة كيميائية جيدة.
- الهندسة المعمارية حيث يُستخدم في صناعة النوافذ، الأبواب، والألواح المستخدمة في البناء.
- إنتاج ألياف البولي كلوريد الفينيل (PVC) التي تدخل في عدة تطبيقات صناعية.
- الصناعات الكهربائية نظرًا لخواصه العازلة كهربائيًا، مما يجعله مثاليًا في صناعة الأجهزة الكهربائية الصغيرة والأسلاك والكابلات.
- إنتاج الزجاجات والأجسام المجوفة المُشكّلة، مثل عبوات المياه والمنظفات.
- تصنيع الألواح، الصفائح، الأفلام، والأقراص المستخدمة في الطباعة والتغليف.
- إنتاج المواد المقولبة التي تشمل الأجزاء البلاستيكية المعقدة المستخدمة في التصنيع.
- صناعة الرغوات والألياف الصناعية التي تدخل في صناعة الأثاث والمفروشات.

البولي كلوريد الفينيل (PVC) المرن (المُلدّن) يُستخدم في:

- إنتاج الصفائح والأفلام البلاستيكية التي تُستخدم في تغليف المواد الغذائية والصناعية.
- تصنيع الأقمشة والورق المطلي، بالإضافة إلى الكابلات الكهربائية المعزولة.
- إنتاج الأحذية والمنتجات البلاستيكية المصبوبة مثل الحقائب، القفازات، والمعدات الطبية.

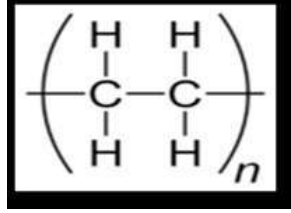
تُبرز هذه الاستخدامات المتنوعة مدى أهمية البولي كلوريد الفينيل (PVC) كخامة صناعية متعددة الوظائف، حيث يجمع بين القوة، المرونة، والمقاومة الكيميائية، مما يجعله أحد أكثر البوليمرات استخدامًا في مختلف المجالات.

4. البولي إيثيلين منخفض الكثافة (LDPE)

1.4. تعريفه

البولي إيثيلين منخفض الكثافة (LDPE) هو أحد أنواع البوليمرات الحرارية التي تُستخدم على نطاق واسع بفضل مرونته العالية وخفته، مما يجعله مثاليًا في العديد من التطبيقات الصناعية والاستهلاكية. يتميز البولي إيثيلين منخفض

الكثافة (LDPE) ببنية جزيئية متفرعة، مما يمنحه مرونة كبيرة وقدرة على التمدد دون أن يتكسرو تمثّل صيغته كما في الشكل: (II.5).



الشكل : 5.II البولي إيثيلين

2.4. خصائص البولي إيثيلين منخفض الكثافة: (LDPE)

- مرونة عالية وقابلية كبيرة للتشكيل.
- مقاومة جيدة للرطوبة والمواد الكيميائية.
- شفاف جزئياً ويمكن تعديله ليكون أكثر وضوحاً.
- يتحمل درجات حرارة منخفضة دون أن يصبح هشاً.

3.4. أهم تطبيقات البولي إيثيلين منخفض الكثافة: (LDPE)

- تغليف المواد الغذائية: يُستخدم في تصنيع الأكياس البلاستيكية، وأغلفة المنتجات الغذائية، وأكياس الخبز.
- الزراعة: يُستخدم في صناعة الأغشية البلاستيكية لتغطية المحاصيل وحمايتها من العوامل البيئية.
- الأنابيب والتوصيلات: يُستخدم في تصنيع بعض الأنابيب والطبقات العازلة في أنظمة الري والتمديدات.
- الصناعات الكهربائية: يدخل في تصنيع الأسلاك والعوازل الكهربائية بفضل خواصه العازلة الجيدة.
- المنتجات المنزلية: مثل الزجاجات البلاستيكية، حاويات السوائل، والألعاب البلاستيكية.

4.4. مزايا البولي إيثيلين منخفض الكثافة (LDPE) مقارنةً بالبوليمرات الأخرى

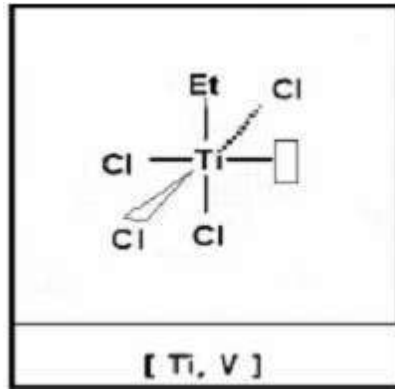
- أكثر ليونة ومرونة من البولي إيثيلين عالي الكثافة (HDPE).
- أقل كثافة، مما يجعله خفيف الوزن وسهل النقل.
- غير سام، مما يسمح باستخدامه في تغليف المواد الغذائية.

بفضل هذه الخصائص، يظل البولي إيثيلين منخفض الكثافة (LDPE) من أكثر المواد البلاستيكية استخداماً في الحياة اليومية، حيث يجمع بين الأداء الجيد والتكلفة المنخفضة.

عملية البلمرة بطريقة زيغلر-ناتا

تحدث هذه الطريقة في ظل درجات حرارة وضغط منخفضة نسبياً مقارنة بالطرق الأخرى. يوجد عدد كبير من المحفزات المستخدمة في هذه العملية، والتي تتكون عادةً من مركب عضوي معدني (من المجموعات I-III) مقترن بملح معدن انتقالي (من المجموعات IV-VIII).

من أشهر الأمثلة على ذلك، والمستخدم في تصنيع البولي إيثيلين عالي الكثافة (PEHD)، هو تفاعل رباعي كلوريد التيتانيوم ($TiCl_4$) كمحفز أساسي، وثلاثي إيثيل الألومنيوم ($Al(C_2H_5)_3$) كمساعد محفز في وجود غاز الإيثيلين (C_2H_4)، [29] كما هو موضح في الشكل II.6. و يُعرف هذا النظام باسم **محفز زيغلر-ناتا**.



الشكل : II.6 بنية محفز من نوع زيغلر-ناتا

يتكون الموقع الفعال في هذه العملية من ذرة تيتانيوم محاطة بأربع ذرات كلور بالإضافة إلى مجموعة ألكيل، وتكون البنية في تكوين ثماني السطوح مع وجود موقع فارغ. هذا الموقع الفارغ يسمح لجزيء الإيثيلين بالارتباط بذرة التيتانيوم، وفي المرحلة التالية، يتم إدراج جزيء الإيثيلين بين المعدن ومجموعة الألكيل، مما يخلق موقعاً فارغاً جديداً، وبهذا تستمر العملية بشكل متكرر لتكوين سلسلة من البولي إيثيلين (PE) [43]

تعتمد الخصائص الجزيئية للراتنجات الناتجة عبر طريقة زيغلر-ناتا على عدة عوامل، منها: نوع المحفز المستخدم، وجود عوامل نقل السلسلة (مثل الهيدروجين، الذي يتحكم في الكتلة المولية)، بالإضافة إلى ظروف التفاعل التي تلعب دوراً رئيسياً في تحديد خصائص المنتج النهائي.

5. مطاط الأكريلونيتريل بوتادين (NBR)

مطاط الأكريلونيتريل بوتادين (NBR) هو أحد المطاطات الصناعية المشتركة التي تتكون من مونومرين رئيسيين: الأكريلونيتريل (ACN) ($CH_2=CHCN$) والبوتادين ($CH_2=CH-CH=CH_2$). يتميز هذا المطاط بمقاومته العالية للزيوت والوقود والمواد الكيميائية، مما يجعله مناسباً للاستخدام في العديد من التطبيقات الصناعية.

1.5. التركيب الكيميائي ل NBR

يتكون مطاط الأكريلونيتريل بوتادين (NBR) من سلاسل بوليمرية تحتوي على نسبة متغيرة من الأكريلونيتريل $CH_2=CHCN$ ، والتي تؤثر بشكل مباشر على خواصه الفيزيائية والكيميائية. كلما زادت نسبة الأكريلونيتريل، زادت مقاومة المطاط للزيوت والهيدروكربونات، لكن ذلك يقلل من مرونته عند درجات الحرارة المنخفضة.

2.5. الخصائص الرئيسية لمطاط الأكريلونيتريل بوتادين (NBR)

*مقاومة عالية للزيوت والشحوم : يتمتع مطاط الأكريلونيتريل بوتادين (NBR) بقدرة فائقة على مقاومة المواد البترولية والزيوت المعدنية، مما يجعله مثاليًا لتطبيقات صناعة السيارات والمعدات الميكانيكية.

*مرونة جيدة وتحمل درجات الحرارة المتفاوتة : يتحمل مطاط الأكريلونيتريل بوتادين (NBR) درجات حرارة تتراوح بين $40^{\circ}C$ إلى $120^{\circ}C$ ، مع إمكانية تعزيز خصائصه بإضافة مواد مضافة.

*مقاومة جيدة للتآكل والتشقق : يتمتع هذا المطاط بصلابة ميكانيكية جيدة، مما يجعله مقاومًا للتمزق والتشقق عند تعرضه للإجهادات المختلفة.

*ضعف مقاومة الأوزون والأشعة فوق البنفسجية : نظرًا لاحتوائه على روابط مزدوجة غير مشبعة، فإنه أكثر عرضة للتدهور عند تعرضه للأوزون أو الأشعة فوق البنفسجية لفترات طويلة.

3.5. تطبيقات مطاط الأكريلونيتريل بوتادين (NBR)

- الصناعات الميكانيكية والسيارات : يُستخدم في صناعة حشوات الزيت، والخرطوم، وحلقات السدادات المطاطية (O-Rings)، والموانع المطاطية نظرًا لمقاومته العالية للزيوت والشحوم.
- الصناعات الطبية : يُستخدم في صناعة القفازات الطبية المقاومة للمواد الكيميائية، والمعدات المخبرية.
- الصناعات النفطية والغازية : يستخدم في صناعة بطانات الخزانات وخرطوم الوقود لنقل المواد البترولية بأمان.
- صناعة الأحذية والمعدات الرياضية : يستعمل في تصنيع النعال المطاطية والمعدات الرياضية التي تتطلب مقاومة للزيوت والمواد الكيميائية.

4.5. تحسين خصائص مطاط الأكريلونيتريل بوتادين (NBR)

يمكن تعديل خواص مطاط الأكريلونيتريل بوتادين (NBR) من خلال عمليات مختلفة مثل:

- الفلكنة (التشابك) : (Vulcanization) بإضافة الكبريت أو البيروكسيدات لزيادة مقاومته للحرارة والتآكل.

- إضافة مواد تقوية (Fillers) مثل أسود الكربون (Carbon Black) لتحسين الصلابة والمتانة.
- التعديل الكيميائي: بإضافة مواد مانعة للأكسدة لتحسين مقاومته للأوزون والأشعة فوق البنفسجية.

يعتبر مطاط الأكريلونيتريل بوتادين (NBR) من المواد الأساسية في العديد من الصناعات بفضل مقاومته العالية للزيوت والمواد الكيميائية، ومرونته الجيدة. ورغم بعض نقاط ضعفه، يمكن تحسين أدائه باستخدام إضافات وتقنيات معالجة متقدمة، مما يجعله خيارًا مثاليًا لمجموعة واسعة من التطبيقات الصناعية.

6. الألياف الطبيعية

1.6. تعريفها

الألياف الطبيعية هي هياكل بيولوجية تتكون بشكل أساسي من السليلوز، والهيميسليلوز، واللينين كما تحتوي أيضًا على مستخلصات، وبروتينات، وبعض المركبات الأخرى بنسب مختلفة.

تشكل الألياف الصلبة فئة متميزة، حيث تمثل 90% من الإنتاج العالمي. وتستخدم هذه الألياف الصلبة أو القاسية في تصنيع مواد مركبة مثل مركبات الخشب والبلاستيك (WPC (Wood-Plastic Composites). وتختلف نسبة السليلوز والهيميسليلوز واللينين بشكل كبير بين الألياف الطبيعية، مثل الجوت، والخشب، والسيال، والقنب، حيث تعمل اللينين كطبقة رابطة داخل الألياف، في حين أن السليلوز هو العنصر البنيوي الأكثر صلابة [44].

2.6. أنواع الألياف الطبيعية

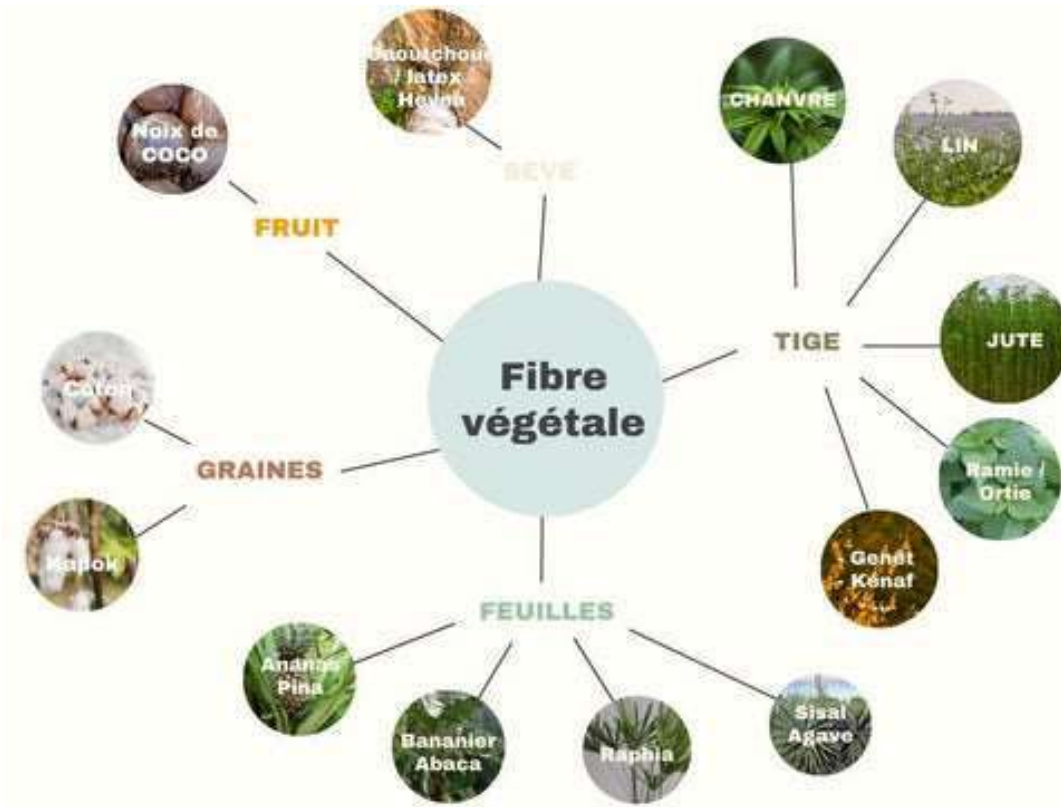
- الألياف من أصل حيواني: تشمل الزجاج، الكربون، إلخ.
- الألياف من مصدر عضوي: مثل الكيفلار، والبولياميدات، إلخ.
- الألياف من مصدر معدني: مثل البورون، والألمنيوم، إلخ.
- الألياف ذات الأصل النباتي: مثل ألياف أوراق نخيل التمر، وبقايا القهوة، إلخ.

3.6. الألياف النباتية الطبيعية

تتكون الألياف النباتية من خلايا ميتة تتكون أساسًا من السليلوز، والهيميسليلوز، واللينين، والبكتين. يمكن أن تكون الألياف معزولة أو مجمعة في شكل حزم من الألياف. من المهم التمييز بين الألياف الفردية (الألياف الأولية) وبين حزم الألياف التي تتشكل من تجمع عدة ألياف معًا. الألياف البسيطة تتكون بشكل رئيسي من اللينين والهيميسليلوز، وتُعرف بشكل عام باسم "الألياف النباتية" [45].

مصادر الألياف النباتية:

تُستخرج الألياف النباتية من الفواكه، أو الأوراق، أو السيقان، وتُستخدم في العديد من الصناعات بفضل كثافتها المنخفضة، وقدرتها العازلة، وخصائصها الحرارية والميكانيكية، وقابليتها للتحلل الحيوي [46].



الشكل : 7.II الألياف النباتية [47]

الجدول : 2.II التركيب الكيميائي لبعض الألياف النباتية [48].

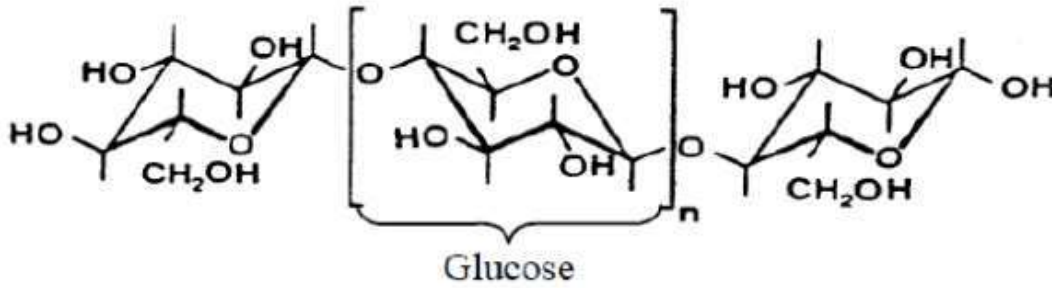
نوع الألياف	(%) السليلوز	الهيميسليلوز (%)	(%) اللينين	(%) الرماد
الباجاس	55	17	25	-
الخيزران	26-43	30-21	31	-
الكتان	71	18.6-20.6	2	1.5
القنب	72	20	9	-
الجوت	61-71	14-20	12-13	0.5
القنب الهندي	68	15	10	0.8
الرامي	68.6-76.2	13-16	0.6-0.7	0.3
ألياف الأباكا	56-63	20-25	42-985	3
السيزال	65	12	10	2
صنوبر حلب	81	-	13	-
جوز الهند	32-43	0.15-0.25	40-45	-

1.3.6. السليلوز

السليلوز هو البوليمر العضوي الأكثر وفرة على الأرض ويشكل المكون الهيكلي الرئيسي لجدران الخلايا النباتية. وهو عبارة عن عديد السكاريد الخطي يتكون من وحدات الجلوكوز المرتبطة بروابط β -(1 \rightarrow 4) جليكوسيدية، مما يمنحه استقرارًا عاليًا ومقاومة ميكانيكية كبيرة [48].

بفضل بنيته البلورية، يتمتع السليلوز بمقاومة جيدة للشد وهو غير قابل للذوبان في الماء وكذلك في معظم المذيبات العضوية. يُستخدم في العديد من التطبيقات الصناعية، بما في ذلك صناعة الورق والمنسوجات والمواد البلاستيكية الحيوية والمركبات المقواة بالألياف الطبيعية.

كما يلعب السليلوز دورًا رئيسيًا في قابلية التحلل الحيوي للمواد، حيث يتم تفكيكه بواسطة إنزيمات متخصصة، مثل السليلاز، التي تنتجها بعض الكائنات الحية الدقيقة ويمثل كما في الشكل: 8.II.

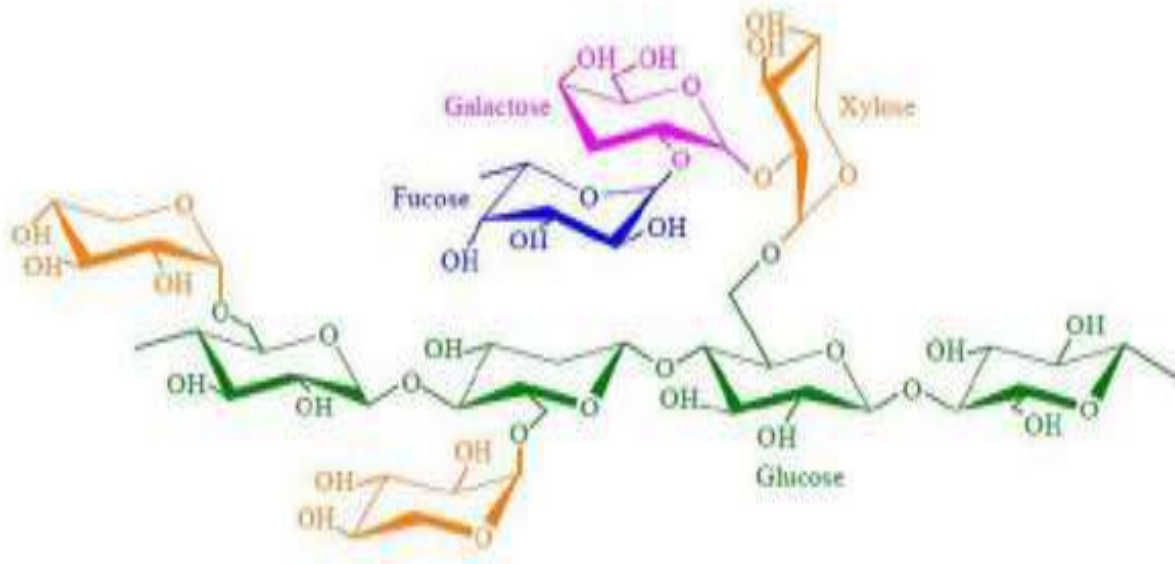


الشكل : 8.II جزيء السليلوز [49]

2.3.6. الهيميسليلوز

الهيميسليلوز ليس شكلاً من أشكال السليلوز، بل هو مجموعة من عديدات السكاريد المكونة من مزيج من الحلقات الكربونية ذات 5 و 6 ذرات كربون (كما هو موضح في الشكل: II.8). يشكل الهيميسليلوز مصفوفة داعمة للميكروفibrilles السليلوزية.

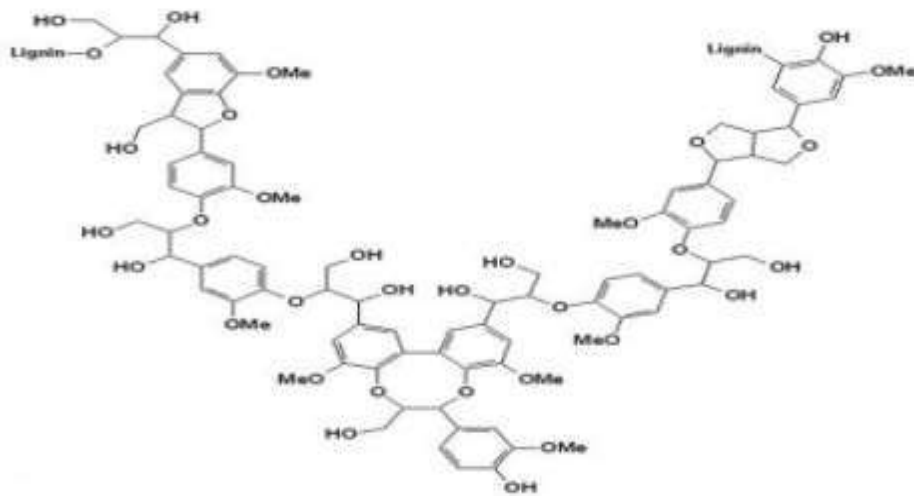
يختلف الهيميسليلوز عن السليلوز في عدة جوانب رئيسية، حيث يتكون من سكريات محايدة مثل الزيلوز، الأرابينوز، الجالاكتوز، الجلوكوز، المانوز، بالإضافة إلى الأحماض اليورونية، في حين أن السليلوز يحتوي فقط على وحدات β D-1,4-غلوكوبيرانوز [50].



الشكل : 9.II بنية نوع من الزيولوجلوكان [49]

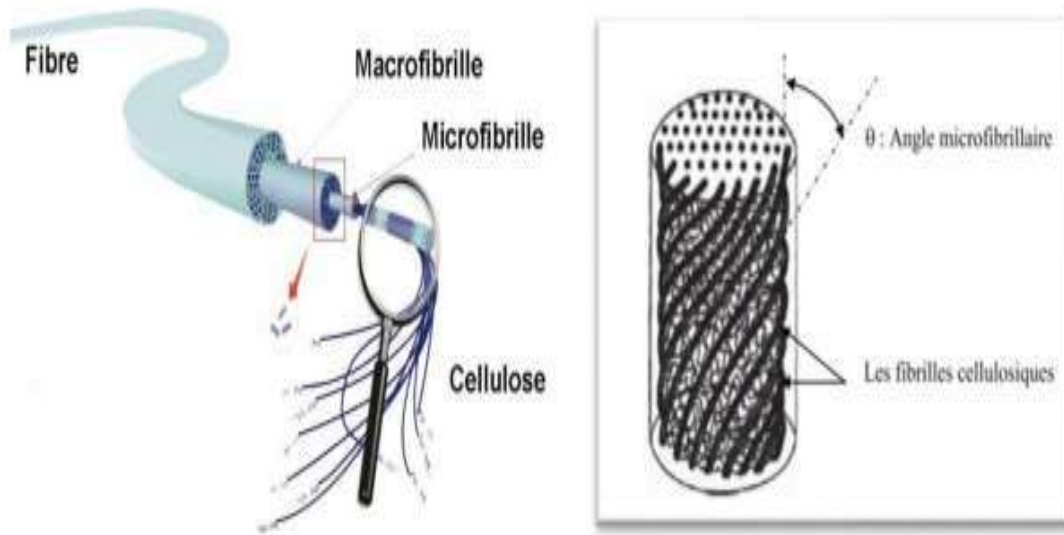
3.3.6. اللينين

اللينين هو جزيء ضخم شديد التباين يتكون من بوليمرات عطرية. (45) يُعد، بعد السكريات المتعددة، ثاني أكثر البوليمرات الطبيعية وفرة على سطح الأرض. يساهم في تعزيز الصلابة الهيكلية لجدران الخلايا ويحمي النباتات من هجوم الكائنات الممرضة. اللينين هو جزيء ثلاثي الأبعاد يتكون من وحدات فينيل بروبان الشكل: 10.II



الشكل : 10.II تمثيل تخطيطي لجزيء اللينين [49]

4.6. البنية الفيزيائية للألياف النباتية



الشكل : 11.II مخطط يوضح بنية الألياف النباتية.

تُعد الألياف النباتية هياكل بيولوجية تتكون أساسًا من السليلوز، والهيميسليلوز، واللينين. كما تحتوي أيضًا على مستخلصات، وبروتينات، وبعض المركبات غير العضوية بكميات أقل بكثير. على عكس المكونات الليفية الأخرى ذات البنية غير المتبلورة، يمتلك السليلوز بنية بلورية في الغالب.

يُعتبر السليلوز البلوري من البوليمرات ذات معامل المرونة الأعلى، حيث يبلغ حوالي 136 جيجا باسكال، مقارنة بـ 75 جيجا باسكال لألياف الزجاج.

يكون الجدار الخلوي الخارجي عادةً رقيقًا ومرنًا جدًا، مما يسمح له بالتمدد والتشوه، وبالتالي مواكبة نمو الخلية. تحتوي الميكروفبريلات على نسبة 8 إلى 14% من السليلوز، وتشكل شبكة غير محكمة الترتيب تُعرف بالبنية المبعثر [51-52].

5.6. البنية الكيميائية للألياف النباتية

تتكون الخلايا النباتية بشكل أساسي من الماء، وبوليمرات تعتمد على السكر، مع كميات أقل من اللينين ومكونات أخرى مستخلصة.

تتألف الألياف النباتية بشكل رئيسي من السليلوز، والهيميسليلوز، واللينين، والبكتين، والشمع. ويحدد التناسب بين هذه المكونات مجموعة من الخصائص الفيزيائية والكيميائية للألياف [53]

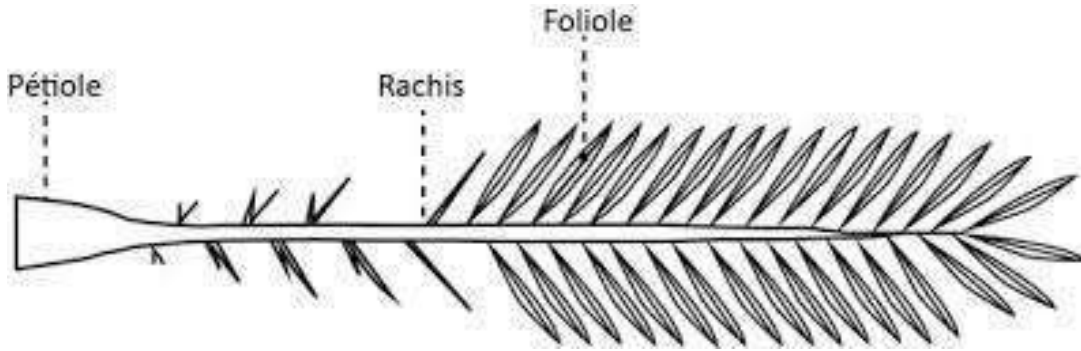
أكدت العديد من الدراسات عدم انتظام التركيب الكيميائي للألياف النباتية، حيث يختلف من نوع إلى آخر، بل وحتى داخل نفس النوع من الألياف الطويلة أو القصيرة [54] تشمل أنواع الألياف النباتية المستخدمة ألياف أوراق نخيل التمر وألياف القهوة.

6.6. أوراق نخيل التمر (DPLF)

نخيل التمر، المعروف أيضًا باسم "الجريد"، كما في الشكل: 12.II هو نبات ذو أوراق ريشية حيث تُرتب الوريقات بشكل مائل على طول محور يمتد حتى السويقة. تتحول الأجزاء السفلية من الأوراق إلى أشواك تختلف في عددها وطولها. أما السويقة (المعروفة باسم "Kornafs") فهي صلبة وقوية نسبيًا.

ينمو كل عام عدد معين من الأوراق الجديدة من براعم النخيل، وفي المقابل، تفقد الأشجار عددًا مماثلًا من الأوراق نتيجة الجفاف. يقدر عدد أشجار النخيل في العالم بحوالي 100 مليون شجرة، حيث يتم قطع النخيل الجاف والطري سنويًا، مما ينتج عنه كمية تقدر بـ 1,130,000 طن من المخلفات النباتية.

في الجزائر، يتجاوز عدد أشجار النخيل 10 ملايين نخلة، مع وجود أكثر من 800 صنف مختلف. يصل إنتاج النخيل الجاف إلى حوالي 135,103 طن سنويًا، في حين يبلغ إنتاج سعف النخيل 5,103 أطنان، أما مخلفات شجرة السدر فتصل إلى 67,500 طن سنويًا [55]



الشكل : 12.II رسم تخطيطي لسعفة نخيل التمر.

1.6.6. ألياف أوراق نخيل التمر

يمتلك نخيل التمر بنية ليفية تتكون من عدة أنواع من الألياف:

✓ ألياف خشب الساق.

✓ ألياف الأوراق الموجودة عند أعناق الأوراق.

✓ ألياف الساق عند سيقان الأعناق والدعائم الحاملة للثمار (العراجين).

✓ ألياف السطح المحيطة بالجذع أو قواعد السعف (السويقة).

✓ ألياف الليف (الموجودة بين الكرناف "Kornafs" ، حيث يكون الجذع مغطى بطبقة ليفية تُعرف بالليف) [55]

2.6.6. التركيب الكيميائي لألياف اوراق نخيل التمر

يوضح الجدول التالي التركيب الكيميائي لألياف اوراق نخيل التمر المستخرجة من الأوراق:

جدول : 3.II التركيب الكيميائي لألياف اوراق نخيل التمر [56]

المكون (%)	السليولوز	الهيميسليولوز	اللينين	الرماد	المستخلصات
DPLF	40.21	12.8	32.2	10.54	4.25

7.6. مسحوق القهوة

تنمو حبوب القهوة داخل ثمار شجرة البن، والتي تُعرف باسم "الكرزة". تمر هذه الثمار بتغير لوني من الأخضر إلى الأحمر عند نضجها، وتحتوي كل كرزة على حبتين من القهوة الخضراء. تنتمي شجرة البن إلى عائلة الفوية (Rubiaceae)

وتضم نوعين رئيسيين "Coffea Arabica" ، الذي يُنتج قهوة الأرابيكا المشهورة بنكهتها الناعمة والعطرية، و "Coffea Canephora"، الذي يُنتج قهوة الروبوستا ذات المذاق القوي والمر [57].

جدول: 4.II التركيب العنصري لمسحوق القهوة [57]

العناصر	التركيب (%)
الكربون (C)	49.7 %
الهيدروجين (H)	غير محدد (s.d)
النيتروجين (N)	2.3 %
الأكسجين (O)	غير محدد (s.d)
نسبة H/C	غير محدد (s.d)
نسبة C/N	22 %

8.6. نوى التمر

تعد نوى التمر من المخلفات الناتجة عن العديد من الصناعات التحويلية للتمر تحاط النواة بغلاف داخلي (Endocarpe إندوكارب) رقيق، وتكون بشكل مستطيل، يختلف حجمها من نوع لآخر، سطحها أملس أو يحتوي على نتوءات جانبية على شكل حواف أو زعانف، ويوجد على جانبها تجويف بطني، بينما يكون الجنين في الجهة الظهرية. وتتميز النواة بقوامها الصلب والقرني. تحتوي النواة على الألبومين (السويداء Endosperme) الصلب والقرني، حيث يكون الجنين الظهري صغيراً جداً مقارنة بحجم الألبومين (2 إلى 3 mm).

1.8.6. الخصائص الفيزيائية والكيميائية لنوى التمر

أظهرت الدراسات وجود فروق كبيرة بين الأشجار في القطر والوزن والطول للنواة، حتى وإن كانت النخيل المزروعة تنتمي لنفس المزرعة. وقد تُعزى هذه الفروقات إلى نوعية حبوب اللقاح المستخدمة من قبل الفلاحين (خليفة، 1980)، حيث أثبت هذا الباحث التأثير الكبير لنوع اللقاح على الصفات المورفولوجية للنواة. كما بينت الدراسات التي أجراها عكوران وتامة (1997) أن وزن نوى التمور الجزائرية (منطقة الزيبان) يختلف من صنف إلى آخر حسب عدة عوامل، حيث تراوحت القيم كالآتي:

- الوزن: من 0.6 إلى 1.69 g
- القطر: من 0.58 إلى 1 cm
- الطول: من 2.9 إلى 3.15 cm (41)

2.8.6. التركيب الكيميائي لنوى التمر

الجدول : 5.II التركيب الكيميائي لنوى التمر [56]

المكونات	النسبة (%)
الماء	6.46
السكريات	62.51
البروتينات	5.22
الدهون	8.49
السليولوز	16.20
الرماد	1.12

7. الدراسات السابقة

يعد البولي كلوريد الفينيل (PVC) خيارًا شائعًا لاستخدامها كمادة أساسية نظرًا لجودتها الممتازة. في السنوات الأخيرة، أُجريت العديد من الأبحاث حول المواد المركبة القائمة على البولي كلوريد الفينيل (PVC) والمُدعمة بالألياف.

قام **L. Augier (2007)** بدراسة حول "تحضير مواد مركبة من بولي كلوريد الفينيل (PVC) والخشب انطلاقًا من نفايات ورشات النجارة: التركيب، التوصيف، المتانة وقابلية التدوير". ركزت هذه الدراسة على استغلال نفايات الخشب الناتجة عن ورشات النجارة كمصدر للألياف الطبيعية لتعزيز مادة PVC، بهدف إنتاج مواد مركبة ذات خصائص ميكانيكية جيدة ومستدامة بيئيًا. كما تناول البحث دراسة تأثير هذه النفايات الخشبية على خصائص المركب، من حيث مقاومة الماء والعوامل الجوية، بالإضافة إلى تقييم قابلية إعادة تدوير هذه المواد المركبة بهدف تقليل التأثير البيئي وتحقيق الاستدامة في استخدام الموارد الطبيعية [58].

قامت **S. Atmane عثمان س. (2017)** بإنجاز عمل بحثي يهدف إلى تحضير وتوصيف مادة مركبة ذات مصفوفة من الـ PVC مدعمة بألياف دقيق نواة الزيتون. تم الحصول على هذا الدقيق من خلال عملية الطحن والغزلة بحجم حبيبات موحد (0.125 مم). تم تحضير العينات باستخدام تقنية الخلط الجاف باستعمال خلاط بسيط، ثم تم تشكيلها بواسطة الضغط الحراري. تم اعتماد نسب مختلفة من الدقيق النباتي تصل حتى 30% وزناً من أجل دراسة تأثيرها. ركزت الدراسة على تأثير حجم الحبيبات وتركيز الدقيق النباتي على كل من البنية المورفولوجية، معدل امتصاص الماء، والخصائص الميكانيكية مثل الاستطالة عند الكسر، الإجهاد عند الكسر، ومعامل المرونة. أظهرت النتائج أن توزيع واندماج ألياف الخشب داخل مصفوفة الـ PVC كان جيدًا عند نسب منخفضة، كما أظهرت أن إضافة دقيق الخشب حسّنت من معامل يونغ لكنها أدت إلى انخفاض ملحوظ في الاستطالة والإجهاد عند الكسر. وفي الختام، خلصت الباحثتان إلى أن إضافة الدقيق النباتي تساهم بشكل كبير في تحسين الخصائص الميكانيكية للمادة المركبة، مما يعزز من إمكانية استعمال هذا النوع من المركبات في تطبيقات صناعية متعددة. [59]

قام **S. Bouhank بوحناك س. (2017)** بانجاز أطروحة دكتوراه تحت عنوان "تحضير مواد مركبة من بولي كلوريد الفينيل (PVC) وألياف نباتية مستخلصة من الجنيت الإسباني (Genêt d'Espagne): التركيبات والخصائص"، حيث تمحور عمله البحثي حول تطوير مواد مركبة تجمع بين مادة الـ PVC كمصفوفة وألياف الجنيت الإسباني كداعم طبيعي. وقد ركّز في دراسته على إعداد عدة تركيبات مختلفة من هذه المواد المركبة، مع القيام بتقييم شامل لخواصها. وتهدف هذه الدراسة إلى إبراز مدى فعالية استخدام الألياف النباتية في تحسين خصائص الـ PVC، وتقليل التكلفة، وتقديم بدائل بيئية في مجال صناعة البوليمرات والمركبات. [60]

قام **K. Zhang وآخرون (2018)** بإجراء دراسة حول المركبات القائمة على راتنج الإيبوكسي، بهدف تحليل تأثير ألياف الخيزران على الخصائص الميكانيكية والحرارية لهذه المركبات. تمت معالجة ألياف الخيزران بمحلول هيدروكسيد الصوديوم (NaOH) بتركيزات 2%، 6%، و10% بالوزن، وذلك لتحديد التركيز الأمثل للمعالجة. أظهرت النتائج أن التركيز الأنسب هو 6%، حيث عززت هذه المعالجة ارتباط الألياف مع مصفوفة الإيبوكسي، مما أدى إلى تحسين الخصائص

الميكانيكية. كما بينت الدراسة أن الألياف المعالجة بهذا التركيز تمتعت بثبات حراري أفضل مقارنةً بالألياف غير المعالجة [61]

انجزت BOUSSEHEL H بوسهل ح. (2018) أطروحة دكتوراه تناولت موضوعًا هامًا يتمثل في "دراسة وسائل تثبيت المركبات القائمة على البوليستيران" حيث ركزت في عملها البحثي على تحليل ودراسة مختلف الطرق والتقنيات التي تساهم في تحسين استقرار هذه المركبات وتعزيز مقاومتها للعوامل الخارجية. وتهدف هذه الدراسة إلى تطوير حلول فعالة للحد من تدهور خصائص البوليستيران عند الاستخدام، وأظهرت النتائج تحسنًا في الخصائص الميكانيكية والحرارية للمركبات، بالإضافة إلى تقليل امتصاص الماء، مما يشير إلى تحسين التوافق بين الألياف والمصفوفة البوليمرية مما يسمح بتوسيع مجالات تطبيقه الصناعي وزيادة عمره التشغيلي في مختلف المجالات مثل التغليف، والصناعات الكهربائية، والإنشاءات. [62-63]

قام عبدالرحمن راشد محمد راشد 2019 بدراسة تأثير تأثير اتجاه الألياف الزجاجية، الكسر الحجمي، ودرجة الحرارة على خاصية متانة الانحناء لصفائح مركبة بوليمرية تعتمد على راتنجات الإيبوكسي والبوليستر غير المشبع. استخدمت ألياف زجاجية بكسور وزنية 12% و 25%، ورتبت بزوايا مختلفة (0°، 45°، 90°، و [0°/90°/0°]) باستخدام تقنية القلوية اليدوية. أظهرت النتائج أن الاتجاه 0° حقق أعلى متانة انحناء بلغت **156.4 MPa**، في حين أن الاتجاه 90° سجل أدنى قيمة بلغت **45.2 MPa**. زادت المتانة بنسبة **17%** بعد معالجة حرارية عند 80°C لعينة الإيبوكسي، بينما انخفضت بنسبة **12%** لعينة البوليستر. كما أدى رفع عدد الطبقات من 3 إلى 6 طبقات إلى تحسن في المتانة بنسبة **22%**. تبرز هذه النتائج أهمية التوجيه الهندسي للألياف والمعالجة الحرارية في تحسين أداء المركبات البوليمرية المدعمة، خاصة في التطبيقات التي تتطلب مقاومة انحناء عالية واستقرارًا حراريًا [64]

قام Merzoug وآخرون (2020) بدراسة تأثير المعالجة القلوية على تحسين السطح الخارجي لألياف أعناق سعف النخيل (PDPF) وتحليل تأثير دمج هذه الألياف مع الألياف الزجاجية على الخصائص الحرارية والميكانيكية للمركبات المصنوعة من راتنج الفينيل إستر. أظهرت النتائج أن المعالجة بهيدروكسيد الصوديوم (NaOH) ساعدت على إزالة الشوائب، مما أدى إلى تحسين الالتصاق بين الألياف والمصفوفة. كما بينت التحاليل الميكانيكية أن المركبات التي تحتوي على 30% من ألياف أعناق السعف أظهرت خصائص انحناء فائقة مقارنة بمعظم المركبات الأخرى، مما يدل على تحسن واضح في الأداء الميكانيكي عند دمجها مع الألياف الزجاجية. [65]

قام S. Derradji س. دراجي وآخرون. (2021) بإنجاز دراسة حول تأثير عملية إزالة الحبر من ورق الجرائد على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للمواد المركبة من بولي كلوريد الفينيل (PVC) وألياف ورق الجرائد. وقد تمثل الهدف من هذا العمل في تقييم تأثير مرحلة إزالة الحبر من الألياف الورقية المستخلصة من ورق الجرائد المستعمل عند إدماجها داخل مصفوفة PVC، وذلك من خلال دراسة التغيرات التي تطرأ على البنية، والخصائص الميكانيكية والفيزيائية للمواد المركبة المحضرة. أظهرت النتائج أن إزالة الحبر من الألياف الورقية ساهمت في تحسين التماسك بين الألياف والمصفوفة البوليمرية،

مما انعكس إيجاباً على بعض الخصائص الميكانيكية مثل مقاومة الشد ومقاومة الانحناء. كما لوحظ أن عملية إزالة الحبر قلّلت من العيوب والشوائب العالقة بالألياف، مما أدى إلى تحسين توزيعها داخل المصفوفة وتقليل امتصاص الماء. وخلصت الدراسة إلى أن إعادة تدوير ورق الجرائد بعد إزالة الحبر يعد خياراً واعداً لتصنيع مواد مركبة ذات خصائص جيدة، مع إمكانية استغلالها في تطبيقات صناعية مختلفة، وهو ما يفتح آفاقاً واسعة أمام تدوير النفايات الورقية بطريقة فعالة وصديقة للبيئة. [66]

درس النوري العايب 2021 تطوير مواد مركبة ذات مصفوفة من راتنج البوليستر غير المشبع (UP) مدعمة بألياف اللوفا الطبيعية، مع دراسة تأثير المعالجة الكيميائية للألياف على الخواص الميكانيكية والحرارية. تم استخدام طريقتين للمعالجة: الصودا الكاوية (NaOH) وبرمنغنات البوتاسيوم ($KMnO_4$). أظهرت اختبارات الشد أن مقاومة الشد زادت من 24.78 MPa للمركبات غير المعالجة إلى 38.32 MPa بعد المعالجة بـ $KMnO_4$ ، بزيادة قدرها حوالي 54.6% كما ارتفعت مقاومة الانحناء من 41.26 MPa إلى 56.45 MPa.

