جمهورية العراق

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة بابل

كلية التربية للعلوم الصرفة

قسم الفيزياء

الخواص الميكانيكية للبوليمـــرات

بحث تقدمت به الطالبة

(سراب كاظم عنيد حسين)

الى مجلس قسم الفيزياء في كلية التربية للعلوم الصرفة

وهو جزء من متطلبات الحصول على شهادة البكالوريوس في الفيزياء

اشراف

أ. م . د . فرح جبار حمود

1447 هـ **2026 م**

بِسۡمِ ٱللَّهِ ٱلرَّحۡمَٰنِ ٱلرَّحِيمِ

﴿نَرْفَعُ دَرَجَاتٍ مَّن نَّشَاءُ ۗ وَفَوْقَ كُلِّ ذِي عِلْمٍ عَلِيمٌ ﴾

صدق الله العلي العظيم

الاهداء

الى من كانت ولا زالت النور الذي يضيئ طريقي , الى من علمتني الصبر والقوة رغم كل الظروف , امي الحبيبة

اهديك ثمرة جهدي ,فانت سر نجاحي.

وألى اخي العزيز سندي ورفيق دربي , شكرا لوقوفك الى جانبي بكل خطوة .

والى روح ابي الغالي والدي المتوفي ,رحمك اله وجعل الجنة دارك ,فانت مصدر قوتي وما زلت استمدها من ذكراك .اهدي لك هذا الإنجاز لعله يصل اليك دعاء وفخرا .

كيف لي ان انسى من علمني اول حرفا ؟اساتذتي الافاضل حفظكم الله من كل شر واطال في اعماركم .

والى جميع عائلتي الكريمة وألى أصدقائي الأعزاء ,شكرا لدعمكم ومحبتكم التي كانت دفعا لي للاستمرار .

شكر وتقدير

ولا يسعني وانا انجز بحثي , الا ان أتقدم بوافر الشكر والتقدير والامتنان لأستاذتي المشرفة (أ.م.د. فرح جبار حمود)

اسأل الله ان يطيل في عمرها ويمن عليها بالصحة والعافية .

والشكر موصول الى كل من ساندني ووقف بجانبي .

..... والله ولي التوفيق

الخلاصة

تناول البحث الدراسة النظرية للخواص الميكانيكية للبوليمرات حيث تعد دراسة هذه الخواص عملية معقدة بسبب الحساسية العالية للسلوك الميكانيكي تجاه مجموعة من العوامل الخارجية والداخلية وتتمثل العوامل الخارجية بدرجات الحرارة والزمن والضغط عند الاختبار و التعرض للاشعاع ، اما العوامل الداخلية فتتمثل بالبنية البلورية و درجة البلمرة ووجود الملونات ودرجة التشابك . هناك اعتماد كبير للخواص الميكانيكية للبوليمرات على درجة الحرارة و زمن التحمل مقارنة بالمواد الهندسية الاخرى الاقل تأثيراً بهذين العاملين و يعود سبب هذا الاعتماد على طبيعة البوليمر اللزجة المرنة فالبوليمرات تتسم بصفات السوائل اللزجة عند تسليط اجهاد عليها و ان الاجهاد يتلاشى على هيأة حرارة و عند رفع الاجهاد عنها تبقى في الحالة المشوهة وغير قادرة على اعادة مواصفاتها الاولية وفي نفس الوقت فان البوليمرات تمتاز بصفة المرونة اي عند فرض اجهاد ما عليها فانها تخزن الشغل المصروف عليها على هيأة طاقة مخزونة فتسترجع الابعاد الاولية للمادة حال زوال الاجهاد و تنشأ هذه الازدواجية في الخواص من طبيعة تركيب المواد البوليمرية اذ ان وجود نوعين من القوى و هي الاواصر التساهمية القوية داخل الجزيئات و الروابط الثانوية الضعيفة بين الجزيئات هي التي تؤثر في الخواص الميكانيكية بصورة عامة ان الخواص الميكانيكية تصف سلوك المواد البوليمرية و متراكباتها الواقعة تحت تأثير قوى مسلطة عليها

قائمة المحتويات

الاهداء ..... ج

شكر وتقدير ..... د

الخلاصة ..... ه

قائمة المحتويات ..... و

المقدمة 1

الفصل الاول 2

الخواص الميكانيكية للبوليمرات 2

1 - 1 تاريخ علم البوليمر 2

1 - 2 مفاهيم أساسية 3

1 - 2 - 2 المونومر 6

1 - 2 - 3 الوحدة التركيبية المتكررة 7

1 - 2 - 4 البلمرة 9

1 - 2 - 4 - 2 البلمرة التكثيفية 9

1 - 2 - 4 - 2 بلمرة الإضافة 11

1 - 3 تصنيف البوليمرات 12

1 - 3 - 1 التصنيف المعتمد على مصادر البوليمرات 14

1 - 3 - 1 البوليمرات الطبيعية 15

1 - 3 - 1 - 2 البوليمرات الطبيعية (المحور البنيوي والوظيفي) 17

1 - 3 - 1 - 3 البوليمرات المصنعة 18

1 - 3 - 2 التصنيف الكيميائي للبوليمرات : 18

1 - 3 - 2 - 1 البوليمرات الخطية : 19

1 - 3 - 1 - 2 البوليمرات المتفرعة : 21

1 - 3 - 2 - 3 البوليمرات المتشابكة 21

1 - 4 العوامل المحددة لصفات البوليمر 23

1 - 4 - 1 الوزن الجزيئي للبوليمر 23

1 - 4 - 2 طبيعة السلسلة الجزيئية 25
1 - 4 - 3 القوى الجزيئية.....25
الخلائط البوليمرية 1-5(Polymer Blends).....27
1 - 6 بولي فينيل الكحول(Polyvinyl Alcohol - PVA) 27
1 - 7 بوليمر ميثيل السليلوز(Methyl Cellulose - MC) 29
1 - 9 : تقنية النبضة(Pulse Technique) 30
الفصل الثاني 32
الخواص الميكانيكية للبوليمرات 32
2 - 1 مقدمة.....32
2 - 2 : سرعة الموجات فوق السمعية في البوليمرات.....32
2 - 3 : الاسترخاء في السوائل.....34
- 3 - 1 : الاسترخاء اللزوجي اللزوجة المرنة 2 34
2 - 3 - 2 : الاسترخاء الحراري.....35
2- 3 - 3 : الاسترخاء التركيبي.....36
2- 4 : الانضغاطية.....37
2- 5 : معامل المرونة 38
2- 6 : الممانعة الصوتية النوعية.....38
قائمة المصادر 39

المقدمة

تُعدّ البوليمرات من أهم المواد الهندسية الحديثة التي شهدت تطورًا كبيرًا في العقود الأخيرة، لما تمتاز به من تنوع واسع في خواصها الفيزيائية والميكانيكية، مما جعلها تدخل في العديد من التطبيقات الصناعية والطبية والهندسية. وتتكون البوليمرات من سلاسل جزيئية طويلة ناتجة عن ارتباط وحدات بنائية صغيرة تُعرف بالمونومرات، حيث يؤدي هذا التركيب الفريد إلى ظهور سلوك ميكانيكي مميز يجمع بين خصائص المواد الصلبة والسائلة.

تكتسب دراسة الخواص الميكانيكية للبوليمرات أهمية خاصة، إذ تحدد هذه الخواص مدى قدرة المادة على تحمل القوى الخارجية مثل الشد، والضغط، والانحناء، والصدمات، كما تؤثر بشكل مباشر على كفاءة وأداء المواد في التطبيقات العملية. وتعتمد هذه الخواص على عدة عوامل، من أهمها التركيب الجزيئي، وطبيعة الروابط بين السلاسل، ودرجة التبلور، والوزن الجزيئي، بالإضافة إلى تأثير درجة الحرارة والزمن

يهدف هذا البحث إلى دراسة الخواص الميكانيكية للبوليمرات بشكل مفصل، مع تسليط الضوء على العوامل المؤثرة فيها، وأنواع السلوك الميكانيكي، إضافة إلى أهم التطبيقات العملية التي تعتمد على هذه المواد في مختلف المجالات

الفصل الاول

الخواص الميكانيكية للبوليمرات

1 - 1 تاريخ علم البوليمر

يُعد علم البوليمرات من العلوم الحديثة نسبيًا، إلا أن جذوره تعود إلى استخدام الإنسان للمواد الطبيعية منذ القدم، حيث استُخدمت مواد مثل السليلوز والمطاط الطبيعي والبروتينات في مجالات متعددة دون فهم تركيبها الجزيئي

1. ـ المرحلة البدائية (قبل القرن التاسع عشر)

اعتمد الإنسان في هذه المرحلة على البوليمرات الطبيعية مثل القطن والصوف والمطاط، حيث كانت تُستخدم اعتمادًا على خواصها الفيزيائية فقط دون إجراء تعديلات كيميائية أو فهم علمي دقيق لطبيعتها

