الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة الشهيد حمة لخضر الوادي
كلية التكنولوجيا

مذكرة مقدمة لنيل شهادة ماستر أكاديمي

ميدان : علوم وتكنولوجيا

شعبة : هندسة طرائق

التخصص : هندسة كيميائية

إعداد:
عبائدي أسماء أمة الله – حسان صفاء

بعنوان :

تثمين المخلفات الزراعية باستغلالها في تصنيع المواد المركبة من المبلمرات مع دراسة لبعض التطبيقات الممكنة

نوقشت يوم : 2026|6|13

تحت اشراف اللجنة المكونة :

جميلة بره	جامعة الشهيد حمة لخضر– الوادي	رئيساً
خديجة حاج العربي	جامعة الشهيد حمة لخضر– الوادي	مناقشا
عبد الســـلام بوغـــــزال	جامعة الشهيد حمة لخضر– الوادي	مؤطرا

السنة الجامعية : 2025|2026

بسم الله الرحمن الرحيم

شكر و تقدير

الحمد لله حمداً يملأ السماوات والأرض، حمداً يُنيرُ الدروب، ويُذهب الهموم، ويجلبُ الرضى بقضائه وقدره، الحمد لله الذي أنعم علينا بالتوفيق لإنجاز هذا العمل.

نتوجه إليكم بأصدق كلمات الشكر والعرفان على ما بذلته من توجيهات قيّمة ومتابعة دقيقة خلال إعدادنا لهذه المذكرة، لقد كان دعمك وإشرافك حجر الأساس في إنجاز هذا العمل على أكمل وجه، فجزاك الله خير الجزاء.

أستاذنا الفاضل و المثابر : بوغزال عبد السلام.

كما نتقدم بالشكر الجزيل لطاقم وحدة البحث و تطوير الطاقات المتجددة UDERZA

جزاكم الله كل خير

إهداء

نحمده الله الذي سخر لنا ما في الأرض جميعاً

أهدي ثمرة جهدي وتعب سهر الليالي

إلى من علماني أن الخير في الأرض لا يضيع

وأن ما يفضل اليوم يمكن أن يكون نفعاً غدا

إلى من زرع في نفسي حب العلم والعمل

إلى والدي العزيزين حفظهما الله وأطال في عمرهما

إلى كل إخوتي و أحبائي و أصدقائي

إلى أساتذتي الكرام الذين كان لهم الفضل في توجيهي ونقلي من جهل المعرفة إلى نور الفهم

إلى كل من آمن بقدرتي ، وساندني بكلمة طيبة أو دعوة صادقة في طريق هذا الإنجاز

وَقُلِ اعْمَلُوا فَسَيَرَى اللَّهُ عَمَلَكُمْ وَرَسُولُهُ وَالْمُؤْمِنُونَ

أسماء أمة الله عبائدي

إهداء

الحمد لله الذي بنعمته تتمّ الصالحات، وبفضله تُنجز الغايات،

الحمد لله حمدًا يليق بجلال وجهه وعظيم سلطانه، على التوفيق والتمام والإنجاز.

إلى من كان لي النور حين أظلمت الطرق، والسند حين اشتدّ التعب

إلى من حمل همّي قبل أن أحمله، وبذل الغالي والنفيس لأجل راحتي ونجاحي

إلى أبي الغالي، مصدر الفخر والقوة، أطال الله في عمره وألبسه ثوب الصحة والعافية.

وإلى من لا تُقاس كلماتها بمداد، ولا يُوفّى فضلها بعبارات، إلى القلب الذي ينبض حبًا وحنانًا

إلى من كانت دعواتها تحفّني في كل خطوة، وابتسامتها تمنحني الأمل مهما اشتدّت الظروف

إلى أمي الحبيبة، نبض الحياة وسرّ الطمأنينة، حفظها الله وأدامها نورًا في حياتي.

وإلى إخوتي الذين كانوا لي جناحًا أستند إليه، وسندًا أواجه به صعوبات الطريق، فكانوا لي العون بعد الله، ورفقاء الدرب في كل المواقف.

حفظكم الله ورعاكم جميعا

حسان صفاء

الفهرس

العنوان	الصفحة
الاهداء	
شكر وعرفان	
الفهرس	I
قائمة الأشكال	IV
قائمة الجداول	VII
مقدمة	1
الباب النظري	
الفصل الأول : مفاهيم حول المبلمرات والمخلفات النباتية	
I .1 . نبذة تاريخية حول تطور علم المبلمرات	5
I . 2. أنواع المبلمرات ومصادرها	6
I .2 . 1 . البوليمرات الطبيعية	7
I .2 . 2 . البوليمرات شبه الاصطناعية	6
I .3.2. البوليمرات الاصطناعية	6
I .4.2 . البوليمرات الحيوية	8
I .3 . الطرق الصناعية للحصول على المبلمرات	8
I .3 . 1 . البلمرة في الكتلة	8
I .3 . 2 . البلمرة في المحلول	10
I .3 . 3 . البلمرة بالمستحلب	11
I .3 . 4 . البلمرة بالتعليق	12
I .3 . 5 . البلمرة التنسيقية	14
I .4 . استعمالات البوليمرات وتأثيراتها البيئية	16
I . 5 . مصادر المخلفات النباتية	17

I .6. أنواع المخلفات الزراعية	18
I .6. 1 . المخلفات الحقلية	18
I . 6 .2. مخلفات الأشجار المثمرة	18
I .6. 3. المخلفات النباتية	19
I .7. طرق معالجة المخلفات الزراعية	19
I .7. 1 . المعالجة الفيزيائية	19
I .7. 2. المعالجة الكيميائية	20
I .7. 3 . المعالجة البيولوجية	20
I . 8 . أهمية استغلال المخلفات الزراعية	20
الفصل الثاني : المواد المركبة من المبلمر والألياف النباتية	
II . 1 . مفاهيم حول المواد المركبة	23
II .2. أنواع المواد المركبة	24
II .2. 1. النوع الأول : التصنيف حسب نوع المصفوفة البوليمرية	24
II .2.2. النوع الثاني : التصنيف حسب شكل وطول الألياف	25
II .2. 3 . النوع الثالث : التصنيف حسب اتجاه توزيع الألياف	26
II .3. طرق تحضير المواد المركبة	29
II . 3 . 1. تقنية القولبة	29
II . 3 . 2. طريقة القالب المفتوح	30
II . 3 .3. طريقة القولبة بالانتقال	31
II . 3 .4. القولبة بالتفريغ	32
II . 3 .6. طريقة القولبة بالضغط	33
II . 3 .7. طريقة القولبة بالحقن	33
II . 3 .7. طريقة اللف الآلي	34
II . 3 .8. طريقة القولبة بالسحب	34
II . 4. مجالات استعمال المواد المركبة	35

II . 5. ذكر بعض الأعمال البحثية (الجديدة)	36
الفصل الثالث : المنهجية التجريبية	
III .1.1. المواد والكواشف	41
III .1.1. 1. بولي كلوريد الفينيل(PVC)	41
III .1. 1. 2 . هيدروكسيد الصوديوم (NaOH)	41
III .1. 1. 3 . الألياف النباتية (FVP)	41
III .1. 1. 4 . المذيبات	42
III .1. 1. 4 .1. رباعي هيدروفوران (THF)	42
III .1. 1. 4 .2. الإيثانول	42
III .1. 1. 4 .3. أزرق الميثيلين	42
III . 1. 2 . الأجهزة والمعدات	42
III .1. 3 . طرق التحضير	43
III .1. 3 . 1. تحضير ألياف نخيل التمر	43
III .1. 3 . 1. 1. جمع وطحن الألياف	43
III .1. 3 . 1. 2. معالجة الألياف	43
III .2. تحضير المواد المركبة	46
III .3. تقنيات القياس والتوصيف	47
III .3. 1 . مطيافية الأشعة تحت الحمراء بتحويل فوريه	47
III .3. 2 . المطيافية بالأشعة فوق البنفسجية–المرئية	47
III .4. الاختبارات التجريبية	47
III.4.1. اختبار امتصاص الماء	47
III .4. 2 . اختبار الترشيح	48
III .4. 3 . مقاومة العينات للأحماض	49
الفصل الرابع : مناقشة النتائج	
III .5. 3 . التفسير العلمي لتطور تركيز أزرق الميثيلين وتأثيره على مردود التصفية عبر الدورات المتعاقبة	51
III .5. 4 . التفسير العلمي لمقارنة بين مركب 1 و 2	53
III .5. 5 . التفسير العلمي لغمر العينات في الأوساط الحمضية Hcl و H_2SO_4	54
خاتمة	57
قائمة المراجع	59

قائمة الأشكال

الرقم	العنوان	الصفحة
	الباب النظري	
	الفصل الأول : مفاهيم حول المبلمرات والمخلفات النباتية	
الشكل I . 1	*تصنيف البوليمرات حسب مصدرها وقابليتها للتحلل الحيوي*	6
الشكل I . 2	مخطط مبسط لعملية البلمرة في الكتلة داخل مفاعل مزوّد بنظام تحريك	8
الشكل I . 3	*مخطط صناعي لعملية البلمرة في المحلول مع مرحلة فصل البوليمر واسترجاع المذيب*	10
الشكل I . 4	*مخطط تخطيطي لعملية البلمرة بالمستحلب في تحضير جسيمات نواة–غلاف (Core–Shell).*	11
الشكل I . 5	مخطط تخطيطي لعملية البلمرة بالتعليق وتكوّن حبيبات البوليمر داخل الطور المائي	13
الشكل I . 6	*آلية الإدراج في البلمرة التنسيقية باستخدام محفزات زيجلر–ناتا*	15
	الفصل الثاني : المواد المركبة من المبلمر والألياف النباتية	
الشكل II .7	*تمثيل تخطيطي لبنية المادة المركبة المدعمة بالألياف، يوضح اتحاد طور التقوية الليفي مع الطور المستمر (المصفوفة) لتكوين مادة ذات خصائص ميكانيكية محسّنة مثل مقاومة الشد والصلابة*	23
الشكلII . 8	*اتجاهات مختلفة للألياف في المواد المركبة المقواة بالألياف. حيث: أ. اتجاه أحادي، ب. اتجاه ثنائي، ج. اتجاه عشوائي، د. نسيج منسوج*	27
الشكلII . 9	*مخطط يوضح مبدأ عمل تقنية القولبة بنقل الراتنج (RTM) في تحضير المواد المركبة المدعمة بالألياف النباتية*	29
الشكل II.4	مخطط يوضح مبدأ عمل تقنية القالب المفتوح في تحضير المواد المركبة المدعمة بالألياف النباتية	30
الشكلII . 5	مخطط يوضح تقنية القالب المفتوح باستخدام مسدس الرش في تحضير المواد المركبة المدعمة بالألياف النباتية	31
الشكلII .6	مخطط يوضح مبدأ عمل تقنية القولبة بالانتقال في تحضير المواد المركبة المدعمة بالألياف النباتية	31

الشكلII . 7	منتجات مشكلة بطريقة القولبة بالانتقال	32
الشكلII . 8	مخطط يوضح مبدأ عمل تقنية القولبة بالتفريغ في تحضير المواد المركبة المدعمة بالألياف النباتية	32
الشكلII . 9	مخطط يوضح مبدأ عمل تقنية القولبة بالضغط في تحضير المواد المركبة المدعمة بالألياف النباتية	33
الشكل II .10	مخطط يوضح مبدأ عمل تقنية القولبة بالحقن في تحضير المواد المركبة المدعمة بالألياف النباتية	33
الشكل II .11	مخطط يوضح مبدأ عمل تقنية اللف الالي في تحضير المواد المركبة المدعمة بالألياف النباتية	34
الشكلII . 12	مخطط يوضح مبدأ عمل تقنية القولبة بالسحب في تحضير المواد المركبة المدعمة بالألياف النباتية	34
	الباب العملي	
	الفصل الثالث : المنهجية التجريبية	
الشكلIII .1	مسحوق ال pvc الخام	41
الشكلIII .2	ألياف النخيل (العرجون)	41
الشكلIII .3	مراحل تهيئة الألياف	43
الشكلIII .4	جهاز الاستخلاص	44
الشكلIII .5	غسيل الألياف (قمع بوشنر)	44
الشكلIII 6	صورة لألياف نخيل التمر (أ) قبل المعالجة و (ب) بعد المعالجة بهيدروكسيد الصوديوم NaoH	45
الشكلIII .7	اعادة طحن الألياف يدويا	45
الشكلIII .8	صور نماذج لأغشية المركبات المحضرة	46
الشكلIII .9	جهاز المطيافية ال FTIR	47
الشكلIII .10	جهاز ال UV_Visible	47
الشكلIII .11	صورة لجهاز الترشيح (يسار) ورسم تخطيطي مبسط (يمين)	48

	الفصل الرابع : مناقشة النتائج	
الشكلIII .1	صورة توضح شكل العينة قبل وبعد الغمر في محلول أزرق المثيلين	51
الشكلIII .2	تمثيل بياني يوضح مردود التصفية (أ) والتركيز (ب)	52
الشكلIII .3	صور توضح طرق التصفية	52
الشكلIII .4	منحنى بياني يوضح قيم التركيز للمركب 3 قبل وبعد الغسل	53
الشكلIII .5	تمثيل بياني يوضح نسبة الامتصاص للمركب 1 و 3	53
الشكل III .6	تمثيل بياني يوضح عينات من البوليمار في الأوساط الحامضية في H_2SO_4 HCl	55
الشكلIII .7	عينات من البوليمار في الأوساط الحامضية	55

قائمة الجداول

الرقم	العنوان	الصفحة
	الباب النظري	
	الفصل الثاني : المواد المركبة من المبلمر والألياف النباتية	
الجدولII .1	**تصنيف المواد المركبة المدعمة بالألياف حسب اتجاه وترتيب الألياف داخل المصفوفة البوليمرية**	28
	الباب العملي	
	الفصل الثالث : المنهجية التجريبية	
الجدول III.1	**تركيب الأغشية المركبة المختلفة المحضرة**	46

ملخص الدراسة

ملخص:

يتمحور هذا العمل حول كيفية تثمين بعض المخلفات الزراعية وذلك بجعلها مادة يمكن استغلالها في صناعة او تحضير مواد مركبة من مصفوفات المبلمرات وخاصة الشائعة منها كالبولي ايثيلين ، البولي بروبولين او البولي كلورير الفينيل... الخ.

اخضاع عينات من هذه المواد المركبة لبعض التحاليل والتشخيص يمكننا من اخذ الفكرة حول عدد من الخصائص التي تتميز بها مما يعطينا نظرة اولية عن المجالات التي يمكن استعمالها فيها ونخص بالذكر على سبيل المثال: العزل الحراري والصوتي، التغليف، معالجة المياه الصناعية ... الخ

وتكمن أهمية تثمين المخلفات الزراعية من خلال استغلالها في تصنيع المواد المركبة البوليمرية توجهًا واعدًا لتحقيق التنمية ، إذ تُستخدم الألياف الطبيعية المستخلصة من مخلفات مثل قش القمح وألياف النخيل وقشور الأرز كمواد تدعيم للمبلمرات بهدف تحسين خصائصها الميكانيكية وتقليل تكلفتها.

حيث توصلنا الى أن هذا النهج يحد من التلوث الناتج عن تراكم أو حرق المخلفات الزراعية ، مع توفير مواد خفيفة الوزن وصديقة للبيئة وإمكانية توظيف هذه المواد المركبة في مجالات متعددة ،. كما تمثل هذه التطبيقات قيمة مضافة للمخلفات الزراعية وتعزز الاستفادة من الموارد المتجددة في إنتاج مواد ذات أداء تقني واقتصادي جيد.

الكلمات المفتاحية : المبلمرات ، المخلفات الزراعية ، المواد المركبة ، تثمين المواد ، المواد البيئية.

Abstract:

This work focuses on the valorization of agricultural residues by transforming them into useful raw materials that can be exploited in the manufacture and preparation of polymer-matrix composites, particularly those based on widely used polymers such as polyethylene (PE), polypropylene (PP), and polyvinyl chloride (PVC).

The characterization and analysis of these composite materials provide valuable insights into their physical, mechanical, and functional properties, thereby offering a preliminary assessment of their potential fields of application. These applications include, but are not limited to, thermal and acoustic insulation, packaging, and industrial wastewater treatment.

The valorization of agricultural residues through their incorporation into polymer composite materials represents a promising approach toward sustainable development. Natural fibers extracted from agricultural wastes such as wheat straw, palm fibers, and rice husks can be used as reinforcing agents for polymers in order to improve their mechanical performance while reducing production costs.

The results indicate that this approach contributes to reducing environmental pollution caused by the accumulation or open-field burning of agricultural residues, while simultaneously providing lightweight and environmentally friendly materials. Furthermore, these composites can be employed in a wide range of applications and offer significant added value to agricultural waste, thereby promoting the efficient utilization of renewable resources for the production of materials with satisfactory technical and economic performance.

Keywords: Polymers, Agricultural Residues, Composite Materials, Material Valorization, Eco-Friendly Materials.