أظهرت التحاليل الحرارية (TGA) تحسناً في درجة بدء التحلل الحراري للمركبات المعالجة لتصل إلى $341.5^\circ C$ مقارنة بـ $286.2^\circ C$ في حالة الألياف الخام، مما يدل على تحسن كبير في الاستقرار الحراري. كشفت تحاليل FTIR تغيرات واضحة في البنية الكيميائية، تؤكد حدوث تفاعل بين المصفوفة والألياف بعد المعالجة. وخلصت الدراسة إلى أن المعالجة الكيميائية تساهم في تحسين الالتصاق بين الألياف والمصفوفة، مما يُنتج مركبات ميكانيكية أكثر كفاءة، مناسبة لتطبيقات هيكلية خفيفة الوزن ومستدامة. [67-69]

انجزت MAOU S معوس. (2022) أطروحة دكتوراه هدفت هذه الدراسة إلى تطوير مركبات بوليمرية مستدامة تعتمد على مزيج من بولي كلوريد الفينيل (PVC) والبولي إيثيلين منخفض الكثافة (LDPE)، مدعمة بـ بركونات الكالسيوم ومثبتات حرارية من ستيارات الكالسيوم/الزنك بنسبة (1/9). كما استُخدمت ألياف نخيل التمر كمادة تدعيم طبيعية، سواء كانت معالجة كيميائياً أو غير معالجة. أظهرت النتائج أن النسبة المثلى للمزج (20% PVC-80 LDPE) قدّمت أفضل الخصائص الميكانيكية والحرارية، كما عززت إضافة الألياف معامل المرونة. أظهرت التحاليل المجهرية (SEM) والحرارية (TGA) تحسناً في البنية المجهرية والاستقرار الحراري أن التفكك الحراري يتم على مرحلتين وكانت المركبات ذات 10 و 30% ألياف تُظهر استقراراً حرارياً في المرحلة الثانية. كذلك، ساهمت المعالجات الكيميائية للألياف في تعزيز الالتصاق بين الألياف والمصفوفة، وتقليل امتصاص الماء، مما يجعل هذه المركبات واعدة لتطبيقات هيكلية وصناعية مستدامة. [70-72]

انجزت BERKOUK A برقوق ع. (2022) أطروحة دكتوراه تناولت فيها دراسة تأثير تدعيم البوليمرات الحرارية، خاصة LDPE، بألياف نباتية طبيعية لتحسين خصائصها الفيزيائية والميكانيكية. تم استخدام ألياف نباتية خضعت لمعالجات كيميائية لتحسين التوافق بين الألياف والمصفوفة البوليمرية. أظهرت المركبات المحضرة تحسناً ملحوظاً في معامل المرونة وقوة الشد مقارنة بالمادة البوليمرية النقية. كما أظهرت الألياف المعالجة كيميائياً دوراً مهماً في تقليل امتصاص الماء وتعزيز الاستقرار الحراري. تشير النتائج إلى أهمية استخدام الألياف النباتية كخيار بيئي فعال لتحسين أداء البوليمرات في تطبيقات مختلفة، مع المحافظة على الاستدامة والاقتصاد في المواد الخام. [73-74]

انجزه CHELALI شلالي ح . (2024) أطروحة درس فيها تطوير ودراسة مركبات بوليمرية مدعمة بألياف طبيعية، مع التركيز على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية والديناميكية الميكانيكية لهذه المركبات. تم استخدام بوليمرات حرارية كمصفوفة، وأدخلت ألياف نباتية كمادة تدعيم لتعزيز الأداء الميكانيكي والحراري. أظهرت النتائج أن إدخال الألياف الطبيعية أدى إلى تحسين في معامل المرونة وقوة الشد، بالإضافة إلى تعزيز الاستقرار الحراري للمركبات. كما أظهرت التحاليل الديناميكية الميكانيكية تحسناً في سلوك التخميد والصلابة. تشير هذه النتائج إلى إمكانية استخدام الألياف الطبيعية كمادة تدعيم فعالة في المركبات البوليمرية، مما يساهم في تطوير مواد مركبة مستدامة وصديقة للبيئة ذات خصائص محسنة لتطبيقات متنوعة [75-76]

خاتمة الفصل

تناول هذا الفصل دراسة الألياف النباتية ومكوناتها الكيميائية والفيزيائية، مع التركيز على الياف اوراق نخيل التمر ومسحوق القهوة، بالإضافة إلى تحليل المواد المركبة (Composites) ومصفوفة بولي كلوريد الفينيل (PVC). لقد أظهرت الدراسات أن الألياف الطبيعية، بفضل تركيبها الكيميائي، تُعد خياراً واعداً لتعزيز المواد المركبة، حيث تساهم في تحسين الخصائص الميكانيكية والحرارية لهذه المواد، خاصة بعد المعالجة القلوية التي تساعد على إزالة الشوائب وتعزيز التفاعل بين الألياف والمصفوفة البوليمرية.

بالإضافة إلى ذلك، تمت مناقشة استخدام بولي كلوريد الفينيل (PVC) كمادة أساسية في بعض التطبيقات، نظراً لخصائصه الفيزيائية الممتازة مثل مقاومته الجيدة للعوامل البيئية، ومتانته العالية، وسهولة معالجته. ومع ذلك، يواجه هذا البوليمر بعض التحديات المتعلقة بتأثيره البيئي وإعادة تدويره، مما يستدعي البحث عن حلول مبتكرة لتحسين استدامته.

بناءً على ما تم عرضه، يمكن الاستنتاج أن الجمع بين الألياف النباتية والمصفوفات البوليمرية مثل الـ PVC يفتح آفاقاً جديدة في مجال تطوير المواد المركبة المستدامة، مما يعزز من إمكانيات استخدامها في التطبيقات الصناعية المختلفة. في الفصل التالي، سنتناول طرق تحضير ومعالجة هذه المركبات، مع التركيز على تحسين خصائصها وتعزيز استدامتها البيئية.

الفصل الثالث: التقنيات التجريبية لتحضير المواد المركبة

مقدمة الفصل

يُعد تحضير المواد المركبة أحد المجالات البحثية المتقدمة التي تكتسب اهتماماً متزايداً نظراً لتنوع تطبيقاتها الصناعية والتقنية. ويعتمد نجاح تحضير هذه المواد على اختيار المواد الأولية المناسبة واعتماد تقنيات تجريبية دقيقة تضمن تجانس المكونات وتحقيق الخصائص الفيزيائية والميكانيكية المطلوبة. في هذا الإطار، تم في هذا العمل استخدام مواد أولية متنوعة تشمل البوليمرات مثل بولي كلوريد الفينيل (PVC) والبولي إيثيلين منخفض الكثافة (LDPE)، بالإضافة إلى بعض الملدنات والمضافات مثل ستيرات الكالسيوم والزنك (Ca/Zn) ومطاط NBR. كما تم إدماج الألياف النباتية المستخلصة من نفايات النخيل كمصدر للتدعيم، في خطوة تهدف إلى تجميع المخلفات الزراعية وتحقيق بعد بيئي في إنتاج المواد المركبة.

ولتحقيق الأهداف المرجوة من هذا البحث، تم الاعتماد على مجموعة من التقنيات التجريبية المتكاملة، بدءاً من تحضير العينات وتهيئتها، وصولاً إلى إجراء تحاليل مختلفة تسمح بفهم التركيب البنوي والمورفولوجي والميكانيكي للمواد المركبة المحضرة. ومن بين أبرز هذه التقنيات ذكر التحاليل الطيفية بالأشعة تحت الحمراء بتحليل فورييه (FTIR)، والاختبارات الميكانيكية الديناميكية (DMA)، وتحاليل المجهر الإلكتروني الماسح (MEB)، بالإضافة إلى تقنية حيود الأشعة السينية (DRX)، وكلها تقنيات توفر بيانات دقيقة وضرورية لفهم سلوك المواد المركبة تحت ظروف مختلفة.

1. المواد الأولية المستعملة وطرق تحضير الألياف

1.1. المواد الأولية المستعملة

تمت الإشارة في الفصل السابق إلى أن البوليمرات مثل البولي إيثيلين الكلور (CPE) والبولي ميثيل والبولي إيثيلين بالإضافة إلى عوامل الربط الكيميائي مثل سيلان A-137 أو سيلان A-1100 تُستخدم في تحضير المواد المركبة. ومع ذلك، يُعتبر استعمال الألياف الطبيعية غير المعالجة كمادة تدعيم داخل هذه المركبات خياراً أكثر جدوى مقارنة بالألياف المعالجة، وذلك نظراً لأن إنتاج الألياف الاصطناعية لا يتم دائماً وفق معايير صديقة للبيئة، مما قد يُشكل تهديداً بيئياً على المدى الطويل.

وفي هذا السياق، تُعد واحات النخيل بالجزائر عنصراً محورياً في النظام البيئي الصحراوي، حيث تنتج سنوياً كميات كبيرة من المخلفات النباتية. ومن هنا جاءت أهمية عملنا الذي يهدف إلى استرجاع هذه النفايات واستغلالها كمصدر طبيعي في تصنيع مركبات صديقة للبيئة أو ما يُعرف بـ "المركبات الخضراء".

تركز هذه الدراسة على تحليل الخواص الميكانيكية والبنية المورفولوجية لمركبات بوليمرية مكونة من بولي كلوريد الفينيل (PVC) وبولي إيثيلين منخفض الكثافة (LDPE). ولتحقيق ذلك، قمنا بالاعتماد على نفايات نباتية قابلة للتحلل البيولوجي، تتوفر بكثرة في المناطق الصحراوية، وعلى وجه الخصوص ألياف أوراق نخيل التمر، والتي تم استخدامها كعنصر تدعيم رئيسي داخل هذه المركبات الجديدة لتعزيز أدائها الميكانيكي والبيئي.

تم استعمال بولي كلوريد الفينيل (PVC) المتوفر في شركة صناعة الكوابل ببسكرة بمختلف الأنواع المتوفرة PVC-SE1200 و COMPOUND PVCTI2 وكذلك مادة PVC 4000 M بقيمة K تساوي 2-67، بالإضافة إلى

الملدن بيس (2-إيثيل هكسيل) تيرفثالات (DOP) ، وحببيات البولي إيثيلين منخفض الكثافة (LDPE) ذات نقطة انصهار تبلغ 129 °C والإنتالبي النوعي للانصهار يقدر بـ 106Jou/g ، من الشركة الوطنية للبتروكيماويات (ENIP) الواقعة بمدينة سكيكدة، الجزائر.

أما ستيرات الكالسيوم والزنك (Ca/Zn stearate) فقد تم اقتناؤها من شركة Nanjing OMYA Fine Chemical Ind. Co. Ltd. بمدينة نانجينغ، الصين.

بالإضافة إلى ذلك، تم استخدام مطاط NBR المشترك الذي يحتوي على نسبة 32% وزنا من الأكريلونيتريل (ACN)، وهيدروكسيد الصوديوم (NaOH) ، وحمض الخليك (CH₃COOH) ، والتي تم الحصول عليها من شركة Sigma Aldrich، فرنسا.

أما الياف أوراق نخيل التمر فقد تم جمعها محليًا من واحات بسكرة الواقعة في جنوب الجزائر.

2.1. تحضير الياف أوراق نخيل التمر

تم جمع أوراق النخيل الخام مباشرة من منطقة بسكرة الواقعة جنوب الجزائر، وهي منطقة معروفة بإنتاج النخيل وجودة تمورها. وقد خضعت هذه الأوراق إلى سلسلة من المعالجات الميكانيكية والفيزيائية من أجل استخلاص الألياف وتحضيرها للاستخدام في تحضير المواد المركبة، وذلك وفق الخطوات التالية:

- **الغسل:** تم غسل أوراق النخيل جيدًا أولاً بالماء العادي لإزالة الأتربة والرواسب السطحية، ثم بالماء المقطر للتأكد من إزالة الشوائب الدقيقة والعالقة بها، مما يساهم في تحسين جودة الألياف وتقليل الشوائب المؤثرة على خصائص المركب النهائي.
- **التجفيف:** جُففت الأوراق المغسولة في الهواء الطلق لمدة 24 ساعة لتقليل محتواها الرطوبي تدريجيًا، ثم تم إدخالها إلى فرن التجفيف على درجة حرارة 80°C لمدة ساعتين لضمان جفافها التام وسهولة عملية الطحن اللاحقة.
- **الطحن:** تم طحن الأوراق الجافة باستخدام مطحنة كهربائية للحصول على ألياف خشنة قابلة للمعالجة.
- **الغربلة:** خضعت الألياف الناتجة لعملية غربلة دقيقة عبر عدة مراحل باستخدام مناخل مختلفة الأقطار، وذلك للحصول على حببيات متجانسة من حيث الحجم، وهو ما يساهم في توزيع الألياف داخل المصفوفة البوليمرية لاحقًا.
- **التقطيع:** تم قص الألياف يدويًا أو ميكانيكيًا إلى أطوال محددة حسب متطلبات التجربة والمواصفات التقنية للمركب.

- **التقسيم:** تم تقسيم كمية الألياف المحضرة إلى ثلاث مجموعات رئيسية بهدف دراسة تأثير المعالجات الكيميائية المختلفة، كما يلي:

- كمية من الياف (DPLF) الخام غير المعالجة كيميائياً تُستخدم كمرجع.
- كمية أخرى مخصصة للمعالجة بمحلول هيدروكسيد الصوديوم (NaOH) لتحسين خصائص السطح وزيادة التفاعل مع المصفوفة البوليمرية.
- كمية ثالثة ستُعالج بمادة السيلان لتحسين الترابط بين الألياف والمصفوفة وزيادة مقاومة امتصاص الرطوبة.

- **إعادة الطحن والغربلة:** بعد عمليات المعالجة، تمت إعادة طحن الألياف باستخدام مطحنة كهربائية للحصول على حجم دقيق ومتجانس، تلتها عملية الغربلة مرة أخرى لضمان توحيد حجم الألياف واكتمال التحضير النهائي.

تُعد هذه المراحل ضرورية لتحضير الألياف بشكل مثالي لاستعمالها كمادة تدعيم طبيعية داخل المصفوفة البوليمرية، مما يساهم في تحسين الخواص الميكانيكية والفيزيائية للمواد المركبة



الشكل: 1.III مراحل تحضير مسحوق الياف ور نخيل التمر

3.1. المعالجة الكيميائية لألياف أوراق نخيل التمر

1.3.1. المعالجة بمحلول هيدروكسيد الصوديوم (NaOH)

تم وزن 300g من الياف أوراق نخيل التمر المقطعة مسبقاً إلى أطوال مناسبة، ثم غمرها بالكامل في 2 لتر من محلول هيدروكسيد الصوديوم (NaOH) بتركيز 6%، وذلك عند درجة حرارة 30°C مع مراعاة الحفاظ على نسبة ثابتة بين كمية الألياف وحجم المحلول لضمان التجانس وفعالية المعالجة.

تمت عملية النقع في المحلول القلوي لمدة 24 ساعة، حيث تعمل القلوية على إزالة الشوائب، المواد اللينينية، وبعض المكونات غير السليلوزية من سطح الألياف، مما يساهم في تحسين خشونة السطح وزيادة التفاعل بين الألياف والمصفوفة البوليمرية عند استخدامها لاحقاً في تركيب المواد المركبة.

بعد انتهاء فترة النقع، تم شطف الألياف جيداً عدة مرات باستخدام الماء العادي أولاً لإزالة الجزء الأكبر من بقايا المحلول القلوي، ثم بالماء المقطر للتأكد من التخلص التام من أي آثار متبقية لمادة NaOH، وذلك للحفاظ على سلامة الألياف ومنع أي تأثير سلبي على خواصها.

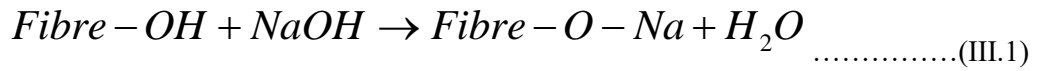
عقب عملية الغسل، تم تجفيف الألياف على مرحلتين:

- التجفيف الأولي في درجة حرارة الغرفة لمدة 48 ساعة لتقليل نسبة الرطوبة تدريجياً.
- التجفيف النهائي داخل فرن تجفيف بدرجة حرارة 80°C لمدة 5 ساعات لضمان التخلص الكامل من الرطوبة والوصول بالألياف إلى حالة مستقرة.

وفي المرحلة الأخيرة، خضعت الألياف إلى عملية الطحن باستخدام مطحنة كهربائية حتى الوصول إلى حجم الحبيبات المناسب، تلتها عملية الغزيلة للحصول على ألياف متجانسة من حيث الحجم، جاهزة للاستعمال في تحضير المواد المركبة.

هذه المعالجة القلوية تُعد من المراحل المهمة لتحسين خواص الألياف وزيادة قدرتها على الارتباط بالمصفوفة البوليمرية، مما ينعكس إيجاباً على الأداء الميكانيكي للمادة المركبة النهائية.

يُعطى التفاعل كما يلي : يتفاعل جذر الهيدروكسيل الموجود على سطح الألياف مع محلول هيدروكسيد الصوديوم لتشكيل مجموعة ألياف O-Na مع تحرير جزيء ماء [77]





الشكل : 2.III الألياف المعالجة بهيدروكسيد الصوديوم (NaOH)

2.3.1. المعالجة بواسطة (3- triméthoxysilyl) سيلان مع الميثانول وحمض الأسيتيك

تم تحضير محلول المعالجة بالسيلان من خلال مزج 656ml من الميثانول مع 73ml من الماء المقطر في وعاء مناسب، ثم تمت إضافة 7.3ml من مادة (3-triméthoxysilyl) silane مع التحريك المستمر لضمان التجانس التام. بعد ذلك، تم تعديل درجة الحموضة (pH) تدريجياً عبر إضافة حمض الأسيتيك حتى الوصول إلى $pH = 4$ ، مع استمرار التحريك لمدة 15min عند درجة حرارة الغرفة.

عقب تحضير المحلول، تم غمر الألياف المجففة مسبقاً في هذا الوسط التفاعلي مع الاستمرار في التحريك المستمر لمدة 3 ساعات عند درجة حرارة $40^{\circ}C$ ، وذلك لضمان التفاعل الكامل بين جزيئات السيلان ومجموعات الهيدروكسيل الموجودة على سطح الألياف.

بعد انتهاء مدة المعالجة، تم ترشيح الألياف للتخلص من المحلول الزائد، ثم خضعت لعملية تجفيف داخل فرن بدرجة حرارة $80^{\circ}C$ لمدة 24 ساعة لضمان إزالة الرطوبة والحصول على ألياف مستقرة كيميائياً.

في المرحلة الأخيرة، تم طحن الألياف باستخدام مطحنة كهربائية تلاها غربلة دقيقة للحصول على حبيبات متجانسة الحجم، لتكون الألياف بذلك جاهزة للاستخدام في تحضير المواد المركبة.

هذه المعالجة بالسيلان تهدف إلى تحسين التوافق بين الألياف والمصفوفة البوليمرية من خلال تكوين روابط تساهمية عند الواجهة، مما يعزز من الخصائص الميكانيكية والفيزيائية للمواد المركبة المحضرة.

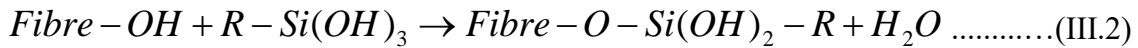


الشكل : 3.III الألياف المعالجة بالسيلان

السيلان هو مركب كيميائي صيغته الكيميائية SiH_4 . تستخدم مركبات السيلان كعوامل ربط لتحسين استقرار المواد المركبة، حيث تساعد على تعزيز الالتصاق بين الألياف والمصفوفة البوليمرية، كما تعمل على تقليل عدد المجموعات الهيدروكسيلية للسيليولوز عند الواجهة بين الألياف والمصفوفة [79-78]

إن وجود الرطوبة يؤدي إلى تحلل مجموعات الألكوكسي القابلة للتحلل المائي لتشكيل السيلانولات، والتي تتفاعل بدورها مع المجموعات الهيدروكسيلية الموجودة في الألياف لتكوين روابط تساهمية مستقرة مع الجدار الخلوي [80] وبهذا، تساهم السلاسل الهيدروكربونية (R) الناتجة عن تطبيق السيلان في الحد من انتفاخ الألياف، حيث تنتشر داخل المصفوفة لتشكل شبكة متشابكة [81]

تعطى معادلة التفاعل الكيميائي كما يلي [77]



4.1. تحضير مسحوق نوى التمر

تُعد نوى التمر من المخلفات الزراعية الغنية بالمواد العضوية، ويتم تحضيرها وفق سلسلة من المراحل الدقيقة للحصول على مسحوق ناعم ومتجانس يمكن استخدامه كمادة مألئة في تحضير المواد المركبة. وتتمثل هذه المراحل فيما يلي:

- **فصل اللب عن النواة:** تُفصل نواة التمر عن اللب بطريقة يدوية سهلة وسريعة، نظرًا لسهولة هذه العملية نتيجة انفصال النواة بشكل طبيعي داخل الثمرة.

- **الغسل:** تُغسل النوى جيدًا بالماء الساخن لإزالة بقايا اللب العالقة والشوائب المختلفة التي قد تؤثر على جودة المادة الناتجة. تهدف هذه الخطوة إلى تنظيف النوى بشكل كامل لضمان عدم وجود أي ملوثات أو مواد عضوية قد تؤثر على التفاعلات داخل المصفوفة البوليمرية لاحقًا.
 - **التجفيف:** بعد الغسل، تُترك النوى لتجف في الهواء الطلق لفترة زمنية مناسبة، وذلك لتقليل نسبة الرطوبة وضمان سهولة عملية الطحن. وقد يتم تجفيفها لاحقًا داخل فرن بدرجة حرارة معتدلة لضمان جفافها التام وتحضيرها للطحن.
 - **الطحن:** تُطحن النوى على مرحلتين؛ حيث تُجرى عملية الطحن الأولى باستخدام مطحنة ذات أحجار طحن قوية لتحويل النوى إلى أجزاء صغيرة. ثم تُعاد هذه الأجزاء للطحن باستخدام خلاط كهربائي عالي السرعة للحصول على مسحوق ناعم ومتجانس.
 - **الغربلة:** يتم غربلة المسحوق الناتج باستخدام سلسلة من المناخل ذات أقطار مختلفة، بهدف الحصول على حجم حبيبات موحد حسب متطلبات التجربة أو الاستخدام، مما يساهم في تحسين خصائص المادة المركبة من حيث التجانس والتماسك.
- تضمن هذه المراحل تحضير مسحوق نوى التمر بجودة عالية، ليكون جاهزًا للاستعمال في تصنيع المواد المركبة كبديل طبيعي وفعال للمواد المألوفة التقليدية، مما يعزز من الخصائص الميكانيكية والبيئية للمنتج النهائي الشكل:III.4 .



الشكل : III.4 مسحوق نوى التمر المحضر

5.1. تحضير مسحوق القهوة

تتم عملية تحضير مسحوق تفل القهوة وفق نفس الخطوات والمعايير المعتمدة لتحضير باقي المواد الطبيعية المستخدمة في تعزيز المواد المركبة، وذلك لضمان جودة المادة المحضرة وتجانسها مع باقي مكونات الخليط. وتشمل هذه العملية المراحل التالية:

الغسل: يتم غسل تفل القهوة جيداً باستخدام الماء الساخن لإزالة كافة الشوائب والأوساخ العالقة، وكذلك التخلص من الزيوت أو المواد العضوية المتبقية التي قد تؤثر سلباً على خصائص المادة المركبة. تساعد هذه الخطوة في تحسين نقاء المادة الخام وضمان خلوها من أية ملوثات قد تعيق عملية الدمج مع المصفوفة البوليمرية لاحقاً.

التجفيف: بعد الغسل، يُترك تفل القهوة ليُجف في الهواء الطلق لفترة زمنية مناسبة حتى يتم التخلص من أكبر قدر ممكن من الرطوبة. ثم يُجفف داخل فرن بدرجة حرارة مناسبة لضمان جفافه التام، حيث تُعتبر هذه الخطوة ضرورية لتفادي حدوث تفاعلات غير مرغوبة أو ظهور فراغات أثناء عملية القولبة.

الطحن: يتم طحن تفل القهوة المجفف باستخدام مطحنة كهربائية للحصول على مسحوق ناعم ومتجانس، مما يسهل دمجها لاحقاً مع المصفوفة البوليمرية ويضمن توزيعاً جيداً داخل الخليط.

النخل (التصفية): وأخيراً، يتم نخل المسحوق الناتج باستخدام غرابيل ذات أقطار مختلفة للحصول على حجم جسيمات موحد حسب الحاجة، ما يُساهم في تحسين تماسك وتجانس المادة المركبة ويضمن جودة الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للمنتج النهائي.

تُعتبر هذه المراحل ضرورية وأساسية لتحضير تفل القهوة كمادة مالئة طبيعية فعالة يمكن دمجها بسهولة داخل المصفوفة البوليمرية مثل PVC، مما يُعزز من الخصائص الميكانيكية والبيئية للمواد المركبة

2. تحضير المواد المركبة

1.2. تحضير الخلائط

في إطار هذه الدراسة، تم العمل على تحضير مواد مركبة تعتمد على مادة بولي كلوريد الفينيل (PVC) كمصفوفة بوليمرية، مدعمة بمواد طبيعية ذات مصدر نباتي تتمثل في الياف اوراق نخيل التمر المعالجة (DPLF) نوى التمر ومسحوق القهوة، وذلك بهدف استبدال جزء من المواد التقليدية بحشوات بيئية ومجددة، مما يساهم في تحسين خصائص المواد المركبة وتقليل الكلفة البيئية.

تم إعداد الخلائط وفق تراكيب محددة مسبقاً، حيث تختلف نسبة الألياف ومسحوق القهوة المضافة إلى مصفوفة بولي كلوريد الفينيل (PVC) حسب التركيبة، وذلك من أجل دراسة تأثير كل مكون بشكل منفرد ومشترك على سلوك المادة المركبة.

الفصل الثالث: التقنيات التجريبية لتحضير المواد المركبة

وقد تم توزيع العينات وفق جدول تركيبي يوضح نسب كل من بولي كلوريد الفينيل (PVC) والألياف ومسحوق القهوة ونوى التمر بشكل دقيق.

ولضمان تحضير خلطات متجانسة، تم خلط مكونات كل تركيبة بشكل جيد باستخدام خلاط ميكانيكي لضمان التوزيع المتساوي للألياف ومسحوق القهوة داخل مصفوفة البوليمر. هذه المرحلة ضرورية لتحقيق التجانس المطلوب ومنع تكتل الألياف أو المسحوق في جزء معين من العينة، الأمر الذي قد يؤثر سلباً على الخصائص النهائية للمواد المركبة.

بعد تحضير الخلائط، تم جمع كل تركيبة على حدة تمهيداً لمرحلة القولية والمعالجة الحرارية، والتي تسمح بتشكيل العينات حسب الأبعاد والشكل المرغوب فيهما لإجراء مختلف الاختبارات الفيزيائية والميكانيكية لاحقاً.

وتهدف هذه الدراسة إلى تقييم مدى تأثير كل من الياف اوراق نخيل التمر ومسحوق القهوة، سواء بشكل منفرد أو مجتمع، على الخواص الميكانيكية مثل مقاومة الشد، معامل المرونة، وكذلك على الخصائص الفيزيائية كقابلية امتصاص الماء والاستقرار الحراري لهذه المواد المركبة .

الجدول : 1.III التراكيب المختلفة المعتمدة لتحضير العينات

التركيبات الوزنية الألياف/PVC	رمز الخليط	رقم الخليط
PVC 100%	S101	1
PVC 97.5%DPLF2.5% (NT)	S102	2
PVC 95%DPLF5% (NT)	S103	3
PVC 90%DPLF10% (NT)	S104	4
PVC85%DPLF15% (NT)	S105	5
PVC80%DPLF20%(NT)	S106	6
PVC70%DPLF30%(NT)	S107	7
PVC 97.5%DPLF2.5% (TNaOH)	S108	8
PVC 95%DPLF5% (TNaOH)	S109	9
PVC 90%DPLF10% (TNaOH)	S110	10
PVC85%DPLF15% (TNaOH)	S111	11
Pvc 80%DPLF20% (TNaOH)	S112	12
Pvc70%DPLF30% (TNaOH)	S113	13
PVC 97.5%DPLF2.5% (TSILANE)	S114	14
PVC 95%DPLF5% (TSILANE)	S115	15
PVC 90%DPLF10% (TSILANE)	S116	16

PVC85%DPLF15%(TSILANE)	S117	17
PVC97.5 CAFE2.5%(NT)	S118	18
PVC95 CAFE 5%(NT)	S119	19
PVC90 CAFE 10%(NT)	S120	20
PVC85 CAFE 15%(NT)	S121	21
PVC75 CAFE 25%(NT)	S122	22
Pvc 80%DPLF20% (TSILANE)	S123	23
PVC 90%ND10% (NT)	S124	24
PVC 85%ND15% (NT)	S125	25
PVC 70%ND30% (NT)	S126	26
PVC 50%ND50% (NT)	S127	27
LDPE 80 / PVC 20	S201	28
LDPE 50 / PVC 50	S202	29
LDPE 20 / PVC 80	S203	30
LDPE 80 / PVC 20 / DPLF 10	S204	31
LDPE 50 / PVC 50 / DPLF 10	S205	32
LDPE 20 / PVC 80 / DPLF 10	S206	33
LDPE 80 / PVC 20 / DPLF 20	S207	34
LDPE 50 / PVC 50 / DPLF 20	S208	35
LDPE 20 / PVC 80 / DPLF 20	S209	36
LDPE 80 / PVC 20 / DPLF 30	S210	37
LDPE 50 / PVC 50 / DPLF 30	S211	38
LDPE 20 / PVC 80 / DPLF 30	S212	39
PVC20 /LDPE /80	C0=S201	40
PVC/LDPE/NBR20 /80/10	C1	41
TDPF/PVC/LDPE/NBR 10/20/80/10	C2	42
TDPF/PVC/LDPE/NBR 20/20/80/10	C3	43
TDPF/PVC/LDPE/NBR 30/20/80/10	C4	44

2.2. تحضير صفائح مركبة من الياف اوراق نخيل التمر ونوى التمر

في هذه المرحلة، تم استخدام الخلطات المحضرة من الياف اوراق نخيل التمر المعالجة ومسحوق نوى التمر مع مادة البولي كلوريد الفينيل (PVC) من أجل إنتاج صفائح مركبة. تمت عملية التحضير باستخدام جهاز التقويم (Calandre) من

نوع Schwabenthan Polymix 200p، الشكل: III.5 والذي يتميز بوجود أسطوانتين معدنيتين قويتين يتم التحكم بدقة في درجة حرارتهما من خلال نظام تحكم إلكتروني، مما يسمح بالحصول على خلط متجانس وتشكيل مثالي للمادة المركبة.



الشكل : III.5 آلة التقويم Schwabenthan Polymix 200

1.2.2. مرحلة التقويم: (Calandrage)

خلال هذه المرحلة، تم إدخال الخليط بعناية بين الأسطوانتين الدوارتين اللتين تضغطان الخليط بقوة مع التحكم في سرعة الدوران ودرجة الحرارة. وقد تم ضبط درجة حرارة الأسطوانات على 160°C ، وهي الدرجة المثالية لمعالجة مادة الـ PVC وضمان ذوبانها واندماجها الكامل مع الألياف والمكونات النباتية.

استمرت عملية التقويم لمدة 10 دقائق، حيث تم خلالها استخدام قفازات خاصة مقاومة للحرارة لضمان سلامة الباحث أثناء التعامل مع الأسطح الساخنة. خلال هذه المدة، يبدأ البوليمر في الانصهار تدريجياً ويغلف الألياف الطبيعية بشكل متجانس، مما يعزز من تماسك البنية ويمنح المادة المركبة خواص ميكانيكية محسنة.

مع نهاية هذه المرحلة، تم الحصول على شريط رقيق (فيلم) متماسك ومتجانس من الخليط، حيث يتم إخراجها بعناية وتركه ليبرد في الهواء الطلق حتى يتصلب تدريجياً وتثبت بنيته الشكل: III.6



الشكل : 6.III تحضير أغشية المواد المركبة.

2.2.2. مرحلة التشكيل: (Moulage)

بعد مرحلة التقويم، تم تقطيع الشريط الناتج إلى قطع صغيرة تناسب حجم القالب المعدني المخصص للتشكيل. تم وضع هذه القطع بين صفيحتين من الألمنيوم لضمان توزيع متساوٍ للضغط والحرارة خلال عملية الكبس.

تم إدخال القالب في مكبس حراري، الشكل: 7.III حيث خضعت العينات لدرجة حرارة 160°C مع تطبيق ضغط عالٍ يصل إلى 300 بار لمدة 15 دقيقة. هذه الظروف تضمن الانصهار الكامل للمادة البوليمرية واندماجها التام مع الألياف ومسحوق نوى التمر، مع تقليل احتمالية تكون الفراغات أو فقاعات الهواء داخل البنية المركبة.



الشكل 7.III: آلة التشكيل الهيدروليكية Schwabenthan Polystat 300 S

بعد انتهاء مدة الضغط والحرارة، تم ترك القالب ليبرد تدريجياً لمدة 30 دقيقة، مما يسمح بتصلب المادة والحصول على صفائح مركبة متماسكة وذات سطح منتظم وجاهزة للاستخدام أو لإجراء الاختبارات الشكل: III.8



الشكل 8.III : الصفائح المحضرة

3.2. تحضير صفائح مسحوق القهوة

بنفس المنهجية والدقة، تم تحضير صفائح مركبة باستخدام مسحوق القهوة كعنصر داعم داخل مصفوفة الـ PVC. تم اتباع نفس مراحل التقويم والتشكيل السابقة، حيث خضعت خلطات مسحوق القهوة لنفس ظروف المعالجة الحرارية والميكانيكية لضمان الحصول على صفائح ذات خصائص مماثلة وتسهيل عملية المقارنة بين تأثير كل من الياف اوراق نخيل التمر ومسحوق القهوة على خصائص المادة المركبة.

3. التقنيات المستخدمة لدراسة خصائص المواد المركبة

من أجل تقييم الأداء الميكانيكي والفيزيائي للصفائح المركبة المحضرة والمعززة باللياف اوراق نخيل التمر و نوى التمر ومسحوق القهوة، تم اعتماد مجموعة من التقنيات والاختبارات المخبرية المتطورة، التي تسمح بفحص مختلف الخواص الضرورية لضمان جودة المنتج النهائي وملاءمته للتطبيقات المختلفة. تتلخص هذه التقنيات فيما يلي:

- الاختبارات الميكانيكية: وتشمل اختبار الشد الذي يسمح بتحديد مقاومة المادة للقوى الخارجية، بالإضافة إلى اختبار الصلادة وفق مقياس Shore A الذي يقيس صلابة السطح ومقاومته للتشوه.
- الخصائص الفيزيائية: حيث تم إجراء اختبار امتصاص الماء لتقييم مدى تأثير المواد المركبة بالرطوبة، وهو اختبار مهم جدًا خاصةً للمواد الطبيعية التي تحتوي على ألياف أو مكونات نباتية قد تمتص الماء وتؤثر على الأداء العام للمادة.
- التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء بتقنية فورييه (FTIR) وتستخدم هذه التقنية لتحليل البنية الكيميائية للمركب والتعرف على الروابط والوظائف الكيميائية الموجودة فيه، مما يسمح بالتأكد من حدوث التفاعلات الكيميائية اللازمة بين البوليمر والألياف أو الحشو.
- التحليل الميكانيكي الديناميكي (DMA) وهو اختبار ضروري لفهم سلوك المادة المركبة تحت تأثير الأحمال الديناميكية وتحديد خصائص مثل معامل التخزين ومعامل الفقد، بالإضافة إلى دراسة تأثير درجات الحرارة المختلفة على الأداء الميكانيكي.
- المجهر الإلكتروني الماسح (MEB) تم اللجوء إلى هذه التقنية المتقدمة من أجل تحليل البنية المجهرية للعينات ودراسة توزيع الألياف أو الحشو داخل مصفوفة البوليمر، وكذلك الكشف عن أي فراغات أو تشققات قد تؤثر سلبًا على جودة المادة المركبة.

1.3. حيود الأشعة السينية: (XRD)

تُعتبر تقنية حيود الأشعة السينية من أبرز وأدق التقنيات الفيزيائية المستخدمة على نطاق واسع في مجال تحليل المواد ودراسة خصائصها البلورية والبلورية. تعتمد هذه الطريقة على مبدأ تفاعل الأشعة السينية ذات الطول الموجي المعروف مع الشبكات البلورية الدقيقة داخل المادة، حيث تقوم الذرات المرتبة بشكل دوري داخل البنية البلورية ببعثرة الأشعة السينية الساقطة عليها وفق زوايا محددة. وينتج عن هذا التفاعل نمط مميز من الانعكاسات يُعرف بنمط الحيود، يمكن تحليله لاستنتاج العديد من الخصائص البلورية.

تتيح هذه التقنية تحديد درجة التبلور داخل المادة بدقة عالية، حيث يمكن من خلالها قياس نسبة المناطق البلورية مقارنة بالمناطق غير المتبلورة، بالإضافة إلى تحديد نوع الطور البلوري وترتيب السلاسل الجزيئية في البنية الداخلية للعينات. كما تُمكن الباحث من حساب متوسط حجم البلورات أو الحبيبات داخل المادة، وهو عامل مهم جداً في تفسير الخواص الميكانيكية والفيزيائية للمواد المدروسة.

في إطار هذه الدراسة، تم إجراء اختبار حيود الأشعة السينية على العينات المحضرة باستخدام جهاز حديث ومتطور من نوع Bruker D8، والذي يُعد من الأجهزة ذات الكفاءة العالية والدقة المتناهية في هذا المجال. تم ضبط الجهاز على إصدار شعاع أحادي اللون من الأشعة السينية مركز بدقة على خط $K\alpha 1$ للنحاس، الذي يتميز بطول موجي يبلغ 1.54184 أنغستروم، وهي قيمة مثالية لتحليل المواد ذات التركيب البلوري المعقد.

خلال التجربة، تم تسليط الشعاع بدقة على العينات، ثم تسجيل شدة الأشعة المنعكسة وفقاً لزاوية الانعكاس (2θ) التي تم ضبطها لتتراوح بين 6 درجات و70 درجة، وهي منطقة واسعة تغطي أغلب الزوايا التي تظهر فيها قمم الحيود المهمة في المواد المدروسة. وقد تم تسجيل هذه النتائج باستخدام برنامج خاص يمكن من تحليل البيانات واستخراج معلومات تفصيلية حول بنية العينات، مثل تحديد الطور البلوري، وحساب معدل التبلور، بالإضافة إلى تقدير حجم البلورات أو الحبيبات داخل كل عينة. [82]

إن نتائج هذا التحليل تُعد ضرورية لفهم العلاقة بين البنية البلورية والخصائص الفيزيائية والميكانيكية للعينات، خاصة في المواد البوليميرية أو المركبة التي تتأثر خصائصها بشكل مباشر بنسبة التبلور وحجم الحبيبات الداخلة في تركيبها.

2.3. التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه (FTIR)

1.2.3. تعريف التقنية

يُعد التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه (FTIR) من أهم التقنيات التحليلية التي تعتمد على مبدأ امتصاص المادة المدروسة للأشعة تحت الحمراء. ويُمكن تطبيق هذا التحليل على العينات الغازية، الصلبة أو السائلة.

تكمُن أهمية هذه التقنية في قدرتها على تحديد المجموعات الوظيفية داخل المادة من خلال رصد الاهتزازات المميزة للروابط الكيميائية بين الذرات، مما يسمح بدراسة التركيب الجزيئي بشكل نوعي وكمي. وتتمثل فائدة هذه التقنية خصوصاً عند تحليل الجزيئات البيولوجية مثل الأحماض النووية، والدهون، والكربوهيدرات، والبروتينات، حيث تُظهر اختلافات واضحة في الأطياف نتيجة تنوع المكونات الماكرو جزيئية.

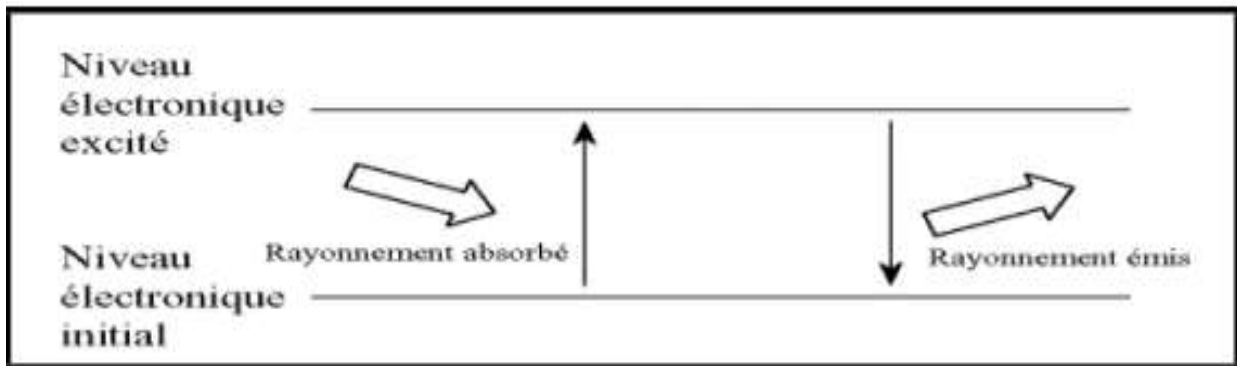
وتجدر الإشارة إلى أن امتصاص الأشعة تحت الحمراء يحدث فقط في الجزيئات التي تمتلك تغيراً في عزمها القطبي أثناء الاهتزاز، إذ تتفاعل الأشعة مع الروابط الكيميائية فتُمتص أطوال موجية معينة تتناسب مع ترددات الاهتزاز لتلك الروابط، وهو ما يُنتج طيفاً فريداً يُمثل "البصمة الطيفية" للمادة.

2.2.3. مبدأ العمل

يعتمد جهاز التحليل الطيفي (SHIMADZU FTIR-8400S) على مبدأ مقياس التداخل لمايكلسون، الذي يُعد الجزء الرئيسي للجهاز، ويتكوّن من :

- مرآة ثابتة (M2)
- مرآة متحركة (M1)
- فاصل للأشعة

يتم توجيه شعاع الأشعة تحت الحمراء إلى فاصل الأشعة الذي يقسمه إلى نصفين؛ النصف الأول يُرسل إلى المرآة المتحركة M1 والنصف الآخر إلى المرآة الثابتة M2. بعد انعكاس الشعاعين، يجتمعان مجدداً عند فاصل الأشعة حيث يحدث بينهما تداخل ضوئي الشكل : 9.III .



الشكل : 9.III مبدأ ظاهرة امتصاص وإصدار الفوتونات في مجال الأشعة تحت الحمراء

يؤدي الاختلاف في المسار البصري بين الشعاعين، الناتج عن حركة المرآة المتحركة، إلى ما يُعرف بالـ "الاختلاف الطوري" أو "التداخل"، مما يُسبب تغيرات دورية في شدة الإشارة حسب تردد الشعاع وموضع المرآة المتحركة.

بعدها، يتم توجيه الشعاع الناتج إلى العينة ومن ثم إلى كاشف حساس يقيس كمية الأشعة الممتصة من طرف المادة المدروسة.

3.2.3. المجال الطيفي

يغطي المجال الطيفي للأشعة تحت الحمراء نطاقاً واسعاً يتراوح بين : 0.8 إلى 1000 μm وينقسم إلى ثلاث مناطق رئيسية :

- المنطقة القريبة (0.8 إلى 2.5 μm أو 4000 – 12500 cm^{-1})
- المنطقة المتوسطة (2.5 إلى 25 μm أو 400 – 4000 cm^{-1}) وهي الأكثر استخداماً لدراسة المجموعات الوظيفية.
- المنطقة البعيدة (25 إلى 1000 μm أو 10 – 400 cm^{-1})

يتم التعبير عن الأطياف الناتجة بعلاقة الامتصاصية (A) بدلالة العدد الموجي (ν) , حيث : $\nu(\text{m}^{-1}) = \frac{1}{\lambda(\text{m})}$

ولكن لوحد المتعامل بها هي (cm^{-1}) لذلك فإن عبارته $\nu(\text{cm}^{-1}) = \frac{10^4}{\lambda(\mu\text{m})}$ حيث تمثل λ الطول الموجي بالـ μm .

4.2.3. منهجية تحضير العينات الصلبة

لتطبيق تقنية FTIR على المواد الصلبة، يتم إعداد العينات وفق الخطوات التالية :

- تُطحن العينة جيداً حتى تصبح مسحوقاً ناعماً.
- تُخلط كمية صغيرة من العينة (حوالي 0.001 g) بنسبة 5% مع مادة شفافة في مجال الأشعة تحت الحمراء وهي بروميد البوتاسيوم (KBr) بكمية 0.2 g بنسبة 95%.
- يُضغط الخليط باستخدام مكبس خاص للحصول على قرص شفاف صلب يُسمح بمرور الأشعة تحته، الشكل: III.10 .



الشكل: 10.III مراحل تحضير العينة وخلطها بـ KBr

5.2.3. مراحل القياس

1. تثبيت القرص الشفاف داخل الجهاز الشكل: 11.III في مسار شعاع الأشعة تحت الحمراء.
2. تمرير الأشعة عبر العينة ودراسة تفاعلها مع الروابط الكيميائية للمركبات المكونة للعينة.
3. تسجيل الطيف الناتج الذي يُظهر الامتصاصية عند كل عدد موجي.
4. تحليل الأطياف لتحديد المجموعات الوظيفية والتغيرات التركيبية داخل المادة.



الشكل : 11.III جهاز التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه.

تُعد تقنية التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه أداة فعالة لفحص المواد وتحديد المجموعات الوظيفية والتركيبات الكيميائية بدقة عالية، ما يجعلها ضرورية في مختلف مجالات البحث العلمي خاصة عند دراسة المواد المركبة، البوليمرات، والألياف الطبيعية مثلًا الياف اوراق نخيل التمر ونوى التمر.

3.3. اختبار امتصاص الماء

يُعتبر امتصاص الماء من أهم الخصائص الفيزيائية التي تحدد جودة المواد ومدى قابليتها للتأثر بالرطوبة، خاصة عندما يتعلق الأمر بالبوليمرات والمواد المركبة والمواد الطبيعية مثل الأخشاب. إذ يؤثر امتصاص الماء بشكل مباشر على الأداء الميكانيكي وطول العمر الافتراضي للمواد عند استخدامها في البيئات الرطبة أو المعرضة للماء.

لذلك، تم إجراء اختبار امتصاص الماء على العينات المركبة المحضرة من الياف اوراق نخيل التمر ونوى التمر ومسحوق القهوة والمعززة بمادة PVC ، بهدف تقييم مدى قدرتها على امتصاص الماء وتأثر خصائصها بوجود الرطوبة

1.3.3. خطوات تنفيذ اختبار امتصاص الماء

الخطوة الأولى تم تجفيف العينات جيداً في الفرن لضمان خلوها التام من أي رطوبة، ثم تم وزنها باستخدام ميزان إلكتروني دقيق جداً يسمح بقياس الكتلة حتى أربعة منازل عشرية ($0.0001g$) الشكل : III.12 ، وتم تسجيل الكتلة الابتدائية لكل عينة تحت الرمز (m_0).



الشكل : III.12 عملية وزن العينات (m) بعد الغمر في الماء بميزان تحليلي من نوع KERN ABT 320-4M بدقة $0.1mg$.

الخطوة الثانية وُضعت العينات في ببشر يحتوي على ماء مقطر بدرجة حرارة الغرفة لضمان عدم وجود أي شوائب قد تؤثر على نتائج القياس.

الخطوة الثالثة تركت العينات مغمورة بالكامل داخل الماء لفترات زمنية محددة مسبقاً (24 ساعة، 48 ساعة، 72 ساعة...) من أجل متابعة تطور امتصاص الماء مع مرور الوقت.

الخطوة الرابعة بعد انقضاء كل فترة زمنية، يتم إخراج العينات واحدة تلو الأخرى وتجفيف سطحها الخارجي برفق باستخدام قطعة قماش أو ورق ماص دون الضغط عليها أو التأثير على تركيبها الداخلي.