2 ـ بداية التطور العلمي (القرن التاسع عشر

شهد القرن التاسع عشر بداية التقدم الحقيقي في علم البوليمرات، حيث تم إدخال تعديلات كيميائية على المواد الطبيعية، ومن أبرز الإنجازات :

اكتشاف عملية الفلكنة للمطاط بواسطة تشارلز جوديير عام 1839، مما أدى إلى تحسين الخواص الميكانيكية للمطاط وزيادة مرونته ومقاومته للحرارة

تصنيع مادة السليلوز المعدل، والتي تُعد من أوائل المواد شبه الصناعية المستخدمة في التطبيقات التجارية

نشوء علم البوليمر الحديث (القرن العشرين)

يُعتبر القرن العشرون البداية الحقيقية لعلم البوليمرات الحديث، حيث وضع العالم هيرمان شتاودينغر مفهوم الجزيئات العملاقة (Macromolecules) عام 1920، موضحًا أن البوليمرات تتكون من سلاسل طويلة من الوحدات المتكررة المرتبطة بروابط تساهمية . وقد واجهت هذه النظرية معارضة في البداية، لكنها أصبحت لاحقًا أساس علم البوليمرات، مما أدى إلى حصوله على جائزة نوبل في الكيمياء عام 1953 تقديرًا لإسهاماته

تطور البوليمرات الصناعية

مع التقدم الصناعي، تم تطوير العديد من البوليمرات الصناعية ذات الخصائص الميكانيكية المتميزة، ومنها

البولي إيثيلين: يُستخدم في صناعة الأكياس والأنابيب

البولي ستايرين: يُستخدم في مواد التعبئة والعزل

النايلون: تم تطويره بواسطة والاس كاروثرز في شركةDuPont

ويُستخدم في الألياف الصناعية

.البوليمرات الحديثة والتقنيات المتقدمة

1 - 2 مفاهيم أساسية

يُعد فهم المفاهيم الأساسية في علم البوليمرات ضروريًا لدراسة خواصها الميكانيكية، إذ ترتبط هذه الخواص بشكل مباشر بتركيب البوليمر وطبيعة الروابط بين وحداته البنائية

البوليمر(Polymer)

يُعرّف البوليمر بأنه مادة كيميائية تتكون من سلاسل طويلة من وحدات متكررة تُسمى مونومرات، ترتبط فيما بينها بروابط تساهمية لتشكّل جزيئات كبيرة تُعرف بالجزيئات العملاقة (Macromolecules)

تتميز البوليمرات بخصائص فريدة مثل المرونة، وقابلية التشكيل، ومقاومة الكسر، مما يجعلها مواد أساسية في العديد من التطبيقات الصناعية

تمثل الوحدة التركيبية المتكررة الجزء الأساسي الذي يتكرر داخل سلسلة البوليمر، وهي ناتجة عن ارتباط المونومرات مع بعضها .

وتُحدد طبيعة هذه الوحدة العديد من خواص البوليمر، مثل الصلابة والمرونة ودرجة الانصهار

البلمرة(Polymerization)

تُعرف البلمرة بأنها العملية الكيميائية التي يتم من خلالها ربط المونومرات لتكوين سلاسل بوليمرية طويلة

وتنقسم البلمرة إلى نوعين رئيسيين .

بلمرة الإضافة(Addition Polymerization)

هي عملية يتم فيها إضافة المونومرات دون فقدان أي جزء من الجزيء، وغالبًا ما تكون المونومرات غير مشبعة (تحتوي على روابط مزدوجة)

البوليمرات

تُعد البوليمرات من أهم المواد الهندسية الحديثة، لما تتمتع به من تنوع كبير في الخواص الميكانيكية والفيزيائية، مما يجعلها تدخل في مختلف التطبيقات الصناعية والطبية والهندسية

تعريف البوليمرات

تُعرف البوليمرات بأنها مركبات كيميائية ذات أوزان جزيئية عالية، تتكون من سلاسل طويلة من وحدات متكررة (مونومرات) مرتبطة بروابط تساهمية

وتُظهر هذه المواد سلوكًا ميكانيكيًا مميزًا يجمع بين خصائص المواد الصلبة والسائلة، مثل المرونة واللدونة وقابلية الاستطالة (3)

تصنيف البوليمرات

يمكن تصنيف البوليمرات بعدة طرق اعتمادًا على طبيعتها وتركيبها :

حسب المصدر

بوليمرات طبيعية: مثل السليلوز والمطاط الطبيعي

بوليمرات صناعية: مثل البولي إيثيلين والبولي ستايرين

حسب التركيب البنيوي

بوليمرات خطية: تتكون من سلاسل مستقيمة، وتتميز بقابليتها للانصهار وإعادة التشكيل

بوليمرات متفرعة: تحتوي على تفرعات جانبية تؤثر على الكثافة والخواص الميكانيكية

بوليمرات شبكية (متشابكة): تحتوي على روابط عرضية بين السلاسل، مما يمنحها صلابة عالية ومقاومة للحرارة

حسب السلوك الحراري

لدائن حرارية :(Thermoplastics) تلين بالحرارة ويمكن إعادة تشكيلها مثل البولي إيثيلين

لدائن متصلدة حراريًا :(Thermosets) لا يمكن إعادة تشكيلها بعد التصلب بسبب التشابك الشبكي

حسب الخواص الميكانيكية

مواد مرنة :(Elastomers) مثل المطاط، تتميز بقدرتها على العودة إلى شكلها الأصلي بعد إزالة الحمل

مواد صلبة :(Plastics) تمتاز بالصلابة والمتانة وتُستخدم في التطبيقات الهيكلية

التركيب الجزيئي للبوليمرات

يتكون البوليمر من سلاسل طويلة من المونومرات المرتبطة بروابط تساهمية قوية، بينما ترتبط هذه السلاسل مع بعضها بقوى بين جزيئية أضعف

ويؤثر هذا التركيب على الخواص الميكانيكية مثل : مقاومة الشد ، الصلابة ، الاستطالة ، المتانة

حيث أن زيادة طول السلسلة أو وجود روابط عرضية يزيد من قوة البوليمر

سلوك البوليمرات تحت الإجهاد

1 - 2 - 2 المونومر

يُعد المونومر الوحدة الأساسية في بناء البوليمرات، حيث يُمثل الجزيء الصغير القادر على الارتباط كيميائيًا مع جزيئات أخرى مماثلة لتكوين سلاسل طويلة تُعرف بالبوليمرات .

وتكمن أهمية المونومر في أنه يحدد بشكل مباشر طبيعة وخواص البوليمر الناتج، بما في ذلك الخواص الميكانيكية مثل الصلابة والمرونة والمتانة

تعريف المونومر

يُعرّف المونومر بأنه مركب كيميائي منخفض الوزن الجزيئي يحتوي على مواقع نشطة (مثل الروابط المزدوجة أو المجموعات الوظيفية) تمكّنه من الدخول في تفاعلات البلمرة لتكوين سلاسل بوليمرية

خصائص المونومرات

- تتميز المونومرات بعدة خصائص تؤثر في سلوكها أثناء البلمرة، ومنها
- الفعالية الكيميائية: تحدد قدرة المونومر على التفاعل والارتباط
- التركيب الجزيئي: يؤثر في شكل السلسلة البوليمرية الناتجة
- نوع الروابط: مثل الروابط المزدوجة أو المجموعات الوظيفية التي تحدد نوع البلمرة
- الكتلة الجزيئية: تكون منخفضة مقارنة بالبوليمرات

أنواع المونومرات

يمكن تصنيف المونومرات إلى عدة أنواع حسب طبيعتها الكيميائية

مونومرات غير مشبعة

تحتوي على روابط مزدوجة(C=C) ، وتدخل في بلمرة الإضافة بسهولة

مثال : الإيثيلين ← يُكوّن البولي إيثيلين

مونومرات ذات مجموعات وظيفية

تحتوي على مجموعات مثل(–OH ، –COOH، (–NH_2، وتدخل في بلمرة التكاثف [2

مثال : الأحماض الكربوكسيلية والأمينات ← تُكوّن النايلون (6)