مقدمة عامة

مقدمة عامة

شهدت المواد البوليمرية تطورًا ملحوظًا خلال القرن العشرين ، حيث أصبحت عنصرًا أساسيًا في مختلف المجالات الصناعية بفضل تنوع خصائصها الفيزيائية والكيميائية وسهولة تشكيلها وتكلفتها الاقتصادية المناسبة وقد أتاح التقدم في تقنيات البلمرة إمكانية تصميم مواد بخصائص ميكانيكية وحرارية وكيميائية قابلة للتكيّف وفق متطلبات التطبيقات المختلفة ، مما وسّع نطاق استخدامها ليشمل مجالات التغليف ، البناء، الطب ، النقل والصناعات الهندسية المتقدمة.

غير أن الاعتماد المكثف على البوليمرات المشتقة من الموارد الأحفورية (بترول, غاز) أفرز تحديات بيئية متزايدة ، أبرزها تراكم النفايات البلاستيكية وصعوبة تحللها إلى جانب الانبعاثات الكربونية المرتبطة بعمليات الإنتاج، وفي هذا السياق برز توجه علمي متنامٍ نحو تطوير بدائل مستدامة تعتمد على الموارد المتجددة، خاصة المخلفات النباتية الناتجة عن الأنشطة الزراعية والصناعات التحويلية.

تتميز هذه المخلفات بغناها بالمركبات الليغنوسليلوزية ، مثل السليلوز والهيميسليلوز واللجنين ، مما يجعلها موردًا واعدًا لإنتاج مواد ذات قيمة مضافة لاسيما في مجال المواد المركبة الحيوية ، وفي ظل التوجه نحو تطوير مواد هندسية تجمع بين الأداء العالي والاستدامة البيئية ، حظيت المواد المركبة المدعمة بالألياف النباتية باهتمام متزايد , وتتكون هذه المواد من مصفوفة بوليمرية تعمل كطور مستمر ، مدعمة بألياف طبيعية تؤدي دور التقوية ، حيث يسهم التفاعل بين المكونين في تحسين الخصائص الميكانيكية والبنيوية مقارنة بالبوليمر النقي ، وتعود أهمية هذه المواد إلى انخفاض كثافتها وتوفر مصادرها وقابليتها للتحلل فضلًا عن إمكانية استخدامها كبديل جزئي للألياف الصناعية في عدة تطبيقات .

حيث تهدف هذه الدراسة إلى إبراز الفائدة والأهمية المتزايدة لتثمين المخلفات الزراعية من خلال استغلالها كمادة أولية في تصنيع المواد المركبة المعتمدة على المبلمرات ، وذلك في إطار تحقيق الاستفادة المثلى من الموارد المتاحة والحد من الآثار البيئية السلبية الناجمة عن تراكم هذه المخلفات أو التخلص منها بطرق تقليدية كالحرق والطمر, كما تسعى الدراسة إلى توضيح الدور الذي يمكن أن تؤديه الألياف والجسيمات المستخلصة من المخلفات الزراعية في تحسين بعض الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للمواد المركبة ، مع المساهمة في خفض تكاليف الإنتاج وتقليل الاعتماد على المواد التقليدية غير المتجددة.

وتتناول الدراسة كذلك مختلف الجوانب المرتبطة بعمليات معالجة هذه المخلفات وإدماجها داخل المصفوفات البوليمرية ، مع تقييم أدائها ومدى ملاءمتها للاستخدامات الصناعية المختلفة , إضافة إلى ذلك ، سيتم استعراض مجموعة من التطبيقات الممكنة لهذه المواد المركبة في مجالات متعددة مثل البناء

والتشييد ، وصناعة الأثاث ، والتغليف ، وقطاع السيارات ، والمنتجات الاستهلاكية المختلفة ، مما يبرز دورها في دعم مبادئ الاقتصاد الدائري والتنمية المستدامة , كما تهدف الدراسة إلى تسليط الضوء على الإمكانات المستقبلية لهذه التقنية باعتبارها حلاً مبتكراً يجمع بين المحافظة على البيئة وتحقيق قيمة اقتصادية مضافة للمخلفات الزراعية التي كانت تُعد سابقاً نفايات عديمة الفائدة .

وينقسم بحثنا هذا إلى أربعة محاور بالاضافة الى مقدمة وخاتمة عامتين :

المحور الأول: نتناول فيه مفاهيم حول المبلمرات والمخلفات النباتية اما المحور الثاني فسنتطرق فيه إلى المواد المركبة من المبلمر والألياف النباتية في حين ان المحور الثالث يتناول بالشرح المنهجية التجريبية ومختلف الطرق الفيزيائية والكيميائية لدراسة الخصائص بينما يعرض في المحور الرابع النتائج المتحصل عليها مع المناقشة والتفسير.

الـبـاب الـنـظري

الفصل الأول :

مفاهيم حول المبلمرات والمخلفات النباتية

I .1 . نبذة تاريخية حول تطور علم المبلمرات :

يُعد علم البوليمرات أحد الفروع الحديثة في الكيمياء التي شهدت تطورًا كبيرًا خلال القرنين التاسع عشر والعشرين ، ويتضمن دراسة المواد الكبيرة (Macromolecules) المكوّنة من سلاسل طويلة من الوحدات المتكررة حيث بدأت بدايات هذا العلم منذ القرن التاسع عشر ، حين قام الكيميائيون الأوائل بتحضير مشتقات من السليلوز الطبيعي ، وهو بوليمر طبيعي يتكوّن في النباتات. في ثلاثينيات القرن التاسع عشر ، أنتج هنري براكونو وبعض زملائه مشتقات السليلوز مثل السيلولوز الإيثيري ، والتي تعد من أوائل المواد شبه الصناعية التي استُخدمت لصناعة المواد ذات الخواص البلاستيكية [1] .

في أواخر القرن التاسع عشر، أدّت تجارب فلكنة المطاط الطبيعي إلى تطوير مطاط أكثر مرونة وصلابة، وهو ما ساعد في توسّع استخدام المواد البوليمرية في التطبيقات الصناعية الأولى. ومع حلول بداية القرن العشرين، ظهرت أولى البوليمرات الاصطناعية بالكامل، وكان من أهمها الباكلايت الذي اخترعه ليو بايكيلاند عام 1907، وهو راتنج فينولي قابل للتشكيل الحراري ويُعد من المواد العاملة التي مهدت الطريق لصناعة البلاستيك الحديث [2].

أما التحوّل النظري الحاسم في فهم البوليمرات فقد حدث في عام 1920 ، عندما اقترح الكيميائي الألماني هيرمان ستودينجر أن المواد البوليمرية ليست مجرد خليط من الجزيئات الصغيرة مرتبطة بقوى غير معروفة ، بل هي سلاسل جزيئية طويلة مرتبطة بروابط تساهمية. وقد شكّكت نظريته في النموذج السائد آنذاك ، لكنها أصبحت الأساس العلمي المعترف به لكيمياء البوليمرات الحديثة ، وساهمت بشكل كبير في إدخال هذا الفرع ضمن اهتمامات الكيمياء المولكولية والصناعية [3].

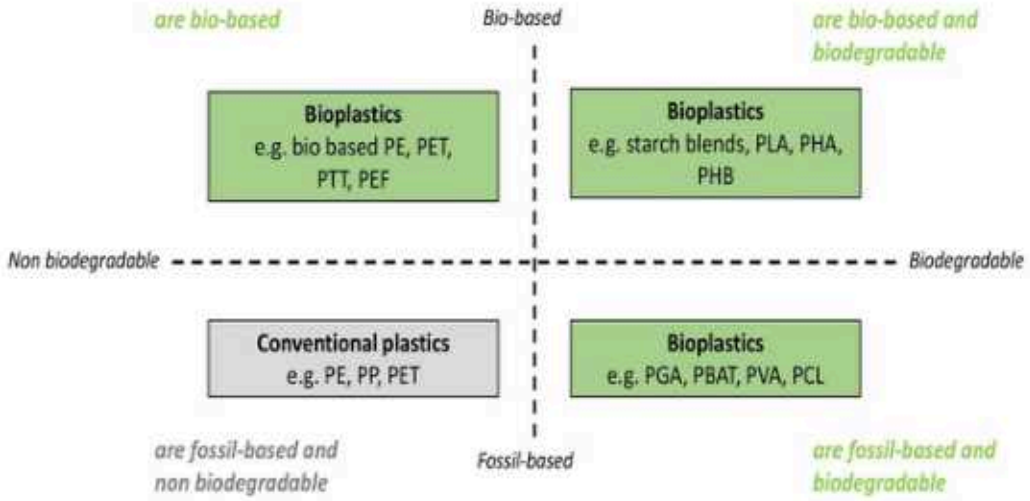
خلال العقدين الثالث والرابع من القرن العشرين ، شهد علم البوليمرات وتطبيقاته الصناعية توسعًا كبيرًا ، حيث طُوّرت أنواع جديدة من البوليمرات الصناعية مثل البولي فينيل كلوريد (PVC) والبولي إيثيلين

والبوليسترين .كما ساهمت الأبحاث في تطوير الألياف الاصطناعية مثل النايلون الذي ظهر في الثلاثينيات، مما أحدث ثورة في صناعة النسيج والمواد الهندسية [4].

منذ منتصف القرن العشرين وحتى اليوم ، تطوّر علم البوليمرات ليشمل مجموعة واسعة من المواد والأنظمة ، بما في ذلك البوليمرات الحيوية القابلة للتحلل والبوليمرات الذكية والمواد المركّبة المعزّزة بالألياف ، والتي أصبحت أساسًا لتطبيقات متعددة في الصناعات المختلفة مثل الطب ، التغليف ، الكهرباء ، والهندسة وقد دفع الاهتمام بالقضايا البيئية والاقتصادية البحث الحالي نحو تطوير بوليمرات مستدامة تعتمد على مصادر متجددة بدل المصادر البترولية التقليدية [5].

I . 2. أنواع المبلمرات ومصادرها :

تنقسم البوليمرات من حيث مصادرها إلى بوليمرات طبيعية ، وبوليمرات شبه اصطناعية ، وبوليمرات اصطناعية ، ويعتمد هذا التصنيف على أصل المادة الخام وطريقة الحصول عليها. يُعد هذا التصنيف أساسيًا لفهم خصائص البوليمرات وتطبيقاتها الصناعية والبيئية[6].



الشكل I .1 : تصنيف البوليمرات حسب مصدرها وقابليتها للتحلل الحيوي[7]

I .2. 1 . البوليمرات الطبيعية (Natural Polymers)

البوليمرات الطبيعية هي مواد بوليمرية موجودة في الطبيعة دون تدخل صناعي ، وتنتجها الكائنات الحية النباتية أو الحيوانية من أهم أمثلتها السليلوز، النشاء ، اللجنين ، البروتينات ، والمطاط الطبيعي .يُعد السليلوز أكثر البوليمرات الطبيعية وفرة على سطح الأرض، ويوجد أساسًا في جدران الخلايا النباتية ، بينما يُستخرج النشاء من النباتات مثل الذرة والبطاطا , تتميز البوليمرات الطبيعية بقابليتها للتحلل الحيوي وصداقة البيئة، إلا أن خصائصها الميكانيكية والحرارية تكون محدودة مقارنة بالبوليمرات الاصطناعية ، مما يستدعي أحيانًا تعديلها أو دمجها في مواد مركبة [8].

I .2. 2 . البوليمرات شبه الاصطناعية :

تُحضَّر البوليمرات شبه الاصطناعية انطلاقًا من بوليمرات طبيعية بعد إخضاعها لتعديلات كيميائية بهدف تحسين خواصها الفيزيائية أو الكيميائية. من أشهر أمثلتها أسيتات السليلوز، نترات السليلوز، والرايون . تعتمد مصادر هذا النوع من البوليمرات أساسًا على المواد النباتية، خاصة السليلوز المستخرج من الخشب أو القطن. تتميز هذه البوليمرات بتوازن نسبي بين الأداء الصناعي والطابع البيئي، وقد استُخدمت تاريخيًا في صناعة الأفلام ، الألياف، والمواد البلاستيكية الأولى[9].

I .3.2. البوليمرات الاصطناعية :

البوليمرات الاصطناعية هي مواد تُحضَّر كليًا بطرق صناعية انطلاقًا من مونومرات مشتقة غالبًا من الموارد البترولية أو الغاز الطبيعي .من أمثلتها البولي إيثيلين(PE) ، البولي بروبيلين (PP) ، البولي فينيل كلوريد(PVC) ، البوليسترين(PS) ، والنايلون .تمتاز هذه البوليمرات بخصائص ميكانيكية وحرارية عالية ، وسهولة التحكم في بنيتها أثناء التصنيع، ما جعلها واسعة الاستخدام في مجالات التغليف ، البناء ، النقل ،

والصناعات الهندسية , غير أن اعتمادها على مصادر غير متجددة وصعوبة تحللها بيئيًا يمثلان تحديًا كبيرًا . [10]

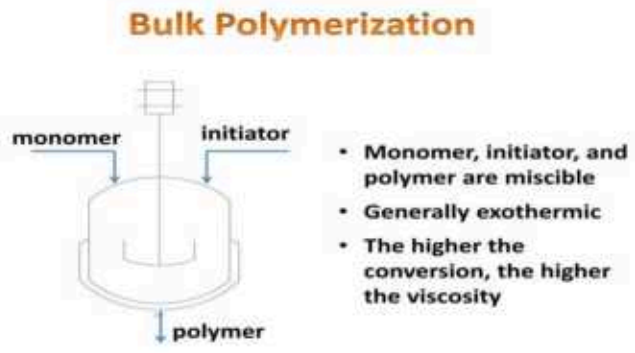
I .4.2. البوليمرات الحيوية :

ظهر هذا الصنف استجابةً للتحديات البيئية المرتبطة بالبوليمرات التقليدية ، حيث يتم إنتاج البوليمرات الحيوية إما من مصادر متجددة أو تكون قابلة للتحلل الحيوي .من أمثلتها حمض البولي لاكتيك(PLA) ، والبولي هيدروكسي ألكانوات (PHA) تعتمد مصادر هذه البوليمرات على الكتلة الحيوية مثل النشاء ، السكر، أو المخلفات الزراعية. تمثل البوليمرات الحيوية اتجاهًا حديثًا نحو الاستدامة وتقليل الاعتماد على الموارد الأحفورية .[11]

I .3 . الطرق الصناعية للحصول على المبلمرات :

I .3 . 1 . البلمرة في الكتلة (Bulk polymerization)

تُعد البلمرة في الكتلة من أبسط الطرق الصناعية لإنتاج البوليمرات ، ويبيّن الشكل الآتي آلية تنفيذها داخل المفاعل.



الشكل I .2 : مخطط مبسط لعملية البلمرة في الكتلة داخل مفاعل مزوّد بنظام تحريك

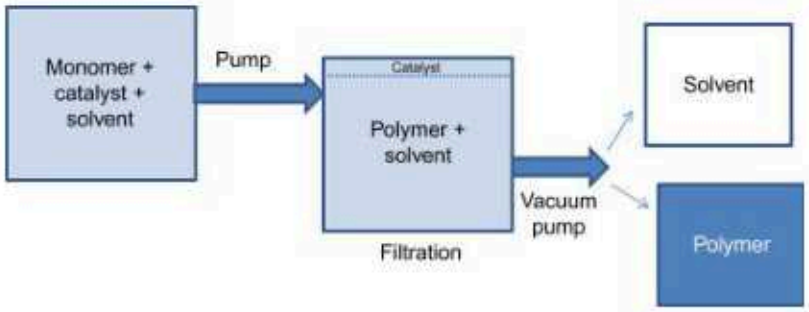
البلمرة في الكتلة (Bulk Polymerization) هي طريقة صناعية تُجرى فيها البلمرة باستعمال **المونومر وحده تقريبًا** مع البادئ Initiator و/أو محفّز Catalyst ، وأحيانًا مُنظّم للسلسلة Chain transfer agent) **من دون مذيب** و تبدأ العملية عادة بمرحلة بدء (Initiation) ثم نمو السلسلة (Propagation) ثم الإنهاء (Termination) حسب آلية البلمرة (جذرية/أيونية/تناسقية) ، لكن الأكثر شيوعًا صناعيًا في الكتلة هو **البدء الجذري** لبعض المونومرات مثل الستايرين والميثيل ميثاكريلات[10].

تواجه البلمرة في الكتلة تحديًا هندسيًا رئيسيًا في **إزالة الحرارة** ومع تقدم التحول ترتفع لزوجة الوسط بسرعة لأن البوليمر المتكوّن يزيد من سماكة المزيج ، فتضعف عملية الخلط وانتقال الحرارة ، ما قد يسبب ارتفاعًا حراريًا موضعيًا (Hot spots) وخطر الهروب الحراري (Runaway) كذلك قد تظهر ظاهرة **تأثير الجِل/تأثير ترومسدورف (Trommsdorff or Gel effect)** , لذلك تُستخدم تقنيات تشغيلية للتغلب على ذلك مثل : التشغيل على مراحل (Staged polymerization) أو الاعتماد على أنظمة مستمرة مع تحكم حراري صارم [6 , 10].