الخطوة الخامسة فور تجفيف السطح، تُوزن العينة مباشرة لتسجيل كتلتها بعد الامتصاص

الخطوة السادسة تُعاد العينة إلى الماء وتُكرر عملية الوزن عند كل فترة زمنية محددة حتى تصل العينة إلى مرحلة التشبع، أي عندما تستقر قيمة الوزن ولا تتغير مع مرور الوقت.

2.3.3. طريقة حساب نسبة امتصاص الماء

لحساب كمية الماء الممتصة، يتم حساب التغير النسبي في الكتلة بين الحالة الجافة والحالة المبللة باستخدام العلاقة

التالية

$$\frac{\Delta m}{m} = \frac{m - m_0}{m_0} * 100(\%) \dots\dots\dots(III.3)$$

حيث:

- m_0 الكتلة الابتدائية للعينة قبل الغمر (g).
- m الكتلة النهائية للعينة بعد الغمر (g).
- $\Delta m(\%)$ نسبة امتصاص الماء المئوية.

3.3.3. الهدف من الاختبار

*تقييم مدى قدرة العينات المركبة على مقاومة امتصاص الماء.

*تحديد تأثير المعالجات الكيميائية المختلفة NaOH (أو السيلان) على تقليل امتصاص الماء وتحسين الخصائص الفيزيائية للمواد المركبة.

* دراسة تأثير وجود الألياف أو مسحوق القهوة داخل المصفوفة البوليمرية على سلوك المادة عند تعرضها للرطوبة.

يساعد هذا الاختبار في إعطاء فكرة دقيقة حول مدى ملائمة هذه المواد المركبة للاستخدام في التطبيقات التي تتعرض للبيئات الرطبة أو التي تتطلب مقاومة جيدة للماء، مثل صناعة الألواح والمواد الإنشائية والديكور الداخلي

4.3. الاختبارات الميكانيكية

1.4.3. اختبار الشد (Tensile Test)

يعتبر اختبار الشد من أهم وأشهر الاختبارات الميكانيكية التي يتم إجراؤها لدراسة سلوك المواد عند تعرضها لقوى الشد. الهدف الرئيسي من هذا الاختبار هو قياس قدرة المادة على مقاومة الانكسار والتمزق تحت تأثير حمل متزايد. ويتيح هذا الاختبار الحصول على بيانات دقيقة حول الخصائص التالية:

- معامل المرونة (E) الذي يعبر عن صلابة المادة ومقاومتها للتشوه.
- إجهاد الانهيار (σ_r) وهو الحد الأقصى للإجهاد الذي يمكن أن تتحمله المادة قبل الانكسار.
- الاستطالة عند الكسر: الذي يعبر عن قدرة المادة على الاستطالة قبل أن تنكسر.

1.1.4.3. إجراءات الاختبار

تمت عملية اختبار الشد وفقاً للمعيار الدولي ISO 727 باستخدام آلة الشد المتطورة من نوع Zwick/Roell، الشكل: III.13 والتي تتميز بالدقة العالية والقدرة على تسجيل أدق التفاصيل أثناء التجربة.

- تم تحضير العينات بدقة وفق أبعاد قياسية لضمان نتائج دقيقة وموثوقة.
- تم إجراء الاختبار في ظروف بيئية مضبوطة وبدرجة حرارة الغرفة لضمان تجانس النتائج.
- تم ضبط سرعة حركة الفكين على 100mm/min بحيث يتم سحب العينة تدريجياً حتى تصل إلى نقطة الكسر.
- أثناء الاختبار، تقوم آلة الشد بتسجيل القوة المؤثرة على العينة والتشوه الحاصل فيها لحظة بلحظة.
- يتم رسم منحنيات الإجهاد - الانفعال مباشرة على الحاسوب المتصل بجهاز الاختبار، مما يسمح بتحليل الأداء الميكانيكي بدقة متناهية كما في الشكل: III.16.(بالملاحق).



الشكل : III.13 آلة اختبار الشد من نوع Zwick/Roell

2.1.4.3. مكان تنفيذ الاختبار

أُجريت جميع الاختبارات الميكانيكية داخل مخابر المؤسسة الوطنية ENICAB بمدينة بسكرة، حيث تتوفر أحدث التجهيزات والتقنيات لضمان الحصول على نتائج دقيقة وقابلة للاستغلال في التحليل والمقارنة بين مختلف العينات. يسمح هذا النوع من التحاليل بفهم تأثير إضافة الألياف الطبيعية على مقاومة المادة وقابليتها للاستخدام في التطبيقات المختلفة مثل مواد البناء أو الصناعات البلاستيكية المدعمة.

3.1.4.3. تحضير عينات الاختبار: (Eprouvettes)

بعد الانتهاء من عملية التشكيل والحصول على الصفائح المركبة، يتم تقطيع هذه الصفائح بدقة إلى عينات اختبارية على شكل "دمبل" أو "شكل العظم" وفقاً للمعايير الدولية المعتمدة في اختبارات الشد (مثل معيار ISO 527 أو ما يعادله) الشكل: 14.III.



الشكل : 14.III تقطيع العينات الاختبارية

يُعتبر هذا الشكل مثاليًا لأنه يضمن أن تتركز عملية الشد في منطقة الاختبار الوسطى بعيدًا عن رؤوس العينة المثبتة، مما يسمح بالحصول على نتائج دقيقة وواضحة دون تأثير منطقة التثبيت على العينة.

يتم تحضير العينات باستخدام آلة تقطيع دقيقة أو قوالب خاصة لضمان تجانس الأبعاد بين العينات، حيث إن أدنى اختلاف في السماكة أو العرض قد يؤثر على نتائج التجربة لاحقًا.

4.1.4.3. مراحل تنفيذ اختبار الشد: (Étapes de mesure)

لاختبار قوة تحمل المادة المركبة ومقاومتها للشد، يتم اتباع خطوات منهجية دقيقة كما يلي:

أولاً: إدخال كافة بيانات العينة بدقة في النظام الإلكتروني للآلة، بما في ذلك:

- السماكة (h) بوحدة المليمتر
- العرض الابتدائي لمنطقة الشد (b0)
- هذه المعلومات ضرورية لحساب الإجهاد (σ) بدقة لاحقاً.

ثانياً: تثبيت العينة داخل آلة الشد Zwick/Roell بعناية فائقة لضمان ثباتها وعدم انزلاقها أثناء السحب.

ثالثاً: تشغيل الآلة والبدء بعملية السحب التدريجي للعينة بسرعة ثابتة تبلغ 100 ملم/دقيقة حتى تصل إلى مرحلة الانهيار أو الكسر، وخلال ذلك يتم تسجيل منحنى الإجهاد-الانفعال مباشرة على الحاسوب المرتبط بالآلة الشكل: III.15 .



الشكل : 15.III عينة الاختبار موضوعة داخل آلة الشد

المعايير والمخرجات الأساسية لاختبار الشد

يسمح اختبار الشد باستخراج أهم الخصائص الميكانيكية للمادة المركبة المدروسة، وهي:

معامل المرونة: Module d'élasticité (E)

- يعبر هذا المعامل عن مدى صلابة المادة ومقاومتها للتشوه عند تعرضها للشد.

- حسابه يتم من الجزء الخطي لمنحنى الإجهاد-الانفعال، ويعكس قدرة المادة على العودة إلى شكلها الأصلي بعد إزالة الحمل.
- كلما كان هذا المعامل مرتفعاً، دلّ ذلك على أن المادة أكثر صلابة وأقل قابلية للتشوه.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} (N / m^2) \quad [82] \quad (III.4)$$

E معامل المرونة (معامل يونغ). (N/m²)

σ الإجهاد. (N/m²)

ε التشوه (%)

الإجهاد عند الكسر: **(σ_r) – Contrainte à la rupture**

- هو الحد الأقصى من الإجهاد الذي يمكن أن تتحمله العينة قبل أن تنكسر أو تنهار.
- يتم استخراجها من قيمة القوة F العظمى المسجلة أثناء الاختبار، بالنسبة إلى مساحة المقطع العرضي للعينة (S).
- يعتبر مؤشراً مهماً على قوة تحمل المادة المركبة للأحمال الخارجية.

$$\sigma_r = \frac{F}{S} (N / m^2) \quad [82] \dots \dots \dots (III.5)$$

σ_r: الإجهاد عند الكسر. (N/m²)

S : مساحة العينة الإختبارية. (m²)

F : قوة السحب المسلطة على العينة الإختبارية (N)

الاستطالة عند الكسر: **(A%) – Allongement à la rupture**

- تعبر هذه القيمة عن قابلية المادة للتمدد قبل أن تنكسر، وتُعبّر عنها كنسبة مئوية.
- كلما زادت هذه القيمة، دلّ ذلك على أن المادة أكثر مرونة وقادرة على امتصاص الصدمات.

$$A\% = \frac{L - L_0}{L_0} * 100 \quad [82] \dots \dots \dots (III.6)$$

A الاستطالة عند القطع. %

L طول عينة الإختبار أثناء الاستطالة. (m)

L₀ الطول الابتدائي لعينة الإختبار. (m)

ملاحظات هامة

- تُجرى هذه الاختبارات في ظروف محكمة، عادة في درجة حرارة الغرفة لضمان دقة النتائج وقابليتها للمقارنة بين مختلف العينات.
- جميع القياسات تُسجل بدقة من خلال البرنامج المرافق لجهاز Zwick/Roell الذي يقوم برسم المنحنيات البيانية أوتوماتيكياً ويوفر البيانات المطلوبة للحساب والتحليل. حيث نستقي منه النتائج كما في الشكل: III.16. (بالملاحق)
- هذه البيانات ضرورية لفهم مدى تأثير المعالجة الكيميائية للألياف أو إضافة مسحوق القهوة على الخواص الميكانيكية للمواد المركبة المنتجة.

الهدف من اختبار الشد

يهدف هذا الاختبار إلى تقييم جودة المادة المركبة الناتجة ومدى ملاءمتها للتطبيقات الصناعية التي تتطلب مقاومة عالية للشد مثل صناعة السيارات، مواد البناء، أو تجهيزات خارجية تتعرض لعوامل بيئية مختلفة.

2.4.3. اختبار صلادة شور (Shore A)

تم إجراء اختبار قياس صلابة العينات باستخدام جهاز الديوروميتر Shore A داخل مخبر شركة UNICAB بمدينة بسكرة، وذلك بهدف تقييم صلابة الصفائح المركبة المحضرة.

يعتمد هذا الاختبار على تطبيق قوة معينة لدفع إبرة الديوروميتر داخل سطح العينة، وفقاً للمعيار الدولي NF ISO T 51-123، حيث تم تجهيز عينات الاختبار على شكل صفائح مربعة بأبعاد $13 \times 13 \text{ cm}^2$.

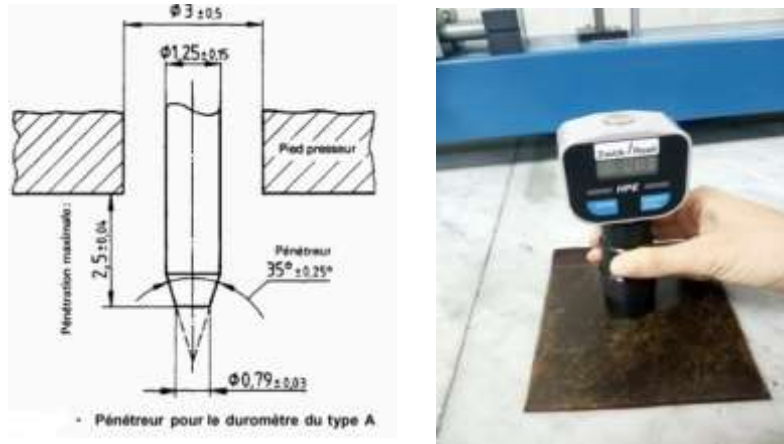
يتم وضع العينة على سطح صلب ومستوي، ثم يُثبت جهاز الديوروميتر بشكل عمودي فوقها لضمان توزيع متساوٍ للقوة على منطقة القياس. بعد ذلك، تُطبّق القوة تدريجياً حتى تتغرز الإبرة داخل العينة.

يُترك الجهاز لمدة 15 ثانية بعد بدء التلامس بين الإبرة وسطح العينة لضمان استقرار القراءة ودقتها، ثم يتم تسجيل قيمة الصلابة مباشرة من شاشة الجهاز أو المؤشر الميكانيكي.

تُعطى نتائج الصلابة على مقياس يتراوح بين 0 و 100، حيث تشير القيم الأعلى إلى مواد أكثر صلابة ومقاومة للانغراز، بينما تدل القيم المنخفضة على مواد أكثر ليونة.

يساعد هذا الاختبار على تقييم مقاومة المادة المركبة للتشوه السطحي تحت تأثير الأحمال المختلفة، كما يسمح بمقارنة تأثير نوع المعززات (كألياف اوراق نخيل التمر و نوى التمر أو مسحوق القهوة) على خاصية الصلابة داخل مصفوفة البوليمير.

تُعرض صورة الجهاز المستخدم أثناء التجربة في الشكل III.17 أدناه.



الشكل : 17.III اختبار صلادة شور.(Shore)

طريقة إجراء اختبار الصلابة:(Shore A)

تم اتباع الخطوات التالية بدقة للحصول على نتائج دقيقة في قياس صلابة العينات:

1. إمساك الجهاز باليد بشكل مريح وثابت.
2. تطبيق الجزء الذي يحتوي على الإبرة (رأس القياس) ببطء وبشكل متساوٍ فوق سطح العينة (اللوحة المركبة)، مع ضمان أن تكون الإبرة عمودية على السطح.
3. قراءة القيمة الظاهرة مباشرة على شاشة الجهاز أو مؤشره بعد استقرار الإبرة.
4. تكرار العملية ثلاث مرات على أماكن مختلفة من نفس العينة، ثم حساب المتوسط الحسابي للقيم الثلاث للحصول على قراءة دقيقة ومعتمدة لصلابة العينة.

5.3. الإستقرار الحراري

يُعد اختبار الاستقرار الحراري من أهم الاختبارات المعتمدة لتقييم قدرة المواد البلاستيكية، وخاصة مركبات الـ PVC، على مقاومة التحلل عند تعرضها لدرجات حرارة مرتفعة وظروف قاسية، مثل تلك التي قد تحدث في سيناريوهات الحريق غير المباشر. فعند ارتفاع درجة الحرارة، يبدأ الـ PVC في إطلاق غاز حمض الهيدروكلوريك (HCl)، الذي يُسرّع بدوره من عملية التحلل والتدهور الحراري للمادة.

يهدف هذا الاختبار إلى تحديد الزمن الذي تبدأ فيه كل تركيبة من المواد بالتحلل عند درجة حرارة ثابتة تبلغ 200 °C. حيث يتم وضع عينات الاختبار داخل أنابيب زجاجية مغلقة من أحد الطرفين، ثم تغمر هذه الأنابيب داخل حمام زيتي (IRM 902-ASTM2) داخل جهاز ثرموستات مجهز بقياس حرارة لضبط الحرارة بدقة.



الشكل : 18.III اختبار الاستقرار الحراري.

يُجرى هذا الاختبار وفقًا للمعايير الدولية المعتمدة IEC 60811-1-2، وبعد مرور 16 ساعة على الأقل من عملية بثق المركبات لضمان استقرار العينات. يتم استخدام أنابيب اختبار زجاجية يبلغ طولها 110 مم، بقطر خارجي حوالي 5 مم و قطر داخلي (0.5 ± 4.0) مم، إضافة إلى شرائط من ورق قياس الرقم الهيدروجيني (pH) ذات مجال قياس من 1 إلى 10، والتي تلعب دور المؤشر في الكشف عن انطلاق غاز HCl.

تُحضّر ثلاث عينات اختبار من كل تركيبة، بحيث يتراوح وزن كل عينة بين (50 ± 5) mg، وتُقطع على شكل شريطين أو ثلاثة شرائط صغيرة بطول يتراوح بين 20 و 30 mm. تُوضع كل عينة داخل أنبوب اختبار برفقة شريط من ورق pH الجاف بطول حوالي 15 mm وعرض 3 mm، بحيث يبرز جزء من الورقة خارج الأنبوب بمقدار 5 mm تقريبًا.

بعد تجهيز العينات، توضع الأنابيب في جهاز التسخين المضبوط مسبقًا على درجة الحرارة المطلوبة وتُسَخَّن لفترة زمنية محددة. ويُقاس خلال هذا الاختبار الزمن اللازم لتحول لون ورقة pH من قيمة 5 إلى قيمة تتراوح بين 2 و 3، مما يدل على بدء تحلل المادة وانطلاق غاز HCl.

يعتبر التغير اللوني قد حدث عند ظهور اللون الأحمر المميز بان قيمة pH تساوي 3 على ورقة الاختبار. وفي المراحل الأخيرة من التجربة، يتم استبدال ورقة pH كل 5 إلى 10 دقائق لمراقبة لحظة التحول بدقة وتحديد زمن بداية التحلل الحراري بدقة أكبر. تُوضح نتائج هذا الاختبار مدى مقاومة كل تركيبة للحرارة وقدرتها على الاحتفاظ بخواصها قبل الوصول إلى مرحلة التحلل الحراري.

6.3. المجهر الإلكتروني الماسح (MEB)

يُعدّ المجهر الإلكتروني الماسح (MEB) من أهم التقنيات الحديثة المستخدمة في دراسة وتحليل العينات على المستوى المجهرى بدقة عالية جدًا. يعتمد هذا النوع من المجاهر على استخدام حزمة من الإلكترونات عالية الطاقة يتم توجيهها لمسح

سطح العينة، مما يسمح بالكشف عن التفاصيل الدقيقة والتراكيب المجهرية التي لا يمكن رؤيتها بالعين المجردة أو بالمجاهر الضوئية التقليدية.



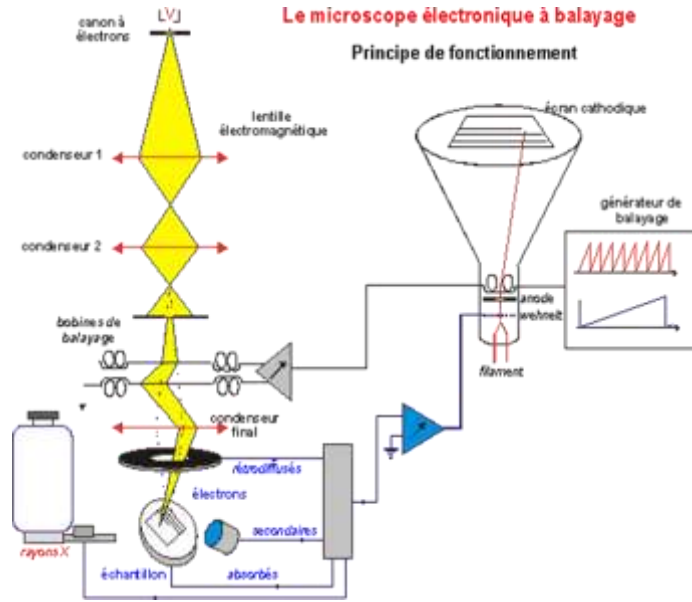
الشكل: 19.III مجهر إلكتروني ماسح (MEB/EDX) من نوع TESCAN VEGA3.

1.6.3. مبدأ عمل المجهر الإلكتروني الماسح

يبدأ عمل الجهاز بإنتاج حزمة إلكترونية رفيعة بواسطة مدفع إلكتروني، حيث يتم تسريع هذه الإلكترونات داخل عمود مفرغ من الهواء نحو سطح العينة المراد تحليلها. عند اصطدام هذه الحزمة بالسطح، تحدث عدة تفاعلات ينتج عنها انبعاث إلكترونات ثانوية منخفضة الطاقة وإلكترونات مرتدة، بالإضافة إلى إشعاعات مختلفة.

يتم جمع هذه الإلكترونات المنبعثة بواسطة كواشف حساسة تعمل على تضخيم الإشارات الكهربائية الناتجة وتحويلها إلى صورة رقمية دقيقة تُمثل شكل السطح بدقة عالية وتظهر جميع تفاصيله المجهرية. ومن خلال التحكم في حركة الحزمة الإلكترونية عبر ملفات مغناطيسية تُعرف بملفات الانحراف أو التصحيح، يتم مسح العينة نقطةً بنقطة، مما يسمح بإعادة بناء صورة ثلاثية الأبعاد لسطح العينة.

تشبه هذه الملفات العدسات في عملها، حيث تقوم بتوجيه وتركيز الحزمة الإلكترونية باستخدام مجال مغناطيسي متغير يتحكم فيه تيار كهربائي دقيق، وتُعرف المنطقة التي يتقاطع فيها المجال المغناطيسي بالحقل البؤري.



الشكل: III.20 مبدأ عمل المجهر الإلكتروني الماسح

2.6.3. التحليل باستخدام المجهر الإلكتروني الماسح: (MEB)

من أجل دراسة البنية السطحية والمورفولوجية للعينات، تم إجراء التحاليل المجهرية على مستوى جامعة بسكرة باستعمال جهاز مجهر إلكتروني ماسح (MEB/EDX) من نوع TESCAN VEGA3. و مخبر PTAPC بيسكرة التابع لمركز البحث في الطاقات المتجددة CRAPC ، وذلك باستخدام جهاز من نوع THERMO FISHER المجهر بنظام تحليل دقيق للطاقة المشتتة للأشعة السينية (EDX).

يتيح نظام EDX المدمج مع المجهر تحديد التركيب الكيميائي للعينة بدقة، حيث يتم تحليل الأشعة السينية المنبعثة نتيجة اصطدام الحزمة الإلكترونية بالعناصر المكونة للعينة، مما يسمح بالتعرف على طبيعة وتركيب المواد الموجودة داخل العينة. لكي تتمكن العينة من إعادة إصدار الإلكترونات داخل حجرة المراقبة في المجهر الإلكتروني، يجب تغليف سطحها بطبقة رقيقة من المعدن. وتتم هذه العملية باستخدام جهاز الطلاء المعدني، حيث يقوم هذا الجهاز بترسيب طبقة دقيقة من معدن الفضة بسمك يتراوح بين 2 إلى 3 نانومتر تقريباً. [84-83]



الشكل: 21,III. جهاز الطلاء المعدني من نوع Cressington Sputter Coater 108 auto.

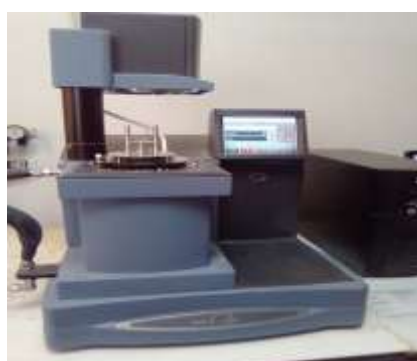
وفي هذه الدراسة، تم اعتماد تقنية EDX لتأكيد وتحديد المكونات الكيميائية للصفائح المحضرة المحتوية على الياف معالجة بمادتي DPLF (NaOH & 3-triméthoxysilyl)، وذلك بهدف التحقق من مدى تجانس التركيبة الكيميائية ومدى نجاح عمليات المعالجة والتعديل الكيميائي للعينات.

بهذه الطريقة، ساهم استخدام المجهر الإلكتروني الماسح والتحليل الطيفي بالأشعة السينية EDX في تقديم معلومات دقيقة وموثوقة حول الخصائص البنيوية والتركيبية للعينات قيد الدراسة.

7.3. التحليل الميكانيكي الديناميكي (DMA)

يُعد التحليل الميكانيكي الديناميكي (DMA) من أهم التقنيات المعتمدة لدراسة السلوك الميكانيكي للمواد البوليمرية الصلبة تحت تأثير قوة متغيرة. ويهدف هذا الاختبار إلى تقييم الخصائص المرنة للمواد، من خلال تحديد معامل المرونة وقيم التخامد، وذلك عبر تطبيق قوة اهتزازية دورية على العينة. [85]

تم إجراء التجارب باستخدام جهاز DMA من نوع TA Q800 بمخبر الكيمياء التطبيقية (LCA) بجامعة بسكرة.

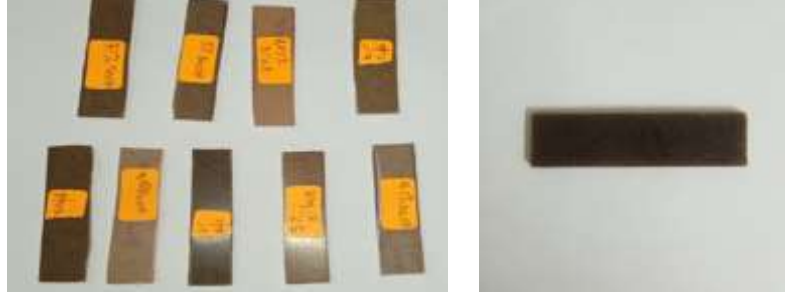


الشكل : 22,III جهاز التحليل الميكانيكي الديناميكي (DMA) من نوع DMA TA Q800

1.7.3. منهجية العمل

تتمثل الخطوات الأساسية لهذا التحليل فيما يلي:

- تجهيز العينة بدقة على شكل مستطيل وفق أبعاد القالب المعدني الخاص بالجهاز.



الشكل: III, 23 العينات المحضرة للتحليل DMA

- تسجيل بيانات العينة مثل السمك والعرض بدقة داخل واجهة الجهاز.
- تشغيل الجهاز والانتظار لمدة زمنية تقدر بحوالي 20 دقيقة حتى تظهر النتائج البينانية على الشاشة.



الشكل: III, 24 تثبيت العينة داخل جهاز الاختبار

2.7.3. مبدأ الاختبار

يعتمد اختبار DMA على إخضاع العينة لتشوهات جيبية صغيرة جداً داخل مجال محدد من درجات الحرارة، بهدف قياس استجابة المادة وتحديد خصائصها الفيزيائية والميكانيكية بدقة. يُتيح هذا التحليل قياس:

- معامل التخزين (E') الذي يعبر عن الجزء المرن القابل للتخزين من الطاقة.
- معامل الفقد (الضياع) (E'') الذي يمثل الطاقة المفقودة على شكل حرارة.
- معامل التخماد ($\tan \delta$) والذي يُحسب وفق العلاقة:

$$\tan \delta = \frac{E''}{E'} \quad (\text{III.7})$$

ويمثل هذا العامل نسبة الطاقة المبددة إلى الطاقة المخزنة، مما يسمح بتقييم قدرة المادة على امتصاص الاهتزازات والصدمات.

3.7.3. ظروف التجربة

- تم إجراء الاختبارات بتشوه قدره 6%.
 - مجال درجات الحرارة تراوح بين 25°C و 115°C، بمعدل تسخين 10°C في الدقيقة.
 - تردد التطبيق بلغ 1 هرتز.
 - أبعاد العينات المستخدمة كانت 3mm. × 10mm × 35mm
- يُعتبر هذا التحليل أداة فعّالة للحصول على رؤية شاملة حول سلوك البوليمرات والمواد المركبة تحت ظروف ميكانيكية وحرارية متغيرة، ما يُمكن من فهم أدق لخواصها في التطبيقات المختلفة.

خاتمة الفصل

من خلال استعراض هذه التقنيات التجريبية، يتضح أن تحضير ودراسة المواد المركبة يتطلب تكامل عدة طرق تحليلية متقدمة، تساهم كل منها في الكشف عن جانب معين من خصائص هذه المواد المعقدة. فبفضل هذه المنهجية العلمية الدقيقة، تمكنا من الوقوف على مدى تأثير دمج الألياف الطبيعية كمادة تدعيم داخل المصفوفات البوليمرية، وكذا تقييم تفاعل المكونات فيما بينها على المستوى البنيوي والفيزيائي.

إن النتائج المتحصل عليها من خلال هذه التحاليل تؤكد أهمية هذه المقاربات التجريبية في تحسين الأداء العام للمواد المركبة وتوسيع نطاق استخدامها في مجالات متعددة، خاصة تلك التي تتطلب مواداً ذات خصائص ميكانيكية جيدة وذات بعد بيئي مستدام. وعليه، تفتح هذه الدراسة آفاقاً واعدة نحو تطوير مواد مركبة أكثر فعالية وأقل تأثيراً على البيئة، انطلاقاً من تجميع الموارد المحلية المتجددة مثل نفايات النخيل في المناطق الصحراوية.

الفصل الرابع: النتائج والتفسيرات

مقدمة الفصل

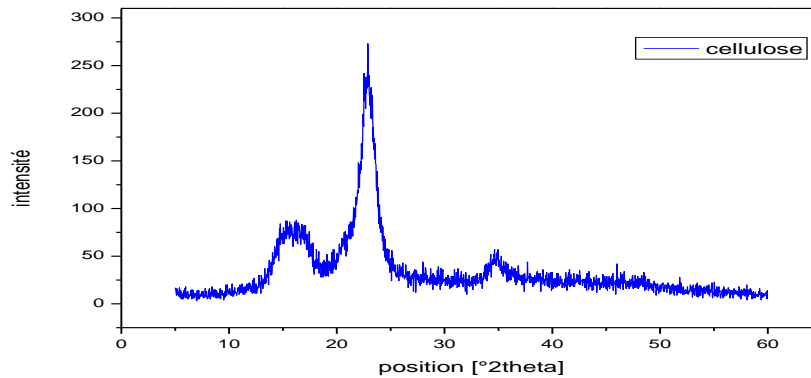
يتناول هذا الفصل عرضًا مفصلاً وتحليلاً معمقاً لنتائج البحث، مع مناقشتها وفق منهجية تراعي طبيعة المركبات المدروسة. يعتمد هذا الترتيب على الفروق بين المواد المستخدمة، حيث تشمل الدراسة مركب PVC مع الألياف الطبيعية، مثل الياف اوراق نخيل التمر، نوى التمر، ومسحوق القهوة. كما تشمل الدراسة مركبات أخرى أساسها PVC، PE مع الياف اوراق نخيل التمر، بالإضافة إلى مركب يجمع بين PVC و PE و NBR مع الياف اوراق نخيل التمر.

1. المركبات القائمة على البولي كلوريد فينيل PVC و الألياف الطبيعية

1.1. نتائج حيود الأشعة السينية DRX

من أجل إجراء توصيف بنيوي لمركباتنا، تم إجراء دراسة باستخدام حيود الأشعة السينية (DRX). تعود البنية البلورية فقط إلى السيليلوز الموجود في الألياف، في حين أن المصفوفة البوليمرية ذات طبيعة عضوية بالكامل. لذلك، يتم اختيار أي عينة تحتوي على أي نوع من الألياف الطبيعية، مثل:

المزيج البولي كلوريد فينيل 85% مع الياف اوراق نخيل التمر 15% يُظهر مخطط حيود الأشعة السينية (DRX) لهذا التركيب ذروتين واضحتين تقعان عند الزاويتين $2\theta = 18.24^\circ$ و $2\theta = 22.6^\circ$ واللّتين تتوافقان مع التركيب البلوري للسيليلوز كما هو موضح في الشكل: IV.1



الشكل : 1.IV حيود الأشعة السينية (DRX) لمزيج البولي كلوريد فينيل 85% مع الياف اوراق نخيل التمر 15%

يُظهر المنحنى المرفق طيف حيود الأشعة السينية لعينة تحتوي على السيليلوز، حيث يمكن ملاحظة قمة رئيسية حادة حول 22.6° ، والتي تدل على التوجه البلوري لجزيئات السيليلوز. كما يظهر أيضاً وجود قمة أخرى عند 18.24° ، وهي مرتبطة بترتيب جزيئي أقل انتظاماً داخل البنية الليفية. يشير شكل المنحنى العام إلى الطبيعة شبه البلورية للألياف المستخدمة،

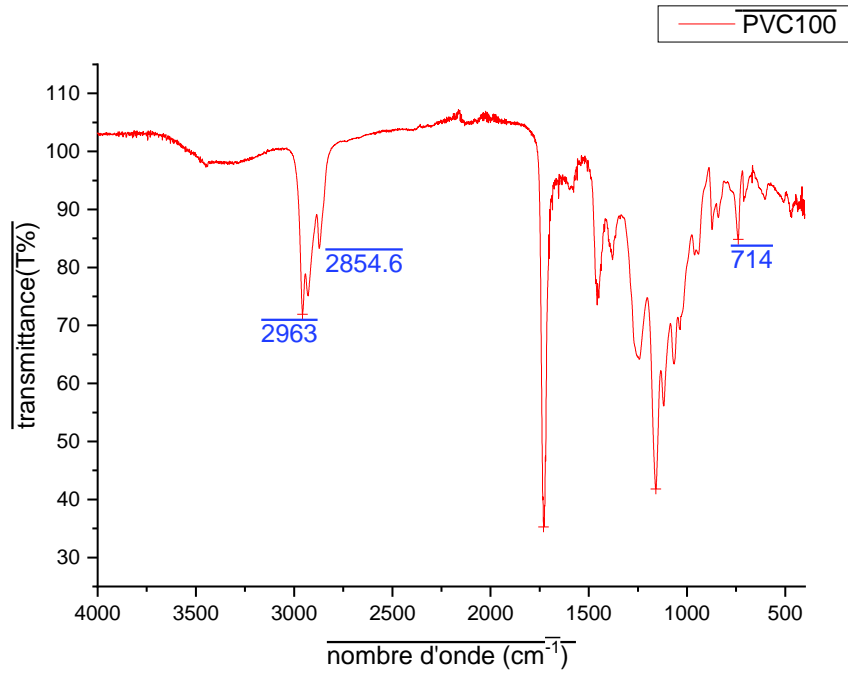
حيث تضم مناطق بلورية وأخرى غير منتظمة. يمكن تفسير هذا السلوك البلوري بأنه يعزز من خصائص المادة المركبة، مثل الصلابة والقدرة على مقاومة التشوهات، مما يؤثر بشكل مباشر على الأداء الميكانيكي النهائي للمادة.

2.1. التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء FTIR

يهدف التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء لمساحيق الإضافات المختلفة، مثل الياق اوراق نخيل التمر، نوى التمر المعالجة وغير المعالجة، ومسحوق القهوة، إلى تحديد المجموعات الوظيفية الموجودة في بنيتها.

ولتأكيد امتصاص هذه المجموعات داخل تركيب المواد المدروسة، تم إدراج تركيبات المواد المختلفة في الجداول 1.IV، 2.IV، 3.IV، 4.IV، 5.IV، 6.IV، 7.IV مع الإشارة إلى الترددات المميزة لكل منها.

1.2.1. التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء لكلوريد البولي فينيل (PVC)



الشكل: 2.IV طيف الأشعة تحت الحمراء (FTIR) لعينة من كلوريد البولي فينيل (PVC 100%)

يمثل الشكل: 2.IV طيف الأشعة تحت الحمراء (FTIR) لعينة من كلوريد البولي فينيل (PVC 100%) ، حيث يوضح الامتصاصية لمختلف الروابط الكيميائية الموجودة في التركيب الجزيئي لهذه المادة. يمكن ملاحظة قمم امتصاص رئيسية عند ترددات محددة، مما يشير إلى وجود مجموعات وظيفية معينة.

تحديد المجموعات الوظيفية في طيف PVC

تمثل القمم الرئيسية الظاهرة في الطيف المرفق:

• مجموعة C-H (الألكان):

تظهر عند 2963 و 2845.6 cm^{-1} ، وهي ناتجة عن اهتزازات التمدد لمجموعة الألكان (C-H) الموجودة في السلسلة الهيكلية للبولي كلوريد الفينيل.

• رابطة C-Cl :

تظهر عند 714 cm^{-1} ، وهي خاصة بامتداد رابطة الكربون-كلور (C-Cl) ، والتي تميز تركيب بولي كلوريد فينيل.

الجدول : 1.IV الترددات المميزة لبولي كلوريد الفينيل (PVC100%)

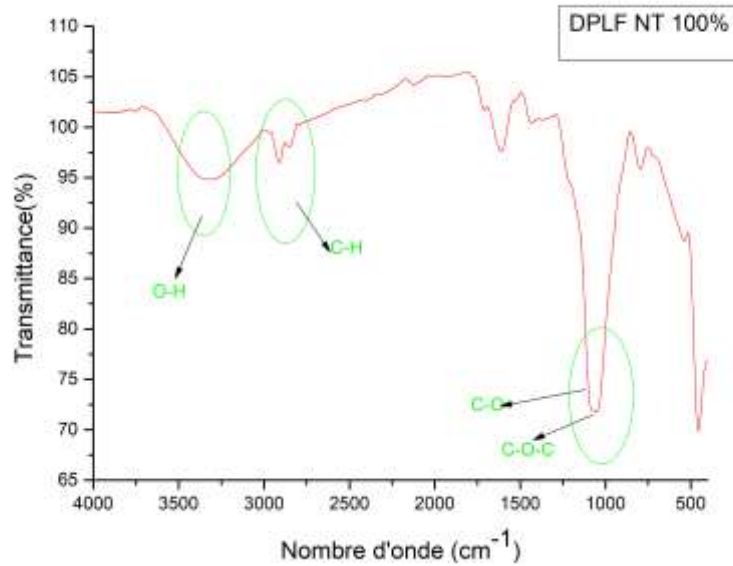
الإسناد	الكان C-H			C- Cl
cm^{-1} العدد الموجي	2963 et 2845.6			714

تحليل الطيف وملاحظات إضافية

يظهر الطيف منحنيات امتصاص واضحة عند الترددات المذكورة، مما يؤكد التركيب الكيميائي لبولي كلوريد الفينيل (PVC) القمة العريضة في نطاق $2963 - 2845.6\text{ cm}^{-1}$ تدل على التمدد النموذجي لرابطة C-H في سلاسل الألكان، في حين أن القمة عند 714 cm^{-1} تشير إلى وجود الكلور في بنية البوليمر.

بناءً على هذا التحليل، يمكن الاستنتاج أن طيف FTIR لـ PVC 100% يتوافق مع البنية الكيميائية المتوقعة لهذه المادة، مما يثبت صحة تركيبها وخصائصها الوظيفية.

2.2.1. التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء لمسحوق الياف اوراق نخيل التمر (DPLF)



الشكل : 3.IV طيف FTIR لـ DPLF

الجدول : 2.IV الترددات المميزة لـ DPLF

لإسناد	O-H المرتبطة	الكان C-H	C-O	C-O-C
cm⁻¹ العدد الموجي	3334.14	2925.12 et 2835.35	1104.2	1047.25

يهدف التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه (FTIR) إلى تحديد الروابط الكيميائية الموجودة في مسحوق ألياف اوراق نخيل التمر (DPLF). تعد هذه التقنية ضرورية لتوصيف المجموعات الوظيفية الرئيسية وفهم تفاعل هذه الألياف مع مصفوفة البوليمر عند دمجها في المركبات.

تحديد نطاقات الامتصاص وتفسيرها

يُظهر الطيف امتصاصًا واضحًا في منطقة 3427 cm^{-1} ، والذي يُعزى إلى اهتزازات التمدد لمجموعات الهيدروكسيل (OH-) الموجودة بكثرة في السليلوز واللينين. يشير هذا النطاق العريض إلى وجود روابط هيدروجينية بين السلاسل السكرية المتعددة، وهو ما يعكس الطبيعة المحبة للماء لهذه الألياف.

كما لوحظت نطاقات امتصاص عند 2913 cm^{-1} و 2852 cm^{-1} ، وهي مرتبطة باهتزازات التمدد غير المتماثلة والمتماثلة لروابط C-H في مجموعات الميثيل (CH_3 -) والمثيلين (CH_2 -) ، مما يدل على وجود مركبات عضوية أليفاتية داخل اللينين والشموع الطبيعية على سطح الألياف.

في منطقة 1600 cm^{-1} و 1510 cm^{-1} ، يظهر امتصاص مميز مرتبط باهتزازات التمدد للروابط المزدوجة C=C داخل الحلقات الأروماتية لمركبات اللينين. هذه النطاقات تؤكد الطبيعة العطرية لهذا المكون، والذي يضيفي على الألياف صلابة ميكانيكية واستقرارًا حراريًا.

بالإضافة إلى ذلك، يُظهر الطيف نطاق امتصاص عند 1107 cm^{-1} ، وهو مرتبط باهتزازات رابطة C-O الموجودة في السكريات المتعددة مثل السليلوز والهيميسليلوز. كما يُلاحظ امتصاص آخر عند 1055 cm^{-1} ، والذي يعكس اهتزازات رابطة C-O-C ، مما يدل على الروابط الإيثيرية بين وحدات الجلوكوز في بنية السليلوز.

التفسير

*تؤكد الملاحظة القوية للنطاق عند 3427 cm^{-1} أن مسحوق ألياف أوراق نخيل التمر يحتوي على نسبة عالية من السليلوز، مما يجعله مادة ذات قدرة امتصاصية للماء، وهو عامل يجب أخذه بعين الاعتبار عند استخدامه في المركبات البوليمرية.

*يشير وجود الامتصاص عند 2913 cm^{-1} و 2852 cm^{-1} إلى أن المادة تحتوي على مركبات أليفاتية (Les composés aliphatiques)، والتي قد تكون ناتجة عن المكونات الدهنية أو الشمعية الموجودة على سطح الألياف.

*تؤكد النطاقات عند 1600 cm^{-1} و 1510 cm^{-1} وجود اللينين، والذي يساهم في تقوية الألياف، مما يمنحها خصائص ميكانيكية جيدة عند استخدامها كحشو في المواد المركبة.

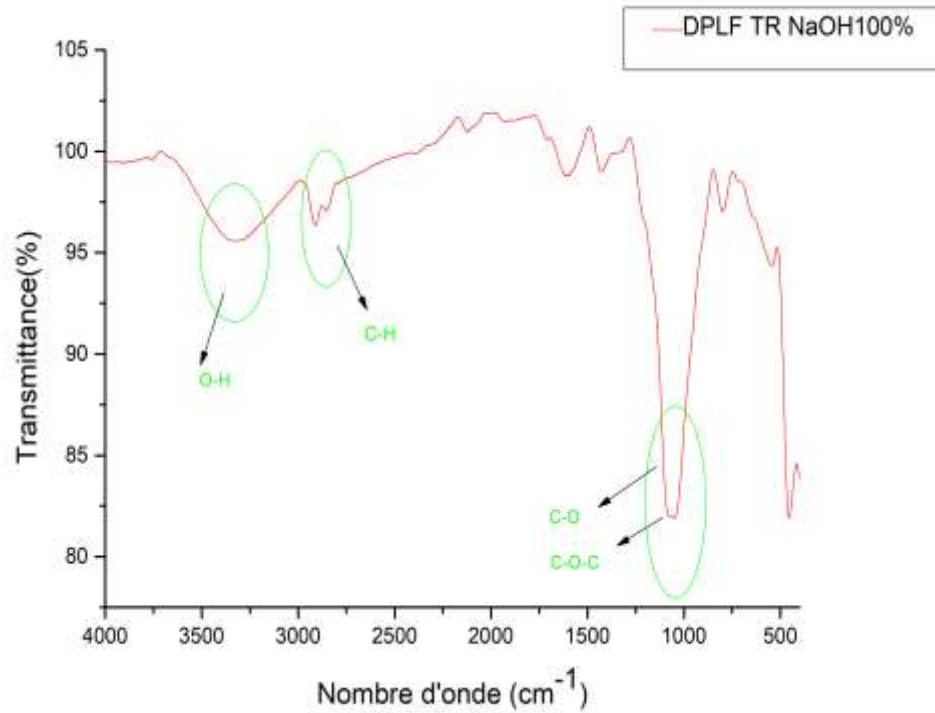
*النطاقات الملحوظة عند 1107 cm^{-1} و 1055 cm^{-1} تدل على التركيب السليلوزي للألياف، حيث تعكس الروابط الكيميائية بين وحدات الجلوكوز داخل البنية السكرية المتعددة.

الاستنتاج

يكشف طيف الأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه FTIR لمسحوق ألياف أوراق نخيل التمر عن تركيب لينو-سليلوزي متميز، حيث يُشكل السليلوز المكون الرئيسي، يليه اللينين، مع وجود نسبة أقل من الهيميسليلوز. يوضح طيف الامتصاص أن المادة تمتلك خواص كيميائية تجعلها مناسبة كحشو طبيعي في البوليمرات، لا سيما بسبب المجموعات الوظيفية التي يمكنها التفاعل مع المصفوفة البوليمرية.

بالتالي، توفر دراسة التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء فهماً معمقاً للبنية الكيميائية لألياف أوراق نخيل التمر، مما يساهم في تحسين استخدامها في تطوير المواد المركبة وتعزيز خواصها الميكانيكية والحرارية.

3.2.1. التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء لألياف اوراق نخيل التمر (DPLF) المعالجة بهيدروكسيد الصوديوم (NaOH)



الشكل 4.IV: الطيف FTIR لألياف اوراق نخيل التمر (DPLF) المعالجة بهيدروكسيد الصوديوم (NaOH)

الجدول 3.IV: الترددات المميزة لألياف اوراق نخيل التمر (DPLF) المعالجة بهيدروكسيد الصوديوم (NaOH)

الإسناد	O-H المرتبطة	الكان C-H	C-O	C-O-C
العدد الموجي cm⁻¹	3334.14	2927.41 et 2830.26	1104.19	1047.29

يُظهر التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء (FTIR) لألياف اوراق نخيل التمر المعالجة بهيدروكسيد الصوديوم (NaOH) بعض التغيرات المهمة مقارنة بالعينة غير المعالجة، مما يدل على تأثير المعالجة الكيميائية على البنية الوظيفية للألياف.