دور المونومر في تحديد خواص البوليمر

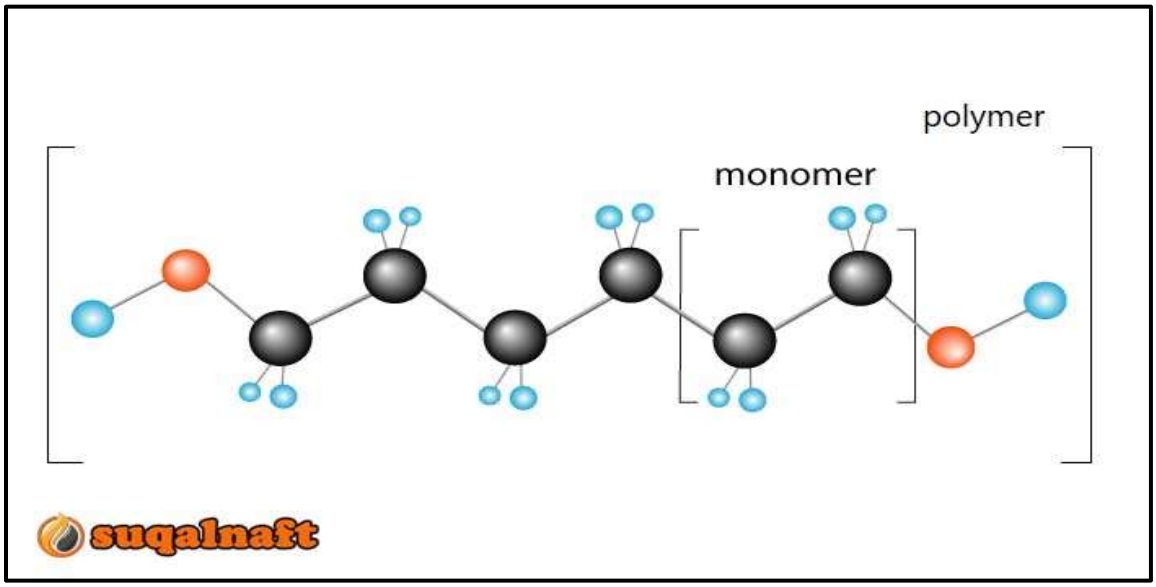
يؤثر نوع المونومر بشكل مباشر على الخواص النهائية للبوليمر، ومن أهم هذه التأثيرات

- الصلابة والمرونة: المونومرات ذات التركيبات الصلبة تعطي بوليمرات أكثر صلابة
- درجة التبلور: تؤثر في الكثافة والقوة الميكانيكية
- مقاومة الحرارة: تعتمد على طبيعة الروابط في المونومر

تُعد المونومرات الأساس في الصناعات البوليمرية، حيث يتم اختيارها بعناية للحصول على خصائص محددة تناسب التطبيقات المختلفة مثل :

الصناعات البلاستيكية ، الألياف الصناعية ، المواد العازلة ، التطبيقات الطبية

ويؤدي التحكم في نوع المونومر وتركيبه إلى إنتاج مواد بخصائص ميكانيكية محسنة



شكل(1) :الفرق بين البوليمر و المونومر

1 - 2 - 3 الوحدة التركيبية المتكررة

تُعد الوحدة التركيبية المتكررة من أهم المفاهيم الأساسية في علم البوليمرات، حيث تمثل الجزء البنيوي الذي يتكرر على طول السلسلة البوليمرية، وينتج عن ارتباط جزيئات المونومر مع بعضها أثناء عملية البلمرة

تُعرّف الوحدة التركيبية المتكررة بأنها أصغر جزء في السلسلة البوليمرية يعبر عن التركيب الكيميائي المتكرر للبوليمر، والذي يتكرر عددًا كبيرًا من المرات ليكوّن الجزيء العملاق

وتُكتب عادةً بين قوسين مع الإشارة إلى عدد مرات التكرار(n) ، مما يدل على درجة البلمرة

العلاقة بين المونومر والوحدة المتكررة

لا تكون الوحدة التركيبية المتكررة دائمًا مطابقة تمامًا للمونومر، حيث قد يحدث تغير في التركيب الكيميائي أثناء البلمرة

في بلمرة الإضافة: تكون الوحدة المتكررة مشابهة للمونومر مع فقدان الرابطة المزدوجة

في بلمرة التكاثف: تختلف الوحدة المتكررة بسبب فقدان جزيئات صغيرة مثل الماء أو الكحول

أمثلة على الوحدات التركيبية المتكررة

في البولي إيثيلين:

الوحدة المتكررة هي.[4] $(–CH_2–CH_2–)$

في البولي ستايرين

الوحدة المتكررة تحتوي على مجموعة فينيل مرتبطة بالسلسلة في النايلون

تتكون الوحدة المتكررة من مجموعات أميد ناتجة عن بلمرة تكاثفية

أهمية الوحدة التركيبية في تحديد الخواص

تلعب الوحدة التركيبية المتكررة دورًا أساسيًا في تحديد خواص البوليمر، ومنها

الخواص الميكانيكية: مثل الصلابة والمتانة والمرونة

الخواص الحرارية: مثل درجة الانصهار ودرجة الانتقال الزجاجي

الخواص الكيميائية: مثل مقاومة المواد الكيميائية والتآكل

فكلما كانت الوحدة المتكررة أكثر انتظامًا، زادت قابلية البوليمر للتبلور وبالتالي ازدادت صلابته

تأثير ترتيب الوحدات المتكررة

1 - 2 - 4 البلمرة

تُعد البلمرة العملية الأساسية في تكوين البوليمرات، حيث يتم من خلالها ربط جزيئات المونومر الصغيرة لتكوين سلاسل طويلة تُعرف بالبوليمرات، والتي تمتلك خواص ميكانيكية مميزة مثل المتانة والمرونة

تعريف البلمرة

تُعرّف البلمرة بأنها تفاعل كيميائي يتم فيه اتحاد عدد كبير من المونومرات لتكوين جزيء كبير عالي الوزن الجزيئي يُسمى البوليمر

وتحدث هذه العملية عبر تكوين روابط تساهمية بين الوحدات المتكررة، مما يؤدي إلى تكوين سلاسل مستقرة كيميائيًا

أنواع البلمرة

1 - 2 - 4 - 2 البلمرة التكثيفية

تُعد البلمرة التكثيفية (Condensation Polymerization) من أهم طرق تحضير البوليمرات، حيث يتم فيها اتحاد جزيئات المونومر مع فقدان جزيئات صغيرة مثل الماء أو الكحول، مما يؤدي إلى تكوين سلاسل بوليمرية ذات تركيب مميز وخواص ميكانيكية مهمة (8)

تعريف البلمرة التكثيفية

تُعرّف البلمرة التكثيفية بأنها تفاعل كيميائي تدريجي (Step-growth) يتم فيه اتحاد مونومرين أو أكثر يحتويان على مجموعات وظيفية فعالة، وينتج عن هذا الاتحاد تكوين بوليمر مع انطلاق جزيئات صغيرة كنواتج ثانوية

آلية البلمرة التكثيفية

تعتمد هذه العملية على تفاعل المجموعات الوظيفية مثل :

مجموعة الكربوكسيل(–COOH)

مجموعة الهيدروكسيل(–OH)

مجموعة الأمين($-NH_2$)

حيث تتفاعل هذه المجموعات لتكوين روابط جديدة مثل الروابط الإستيرية أو الأميدية، مع خروج جزيئات صغيرة

وتتميز هذه البلمرة بأنها لا تحتاج إلى مراكز نشطة كما في بلمرة الإضافة، بل تحدث بشكل تدريجي بين الجزيئات

خصائص البلمرة التكثيفية

تفاعل بطيء نسبيًا مقارنة ببلمرة الإضافة

يعتمد على وجود مجموعتين وظيفيتين أو أكثر في المونومر

ينتج عنه نواتج ثانوية (مثل الماء)

يتطلب دقة في التحكم بنسبة المونومرات للحصول على وزن جزيئي عالٍ

أمثلة على البوليمرات التكثيفية

النايلون: يتكون من تفاعل الأحماض الكربوكسيلية مع الأمينات

البولي إسترات: تنتج من تفاعل الأحماض مع الكحولات

الراتنجات الفينولية: تُستخدم في المواد العازلة واللاصقة

تأثير البلمرة التكثيفية على الخواص الميكانيكية : تؤثر هذه العملية بشكل مباشر على الخواص الميكانيكية للبوليمرات، حيث تؤدي الروابط القوية (مثل الأميدية) إلى زيادة المتانة

يساهم انتظام السلسلة في تحسين مقاومة الشد

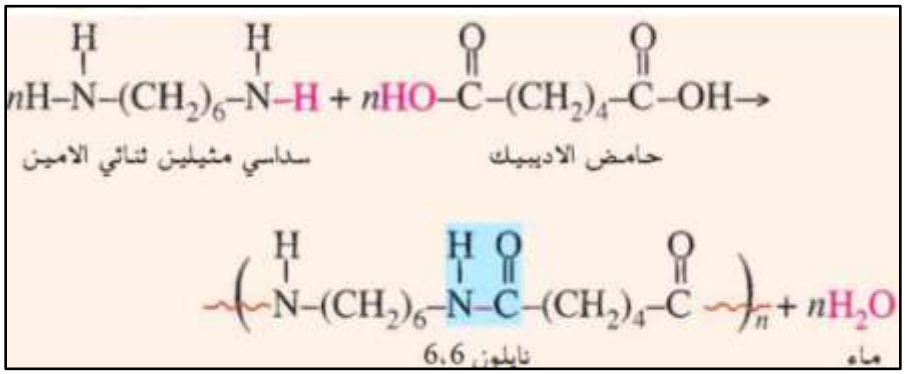
تؤثر درجة البلمرة على الصلابة والمرونة

كما أن وجود روابط بين السلاسل . (Cross-linking) يزيد من الصلابة ويقلل من القابلية للتمدد