تُستعمل البلمرة في الكتلة لإنتاج بوليمرات مهمة عندما تكون النقاوة والشفافية مطلوبة و من الأمثلة الشائعة **PMMA** (الأكريليك) الذي يُحضّر كثيرًا بالكتلة للحصول على صفائح شفافة ، وكذلك بعض درجات **PS** (البوليسترين) وبشكل عام تُفضَّل هذه الطريقة عندما تكون كلفة الفصل من المذيب أو الماء مرتفعة ، أو عندما يكون المنتج النهائي حساسًا لبقايا المذيبات ، مع ضرورة تصميم المفاعل والتحكم الحراري والخلط لتفادي مشكلات اللزوجة والحرارة [10 , 12].

I . 3 . 2 . البلمرة في المحلول (Solution polymerization)

تعتمد البلمرة في المحلول على إجراء التفاعل في وسط يحتوي على مذيب مناسب لتحسين التحكم الحراري ، كما يوضحه المخطط الصناعي التالي.



الشكل I . 3 : مخطط صناعي لعملية البلمرة في المحلول مع مرحلة فصل البوليمر واسترجاع المذيب

البلمرة في المحلول هي طريقة صناعية يتم فيها إجراء تفاعل البلمرة في وجود مذيب مناسب يذيب كلًا من المونومر والبادئ , وأحيانًا البوليمر الناتج أيضًا يهدف استخدام المذيب إلى تحسين التحكم الحراري وتقليل لزوجة الوسط التفاعلي ، مما يسهل عملية الخلط وانتقال الحرارة داخل المفاعل و تُعد هذه الطريقة مناسبة خاصةً للتفاعلات التي تكون فيها البلمرة في الكتلة صعبة التحكم بسبب ارتفاع اللزوجة أو مخاطر الهروب الحراري [10].

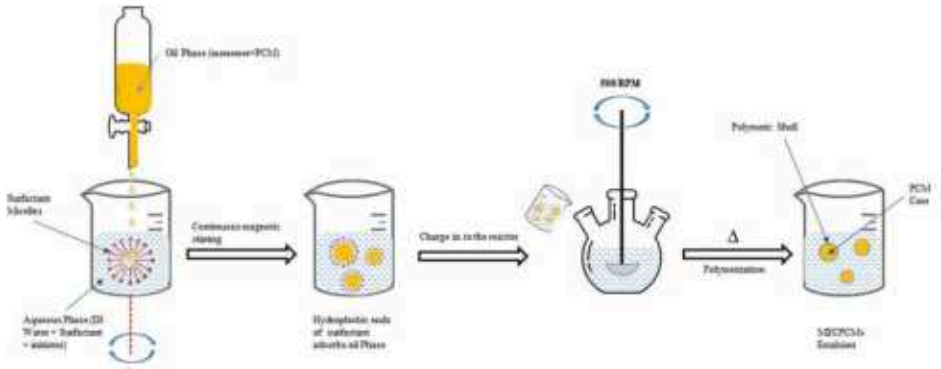
من الناحية التشغيلية ، يُضاف المونومر والبادئ إلى المذيب داخل مفاعل مزوّد بنظام تحريك وتبريد ، وتُجرى العملية غالبًا تحت ضغط ودرجة حرارة محكومين. وبما أن المذيب يعمل كوسيط ناقل للحرارة ، فإن إزالة الحرارة الناتجة عن التفاعل الطارد للحرارة تكون أكثر كفاءة مقارنة بالبلمرة في الكتلة. كما أن انخفاض اللزوجة يحافظ على تجانس الوسط حتى عند نسب تحويل مرتفعة [6].

إلا أن وجود المذيب يؤثر على آلية البلمرة وخصائص البوليمر الناتج , فقد يؤدي إلى انخفاض الوزن الجزيئي بسبب حدوث تفاعلات نقل السلسلة (Chain transfer to solvent) ، مما يحد من نمو السلاسل البوليمرية , لذلك يجب اختيار المذيب بعناية بحيث يكون خاملاً كيميائيًا قدر الإمكان ولا يشارك في التفاعل [10].

تُستخدم هذه الطريقة صناعيًا في إنتاج العديد من البوليمرات مثل البولي أكريلات ، بعض أنواع المطاط الصناعي ، والراتنجات الخاصة .بعد انتهاء التفاعل، يتطلب الأمر مرحلة فصل لإزالة المذيب ، سواء بالتبخير أو التقطير، مما يزيد من التكلفة التشغيلية مقارنة بالبلمرة في الكتلة. ومع ذلك، فإن سهولة التحكم الحراري تجعلها خيارًا مفضلًا في بعض التطبيقات الحساسة [12]

I . 3 . 3 . البلمرة بالمستحلب (Emulsion polymerization)

يوضح الشكل التالي تطبيقًا عمليًا للبلمرة بالمستحلب في تحضير جسيمات مغلفة من نوع نواة–غلاف.



الشكل I .4 : مخطط تخطيطي لعملية البلمرة بالمستحلب في تحضير جسيمات نواة–غلاف (Core–Shell).

البلمرة بالمستحلب هي طريقة صناعية تُجرى فيها عملية البلمرة داخل وسط مائي يحتوي على مونومر غير قابل للذوبان في الماء ، إضافةً إلى عامل استحلاب (Surfactant) وبادئ تفاعل قابل للذوبان في الطور المائي. يتكوّن نظام ثنائي الطور حيث يُوزَّع المونومر على شكل قطرات دقيقة داخل الماء ، بينما

تتشكل مذيلات (Micelles) بفضل عامل الاستحلاب ، وتحدث البلمرة فعليًا داخل هذه المذيلات , تُعد هذه الطريقة من أهم التقنيات الصناعية لإنتاج اللاتكس والبوليمرات ذات الكتلة الجزيئية العالية [10].

تبدأ العملية بإذابة عامل الاستحلاب في الماء لتكوين مذيلات مستقرة ، ثم يُضاف المونومر الذي يتوزع بين القطرات والمذيلات. بعد إضافة البادئ القابل للذوبان في الماء (مثل بيروكسيدات أو أملاح البيرسلفات) ، تتولد الجذور الحرة في الطور المائي وتهاجر إلى المذيلات المحتوية على المونومر، حيث تبدأ عملية نمو السلسلة البوليمرية ومع تقدم التفاعل ، تتشكل جسيمات بوليمرية مستقرة في الوسط المائي تُعرف باسم لاتكس (Latex particles) [6, 10]

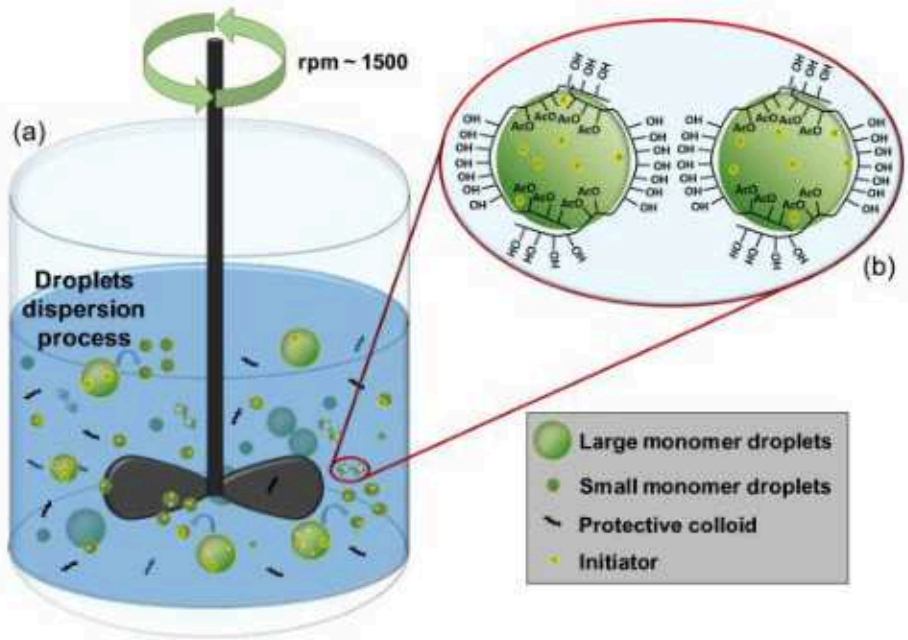
تتميز البلمرة بالمستحلب بعدة مزايا صناعية مهمة ، منها :

- كفاءة عالية في إزالة الحرارة بسبب وجود الماء كوسط ناقل للحرارة .
- إمكانية الحصول على أوزان جزيئية مرتفعة مع معدلات بلمرة عالية .
- لزوجة منخفضة نسبيًا رغم ارتفاع نسبة التحول، مما يسهل التشغيل الصناعي .
- إنتاج مباشر لمستحلب بوليمري يمكن استخدامه دون الحاجة إلى فصل كامل للبوليمر في بعض التطبيقات (مثل الدهانات والمواد اللاصقة) [6].

إلا أن لهذه الطريقة بعض التحديات، أهمها ضرورة إزالة بقايا عامل الاستحلاب في بعض التطبيقات الحساسة ، بالإضافة إلى تعقيد النظام الحركي مقارنة بالبلمرة في الكتلة أو المحلول , وتُستخدم هذه التقنية صناعيًا في إنتاج بوليمرات مثل البولي ستايرين، البولي أكريلات، مطاط الستايرين–بوتادايين (SBR) ، واللاتكس الصناعي [12].

I . 3 . 4 . البلمرة بالتعليق (Suspension polymerization)

تعتمد البلمرة بالتعليق على تشتيت المونومر في وسط مائي باستعمال التحريك ومواد مثبتة، حيث تتم عملية البلمرة داخل القطرات المعلقة كما هو موضح في الشكل التالي



الشكل I .5 : مخطط تخطيطي لعملية البلمرة بالتعليق وتكوّن حبيبات البوليمر داخل الطور المائي

البلمرة بالتعليق هي طريقة صناعية يتم فيها تشتيت المونومر غير القابل للذوبان في الماء على شكل قطرات كبيرة نسبيًا داخل وسط مائي باستعمال مواد مُثبِّتة (Stabilizers) أو عوامل تعليق ، بينما يكون البادئ (Initiator) قابلًا للذوبان في المونومر نفسه. تُجرى العملية داخل مفاعل مزوّد بنظام تحريك قوي يحافظ على توزيع القطرات ومنع تكتلها. وتُعرف هذه الطريقة أحيانًا باسم البلمرة الحبيبية (Bead polymerization)لأن البوليمر الناتج يتشكل على هيئة حبيبات صلبة [10] .

في هذه التقنية ، يعمل الماء كوسط ناقل للحرارة فقط ، دون أن يشارك فعليًا في التفاعل الكيميائي. يحدث التفاعل داخل كل قطرة مونومر بشكل مستقل تقريبًا، بحيث تمثل كل قطرة "مفاعلًا صغيرًا". ومع تقدم التفاعل ، تتحول القطرات تدريجيًا إلى جسيمات بوليمرية صلبة وبسبب وجود الماء كطور مستمر ،

تكون عملية إزالة الحرارة أكثر كفاءة مقارنة بالبلمرة في الكتلة، كما تبقى اللزوجة الكلية للنظام منخفضة نسبيًا ، مما يسهل التشغيل الصناعي.[6, 10]

تتميز البلمرة بالتعليق بعدة مزايا، منها :

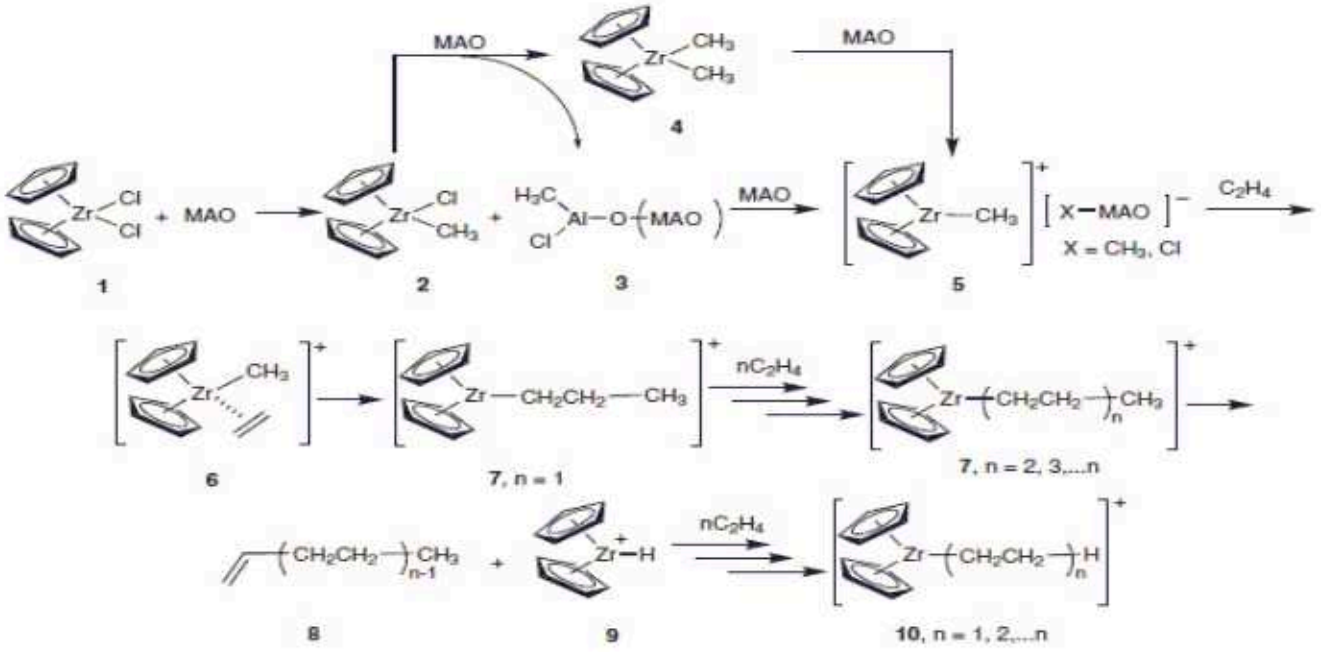
- سهولة التحكم في درجة الحرارة .
- إنتاج مباشر لحبيبات بوليمرية سهلة الفصل بالترشيح .
- تقليل مخاطر ارتفاع اللزوجة والهروب الحراري .
- نقاوة جيدة للمنتج مقارنة بالبلمرة بالمستحلب (لأن كمية المواد الفعالة السطحية أقل).

ومع ذلك ، تتطلب هذه الطريقة تحكمًا دقيقًا في سرعة التحريك وحجم القطرات ، لأن توزيع حجم الجسيمات النهائية يعتمد بشكل مباشر على ظروف الخلط [6]

تُستخدم هذه التقنية صناعيًا على نطاق واسع في إنتاج البولي فينيل كلوريد (PVC) ، وبعض أنواع البولي ستايرين (PS) والراتنجات الحبيبية وتُعد من أكثر الطرق شيوعًا عندما يكون الهدف إنتاج بوليمر على شكل حبيبات جاهزة للمعالجة اللاحقة [12]

I . 3 . 5 . البلمرة التنسيقية (Ziegler–Natta catalysts)

تعتمد البلمرة التنسيقية على آلية إدراج المونومر في رابطة فلز–كربون عند المركز الفعال للمحفز، كما يوضحه الشكل التالي.



الشكل I .6 : آلية الإدراج في البلمرة التنسيقية باستخدام محفزات زيجلر–ناتا

البلمرة التنسيقية هي طريقة صناعية تعتمد على استخدام محفزات خاصة تُعرف بمحفزات زيجلر–ناتا (Ziegler–Natta catalysts)لإنتاج بوليمرات ذات بنية منتظمة عالية الترتيب stereoregular) polymers). طُوِّرت هذه التقنية في خمسينيات القرن العشرين على يد العالمين كارل زيجلر وجوليو ناتا ، ومكّنتهما من التحكم في البنية الفراغية للسلسلة البوليمرية ، وهو إنجاز منحهما جائزة نوبل في الكيمياء عام 1963 [10].

تعتمد هذه البلمرة على محفزات مكوّنة عادةً من مركب فلز انتقالي)مثل $TiCl_4$ أو ($TiCl_3$ مع مركبات ألومنيوم عضوية)مثل .($Al(C_2H_5)_3$ يحدث التفاعل عبر آلية تنسيقية حيث يرتبط المونومر (غالبًا أوليفين مثل الإيثيلين أو البروبلين) بمركز الفلز ، ثم يُدرج داخل الرابطة بين الفلز والسلسلة النامية ، فيما يُعرف بآلية الإدراج (Insertion mechanism) تسمح هذه الآلية بالحصول على بوليمرات ذات توزيع جزيئي مضبوط وبنية بلورية منتظمة ، مثل البولي إيثيلين عالي الكثافة (HDPE) والبولي بروبيلين المتناظر Isotactic) .[6, 10].