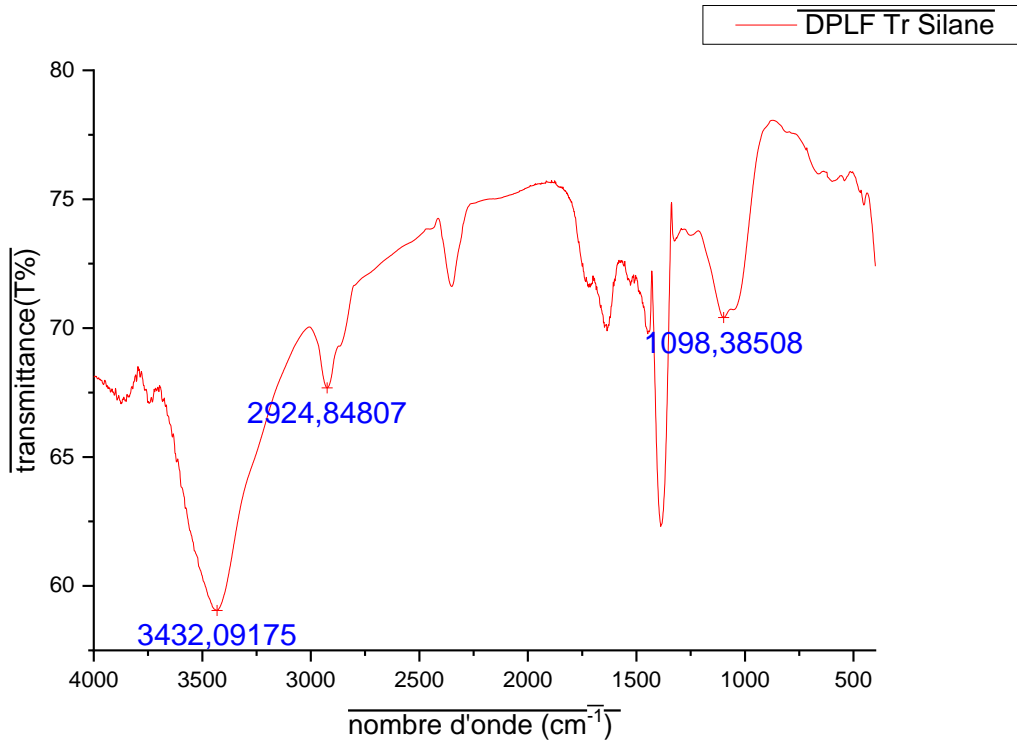
يُلاحظ في الطيف امتصاص قوي عند حوالي 3334.14 cm⁻¹، وهو ما يعزى إلى اهتزازات تمدد مجموعة O-H المرتبطة. يظل هذا الامتصاص موجودًا بعد المعالجة، مما يشير إلى بقاء مجموعات الهيدروكسيل في السليلوز، ولكن مع إمكانية حدوث تغير في بيئة الروابط الهيدروجينية نتيجة إزالة بعض المكونات غير السليلوزية مثل اللينين والهيميسليلوز.

بالنسبة لاهتزازات C-H الألكانية، تظهر نطاقات الامتصاص عند 2927.41 و 2830.26 cm^{-1} ، مما يعكس امتدادات الروابط C-H في السلاسل الأليفاتية. لم يظهر تغيير كبير في هذه الترددات بعد المعالجة، مما يشير إلى أن الهيكل الكربوني الأساسي للألياف لم يتأثر بشكل ملحوظ.

أما بالنسبة لاهتزازات C-O و C-O-C، فتظهر نطاقاتها عند 1104.19 و 1047.29 cm^{-1} ، وهي مرتبطة بوظائف الإثيرات والسليولوز. يبقى الامتصاص في هذه النطاقات قائماً بعد المعالجة، مما يؤكد بقاء السليولوز كمكون رئيسي في بنية الألياف، على الرغم من إزالة بعض المكونات غير المرغوب فيها.

بشكل عام، تُظهر نتائج التحليل الطيفي أن معالجة DPLF بـ NaOH تؤدي إلى تنظيف الألياف عبر إزالة بعض المركبات غير السليولوزية مثل الهيميسليولوز واللينين، مما يعزز نقاء السليولوز في البنية النهائية.

4.2.1. التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء لألياف اوراق نخيل التمر (DPLF) المعالجة بالسيلان



الشكل : 5.IV الطيف الأشعة تحت الحمراء لألياف اوراق نخيل التمر (DPLF) المعالجة بالسيلان

الجدول : 4.IV الترددات المميزة لـ DPLF المعالجة بالسيلان

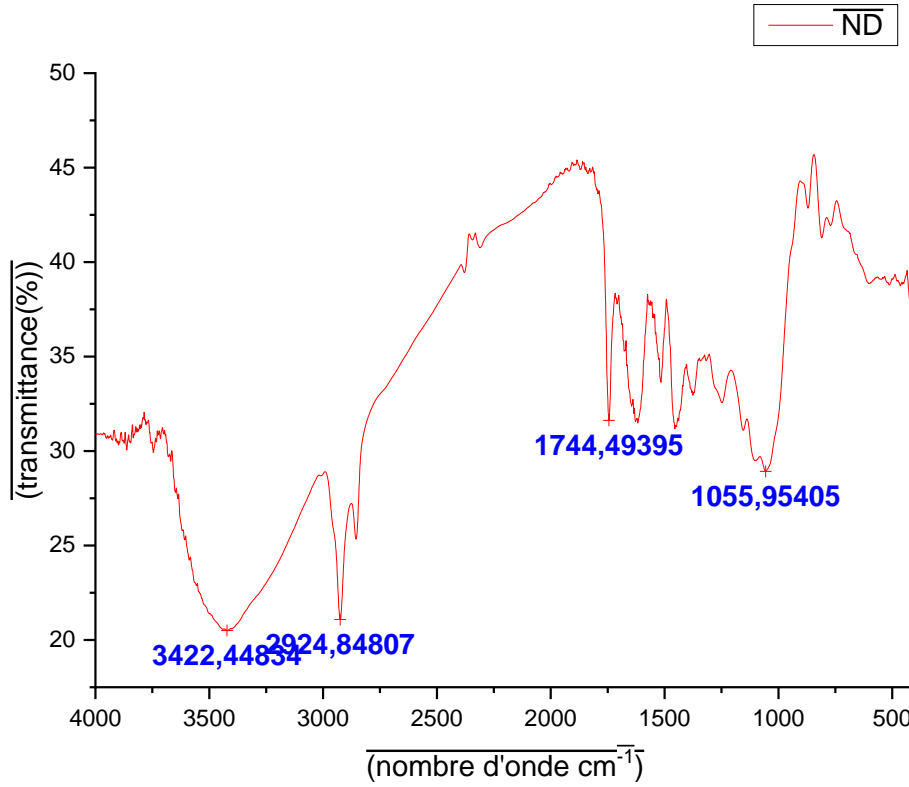
الإسناد	O -H المرتبطة	الكان C-H	C-O	C-O-C
cm^{-1} العدد الموجي	3300-3500	2800-3000	1100-1200	1000-1100

يمثل الطيف بالأشعة تحت الحمراء لألياف أوراق نخيل التمر (DPLF) المعالجة بالسيلان التغيرات الكيميائية الناتجة عن عملية المعالجة. يمكن ملاحظة عدة نطاقات امتصاصية رئيسية تشير إلى وجود مجموعات وظيفية مختلفة في البنية الكيميائية للألياف المعالجة.

- **الرابطة OH- (مجموعة الهيدروكسيل المرتبطة):** تظهر هذه الرابطة عادةً في نطاق الامتصاص بين 3200 و 3500 cm^{-1} ، وهو ما يدل على وجود مجموعات هيدروكسيل مرتبطة، والتي يمكن أن تعود إلى السليلوز أو بقايا الماء الممتصة على السطح.
- **الرابطة C-H (الألكانات):** يظهر الامتصاص في نطاق $2800 - 3000\text{ cm}^{-1}$ ، مما يشير إلى امتداد الروابط بين الكربون والهيدروجين في سلاسل الهيدروكربونات.
- **الرابطة Si-O-Si و Si-O-C:** يمكن ملاحظة نطاقات الامتصاص بين 1000 و 1100 cm^{-1} ، مما يشير إلى تشكل روابط السيليكون-الأكسجين، وهي دليل على تفاعل السيلان مع الألياف.
- **الرابطة C=O (الكربونيل):** قد يظهر نطاق امتصاص ضعيف في حدود $1700 - 1750\text{ cm}^{-1}$ ، مما قد يعكس وجود مجموعات كربونيلية من البنية اللجنوسليلوزية أو تأثير عملية المعالجة الكيميائية.

يظهر الطيف أن معالجة ألياف أوراق نخيل التمر بالسيلان تؤدي إلى انخفاض كثافة نطاقات OH-، مما يدل على تفاعل السيلان مع مجموعات الهيدروكسيل الحرة على سطح الألياف. كما يشير ظهور نطاقات Si-O-Si و Si-O-C إلى تكوين طبقة سطحية جديدة تحتوي على السيليكون، مما يعزز تفاعل الألياف مع البوليمرات في التطبيقات المركبة.

5.2.1. التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء لنوى التمر



الشكل : 6.IV الطيف الأشعة تحت الحمراء لنوى التمر

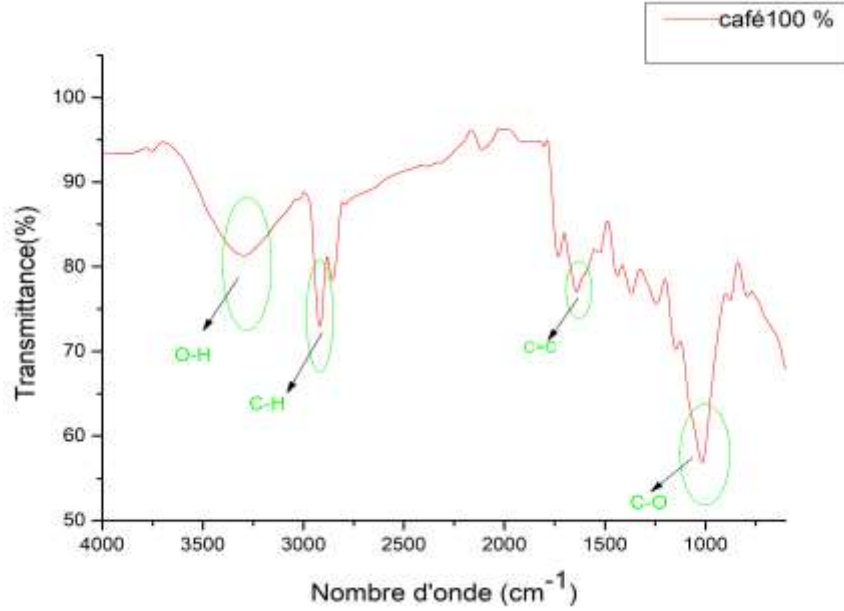
يعتمد التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء (FTIR) لنوى التمر على تحديد المجموعات الوظيفية الموجودة في تركيبته الكيميائية من خلال ترددات الامتصاص المميزة. يعكس الطيف المسجل في الشكل: 6.IV البنية الكيميائية المعقدة لنوى التمر، حيث تظهر عدة نطاقات امتصاصية تُعزى إلى المكونات الرئيسية مثل السليلوز، الهيميسليلوز، واللينين.

تحليل نطاقات الامتصاص الرئيسية

- **مجموعة الهيدروكسيل (O-H):** تظهر امتصاصًا واسعًا بين 3200cm^{-1} و 3400cm^{-1} ، مما يشير إلى وجود الروابط الهيدروجينية المكثفة، التي ترتبط عادةً بالسليلوز والمركبات الفينولية.
- **الامتدادات الكربوهيدروجينية (C-H):** تم تحديد نطاق امتصاص عند حوالي 2900cm^{-1} و 2850cm^{-1} ، مما يدل على وجود الروابط C-H في مجموعات الميثيلين ($-\text{CH}_2-$) والميثيل ($-\text{CH}_3$) الموجودة في السلاسل الكربونية الطويلة.
- **مجموعة الكربونيل (C=O):** تلاحظ قمة امتصاص قوية عند حوالي 1730cm^{-1} - 1750cm^{-1} ، مما يعكس وجود استرات، كيتونات أو أحماض كربوكسيلية، والتي ترتبط بالمواد الدهنية والشمعية في نوى التمر.
- **الروابط الإثيرية (C-O-C):** تظهر نطاقات امتصاص عند 1000cm^{-1} - 1200cm^{-1} ، مما يشير إلى وجود روابط إثيرية خاصة بالمكونات السكرية مثل السليلوز والهيميسليلوز.

يوضح طيف FTIR الخاص بنوى التمر غناه بالمركبات العضوية، بما في ذلك السكريات، الأحماض الدهنية، والمركبات الفينولية. كما تشير نطاقات الامتصاص المسجلة إلى وجود تفاعل بين مكوناته، مما قد يؤثر على خصائصه الفيزيائية والكيميائية عند استخدامه كمادة مضافة في المركبات البوليمرية.

6.2.1. التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء لتفل القهوة



الشكل : 7.IV طيف FTIR لتفل القهوة

الجدول : 6.IV الترددات المميزة لتفل القهوة

الإسناد	O-H المرتبطة	الكان C-H	C=C	C-O
العدد الموجي cm ⁻¹	3416.36	2931.42et 2838.37	1628.02	1012.10

يعد التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء (FTIR) أداة فعالة لدراسة المجموعات الوظيفية الموجودة في تفل القهوة، حيث يكشف عن الروابط الكيميائية التي تميز المركبات العضوية في العينة. من خلال تحليل الطيف المسجل، يمكن تحديد الامتصاصات المميزة لبعض المجموعات الوظيفية الهامة.

تحديد المجموعات الوظيفية في طيف تفل القهوة

*مجموعة الهيدروكسيل (O-H) المرتبطة يظهر نطاق الامتصاص عند 3416.36 cm^{-1} ، مما يشير إلى وجود روابط O-H المرتبطة، والتي تعود عادةً إلى المركبات الفينولية أو الماء الممتص أو السكريات الموجودة في اللينين والسليلوز.

*مجموعة الألكان (C-H) في المركبات العضوية يظهر نطاق الامتصاص عند 2931.42 cm^{-1} و 2838.37 cm^{-1} ، مما يدل على اهتزازات التمدد لمجموعة C-H في الألكانات، وهي نموذجية للسكريات والدهون الموجودة في تفل القهوة.

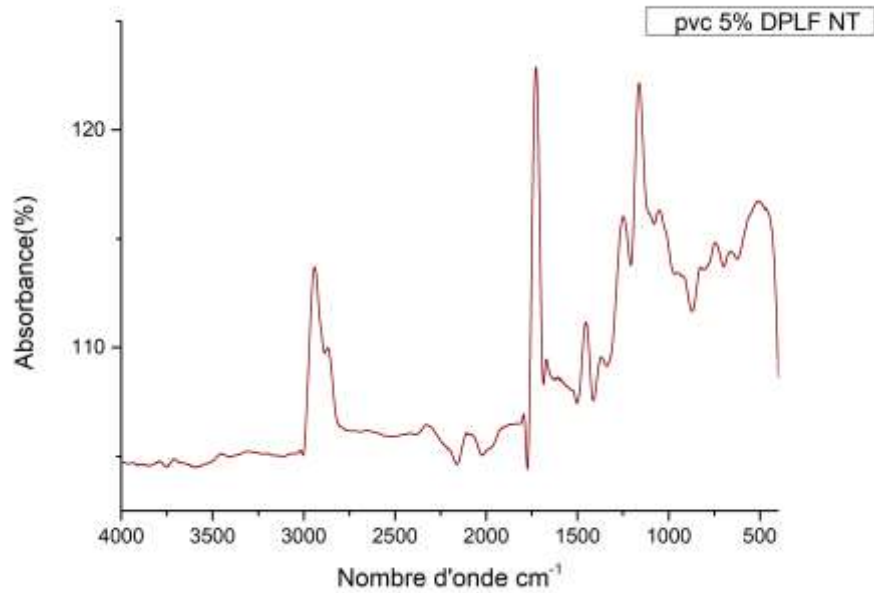
*مجموعة الألكين (C=C) يظهر نطاق الامتصاص عند 1628.02 cm^{-1} ، وهو مرتبط بالاهتزازات الهيكلية لرابطة C=C في المركبات العطرية والفينولات، التي تميز اللينين والمركبات الفينولية الأخرى.

*مجموعة الإثيرات (C-O) يظهر نطاق الامتصاص عند 1012.10 cm^{-1} ، وهو مرتبط باهتزازات التمدد لمجموعة C-O، مما يشير إلى وجود السكريات أو المكونات السليلوزية في التركيب.

يظهر طيف FTIR لتفل القهوة ميزات نموذجية لمكونات اللجنوسليلوز، بما في ذلك السليلوز، الهيميسليلوز، واللينين. الامتصاص القوي عند 3416 cm^{-1} يشير إلى وجود مجموعات الهيدروكسيل، مما يدل على الطبيعة المحبة للماء للمادة. كما أن نطاقات الامتصاص عند $2838\text{-}2931 \text{ cm}^{-1}$ تعكس وجود المركبات العضوية، مثل الدهون والسكريات. وأخيراً، الامتصاصات عند 1628 cm^{-1} و 1012 cm^{-1} تؤكد وجود المركبات العطرية والسكريات.

بناءً على هذه النتائج، يمكن الاستنتاج أن تفل القهوة غني بالمركبات العضوية، مما يجعله مناسباً للاستخدامات المختلفة، مثل المواد المألئة في البوليمرات، أو في التطبيقات البيئية مثل الامتزاز وإزالة الملوثات.

7.2.1. التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء للمركب (5% DPLF - 95% PVC)



الشكل : 8.IV طيف FTIR للمركب 5% PVC/DPLF

الجدول : 7.IV الترددات المميزة للمركب 5% PVC/DPLF

الإسناد	O – H المرتبطة	الكان C-H	C-O	C-O-C
العدد الموجي cm^{-1}	3334.14	2925.12 et 2835.35	1104.2	1047.25

يوضح الطيف المسجل في الشكل 8.IV الامتصاصات المميزة للمركب الحاصل من دمج 5% من ألياف اوراق نخيل التمر (DPLF) مع بولي كلوريد الفينيل (PVC) من خلال مقارنة القمم المسجلة مع الترددات المميزة للمجموعات الوظيفية، يمكن تحديد البصمات الكيميائية التالية:

*مجموعة الهيدروكسيل (O-H) عند 3334.14cm^{-1} تشير هذه القمة إلى امتداد اهتزازي لمجموعة الهيدروكسيل، مما يدل على وجود كميات معينة من الماء الممتص أو بقايا مجموعات هيدروكسيلية من المكونات الطبيعية للألياف النباتية.

*امتداد الروابط C-H للألكانات عند 2925.12cm^{-1} و 2835.35cm^{-1} تعود هذه القمم إلى الاهتزازات التمددية للرابطة C-H في سلاسل الهيدروكربون، وهي نموذجية في كل من الألياف الطبيعية والمصفوفة البوليمرية البولي كلوريد الفينيل (PVC).

*اهتزازات مجموعة C-O عند 1104.2cm^{-1} يشير هذا الامتصاص إلى وجود روابط الإيثرات أو الاسترات، التي يمكن أن تكون ناتجة عن السليلوز أو اللينين الموجود في ألياف اوراق نخيل التمر.

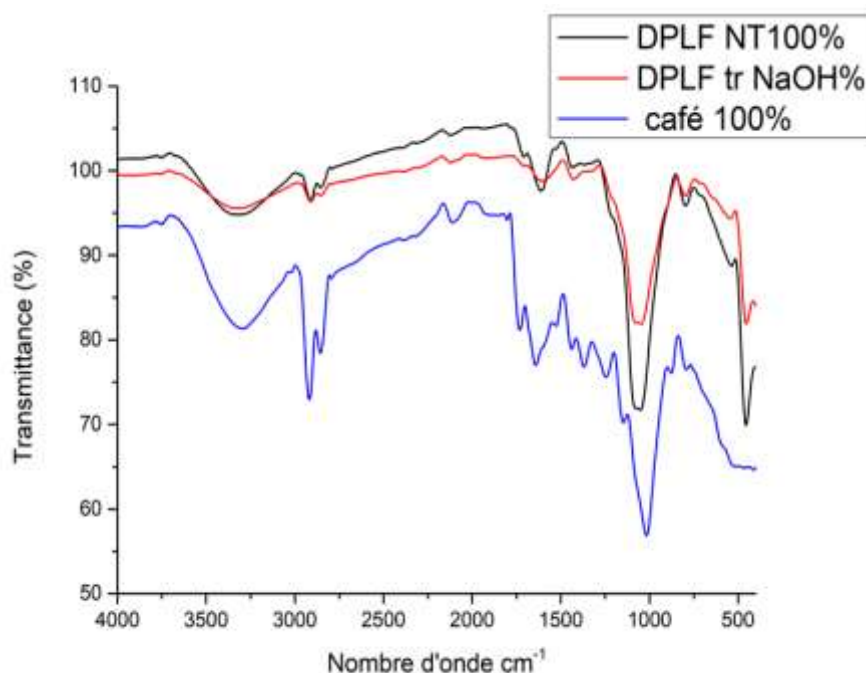
*اهتزازات C-O-C عند 1047.25cm^{-1} هذه القمة نموذجية لاهتزازات مجموعات الإيثرات، والتي قد تكون موجودة في التركيبة الكيميائية للألياف الطبيعية أو كنتيجة لتفاعل طفيف بين PVC و DPLF.

ملاحظات وتعليقات

- مقارنةً بالطيف الأصلي لبولي كلوريد الفينيل (PVC) ، يمكن ملاحظة بعض التعديلات الطفيفة في الترددات، مما يشير إلى احتمال حدوث تفاعلات بين البوليمر والألياف، مثل التداخل بين الروابط الهيدروجينية أو التفاعلات الكيميائية الضعيفة.
- لا توجد تغييرات كبيرة تدل على تفاعلات كيميائية قوية بين PVC و DPLF ، مما يشير إلى أن التفاعل بين المكونين هو بشكل أساسي فيزيائي وليس كيميائي.
- القمم المرتبطة بالمجموعات الهيدروكسيلية (O-H) تظهر بشكل واضح، مما يشير إلى بقاء بعض الرطوبة أو المجموعات القطبية في النظام المركب.

يُظهر طيف FTIR أن إدراج 5% من ألياف اوراق نخيل التمر في مصفوفة البولي كلوريد الفينيل (PVC) لا يؤدي إلى تغييرات كبيرة في التركيب الكيميائي، لكنه قد يؤثر على الخواص الفيزيائية للمادة، مثل تحسين التشابك بين الألياف والبوليمر أو تعديل بعض الخصائص الميكانيكية.

8.2.1. التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء لـ (DPLF غير المعالجة 100% و DPLF المعالجة بـ NaOH 100% والقهوة 100%)



الشكل : 9.IV طيف FTIR للمركب (DPLF غير المعالجة 100% ، DPLF المعالجة بـ NaOH 100% ، والقهوة 100%)

الجدول : 8.IV الترددات المميزة للمركب (100% ، DPLF غير المعالجة و DPLF 100% المعالجة بـ NaOH ، والقهوة 100%)

الإسناد	الوظيفة والتردد				
	O-H المرتبطة	C-H الكان	C=C	C-O	C-O-C
DPLF NT 100%	3334.14	2925.12et 2835.35	-	1004.2	1047.25
DPLF traité NaOH 100%	3334.14	2927.41et 2830.26	-	1104.19	1047.29
قهوة marc de café	3416.36	2931.42et 2838.37	1628.02	1012.10	

يعرض الشكل: 9.IV طيف FTIR للعينات الثلاث:الياف اوراق نخيل التمر غير المعالجة (DPLF NT 100%)، الياف اوراق نخيل التمر المعالجة بهيدروكسيد الصوديوم (DPLF tr NaOH 100%) ، وتفل القهوة (Café 100%). يوضح هذا الطيف الاختلافات في المجموعات الوظيفية بين هذه المواد وتأثير المعالجة الكيميائية على البنية الجزيئية للألياف.

امتصاص مجموعة O-H

يظهر نطاق الامتصاص لمجموعة الهيدروكسيل O-H عند 3334.14 cm^{-1} في كل من الألياف غير المعالجة والمعالجة وكذلك في القهوة. يشير هذا الامتصاص إلى وجود روابط هيدروجينية داخلية، والتي ترتبط عادةً بالسليولوز، الهيميسليولوز، واللينين الموجود في الألياف النباتية.

امتصاص مجموعة C-H (الألكانات)

تم تحديد امتصاصات الألكانات C-H عند 2925.12 cm^{-1} و 2835.35 cm^{-1} في الألياف غير المعالجة، بينما لوحظت تغيرات طفيفة في الألياف المعالجة حيث انتقلت الترددات إلى 2927.41 cm^{-1} و 2830.26 cm^{-1} . هذا التغيير يشير إلى تأثير المعالجة القلوية (NaOH) على التركيب الكيميائي للألياف، حيث يمكن أن تؤدي إلى إزالة بعض المكونات مثل الهيميسليولوز والشوائب السطحية.

امتصاص مجموعة C=C

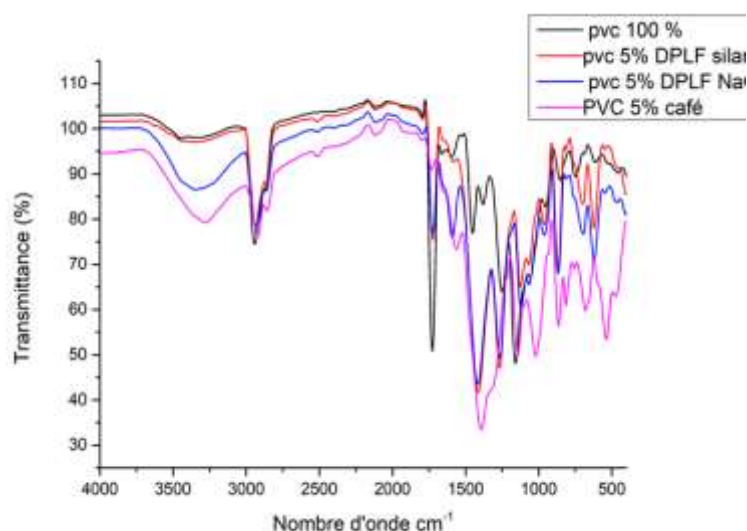
لم يظهر نطاق امتصاص واضح لمجموعة C=C في الألياف غير المعالجة أو المعالجة، مما يشير إلى أن المركبات الأروماتية، إن وجدت، موجودة بكميات قليلة جداً أو غير بارزة في هذا الطيف.

امتصاص مجموعة C-O و C-O-C

تم تحديد نطاق امتصاص C-O عند 1004.2 cm^{-1} في الألياف غير المعالجة، بينما ظهر عند 1104.19 cm^{-1} في الألياف المعالجة، مما يشير إلى تغيرات في الروابط الإثيرية (R-O-R) نتيجة تفاعل الهيدروكسيد مع المركبات العضوية. بالإضافة إلى ذلك، أظهر طيف C-O-C امتصاصاً عند 1047.25 cm^{-1} في الألياف غير المعالجة، وبنفس القيم تقريباً في الألياف المعالجة، مما يدل على استقرار روابط الإيثر نسبياً بعد المعالجة.

بالمقارنة بين الأطياف الثلاثة، يمكن ملاحظة أن المعالجة بهيدروكسيد الصوديوم تؤدي إلى بعض التغيرات في الامتصاصات الطيفية، خاصة في نطاق C-H و C-O، مما يدل على إزالة بعض المكونات غير المرغوبة مثل الهيميسليولوز والمواد الشمعية. من ناحية أخرى، يظهر طيف القهوة اختلافات كبيرة، خاصة في شدة الامتصاص عند القيم المنخفضة، مما يشير إلى تركيبة كيميائية مختلفة تتضمن مركبات فينولية وأخرى مميزة للقهوة.

9.2.1. طيف FTIR لـ (PVC 100%) و (PVC 95% 5% قهوة) و (95 % PVC 5% DPLF معالجة بالسيلان) و (95 % PVC 5% DPLF معالجة بـNaOH)



الشكل 10.IV : طيف FTIR لـ (PVC 100%) و (PVC 95% 5% قهوة) و (95 % PVC 5% DPLF معالجة بالسيلان) و (95 % PVC 5% DPLF معالجة بـNaOH)

الجدول 9.IV: الترددات المميزة للمركبات (PVC 100%) و (PVC 95% 5% قهوة) و (5 % DPLF معالجة بالسيلان) و (95 % PVC 5% DPLF معالجة بـNaOH)

المركبات	الوظيفة والتردد						
	O-H المرتبطة	C-H الكان	Si-O	C=C	C-O	C-O-C	C-CL
PVC 100%	-	2963 et 2845.6	-	-	-	-	714
PVC95% DPLF5% Tr/silane	3416.63	2906.08et 2867.80	1044.89	-	1276.33	10421.14	721.10
PVC95% DPLF5% Tr/NaOH	3371.81	2912.57 et 2855.01	-	-	1136.88	1072.92	708.31
PVC95% 5% قهوة N.Tr	3346.07	2939.71 et 2843.39	-	1554.3	1280.53	-	561.78

يعرض الشكل 10.IV أطياف FTIR لأربعة أنظمة مختلفة من مادة PVC ، حيث تمت مقارنة المركب النقي مع ثلاث عينات مركبة تحتوي على إضافات طبيعية مختلفة: تفل القهوة، DPLF المعالج بالسيلان، و DPLF المعالج بـ NaOH. يمكن استخلاص التحليلات التالية من النتائج الظاهرة:

نطاق امتصاص مجموعات الهيدروكسيل (-OH)

- يظهر الامتصاص عند حوالي 3416.63 cm^{-1} في مركب PVC, 5% DPLF Tr-silane ، وعند 3371.81 cm^{-1} في مركب PVC, 5% DPLF Tr-NaOH، مما يشير إلى وجود مجموعات الهيدروكسيل الناتجة عن عملية المعالجة الكيميائية بالأحماض والقواعد.
- في حالة PVC, 5% café، تم تسجيل نطاق امتصاص عند 3346.07 cm^{-1} ، وهو ما يعكس الطبيعة البوليمرية والمحتوى الغني بالمجموعات الوظيفية للهيدروكسيل في تفل القهوة.

نطاق الامتصاص لرابطة C-H (الألكانات)

- في مركب البولي كلوريد الفينيل (PVC) النقي، يظهر الامتصاص عند 2963 cm^{-1} و 2845.6 cm^{-1} ، وهو النطاق المميز لمجموعات الألكانات.
- في المركبات الأخرى، لوحظت تغييرات طفيفة في مواضع الامتصاص، مما يشير إلى تأثير الإضافات الطبيعية على التفاعلات البينية داخل مصفوفة البوليمر.

نطاق امتصاص رابطة Si-O في PVC, 5% DPLF Tr- silane

- يظهر نطاق الامتصاص عند 1044.89 cm^{-1} ، وهو مميز لروابط Si-O، مما يؤكد نجاح عملية المعالجة بالسيلان واندماج مجموعات السيليكون مع الهيكل البوليمري.

نطاق الامتصاص لرابطة C=C (الروابط المزدوجة للكربون)

- يظهر نطاق الامتصاص عند 1554.3 cm^{-1} في مركب PVC 5% café، مما يشير إلى وجود روابط كربون مزدوجة غير مشبعة، وهي سمة مميزة للمركبات العضوية الطبيعية مثل تفل القهوة.

نطاق الامتصاص لرابطة C-O و C-O-C

- في مركب PVC, 5% DPLF Tr-NaOH، تم تسجيل امتصاص عند 1136.88 cm^{-1} و 1072.92 cm^{-1} ، وهي قيم تتعلق بمجموعات الإيثر (C-O-C).
- مركب PVC, 5% DPLF Tr- silane أظهر نطاقًا عند 1276.33 cm^{-1} ، مما يشير إلى التفاعلات الناتجة عن ارتباط السيلان مع المصفوفة البوليمرية.

نطاق الامتصاص لرابطة C-Cl

- يُظهر مركب البولي كلوريد الفينيل (PVC) النقي امتصاصاً قوياً عند 714 cm^{-1} ، وهو النطاق المميز لرابطة C-Cl الموجودة في هيكل البوليمر.
- في المركبات المركبة الأخرى، لوحظت تغييرات طفيفة في هذا النطاق بسبب تأثير التفاعلات الكيميائية مع الإضافات الطبيعية، مما قد يؤدي إلى تعديل طفيف في التركيب الجزيئي.

الاستنتاجات العامة

- يعكس طيف FTIR التغيرات الكيميائية والبنوية التي طرأت على مركبات PVC عند إضافة الإضافات الطبيعية المختلفة.
- عملية معالجة DPLF بالسيلان و NaOH عززت ظهور نطاقات مميزة لمجموعات Si-O و C-O-C، مما يشير إلى تحسن في التفاعل بين المصفوفة البوليمرية والألياف المضافة.
- إدخال قفل القهوة أدى إلى بروز نطاق C=C، مما يشير إلى إمكانية حدوث تفاعلات أكسدة أو تكوين روابط جديدة داخل النظام.
- التغيرات الطفيفة في نطاق C-Cl توضح أن الإضافات قد أثرت على الهيكل البوليمري ولكن دون تدميره، مما يشير إلى استقرار التركيب البنوي لبولي كلوريد الفينيل (PVC) بعد التعديل.

بناءً على هذه النتائج، يمكن استخدام هذا التحليل لتفسير تأثير المواد الطبيعية المضافة على تحسين خصائص البولي كلوريد الفينيل (PVC)، مما يفتح المجال لمزيد من الدراسات حول التفاعل بين البوليمر والمضافات العضوية لتعزيز الأداء الميكانيكي والحراري لهذه المواد المركبة.

خلاصة لما سبق، أظهرت جميع الجداول السابقة أن جميع الوظائف التي ظهرت في أطيف الأشعة تحت الحمراء (FTIR) تعود إلى مكونات المواد المستخدمة في دراستنا.

3.1. امتصاص الماء المقطر

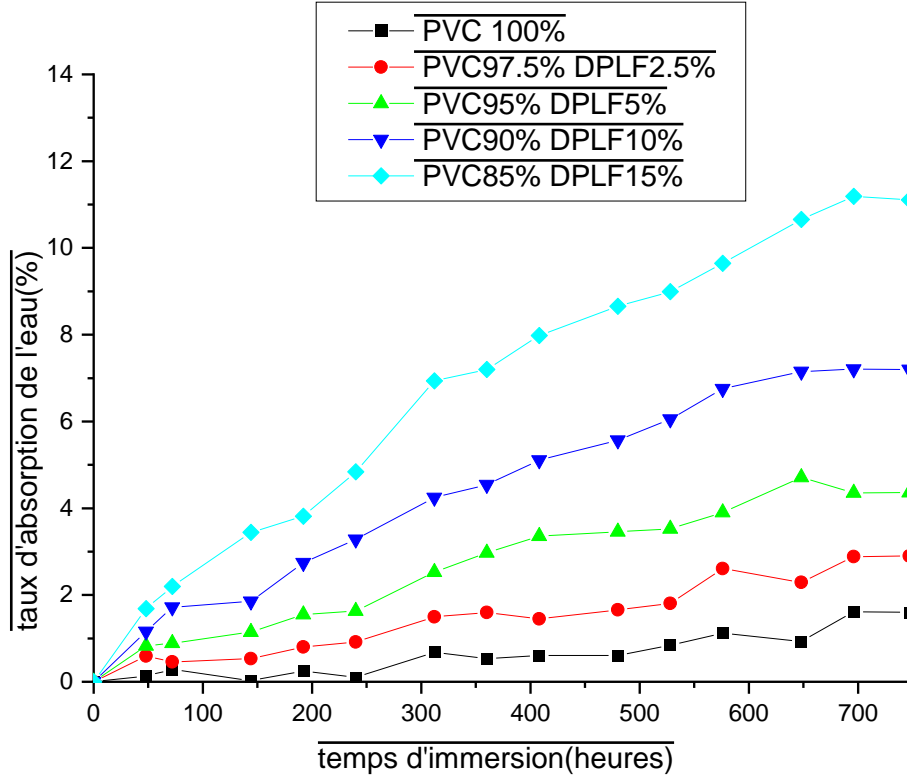
من أجل تقييم القدرة الامتصاصية للمركبات المحضرة، تم إجراء دراسة مفصلة لمدى امتصاصها للماء، وذلك بهدف تحليل تأثير تركيبها على سلوكها تجاه الامتصاص وتحسين خصائصها الفيزيائية.

1.3.1. تأثير نسبة الألياف على الامتصاص

تم إجراء هذه الدراسة على مدى أكثر من 744 ساعة، مع أخذ عينات كل 48 ساعة. من خلال تحليل الشكل الذي يمثل المركب المحتوي على ألياف جريد نخيل التمر غير المعالجة، نلاحظ أن خاصية الامتصاص تزداد مع زيادة نسبة الألياف المستخدمة. وهذا يشير إلى أن التماسك بين الألياف والمصفوفة البوليمرية ضعيف، وهو ما يُعزى إلى الطبيعة غير البلورية لمادة البولي كلوريد الفينيل وخصائصه الحرارية اللدنة.

يمكن تفسير هذا التأثير أيضاً من خلال تحليل منحنيات الخواص الميكانيكية الشكل IV.8 ، حيث يظهر انخفاض في قيم مقاومة الكسر، مما يؤدي بدوره إلى زيادة الاستطالة عند الكسر.

1.1.3.1. تأثير نسبة ألياف أوراق نخيل التمر (DPLF) على الامتصاص



الشكل: 11.IV امتصاص الماء المقطر بمرور الزمن لمختلف النسب من PVC / DPLF 100% PVC ، 2.5% DPLF ، 5% DPLF ، 10% DPLF ، 15% DPLF

الملاحظات الرئيسية

تأثير نسبة ألياف أوراق نخيل التمر (DPLF)

*يلاحظ أن زيادة نسبة ألياف DPLF تؤدي إلى زيادة معدل امتصاص الماء.

*يظهر البولي كلوريد الفينيل (PVC) النقي (100%) أقل نسبة امتصاص للماء، وهو أمر متوقع نظراً لكونه بوليمراً كارهاً للماء.

*على العكس، المركبات التي تحتوي على ألياف DPLF تُظهر امتصاصاً أعلى للماء بسبب الطبيعة المحبة للماء للألياف النباتية.

ديناميكية الامتصاص

*في الساعات الأولى من الغمر، يزداد امتصاص الماء بسرعة، ثم يبدأ في التباطؤ التدريجي مع مرور الوقت.

*هذا الاتجاه يكون أكثر وضوحًا في العينات التي تحتوي على نسب عالية من DPLF، 10% و 15% ..

*يلاحظ أنه يحدث التشبع وتتوقف العينات عن الإمتصاص بعد مرور حوالي 700 ساعة

التأثير على خصائص المركب

*الامتصاص العالي للماء يمكن أن يُضعف الترابط بين الألياف والمصفوفة البوليمرية، مما يؤدي إلى انخفاض الخصائص الميكانيكية للمركب.

*يمكن ربط زيادة الاستطالة عند الكسر وانخفاض مقاومة الشد بهذه النتائج.

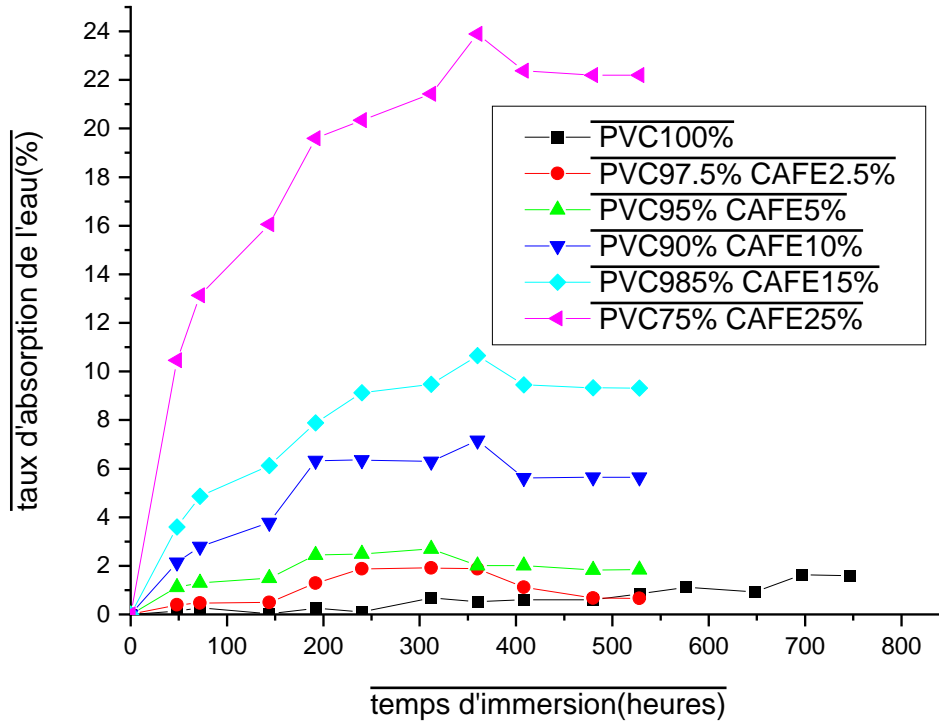
الاستنتاج

إدخال الألياف اوراق نخيل التمر (DPLF) في البولي كلوريد الفينيل (PVC) يؤدي إلى زيادة امتصاص الماء، مما قد يؤثر على الأداء الميكانيكي ومتانة المركبات. يمكن التفكير في تعديل سطح الألياف (مثل المعالجة الكيميائية أو استخدام عوامل التوافق) للحد من هذا الامتصاص وتحسين تماسك المركب.

2.1.3.1. تأثير نسبة القهوة على الامتصاص

بالنسبة للإضافة الثانية، وهي تفل القهوة، يُلاحظ أن الامتصاص يكون أكثر وضوحًا مقارنةً بالألياف اوراق نخيل التمر (DPLF). يُعزى هذا السلوك إلى الطبيعة الكيميائية للقهوة، حيث تحتوي على نسبة عالية من السليلوز والهيميسليلوز، وهما مادتان معروفتان بقدرتهما الكبيرة على امتصاص الرطوبة.

بالإضافة إلى ذلك، فإن التفاعل بين تفل القهوة ومصفوفة البولي كلوريد الفينيل (PVC) يكون أقل فعالية، مما يؤدي إلى ضعف الالتصاق بينهما. ينعكس هذا التأثير بشكل واضح على الخصائص الميكانيكية للمركب، حيث تُظهر النتائج انخفاضًا في مقاومة الشد وزيادة في الاستطالة عند الكسر، مما يدل على ضعف الترابط الداخلي في المادة المركبة.



الشكل : 12.IV امتصاص الماء المقطر بدلالة الزمن لـ PVC 100% ، PVC مع 2.5% قهوة، PVC مع 5% قهوة، PVC مع 10% قهوة، PVC مع 15% قهوة.

يمثل هذا الشكل منحنيات امتصاص الماء المقطر للمواد المركبة المصنوعة من الـ PVC بنسب مختلفة من القهوة، حيث يتم تتبع الامتصاص بدلالة الزمن.

تأثير القهوة على الامتصاص

*يلاحظ انه يحدث التشبع وتتوقف العينات عن الإمتصاص بعد مرور حوالي 350 ساعة

*يلاحظ أن زيادة نسبة القهوة في التركيبة تؤدي إلى ارتفاع كبير في معدل امتصاص الماء.

*التركيبة التي تحتوي على 25% من القهوة (المنحنى البنفسجي) تظهر أعلى نسبة امتصاص، مما يشير إلى أن المادة تصبح أكثر مسامية وأقل مقاومة للرطوبة.

المقارنة مع الـ PVC النقي (100%)

*الـ PVC النقي (المنحنى الأسود) يظهر أقل امتصاص للماء، مما يدل على طابعه الهيدروفوبي (مقاوم للماء)

*بمجرد إضافة تفل القهوة ولو بنسبة ضئيلة (2.5%)، يزداد الامتصاص تدريجياً، ويزداد أكثر مع زيادة نسبة القهوة.

تفسير النتائج

*هذه الظاهرة تعود إلى الطبيعة الكيميائية للقهوة، التي تحتوي على نسبة عالية من السليلوز والهيميسليلوز، وهي مواد تميل إلى امتصاص الرطوبة.

*ضعف الالتصاق بين القهوة ومصفوفة البولي كلوريد الفينيل (PVC) يساهم في خلق مسامات دقيقة داخل المادة، مما يسمح بمرور الماء إلى الداخل وزيادة الامتصاص.

*النتائج تتوافق مع الإنخفاض المتوقع في بعض الخصائص الميكانيكية مثل مقاومة الشد وزيادة الاستطالة عند الكسر.

الاستنتاج

*يمكن استنتاج أن إدراج القهوة بنسبة مرتفعة في مصفوفة البولي كلوريد الفينيل (PVC) يعزز امتصاص الماء، مما قد يكون غير مرغوب فيه في التطبيقات التي تتطلب مقاومة عالية للرطوبة.

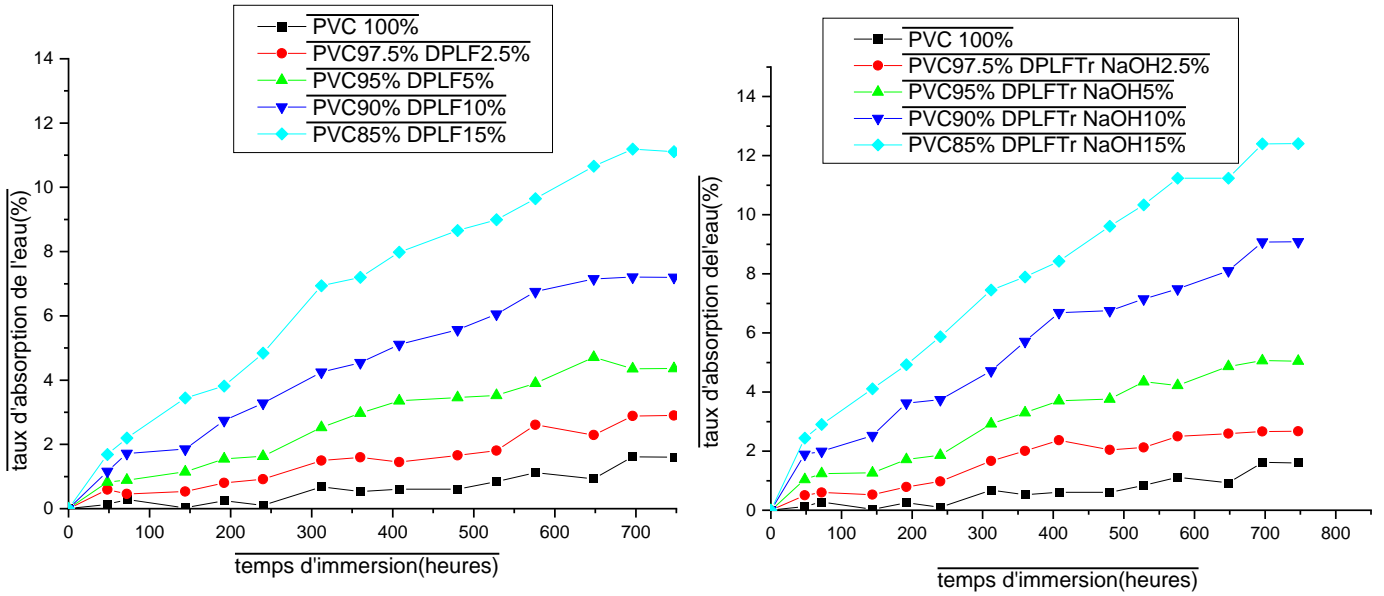
*ينبغي التحكم في نسبة القهوة المستخدمة لتحسين خصائص المادة حسب التطبيقات المستهدفة.