التطبيقات الصناعية للبلمرة التكثيفية

تُستخدم البوليمرات الناتجة من هذه العملية في العديد من المجالات، منها صناعة الألياف الصناعية (مثل النايلون)

الصناعات البلاستيكية ، المواد العازلة كهربائيًا وحراريًا ، الصناعات الهندسية عالية الأداء



شكل (2) : البلمرة التكثيفية

1 - 2 - 4 - 2 بلمرة الإضافة

تُعد بلمرة الإضافة (Addition Polymerization) من أهم طرق تحضير البوليمرات الصناعية، حيث يتم فيها اتحاد جزيئات المونومر غير المشبعة لتكوين سلاسل طويلة دون فقدان أي جزيئات صغيرة، مما يؤدي إلى تكوين بوليمرات ذات خواص ميكانيكية مميزة

: تعريف بلمرة الإضافة

تُعرّف بلمرة الإضافة بأنها تفاعل كيميائي يتم فيه إضافة المونومرات المحتوية على روابط مزدوجة (C=C)إلى بعضها البعض لتكوين بوليمر، دون تكوّن نواتج ثانوية

آلية بلمرة الإضافة

تتم هذه العملية عادةً عبر تفاعل متسلسل (Chain Reaction) يمر بثلاث مراحل رئيسية

مرحلة البدء(Initiation)

يتم فيها تكوين مركز نشط (جذر حر أو أيون) لبدء التفاعل

مرحلة النمو(Propagation)

تُضاف جزيئات المونومر بشكل متتابع إلى السلسلة النامية، مما يؤدي إلى زيادة طول السلسلة البوليمرية

مرحلة الإنهاء(Termination)

تنتهي السلسلة عند اتحاد الجذور الحرة أو توقف النشاط الكيميائي

خصائص بلمرة الإضافة لا تنتج نواتج ثانوية ،تتم بسرعة عالية نسبيًا ، تعتمد على مونومرات غير مشبعة ، تُنتج بوليمرات ذات أوزان جزيئية عالية

تأثير بلمرة الإضافة على الخواص الميكانيكية

تلعب هذه العملية دورًا مهمًا في تحديد الخواص الميكانيكية للبوليمرات، حيث يزيد طول السلسلة من قوة الشد والمتانة

يؤثر انتظام السلسلة في الصلابة والمرونة

يؤدي التفرع في السلاسل إلى تقليل الكثافة وزيادة المرونة

كما أن التحكم في ظروف البلمرة يسمح بإنتاج مواد بخصائص مختلفة تناسب التطبيقات الصناعية .

1 - 3 تصنيف البوليمرات

يُعد تصنيف البوليمرات من الأسس المهمة لفهم سلوكها وخواصها الميكانيكية، إذ يتم تقسيم البوليمرات إلى أنواع مختلفة اعتمادًا على المصدر، والتركيب، والسلوك الحراري، والخواص الميكانيكية

: التصنيف حسب المصدر

- بوليمرات طبيعية : هي البوليمرات التي توجد في الطبيعة دون تدخل صناعي، مثل السليلوز والمطاط الطبيعي
- بوليمرات صناعية : يتم إنتاجها بعمليات كيميائية صناعية، مثل البولي إيثيلين والبولي ستايرين
- التصنيف حسب التركيب البنيوي

- بوليمرات خطية : تتكون من سلاسل مستقيمة، وتتميز بإمكانية الانزلاق بين السلاسل، مما يمنحها مرونة نسبية
- بوليمرات متفرعة : تحتوي على سلاسل جانبية تؤثر في الكثافة والخواص الميكانيكية
- بوليمرات شبكية (متشابكة) تحتوي على روابط عرضية بين السلاسل، مما يزيد من الصلابة ومقاومة الحرارة

التصنيف حسب السلوك الحراري

اللدائن الحرارية(Thermoplastics)

هي مواد تلين عند التسخين ويمكن إعادة تشكيلها عدة مرات، مثل البولي إيثيلين .

اللدائن المتصلدة حراريًا(Thermosets)

تتصلب بشكل دائم ولا يمكن إعادة تشكيلها بسبب وجود روابط تشابكية قوية

التصنيف حسب الخواص الميكانيكية

الإيلاستومرات(Elastomers)

وهي بوليمرات مرنة مثل المطاط، تتميز بقدرتها على الاستطالة والعودة إلى شكلها الأصلي

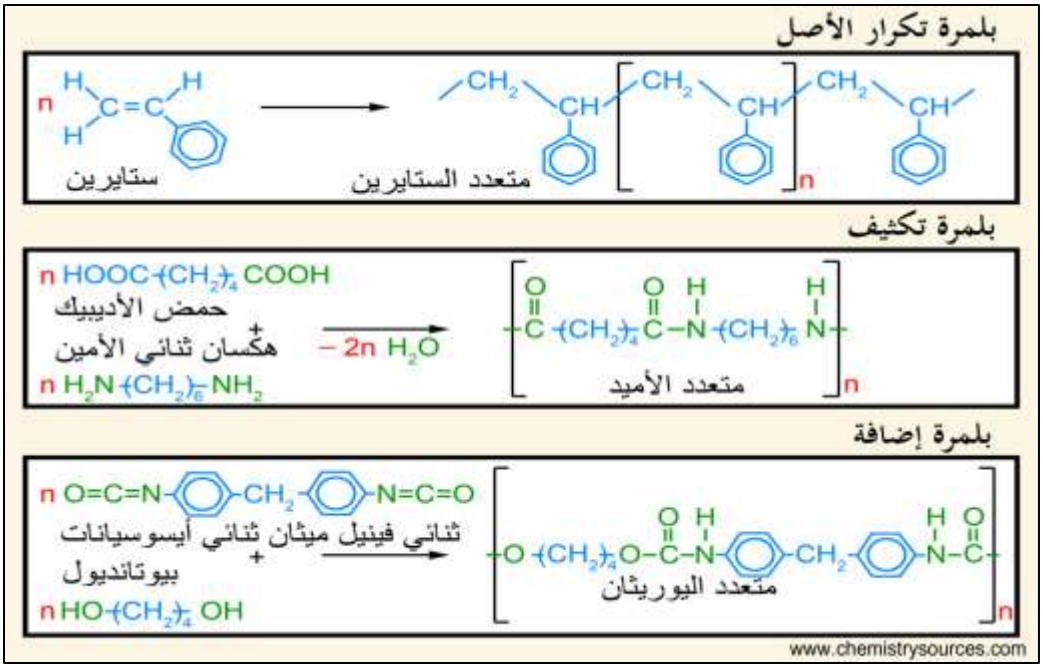
البلاستيك(Plastics)

مواد تتميز بالصلابة والمتانة، وتُستخدم في التطبيقات الصناعية المختلفة

الألياف(Fibers)

بوليمرات متبلورة : تحتوي على مناطق مرتبة، مما يزيد من الصلابة والقوة الميكانيكية

بوليمرات غير متبلورة : تكون سلاسلها عشوائية، مما يمنحها مرونة أكبر



شكل (3) : بعض انواع البوليمرات

1 - 3 - 1 التصنيف المعتمد على مصادر البوليمرات

يُعد التصنيف المعتمد على مصادر البوليمرات من أهم طرق التصنيف، إذ يعتمد على أصل المادة الخام المستخدمة في تكوين البوليمر، سواء كانت طبيعية أو صناعية أو شبه صناعية، وهذا التصنيف يساعد في فهم خصائص المادة وسلوكها الميكانيكي ومدى ملاءمتها للتطبيقات المختلفة (11) .[

البوليمرات الطبيعية(Natural Polymers)

هي البوليمرات التي تتواجد في الطبيعة دون تدخل بشري مباشر، وتُنتجها الكائنات الحية مثل النباتات والحيوانات .

أمثلة : السليلوز الموجود في النباتات ، المطاط الطبيعي المستخرج من أشجار المطاط ، البروتينات مثل الحرير والصوف .

الخصائص :

قابلة للتحلل الحيوي ، متوفرة طبيعيًا ، خواص ميكانيكية محدودة مقارنة بالصناعية

البوليمرات الصناعية(Synthetic Polymers) :

هي بوليمرات يتم تصنيعها كيميائيًا من مواد أولية مشتقة من النفط أو الغاز الطبيعي عبر عمليات البلمرة .