تتميز البلمرة التنسيقية بعدة مزايا صناعية مهمة ، منها :

- إنتاج بوليمرات ذات خصائص ميكانيكية عالية .
- التحكم في البنية الفراغية (Tacticity) .
- كفاءة عالية في استهلاك المونومر .
- إمكانية التشغيل في ظروف ضغط وحرارة معتدلة مقارنة ببعض الطرق الأخرى .

كما أن هذه التقنية تمثل الأساس الصناعي لإنتاج كميات ضخمة من البوليمرات المستخدمة في التغليف ، الأنابيب ، الصناعات البلاستيكية ، وقطع السيارات [10] .

من الناحية الصناعية ، تُجرى العملية غالبًا في مفاعلات طور غازي (Gas-phase reactors) أو في وسط معلق (Slurry reactors) ، ويعتمد اختيار النظام على نوع البوليمر المطلوب وخصائصه النهائية وقد تطورت لاحقًا محفزات أحدث مثل محفزات الميتالوسين (Metallocene catalysts) التي تسمح بتحكم أدق في البنية الجزيئية [13].

I .4 . استعمالات البوليمرات وتأثيراتها البيئية :

تُعدّ البوليمرات من المواد الأساسية في مختلف القطاعات الصناعية المعاصرة لما تتميز به من خفة الوزن ، وسهولة التشكيل ، ومقاومة العوامل الكيميائية والفيزيائية ، إضافة إلى إمكانية تعديل بنيتها للحصول على خصائص محددة تناسب التطبيق المطلوب فقد أصبح استخدامها واسع الانتشار في مجالات التعبئة والتغليف، والبناء ، والصناعات الكهربائية ، وقطاع النقل ، وكذلك في المجال الطبي حيث تُستعمل في الأجهزة ذات الاستعمال الواحد والمستلزمات الجراحية والأطراف الصناعية ويرجع هذا الانتشار إلى قدرتها على الجمع

بين الأداء الجيد والكلفة الاقتصادية المقبولة ، مما جعلها بديلاً عمليًا للعديد من المواد التقليدية كالزجاج والمعادن في عدد كبير من التطبيقات الصناعية والهندسية. [14, 15]

غير أن هذا التوسع الكبير في إنتاج البوليمرات، خاصة تلك المشتقة من الموارد الأحفورية ، أدى إلى بروز تحديات بيئية متزايدة ، من أبرزها تراكم النفايات البلاستيكية نتيجة بطء تحللها الطبيعي ، وما يرافق ذلك من تلوث للأنظمة البرية والبحرية، كما أن عمليات تصنيعها واستهلاكها ترتبط بانبعاثات كربونية واستهلاك مرتفع للطاقة، إضافة إلى احتمال تحرر بعض المضافات الكيميائية في البيئة. وقد دفع ذلك إلى تكثيف البحث نحو تطوير بدائل أكثر استدامة، مثل البوليمرات الحيوية والمواد المركبة المعتمدة على مصادر متجددة ، بهدف تقليل الأثر البيئي وتعزيز مبادئ الاقتصاد الدائري دون الإخلال بالمتطلبات التقنية والصناعية. [11, 16]

I . 5 . مصادر المخلفات النباتية :

تنتج المخلفات النباتية أساسًا عن الأنشطة الزراعية بمختلف أنواعها، سواء خلال مراحل الزراعة أو الحصاد أو ما بعد الحصاد. وتشمل هذه المخلفات بقايا المحاصيل الحقلية مثل قش القمح والشعير، تبن الأرز، سيقان الذرة، إضافة إلى مخلفات تقليم الأشجار المثمرة كنخيل التمر والزيتون والحمضيات. وتُعد هذه المخلفات ذات طبيعة ليغنوسليلوزية، إذ تتكون أساسًا من السليلوز والهيميسليلوز واللجنين، وهو ما يمنحها خصائص فيزيائية وكيميائية تجعلها قابلة للاستغلال في العديد من التطبيقات الصناعية ، خاصة في مجال إنتاج المواد المركبة والطاقة الحيوية والمواد الممتزة وقد أكدت عدة دراسات عربية أن هذه المخلفات تمثل موردًا متجددًا يمكن تثمينه بدل التخلص منه بالحرق أو الطمر. [17]

كما تسهم الصناعات الزراعية والغذائية في إنتاج كميات معتبرة من المخلفات النباتية ، مثل قشور الفواكه والخضروات ، بقايا عصر الزيتون، تفل التمور، ومخلفات تصنيع الحبوب وغالبًا ما تتراكم هذه المخلفات في مواسم معينة وبكميات كبيرة ، مما يؤدي إلى مشكلات بيئية في حال غياب أنظمة فعالة للإدارة والمعالجة. غير

أن الاتجاهات الحديثة في البحث العلمي العربي تؤكد أهمية استغلال هذه المخلفات ضمن إطار الاقتصاد الدائري، من خلال تحويلها إلى مواد ذات قيمة مضافة في الصناعات الكيميائية والهندسية ، خاصة في مجال المواد المركبة الحيوية. [18]

I .6. أنواع المخلفات الزراعية :

يمكن تصنيف المخلفات النباتية وفقًا لطبيعتها ومصدرها إلى عدة أنواع رئيسية ، أبرزها :

I .6. 1 . المخلفات الحقلية :

تشمل بقايا المحاصيل الزراعية الناتجة بعد الحصاد مثل قش القمح والشعير، سيقان الذرة، تبن الأرز، وبقايا عباد الشمس. وتتميز هذه المخلفات بكونها غنية بالمركبات الليغنوسليلوزية ، مما يجعلها مادة أولية مناسبة لإنتاج الطاقة الحيوية أو المواد المركبة أو الكربون النشط[17]

I . 6 .2. مخلفات الأشجار المثمرة :

فتتمثل في نواتج التقليم السنوي وبقايا الجذوع والأوراق ، إضافة إلى مخلفات النخيل والزيتون والحمضيات. وتُعد هذه المخلفات ذات أهمية خاصة في الدول الزراعية، حيث تنتج بكميات كبيرة سنويًا ، ويمكن تثمينها في إنتاج الألواح الخشبية الحيوية أو المواد المركبة المدعمة بالألياف الطبيعية.

I .6 .3. المخلفات النباتية :

وهي نواتج الصناعات الغذائية والتحويلية ، مثل قشور الفواكه والخضروات ، تفل الزيتون ، بقايا التمور، ومخلفات طحن الحبوب. وغالبًا ما تحتوي هذه المخلفات على نسب مرتفعة من المواد العضوية القابلة للتحلل ،

ما يجعلها ملائمة للاستخدام في عمليات التخمير، إنتاج السماد العضوي ، أو تحضير مواد ذات قيمة مضافة في الصناعات الكيميائية [19] .

هذا التصنيف يساعد في تحديد خصائص كل نوع وإمكانية استغلاله وفقًا لطبيعته الكيميائية والفيزيائية، وهو ما يشكل الأساس العلمي لعمليات التثمين الصناعي في مجال المواد المركبة الحيوية [18].

I .7. طرق معالجة المخلفات الزراعية :

تُعد معالجة المخلفات النباتية خطوة أساسية قبل إدماجها في التطبيقات الصناعية ، خاصة في مجال تصنيع المواد المركبة أو تحضير المواد البوليمرية الحيوية، ويمكن تصنيف طرق المعالجة إلى ثلاث فئات رئيسية : المعالجة الفيزيائية ، المعالجة الكيميائية ، والمعالجة البيولوجية ، ويعتمد اختيار الطريقة على طبيعة المخلفات والهدف من تثمينها [20] .

I .7. 1 . المعالجة الفيزيائية :

هي عمليات ميكانيكية تهدف إلى تحسين الخصائص الشكلية والحجمية للمادة مثل الطحن ، التجفيف ، الغربلة ، والفرم وتساعد هذه العمليات على تقليل حجم الجسيمات وزيادة المساحة السطحية ، مما يُحسّن من قابلية التفاعل أو الدمج داخل مصفوفة بوليمرية، كما أن التجفيف يُعد خطوة ضرورية لتقليل نسبة الرطوبة ، خصوصًا عند استخدام الألياف النباتية في المواد المركبة ، لأن وجود الماء يؤثر سلبًا على الالتصاق بين الألياف والمصفوفة البوليمرية. [20, 21]

I .7. 2. المعالجة الكيميائية :

تهدف إلى تعديل البنية السطحية والكيميائية للمخلفات النباتية خاصةً إزالة جزء من اللجنين والهيميسليلوز أو تنشيط المجموعات الوظيفية ومن أكثر الطرق استخدامًا المعالجة بالقلويات مثل (NaOH ، والمعالجة بالأحماض المخففة ، والأكسدة ، والأسيتلة .

I .7. 3 . المعالجة البيولوجية : تعتمد على استخدام الكائنات الدقيقة أو الإنزيمات لتفكيك بعض مكونات المخلفات النباتية بطريقة انتقائية وصديقة للبيئة. [22]

I . 8 . أهمية استغلال المخلفات الزراعية :

يمثل استغلال المخلفات النباتية توجهًا استراتيجيًا في إطار التنمية المستدامة، نظرًا لما توفره هذه المواد من إمكانات كبيرة للتحويل إلى منتجات ذات قيمة مضافة بدل التخلص منها بطرق تقليدية كالحرق أو الطمر فهذه المخلفات ، بفضل تركيبها الليغنوسليلوزي الغني بالسليلوز والهيميسليلوز واللجنين ، تشكل مادة أولية مناسبة لإنتاج المواد المركبة الحيوية ، والمواد الممتزة ، والوقود الحيوي ، إضافة إلى تطبيقات صناعية متعددة في المجال الكيميائي والهندسي. وقد بينت الدراسات أن تثمين هذه المخلفات يساهم في تقليل الاعتماد على الموارد الأحفورية ، ويعزز استخدام المواد المتجددة في الصناعات الحديثة ، خاصة في مجال البوليمرات الحيوية والمواد المركبة الصديقة للبيئة [20, 22].

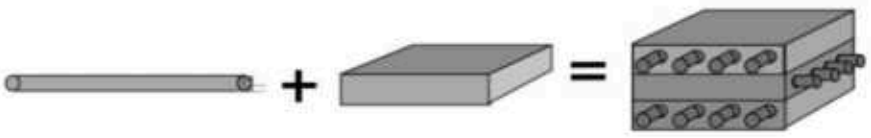
من جهة أخرى ، يساهم استغلال المخلفات النباتية في الحد من المشكلات البيئية الناتجة عن تراكمها ، مثل تلوث الهواء الناتج عن الحرق العشوائي أو انبعاث الغازات الدفيئة. كما يحقق بعدًا اقتصاديًا مهمًا من خلال خلق سلاسل قيمة جديدة في المناطق الزراعية، وتحويل النفايات إلى موارد صناعية قابلة للاستثمار. ويُعد هذا التوجه منسجمًا مع مبادئ الاقتصاد الدائري التي تقوم على إعادة إدماج المخلفات ضمن دورة الإنتاج بدل

اعتبارها عبئًا بيئيًا لذلك ، فإن تثمين المخلفات النباتية لا يُعد خيارًا بيئيًا فقط ، بل يمثل أيضًا ركيزة اقتصادية وتقنية لدعم الصناعات المستدامة ، خاصة في الدول ذات الطابع الزراعي. [20, 22]

الفصل الثاني : المواد المركبة من المبلمر والألياف النباتية

II . 1 . المواد المركبة، عموميات :

المواد المركبة هي مواد هندسية تتكون من اتحاد مادتين أو أكثر مختلفتين في الخصائص الفيزيائية أو الكيميائية ، يتم دمجهما على مستوى مجهري بطريقة مدروسة بحيث تحتفظ كل مادة بهويتها المميزة داخل البنية النهائية، ويؤدي هذا الدمج إلى الحصول على مادة ذات خصائص محسّنة تفوق خصائص كل مكون منفردًا بحيث تبقى كل مرحلة متميزة وموزعة داخل البنية النهائية دون أن تفقد هويتها عادةً ما تتكوّن المادة المركبة من طور مستمر يُسمى المصفوفة (Matrix) يحيط بطور آخر يُسمى مادة التدعيم (Reinforcement)، والذي قد يكون على شكل ألياف أو جسيمات أو رقائق يهدف هذا الدمج إلى تحسين الخواص الميكانيكية , إضافة إلى تحسين الخصائص الحرارية والكهربائية ومقاومة التآكل، ومن الخصائص المميزة للمواد المركبة الخصائص الفردية للأجزاء المكونة لها وتُصمم المواد المركبة بحيث تلبي المتطلبات للاستخدام في التطبيقات المختلفة مثل : هياكل السيارات، الطائرات، البناء، الصناعات البحرية [25][9].[23].[26].



Fiber/Filament Reinforcement	Matrix	Composite
• High strength • High stiffness • Low density	• Good shear properties • Low density	• High strength • High stiffness • Good shear properties • Low density

الشكل II . 1: تمثيل تخطيطي لبنية المادة المركبة المدعمة بالألياف، يوضح اتحاد طور التقوية الليفي مع الطور المستمر (المصفوفة) لتكوين مادة ذات خصائص ميكانيكية محسّنة مثل مقاومة الشد والصلابة [24]

II .2 . أنواع المواد المركبة :

تتنوع المواد المركبة من المبلمر والألياف النباتية تبعًا لعدة معايير تصنيفية ترتبط بطبيعة المصفوفة البوليمرية ، وشكل الألياف ، وطولها ، واتجاه توزيعها داخل البنية ، إضافة إلى طريقة التحضير والمعالجة السطحية للألياف، هذا التنوع يسمح بالحصول على خصائص ميكانيكية وفيزيائية مختلفة تلائم متطلبات التطبيقات الصناعية المتعددة.

انطلاقًا من ذلك، يمكن تقسيم المواد المركبة البوليمرية المدعمة بالألياف النباتية إلى عدة أنواع رئيسية سيتم تناولها بالتفصيل تباعًا.

II .2. 1. النوع الأول : التصنيف حسب نوع المصفوفة البوليمرية :

يُعدّ التصنيف حسب **نوع المصفوفة البوليمرية (Polymer Matrix)** من أهم المعايير المعتمدة في دراسة المواد المركبة المدعمة بالألياف النباتية، وذلك لأن المصفوفة تمثل الطور المستمر الذي يحيط بالألياف وينقل الإجهادات إليها، كما تحميها من العوامل البيئية والرطوبة والتآكل [27]. وتنقسم هذه المواد المركبة أساسًا إلى نوعين رئيسيين: مركبات ذات مصفوفة لدنة حراريًا (Thermoplastic Composites) ومركبات ذات مصفوفة متصلدة حراريًا.(Thermoset Composites)

في المركبات ذات المصفوفة اللدنة حراريًا، تُستخدم بوليمرات مثل البولي بروبيلين (PP) والبولي إيثيلين (PE) والبولي لاكتيك أسيد .(PLA) تتميز هذه البوليمرات بإمكانية إعادة التشكيل عند التسخين دون حدوث تغير كيميائي في بنيتها، مما يسمح بإعادة التدوير وتقليل التأثير البيئي. كما تمتاز بسهولة المعالجة الصناعية مثل القولبة بالحقن والبثق. غير أن مقاومتها الحرارية محدودة مقارنة بالمركبات المتصلدة حراريًا وتُستخدم هذه الأنواع بكثرة في الصناعات الخفيفة مثل مكونات السيارات الداخلية وألواح التغليف.

أما المركبات ذات المصفوفة المتصلدة حراريًا، فتستعمل راتنجات مثل الإيبوكسي (Epoxy) والبوليستر غير المشبع .(Unsaturated Polyester) تتميز هذه المصفوفات بتشكل شبكة ثلاثية الأبعاد أثناء عملية التصلب، ما يمنح المادة المركبة صلابة عالية ومقاومة جيدة للحرارة والإجهادات الميكانيكية، غير أنها غير قابلة لإعادة التشكيل بعد التصلب، مما يجعل إعادة تدويرها أكثر تعقيدًا. وتستخدم هذه المركبات في التطبيقات الإنشائية والهندسية التي تتطلب مقاومة ميكانيكية عالية واستقرارًا حراريًا أفضل [27].

ويؤثر اختيار نوع المصفوفة بشكل مباشر على أداء المادة المركبة، حيث تتحكم في قابلية التشغيل، المتانة، مقاومة الرطوبة، والخصائص الحرارية. كما أن التوافق بين الألياف النباتية ذات الطبيعة المحبة للماء والمصفوفات البوليمرية ذات الطبيعة الكارهة للماء يمثل تحديًا تقنيًا يتطلب أحيانًا معالجة سطحية للألياف أو استخدام مواد ربط (Compatibilizers) لتحسين الالتصاق البيني. لذلك، يُعدّ تصنيف المواد المركبة حسب نوع المصفوفة خطوة أساسية لفهم سلوكها وتحديد مجال استعمالها الصناعي المناسب [27].