2.3.1. تأثير معالجة الألياف

عند معالجة ألياف DPLF بمحلول NaOH أو بالسيلان قبل دمجها في مصفوفة البولي كلوريد الفينيل (PVC)، لم يتم تسجيل تحسن ملحوظ في الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للمادة المركبة. يعود هذا السلوك إلى الطبيعة غير البلورية (العشوائية) للـ PVC، مما يؤدي إلى ضعف التفاعل بين الألياف والمصفوفة البوليمرية.

ضعف قوى التماسك بين مكونات المادة المركبة يفسر عدم تحسن الخصائص، حيث تتركز الألياف في الفراغات والتجاويف الموجودة داخل البنية اللابلورية amorphe البولي كلوريد الفينيل (PVC) بدلاً من تحقيق اندماج فعال معها.

على الرغم من أن المعالجة الكيميائية تهدف عادةً إلى تحسين الالتصاق بين الألياف والمصفوفة البوليمرية، إلا أن طبيعة اللابلورية (amorphe) لبولي كلوريد الفينيل (PVC) تحدّ من هذا التأثير، مما قد يتطلب استخدام طرق إضافية أو بديلة لتعزيز التفاعل بين المكونات.



الشكل 13.IV: امتصاص الماء المقطر بدلالة الزمن لـ PVC/DPLF غير المعالجة و PVC/DPLF المعالجة بـ NaOH

يقدم الشكل:13.IV مقارنة بين سلوك امتصاص الماء المقطر لعينة من البولي كلوريد الفينيل (PVC) النقي ومركبات البولي كلوريد الفينيل (PVC) المعززة بألياف اوراق نخيل التمر (DPLF) غير المعالجة والمعالجة بـ NaOH بتركيزات مختلفة (2.5%، 5%، 10%، 15%).

الملاحظات الرئيسية:

زيادة معدل الامتصاص مع نسبة الألياف

*نلاحظ أن PVC 100% يمتلك أقل معدل امتصاص، مما يؤكد طبيعته الكارهة للماء.

*زيادة نسبة DPLF غير المعالجة، يزداد معدل الامتصاص بشكل واضح، مما يشير إلى تأثير المسامية العالية لهذه الألياف.

تأثير المعالجة بـ NaOH

*المركبات المحتوية على DPLF المعالجة بـ NaOH تظهر زيادة في امتصاص الماء مقارنةً بـ PVC النقي ولكن بمعدلات أقل من تلك المحتوية على DPLF غير المعالجة..

سلوك الامتصاص بتغير الزمن

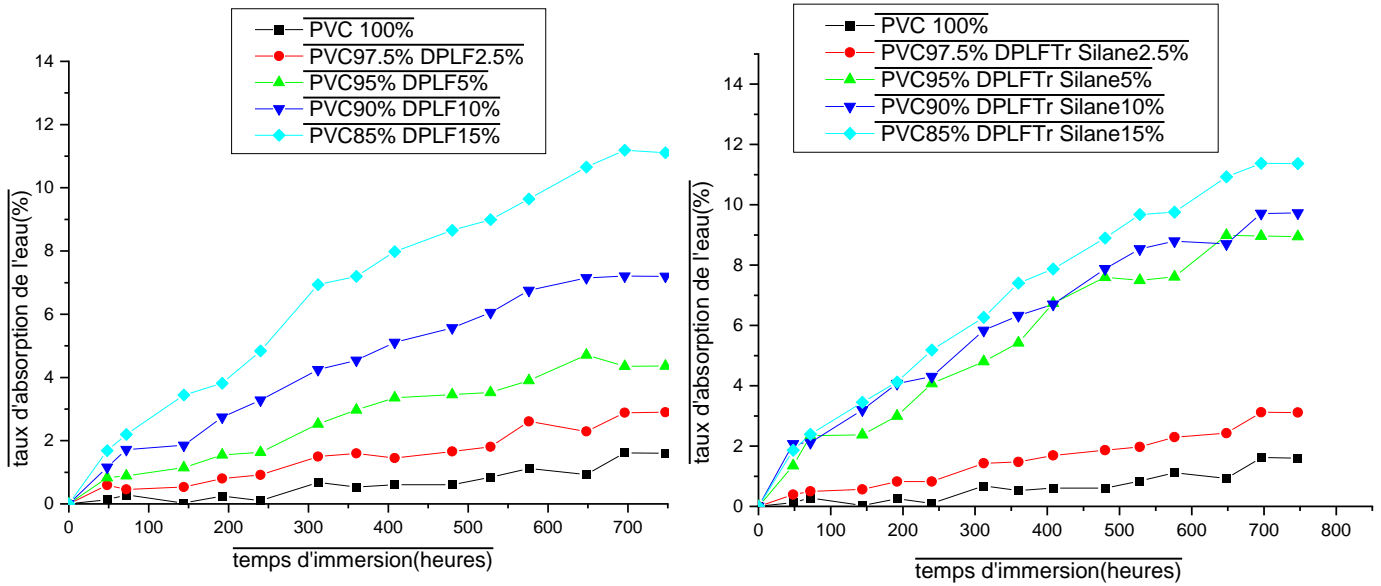
*جميع العينات تظهر زيادة تدريجية في امتصاص الماء مع مرور الوقت، وهو أمر متوقع بسبب انتشار الماء في بنية المركب.

* عند التركيزات الأعلى للألياف (15%)، يكون معدل الامتصاص أكبر، مما يشير إلى أن التشبع بالماء يحدث بشكل أسرع بسبب زيادة المسامية.

الاستنتاجات

* تؤدي إضافة ألياف DPLF إلى زيادة ملحوظة في امتصاص الماء، مما قد يؤثر سلبًا على خصائص المتانة والاستقرار لهذه المركبات.

تأثير المعالجة بالسيلان



الشكل IV.14: امتصاص الماء المقطر بمرور الوقت لـ PVC/DPLF غير المعالجة و PVC/DPLF المعالجة بالسيلان.

يمثل الشكل IV.14 مقارنة بين سلوك امتصاص الماء للمركبات ذات اساس البولي كلوريد الفينيل (PVC) النقي ومركبات البولي كلوريد الفينيل (PVC) المعززة بألياف اوراق نخيل التمر (DPLF) غير المعالجة والمعالجة بمركب السيلان بتركيزات مختلفة (2.5%، 5%، 10%، 15%).

الملاحظات الرئيسية

زيادة معدل الامتصاص مع نسبة الألياف

* كما هو متوقع، فإن PVC 100% لديه أدنى معدل امتصاص للماء.

* مع زيادة نسبة DPLF غير المعالجة، يزداد معدل الامتصاص، مما يدل على أن الألياف الطبيعية ذات الطبيعة المحبة للماء تسهم في ارتفاع معدل امتصاص الماء في المركب.

سلوك الامتصاص عبر الزمن

*جميع المركبات تظهر زيادة تدريجية في امتصاص الماء بمرور الوقت، مما يعكس الانتشار التدريجي للماء داخل المادة.

*المركبات التي تحتوي على نسب أعلى من الألياف المعالجة بالسيلان (15%) لا تزال تظهر امتصاصاً مرتفعاً

تفسير نتائج امتصاص الماء للمركبات المركبة: (PVC/DPLF)

من خلال دراسة منحنيات امتصاص الماء للمركبات المركبة المحضرة من بولي كلوريد الفينيل (PVC) والمُدعمة بألياف أوراق النخيل (DPLF)، سواء كانت غير معالجة أو معالجة قلويًا (NaOH) أو بالسيلان، تبين أنه لم يحدث تحسن واضح في مقاومة امتصاص الماء بعد المعالجة الكيميائية لأوراق النخيل وكان نسبة الامتصاص للمركبات الثلاث مركبات PVC/DPLF المعالجة بالسيلان و مركبات PVC/DPLF المعالجة قلويًا ومركبات PVC/DPLF غير المعالجة جد متقاربة

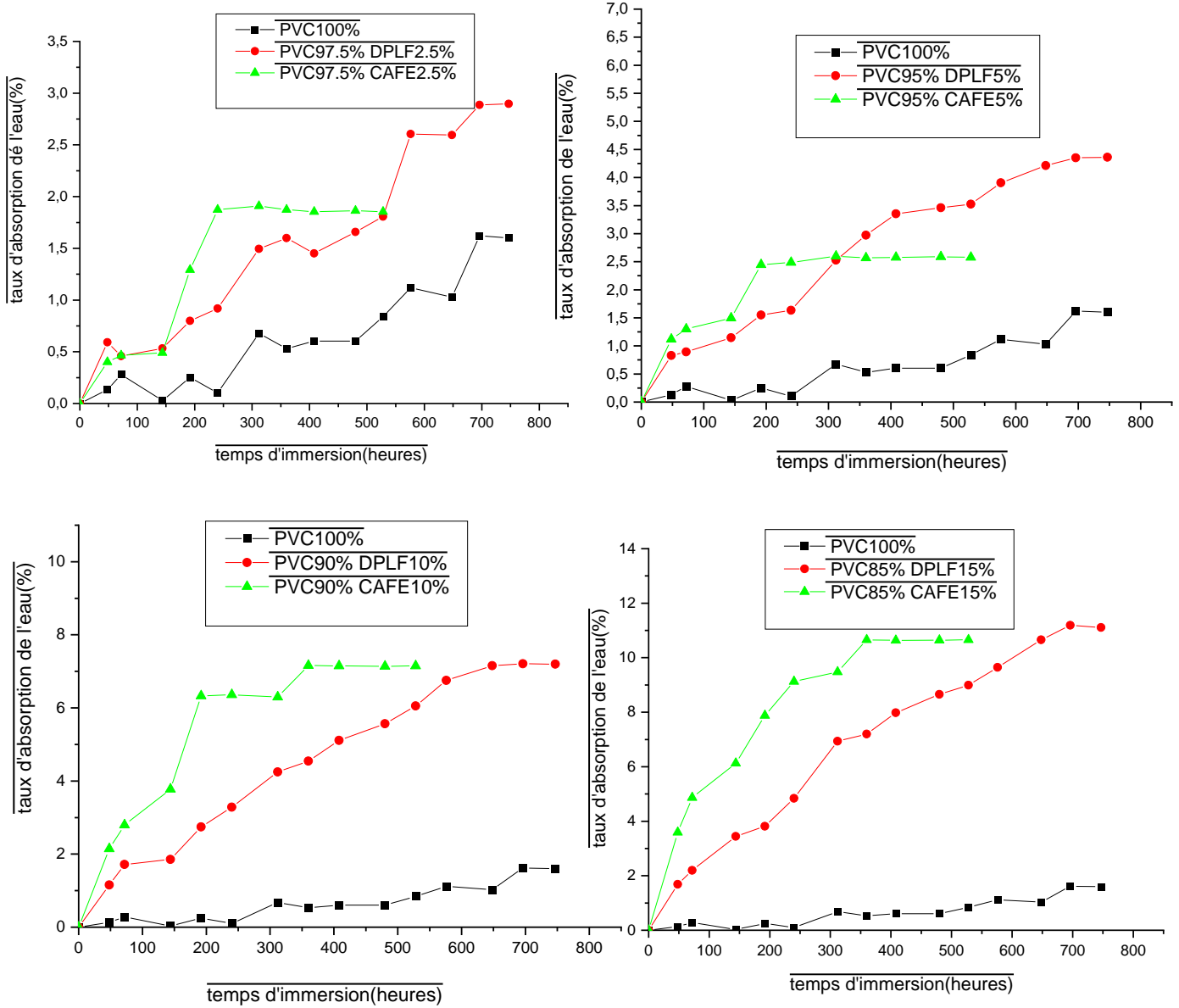
تمثل هذه النتيجة سلوكًا غير متوقع من الناحية النظرية، إذ من المفترض أن تؤدي المعالجة الكيميائية للألياف إلى تحسين التوافق مع المصفوفة البوليمرية وتقليل امتصاص الماء. غير أن النتائج أظهرت عكس ذلك، مما يشير إلى وجود عوامل أخرى تؤثر على الأداء.

أحد العوامل الجوهرية التي تفسر هذه الظاهرة هو الطبيعة غير المتبلورة (Amorphe) لبولي كلوريد الفينيل (PVC)، والتي تتميز بتركيب جزيئي غير منتظم وتماسك ضعيف بين سلسله. في هذا السياق، فإن إدماج الألياف المعالجة ضمن المصفوفة قد لا يؤدي إلى ترابط كافٍ بين مكوناتها، بل قد تعمل الألياف، خاصة عند معالجتها، على شغل الفراغات والتجاويف الموجودة ضمن البنية غير المنتظمة للبوليمر دون تحقيق ترابط كيميائي فعال.

ومن جهة أخرى، من المحتمل أن تكون المعالجة الكيميائية، سواء بالسيلان أو القلوي، قد أدت إلى تغييرات سطحية أو زيادة في المسامية، مما يسهم في خلق مسارات مجهرية تسهل امتصاص الماء. كما أن عدم تجانس توزيع الألياف داخل المصفوفة أو ضعف التوافق البيني قد يكون سببًا إضافيًا في زيادة النفاذية.

*قد يكون من المفيد دمج تقنيات معالجة إضافية مثل الطلاءات المقاومة للماء أو استخدام مواد رابطة أقوى لتحسين أداء المركبات في التطبيقات الصناعية.

3.3.1. تأثير طبيعة الألياف (PVC/DPLF، قهوة/PVC)



الشكل: 15.IV إمتصاص الماء للمركبات PVC/DPLF و قهوة/PVC

تحليل المنحنيات في الشكل 15.IV يبرز تأثير طبيعة الألياف على إمتصاص الماء في مركب الـ PVC. فيما يلي أهم الملاحظات:

المقارنة بين PVC/DPLF و قهوة/PVC

* إمتصاص الماء يكون أسرع بكثير في المركبات التي تحتوي على تفل القهوة مقارنة بتلك التي تحتوي على الألياف اوراق نخيل التمر. (DPLF) وتكون نسبة الإمتصاص أكبر عند النسب العالية للقهوة (15% و 20%)

*يمكن تفسير هذا الاختلاف بالطبيعة الكيميائية لكل من المادتين المضافتين، حيث يحتوي تفل القهوة على نسبة عالية من السليلوز والهيميسليلوز، وهما مادتان محبة للماء مما يزيد من الامتصاص.

*في المقابل، تبدو ألياف DPLF أقل امتصاصاً للماء بسبب بنيتها الأكثر تماسكاً واحتوائها على نسبة أعلى من اللينين، الذي يقلل من نفاذية الماء.

تأثير نسبة الألياف

*يزداد امتصاص الماء مع زيادة النسبة في كلا النوعين من الألياف.

*لكن هذه الزيادة تكون أكثر وضوحاً في حالة القهوة، خاصة عند النسب العالية (10% و 15%)، مما يشير إلى تفاعل قوي مع الماء.

تأثير الامتصاص على تماسك الألياف مع مصفوفة PVC

*الامتصاص العالي لتفل القهوة يشير إلى ضعف الالتصاق بالمصفوفة البوليمرية، مما قد يؤثر سلباً على الخصائص الميكانيكية للمركب.

*في المقابل، تظهر ألياف DPLF توافقاً أفضل مع البولي كلوريد الفينيل (PVC)، رغم أن التماسك لا يزال محدوداً بسبب الطبيعة غير البلورية (الأمورفية) للبوليمر.

الخلاصة

يُعد اختيار نوع الألياف المضافة عاملاً رئيسياً في تحديد معدل امتصاص الماء في مركبات الـ PVC. فرغم أن تفل القهوة مادة متوفرة وقابلة للتحلل الحيوي، إلا أنه يؤدي إلى زيادة امتصاص الماء، مما قد يؤثر سلباً على الأداء الميكانيكي. بالمقابل، توفر ألياف أوراق نخيل التمر توازناً أفضل عبر الحد من امتصاص الماء، مما قد يحسن من متانة المركب.

4.1. نتائج الدراسة الميكانيكية

تمت دراسة السلوك الميكانيكي لمركبات البوليمر المختلفة المدعمة بنسب متعددة من الألياف.

1.4.1. تأثير نسبة الإضافات على الخواص الميكانيكية

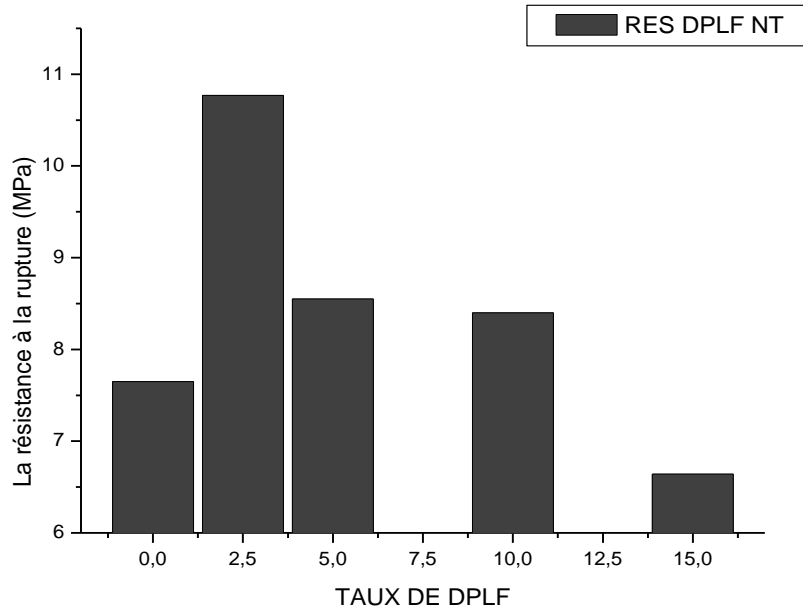
1.1.4.1. تأثير نسبة ألياف أوراق نخيل التمر (DPLF)

بالنسبة للمركبات المكونة من ألياف أوراق نخيل التمر والـ PVC، لوحظت أعلى مقاومة ميكانيكية عند نسبة 2.5%. من الألياف غير المعالجة، ويُعزى ذلك إلى قدرة هذه الألياف على التغلغل داخل الفراغات الموجودة في بنية الـ PVC غير المتبلورة. لكن مع ارتفاع نسبة الألياف، تقل المقاومة تدريجياً، مما يؤدي في المقابل إلى زيادة الاستطالة عند الكسر.

الجدول : 10.IV الخواص الميكانيكية لتراكيب PVC/DPLF

الصلادة (شور)	الاستطالة ϵ (%)	المقاومة σ (MPa)	العينة
87.26	187.80	7.65	S101
89.56	240.60	10.77	S102
89.50	182.33	8.55	S103
91.60	161.71	8.40	S104
92.83	219.77	6.40	S105

أ. دراسة مقاومة الكسر



الشكل : 16.IV تطوّر مقاومة الكسر لتراكيب PVC/DPLF

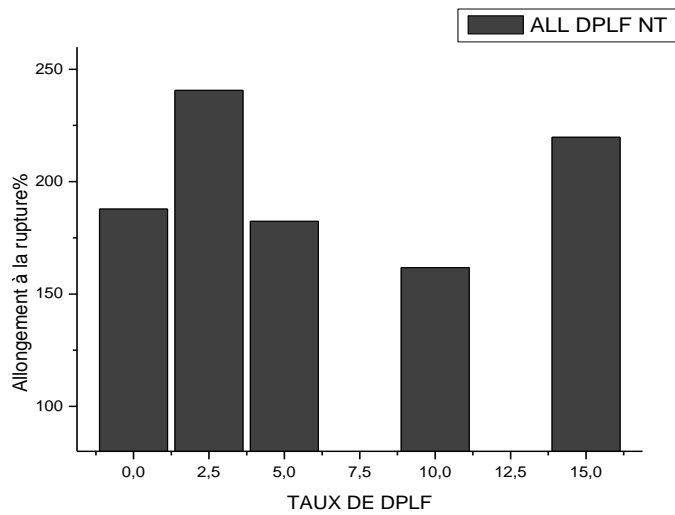
يُظهر الشكل 16.IV تطوّر مقاومة الكسر لتراكيب PVC/DPLF غير المعالجة (NT) حسب نسب مختلفة من ألياف اوراق نخيل التمر (DPLF). نلاحظ من الرسم البياني أن مقاومة الكسر تصل إلى أقصى قيمة لها عند نسبة 2.5% من DPLF، حيث بلغت حوالي 10.8 (MPa). يمكن تفسير هذه الزيادة بتحسّن التماسك بين الألياف والمصفوفة البوليميرية، مما يعزز من قدرة المادة على مقاومة الكسر وكذلك وقد يعزى ذلك الى عامل آخر وهي البنية البلورية المتواجدة في السليولوز.

ومع زيادة نسبة DPLF إلى 5% و 10%، تنخفض مقاومة الكسر تدريجياً، مما يدل على بداية حدوث تكتلات للألياف أو سوء توزيعها داخل المصفوفة، وهو ما يؤثر سلباً على التجانس البنيوي. عند نسبة DPLF 15%، تصل مقاومة

الكسر إلى أدنى مستوى لها، ما يعكس ضعف الترابط بين الألياف والبوليمير وزيادة الفجوات داخل التركيبة، مما يؤدي إلى سلوك هش.

بالتالي، تُظهر النتائج أن هناك نسبة مثالية منخفضة من DPLF حوالي 2.5% (تحسين مقاومة الكسر، بينما تؤدي النسب الأعلى إلى تدهور هذه الخاصية الميكانيكية).

ب. دراسة الاستطالة عند الكسر



الشكل : 17.IV تطوّر الاستطالة عند الكسر لتركيبات PVC/DPLF

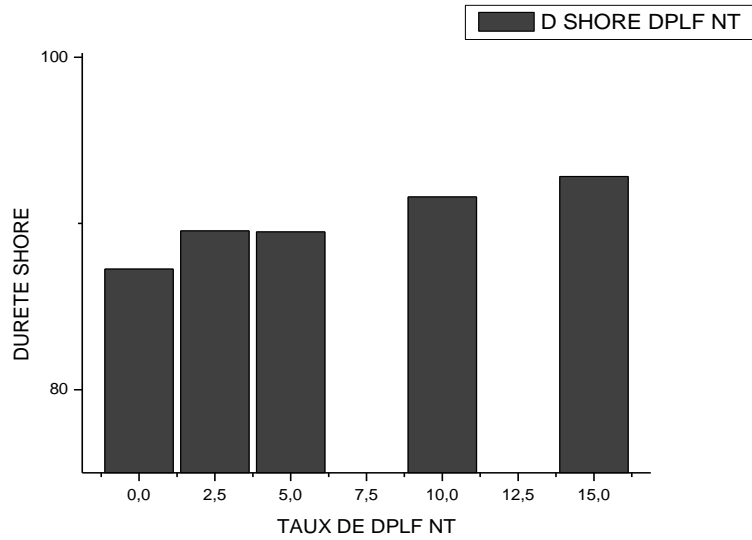
يُبين الشكل 17.IV تطوّر الاستطالة عند الكسر لتركيبات PVC/DPLF غير المعالجة (NT) حسب نسب مختلفة من ألياف اوراق النخيل النمر (DPLF). نلاحظ أن الاستطالة عند الكسر تسجل أعلى قيمة لها عند نسبة 2.5 % من الألياف، حيث تتجاوز 220%. هذا يشير إلى أن الكمية القليلة من الألياف تُساهم في تعزيز مرونة التركيبة دون التأثير السلبي على بنية البوليمير.

لكن مع زيادة نسبة DPLF إلى 5% و 10%، تنخفض الاستطالة بشكل ملحوظ، ما يدل على بداية التأثير السلبي للألياف على الليونة، بسبب احتمالية تكتلها أو ضعف تماسكها مع المصفوفة البوليميرية، مما يقلل من قابلية المادة للتمدد قبل الانكسار.

ومع ذلك، يُلاحظ تحسّن نسبي في الاستطالة عند نسبة 15% من الألياف، حيث ترتفع من جديد إلى ما يقارب 200%. هذا التحسّن قد يُعزى إلى تغيّر في توزيع الألياف أو إعادة تنظيم داخلي للمكونات يُحسن من الاستجابة الميكانيكية للمادة.

بشكل عام، يُظهر الشكل أن الاستطالة عند الكسر تتأثر بشكل غير خطي بزيادة نسبة DPLF ، مع وجود نسبة مثالية (2.5 %) تحقق أفضل توازن بين الليونة والهيكل البنيوي.

ج. دراسة صلادة شور (SHORE)



الشكل : 18.IV تطوّر الصلادة حسب مقياس شور (Shore) لتركيبات PVC/DPLF

يُوضح الشكل 18.IV تغير صلادة شور A لتركيبات PVC/DPLF غير المعالجة (NT) مع تغيّر نسبة ألياف اوراق نخيل التمر. (DPLF)

نلاحظ من خلال المنحنى أن الصلادة تزداد تدريجياً مع ارتفاع نسبة الألياف في التركيبة. في البداية، تكون الصلادة منخفضة نسبياً عند 0% من DPLF ، ثم تبدأ في الارتفاع عند 2.5% و 5%، مما يُشير إلى بداية تعزيز البنية الداخلية للمادة نتيجة إضافة الألياف.

عند نسب أعلى مثل 10% و 15%، تصل الصلادة إلى قيم قصوى، وهو ما يعكس التأثير الإيجابي لتعزيز الألياف على مقاومة المادة للتشوه السطحي. هذا السلوك متوقع، إذ أن إدماج الألياف النباتية يحدّ من ليونة المادة ويزيد من مقاومتها للإنغراس أو الخدش.

بالتالي، يُظهر الشكل أن زيادة محتوى DPLF تؤدي إلى تحسين ملحوظ في صلادة تركيبات PVC وقد يعزى ذلك الى عامل آخر وهي النبة البلورية المتواجدة في السليلوز، مما يُعزز من قابليتها للاستخدام في تطبيقات تتطلب مقاومة أكبر للضغط أو التآكل السطحي.

2.1.4.1. تأثير نسبة القهوة

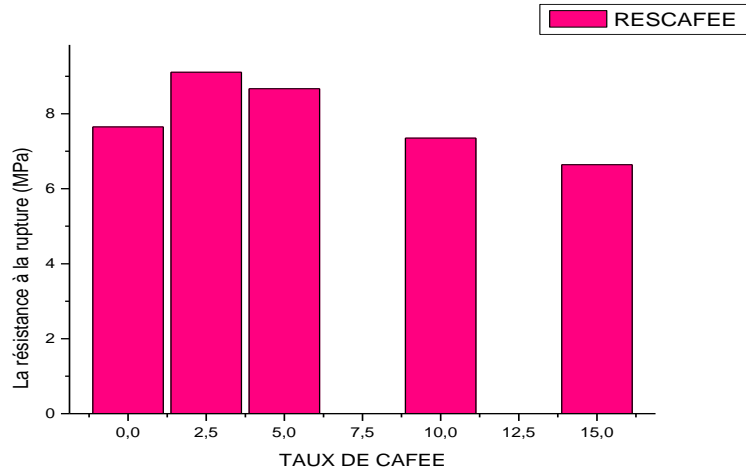
بالنسبة للتركيبات التي تحتوي على بقايا القهوة، لوحظ أن مقاومة الكسر تنخفض مع زيادة نسبة القهوة، كما ينخفض

الاستطالة عند الكسر بشكل ملحوظ

الجدول : 11.IV الخصائص الميكانيكية لتركيبات قهوة/PVC

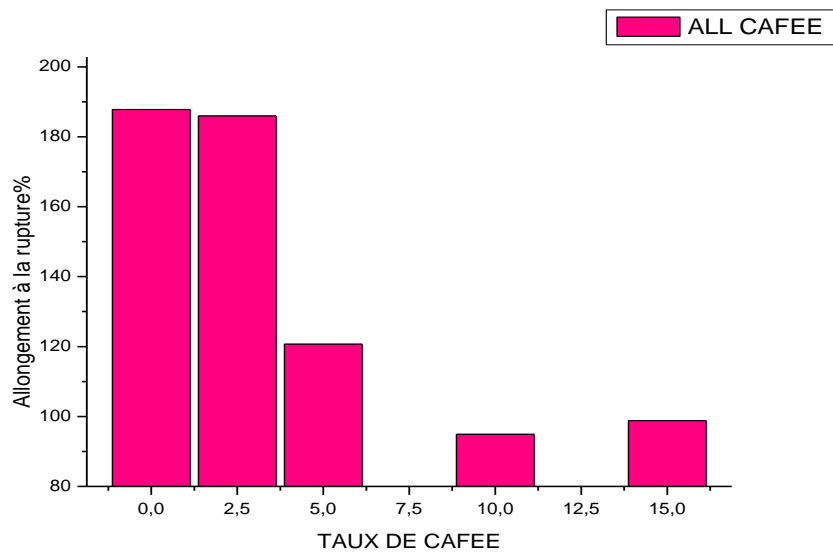
العينه	مقاومة الشد σ (MPa)	ϵ (%) الإستطالة	الصلادة (شور)
(PVC100%)S101	7.65	187.80	87.26
(PVC97.5/MC2.5)S118	9.11	186.00	82.10
(PVC95/MC5)S119	8.67	120.70	85.46
(PVC90/MC10)S120	7.35	94.90	87.86
(PVC85/MC15)S121	6.64	98.80	91.23

أ. دراسة مقاومة الشد عند الانكسار



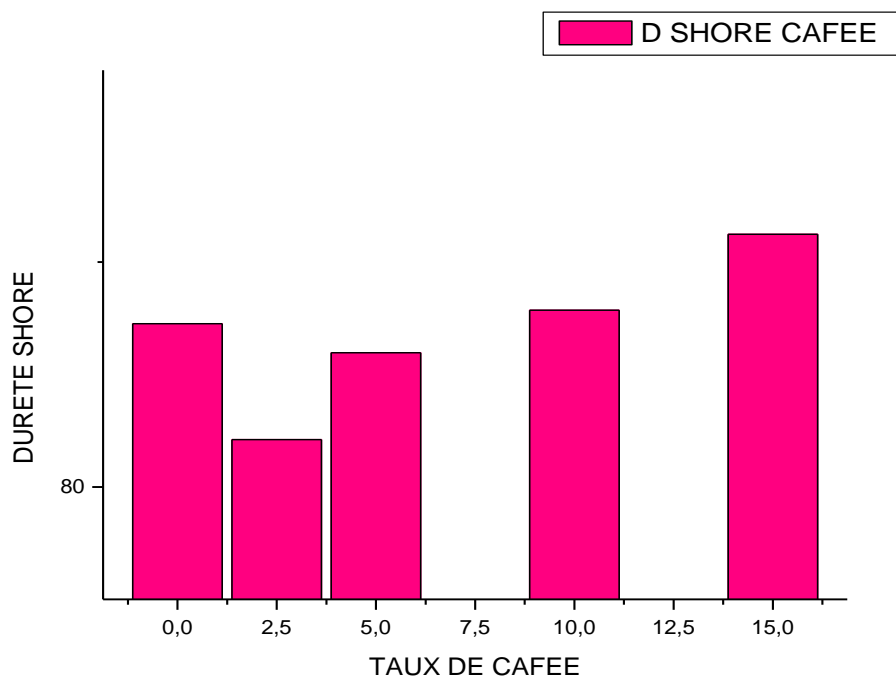
الشكل : 19.IV تطور مقاومة الشد عند الإنكسار لتركيبات PVC/ قهوة

ب. دراسة الاستطالة عند الانكسار



الشكل : IV. 20 تغير الإستطالة عند الكسر لتركيبات قهوة../PVC

ج. دراسة الصلادة (SHORE)



الشكل : IV. 21 تغير صلادة شور لتركيبات قهوة../PVC

تحليل نتائج الخواص الميكانيكية لمركبات نفل القهوة/PVC

- أفضل توازن بين مقاومة الشد والمرونة سُجِّل عند نسبة 2.5% من نفل القهوة.
 - زيادة نسبة النفل تؤدي إلى انخفاض مقاومة الشد والاستطالة، وهو ما يدل على بداية تدهور البنية الميكانيكية.
 - الصلادة ترتفع مع زيادة النفل، مما يشير إلى زيادة صلابة السطح وقساوته.
- إذًا، نفل القهوة يمكن اعتباره مادة تدعيم جيدة بنسبة منخفضة، ولكن عند نسب أعلى يجب الحذر بسبب التأثيرات السلبية على الخصائص الميكانيكية.

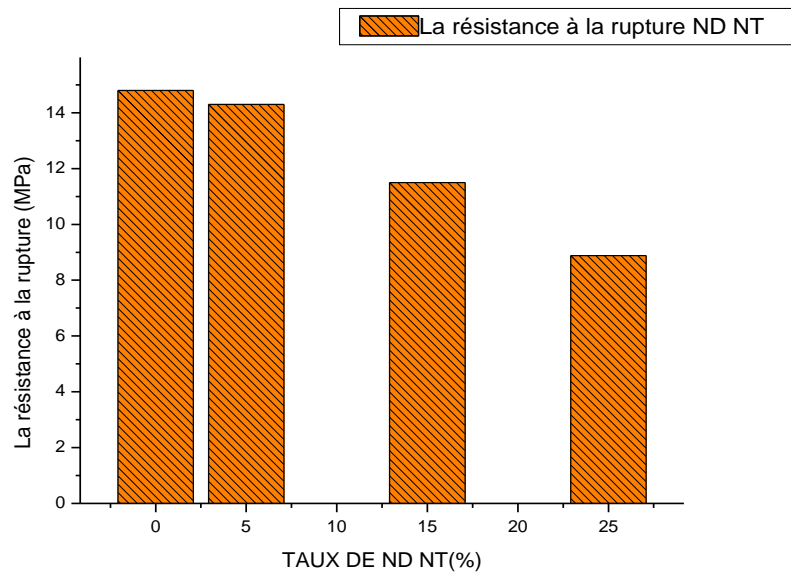
3.1.4.1. تأثير نسبة ألياف نوى التمر

أظهرت الدراسة الميكانيكية الكاملة للمركبات المحضرة أنه مع زيادة نسبة مسحوق نوى التمر، تنخفض مقاومة الكسر مقارنة بالبوليمر النقي.

الجدول: 12.IV الخصائص الميكانيكية لتركيبات نوى التمر/PVC

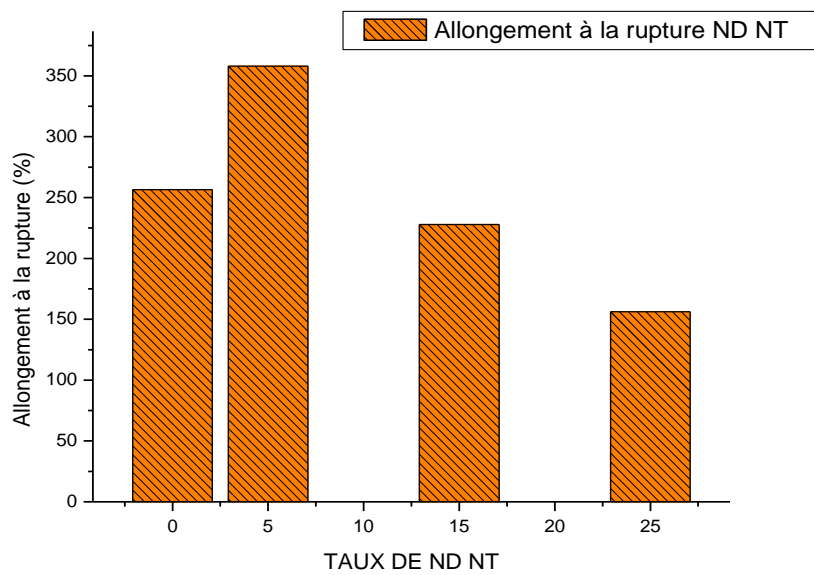
التركيبية	PVC	نوى التمر / PVC 5%	نوى التمر / PVC 15%	نوى التمر / PVC 25%
مقاومة الكسر (MPa)	14.8	14.3	11.5	8.88
الاستطالة عند الكسر (%)	256.6	358	227.9	156.2
(Shore A) الصلادة	82.88	83.1	89.64	90.12

أ. دراسة مقاومة الكسر



الشكل: 22.IV. تغير مقاومة الكسر لتركيبات نوى التمر/PVC.

ب. دراسة الاستطالة عند الكسر

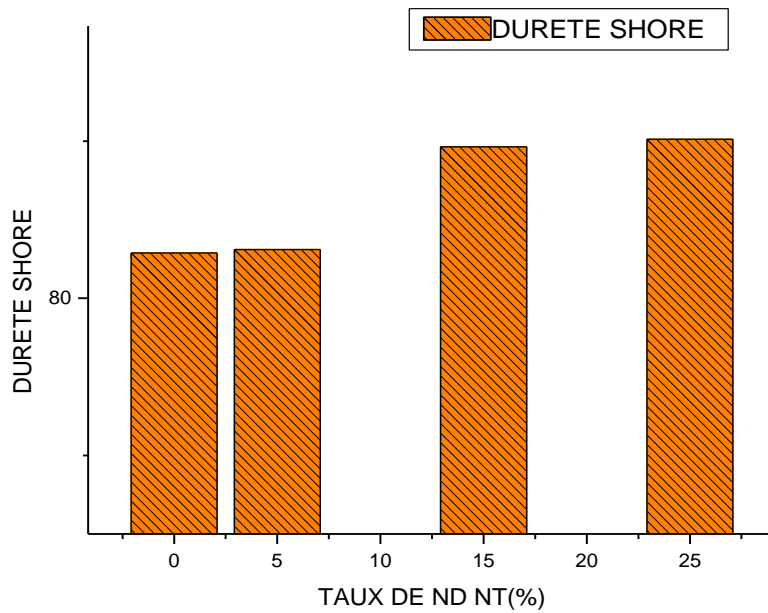


الشكل: 23.IV. تغير الاستطالة عند الكسر لتركيبات نوى التمر/PVC.

تشير هذه الملاحظة إلى أن إضافة مسحوق نوى التمر تُقلل من الطابع البلاستيكي للبولىمر، مما يجعله أكثر صلابة نسبياً.

بالنسبة للإستطالة عند الكسر، نلاحظ نفس الظاهرة، أي نفس الإتجاه التنازلي، حيث تنخفض هذه القيمة نتيجة لزيادة صلابة المتراكب.

ج. دراسة الصلادة (SHORE)



الشكل : 24.IV. تغير صلادة Shore لتركيبات نوى التمر./PVC

تحليل نتائج الخواص الميكانيكية لمركبات نوى التمر/PVC

عند نسب منخفضة (5%)، يظهر تأثير إيجابي من حيث زيادة الاستطالة وثبات المقاومة، مما يدل على دور معزز فعال في هذه النسبة.

عند نسب أعلى (15% و 25%)، يبدأ التأثير العكسي، مما يوحي بأن التشبع الزائد بالألياف دون معالجة سطحية أو توافق كيميائي كافٍ يؤدي إلى نتائج عكسية.

نوى التمر كمادة معززة طبيعية تتطلب تحسينات إضافية (مثل المعالجة الكيميائية أو التوزيع المتجانس) لتحقيق أداء ميكانيكي أفضل.

2.4.1. تأثير المعالجة الكيميائية على الخصائص الميكانيكية

بالنسبة للمترابكات / PVC ألياف DPLF المعالجة بـ NaOH ، نلاحظ نفس النمط (الأشكال IV.25 و IV.26 و IV.27 و IV.28) ، حيث تزداد مقاومة الكسر لتكون في قيمتها الحدية عند النسبة 2.5 ثم تنخفض ، ونفس الشيء بالنسبة للاستطالة.

ونفس الملاحظات بالنسبة للمترابكات PVC / DPLF المعالجة بالسيلان و NaOH أي ان المعالجة الكيميائية بـ NaOH أو بالسيلان لم تؤد إلى تحسين ملحوظ في التماسك مع المصفوفة البوليمرية وهو ما ينبغي تأكيده لاحقاً عن طريق التحليل المورفولوجي (المجهر الإلكتروني الماسح MEB).

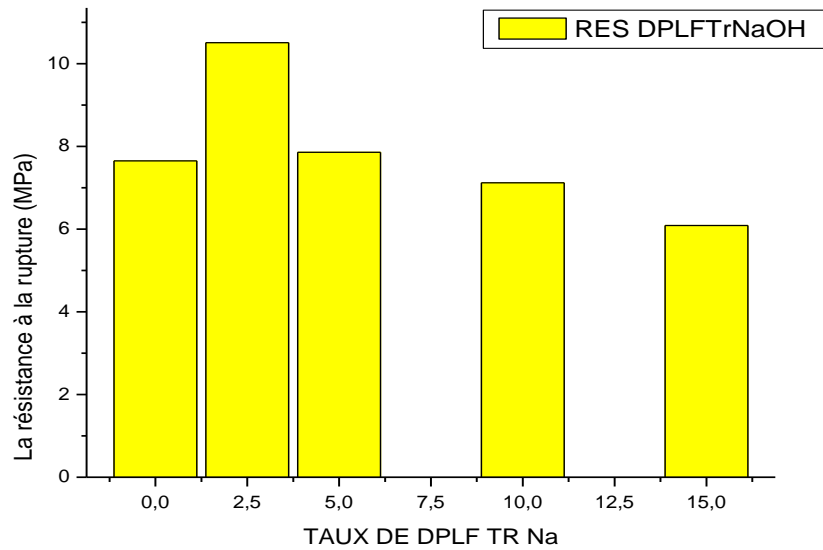
وتؤكد نتائج اختبار الصلادة (Shore) ما توصلت إليه الدراسة الميكانيكية، حيث لوحظ ازدياد الصلادة كلما ارتفعت نسبة الألياف المضافة.

الجدول 13.IV الخصائص الميكانيكية لتركيبات PVC/DPLF المعالجة بـ NaOH و السيلان.

التركيبة	σ مقاومة الكسر (MPa)	ϵ الاستطالة (%)	الصلادة (Shore)
S101	7.65	187.80	87.26
S108	10.51	241.22	84.66
S109	7.86	139.39	83.13
S110	7.12	116.51	90.73
S111	6.09	115.08	86.36
S114	9.55	182.81	88.46
S115	7.69	126.20	88.53
S116	7.69	157.90	91.43
S117	6.60	114.35	94.53

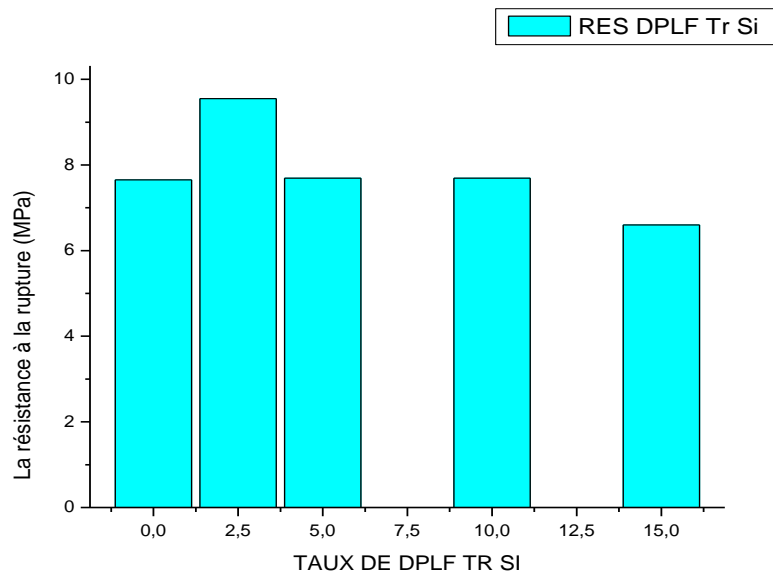
أ. دراسة مقاومة الكسر

1. المعالجة بـ NaOH



الشكل : 25.IV المدرج البياني لمقاومة الكسر للمتراكبات PVC/DPLF المعالجة بـ NaOH

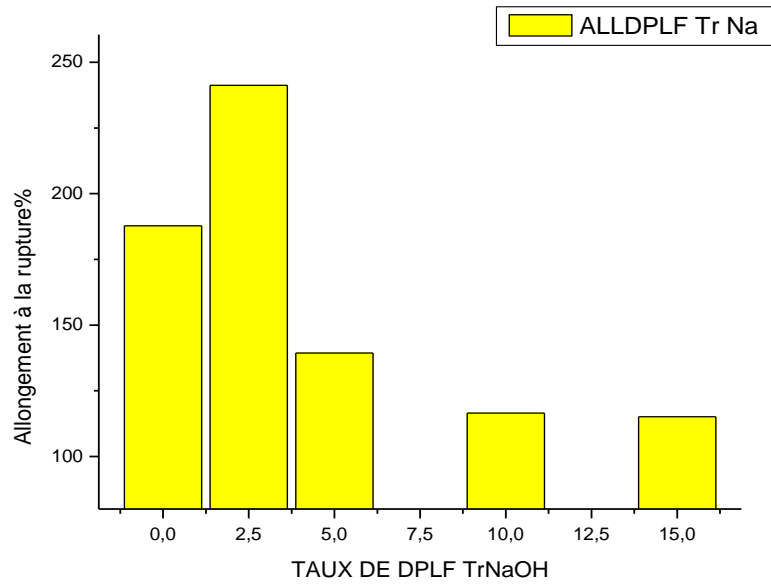
2. المعالجة بالسيلان



الشكل : 26.IV المدرج البياني لمقاومة الكسر للمتراكبات PVC/DPLF المعالجة بالسيلان.