أمثلة : البولي إيثيلين ، البولي ستايرين ، النايلون

الخصائص : مقاومة عالية ، قابلة للتشكيل ، تنوع كبير في الخواص الميكانيكية ، تكلفة إنتاج منخفضة نسبيًا

البوليمرات شبه الصناعية(Semi-synthetic Polymers) :

هي بوليمرات طبيعية تم تعديلها كيميائيًا لتحسين خواصها الفيزيائية والميكانيكية.

أمثلة : السليلوز المعدل ، السليلوز الأسيتاتي المستخدم في الأفلام والأنسجة

الخصائص : تجمع بين خصائص الطبيعية والصناعية ، تحسين في المتانة ومقاومة الماء ، أكثر استقرارًا من البوليمرات الطبيعية

1 - 3 - 1 البوليمرات الطبيعية

تُعد البوليمرات الطبيعية من أقدم أنواع المواد البوليمرية التي عرفها الإنسان، حيث تتواجد في الكائنات الحية نباتية كانت أم حيوانية، وتلعب دورًا أساسيًا في بناء الخلايا والأنسجة، كما تتميز بخصائص ميكانيكية حيوية مهمة مثل المرونة والقوة والقدرة على التحلل الحيوي

تعريف البوليمرات الطبيعية :

هي بوليمرات تتكون بشكل طبيعي داخل الكائنات الحية دون تدخل صناعي، وتنتج عبر عمليات حيوية داخل الخلايا، مثل عمليات البناء الضوئي أو التخليق الحيوي للبروتينات .

وتتكون من وحدات متكررة (مونومرات) ترتبط معًا بواسطة روابط كيميائية لتكوين سلاسل طويلة ذات خواص ميكانيكية محددة

أنواع البوليمرات الطبيعية :

- الكربوهيدرات(Carbohydrate Polymers) :

مثل السليلوز والنشا، وهي من أكثر البوليمرات الطبيعية انتشارًا في النباتات

السليلوز: يعطي الصلابة لجدران الخلايا النباتية

النشا: يمثل مخزون الطاقة في النباتات

- البروتينات(Proteins)

هي بوليمرات مكونة من أحماض أمينية، وتؤدي وظائف بنيوية وإنزيمية في الكائنات الحية

أمثلة : الكولاجين (في الجلد والعظام) ، الكيراتين (في الشعر والأظافر) ، الحرير

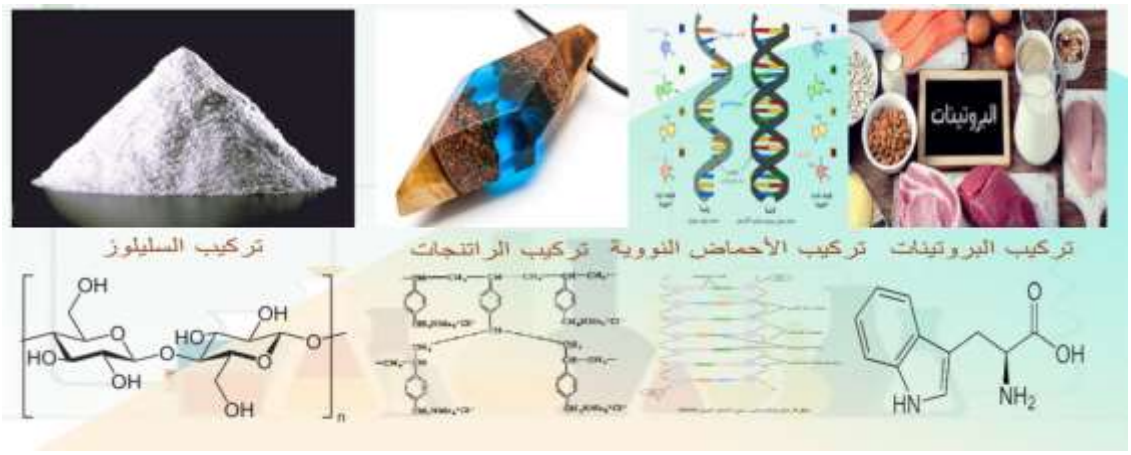
البوليمرات الطبيعية المطاطية :

مثل المطاط الطبيعي، والذي يُستخرج من أشجار المطاط ويتميز بمرونة عالية وقدرة كبيرة على الاستطالة والعودة إلى الشكل الأصلي

الأحماض النووية :

مثل DNA وRNA وهي بوليمرات حيوية مسؤولة عن نقل المعلومات الوراثية داخل الخلايا

الخواص الميكانيكية للبوليمرات الطبيعية



شكل (3): بعض انواع البولمرات الطبيعية

1 - 3 - 1 - 2 البوليمرات الطبيعية (المحور البنيوي والوظيفي)

تُعد البوليمرات الطبيعية من أهم المواد الحيوية في الطبيعة، إذ تمتاز بتركيبها البنيوي المعقد ووظائفها الحيوية المتعددة، وتختلف خواصها الميكانيكية باختلاف نوعها وترتيب وحداتها البنائية وطبيعة الروابط بين سلاسلها (12)

المحور البنيوي للبوليمرات الطبيعية

يقصد بالمحور البنيوي طريقة تنظيم وترتيب سلاسل البوليمر داخل المادة، وهو عامل أساسي في تحديد الخواص الميكانيكية مثل الصلابة والمرونة ومقاومة الشد .

وتتكون البوليمرات الطبيعية من سلاسل طويلة من وحدات متكررة (مونومرات) ترتبط بروابط تساهمية، بينما ترتبط السلاسل فيما بينها بقوى بين جزيئية مثل الروابط الهيدروجينية وقوى فان دير فالس

المحور الوظيفي للبوليمرات الطبيعية :

يرتبط المحور الوظيفي بالدور الحيوي أو الفيزيائي الذي تؤديه البوليمرات داخل الكائن الحي، حيث لا تقتصر وظيفتها على البناء فقط بل تشمل الدعم والحماية ونقل المعلومات

أهم البوليمرات الطبيعية حسب المحور البنيوي والوظيفي

السليلوز : يُعد السليلوز من أكثر البوليمرات الطبيعية انتشارًا في النباتات، ويشكل المكون الأساسي لجدران الخلايا النباتية (3)

. المطاط الطبيعي يُعد المطاط الطبيعي بوليمر مرن يُستخرج من أشجار المطاط، ويتميز بقدرته العالية على الاستطالة

البروتينات تُعد البروتينات بوليمرات حيوية تتكون من أحماض أمينية، وتؤدي وظائف بنيوية ووظيفية داخل الجسم .

الأحماض النووية :

مثل DNA وRNA وهي بوليمرات مسؤولة عن نقل المعلومات الوراثية

، سلاسل مزدوجة أو مفردة ، روابط هيدروجينية بين القواعد النيتروجينية

المحور الوظيفي :تخزين ونقل المعلومات الوراثية

العلاقة بين المحور البنيوي والخواص الميكانيكية :

تتأثر الخواص الميكانيكية للبوليمرات الطبيعية بشكل مباشر بالبنية الداخلية، حيث الانتظام البنيوي يزيد من الصلابة كما في السليلوز، عدم الانتظام يزيد المرونة كما في المطاط الطبيعي ، الروابط الهيدروجينية تزيد من مقاومة الشد

التشابك بين السلاسل يرفع المتانة

1 - 3 - 1 - 3 البوليمرات المصنعة

تُعد البوليمرات الصناعية أو المصنعة من أهم إنجازات الكيمياء الحديثة، حيث يتم إنتاجها بشكل صناعي من مواد أولية مثل النفط والغاز الطبيعي عبر عمليات البلمرة، بهدف الحصول على مواد ذات خواص ميكانيكية وفيزيائية محددة تناسب الاستخدامات الهندسية المختلفة .

تعريف البوليمرات المصنعة :

هي بوليمرات يتم تحضيرها صناعيًا داخل المختبرات أو المصانع من مونومرات بسيطة، وتتميز بإمكانية التحكم في تركيبها الجزيئي وخواصها النهائية مثل الصلابة والمرونة ومقاومة الحرارة

مصادر البوليمرات المصنعة :

تعتمد البوليمرات المصنعة بشكل أساسي على النفط الخام الغاز الطبيعي مشتقات البتروكيمياويات

حيث يتم تحويل هذه المواد إلى مونومرات ثم إدخالها في تفاعلات بلمرة للحصول على البوليمر النهائي .

1 - 3 - 2 التصنيف الكيميائي للبوليمرات :

يُعد التصنيف الكيميائي للبوليمرات من أهم أساليب دراسة البوليمرات، إذ يعتمد على طبيعة التركيب الكيميائي للوحدات البنائية (المونومرات) ونوع الروابط الموجودة في السلسلة البوليمرية، مما ينعكس بشكل مباشر على الخواص الميكانيكية والحرارية والكيميائية .