II .2.2 .النوع الثاني : التصنيف حسب شكل وطول الألياف :

يُعدّ تصنيف المواد المركبة البوليمرية المدعمة بالألياف النباتية حسب شكل الألياف وطولها (Fiber Form and Length)من أهم المعايير المؤثرة في الأداء الميكانيكي للمادة المركبة. فالألياف تمثل عنصر التقوية الأساسي ، ويحدد طولها ، شكلها ، ونمط توزيعها قدرة المادة على تحمل الإجهادات ونقلها بكفاءة داخل البنية المركبة [28].

تنقسم هذه المواد وفق هذا التصنيف إلى ثلاثة أنماط رئيسية : مركبات مدعمة بألياف قصيرة (Short Fiber Composites)، ومركبات مدعمة بألياف طويلة أو مستمرة (Long/Continuous Fiber Composites)، ومركبات مدعمة بألياف منسوجة أو مرتبة.(Woven/Aligned Fiber Composites)

في حالة الألياف القصيرة، يتم تقطيع الألياف النباتية إلى أطوال صغيرة وخلطها عشوائيًا داخل المصفوفة البوليمرية. هذا النوع يتميز بسهولة التصنيع خاصة بطرق القولبة بالحقن والبثق ، كما أنه منخفض التكلفة. غير أن التوزيع العشوائي وقصر الطول يؤديان إلى خصائص ميكانيكية متوسطة مقارنة بالأنواع الأخرى ، بسبب محدودية نقل الإجهاد بين الألياف والمصفوفة [29].

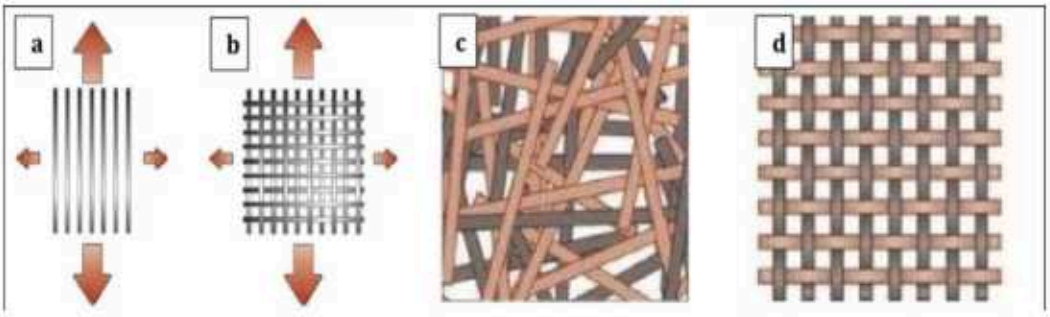
أما المركبات المدعمة بألياف طويلة أو مستمرة ، فتتميز بقدرة أعلى على مقاومة الشد والانحناء، لأن طول الألياف يسمح بنقل أفضل للإجهادات على طول المحور الليفي. كلما اقترب طول الألياف من الطول الحرج (Critical Fiber Length) تحسن الأداء الميكانيكي بشكل ملحوظ. ويُستخدم هذا النوع في التطبيقات التي تتطلب مقاومة إنشائية مرتفعة. الألياف المنسوجة أو الموجهة ، يتم ترتيب الألياف في اتجاهات محددة (أحادي الاتجاه أو ثنائي الاتجاه) ، مما يسمح بالتحكم في الخصائص الميكانيكية حسب اتجاه الحمل. هذا النوع يوفر أعلى درجات الصلابة والمتانة مقارنة بالألياف العشوائية ، ويستعمل في التطبيقات الهندسية المتقدمة. أن شكل وطول الألياف يؤثران مباشرة في مقاومة الشد ، معامل المرونة ، مقاومة الصدمة ، وسلوك الكسر. لذلك فإن اختيار نوع الألياف يعتمد على متطلبات التطبيق النهائي وطرق التصنيع المتاحة [30].

II .2. 3 . النوع الثالث : التصنيف حسب اتجاه توزيع الألياف (Fiber Orientation)

يُعدّ تصنيف المواد المركبة من المبلمر والألياف النباتية حسب **اتجاه توزيع الألياف داخل المصفوفة** من المعايير الأساسية التي تتحكم مباشرة في السلوك الميكانيكي للمادة المركبة. فطريقة ترتيب الألياف لا تؤثر فقط على مقاومة الشد ، بل تحدد كذلك معامل المرونة ، مقاومة الانحناء ، مقاومة الصدمة، وحتى نمط الكسر [28] ويعتمد هذا التصنيف أساسًا على العلاقة بين اتجاه الألياف واتجاه الحمل المطبق على المادة.

يمكن تقسيم هذا النوع إلى ثلاث فئات رئيسية [24] :

- مركبات بألياف أحادية الاتجاه (Unidirectional Composites)
- مركبات بألياف ثنائية الاتجاه أو منسوجة (Bidirectional/Woven Composites)
- مركبات بألياف عشوائية الاتجاه(Randomly Oriented Composites)

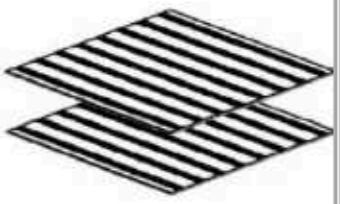
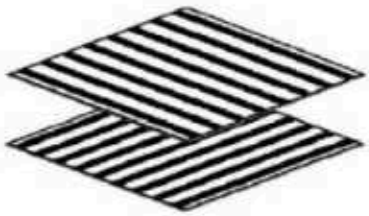


الشكل II .2 : اتجاهات مختلفة للألياف في المواد المركبة المقواة بالألياف. حيث: أ. اتجاه أحادي، ب. اتجاه ثنائي، ج. اتجاه عشوائي، د. نسيج منسوج.

في المركبات أحادية الاتجاه ، تُرتب الألياف في اتجاه واحد فقط. هذا الترتيب يمنح المادة مقاومة عالية جدًا في اتجاه الألياف ، لكنه يجعلها أضعف في الاتجاه العمودي عليها. لذلك تُستخدم هذه المواد في التطبيقات التي يكون فيها اتجاه الإجهاد معروفًا مسبقًا ، مثل العناصر الإنشائية المعرضة لشد محوري.

المركبات ثنائية الاتجاه أو المنسوجة، فتُنسج الألياف في اتجاهين متعامدين غالبًا (°90/°0) ، مما يمنح المادة خواص ميكانيكية متوازنة في مستويين. هذا النوع يُستخدم في التطبيقات التي تتعرض لأحمال متعددة الاتجاهات، ويتميز باستقرار ميكانيكي أفضل مقارنة بالترتيب الأحادي [31].

إن المركبات ذات الألياف العشوائية ، فتتميز بتوزيع غير منتظم للألياف داخل المصفوفة. رغم أن خصائصها الميكانيكية أقل من الأنواع الموجهة، إلا أنها توفر سلوكًا متجانسًا نسبيًا في جميع الاتجاهات ، كما أنها أسهل وأقل تكلفة في التصنيع ، خاصة في عمليات القولبة بالحقن.

النوع	بنية الألياف(Fiber Architecture)	الصورة	الملاحظات(Remarks)
1	أحادي الاتجاه – طبقة واحدة (Unidirectional one layer)		غير متوفر(N/A)
2	أحادي الاتجاه – طبقتان (Unidirectional two layers)		غير متوفر(N/A)
3	ثنائي الاتجاه(Bi-directional)		طبقة واحدة منسوجة-Bi (directional one layer)
			ثنائي الاتجاه باستخدام ألياف أحادية الاتجاه بزاوية 0°/90° (طبقتان)
4	عشوائي(Random)		ألياف مقطعة بطول 25-75 مم موزعة عشوائيا داخل المصفوفة

الجدول II .2: تصنيف المواد المركبة المدعمة بالألياف حسب اتجاه وترتيب الألياف داخل المصفوفة البوليمرية.

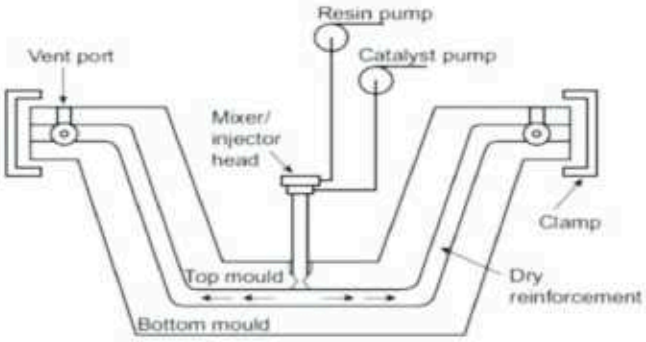
II .3 . طرق تحضير المواد المركبة :

من بين الطرق المتقدمة في تحضير المواد المركبة المدعمة بالألياف النباتية هناك العديد من التقنيات :

II . 3 . 1. تقنية القولبة :

بنقل الراتنج (Resin Transfer Molding – RTM) من أكثر التقنيات استعمالاً في التطبيقات الهندسية التي تتطلب جودة عالية وتحكمًا دقيقًا في البنية الداخلية للمادة المركبة. تعتمد هذه التقنية على وضع الألياف الجافة داخل قالب مغلق، ثم حقن الراتنج السائل تحت ضغط مناسب لضمان تشريب كامل ومنتظم للألياف قبل عملية التصلب، مما يؤدي إلى تقليل نسبة الفراغات وتحسين الخواص الميكانيكية النهائية.

تُعدّ طرق تحضير المواد المركبة من المبلمرات والألياف النباتية عنصرًا حاسمًا في تحديد خصائصها النهائية ، إذ تؤثر بشكل مباشر على توزيع الألياف داخل المصفوفة ، جودة الالتصاق البيني ، نسبة الفراغات ، والسلوك الميكانيكي والحراري للمادة الناتجة .[27] ويعتمد اختيار طريقة التحضير أساسًا على نوع المصفوفة البوليمرية، سواء كانت لدنة حراريًا أو متصلدة حراريًا ، إضافة إلى طبيعة الألياف النباتية ومتطلبات التطبيق الصناعي .[30]

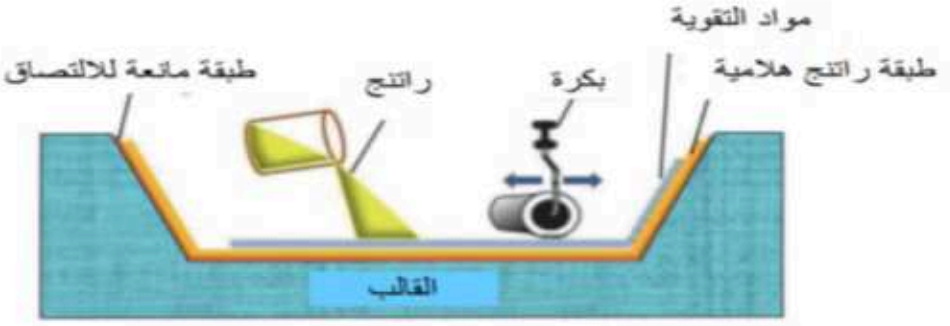


الشكل II . 3 : مخطط يوضح مبدأ عمل تقنية القولبة بنقل الراتنج (RTM) في تحضير المواد المركبة المدعمة بالألياف النباتية

II . 3 . 2. طريقة القالب المفتوح :

يجري إشباع الألياف بالراتنج يدوياً، وتكون على شكل أقمشة منسوجة أو محبوكة أو مخيطة أو مرتبطة، وفي هذه الطريقة، يُعالج القالب أولاً بمواد مانعة للالتصاق، وتوضع الألياف الجافة على القالب، ثم يسكب الراتنج السائل وينتشر على طبقات الألياف. ويتحقق ذلك عادة عن طريق، إما البكرات، أو الفرشاة التي تقوم بتبليل الألياف، وإزالة الهواء المحتبس في الطبقات. تبلل طبقات قليلة من الألياف، وتترك لتتم عملية المعالجة (النفسية) في شروط محيطية نظامية [31] بعد انتهاء معالجة هذه الطبقات، يجري إضافة مزيد منها

يعد الرش طريقة مباشرة لتشكيل المواد المركبة. في هذه الطريقة، يُعالج القالب أولاً بمواد مانعة للالتصاق. إذا استعملت طبقة هلامية من الراتنج، يجري تطبيقه بالرش في القالب بسماكة معينة بعد وضع المواد المانعة للالتصاق، ويكون القالب جاهزا للمعالجة. يتم رش الألياف والراتنج مع مواد النفسية عند الزوجة 500– 1000 سنتي بواز في القالب باستخدام مسدس رش يقطع الألياف المستمرة إلى أطوال حزم قصيرة، ثم ينفخها مباشرة في تيار الراتنج، بحيث يحدث تطبيق كلتا المادتين في وقت واحد على سطح القالب، كما في الشكل في خطوة أخيرة من عملية الرش، يجري ضغط الصفائح يدوياً باستخدام بكرات. ثم تتم معالجة (نفسية) المادة المركبة وإزالتها من القالب [32].



الشكل II. 4 : مخطط يوضح مبدأ عمل تقنية القالب المفتوح في تحضير المواد المركبة المدعمة بالألياف النباتية

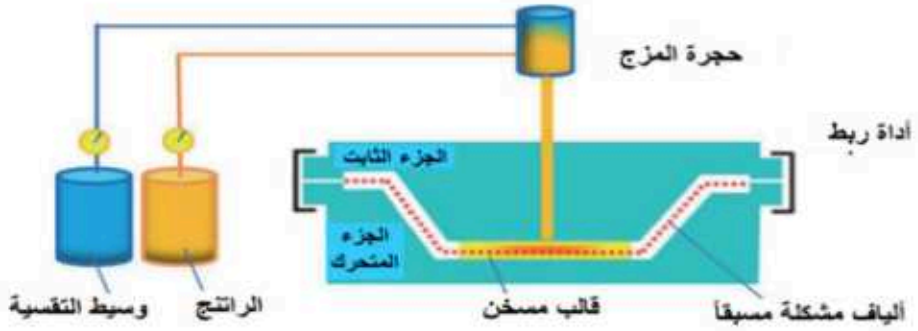
تعد طريقة القالب المفتوح شائعة لتصنيع منتجات المواد المركبة المقواة بالألياف الزجاجية مثل أحواض الاستحمام، وأجسام القوارب ، والمصدات ، وكبائن الشاحنات ، وغيرها من الأشكال الكبيرة وغير المعقدة نسبياً. يُبين الشكل تطبيقات طريقة القالب المفتوح باستخدام مسدس الرش

الشكل II . 5: مخطط يوضح تقنية القالب المفتوح باستخدام مسدس الرش في تحضير المواد المركبة المدعمة بالألياف النباتية

II . 3 .3. طريقة القولبة بالانتقال :

تعتبر القولبة بالانتقال (RTM)، التي تسمى أحياناً بالقولبة السائلة، عملية بسيطة إلى حد ما. في هذه التقنية ، يعالج القالب أولاً بالمواد المانعة للالتصاق ، ثم توضع مواد التقوية الجافة التي تأخذ شكلاً محدداً في القالب الذي يُغلق بعد ذلك.

يُبين الشكل طريقة القولبة بالانتقال.



الشكل II . 6 : مخطط يوضح مبدأ عمل تقنية القولبة بالانتقال في تحضير المواد المركبة المدعمة بالألياف النباتية

يتم ضبط كمية الراتنج والمحفز منخفض اللزوجة وخلطهما، ثم ضخهما في القالب تحت ضغط منخفض إلى متوسط من خلال منافذ الحقن، باتباع مسارات محددة مسبقاً. يستخدم الراتنج منخفض اللزوجة في طريقة

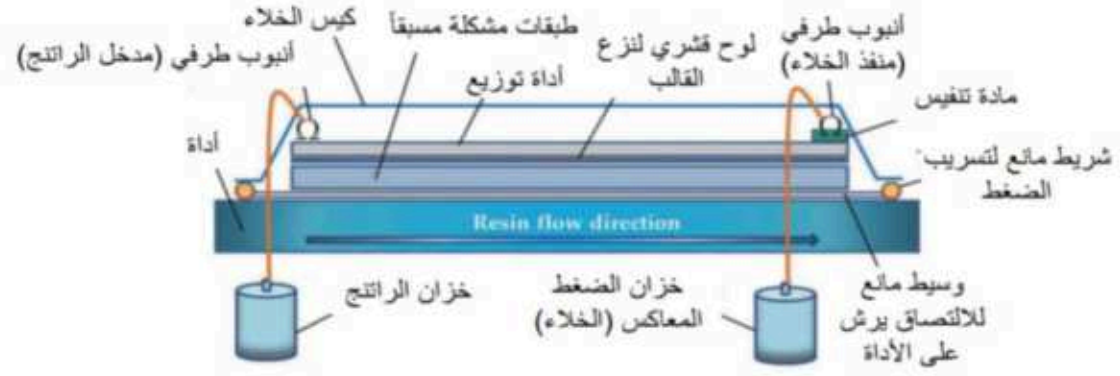
القولية بالانتقال لضمان تغلغله بسرعة بين الألياف خلال القولبة، وبشكل كامل قبل التصلب، خاصة مع المواد المركبة ذات السماكة العالية [33].

تستخدم هذه الطريقة في الحصول على منتجات ذات أشكال معقدة مثل بعض أجزاء هياكل السيارات. يبين الشكل منتجات مشكلة بطريقة القولية بالانتقال.