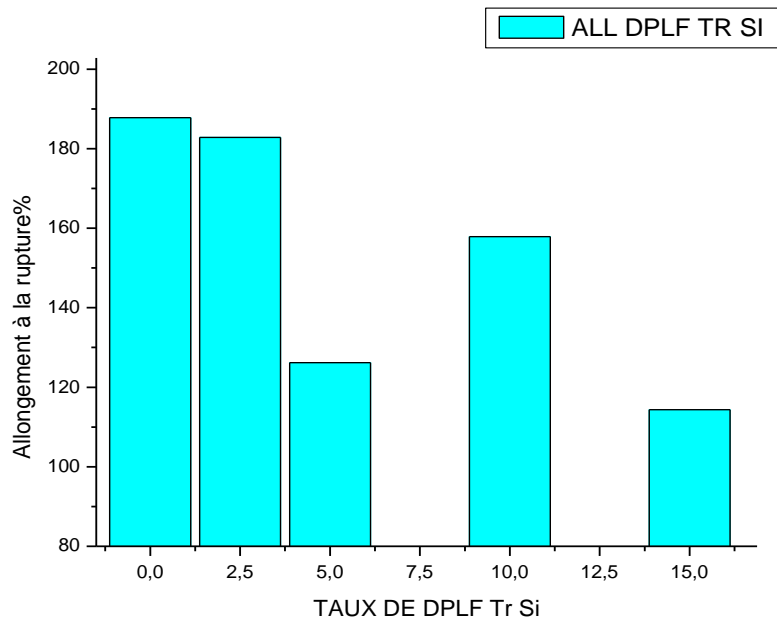
ب. دراسة الاستطالة عند الكسر

ب.1 المعالجة بـ NaOH



الشكل : 27.IV المدرج البياني للاستطالة عند الكسر للمترابكات PVC/DPLF المعالجة بـ NaOH

ب.2 المعالجة بالسيلان



الشكل : 28.IV المدرج البياني للاستطالة عند الكسر للمترابكات PVC/DPLF المعالجة بالسيلان.

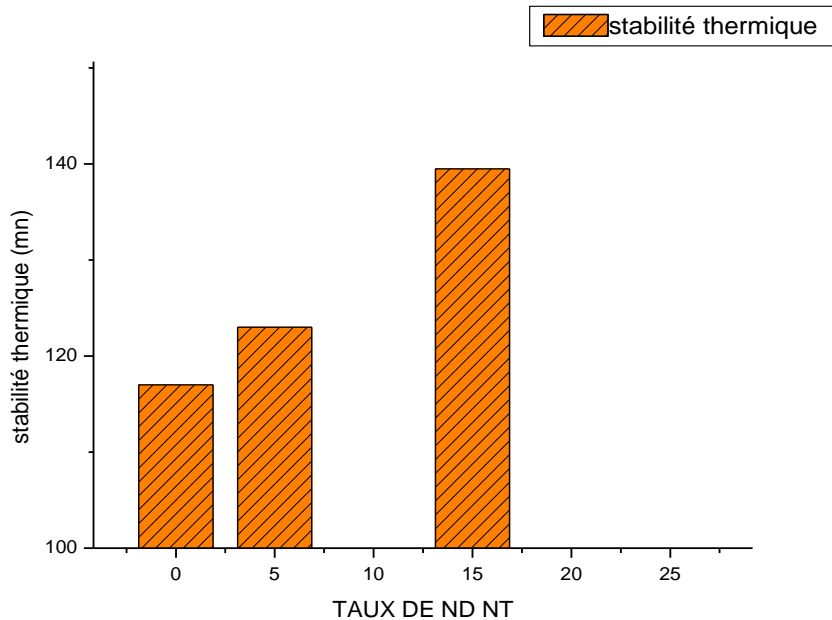
5.1. تفسير نتائج الاستقرار الحراري

1.5.1. تأثير نسبة الألياف على الخصائص الميكانيكية

فيما يخص الاستقرار، يظهر نفس السلوك، أي زيادة في زمن الاستقرار عند الانتقال من 5% إلى 15%، ونُرجع ذلك إلى الطبيعة الكيميائية لنوى التمر، ووجود نسبة 16% من السليلوز البلوري، الذي يُؤخّر أحيانًا انطلاق غاز كلوريد الهيدروجين.

الجدول : 14.IV الاستقرار الحراري لتركيبات نوى التمر./PVC

التركيبية	PVC خام	PVC/نوى تمر 5%	PVC/نوى تمر 15%
الاستقرار الحراري (دقيقة)	117	123	139.5



الشكل : 29.IV تغير الاستقرار الحراري لتركيبات نوى التمر./PVC

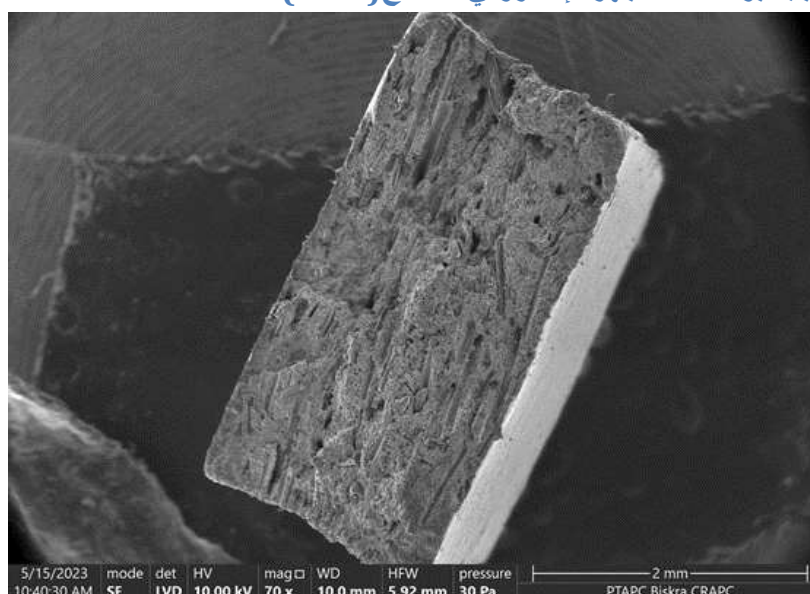
2.5.1. تأثير المعالجة الكيميائية على الإستقرار الحراري

الجدول التالي يوضح تأثير المعالجة الكيميائية سواء كانت بـ NaOH أو بالسيلان على الاستقرار الحراري للمركبات، حيث يزداد زمن بداية انهيار بنية البوليمير، وقد يعود ذلك إلى التفاعل الكيميائي الذي حدث أثناء المعالجة مع السليلوز وتكوّن روابط قوية مقاومة للحرارة

الجدول : 15.IV تأثير المعالجة الكيميائية على الاستقرار الحراري.

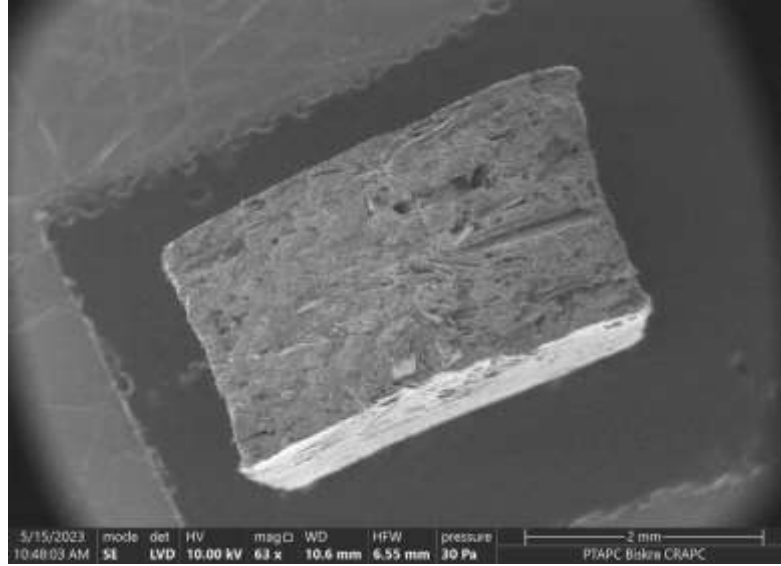
معالج بالسيلان	معالج بـNaOH	غير معالج	DPLF نسبة
142	140	128.5	10
140.5	153.5	130.5	15
151.5	148	131	20
166	141	126.5	30

6.1. الدراسة المورفولوجية بواسطة المجهر الإلكتروني الماسح (MEB)



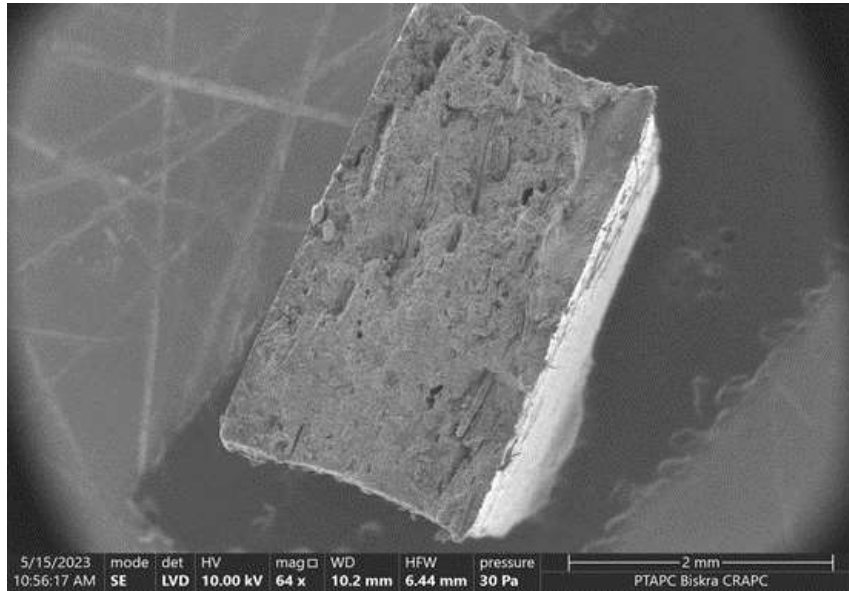
الشكل: 30.IV صورة بواسطة (MEB) للمركب 5%DPLF/PVC غير معالج

تظهر الصورة الميكروغرافية توزع الألياف على سطح البوليمير بشكل غير متجانس، مع وجود عدد كبير من الفراغات الجزيئية والتجاويف على السطح، وهو ما تم تأكيده تقريباً من خلال الدراسات الميكانيكية ونتائج امتصاص الماء.



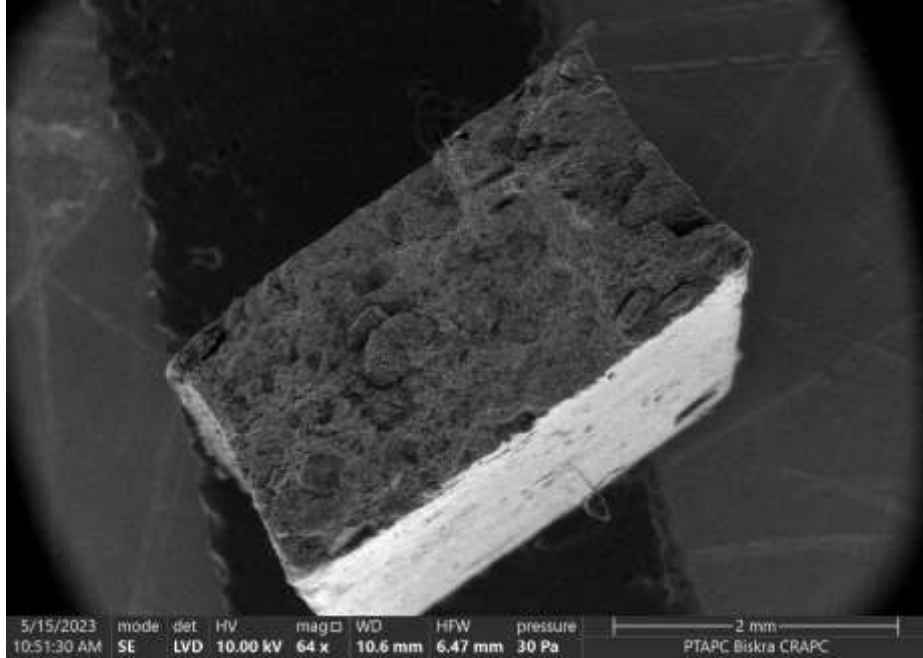
الشكل: 31.IV صورة بواسطة (MEB) للمركب PVC/DPLF5% معالجة بـNaOH

تُظهر الصورة الميكروغرافية للمركب PVC/DPLF5% المعالج بـ NaOH وجود تماسك على سطح البوليمير، كما نلاحظ وجودًا ضعيفًا للمسام والفراغات، والسطح متجانس بسبب احتواء الألياف في بنيتها على مجموعات ألكوكسيد (alcooolates). هذه النتائج تؤكد دراسة امتصاص الماء وكذلك السلوك الميكانيكي.



الشكل: 32.IV صورة بواسطة (MEB) للمركب PVC/DPLF5% معالجة بالسيلان

تُظهر الصورة الميكروغرافية مشهدًا مشابهًا حيث نلاحظ أيضًا تماسكًا جزيئيًا بين المصفوفة البوليمرية والألياف المعالجة بالسيلان، مع وجود مسام قليلة، مما يؤكد نتائج التحاليل الميكانيكية ودراسات امتصاص الماء.

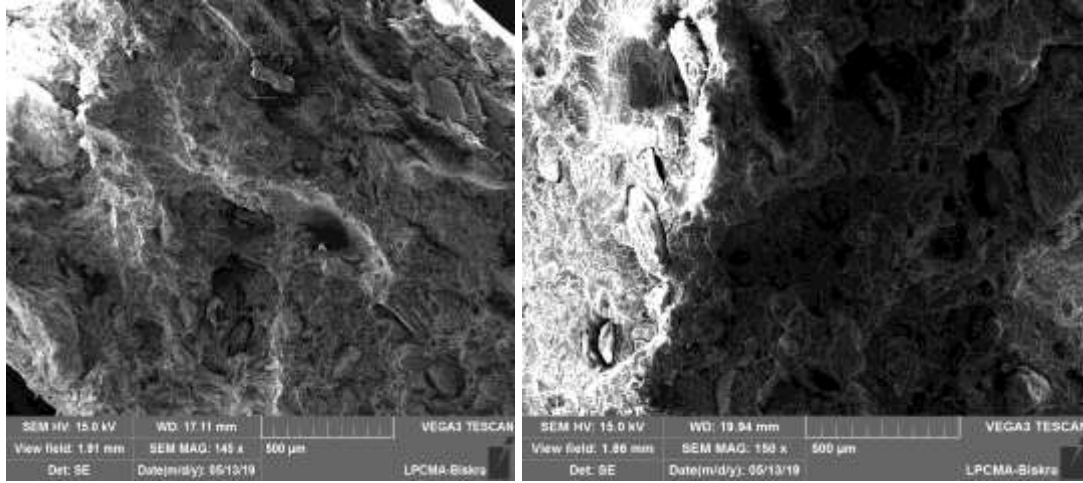


الشكل: 33.IV صورة بواسطة (MEB) للمركب قهوة بنسبة 5% PVC/

تُظهر الصورة الميكروغرافية للمركب PVC/ قهوة بنسبة 5% وجود العديد من الأسطح المسامية والعقد، ما يدل على ضعف التماسك بين المصفوفة البوليمرية وبقايا القهوة، وهو ما يؤثر سلبيًا على الخصائص الميكانيكية.

فيما يخص المركبات PVC/ نوى التمر:

أظهرت صور المجهر الإلكتروني الماسح (MEB) للمركبات التي تحتوي على 15% من مسحوق نوى التمر ضعف التماسك بين المصفوفة البوليمرية والمُضاف (نوى التمر)، ويمكن تفسير ذلك بقلّة كمية المسحوق. بالمقابل، أظهر المركب الذي يحتوي على نسبة 25% من مسحوق نوى التمر توافقًا أفضل مع المصفوفة البوليمرية، حيث أن وجود المسام كان بنسبة ضعيفة، ويُعزى هذا إلى التركيب الكيميائي لمسحوق نوى التمر الذي يحتوي على نسبة جيدة من السليلوز البلوري، مما يُحسّن من التماسك بين المكونين.



S121

S122

الشكل : 34.IV صور ميكروغرافية بواسطة الـ MEB
S121 (نوى التمر 15% PVC) و S122 (نوى التمر 25% PVC)

7.1. الدراسة الميكانيكية الديناميكية (DMA)

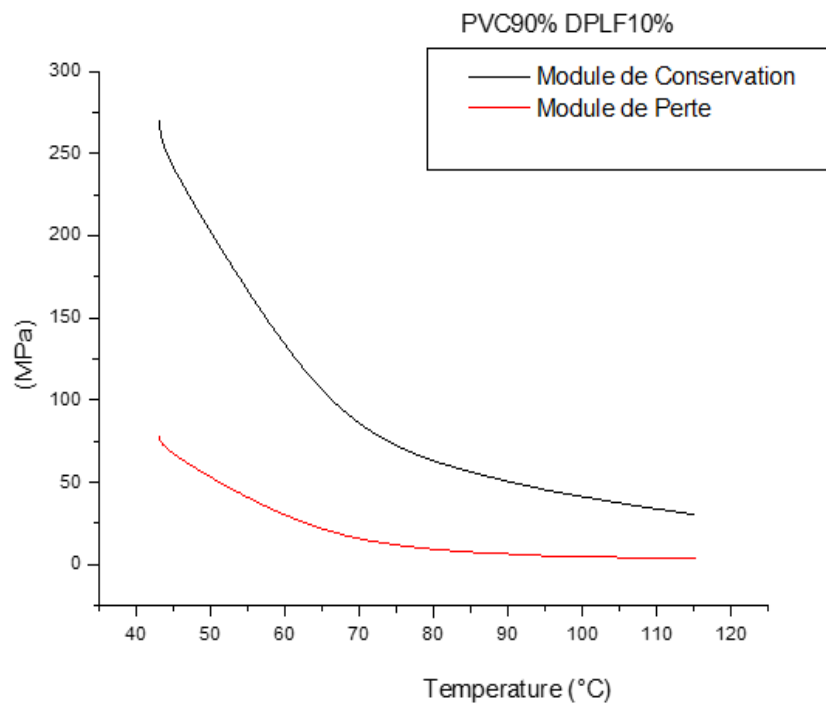
تعتمد هذه التحاليل على استجابة المادة لاستثارة ميكانيكية جيبية الشكل وفقاً للزمن ودرجة الحرارة تم إجراء دراسة ميكانيكية ديناميكية DMA لمجموعة من المواد المركبة لدينا، وذلك فيما يخص معامل الحفظ (E') ، ومعامل الفقد (E'') ، والظل المماسي ($\tan \delta$) ، على سلسلة من المركبات القائمة على البولي كلوريد الفينيل (PVC) .

الجدول : 16.IV قيم معامل الحفظ (E') ومعامل الفقد (E'') للمركبين S101 و S105 عند درجات حرارة $T(^{\circ}\text{C})$ مختلفة للمركب PVC/DPLF

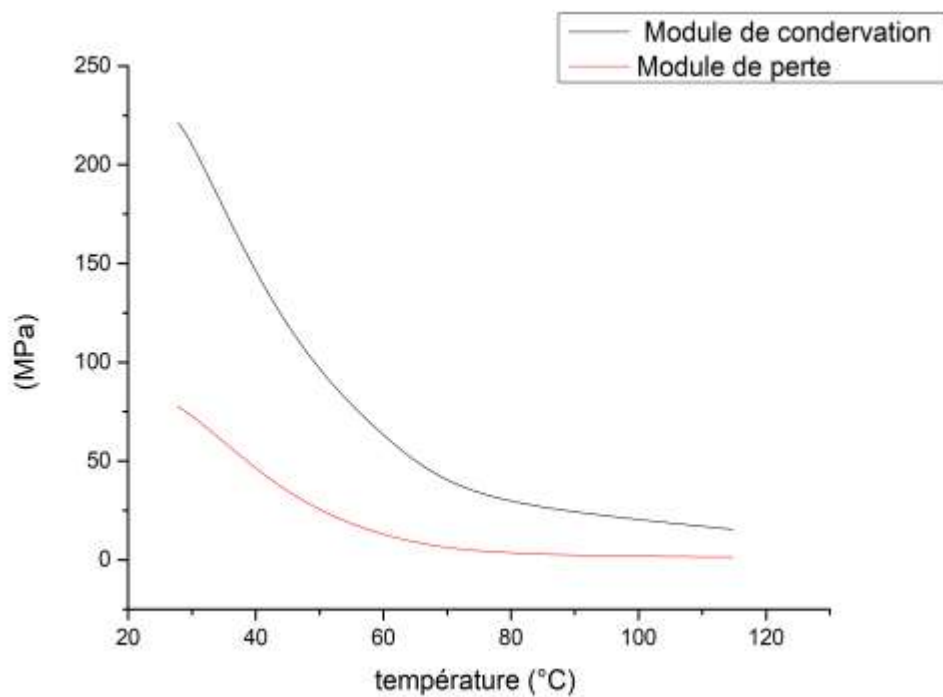
معامل الفقد (E'') (MPa)				معامل الحفظ (E') (MPa)				T ($^{\circ}\text{C}$)
70°	60°	50°	40°	70°	60°	50°	40°	
6.23	12.87	25.36	46.18	40.24	62.90	96.31	145.44	S101
15.41	27.54	46.66	81.98	77.66	114.66	168.72	260.16	S105

من خلال القيم المتعلقة بمعامل الحفظ ومعامل الفقد، نلاحظ أنه بالنسبة للمركب S105 عند درجة حرارة 40 $^{\circ}\text{C}$ ومع نسبة ألياف قدرها 15%، فإن معامل الحفظ قد ارتفع، مما يقودنا إلى الاستنتاج بأن مرونة المادة قد ازدادت. ومع ازدياد درجة الحرارة، يبدأ المعامل في الانخفاض، مما يدل على أن خاصية المرونة بدأت تضعف.

أما بالنسبة لمعامل الفقد لهذا المركب، فإن القيم تنخفض مع ارتفاع درجة الحرارة، ما يدل على أن المادة تفقد من خصائصها اللزجية



الشكل : 35.IV تغير معامل الحفظ (MPa) ومعامل الفقد (MPa) حسب درجة الحرارة (°C) T لمركب PVC/DPLF بنسبة 10%.



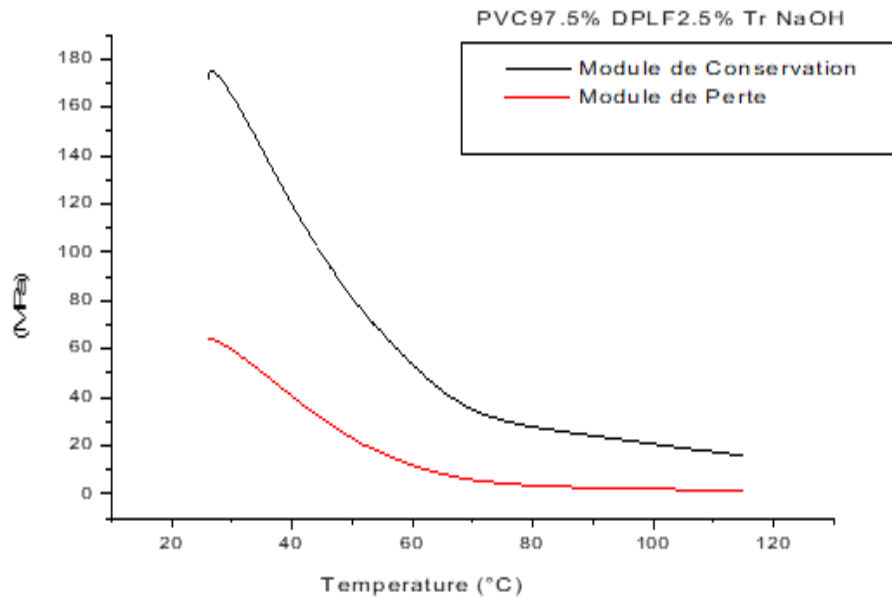
الشكل : 36.IV تغير معامل الحفظ (MPa) ومعامل الفقد (MPa) حسب درجة الحرارة (°C) T لمركب PVC بنسبة 100%

الجدول : 17.IV قيم معامل الحفظ (E') ومعامل الفقد (E'') للمركبين عند درجات حرارة ($T^{\circ}\text{C}$) مختلفة

PVC/DPLF/Tr NaOH

معامل الفقد (E'') (MPa)				معامل الحفظ (E') (MPa)				
70°	60°	50°	40°	70°	60°	50°	40°	T (°C)
6.23	12.87	25.36	46.18	40.24	62.90	96.31	145.44	S101
5.89	12.00	23.15	40.17	34.93	53.52	81.24	119.12	S108

أظهرت الدراسة الميكانيكية الديناميكية للمركب S108 أن معامل الحفظ ينخفض مقارنةً بـ PVC النقي، وذلك نتيجة لوجود كمية ضئيلة من الألياف المدمجة في البوليمر، ومع ارتفاع درجة الحرارة نلاحظ تناقصاً في معامل الحفظ مما يعكس انخفاضاً في المرونة. بالمقابل، يتبع معامل الفقد نفس الاتجاه في التناقص، مما يؤدي إلى انخفاض في خاصية اللزوجة-المرونة للمادة.

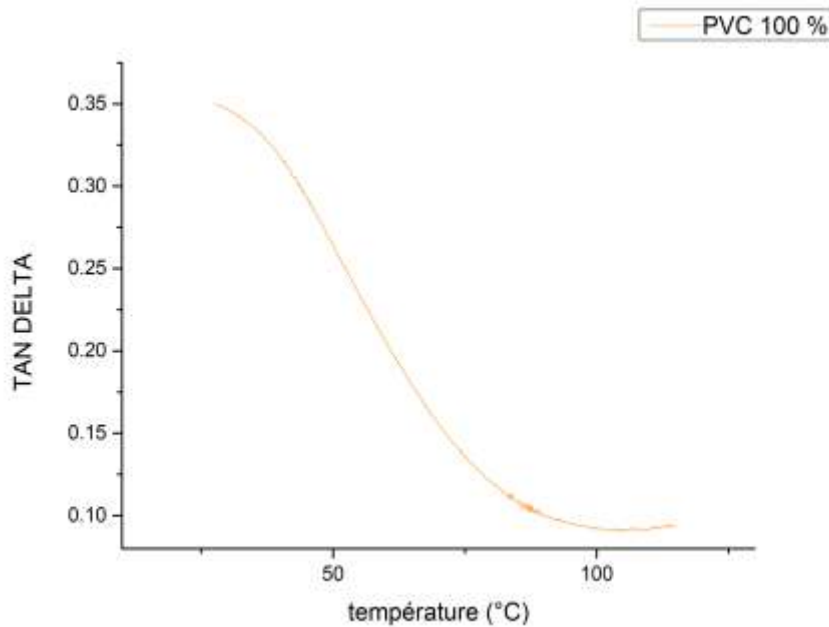


الشكل : 37.IV تغير معامل الحفظ (MPa) ومعامل الفقد (MPa) حسب درجة الحرارة ($T^{\circ}\text{C}$)

الجدول : 18.IV القيم القصوى لـ (Tan δ) للمركبات

العينة	درجة الحرارة الموافقة للقيمة القصوى (°C) (Tan δ)	Tan(δ)
S101	27.80	0.3505
S105	37.73	0.3103
S108	26.17	0.3721
S114	38.72	0.3426

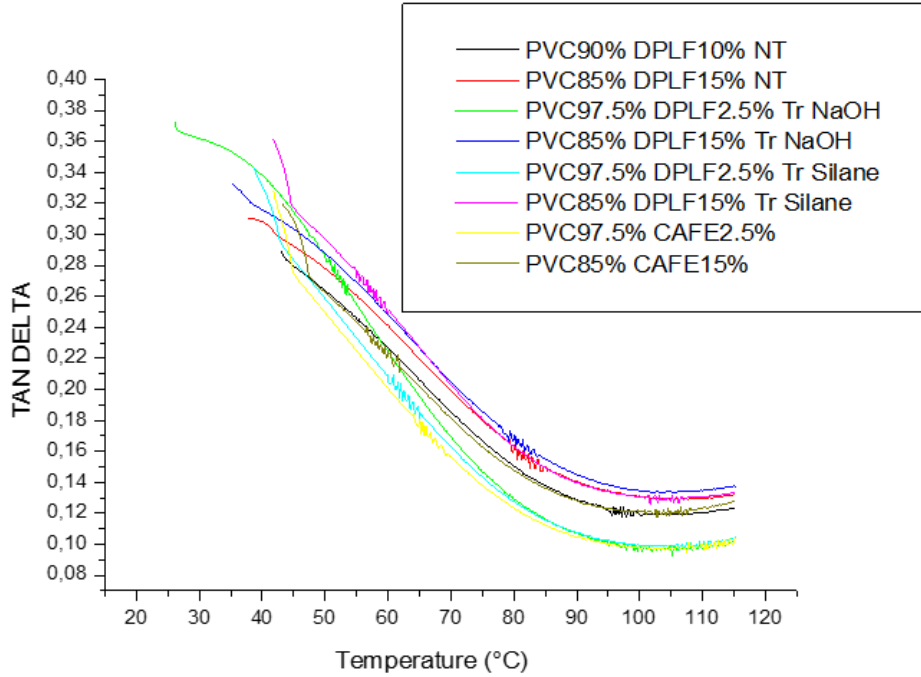
أظهرت دراسة تغير ظل دلتا (Tan δ) للمركبات S105 و S108 و S114 أن النسبة المنخفضة المضافة من الألياف (2.5%) إلى بوليمر PVC لا تؤثر بشكل كبير على القيمة القصوى لـ (Tan δ) ، في حين أن المركب الذي يحتوي على ألياف معالجة بالسيلان يؤثر بشكل واضح على انتقال القيمة القصوى، وهو ما يُعزى إلى الالتصاق الجيد مع مصفوفة البوليمر. ويبلغ هذا الانتقال بين 10 و 12 درجة مئوية.



الشكل : 38.IV تغير (Tan δ) حسب درجة الحرارة (°C)

يمثل هذا الشكل تغير ظل دلتا " (Tan δ) " (TAN DELTA) مع درجة الحرارة لعينة من البواي كلوريد الفينيل (PVC) بنسبة 100%. نلاحظ أن " (Tan δ) " ، الذي يعكس السلوك التخميدي أو التخميد الميكانيكي للمادة، يكون في أعلى مستوياته عند درجات حرارة منخفضة (حوالي 0,35)، ثم ينخفض تدريجياً مع ارتفاع درجة الحرارة. هذا السلوك يشير إلى أن

المادة تكون في حالة زجاجية في البداية (حيث تكون الحركات الجزيئية محدودة)، ومع ارتفاع درجة الحرارة تبدأ بالسلوك المطاطي، وتنخفض خصائص التخميد نتيجة لانخفاض الاحتكاك بين السلاسل البوليميرية.



الشكل : 39.IV تغير $(\tan \delta)$ حسب درجة الحرارة ($T^{\circ}\text{C}$)

الرسم البياني الثاني يُظهر مقارنة لمنحنيات ميل دلتا ($\tan \delta$) لعدة مركبات مختلفة من PVC المدعمة بألياف

DPLF و مسحوق القهوة، بعضها خضع لمعالجات كيميائية مثل NaOH أو Silane.

نلاحظ أن كل المنحنيات تسير بنفس الاتجاه العام (انخفاض ميل دلتا مع زيادة درجة الحرارة)، لكن هناك اختلاف في

قمم ميل دلتا (T_g) وفي الشكل العام للمنحنى حسب نوع المعالجة والمادة المضافة.

ملاحظات مهمة:

- المركب PVC90% + DPLF10% NT (باللون الأسود) و PVC85% + DPLF15% NT (أحمر) :تظهر قمم بارزة لظل دلتا، ما يدل على انتقال زجاجي واضح.
- المركبات المعالجة بـ NaOH و Silane (أزرق، وردي، أخضر...): تعرض قمم أقل أو منحدرات أكثر انسيابية، ما يدل على تحسن في التماسك بين الألياف والمصفوفة البوليميرية وتقليل الطابع اللزج المرن.

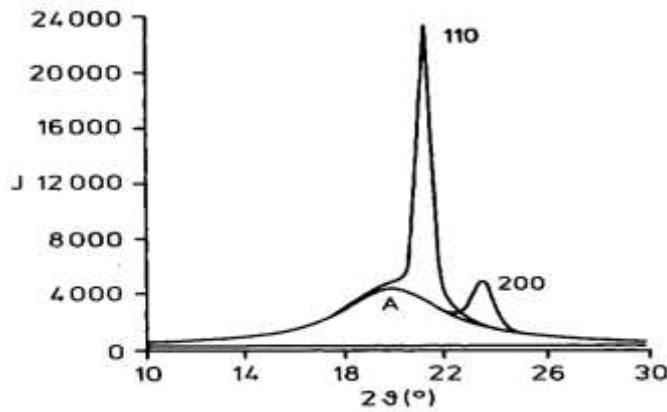
- المركبات المدعمة بالقهوة (أصفر وبني): تُظهر سلوكًا مختلفًا، يشير إلى تأثير نوع المادة الطبيعية على خصائص المركب النهائي.

بصفة عامة، المعالجة الكيميائية تحسن الالتصاق بين الألياف والمصفوفة مما يقلل من الخسائر اللزجة (Loss Modulus)، وبالتالي يغير في خصائص (Tan δ) ، مما يظهر في سلوك المركب تحت ظروف درجات الحرارة المختلفة.

2. دراسة المركبات الثنائية (PVC-PE)-DPLF

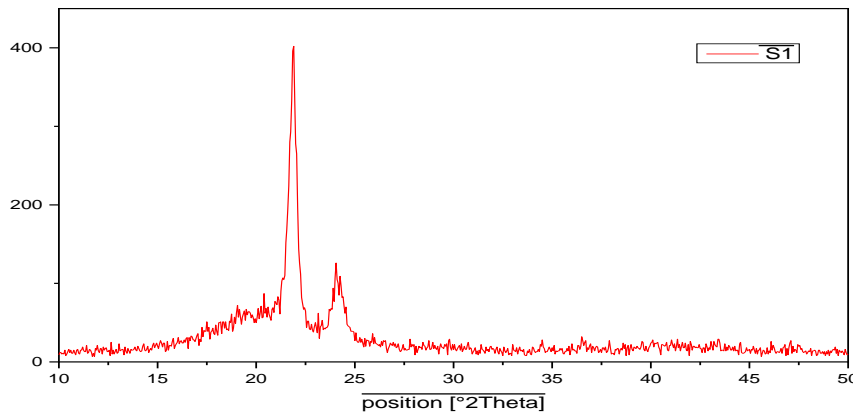
1.2. نتائج ومناقشات تحليل حيود الأشعة السينية (DRX)

بهدف إجراء توصيف بنيوي للخليط والمركبات لدينا، تم القيام بدراسة بواسطة حيود الأشعة السينية (DRX) ، وأخرى باستخدام التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء



الشكل : 40.IV مخطط حيود أحادي البعد لعينة من البولي إيثيلين مع تحليل إلى المكونات غير المتبلورة والمتبلورة

1.2. حيود الأشعة السينية للمركب: PVC20/LDPE80



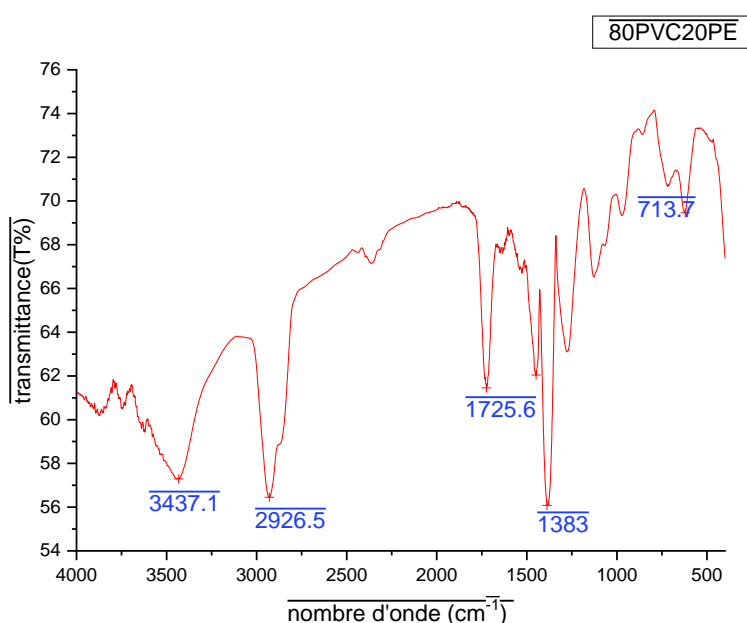
الشكل : 41.IV حيود الأشعة السينية لمركب. PVC 20% PE 80%

أظهر حيود الأشعة السينية لمزيج البوليمرات بنسبة PVC 20 % و PE 80% ذروتين: الأولى عند زاوية $(2\theta_1 = 21.48^\circ)$ والثانية عند $(2\theta_2 = 23.88^\circ)$. حسب البيانات الواردة في الشكل (IV.41)، فإن الذروة الأولى تنتمي إلى مستوى البلورة (110)، أما الثانية فتتنتمي إلى المستوى (200).

2.2. التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء FTIR

1.2.2. التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء لمركب PVC/PE 20/80

يوضح الشكل IV.42 طيف FTIR لمزيج PVC/PE بنسبة 80/20. وقد تم تحديد المجموعات الكيميائية المرتبطة بكل نطاق امتصاص ظاهر في هذا الطيف، كما هو موضح في الجدول IV.19.



الشكل: 42.IV: طيف FTIR لمزيج PVC/PE 20/80

أظهر تحليل الأطياف للمركبات البوليميرية تشابهاً بين أطياف PVC/PE 80:20 و PVC/PE 20:80، حيث لوحظت امتصاصات مميزة لروابط C-Cl، C-H ألكان (CH₂)، C=O الذي يعود ظهوره الى وجود اضافات للتلددين (DOP) و O-H (رطوبة)

القيم الترددية ونسب الامتصاص موضحة في الجدول التالي:

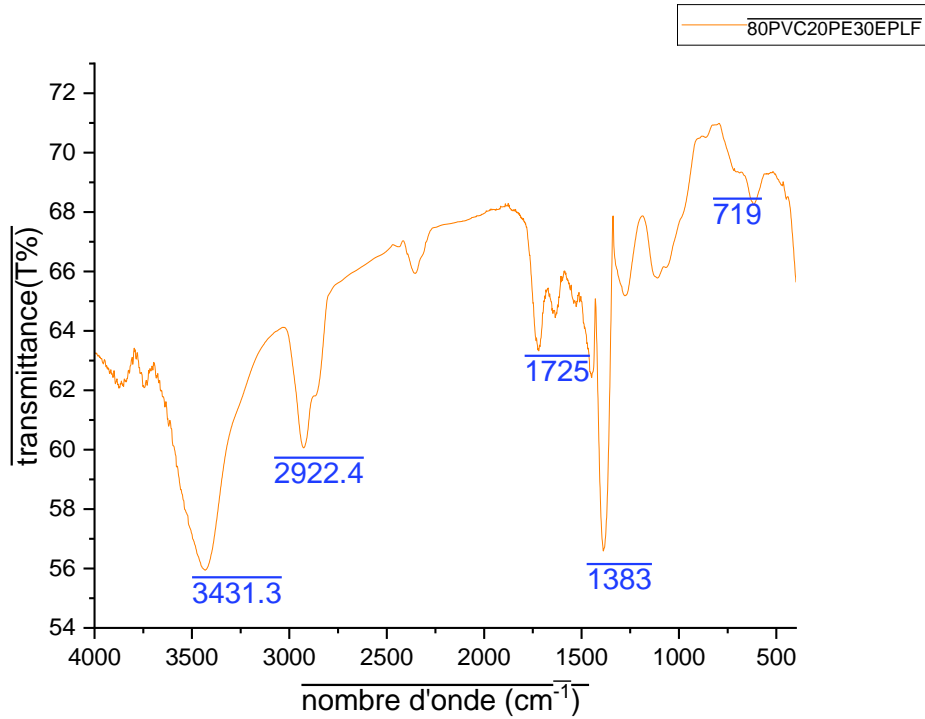
الجدول: 19.IV: تعيين نطاقات الامتصاص بالأشعة تحت الحمراء للمزيجين PE20/PVC80 او PE80/PVC 20

النطاق المميز	C-H	C-Cl	C=O	O-H	C-H
(cm ⁻¹) التردد	2926	713	1725	3437	1383
التعيين	اهتزاز استطالة رابطة CH لمجموعة CH ₂	اهتزاز استطالة رابطة C-Cl	اهتزاز استطالة رابطة C=O	اهتزاز استطالة رابطة OH المرتبطة	اهتزازات انحناء لمجموعات CH ₂ و CH ₃

بالنسبة لمزائج PVC/PE 20/80 والمركبات المحتوية على DPLF بنسبة 30%، أظهرت أطياف FTIR تردد الامتصاص لمجموعة OH في السيليلوز عند 3437 cm^{-1} ، بالإضافة إلى الترددات المذكورة سابقاً.

2.2.2. التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء لمركبات PVC/PE 30 DPLF

يوضح الشكل IV.43 طيف FTIR لمركبات PVC/PE 30 DPLF، وقد تم تحديد المجموعات الكيميائية المرتبطة بكل نطاق امتصاص كما هو مبين في الجدول IV.20.



الشكل : 43.IV طيف FTIR لمركبات PVC20%/PE80% /DPLF30%.

تُظهر أطياف مركبات PVC/PE 80/20 والمركبات المحتوية على 30% من ألياف DPLF تشابهاً ملحوظاً. إلا أن نسبة الرطوبة في تركيب PE/PVC 20/80 كانت أعلى، وهو ما يتجلى في زيادة شدة امتصاص نطاق مجموعة OH

الجدول. 20.IV: تعيين نطاقات الامتصاص بالأشعة تحت الحمراء للمركب PVC/PE/ DPLF30%

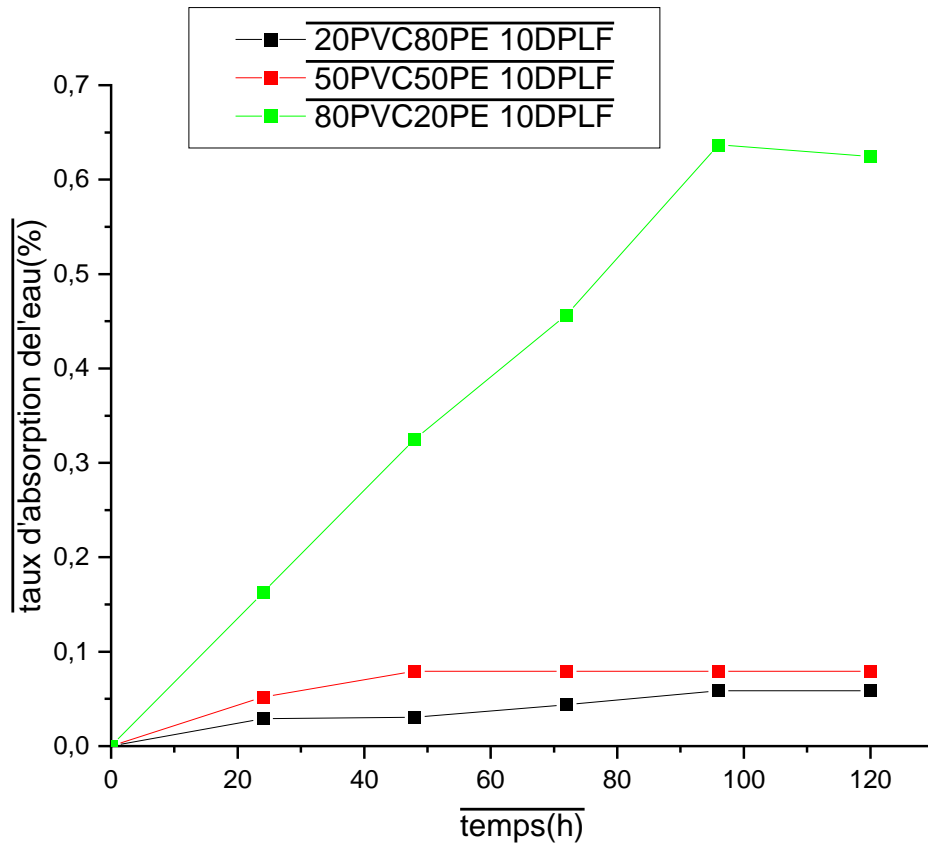
النطاق المميز	C-H	C-Cl	C=O	O-H	C-H
التردد (cm^{-1})	2922	719	1725	3431	1383

3.2. امتصاص الماء المقطر

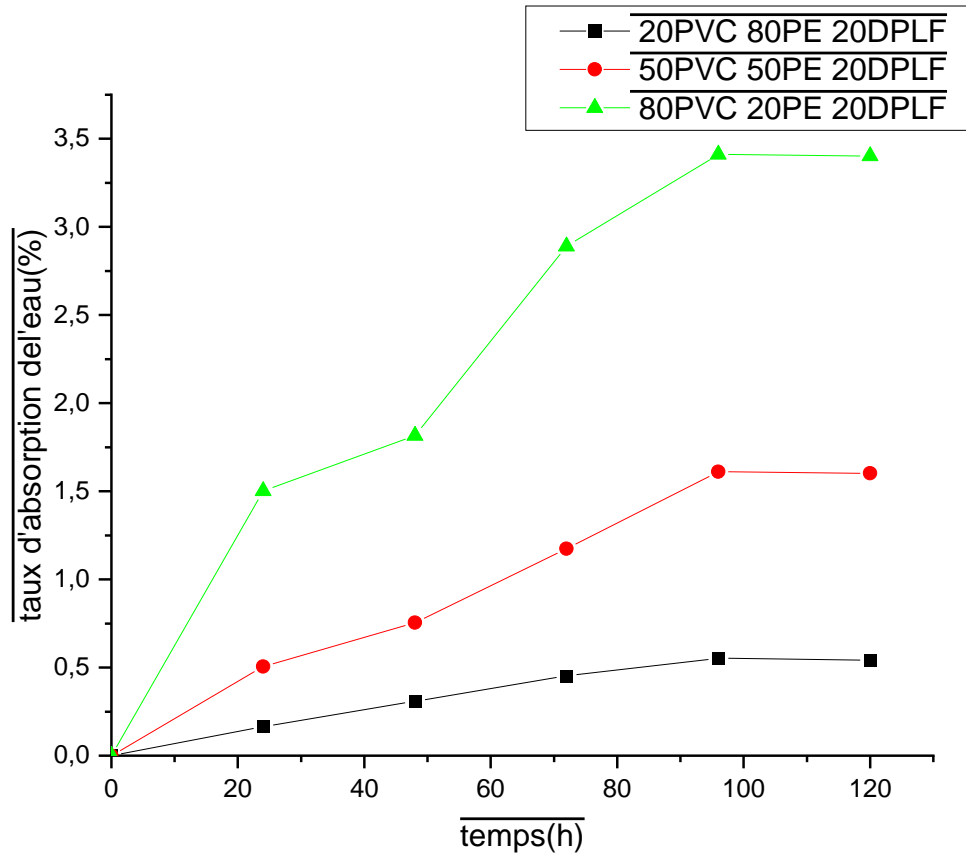
ملاحظة: العينات S201، S202، S203 (الخليط بدون ألياف DPLF) لا تمتص الماء المقطر، لأن هذه العينات غير متأثرة بالماء، وذلك لكون البوليمر غير قطبي، لذلك يتم استخدام الألياف لامتصاص الماء.