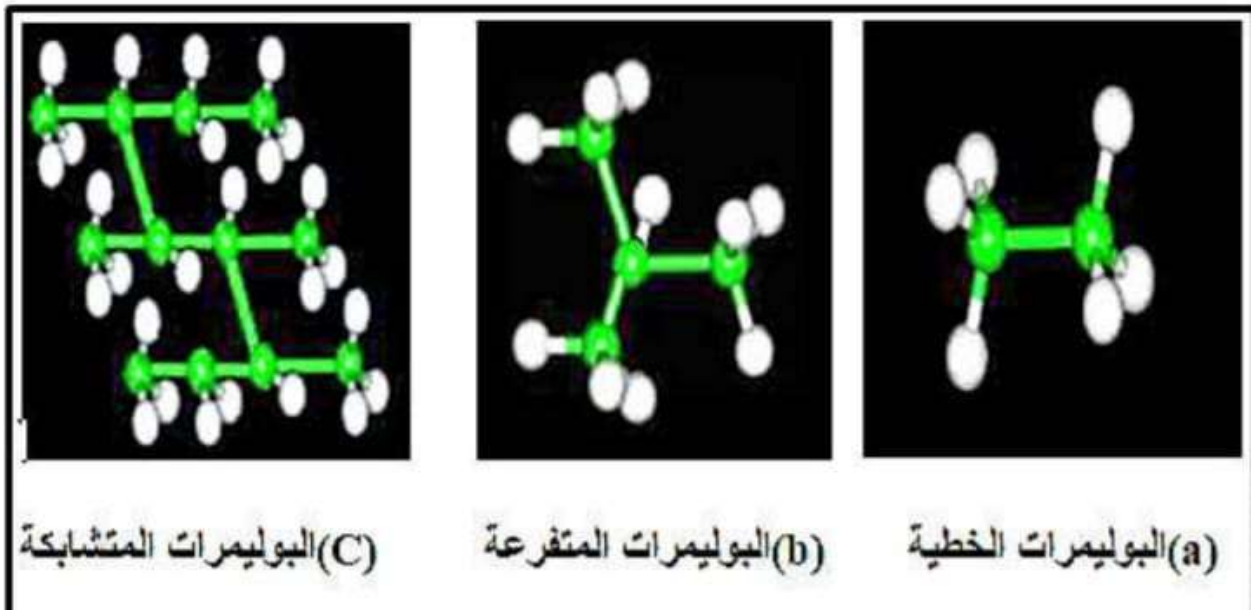
مفهوم التصنيف الكيميائي : يقوم هذا التصنيف على تحديد نوع الذرات والمجموعات الوظيفية في سلسلة البوليمر، وكذلك طبيعة الروابط بين الوحدات المتكررة، مما يساعد في فهم سلوك المادة تحت الظروف المختلفة

البوليمرات الهيدروكربونية : هي بوليمرات تتكون فقط من عنصري الكربون والهيدروجين، وتتميز ببساطة تركيبها الكيميائي

أمثلة : البولي إيثيلين ، البولي ستايرين

1 - 3 - 2 - 1 البوليمرات الخطية :

تُعد البوليمرات الخطية أحد أهم الأشكال البنيوية في علم البوليمرات، حيث تتكون من سلاسل طويلة مستقيمة من وحدات المونومر المرتبطة بروابط تساهمية دون وجود تفرعات جانبية كبيرة أو تشابك شبكي، مما يؤثر بشكل مباشر على الخواص الميكانيكية والفيزيائية للمادة .



شكل(4): انواع البوليمرات

تعريف البوليمرات الخطية :

هي بوليمرات تتكون من سلاسل جزيئية طويلة وممتدة بشكل شبه مستقيم، تكون فيها الوحدات المتكررة مرتبطة بشكل متتابع، دون وجود تفرعات كبيرة أو روابط عرضية بين السلاسل

التركيب البنيوي للبوليمرات الخطية يتميز التركيب البنيوي لها بما يلي سلاسل طويلة مستقيمة أو شبه مستقيمة

قوى بين جزيئية (فان دير فالس أو روابط هيدروجينية) بين السلاسل

إمكانية انزلاق السلاسل فوق بعضها البعض عند تعرضها للإجهاد

هذا التنظيم البنيوي يجعلها قابلة للتشكيل وإعادة التدوير في بعض الحالات .

: أمثلة على البوليمرات الخطية

البولي إيثيلين (بأنواعه منخفض وعالي الكثافة)

البولي ستايرين ، النايلون (في بعض أنواعه الخطية)

الخواص الميكانيكية للبوليمرات الخطية : تتميز البوليمرات الخطية بعدة خواص ميكانيكية مهمة، منها

مرونة متوسطة إلى عالية بسبب قدرة السلاسل على الانزلاق ،قابلية للتشكيل الحراري (خاصة في اللدائن الحرارية)

قوة شد تعتمد على الترتيب البلوري للسلاسل ، انخفاض الصلابة مقارنة بالبوليمرات المتشابك.

تأثير البنية الخطية على الأداء الميكانيكي : تؤثر البنية الخطية بشكل مباشر على سلوك البوليمر، حيث زيادة الانتظام بين السلاسل يؤدي إلى زيادة التبلور وبالتالي زيادة الصلابة ضعف التشابك يسمح بزيادة المرونة

ارتفاع درجة الحرارة يسهل حركة السلاسل ويقلل المقاومة الميكانيكية .

1 - 3 - 1 - 2 البوليمرات المتفرعة :

تُعد البوليمرات المتفرعة نوعًا مهمًا من البنى البوليمرية، حيث تمتاز بوجود سلاسل جانبية (تفرعات) مرتبطة بالسلسلة الرئيسية، مما يؤثر بشكل واضح على الخواص الميكانيكية مثل الكثافة، المرونة، وقوة الشد

تعريف البوليمرات المتفرعة :

هي بوليمرات تتكون من سلسلة رئيسية طويلة ترتبط بها سلاسل جانبية قصيرة أو طويلة، ناتجة عن طريقة التفاعل أثناء البلمرة، حيث تؤدي هذه التفرعات إلى تغيير في انتظام البنية مقارنة بالبوليمرات الخطية

: أمثلة على البوليمرات المتفرعة

البولي إيثيلين منخفض الكثافة(LDPE) بعض أنواع البولي ستايرين المعدل

بوليمرات صناعية تحتوي على تفرعات عشوائية أثناء التصنيع

1 - 3 - 2 - 3 البوليمرات المتشابكة

تُعد البوليمرات المتشابكة (Cross-linked Polymers) من أهم البنى البوليمرية ذات الأداء الميكانيكي العالي، حيث تتكون من سلاسل بوليمرية مرتبطة فيما بينها بروابط كيميائية عرضية، مما يؤدي إلى تكوين شبكة ثلاثية الأبعاد ذات صلابة ومقاومة عالية

تعريف البوليمرات المتشابكة

هي بوليمرات تحتوي على روابط تساهمية عرضية تربط السلاسل البوليمرية ببعضها، مما يمنع حركتها الحرة ويجعل البنية أكثر صلابة وثباتًا مقارنة بالبوليمرات الخطية أو المتفرعة (5)

التركيب البنيوي للبوليمرات المتشابكة، يتكون تركيبها من سلاسل بوليمرية رئيسية

روابط عرضية(Cross-links) بين السلاسل شبكة ثلاثية الأبعاد غير قابلة للانزلاق بسهولة

هذا التنظيم البنيوي يؤدي إلى تقليل حركة السلاسل وزيادة الترابط الداخلي .

كيفية تكوين التشابك : يتكون التشابك أثناء أو بعد عملية البلمرة من خلال استخدام مونومرات متعددة الوظائف

إضافة عوامل تشابك كيميائية المعالجة الحرارية لبعض البوليمرات

الخواص الميكانيكية للبوليمرات المتشابكة : تتميز هذه البوليمرات بخصائص ميكانيكية متقدمة، منها

صلابة عالية جدًا بسبب الشبكة الثلاثية الأبعاد ، مقاومة شد مرتفعة مقارنة بالبوليمرات الخطية والمتفرعة

انخفاض المرونة نتيجة تقيد حركة السلاسل ، مقاومة عالية للحرارة والتشوه ،عدم القابلية لإعادة التشكيل بالحرارة (في معظم الحالات

: تأثير التشابك على السلوك الميكانيكي يؤدي التشابك إلى تقليل انزلاق السلاسل البوليمرية زيادة مقاومة الكسر

رفع معامل المرونة تقليل الاستطالة عند الكسر وبذلك تصبح المادة أكثر صلابة لكنها أقل مرونة

(2) المقارنة بين البوليمرات المتشابكة وغيرها

الخاصية، خطية ، متفرعة، متشابكة، الصلابة، متوسطة، منخفضة، عالية جدًا، المرونة، عالية، عالية جدًا ، منخفضة

مقاومة الحرارة، متوسطة، متوسطة، عالية، قابلية التشكيل،عالية، عالية، منخفضة

: التطبيقات الصناعية : تُستخدم البوليمرات المتشابكة في تطبيقات تتطلب أداءً عاليًا، مثل

العوازل الكهربائية والحرارية، المواد اللاصقة الصناعيةالإطارات (المطاط المفلكن)المواد المركبة عالية المقاومة

أجزاء السيارات والطائرات .(8)

أهمية البوليمرات المتشابكة تكمن أهميتها في ،توفير مواد عالية الصلابة والمتانة، مقاومة الظروف الحرارية والكيميائية القاسية، استخدامها في التطبيقات الهندسية الثقيلة، تحسين أداء المواد في البيئات الصعبة .