الشكل II . 7 : منتجات مشكلة بطريقة القولبة بالانتقال

II . 3 .4. القولبة بالتفريغ :

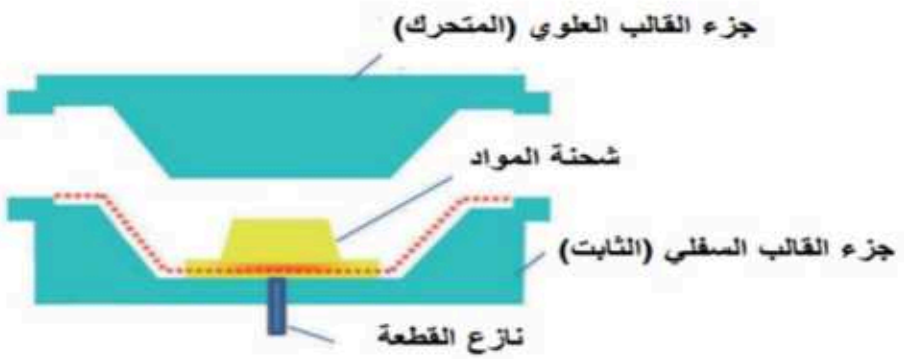
وهي من أكثر طرائق القولية تقدماً، ويكمن الفرق بين هذه الطريقة وطريقة القولية بالانتقال في سحب الراتنج إلى القالب باستخدام الخلاء (التفريغ) فقط بدلاً من ضخه تحت ضغط لا تتطلب هذه الطريقة حرارة أو ضغط عاليين، وهي تعمل عادة باستخدام أدوات منخفضة التكلفة، مما يجعل من الممكن إنتاج أجزاء كبيرة ومعقدة بتكلفة زهيدة وفي مرحلة واحدة [34].



الشكل II . 8 : مخطط يوضح مبدأ عمل تقنية القولبة بالتفريغ في تحضير المواد المركبة المدعمة بالألياف النباتية

II . 3 .6. طريقة القولبة بالضغط:

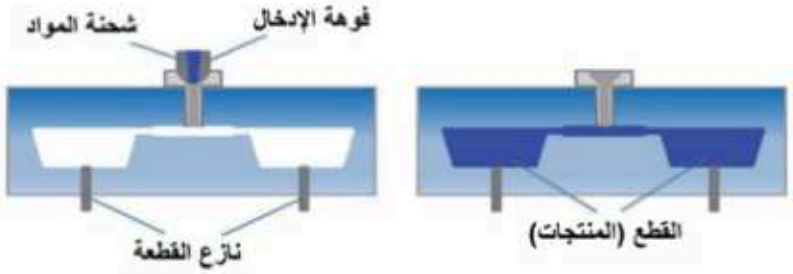
القولبة بالضغط هي عملية دقيقة وسريعة نسبياً لإنتاج أجزاء ذات جودة عالية مصنوعة من مواد مركبة ذات مجال واسع من الأحجام، حيث توضع المواد يدوياً أو آلياً ضمن القالب، ثم يغلق نصفا القالب، ويُطبق الضغط باستخدام مكابس هيدروليكية. يتراوح وقت الدورة حسب أبعاد القطعة وسماكتها. تنتج هذه العملية أجزاء معقدة عالية المقاومة وذات أحجام متنوعة.



الشكل II . 9 : مخطط يوضح مبدأ عمل تقنية القولبة بالضغط في تحضير المواد المركبة المدعمة بالألياف النباتية

II . 3 .7. طريقة القولبة بالحقن :

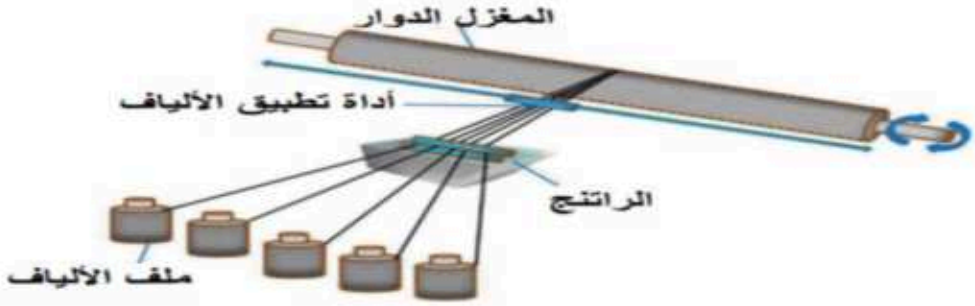
القولبة بالحقن هي عملية قولبة مغلقة سريعة، وذات إنتاجية كبيرة، ولا تتطلب ضغطاً مرتفعاً، وهي الأكثر استخداماً في المواد المركبة ذات المادة الرابطة من بوليميرات التلدن الحراري والمقواة بالألياف مثل النايلون مع الألياف الزجاجية المقطعة [35].



الشكل II .10 : مخطط يوضح مبدأ عمل تقنية القولبة بالحقن في تحضير المواد المركبة المدعمة بالألياف النباتية

II . 3 .7. طريقة اللف الآلي :

اللف الآلي هو طريقة تصنيع مستمرة يمكن أن تكون مؤتمتة بشكل كامل وقابلة للتكرار، مع تكاليف مواد منخفضة نسبياً، حيث يجري تعليق أداة أسطوانية طويلة تسمى المغزل أفقياً بين دعامات النهاية تمر الألياف الجافة من خلال حوض من الراتنج ليتم تبليلها، وتتحرك أداة تطبيق الألياف ذهاباً وإياباً على طول المغزل الدوار مع عربة النقل، مما يمكن من توضع الألياف عليه في تنضيد محدد مسبقاً [36].



الشكل II .11: مخطط يوضح مبدأ عمل تقنية اللف الالي في تحضير المواد المركبة المدعمة بالألياف

II . 3 .8. طريقة القولبة بالسحب :

هي طريقة تشكيل لإنتاج أطوال مستمرة من هياكل مصنعة من مواد مركبة ذات مادة رابطة بوليميرية مقواة بالألياف وذات مقاطع عرضية ثابتة، وهي طريقة تصنيع مستمرة يمكن تكون مؤتمتة بشكل كامل. في هذه الطريقة، يتم سحب حزمة مستمرة من الألياف الجافة من خلال محطة تبليل بالراتنج الساخن.

تسحب حزمة الألياف المشبعة إلى قوالب ساخنة، ويتشكل شكل المقطع العرضي للألياف المسحوبة بواسطة هذه القوالب، ثم يعالج الراتنج والألياف حرارياً، وتتشكل المادة المركبة. وتقطع المنتجات المستمرة الطويلة المعالجة وفقاً للأطوال المرغوبة [37.38].

الشكلII . 12: مخطط يوضح مبدأ عمل تقنية القولبة بالسحب في تحضير المواد المركبة المدعمة بالألياف

II . 4. مجالات استعمال المواد المركبة :

تُعدّ المواد المركبة من المبلمرات والألياف النباتية من المواد الواعدة التي شهدت توسعًا ملحوظًا في مجالات الاستعمال خلال السنوات الأخيرة، وذلك بفضل خفة وزنها، انخفاض تكلفتها، قابليتها للتحلل الحيوي، وخصائصها الميكانيكية المقبولة مقارنة بالمواد التقليدية [27] ومن أبرز القطاعات التي استفادت من هذه المواد قطاع صناعة السيارات، حيث تُستخدم في تصنيع الأجزاء الداخلية مثل ألواح الأبواب، لوحات القيادة، وأجزاء العزل الصوتي، نظرًا لقدرتها على تقليل الوزن الكلي للمركبة وبالتالي خفض استهلاك الوقود والانبعاثات الكربونية. كما أن استخدامها في هذا المجال يساهم في تعزيز مفهوم الاستدامة والاقتصاد الدائري من خلال استبدال الألياف الصناعية بألياف طبيعية متجددة.

وفي قطاع البناء والإنشاءات، تُستعمل هذه المواد في تصنيع الألواح العازلة، الألواح الجدارية، والأسقف الخفيفة، لما توفره من خصائص عزل حراري وصوتي جيدة، إضافة إلى مقاومتها المقبولة للرطوبة عند معالجتها بشكل مناسب .[28] كما تُستخدم في بدائل الخشب الصناعي، خاصة في التطبيقات التي تتطلب مواد خفيفة الوزن وسهلة التشغيل، وتبرز أهميتها كذلك في مشاريع البناء المستدام التي تهدف إلى تقليل البصمة الكربونية للمواد الإنشائية.

أما في مجال التغليف والصناعات الاستهلاكية، فتُستخدم المركبات الحيوية القائمة على بوليمرات قابلة للتحلل مثل PLA مع ألياف طبيعية في إنتاج مواد تغليف صديقة للبيئة، مما يساعد في تقليل النفايات البلاستيكية وتحقيق أهداف التنمية المستدامة، كما بدأت هذه المواد تجد طريقها إلى التطبيقات البحرية والرياضية، حيث تُستعمل في تصنيع القوارب الصغيرة، ألواح التزلج، وبعض المكونات الرياضية التي تتطلب توازنًا بين الخفة والمتانة.

وفي المجال الصناعي والهندسي، تُستخدم هذه المركبات في تصنيع الأجزاء شبه الإنشائية التي لا تتعرض لأحمال عالية جدًا، مثل الحاويات، الصناديق الصناعية، وألواح الحماية. وتشير الدراسات الحديثة إلى أن تحسين تقنيات المعالجة والالتصاق البيني قد يفتح المجال لاستخدام أوسع في التطبيقات الإنشائية المتقدمة [32]وبذلك تمثل المواد المركبة من المبلمرات والألياف النباتية خيارًا استراتيجيًا يجمع بين الأداء الهندسي المقبول والاستدامة البيئية، مما يعزز مكانتها في مختلف القطاعات الصناعية الحديثة.

II . 5. ذكر بعض الأعمال البحثية (الجديدة) :

II . 5 .1. الدراسة الأولى :

تناولت دراسة [32]تحليلاً شاملاً لتطور المواد المركبة المدعمة بالألياف النباتية، مع التركيز على تقنيات التحضير، التحديات التقنية، والخصائص الميكانيكية والحرارية الناتجة. هدفت الدراسة إلى تقييم تأثير طرق التصنيع المختلفة مثل القولبة بالحقن، القولبة بالضغط، وتقنية نقل الراتنج على جودة الترابط البيني بين الألياف والمصفوفة البوليمرية. كما ناقشت التحدي الأساسي المرتبط بعدم التوافق الطبيعي بين الألياف النباتية ذات الطبيعة المحبة للماء والمصفوفات البوليمرية الكارهة للماء، وهو ما يؤدي إلى ضعف الالتصاق وارتفاع نسبة امتصاص الرطوبة. وأظهرت النتائج أن المعالجة السطحية للألياف، خاصة المعالجة القلوية واستخدام المواد الرابطة(Compatibilizers) ، تؤدي إلى تحسين ملحوظ في مقاومة الشد والانحناء، إضافة إلى تقليل الفراغات المجهرية داخل البنية المركبة. كما أكدت الدراسة أن التحكم في ظروف التصنيع مثل درجة الحرارة والضغط وزمن التصلب يلعب دورًا حاسمًا في تحسين الأداء النهائي. وخلصت الدراسة إلى أن التطوير المستقبلي في هذا المجال يجب أن يركز على تحسين الاستقرار الحراري للألياف، وتقنيات التصنيع منخفضة الطاقة، وتعزيز قابلية إعادة التدوير لتحقيق توازن بين الأداء الهندسي والاستدامة البيئية وأن الخصائص الميكانيكية، مثل مقاومة الشد، ومقاومة الانحناء، ومتانة الصدم، والصلادة، تتحسن مع زيادة نسبة الألياف.

وقد سُجلت أفضل القيم غالبًا عند نسب 5% و15% من الألياف، بينما انخفضت هذه القيم عند نسب 10% و20%. ومن ناحية امتصاص الماء، أظهرت المركّبات ذات المحتوى 5% و15% امتصاصًا أقل مقارنة ببقية التركيبات، في حين أن زيادة امتصاص الماء تؤدي إلى تدهور بعض الخصائص الميكانيكية.

يمكن تفسير هذه النتائج بأن توزيع الألياف في نسبتي 5% و15% يكون أكثر تجانسًا داخل المصفوفة، مما يؤدي إلى تحسين الترابط البيني (interfacial bonding) بين الألياف والمادة الأساسية، وبالتالي تحقيق أداء أفضل. كما أن إضافة الألياف إلى مركّبات/HDPE ألياف الغلاف حسّنت من قدرة تحمّل الأحمال (مقاومة الشد) وكذلك القدرة على مقاومة الانحناء (مقاومة الانثناء.(

ومع ذلك، لوحظ في بعض الحالات أن إضافة الألياف قد تؤدي إلى انخفاض هذه الخصائص، ويُعزى ذلك إلى وجود مسامات عند الواجهة بين الألياف والمصفوفة، أو إلى ضعف الالتصاق البيني، مما يعيق انتقال الإجهادات بشكل فعّال.

II . 5 . 2 . الدراسة الثانية :

تناولت دراسة [33] تأثير المعالجات الكيميائية على أداء المواد المركبة المدعمة بالألياف النباتية، مع التركيز على المعالجة القلوية (Alkali Treatment) كأحد أكثر الأساليب استخدامًا لتحسين الالتصاق البيني بين الألياف والمصفوفة البوليمرية. انطلقت الدراسة من إشكالية رئيسية تتمثل في ضعف التوافق الطبيعي بين الألياف النباتية ذات الطبيعة المحبة للماء والبوليمرات الكارهة للماء، وهو ما يؤدي إلى انخفاض مقاومة الشد وزيادة امتصاص الرطوبة. هدفت الدراسة إلى تحليل تأثير إزالة مكونات مثل اللجنين والهيميسليلوز من سطح الألياف باستخدام محاليل قلوية (NaOH) ، ومدى انعكاس ذلك على الخواص الميكانيكية والفيزيائية للمركبات الناتجة.

أظهرت النتائج أن المعالجة القلوية تؤدي إلى زيادة خشونة سطح الألياف وتحسين الترابط الميكانيكي بينها وبين المصفوفة، مما ينعكس في ارتفاع مقاومة الشد والانحناء ومعامل المرونة. كما لوحظ انخفاض

ملحوظ في نسبة الفراغات داخل المادة المركبة، وهو ما يساهم في تحسين الأداء البنيوي العام. غير أن الدراسة أشارت أيضًا إلى أن الإفراط في المعالجة أو استخدام تركيزات عالية من القلوي قد يؤدي إلى تدهور في البنية الليفية وانخفاض في الخواص الميكانيكية، مما يبرز أهمية التحكم الدقيق في زمن المعالجة وتركيز المحلول.

وخلص الباحثون إلى أن المعالجة الكيميائية تمثل خطوة حاسمة في تحسين أداء المواد المركبة الطبيعية، وأن اختيار ظروف المعالجة المثلى يعد عاملًا أساسيًا لتحقيق توازن بين تحسين الالتصاق البيني والحفاظ على سلامة الألياف. وقد ساهمت هذه الدراسة في ترسيخ مفهوم المعالجة السطحية كأحد الاتجاهات البحثية الأساسية في تطوير المواد المركبة المستدامة.

II . 3. 5 . الدراسة _الثالثة :

اتجهت بعض الأبحاث الحديثة إلى تعزيز أداء المواد المركبة المدعمة بالألياف النباتية من خلال إدخال مواد نانوية مثل النانو سليلوز كعامل تدعيم إضافي لتحسين الخصائص الميكانيكية والحرارية، ومن بين هذه الدراسات دراسة [35]التي تناولت تحضير مركبات بوليمرية مدعمة بألياف طبيعية مع إضافة جسيمات نانو سليلوز بهدف رفع كفاءة الالتصاق البيني وتقليل العيوب المجهرية داخل البنية المركبة. اعتمدت الدراسة على تحليل تأثير توزيع الجسيمات النانوية داخل المصفوفة البوليمرية، ومدى مساهمتها في زيادة مساحة التفاعل السطحي بين الطورين، حيث بينت النتائج أن إدماج نسب مدروسة من النانو سليلوز يؤدي إلى تحسن واضح في مقاومة الشد ومعامل المرونة مقارنة بالمركبات التقليدية، إضافة إلى تعزيز الاستقرار الحراري وتقليل معدل امتصاص الرطوبة. كما أظهرت الفحوصات المجهرية أن الجسيمات النانوية تعمل على سد الفجوات الدقيقة داخل المصفوفة، مما يحسن انتقال الإجهاد ويحد من نشوء الشقوق الدقيقة تحت الحمل. وأكد الباحثون أن نجاح هذه التقنية يعتمد على تحقيق توزيع متجانس للنانو سليلوز وتفادي التكتل، وهو ما يتطلب تحكمًا

دقيقًا في عملية الخلط والتحضير. وقد خلصت الدراسة إلى أن دمج التقوية الليفية التقليدية مع التدعيم النانوي يمثل اتجاهًا واعدًا لتطوير مواد مركبة طبيعية ذات أداء ميكانيكي متقدم، مما يفتح آفاقًا أوسع لاستخدامها في التطبيقات الهندسية المتطلبة دون التخلي عن البعد البيئي والاستدامة.