1.3.2. تأثير نسبة الـ PVC على الامتصاص

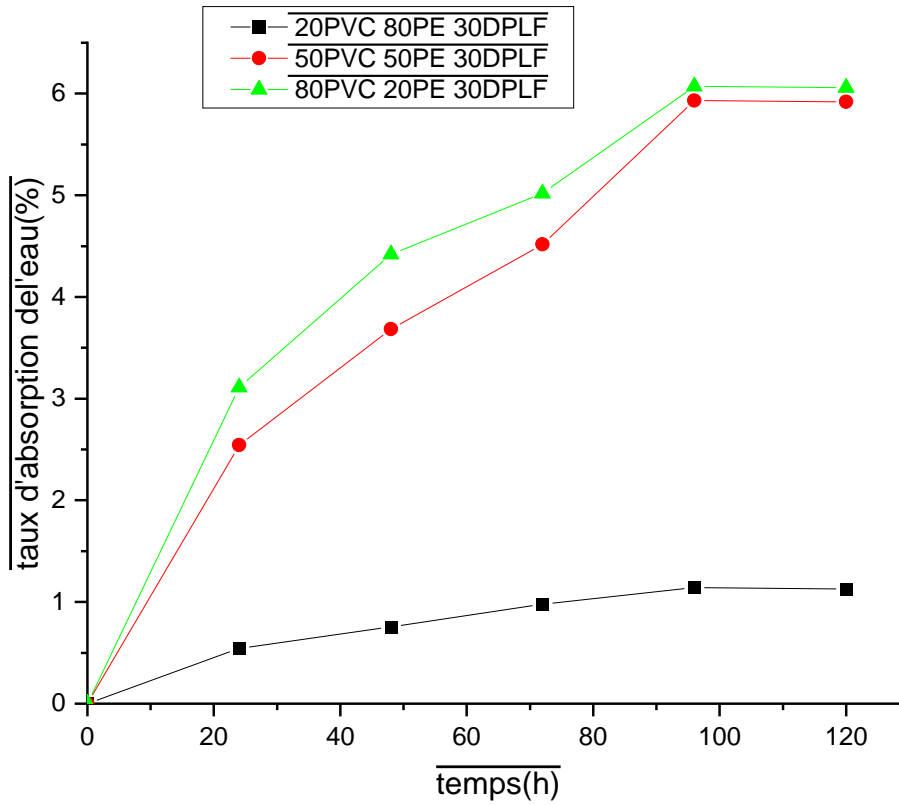
انطلاقاً من التجربة التي أجريناها، حصلنا على المنحنيات التالية:



الشكل: 44.IV امتصاص الماء المقطر بدلالة الزمن للمركبات 50PVC/50PE ، 80PVC/20PE ، 20PVC/80PE و. DPLF10%



الشكل 45.IV: تغير نسبة امتصاص الماء المقطر في المركبات 80PVC/20PE، 20PVC/80PE و 50PVC/50PE و 20DPLF % بدلالة الزمن.



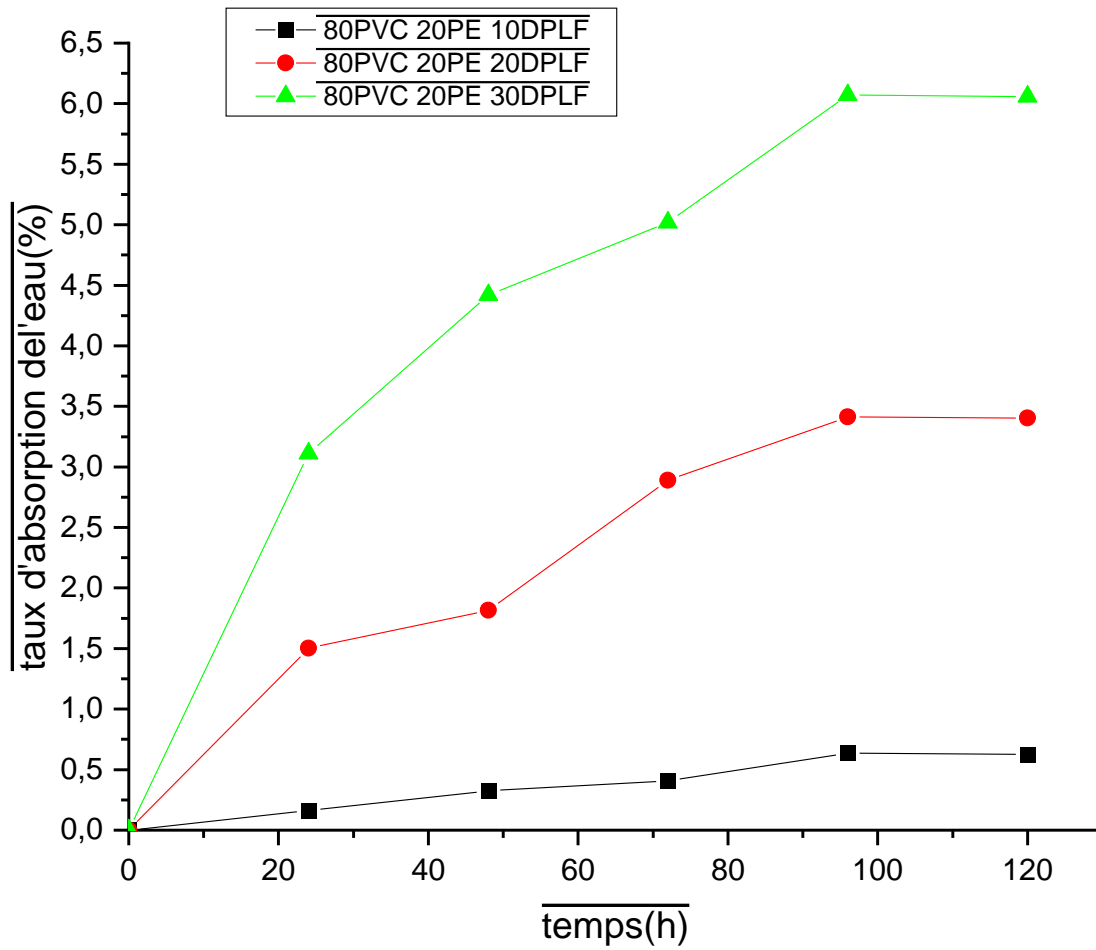
الشكل : 46.IV تغير نسبة امتصاص الماء المقطر في المركبات 80PVC/20PE ، 20PVC/80PE و 50PVC/50PE بدلالة الزمن.

نلاحظ أن زيادة نسبة الـ PVC أدت إلى زيادة في امتصاص الماء المقطر، ويُعزى ذلك إلى تسرب الماء نحو السليلوز المنتشر في الوسط غير المتبلور. وبالتالي، فإن زيادة نسبة الوسط غير المتبلور (PVC) تسمح بنفاذية أكبر للماء.

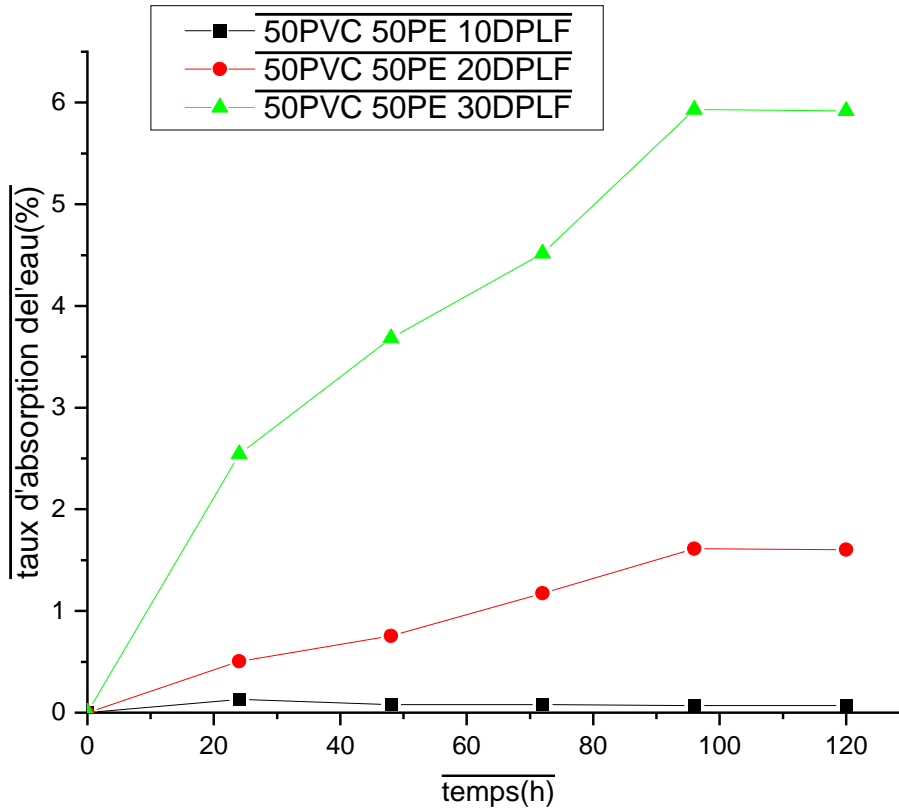
2.3.2. تأثير نسبة الألياف

انطلاقاً من المنحنيات أدناه، لاحظنا ما يلي:

- كلما زادت نسبة الألياف، زاد الامتصاص، مما يدل على أن السليلوز هو المسؤول الرئيسي عن الامتصاص.
- نلاحظ أيضاً أنه في جميع الحالات، تحدث حالة الإشباع بعد حوالي 96 ساعة، حيث تبدأ العينات في التحلل.



الشكل : 47.IV تغير امتصاص الماء المقطر في المركبات 80PVC/20PE مع 10%، 20%، و 30% DPLF بدلالة الزمن.

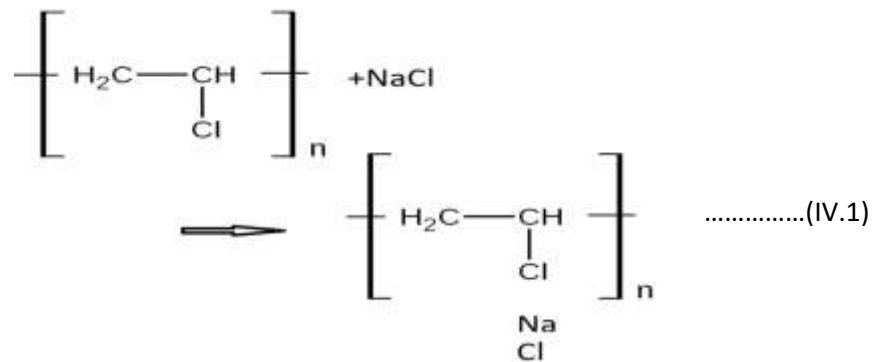


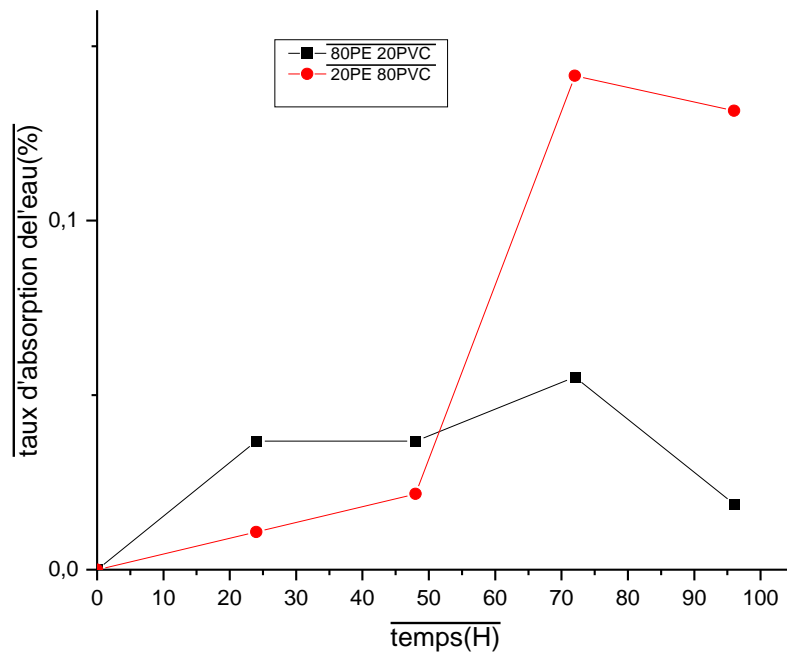
الشكل : 48.IV تغير امتصاص الماء المقطر في المركبات PVC:50PE 50 مع 10%، 20%، و 30%DPLF بدلالة الزمن.

4.2. امتصاص الماء المالح

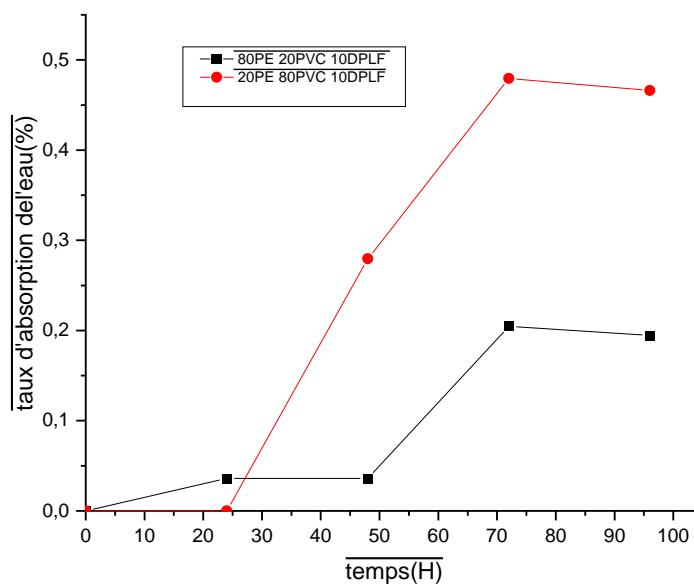
1.4.2. تأثير نسبة PVC

رغم ان الإمتصاص ضعيف جدا تجدر الإشارة إلى أن زيادة نسبة الـ PVC تؤدي إلى زيادة في امتصاص الماء المالح. مع العلم أن الماء المالح يحتوي على أيونات Na^+ و Cl^- ، فعندما تخترق هذه الأيونات الخليط، تتجه أيونات Na^+ نحو ذرات الكلور الموجودة في الـ PVC لتكوين روابط ثنائية كما هو موضح في المعادلة التالية:





الشكل : 49.IV تغير امتصاص الماء المالح في المركبات 20PVC:80PE و 80PVC:20PE بدلالة الزمن.

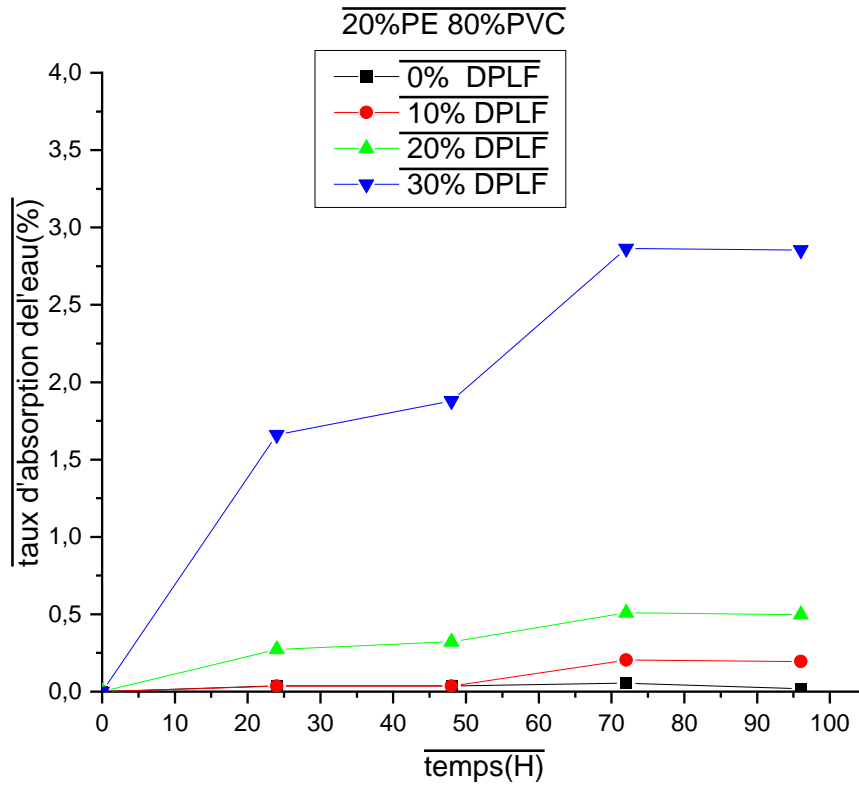
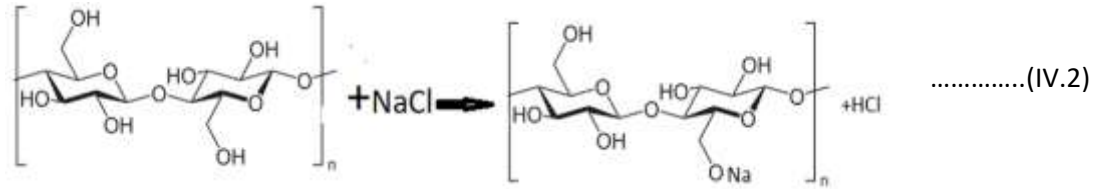


الشكل : 50.IV تغير امتصاص الماء المالح في المركبات 20PVC:80PE و 80PVC:20PE مع 10%DPLF بدلالة الزمن.

2.4.2. تأثير نسبة الألياف

تحتوي الألياف الطبيعية المستخدمة على السليلوز، ويتفاعل الملح مع السليلوز بطريقة تؤدي إلى اختفاء مجموعة OH المرتبطة بالسليلوز، حيث يتفاعل Na^+ مع O^- لتكوين الكحوليات (Alcoolate)، ويتفاعل H مع Cl لتكوين حمض الهيدروكلوريك HCl، كما هو موضح في المعادلة أدناه.

لذلك نلاحظ أن نسبة الألياف في المركبات تؤثر بنفس الطريقة كما في حالة امتصاص الماء المقطر.



الشكل : 51.IV تغير امتصاص الماء المالح في المركبات 80PVC:20PE مع 0%DPLF، 10%DPLF، 20%DPLF و 30%DPLF بدلالة الزمن.

5.2. تفسير النتائج الميكانيكية

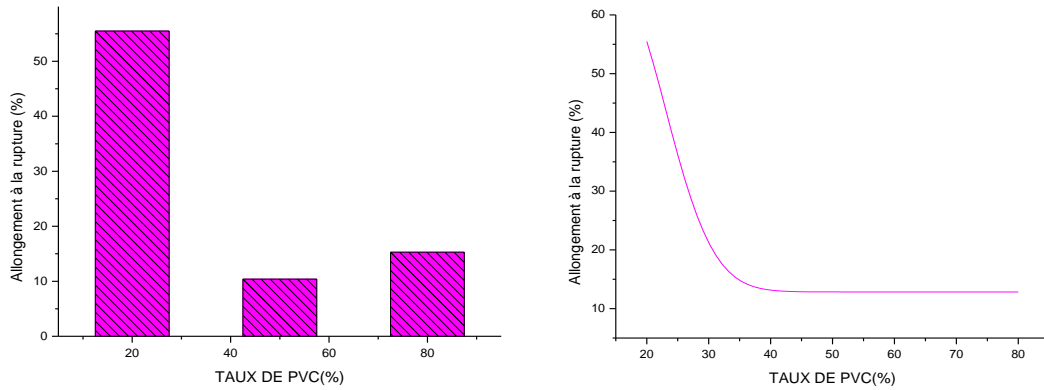
1.5.2. اختبار الشد

تعتمد دراستنا على منحنيات الشد التي تم الحصول عليها على شكل ملفات إلكترونية، كما هو موضح في الشكل (III.16)، ومن خلال هذه المنحنيات استخرجنا النتائج.

الاستطالة عند الكسر

أ. تأثير نسبة الـPVC

يمثل الشكل IV.19 تطور الاستطالة عند الكسر للمركبات PVC/PE حسب نسبة الـPVC. لقد لاحظنا أن نسبة الـPVC لها تأثير كبير على الاستطالة في الخلطة. في الواقع، تؤدي زيادة نسبة الـPVC ذات الطابع غير المتبلور إلى انخفاض تدريجي في الاستطالة عند الكسر، كما هو موضح في المنحنى التالي:



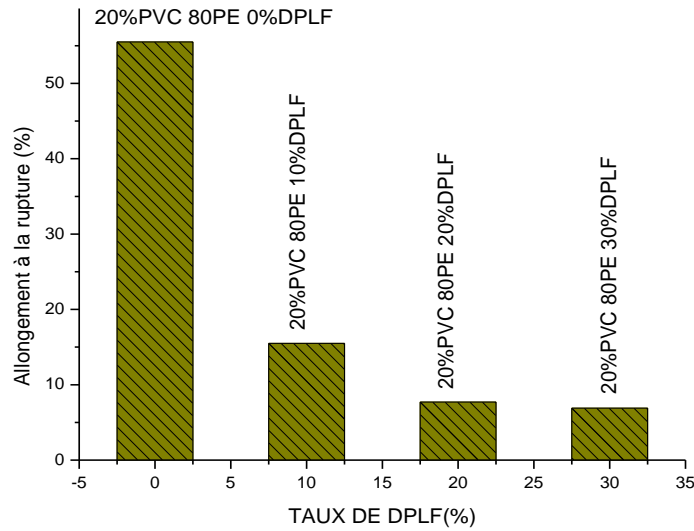
الشكل : 52.IV الاستطالة عند الكسر حسب نسبة الـPVC

تُظهر الخلطات PE/PVC بنسبة 20/80 و 80/20 أن الاستطالة عند الكسر تزداد مع زيادة الطابع البلوري في التركيبة.

تأثير البنية البوليميرية على الخواص الميكانيكية

نلاحظ أنه كلما زادت نسبة الـPVC في التركيبة (ذات الطابع غير المتبلور)، انخفضت مقاومة الكسر تدريجياً.

ب . تأثير نسبة الألياف

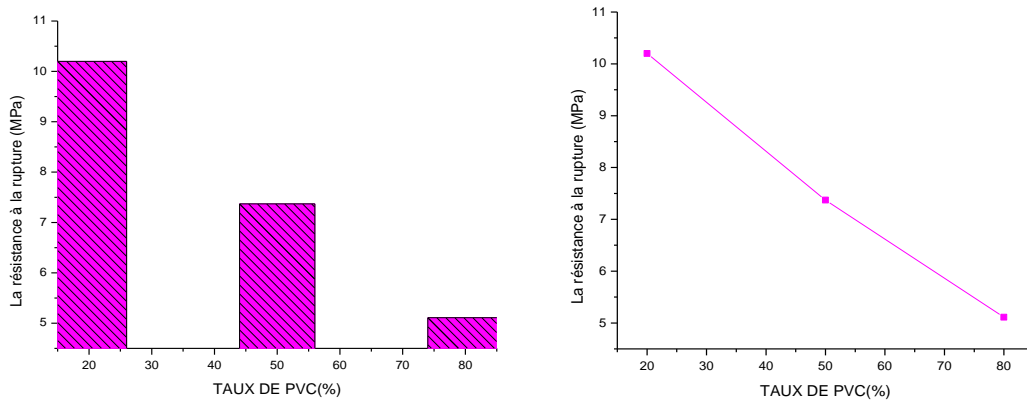


الشكل : 53.IV. تغير الاستطالة عند الكسر بتغير نسبة الألياف.

2.1.5.2. المقاومة عند الكسر

أ. تأثير نسبة الـ PVC في الخلطة

يمثل الشكل IV.54 تطور مقاومة الكسر للمركبات حسب نسبة الـ PVC . عندما يزداد الطابع غير المتبلور (كما في 20% PE/80% PVC، تنخفض مقاومة الكسر. أما عندما يزداد الطابع البلوري (كما في 80 PE بلوري / 20 PVC غير متبلور)، فإن مقاومة الكسر تزداد.



الشكل : 54.IV. تغير مقاومة الكسر حسب نسبة الـ PVC

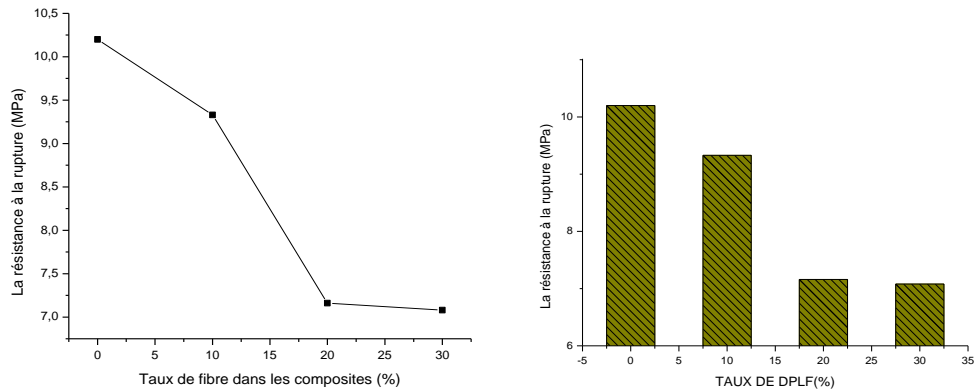
بالنسبة للخلائط البوليميرية PE/PVC بنسبة 80/20 و 20/80، نلاحظ أن مقاومة الكسر تنخفض كلما زاد الطابع غير المتبلور في التركيبة.

تأثير البنية البوليميرية على الخواص الميكانيكية

نلاحظ أنه كلما زادت نسبة الـ PVC في التركيبة (بطابع غير متبلور)، تنخفض مقاومة الكسر تدريجياً.

ب. تأثير نسبة الألياف

لقد حصلنا على المنحنيات التالية:



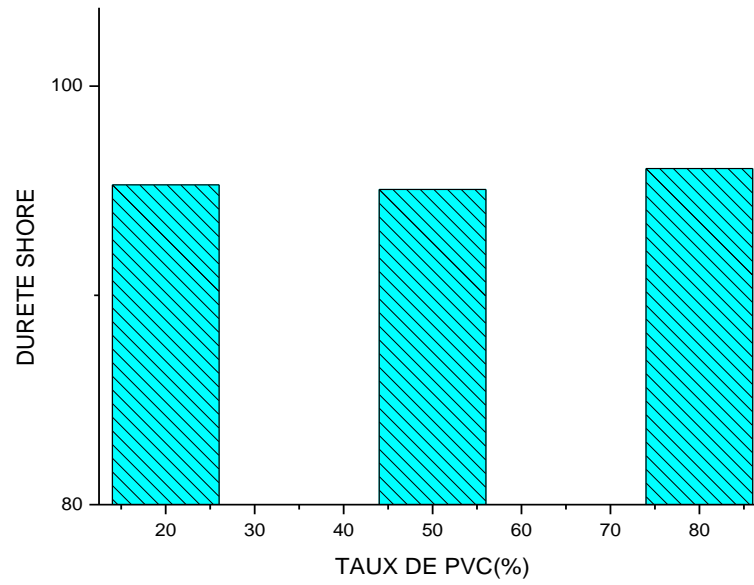
الشكل : 55.IV مقاومة الكسر حسب نسبة الألياف.

بالنسبة للمركبات التي تحتوي على 10 و 20 و 30 % من الألياف، تنخفض مقاومة الكسر عند الانتقال من 10 إلى 30 %.

2.5.2. صلادة شور (Shore)

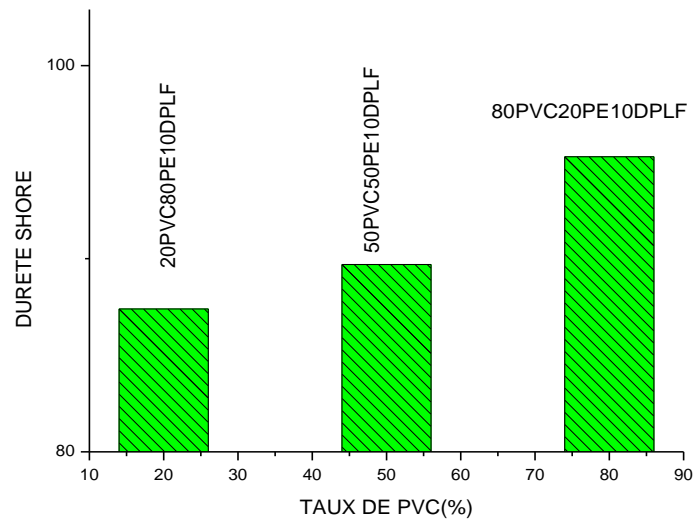
1.2.5.2. تأثير نسبة البولي كلوريد الفينيل (PVC) في الخليط

لاحظنا أن تغير نسبة الـ PVC في الخليط لا يؤدي إلى تغييرات كبيرة في صلادة شور، وإنما هناك زيادة طفيفة فقط، كما هو موضح في المنحنى التالي:



الشكل : 56.IV صلادة شور حسب نسبة الـ PVC.

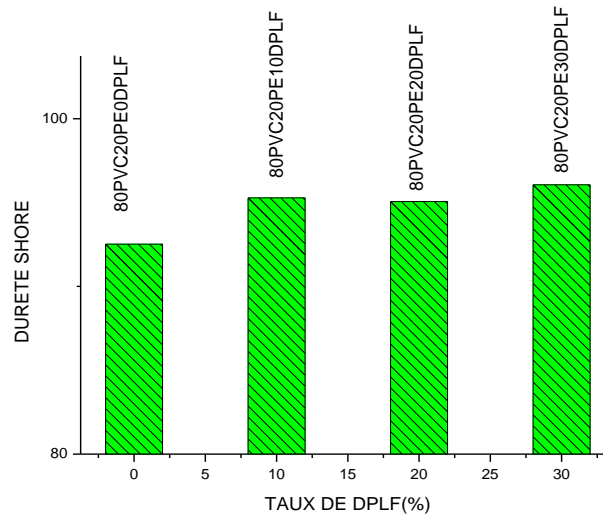
➤ تأثير نسبة الـ PVC في المركبات



الشكل : 57.IV صلادة شور حسب نسبة الـ PVC.

لقد لاحظنا وجود زيادة كبيرة في صلادة شور عندما ترتفع نسبة الـ PVC في المركبات.

2.2.5.2. تأثير نسبة ألياف DPLF في المركبات



الشكل : 58.IV صلادة شور حسب نسبة الألياف.

لاحظنا أن هناك زيادة طفيفة (غير معتبرة إحصائياً) في صلادة شور.

3. دراسة المركب الثلاثي PVC-LDPE-NBR

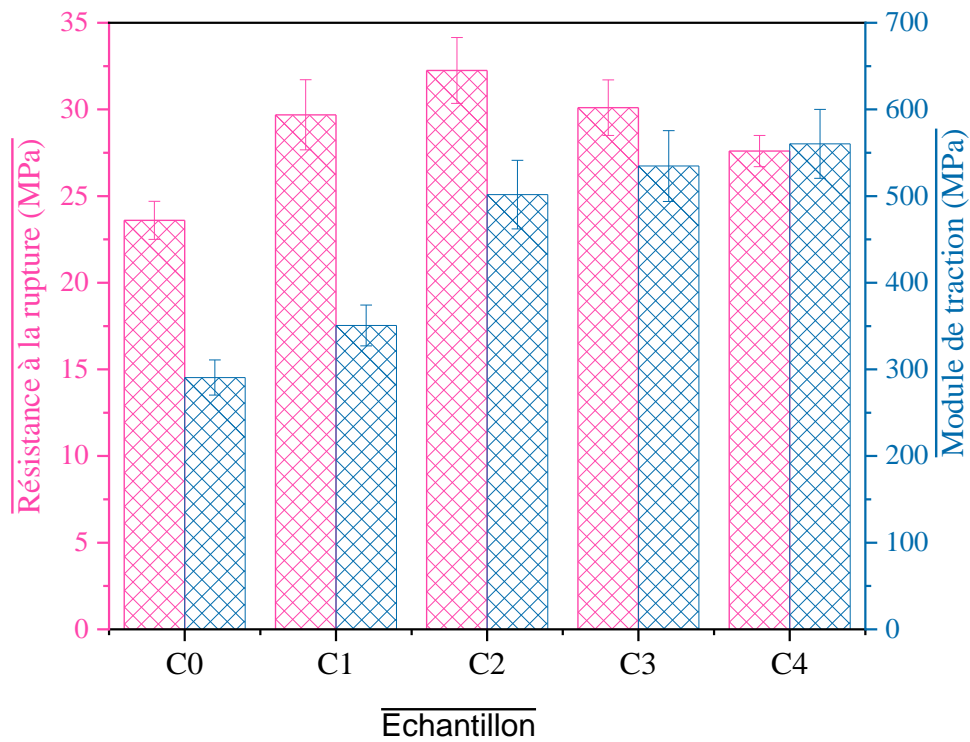
1.3. الخصائص الميكانيكية للمركبات TDPF/PVC/LDPE/NBR

في هذا الجزء كل الألياف النخيل المستعمل معالج قلوياً لذلك ارتأينا أن نرمز لها ب (TDPF) تجنباً لتكرار DPLF

العالجة قلوياً

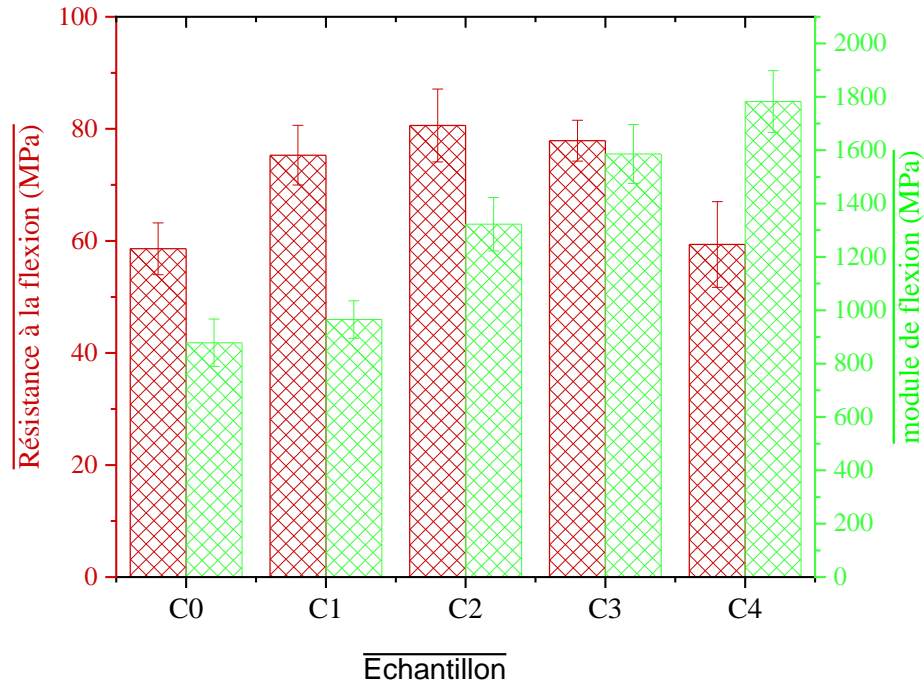
الدراسة الميكانيكية التي تمت في هذا الجزء تمحورت حول دراسة معاملي الشد والانحناء بالإضافة الى دراسة

المقاومة عند الكسر والإستطالة عند الكسر



الشكل: 59.IV. خصائص الشد لمركبات (C4 و C3 و C2 و C1 و C0) TDPF/PVC/LDPE/NBR

توضح الأشكال: (59.IV و 60.IV و 61.IV) الخصائص الميكانيكية للمركبات PVC/LDPE، و PVC/LDPE/NBR و TDPF/PVC/LDPE/NBR التي تحتوي على نسب مختلفة من (10%، 20%، 30% وزناً)



الشكل: 60.IV خصائص الانحناء لمركبات (C0 و C1 و C2 و C3 و C4) TDPF/PVC/LDPE/NBR

كما هو موضح في الشكل: 60.IV، أدى إضافة NBR إلى مركب PVC/LDPE إلى تحسين مقاومة الشد ومعامل المرونة. يشير هذا التحسن إلى أن NBR قد نجح في تعزيز تشتت الطور بين الـ PVC والـ LDPE، مما أدى إلى تكامل أفضل بين المادتين.

علاوة على ذلك، ساهم NBR كعامل توافق في زيادة مقاومة الشد من 23.6 MPa إلى 29.69 MPa (زيادة قدرها 20%)، ومعامل المرونة من 290.56 MPa إلى 350.69 MPa (زيادة قدرها 17%).

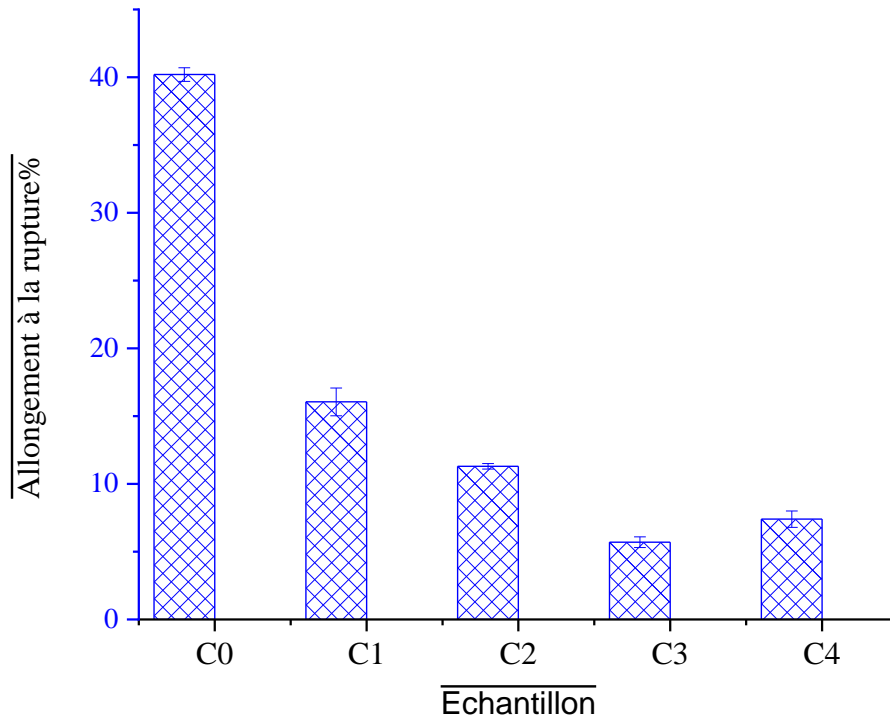
وفقاً لدراسة Fang et al.، يمكن استخدام البولي إيثيلين المكلور (CPE) أو NBR كعوامل توافق تفاعلية لتحسين الخصائص الميكانيكية لمركبات PVC/LDPE، حيث تعمل هذه المواد على تحسين التفاعل بين البوليمرات وتعزيز متانة المركب [86]

تأثير إضافة NBR وألياف اوراق نخيل التمر على الخصائص الميكانيكية

يظهر الشكل: IV.60 أن مقاومة الانحناء ومعامل الانحناء قد ازدادت بمقدار 16.7MPa و 86.94MPa ، على التوالي، بعد إضافة NBR كعامل توافق، مما أدى إلى تحسين الالتصاق البيني بين الـ PVC والـ LDPE. ونتيجة لذلك، تحسنت عملية التشنت داخل المادة، كما انخفض التوتر البيني، مما ساهم في نقل الإجهاد بشكل أكثر كفاءة. [87]

كما هو موضح في الشكلين: IV.59 و IV.60 ، زادت مقاومة الشد والانحناء في العينة C1 بمقدار 2.56MPa و 5.3MPa، على التوالي، وبعد تعزيزها بنسبة 10% وزناً من ألياف اوراق نخيل التمر (العينة C2). ومع ذلك، فإن إضافة 30% وزناً من TDPF (العينة C4) أدت إلى انخفاض مقاومة الشد بمقدار 5.33MPa، ويُعزى ذلك إلى ضعف الترابط بين المصفوفة والليف، مما أثر سلباً على الخصائص الميكانيكية للمركب. [87]

تأثير إضافة ألياف اوراق نخيل التمر على الاستطالة



الشكل 61.IV الاستطالة عند الكسر لمركبات (C4 و C3 و C2 و C1 و C0) TDPF/PVC/LDPE/NBR

أظهرت مصفوفة PVC/LDPE/NBR العينة (C1) قيمة استطالة بلغت 16 % وكما هو موضح في الشكل: IV.61، فإن إدخال ألياف اوراق نخيل التمر المعالجة قلويًا (TDPF) في المصفوفة البوليمرية أدى إلى انخفاض نسبة الاستطالة عند الكسر. يُعزى هذا الانخفاض إلى أن تشوه ألياف اوراق نخيل التمر أقل بكثير من تشوه مصفوفة

PVC/LDPE/NBR، ويستنتج من ذلك ان المصفوفة تتشوه أكثر من إجمالي تشوه المادة المركبة، وبالتالي تنخفض نسبة الاستطالة عند الكسر [88]

كما أن إضافة ألياف TDPF قللت من مرونة المصفوفة البوليمرية، مما أدى إلى تسريع عملية الكسر مقارنةً بالمصفوفة الأساسية PVC/LDPE/NBR. تعتبر الصلابة إحدى الخصائص الميكانيكية الأساسية للبوليمرات، والتي تلعب دورًا رئيسيًا في العديد من التطبيقات [89]. وبسبب توزيع ألياف أوراق نخيل التمر داخل مصفوفة PVC/LDPE/NBR، زادت صلابة المادة المركبة بشكل ملحوظ.

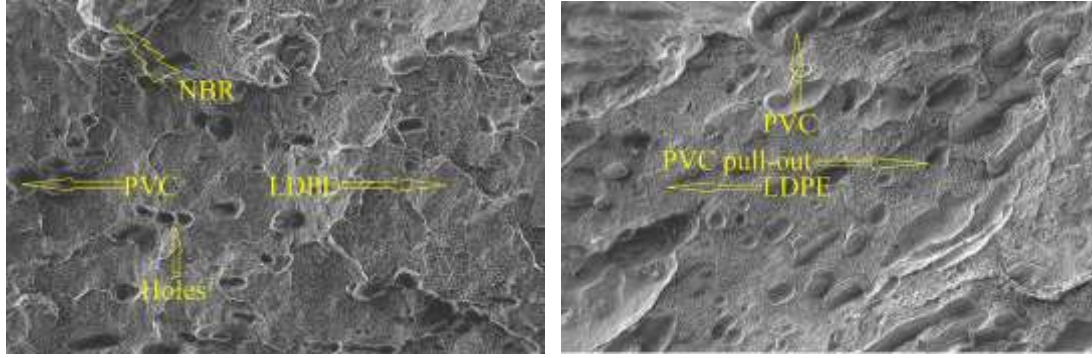
الجدول 21.IV. الخصائص الميكانيكية لمركبات (C0 و C1 و C2 و C3 و C4) DPF/PVC/LDPE/NBR

العينة	مقاومة الشد (MPa)	معامل الشد (MPa)	مقاومة الانحناء (MPa)	معامل الانحناء (MPa)	الاستطالة عند الكسر (%)
C0	23.6 ± 1.14	290.56 ± 20.3	58.6 ± 4.63	878.3 ± 88.6	40.2 ± 0.5
C1	29.69 ± 2.02	350.69 ± 23.6	75.3 ± 5.33	965.24 ± 70.32	16.05 ± 1.02
C2	32.25 ± 2.03	456.36 ± 27.3	80.6 ± 4.96	1280.98 ± 99.3	9.6 ± 0.6
C3	30.1 ± 1.9	501.65 ± 39.6	77.9 ± 6.5	1322.7 ± 100	11.3 ± 0.3
C4	24.36 ± 1.6	534.65 ± 40.9	59.36 ± 3.65	1585.9 ± 110.3	5.7 ± 0.45

توضح هذه النتائج تأثير بوليمر NBR المشترك على السلوك الميكانيكي لمزيج PVC/LDPE. فقد ساهم دمج NBR في تعزيز تشتت الطور بين الـ PVC والـ LDPE وتحسين التوافق البيني. وبالتالي، فإن البوليمر المشترك NBR المستخدم في هذه الدراسة متوافق مع الـ PVC، وهو سلوك مماثل لما لوحظ في أبحاث Xu et al. [90].

2.3. مورفولوجيا المركبات TDPF/PVC/LDPE/NBR

تتأثر مورفولوجيا المزيج غير القابل للامتزاج بعدة عوامل، بما في ذلك تكوين الخليط وظروف التصنيع، ونسبة لزوجة المكونات، والتوتر السطحي. في معظم الحالات، تتميز هذه الخلائط ببنية خشنة قد تخضع للتكتل أثناء التشكيل أو عمليات ما بعد المزج. ولذلك، فإن إضافة مادة توافقية مناسبة قد تزيد من امتزاج النظام، مما يؤدي إلى بنية أكثر تجانسًا وأقل عرضة للتكتل.