1 - 4 العوامل المحددة لصفات البوليمر

تُعد الخواص النهائية لأي البوليمرات نتاجًا مباشرًا لمجموعة من العوامل البنيوية والفيزيائية والكيميائية التي تتحكم في سلوكها الميكانيكي مثل الصلابة، المرونة، مقاومة الشد، ومقاومة الحرارة .

: التركيب الكيميائي للبوليمر

يُعد التركيب الكيميائي من أهم العوامل المؤثرة، إذ يحدد نوع الذرات والمجموعات الوظيفية الموجودة في السلسلة البوليمرية .

وجود مجموعات قطبية يزيد من قوى التجاذب بين السلاسل ، وجود حلقات عطرية يزيد الصلابة ، السلاسل الهيدروكربونية البسيطة تزيد المرونة، وهذا ينعكس مباشرة على الخواص الميكانيكية .

الوزن الجزيئي ودرجة البلمرة : كلما زاد الوزن الجزيئي أو درجة البلمرة ،تزداد قوة الشد، تتحسن المتانة

تقل قابلية الانزلاق بين السلاسل ،لكن زيادة كبيرة جدًا قد تقلل قابلية التشكيل .

تتحدد خواص البوليمر الميكانيكية من خلال تفاعل معقد بين عدة عوامل أهمها: التركيب الكيميائي، الوزن الجزيئي، درجة التبلور، البنية الجزيئية، درجة الحرارة، والإضافات، مما يجعل البوليمرات مواد قابلة للتخصيص حسب الحاجة الصناعية

1 - 4 - 1 الوزن الجزيئي للبوليمر

يُعد الوزن الجزيئي للبوليمرات من أهم العوامل التي تحدد خواصها الميكانيكية والفيزيائية والكيميائية، إذ يؤثر بشكل مباشر على القوة، المتانة، اللزوجة، وسلوك المادة أثناء التشكيل .

تعريف الوزن الجزيئي للبوليمر :

هو متوسط كتلة الجزيئات المكونة لسلسلة البوليمرات، ويُعبّر عنه عادةً بوحدات الكتلة الذرية أو الغرام/مول، ويختلف من سلسلة بوليمرية إلى أخرى بسبب طبيعة البلمرة .

أنواع الوزن الجزيئي :

الوزن الجزيئي العددي(Number Average Molecular Weight)

هو متوسط يعتمد على عدد الجزيئات بغض النظر عن حجمها، ويعطي تصورًا عامًا عن حجم السلاسل

الوزن الجزيئي الوزني(Weight Average Molecular Weight)

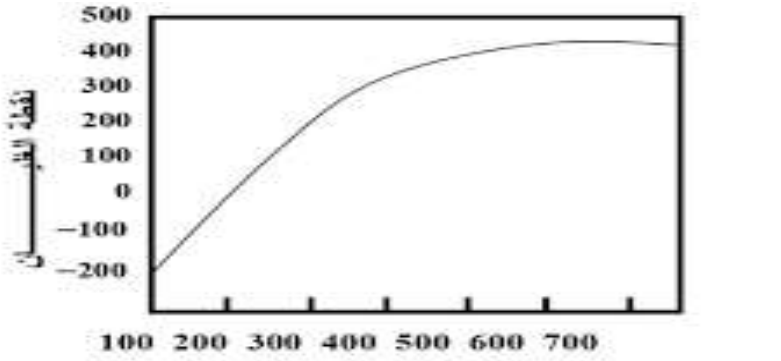
يعطي أهمية أكبر للجزيئات الكبيرة، لذلك يكون أكثر ارتباطًا بالخواص الميكانيكية ، توزيع الوزن الجزيئي

لا تكون جميع سلاسل البوليمر متساوية في الطول، لذلك يوجد ما يسمى بـ توزيع الوزن الجزيئي، وهو يعبر عن اختلاف أطوال السلاسل داخل نفس المادة

أهمية الوزن الجزيئي في التطبيقات الصناعية :

يساعد التحكم في الوزن الجزيئي على إنتاج مواد بلاستيكية قوية أو مرنة حسب الحاجة تحسين خواص الألياف الصناعية ضبط خصائص اللدونة والتشكيل تحسين أداء المواد في التطبيقات الهندسية

يُعتبر الوزن الجزيئي من أهم المحددات الأساسية للخواص الميكانيكية للبوليمرات، حيث تتحكم قيمته في قوة المادة، مرونتها، وسلوكها أثناء التصنيع والاستخدام، لذلك يُعد من العوامل الحرجة في تصميم المواد البوليمرية الحديثة .



شكل (2) علاقة نقطة درجة غليان الهيدروكربونات بالوزن الجزيئي

شكل (5) : الوزن الجزيئي

1 - 4 - 2 طبيعة السلسلة الجزيئية

تُعد طبيعة السلسلة الجزيئية في البوليمرات من العوامل الأساسية التي تتحكم في سلوكها الميكانيكي والفيزيائي، إذ تعتمد الخواص النهائية مثل المرونة، الصلابة، والاستطالة على شكل وترتيب السلسلة الجزيئية وطريقة تفاعلها مع السلاسل المجاورة

مفهوم السلسلة الجزيئية :

السلسلة الجزيئية هي الترتيب المتتابع لوحدات المونومر المرتبطة بروابط تساهمية لتكوين جزيء طويل يعرف بالبوليمر، وقد تكون هذه السلسلة منتظمة أو غير منتظمة حسب ظروف البلمرة

أشكال السلاسل الجزيئية تأخذ السلاسل الجزيئية عدة أشكال رئيسية

. السلاسل الخطية تمتد بشكل شبه مستقيم تسمح بتراص جيد بين الجزيئات تعطي صلابة وقوة شد أعلى

السلاسل المتفرعة تحتوي على تفرعات جانبية تقلل من التراص بين السلاسل تزيد من المرونة وتقلل الكثافة السلاسل المتشابكة ترتبط بروابط عرضية تكون شبكة ثلاثية الأبعاد تعطي صلابة ومقاومة عالية للتشوه أهمية دراسة طبيعة السلسلة الجزيئية تساعد دراسة طبيعة السلسلة في تصميم مواد بوليمرية بخصائص محددة

تحسين الأداء الميكانيكي للمواد الصناعية التحكم في المرونة والصلابة حسب الاستخدام تطوير مواد جديدة في الهندسة والطب

إن طبيعة السلسلة الجزيئية تُعد العامل الأساسي في تحديد الخواص الميكانيكية للبوليمرات، حيث إن شكل السلسلة، انتظامها، ومدى ترابطها بين الجزيئات يحدد بشكل مباشر سلوك المادة تحت الإجهاد والحرارة، مما يجعل التحكم فيها أساسًا في تصميم البوليمرات الحديثة .

1 - 4 - 3 القوى الجزيئية

تُعدّ القوى الجزيئية من العوامل الأساسية التي تتحكم في طبيعة وخواص المواد، خاصة في علم البوليمرات، حيث تؤثر بشكل مباشر على الخواص الفيزيائية والميكانيكية والحرارية للبوليمرات، مثل الصلابة والمرونة ودرجة الانصهار والذوبانية

أولاً: تعريف القوى الجزيئية

القوى الجزيئية هي قوى تجاذب أو تنافر تنشأ بين الجزيئات نتيجة توزيع الشحنات الكهربائية داخلها، وهي أضعف من الروابط الكيميائية (التساهمية والأيونية) لكنها تلعب دوراً مهماً في تحديد سلوك المادة . (3)

ثانياً: أنواع القوى الجزيئية

- قوى فان دير فال (Van der Waals Forces)

تُعد من أضعف القوى الجزيئية، وتنشأ بسبب التغيرات المؤقتة في توزيع الإلكترونات داخل الجزيئات وتنقسم إلى

- قوى لندن:(London Dispersion Forces)

توجد في جميع الجزيئات خاصة غير القطبية، وتزداد بزيادة الكتلة الجزيئية والحجم

- قوى ثنائية القطبDipole-Dipole Forces) (

تحدث بين الجزيئات القطبية نتيجة وجود شحنات جزئية موجبة وسالبة

- الروابط الهيدروجينية(Hydrogen Bonding)

تنشأ عندما يرتبط الهيدروجين بذرة ذات كهروسالبية عالية مثل الأوكسجين أو النيتروجين، مما يؤدي إلى تكوين قوة تجاذب قوية نسبياً بين الجزيئات وتؤثر هذه الروابط على خواص البوليمرات من خلال رفع درجة الانصهار

زيادة التماسك بين السلاسل ، تحسين الخواص الميكانيكية

- القوى الأيونية(Ionic Forces) :

تنشأ بين الأيونات الموجبة والسالبة، وتُعد من أقوى القوى الجزيئية، وتوجد في بعض البوليمرات المتخصصة، حيث تمنحها صلابة ومقاومة عالية.