وأظهرت النتائج أن التركيز الأمثل لجسيمات ITO بلغ 15% وزناً، وعند هذا التركيز ظهرت أغشية السليلوز الشفافة مقاومية منخفضة بلغت 5.0×10^{3} أوم/مربع، ونفاذية ضوئية مرتفعة وصلت إلى 74% عند طول موجي قدره 800 نانومتر.

كما بيّنت الدراسة أن الأغشية السليلوزية الموصلة المحضّرة من السليلوز البكتيري/ البوليبيرول يمكن أن تحقق موصلية كهربائية عالية تصل إلى 3.9 سيمنز/سم . وبلغت السعة التفريغية القصوى لهذه الأغشية 101.9 ملي أمبير·ساعة/غرام عند كثافة تيار قدرها 0.16 أمبير/غرام

الفصل الثالث: المنهجية التجريبية

III.1 : المنهجية التجريبية

III .1.1. المواد والكواشف :

III .1.1. 1. بولي كلوريد الفينيل(PVC)

- الصيغة العامة $(CH_2–CHCl)_n$:
- الكتلة المولية $M \approx 40000 g/mol$
- الناقلية الحرارية: 0.2 واط·م$^{-1}$·ك$^{-1}$
- اللزوجة الظاهرية : 0.89 – 0.95
- الكثافة: 1.16 – 1.35
- درجة حرارة الانتقال الزجاجي T_g :80°

الشكلIII .1. : مسحوق مبلمر PVC

III .1.1. 2 . هيدروكسيد الصوديوم (NaOH)

- الصيغة الكيميائية NaOH :
- الكتلة المولية: 40 غ/مول
- الكثافة: 2.13 غ/سم^3
- اللون: أبيض
- الرائحة: عديم الرائحة

III .1.1. 3 . الألياف النباتية (FVP)

الألياف النباتية المستعملة في هذه الدراسة مستخرجة من نخيل التمر (*Phoenix dactylifera* L) ، وتم جمعها من منطقة وادي سوف جنوب الجزائر

الشكلIII .2. : ألياف النخيل (الجريد)

III .1. 1. 4 . المذيبات :

III .1. 1. 4 .1. رباعي هيدروفوران (THF)

- الصيغة C_2H_8O :
- الكتلة المولية: 72.11 غ/مول
- درجة الغليان: 65–66 °م

III .1. 1. 4 .2. الإيثانول

- الصيغة C_2H_5OH
- الكتلة المولية: 46 غ/مول
- درجة الانصهار: –114 °م
- درجة الغليان: 78–78.5 °م

III .1. 1. 4 .3. أزرق الميثيلين :

- الصيغة $C_{16}H_{18}ClN_3S$
- الكتلة المولية: 319.85 غ/مول
- الذوبانية: 50 غ/لتر في الماء

III . 1. 2 . الأجهزة والمعدات

- بيشر زجاجي (100 مل)
- محرك تحريك مغناطيسي مع صفيحة تسخين
- ملعقة مخبرية
- فرن تجفيف (Etuve)
- ميزان مخبري
- مخبار مدرج
- جهاز الاستخلاص بالمذيب (VELP SCIENTIFICA SER 148)
- أطباق بتري(Boites de pétré) تفريغ

III .1. 3 . طرق التحضير :

III .1. 3 . 1. تحضير ألياف نخيل التمر:

III .1. 3 . 1. 1. جمع وطحن الألياف :

تم الاعتماد فقط على الألياف المعالجة المستخرجة من وريقات نخيل التمر ، دون الأخذ بعين الاعتبار السعف (العرق الوسطي) جُمعت الوريقات من منطقة وادي سوف ، ثم جُففت في الظل ونُظفت بالغسل بالماء. بعد ذلك ، تم تقطيعها وطحنها ، ثم تعريض المسحوق لأشعة الشمس بهدف التخلص من أكبر قدر ممكن من الرطوبة

الشكلIII .3 : مراحل تهيئة الألياف

III .1. 3 . 1. 2. معالجة الألياف :

1. الاستخلاص :

تمت عملية الاستخلاص وفق الخطوات التالية :

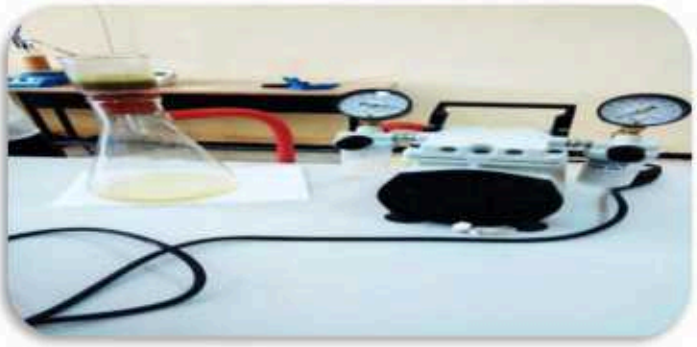
1. وضع كمية محددة من الألياف الخام داخل خرطوشة حامل العينة .
2. استخدام الإيثانول كمذيب للاستخلاص .
3. ضبط درجة الحرارة عند 210 °م .
4. تحديد أزمنة المراحل الثلاث كما يلي :

- الغمر : 15 دقيقة
- الغسل: 20 دقيقة
- استرجاع المذيب : 15 دقيقة

الشكلIII .4 : جهاز الاستخلاص المستخدم

2 . الغسل :

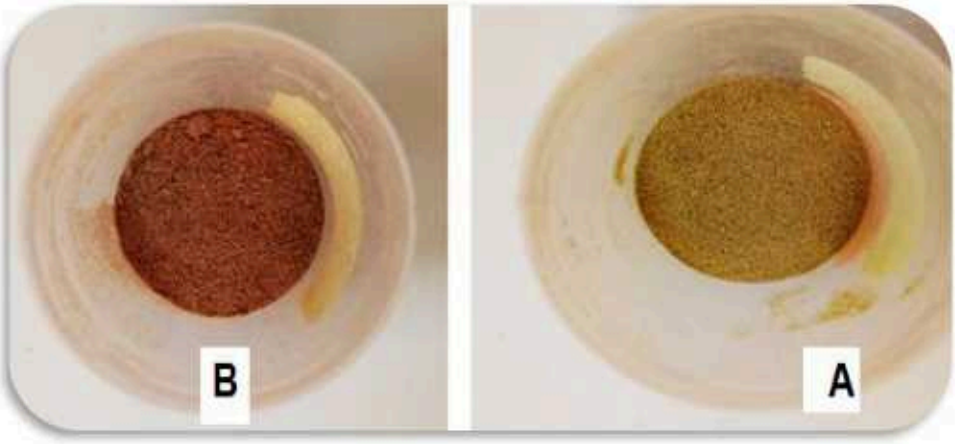
تم غسل الألياف باستخدام قمع بوشنر وماء مقطر، وتكررت العملية عدة مرات إلى غاية الحصول على ماء صافٍ.



الشكلIII .5 : غسيل الألياف (قمع بوشنر)

3 . المعالجة القلوية (NaOH) :

بعد الغسل الأولي ، غُمِرت الألياف في محلول NaOH بتركيز 1 مول/لتر ، مع التحريك عند درجة حرارة الغرفة لمدة 6 ساعات. بعد ذلك ، تم غسلها مجددًا ، ثم معادلة الوسط بإضافة بضع قطرات من حمض الأسيتيك.



الشكلIII 6 : صورة لألياف نخيل التمر (A) قبل المعالجة و (B) بعد المعالجة بهيدروكسيد الصوديوم NaoH

4 . التجفيف

تم تجفيف الألياف في فرن عند درجة حرارة 60 °م لمدة 24 ساعة قبل استعمالها.

5 . إعادة الطحن

أُجري طحن ثانٍ باستخدام هاون مخبري لتقليل حجم الجسيمات.

الشكلIII .7 : اعادة طحن الألياف يدويا

III .2. تحضير المواد المركبة :

تم تحضير الأغشية المركبة وفق الخطوات التالية :

تم إذابة كمية محددة من بولي كلوريد الفينيل (PVC) في رباعي هيدروفوران (THF) تحت تحريك مستمر حتى الحصول على محلول متجانس , بعد ذلك أُضيفت كمية محددة من ألياف نخيل التمر مع الاستمرار في التحريك ثم صُبّ المزيج في طبق بتري وتركه حتى يتبخر المذيب كليًا مما أدى إلى تشكل غشاء مركب.

طبيعة الألياف	وزنPVC (g)	وزن الألياف (g)	نسبة الالياف PVC /FV	المادة المركبة
ألياف معالجة (مستخلصة بالايثانول)	1.5	0.5	75/25	المادة المركبة
ألياف معالجة بهيدروكسيد الصوديوم NAOH	1.5	0.5	75/25	المادة المركبة
ألياف معالجة (مستخلصة بالايثانول)	1	1	50/50	المادة المركبة
ألياف معالجة (مستخلصة بالايثانول 1غ)	0.75	0.25	75/25	المادة المركبة
ألياف معالجة بهيدروكسيد الصوديوم 1غ NAOH	0.8	0.2	90/10	المادة المركبة

الجدول III.1: تركيب الأغشية المركبة المختلفة المحضرة

الشكلIII .8: صور نماذج لأغشية المركبات المحضرة

III .3. تقنيات القياس والتوصيف :

III .3. 1 . المطيافية بالأشعة فوق البنفسجية-المرئية (UV-Vis)

لا تُستخدم هذه التقنية عادةً كوسيلة روتينية للتعرف على البوليمرات، إلا أنها تُستعمل بشكل واسع في التحليل الكمي للإضافات ، والأصباغ ، والملونات ، وكذلك في دراسة تدهور البوليمرات.

يتم القياس عادة في المجالات التالية :

- الأشعة فوق البنفسجية: 180–400 نانومتر
- المجال المرئي: 400–800 نانومتر

الشكلIII .9 : جهاز ال UV_Visible

III .4. الاختبارات التجريبية :

III.4.1. اختبار امتصاص الماء :

يُحسب معدل امتصاص الماء وفق العلاقة التالية :

$$W = m_h - m_{sec} / m_{sec} \quad \text{..... (Éq. III.1)}$$

حيث :

W: معدل امتصاص الماء

كتلة العينة بعد الغمر (غ) : m_h

الكتلة الجافة (غ) : m_{sec}

تم غمر العينات في ماء مقطر، ثم وزنها بعد 24 و48 و72 ساعة.

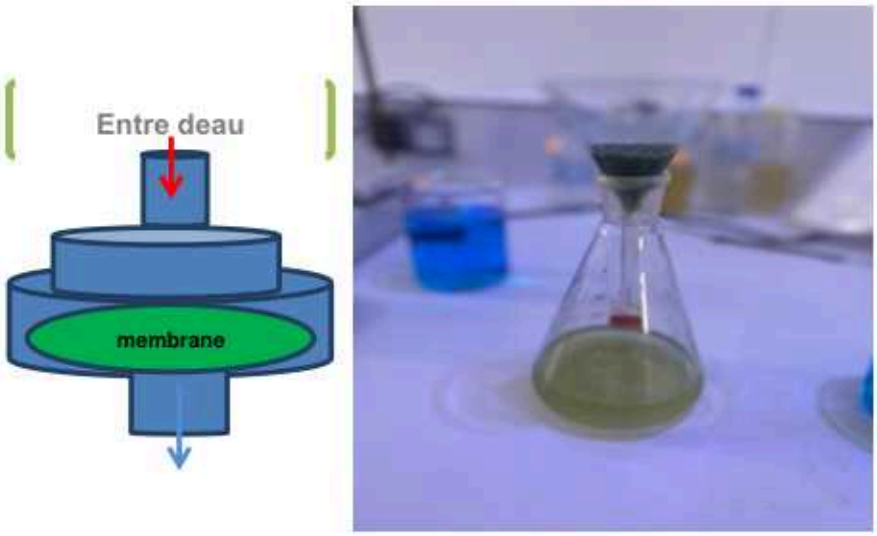
III .4. 2 . اختبار الترشيح :

يهدف هذا الاختبار إلى تقييم كفاءة الغشاء في إزالة الملوثات العضوية، خاصة أزرق الميثيلين.

تم قطع عينة دائرية من الغشاء المركب ووضعها في جهاز الترشيح. أُدخل الماء الملوث من الأعلى ومر عبر الغشاء تحت تأثير ضغط خفيف، ثم جُمع الراشح في دورق إرلنماير.

تم تحليل العينات قبل وبعد الترشيح باستخدام مطيافية .UV–Vis واستُخدم منحنى معايرة يربط بين الامتصاصية والتركيز لتحديد تركيز الملوث بعد الترشيح.

بلغ تركيز المحلول الأم 2 ملغ/ لتر ، وتم تحضير خمس تخفيفات انطلاقًا منه.



الشكلIII .10 : صورة لجهاز الترشيح (يمين) ورسم تخطيطي مبسط (يسار)

III .4 .3 . مقاومة العينات (المواد المركبة) للأحماض :

قمنا بوزن مجموعة من العينات قبل وبعد غمرها في محلول حامضي مركز (H_2SO_4) و(HCl) مدة 24سا.

يتم احتساب نسبة الانتفاخ حسب العلاقة الاتية :

$$Xs(\%) = [(mf - mi) / mi] \times 100$$

مثال في حمض H_2SO_4

$$Xs = [(178,6 - 73,99) / (73,99)] \times 100 = 141,68\%$$

الفصل الرابع : عرض ومناقشة النتائج

ملاحظة :

بعض النتائج المعروضة هي نتائج الأعمال لطلبة ماستر سابقين في نفس السياق البحثي واخذت على سبيل المقارنة والأعمال التي قمنا بها تمت في وحدة البحث وتطوير الطاقات المتجددة في المناطق القاحلة جامعة الوادي واد سوف

الشكلIII . 1 : صورة توضح شكل العينة قبل وبعد الغمر في محلول أزرق المثيلين

III . 1 . الفلترة او التشيح :

يمكن إعادة صياغة التفسير العلمي لآلية تراجع كفاءة التصفية وزيادة تركيز الملوثات عبر الدورات المتتالية على النحو التالي:

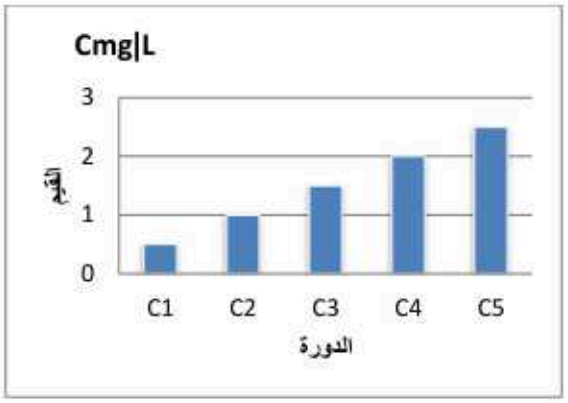
يعود الانخفاض التدريجي في أداء المادة الماصة إلى تداخل عدة عوامل حركية وهيكلية، يمكن تلخيصها في النقاط التالية:

ديناميكية تشبع المواقع النشطة: تعتمد كفاءة الإزالة العالية في البداية على توفر عدد كبير من مواقع الامتزاز الفعالة على سطح المادة. ومع تتابع الدورات ، تصل هذه المواقع إلى حالة التشبع التدريجي ، مما يقلل من القدرة الاستيعابية للمادة ويؤدي إلى نفاذ الملوثات بتركيزات أعلى في المحلول الناتج.

التدهور الهيكلي وانسداد المسام يتقاطع هذا التراجع مع مفاهيم المسامية البينية وسلامة البنية حيث يؤدي الاستخدام المتكرر إلى ظاهرة انسداد المسام أو تآكل البنية السطحية للمادة، مما يقلص المساحة السطحية المتاحة للتفاعل ويحد من نفاذية الملوثات إلى مراكز الاحتجاز الداخلية.

ظاهرة التحرر العكسي : يشير المردود السلبي المسجل في الدورة الأخيرة (C5) إلى وصول المادة إلى نقطة التشبع التام حيث تبدأ الروابط الكيميائية أو الفيزيائية الضعيفة بين السطح والملوث بالانفكاك. يؤدي هذا إلى عودة الملوثات الممتزة سابقاً إلى المحلول ، فيما يعرف بإزالة الامتزاز مما يرفع تركيز الملوث في المخرج إلى مستويات أعلى من تركيزه الأصلي.