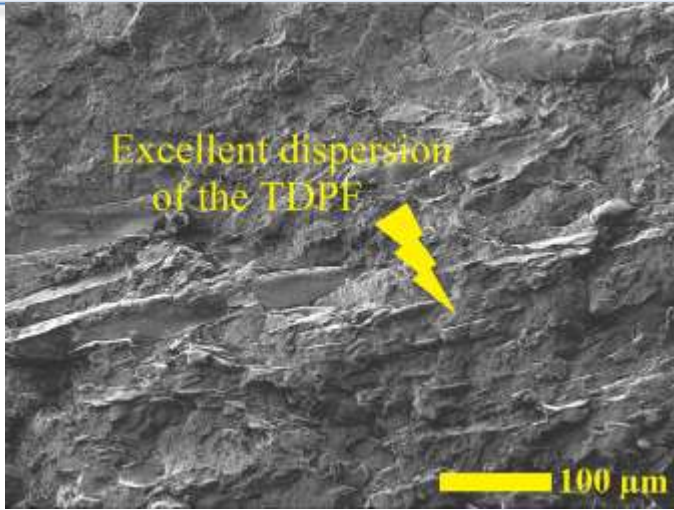
b

a

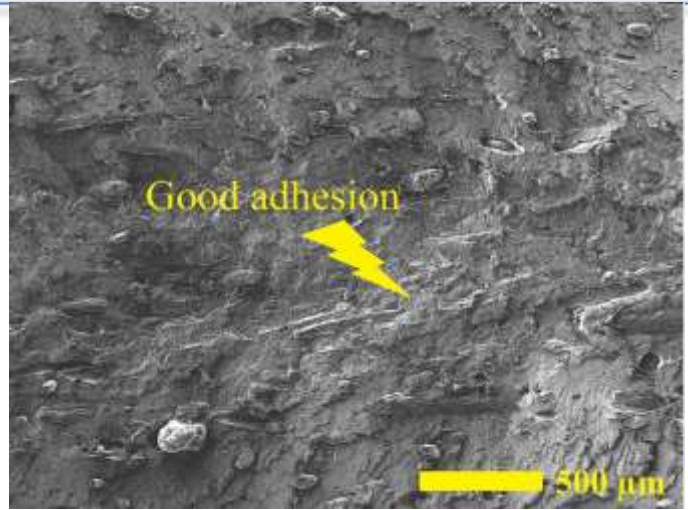
الشكل 62.IV. صور المجهر الإلكتروني الماسح (MEB) لـ (a) مزيج PVC/LDPE (C0) و (b) مزيج PVC/LDPE/NBR (C1).

يُظهر الشكل: 62.IV-a الخصائص السطحية لمزيج PVC/LDPE، حيث يمكن ملاحظة تجمعات كبيرة لجسيمات PVC وظهور فراغات ناتجة عن انفصال الجسيمات أثناء الكسر. يتراوح حجم الجسيمات المتفرقة لطور الـ PVC في مزيج PVC/LDPE (20:80) بين 3 و 30 μm ، ويُعزى هذا الحجم الكبير إلى تكتل الجسيمات بسبب التوتر السطحي بين الـ PVC والـ LDPE. كما يظهر بوضوح ضعف الالتصاق بين سطحي PVC و LDPE. كذلك، يكشف الشكل 62.IV-a عن فراغات بأحجام تتجاوز 20 μm ، وهي ناتجة عن انفصال جسيمات PVC المتجمعة أثناء الكسر، مما يُشبه نمو التشققات الهشة، وهو سلوك شائع في الخلطات غير القابلة للامتزاج [91]. وبسبب هذه البنية، غالبًا ما تمتلك خلطات PVC/LDPE خصائص ميكانيكية ضعيفة.

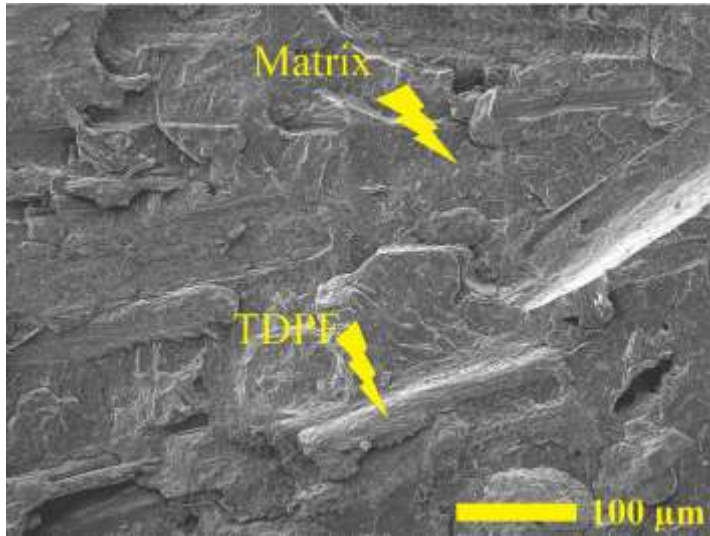
أما الشكل: 62.IV-b، فيوضح تأثير إضافة NBR على حجم جسيمات الطور المتفرق لـ PVC، حيث يُلاحظ أن متوسط حجم الجسيمات انخفض مع إدخال NBR. ويؤدي هذا الانخفاض إلى تحسين الالتصاق بين جسيمات LDPE و PVC. في الأنظمة المتوافقة، يرتبط تقليل حجم الجسيمات عادةً بتقليل التكتل بسبب انخفاض التوتر البيني، مما يؤدي إلى تعزيز الالتصاق [92].



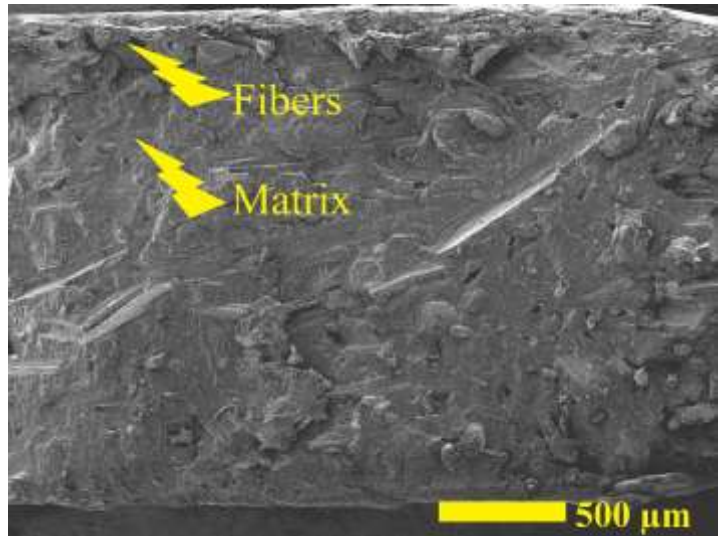
B



A



D

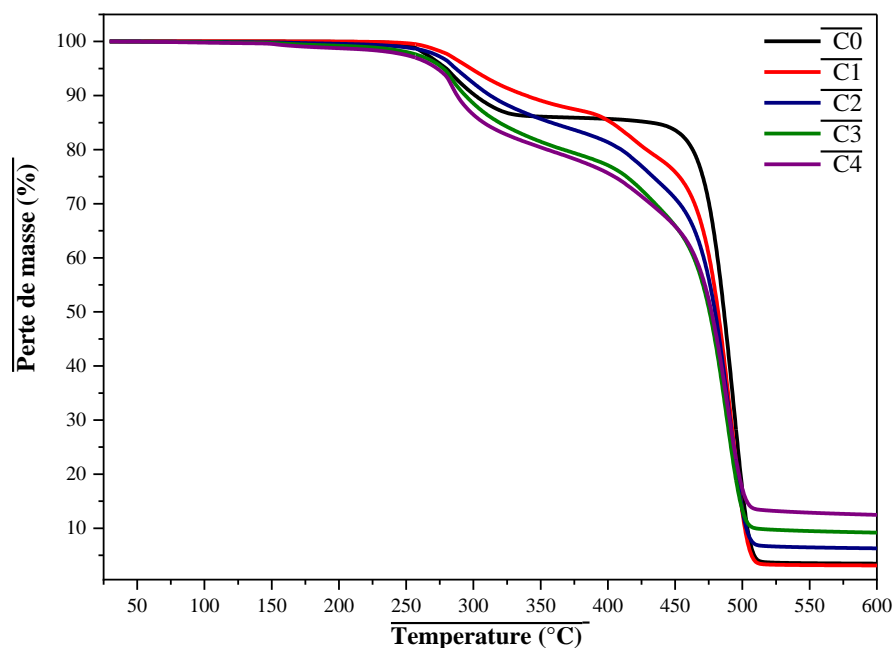


C

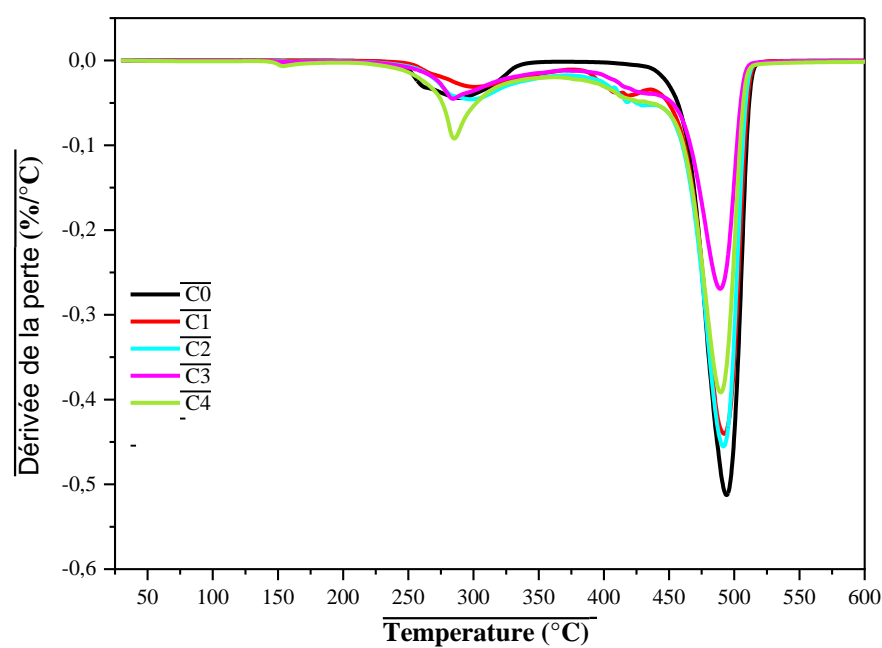
الشكل: 63.IV. صور المجهر الإلكتروني الماسح (MEB) لمركبات (C4 و C2) TDPF/PVC/LDPE/NBR

يُظهر الشكل: 63.IV صور الميكروتوبوغرافيا منخفضة وعالية التكبير لأسطح الكسر في المركبات المحتوية على 10% و 30% وزنيًا من ألياف أوراق نخيل التمر المعالجة فلويا (TDPF) تُظهر البنية المورفولوجية للمركب المحمل بـ 10% وزنيًا من ألياف TDPF سطحًا متجانسًا وتوزيعًا جيدًا للألياف داخل المصفوفة. ولكن مع زيادة نسبة الألياف إلى 30%، انخفض التوافق بين الألياف والمصفوفة البوليمرية، مما أدى إلى تكتل الألياف داخل المركب، كما هو موضح في الأشكال 63.IV-(A-D) تتماشى جميع صور MEB مع الخصائص الميكانيكية التي تم الحصول عليها للمركبات قيد الدراسة.

3.3. التحليل الحراري لمركبات TDPF/PVC/LDPE/NBR



الشكل: 64.IV منحنيات التحليل الحراري الوزني (ATG) لمركبات (C0, C1, C2, C3, C4).
TDPF/PVC/LDPE/NBR



الشكل: 65.IV منحنيات التحليل الحراري الوزني التفاضلي (DTG) لمركبات (C0, C1, C2, C3, C4).
TDPF/PVC/LDPE/NBR

كما هو موضح في الشكلين: (64.IV) و (65.IV)، تم إجراء تحليل التحلل الحراري الوزني (TGA) وتحليل التحلل الحراري التفاضلي الوزني (DTG) على عينات PVC/LDPE/NBR، و PVC/LDPE/NBR، و TDPF/PVC/LDPE/NBR التي تحتوي على 10% و 20% و 30% وزنيًا من ألياف النخيل المعالجة قلويًا (TDPF) حدث التحلل الحراري للمركبات على مرحلتين رئيسيتين:

- المرحلة الأولى: يُرجح أنها ناتجة عن إزالة الكلوريد الهيدروجيني (dehydrochlorination) من كميات صغيرة من PVC، مما أدى إلى تكوين جذور PVC الماكروية، تليها عملية نزع الهيدروجين من LDPE، مما أسفر عن تكوين جذور LDPE الماكروية.

- المرحلة الثانية: يُعتقد أنها مرتبطة بـ تحلل LDPE الحراري من خلال انقسام الروابط على طول سلسله الطويلة، مما أدى إلى تكوين LDPE قصير السلسلة وزيادة تحلل PVC، متبوعًا بتكوين سلاسل بوليينية مزدوجة الرابطة طويلة. تتماشى هذه النتائج مع آلية تكوين الجذور الماكروية التي اقترحها [93] Thongpin et al. و Sombatsompop et al. [94] LDPE و PVC.

الجدول 22.IV. درجات تحلل مركبات TDPF/PVC/LDPE/NBR

العينة	Tonset (°C)	T10% (°C)	T20% (°C)	T50% (°C)	T70% (°C)	T85% (°C)	المتبقي (%)
C0	279.84	301	463.12	485.77	494.58	500.82	3.78
C1	298.26	338.91	429.84	482.57	490.74	498.70	3.39
C2	291.53	313.22	411.28	480.65	492.66	498.70	6.57
C3	277.50	294.30	368.40	475.53	489.46	498.15	9.74
C4	273.05	287.67	358.16	478.09	490.10	503.71	12.92

قيم درجات حرارة التحلل الحراري مدرجة في الجدول 22.IV. أدت إضافة NBR إلى PVC/LDPE إلى زيادة درجة حرارة بداية التحلل الحراري (Tonset) ودرجة حرارة التحلل عند فقدان 10% من الوزن (T10%) لمركب TDPF/PVC/LDPE/NBR. ارتفعت قيم درجات بداية التحلل Tonset و T10% بمقدار 19 و 37 °C على التوالي. ومن المعروف أن إيلاستومرات NBR يمكنها تأخير عملية إزالة الكلوريد الهيدروجيني من PVC [95].

وفقاً لـ الشكل IV.65 يُظهر منحنى العينة (C4) بمحتوى ألياف 30% وزنيًا فقدانًا في الوزن بنحو 4% بين 100 و 150 °C بسبب تبخر الماء، بينما العينتان (C2 و C3) بمحتوى ألياف 10% و 20% وزنيًا على التوالي مستقرتان حراريًا في هذا النطاق.

في النطاق الحراري بين 250 و 500 °C، ينقسم التحلل الحراري لجميع المركبات إلى ثلاث مراحل:

1. المرحلة الأولى: تبدأ عند 250 °C وتستمر حتى 400 °C ، مع فقدان وزن يقارب 15% . هذه المرحلة ترتبط بالتحلل الحراري للهيميسليلوز والسليلوز [96]

2. المرحلة الثانية: تحدث عند حوالي 420 °C ، ومن المحتمل أن تكون مرتبطة بتحلل NBR.

3. المرحلة الثالثة: تحدث بسرعة أكبر من المرحلتين السابقتين، حيث يحدث التحلل الحراري للمصفوفة البوليميرية والمكونات غير السليلوزية من الألياف بين 450 و 500 °C ، وهو ما يرتبط بعملية التحلل الحراري. [97]

خاتمة

في ختام هذا الفصل، تبيّن من خلال مختلف التحاليل البنيوية والميكانيكية والديناميكية أن دمج الألياف الطبيعية المعالجة، مثل ألياف أوراق نخيل التمر، ضمن مصفوفة بوليميرية من PVC، سواء بمفردها أو مع الـ LDPE و NBR، يساهم في تحسين بعض الخصائص الفيزيوميكانيكية للمواد المركبة، مع تأثيرات متفاوتة حسب طبيعة المعالجة ونسبة الإضافة. أظهرت التحاليل بالأشعة تحت الحمراء، والدراسات الميكانيكية والحرارية، أن التوافق بين المكونات وتوزيع الألياف له دور حاسم في تحسين الأداء العام للمركب. هذه النتائج تفتح آفاقاً واعدة لاستخدام هذه المواد المركبة في تطبيقات صناعية تتطلب خصائص ميكانيكية وحرارية محسنة، مع المحافظة على طابعها البيئي والاقتصادي.

الخاتمة

هدفت هذه الأطروحة إلى تطوير وتحسين الخصائص الفيزيائية والميكانيكية والحرارية لمركبات أساسها بولي كلوريد الفينيل (PVC) ، وذلك من خلال إدماج ألياف طبيعية معالجة مستخلصة من نخيل التمر (DPLF) ، بالإضافة إلى مواد مضافة مثل مسحوق نوى التمر، مسحوق القهوة، وبوليميرات مرافقة كالـ LDPE وNBR، ضمن إستراتيجية تهدف إلى استغلال النفايات الزراعية كمصادر متجددة لتحضير مواد مركبة صديقة للبيئة وذات أداء وظيفي عالٍ.

من خلال التحاليل البنيوية بواسطة الأشعة تحت الحمراء (FTIR) ، تم تأكيد وجود روابط وظيفية مميزة، أهمها رابطة الهيدروكسيل O-H عند التردد 3427cm^{-1} ، بالإضافة إلى روابط C-H و C=O عند التردد 2921cm^{-1} و 1722cm^{-1} ، مما يدل على نجاح إدماج الألياف والمكونات الطبيعية داخل المصفوفة البوليمرية. كما أظهرت أطياف FTIR الخاصة بالعينات المعالجة بالألكالي أو بالسيلان تغييرات طفيفة تعكس تحسناً في نفاوة السطح الليفي دون أن تحدث تأثيراً جوهرياً في التوافق مع مصفوفة الـ PVC.

فيما يخص سلوك الامتصاص، أوضحت التجارب أن معدل امتصاص الماء المقطر والماء المالح يرتفع تدريجياً بزيادة نسبة الألياف أو الـ PVC في التركيبة، وقد لوحظ ذلك بوضوح في المركبات المحتوية على 15% و 30% من DPLF أو مسحوق نوى التمر. أو القهوة غير أن المعالجة الكيميائية للألياف لم تسهم بفعالية في تقليل هذا الامتصاص، وهو ما يُعزى إلى الطبيعة غير المتبلورة للـ PVC وضعف التماسك بين المكونات.

أظهرت التجارب الميكانيكية أن أفضل مقاومة للشد تم تسجيلها لمركب يحتوي على 10% من ألياف اوراق نخيل التمر المعالجة، حيث بلغت القيمة حوالي (MPa). 32 أما المركب المحتوي على 30% من الألياف، فقد شهد تراجعاً في المقاومة إلى (MPa) 26.67 بسبب التشقق غير المتجانس للألياف داخل المصفوفة. كما أظهرت الدراسة أن إدخال NBR كمركب ثالث ساهم في تحسين التوافق بين الـ PVC وLDPE، مما أدى إلى رفع مقاومة الشد من 23.6 إلى 29.69 (MPa) وزيادة معامل الشد من 290.56 إلى 350.69 (MPa).

فيما يخص صلابة المواد، فقد ارتفعت قيمة صلادة شور Shore للمركبات المدعمة بالألياف لتصل إلى 94.53، مقارنة بـ 82.88 للـ PVC الخام، مما يدل على ارتفاع في صلابة المركب مع ازدياد نسبة الألياف أو المواد المضافة. كما شهد معامل الانحناء تحسناً واضحاً، حيث وصل إلى 534 (MPa) في أفضل تركيبة.

أما من حيث الاستقرار الحراري، فقد أظهرت المركبات المدعمة بـ 15% من مسحوق نوى التمر تحسناً ملحوظاً، حيث ارتفع زمن الاستقرار من 117 دقيقة للـ PVC الخام إلى 139.5 دقيقة. أما عند استخدام ألياف معالجة بـ NaOH أو Silane ، فقد سجلت أعلى قيمة زمنية وصلت إلى 166 دقيقة، مما يدل على دور التفاعل الكيميائي بين الألياف والمصفوفة في تحسين مقاومة التحلل الحراري.

بالإضافة إلى ذلك، أثبتت الدراسة الديناميكية أن معامل الخسارة (Loss Modulus) انخفض إلى 0.26 MPa مقارنة بـ 0.92 MPa للـ PVC النقي، مما يدل على انخفاض الطابع اللزج وتحسن في الصلابة الهيكلية.

وقد بينت صور المجهر الإلكتروني الماسح (MEB) أن التوافق البيئي بين الألياف والمصفوفة يختلف باختلاف المعالجة ونسبة الإضافة؛ حيث ظهرت فراغات ومناطق ضعف في التماسك في بعض التركيبات، بينما أظهرت تركيبات أخرى، خاصة تلك المعالجة بالألكالي، انسجماً سطحياً أفضل. كما أظهرت الصور أن استخدام NBR أدى إلى تقليل حجم جزيئات PVC داخل المزيج، مما حسن من التماسك بين مكونات المركب، في حين أظهرت العينات الخالية من NBR وجود فراغات كبيرة وضعف في التماسك.

وأخيراً، أظهرت التحاليل الحرارية عبر التحليل الحراري الوزني (TGA) والاختبارات التفاضلية (ATG/DTG) أن بعض التركيبات أبدت مقاومة محسنة ضد التحلل الحراري.

بناءً على ما سبق، تبيّن أن دمج ألياف نخيل التمر المعالجة ضمن مصفوفات بوليمرية متعددة، إلى جانب استخدام مواد توافقية مثل NBR، يمثل إستراتيجية فعالة لإنتاج مواد مركبة مستدامة تمتاز بخصائص ميكانيكية وحرارية ممتازة. هذا العمل يفتح آفاقاً واسعة نحو استخدام هذه المركبات الخضراء في تطبيقات صناعية متنوعة كالبناء، التغليف، والأثاث، مع المحافظة على البعد البيئي والاقتصادي.

قائمة المصادر و المراجع

- [1] Seyni A. « Propriétés physico-chimiques et d'usage de matériaux composites à charge dégradable produits par co-broyage », Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2008.
- [2] Maou, S., Meghezzi, A., Nebbache, N., & Meftah, Y. (2019). Mechanical, morphological, and thermal properties of poly (vinyl chloride)/low-density polyethylene composites filled with date palm leaf fiber. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 25(s2), E88-E93.
- [3] Maou, S., Meghezzi, A., Grohens, Y., Meftah, Y., Kervoelen, A., & Magueresse, A. (2021). Effect of various chemical modifications of date palm fibers (DPFs) on the thermo-physical properties of polyvinyl chloride (PVC)–high-density polyethylene (HDPE) composites. *Industrial Crops and Products*, 171, 113974.
- [4] Maou, S., Meftah, Y., Tayefi, M., Meghezzi, A., & Grohens, Y. (2022). Preparation and performance of an immiscible PVC-HDPE blend compatibilized with maleic anhydride (MAH) via in-situ reactive extrusion. *Journal of Polymer Research*, 29(5), 161.
- [5] Oumer A. N. et Bachtar D. « Modeling and experimental validation of tensile properties of sugar palm fiber reinforced high impact polystyrene composites », *Fibers and Polymers*, vol. 15, no 2, p. 334-339, 2014.
- [6] Maou, S., Meftah, Y., & Meghezzi, A. (2023). Synergistic effects of metal stearate, calcium carbonate, and recycled polyethylene on thermo-mechanical behavior of polyvinylchloride. *Polyolefins Journal*, 10(1), 1-11
- [7] Meftah, Y., Tayefi, M., Fellouh, F., Chouieur, H., Maou, S., & Meghezzi, A. (2020). Influence of Alkali Treatment and Dune Sand Content on the Properties of Date Palm Fiber Reinforced Unsaturated Polyester Hybrid Composites. *Journal of Composite & Advanced Materials/Revue des Composites et des Matériaux Avancés*, 30.
- [8] Maou, S., Meftah, Y., Grohens, Y., Kervoelen, A., Magueresse, A., Selmani, W., & Ferhad, F. (2024). Synergistic effects of dune sand-based silica and alkali-treated date palm fiber as efficient fillers for improving the properties of hybrid epoxy composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 141(46), e56238.
- [9] Gehring F. « Étude du comportement mécanique et de l'endommagement de composites thermoplastiques renforcés de fibres courtes de chanvre: approche expérimentale et modélisation », Université de Lorraine, 2013.
- [10] Aubineau C. Audebert R. et Champetier G., *Les polymères organiques*. Presses universitaires de France, 1974.

- [11] Hall C., *Polymer materials: an introduction for technologists and scientists*. Macmillan International Higher Education, 2017.
- [12] Fontanille M. et Gnanou Y., *Chimie et physico-chimie des polymères*, vol. 386. Dunod Paris, 2002.
- [13] Chen Y., Li M., Payamyar P., Zheng Z., Sakamoto J., et. Schlüter A. D, « Room temperature synthesis of a covalent monolayer sheet at air/water interface using a shape-persistent photoreactive amphiphilic monomer », *ACS Macro Letters*, vol. 3, no 2, p. 153-158, 2014.
- [14] Colson J. W. et Dichtel W. R., « Rationally synthesized two-dimensional polymers », *Nature chemistry*, vol. 5, no 6, p. 453-465, 2013.
- [15] Weiss P., « La chimie des polymères », *Université Médicale Virtuelle Francophone*, 2010.
- [16] Jouenne S., « option chimie et physicochimie des polymères », Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie, 2005.
- [17] Rudin A. et Choi P., *The elements of polymer science and engineering*. Academic press, 2012.
- [18] Van K. D., *Properties of polymers*. New York: Elsevier, 1976.
- [19] Noshay A. et McGrath J. E., « Block copolymers: overview and critical survey», 2013.
- [20] Chandra R. et Rustgi R., « Biodegradable polymers », *Progress in polymer science*, vol. 23, no 7, p. 1273-1335, 1998.
- [21] J. Giboz, T. Copponnex, et P. Mélé, « Microinjection molding of thermoplastic polymers: a review », *Journal of micromechanics and microengineering*, vol. 17, no 6, p. R96, 2007.
- [22] K. F. Adekunle, « A review of vegetable oil-based polymers: synthesis and applications », 2015.
- [23] Y.-L. Liu et T.-W. Chuo, « Self-healing polymers based on thermally reversible Diels–Alder chemistry », *Polymer Chemistry*, vol. 4, no 7, p. 2194-2205, 2013.
- [24] R. Bhola, S. M. Bhola, H. Liang, et B. Mishra, « Biocompatible denture polymers-a review », *Trends Biomater Artif Organs*, vol. 23, no 3, p. 129-136, 2010.
- [25] F. Dubois, « Elaboration et caractérisations électro-optique et diélectrique de composites à cristaux liquides ferroélectriques dispersés dans une matrice polymère », 2004.

- [26] Gornet, L. (2008).Generalit es sur les matériaux composites.Central nantes.
- [27] P. J. Flory, Principle of polymer chemistry, Cornell university press : NY, 1953.
- [28] BOUZIT. F, « laboration et caractérisation mécanique, en statique et en fatigue,des panneaux sandwichs à base de renforts naturels», thèse Magister,BOUMERDES 2015.
- [29] RIGAL, J., & Negrier, A. (2013). Présentation des matériaux composites.  ditions Techniques de l'Ingénieur, a7790, p8.
- [30] BARRAU. J.J, «Structures en matériaux composites»,  ditions Techniques de l'Ingénieur, bm5080, 2004
- [31] Aribi.C.  tude comparative du comportement des différents matériaux composites (différentes matrices). Mémoire de magister, Université de M'hamed Bouguera, Boumerd s. Algérie.
- [32] A. Viksm, A.K Bledzki, M. Letman, L. Rence, A comparaison of compounding processes and wood type for wood fiber-PP composites. Composites : Part A, 36,789- 797 (2005).
- [33] Aucher, J. (2009). Etude comparative du comportement de composites à matrice thermoplastique ou thermodurcissable INSA Rouen - France .Thèse de Doctorat.
- [34] S. Charfeddine, Y.Boucharreb, Etude et caractérisation des composites polyester Fibre naturelle Cas DPLF, Mémoire de Master, Université Mohamed Khider de Biskra, 2020.
- [35] Rouam.K ;(2013). Elaboration, caractérisation mécanique et hygrothermique d'un stratifié renforcé par des fibres naturelles. Mémoire de magister. Université de Boumerd s. Algérie.
- [36] B.Bakhouche, Caractérisation d'un matériau composite stratifié à fibre de verre/époxy en flexion 3 points statique à, Mémoire de master, Université Baadji Mokhtar Annaba, 2018.
- [37] George Odian, «Principles of polymerization», Polytechnica, Paris, p 823, 1994.
- [38] IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans ;(2009). «Evaluations Globales de la Canc rog nit  pour l'Homme, Groupe 3 :Inclassables quant à leur canc rog nit  pour l'Homme» sur [http : //monographs.iarc. fr](http://monographs.iarc.fr), CIRC.

- [39] P.Quennehen, Etude de la dégradation de la fonction isolation de câbles HT isolés au PVC, Thèse de doctorat, université de Grenoble, France, 2006.
- [40] «Chlorure de polyvinyle» dans la base de données de produits chimiques Reptox de la CSST (Organisme québécois responsable de la sécurité et de la santé au travail).
- [41] Peacock A.J. Handbook of polyethylene: Structure, Properties, and Applications, New York: Marcel Dekker, 534, (2001).
- [42] J. Dupuy. Synthèse de nouveaux catalyseurs pour la polymérisation de l'éthylène, Thèse de doctorat, Université Lyon 1, 171, (1994).
- [43] Lasagabaster, A., Abad M. J., Barral L., Ares A. FTIR study on the nature of water sorbed in polypropylene (PP)/ethylene alcohol vinyl (EVOH) films.European Polymer Journal, (2006), Vol. 42, 3121–313
- [44] -Patrick Combette ; Isabelle Ernoult ; Christian G'Sell, Physique des polymères, Tome 1, Structure, fabrication et emploi, Hermann, Paris, 2005.
- [45] Mohanty. A. K, Misra. M et Hinrichsen. G, « Biofibres, Biodégradable polymers and biocomposites : an overview», Macromolecular Materials and Engineering, 276/277, p 1- 24, 2000.
- [46] FRD, France, « La plateforme de développement des valorisations applicatives des fibres végétales ».
- [47] Une fibre naturelle, c'est quoi en fait ?
<https://youmiwi.com/blogs/youmiwi/une-fibre-naturelle-c-est-quoi> .
- [48] S. Ramarad, « Preparation and properties of Kenaf Bast Fiber Filled (Plasticized) Poly(Lactic Acid) Composites » *School of Materials and mineral Resources Engineering, Engineering Campus, Universiti Sains Malaysia*, 2008.
- [49] V. V. D. Thi, « Matériaux composites à fibres naturelles / polymère biodégradables ou non », phdthesis, Université de Grenoble, 2011.
- [50] C. Cuissinat, « Etude des mécanismes de gonflement et de dissolution des fibres de cellulose native », phdthesis, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2006.
- [51] E. Alarcón-Gutiérrez, "Influence de facteurs abiotiques sur la régulation des paramètres microbiens impliqués dans la dégradation de la matière organique d'une litière forestière méditerranéenne." Aix-Marseille 3, 2007.

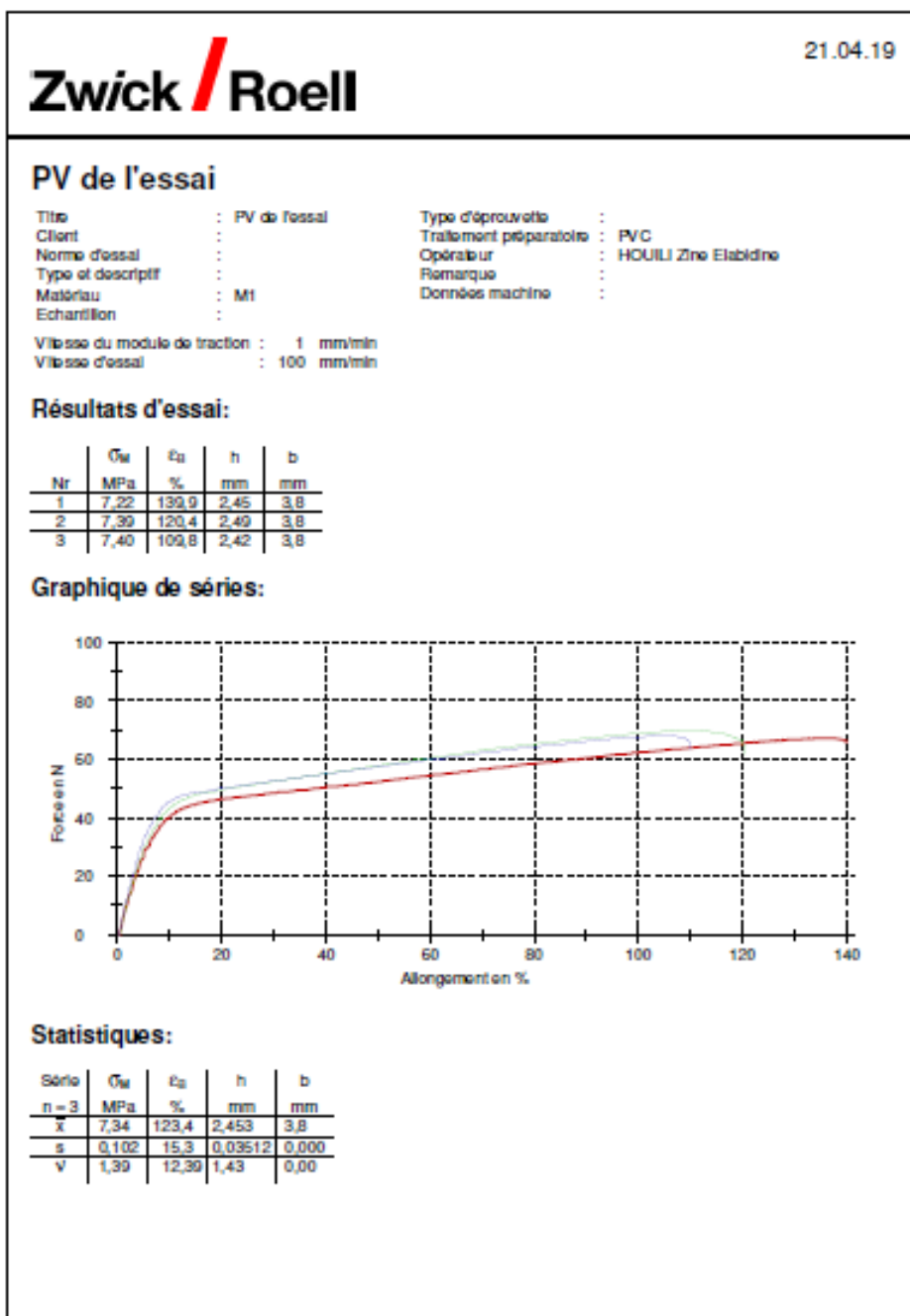
- [52] A. B. Mabrouk, « Elaboration de nanocomposites à base de whiskers de cellulose et de polymère acrylique par polymérisation in situ », phdthesis, Université Grenoble Alpes, 2011.
- [53] M. Dallel, "Evaluation du potentiel textile des fibres d'Alfa (Stipa Tenacissima L.) : caractérisation physico-chimique de la fibre au fil», Mulhouse, 2012.
- [54] J. Mounir, B. Wanassi, S. Msahli, et M. Hassen, « Characterization of mechanical extracted Alfa fibres », Int J Fiber Text. Res, vol. 4, p. 1-4, janv. 2014.
- [55] S. M. Mirmehdi, F. Zeinaly, et F. Dabbagh, « Date palm wood flour as filler of linear low-density polyethylene », Composites Part B: Engineering, vol. 56, p. 137 141, 2014.
- [56] A.Bellel, (2004). « Traitement de surface de polymère par décharge couronne et plasma », Thèse de doctorat, Université Mentouri, Constantine.
- [57] Limousy. L. eguirim.M. Dutournié. P. Kraiem.N. M. Lajili, et R. Said, (2013).Gaseous products and particulate matter emissions of biomass residential boiler fired with spent coffee grounds pellets. Fuel, vol. 107, p. 323-329.
- [58] L. Augier, Étude de l'élaboration de matériaux composites PVC/Bois à partir de déchets de menuiserie : formulation, caractérisation, durabilité et recyclabilité, Thèse de doctorat, Toulouse, INPT, 2007. .
- [59] S. Atmane, R. Bareche, Elaboration et caractérisation d'un matériau composite à base de PVC et de grignon d'olive local, mémoire de master UMM. Tizi-Ouzou, 2017.
- [60] S. Bouhank Elaboration des matériaux composites PVC/fibres de Genêt d'Espagne : Formulations et caractérisations, thèse doctorat, faculté technologie université Sétif 2017.
- [61] K. Zhang, F. Wang, W. Liang, Z. Wang, Z. Duan, et B. Yang, « Thermal and mechanical properties of bamboo fiber reinforced epoxy composites », Polymers, vol. 10, no 6, p. 608, 2018.
- [62] H. Boussehel, Etude des moyens de stabilisation des composites à base de polystyrène, Thèse de doctorat Faculté des Sciences Exactes, Université de Biskra 2018.
- [63] Boussehel H.and all, Effect of Chemicals Treatments on the Morphological, Mechanical, Thermal and Water Uptake Properties of Polyvinyl Chloride/ Palm Fibers Composites, Revue des Composites et des Matériaux Avancés, 2019

- [64] عبدالرحمن راشد محمد راشد دراسة تأثير الاتجاه والكسور الحجمية ودرجت الحرارة على خاصية متانة الانحناء لصفائح بوليميريت مدعمة بالألياف الزجاجية قسم الفيزياء جامعة القادسية 2019
<https://repository.qu.edu.iq/wp-content/uploads/sites/31/2019/05/%D8%B1%D8%B3%D8%A7%D9%84%D8%A9-%D9%84%D9%84%D8%A7%D9%86%D8%AA%D8%B1%D9%86%D9%8A%D8%AA-1.pdf>
- [65] A. Merzoug, B. Bouhamida, Z. Sereir, A. Bezazi, A. Kilic, et Z. Candan, « Quasi-static and dynamic mechanical thermal performance of date palm/glass fiber hybrid composites », Journal of Industrial Textiles, p. 1528083720958036, 2020.
- [66] S. Derradji, Bouhous, A. Effet du désencrage du papier journal sur les propriétés physico-mécaniques des composites PVC/Fibre de papier journal, École Nationale Polytechnique, 2021.
- [67] النوري العايب المواد المركبة ذات مصفوفة مقواة بألياف شهادة دكتوراه علوم كلية العلوم جامعة المسيلة 2021/04/12
<https://num.univ-msila.dz/DWE/public/attachements/2023/02/21/almoad-almrkb-atroh-nhayypdf-qgt5np1u1677016414.pdf>
- [68] بن يحي عز الدين، تأثير المعالجة القلوية على بنية الحلفاء (منطقة بوسعادة) وانعكاسها على الخصائص الميكانيكية لمركب ذو أساس من البولي استر غير المشبع، أطروحة دكتوراه علوم، كلية العلوم، جامعة المسيلة 2014
- [69] S. Maou. Manufacture and characterization of Polyvinyl Chloride / Polyethylene PVC / PE composites for structural applications, doctorat thesis, Faculty of exact sciences, Biskra University 2022
- [70] MAOU S. and all, The effects of surface modified date-palm fiber fillers upon the thermo-physical performances of high density polyethylene-polyvinyl chloride blend with maleic anhydride as a grafting agent, urnal of Applied Polymer Science,2023
- [71] Slimani M. Meghezzi A. Meftah Y. Maou S. Thermophysical behavior of date palm fiber-reinforced polyvinylchloride /low-density olyethylene/acrylonitrile butadiene rubber copolymer ternary composites, Polyolefins Journal, 2023
- [72] Maou S.· Meftah Y. Bouchamia I. Benyaghla A. Alkali-treated date palm fiber-reinforced unsaturated polyester composites: thermo-mechanical performances and structural applications Iranian Polymer Journal 2023

- [73] A. Berkouk. Etude des propriétés thermiques, mécaniques et dynamiques mécaniques de composites à base de polymères thermodurcissable, Thèse doctorat Faculté des Sciences Exactes, Université de Biskra 2022
- [74] Berkouk A. and all Mechanical, Morphological, Thermal and Dynamic Study of Composites of Unsaturated Polyesters-Date Palm Leaf Fiber DPLF. Revue des Composites et des Matériaux Avancés, 2021
- [75] H. Chellali. Élaboration et étude physique, mécanique, et dynamique mécanique de composites polymériques à base de fibres naturelles, Thèse doctorat Faculté des Sciences Exactes, Université de Biskra 2024.
- [76] H. Chelali and all, Mechanical, Curing Parameters and Water Absorption of Hybrid Date Palm Leaf-Orange Peel Fibers Reinforced Unsaturated Polyester Composites, Revue des Composites et des Matériaux Avancés, 2021.
- [77] G. Bogoeva-Gaceva et al., « Natural fiber eco-composites », Polymer composites, vol. 28, no 1, p. 98-107, 2007.
- [78] X. Li, L. G. Tabil, et S. Panigrahi, « Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiber-reinforced composites: a review », Journal of Polymers and the Environment, vol. 15, no 1, p. 25-33, 2007.
- [79] R. Moya et D. Camacho, « Production of natural fiber obtained from the leaves of pineapple plants (Ananas comosus) cultivated in Costa Rica », in Biomass and Bioenergy, Springer, 2014, p. 111-124.
- [80] HM. Akil, M. F. Omar, A. M. Mazuki, S. Safiee, Z. M. Ishak, et A. A. Bakar, «Kenaf fiber reinforced composites: A review », Materials & Design, vol. 32, no 8-9, p. 4107-4121, 2011.
- [81] Dhakal H. N., and Zhang Z., et Richardson M. O., «Effect of water absorption on the mechanical properties of hemp fibre reinforced unsaturated polyester composites», Composites science and technology, vol. 67, no 7-8, p. 1674-1683, 2007.
- [82] Magamou. G. Caractérisation par infrarouge à transformée de Fourier des réactions chimiques entre post-décharges et précurseurs organosiliciés : cas du 3-aminopropyltriethoxysilane (APTES). Autre. Université de Lorraine, 2016.
- [83] Operation manual for Cressington Sputter Coater 108, https://physics.unt.edu/resources/student-research-lab/operation_manual_cressington_sputter_coater.pdf .
- [84] Microscopie électronique et analytique, <https://mea.edu.umontpellier.fr/meb/>

- [85] analyse-mecanique-dynamique-dma.
<https://www.tainstruments.com/pdf/brochure/dma.pdf> .
- [86] Fang Z, Ma G, Liu C, Xu C (2004) Morphology evolution of immiscible LDPE/PVC blends in the presence of compatibilizer and phase dispersant. *J Appl Polym Sci* 91: 763-772.
- [87] Prachayawarakorn J, Khamsri J, Chaochanchaikul K, Sombatsompop N (2006) Effects of compatibilizer type and rubber-wood sawdust content on the mechanical, morphological, and thermal properties of PVC/LDPE blend. *J Appl Polym Sci* 102: 598-606.
- [88] Salmah H, Romisuhani A, Akmal H (2013) Properties of low-density polyethylene/palm kernel shell composites: Effect of polyethylene co-acrylic acid. *J Thermoplast Compos Mater* 26: 3-15.
- [89] Mishra T, Mandal P, Rout AK, Sahoo D (2022) A state-of-the-art review on potential applications of natural fiber-reinforced polymer composite filled with inorganic nanoparticle. *Compos C: Open Access* 9:100298.
- [90] Xu C, Fang Z, Zhong J (1997) Study on phase dispersion-crosslinking synergism in binary blends of poly(vinyl chloride) with low density polyethylene. *Polymer (Guildf)* 38: 155-158.
- [91] Zhao X, Niu K, Xu Y, Peng Z, Jia L, Hui D, Zhang L (2016) Morphology and performance of NR/NBR/ENR ternary rubber composites. *Compos Part B Eng* 107: 106-112.
- [92] Inuwa IM, Hassan A, Samsudin SA, Mohammad Haafiz M, Jawaaid M (2017) Interface modification of compatibilized polyethylene terephthalate/polypropylene blends: Effect of compatibilization on thermomechanical properties and thermal stability. *J Vinyl Addit Technol* 23: 45-54.
- [93] Thongpin C, Santavitee O, Sombatsompop N (2006) Degradation mechanism and mechanical properties of PVC in PVC-PE melt blends: Effects of molecular architecture, content, and MFI of PE. *J Vinyl Addit Technol* 12: 115-123.
- [94] Sombatsompop N, Sungsanit K, Thongpin C (2004) Structural changes of PVC in PVC/LDPE melt-blends: Effects of LDPE content and number of extrusions. *Polymer Engineering and Science* 44: 487-495.
- [95] Khalil AM, Rabie ST (2021) Mechanical, thermal and antibacterial performances of acrylonitrile butadiene rubber/polyvinyl chloride loaded with *Moringa oleifera* leaves powder. *J Therm Anal Calorim* 143: 2973-2981.
- [96] Batuer A, Chen D, Xin Q, He X, Zhang J, Huang Z (2020) Mechanical properties of waste cotton and their changes during early pyrolysis. *J Anal Appl Pyrolysis* 149: 104855.
- [97] Sh. Al-Otaibi M, Alothman OY, Alrashed MM, Anis A, Naveen J, Jawaaid M (2020) Characterization of date palm fiber-reinforced different polypropylene matrices. *Polymers (Basel)* 12: 597.

ملحق



الشكل: 16.III وثيقة (PDF) المتحصل عليها من اختبار الشد