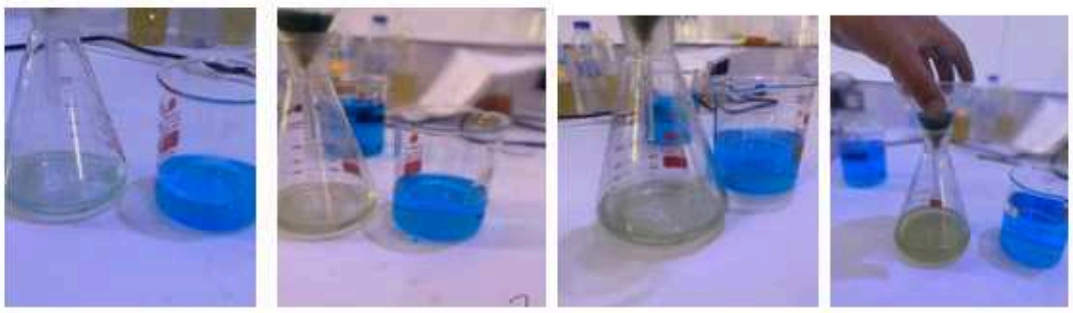
ومنه نستنتج أنه يرتبط استقرار أداء التصفية ارتباطاً وثيقاً بـ كثافة البنية الداخلية للمادة وقدرتها على الصمود أمام الإجهاد الناتج عن العمليات المتكررة، حيث أن أي خلل في الهيكل الجزيئي أو المسامي يؤدي إلى تسريع آلية التحلل الوظيفي . [44]



(أ)

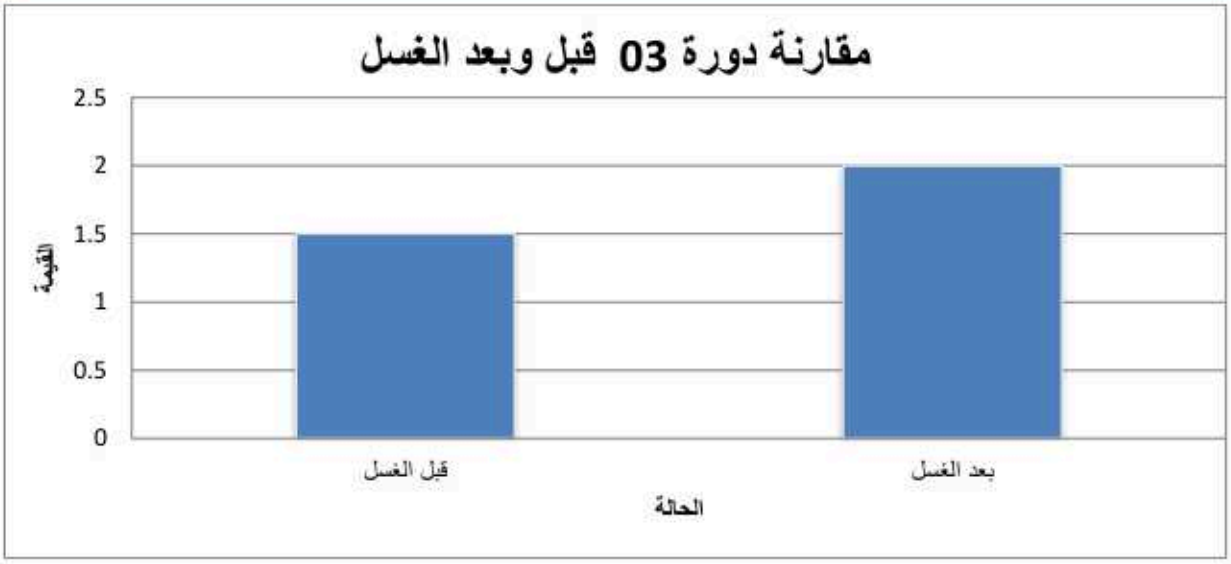
(ب)

الشكلIII . 2 : تمثيل بياني يوضح مردود التصفية (ب) و التركيز(أ)



(دورة 1) (دورة 2) (دورة 3 قبل الغسل) (دورة 3 بعد الغسل)

الشكلIII . 3 : صور توضح طرق التصفية



الشكلIII .4 : منحنى بياني يوضح قيم التركيز للمركب 3 قبل وبعد الغسل

III .2. التفسير العلمي لمقارنة بين مركب 1 و 2 :

لها أعلى نسبة امتصاص قدرت بنسبة C1 من خلال دراستنا للمنحنى اظهرت لنا النتائج على أن العينة نتيجة امتلاكها C1 بنسبة 50% مما يدل على تحسن قدرة الامتصاص للعينة C3 55% مقارنة بالعينة لخصائص سطحية وبنيوية و فعالية امتزاز أفضل

الشكلIII .5 : تمثيل بياني يوضح نسبة الامتصاص للمركب 1 و 3

III .3. التفسير العلمي لغمر العينات في الاوساط الحمضية Hcl و H_2SO_4 :

تُعزى التغيرات الملحوظة في الخصائص الفيزيائية للعينات بعد الغمر لمدة 24 ساعة إلى تباين التفاعلات الكيميائية وفقاً لنوع الوسط الحمضي وتركيب العينة :

1. التباين حسب نوع الحمض

وسط حمض الهيدروكلوريك (Hcl): أبدت العينات استقراراً كيميائياً ملحوظاً؛ حيث اقتصر التأثير على تفاعلات سطحية طفيفة دون اختراق البنية البوليمرية، مما حافظ على السلامة الهيكلية للكتلة.

وسط حمض الكبريتيك (H2So4): سُجل تأثير تآكلي حاد ناتج عن الخواص المؤكسدة والمجففة للحمض. أدى ذلك إلى نزع الماء (Dehydration) والكربنة السطحية (Carbonization)، وهو ما يفسر التغمق اللوني الشديد وتفكك الروابط الكيميائية الداخلية.

2. أثر التركيب والنسب المئوية

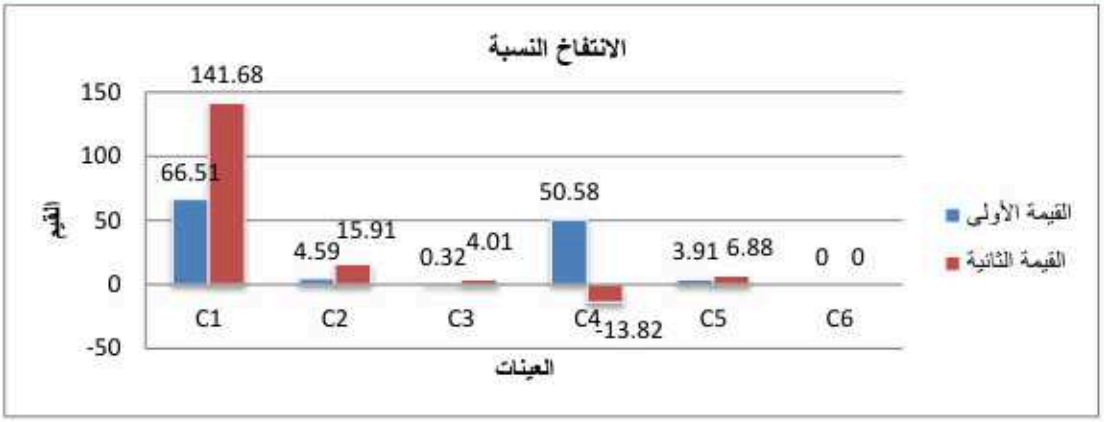
أظهرت العينات ذات التركيز العالي من البوليمر (75% و90%) انخفاضاً في المقاومة الكيميائية، ويُعزى ذلك إلى زيادة المسامية البينية أو انخفاض كثافة التشابك الجزيئي، مما سهّل نفاذ الأيونات الحامضية إلى عمق المادة وتسريع آلية التحلل.

3. ديناميكية التغير في الوزن

الزيادة: تشير إلى ظاهرة الانتفاخ (Swelling) نتيجة امتصاص الوسط الحمضي داخل المسامات.

النقصان: يشير إلى حدوث تدهور كيميائي (Degradation) وفقدان في المادة نتيجة التآكل أو الذوبان.

ومنه نستنتج أنه يتناسب معدل التدهور طردياً مع القوة التأكسدية للوسط الحمضي وعكسياً مع كثافة البنية الداخلية للعينة ، حيث يمثل حمض الكبريتيك الوسط الأكثر إجهاداً للمادة مقارنة بحمض الهيدروكلوريك. [45]



الشكل III .6 : تمثيل بياني يوضح عينات من البوليمار في الأوساط الحامضية في Hcl و H_2So_4

الشكلIII .7 : عينات من البوليمار في الأوساط الحامضية

خاتمة عامة

خاتمة عامة

في ختام هذا المحور، يتضح أن دراسة المبلمرات تمثل ركيزة أساسية لفهم التطورات الحديثة في مجال المواد، نظرًا لتنوع خصائصها وتعدد مجالات تطبيقها، وقد أبان التحليل النظري أن التقدم الكبير في تقنيات البلمرة مكّن من تصميم مواد ذات أداء ميكانيكي وكيميائي متطور، غير أن هذا التقدم تزامن مع تحديات بيئية متزايدة ناجمة عن الاعتماد المكثف على البوليمرات التقليدية المشتقة من الموارد الأحفورية، وهو ما يفرض ضرورة إعادة توجيه البحث العلمي نحو بدائل أكثر استدامة وصديقة للبيئة.

على ضوء النتائج المتحصل عليها يمكننا استخلاص ما يلي:

- إدماج هذه المخلفات ضمن مصفوفات بوليمرية لا يسهم فقط في تحسين الخصائص الوظيفية للمواد الناتجة، بل يندرج أيضًا ضمن مقاربة شاملة لتحقيق مبادئ الاقتصاد الدائري وتقليل الأثر البيئي للأنشطة الصناعية.
- المواد المركبة المدعمة بالألياف النباتية تمثل منظومة متعددة الأطوار ذات بنية معقدة، تتحكم فيها التفاعلات البينية بين المصفوفة البوليمرية وطور التقوية الليفي. وتبين أن الأداء النهائي لهذه المواد لا يرتبط فقط بطبيعة مكوناتها، بل يتحدد أيضًا بمجموعة من العوامل البنيوية والتكنولوجية، من بينها نسبة الأجتها,,,,,, الخ .
- أن المواد المركبة المدعمة بالألياف النباتية تمثل خيارًا بحثيا مهماا يجمع بين متطلبات الأداء التقني واعتبارات الاستدامة البيئية,
- يساعد ادخال الالياف النباتية في مصفوفة المبلمر في تحسين مقاومة هذه المواد للبيئة الصعبة (الاوساط الحمضية عالية التركيز) مما يوسع في مجالات استعالها.
- تحضير الاغشية من هذه المواد المركبة لغرض نزع الملونات من الماء يبدو اكثر كفاءة من استعمال الالياف النباتية لوحدها.

قائمة المراجع

قائمة المراجع :

باللغة العربية

[1]غربية و عبد العالي , استخدام المواد الممتزة من المخلفات الزراعية والصناعية في معالجة الملوثات: استدامة بيئية واقتصادية. مجلة العلوم والتكنولوجيا, 2025. 6(1): 106-97 .p.

[2] Naoui, B.B , تثمين المخلفات الزراعية ذات الأصل النباتي. جامعة ورقلة .

[3] محمد , ع , استغلال المخلفات الزراعية في التطبيقات الصناعية. جامعة جزائرية.

[4] أنور , ا.ح . م , المواد المركبة. المجلة الدولية للعلوم والتقنية , 2022.

[5] س., ع.ا.ح.ب., ب.أ. هـ., and ي.أ.ف. إ., المركبات البوليمرية المدعمة بالنانو سليلوز: مراجعة لطرق التحضير والخصائص والتطبيقات–Carbohydrate Polymers, 2012. 87(2) : p. 963 .979

باللغة الأجنبية :

[1] STAHL, G.A., A short history of polymer science. 1981, ACS Publications.

[2] Feldman, D., Polymer history. Designed monomers and polymers, 2008. 11(1): p. 1–15.

[3] Staudinger, H., The Foundation of Polymer Science. 1999, International Historic Chemical Landmark Washington, ACS.

[4] Chalmin, P., The history of plastics: from the Capitol to the Tarpeian Rock. Field actions science reports. The Journal of Field Actions, 2019(Special Issue 19): p. 6–11.

[5] Stanley, J., et al., The journey of plastics: historical development, environmental challenges, and the emergence of bioplastics for single-use products. Eng, 2025. 6(1): p. 17.

[6] Stevens, M.P., Polymer chemistry: an introduction. (No Title), 1999.

[7] Repinc, S.K., et al., Understanding bio-based polymers :A study of origins, properties, biodegradation and their impact on health and the environment. FEBS Open Bio, 2025.

[8] Drzal, L.T., Natural fibers, biopolymers, and biocomposites. 2005: CRC press.

[9] Callister Jr, W.D. and D.G. Rethwisch, Materials science and engineering: an introduction. 2020: John wiley & sons.
[10] Odian, G., Principles of polymerization. 2004: John Wiley & Sons.
[11] Niaounakis, M., Biopolymers: processing and products. 2014: William Andrew.
[12] Billmeyer, F.W., Textbook of polymer science. 1984: John Wiley & Sons.
[13] Sperling, L.H., Introduction to physical polymer science. 2015: John Wiley & Sons.
[14] Callister, W.D. and D.G. Rethwisch, Materials science and engineering: an introduction. 1999: Wiley New York.
[15] Stevens, M.P., Polymer chemistry: an introduction. 1990.
[16] Geyer, R., J.R. Jambeck, and K.L. Law, Production, use, and fate of all plastics ever made. Science advances, 2017. 3(7): p. e1700782.
[17] Samira, S., K. Islam, and A. Walid, A valorization of agricultural waste for the preparation of an environmentally sustainable material. Journal of Physical & Chemical Research, 2025. 4 (1) : p. 10–20.
[18] Reddy, A.S., et al., Sustainable agricultural waste management in India: Innovations, challenges, and future perspectives. Biomass and Bioenergy, 2025. 202: p. 108261.
[19] Sahi, S., I. Khalfi, and W. Assili, A valorization of agricultural waste for the preparation of an environmentally sustainable material. Journal of Physical & Chemical Research, 2025. 4.(1)
[20] Daniel, I.M., et al., Engineering mechanics of composite materials. Vol. 3. 1994: Oxford university press New York.
[21] Gibson, R.F., Principles of Composite Material Mechanics, ed. E. th. 2016, Boca Raton: CRC Press.
[22] Gibson, R.F., Principles of composite material mechanics. 2007: CRC press.
[23] Faruk, O., et al., Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. Progress in Polymer Science, 2012. 37(11): p. 1552–1596.
[24] Pickering, K.L., M.G.A. Efendy, and T.M. Le, A review of recent developments in natural fibre composites. Composites Part A, 2016. 83: p. 98–112.

[25] Jawaid, M. and H.P.S. Abdul Khalil, Cellulosic/synthetic fibre reinforced polymer hybrid composites: A review. Carbohydrate Polymers, 2011. 86(1): p. 1–18.

[26] Mohanty, A.K., M. Misra, and L.T. Drzal, Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites. 2005, Boca Raton: CRC Press.

[27] Hull, D. and T.W. Clyne, An Introduction to Composite Materials, ed. E. nd. 1996: Cambridge University Press.

[28] Kamarudin, S.H., A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composites (NFRPC): Processing techniques, challenges, properties and applications. Polymers, 2022.

[29] Kabir, M.M., et al., Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites. Composites Part B, 2012. 43(7): p. 2883–2892.

[30] Saba, N., et al., Mechanical and thermal properties of treated natural fiber reinforced polymer composites. Construction and Building Materials, 2016. 106: p. 149–159.

[31] https://netcomposites.com/guide/manufacturing/wet-hand-lay-up/

[32] https://www.eppcomposites.com/spray-layup-process.html

[33] Kendall KN, Rudd CD, Owen MJ,Middleton V. Characterization of the resin transfer moulding process.Composites Manufacturing, 1992;3(4):235-249. https://doi.org/10.1016/0956-7143(92)90111-7

[34] Heider D, Graf A, Fink Bruce K,Gillespie JW Jr. Feedback control of the vacuum-assisted resin transfer molding (VARTM) process. Process Control and Sensors for Manufacturing, 1999;II
(3589):133-141.
https://doi.org/10.1117/12.339956

[35] Frizelle WG. Injection molding technology. In: Kutz M, Andrew W,editors. Applied Plastics Engineering Handbook, USA: Elsevier; 2011. p. 2011 eBook ISBN: 9780323390415

[36] Minsch N, Herrmann FH, Gereke T,Nocke A, Cherif C. Analysis of filament winding processes and potential equipment technologies. Procedia CIRP, 2017;66:125-130.
https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.284

[**37**] Joshi SC. The pultrusion process for polymer matrix composites. In: Advani SG, Hsiao KT, editors, Manufacturing Techniques for Polymer Matrix Composites (PMCs). Cambridge, UK: Woodhead Publishing Limited;2012. ISBN: 978-0-85709-067-6

[**38**] Wilson BA. Pultrusion. In: Peters ST, editor. Handbook of Composites. Boston, MA: Springer; 1998. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-6389-1-24

[**39**] journal polymer degradation and stabilit article number 109941 p13 Early online date 18 apr 2022 ; Pub 30 Jun 2022

[**40**] Journal of Environmetal managment V286 ; 15 May