إن القوى الجزيئية، رغم ضعفها مقارنة بالروابط الكيميائية، تُعد عاملاً حاسماً في تحديد خواص البوليمرات وسلوكها. لذا فإن فهمها يُعد أساسياً في تطوير مواد حديثة ذات خصائص محسّنة تناسب التطبيقات المختلفة.

الخلائط البوليمرية 1-5(Polymer Blends)

تُعدّ الخلائط البوليمرية من أهم الطرق الحديثة لتحسين خواص المواد البوليمرية، حيث يتم مزج نوعين أو أكثر من البوليمرات للحصول على مادة جديدة تجمع بين خواص مميزة لا يمكن تحقيقها باستخدام بوليمر واحد فقط

أولاً: تعريف الخلائط البوليمرية

الخلائط البوليمرية هي مزيج فيزيائي (غير كيميائي) من بوليمرين أو أكثر، يتم خلطها للحصول على مادة ذات خواص محسّنة، دون حدوث تفاعل كيميائي يؤدي إلى تكوين بوليمر جديد .

تُعدّ الخلائط البوليمرية من الحلول الفعّالة لتطوير مواد ذات خواص محسّنة تجمع بين مزايا عدة بوليمرات. ويعتمد نجاح هذه الخلائط على مدى توافق مكوناتها والعوامل المؤثرة في عملية المزج .

1 - 6 بولي فينيل الكحول(Polyvinyl Alcohol - PVA)

يُعدّ بولي فينيل الكحول من البوليمرات المهمة صناعياً وعلمياً، لما يمتلكه من خواص فريدة مثل الذوبانية في الماء، والتوافق الحيوي، وقابلية تشكيل الأغشية، مما جعله واسع الاستخدام في العديد من التطبيقات الصناعية والطبية [1

أولاً: تعريف بولي فينيل الكحول

بولي فينيل الكحول (PVA) هو بوليمر صناعي يُحضَّر بشكل غير مباشر من خلال حلمهة (تحلل) بولي فينيل أسيتات، حيث تتحول مجموعات الأسيتات إلى مجموعات هيدروكسيل (66).[2] (OH-)

ثانياً: التركيب الكيميائي

حيث تحتوي السلسلة البوليمرية على مجموعات هيدروكسيل، والتي تلعب دوراً مهماً في تكوين الروابط الهيدروجينية بين السلاسل

الخواص الفيزيائية والكيميائية

الذوبانية : يذوب بسهولة في الماء بسبب وجود مجموعات الهيدروكسيل القطبية

الروابط الهيدروجينية تُكوّن روابط هيدروجينية قوية بين السلاسل، مما يؤدي إلى زيادة التماسك والصلابة

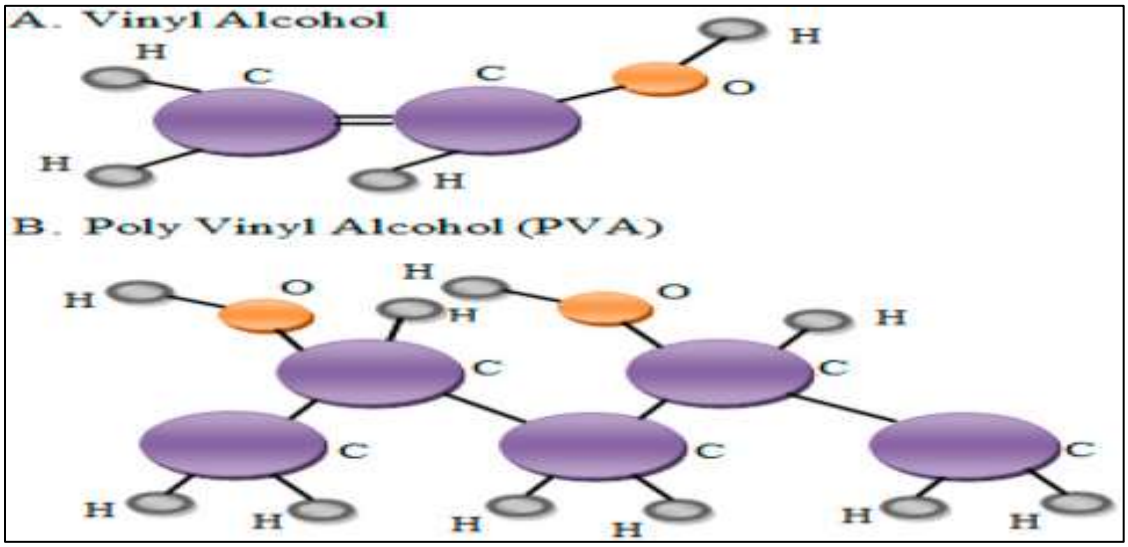
الخواص الميكانيكية : يتميز بقوة شد جيدة مرونة معتدلة مقاومة للتآكل الاستقرار الحراري يتمتع بثبات حراري متوسط، ويتحلل عند درجات حرارة مرتفعة نسبياً

: العوامل المؤثرة على خواصPVA

درجة الحلمهة كلما زادت درجة الحلمهة، زادت الروابط الهيدروجينية وبالتالي تزداد الصلابة

الوزن الجزيئي زيادة الوزن الجزيئي تؤدي إلى تحسين الخواص الميكانيكية وزيادة اللزوجة

درجة الحرارة تؤثر على الذوبانية والمرونة وسلوك البوليمر



شكل (6) : بولي فينيل الكحول

سادساً: تطبيقات بولي فينيل الكحول

يُستخدم PVA في العديد من المجالات، منها

الصناعات الطبية: مثل الضمادات والهلامات الحيوية

صناعة الأغشية: بسبب قابليته لتكوين أفلام شفافة المنظفات والمواد اللاصقة صناعة الورق والنسيج

الطباعة ثلاثية الأبعاد (كمادة داعمة)

1 - 7 بوليمر ميثيل السليلوز(Methyl Cellulose - MC)

يُعدّ بوليمر ميثيل السليلوز من المشتقات المهمة للسليلوز، ويتميز بخصائص فريدة مثل الذوبانية في الماء، والقدرة على تكوين الجل، والاستقرار الكيميائي، مما يجعله واسع الاستخدام في المجالات الصناعية والغذائية والدوائية

أولاً: تعريف ميثيل السليلوز

ميثيل السليلوز هو بوليمر شبه صناعي يتم الحصول عليه من تعديل السليلوز الطبيعي عبر استبدال بعض مجموعات الهيدروكسيل (-OH) بمجموعات ميثيل($-CH_3$) ، مما يؤدي إلى تحسين قابليته للذوبان والخواص الفيزيائية

ثانياً: التركيب الكيميائي

يتكون ميثيل السليلوز من وحدات غلوكوز مترابطة بروابطβ-1,4 ، مع وجود مجموعات ميثيل مرتبطة بالسلسلة البوليمرية، مما يؤثر على درجة التبلور والتفاعل مع الماء

ثالثاً: طريقة التحضير

يُحضَّر ميثيل السليلوز من خلال تفاعل السليلوز مع كلوريد الميثيل في وسط قلوي، حيث يتم استبدال مجموعات الهيدروكسيل بمجموعات ميثيل

رابعاً: الخواص الفيزيائية والكيميائية

الذوبانية يذوب ميثيل السليلوز في الماء البارد ويكوّن محاليل لزجة، بينما لا يذوب في الماء الساخن

التجلط الحراري(Thermal Gelation)

يتميز بظاهرة فريدة حيث يتجلط عند التسخين ويعود إلى الحالة السائلة عند التبريد

اللزوجة يُظهر لزوجة عالية تعتمد على الوزن الجزيئي والتركيز

الاستقرار الكيميائي مقاوم للتغيرات الكيميائية ضمن مدى واسع من الظروف

خامساً: العوامل المؤثرة على خواصه

- درجة الاستبدال(Degree of Substitution)

كلما زادت نسبة مجموعات الميثيل، تغيرت الذوبانية واللزوجة

- الوزن الجزيئي زيادة الوزن الجزيئي تؤدي إلى زيادة اللزوجة وتحسين الخواص الميكانيكية
- درجة الحرارة تؤثر بشكل مباشر على الذوبانية والتجلط .

1 - 9 : تقنية النبضة(Pulse Technique)

تُعدّ تقنية النبضة من التقنيات المهمة في مجالات الفيزياء التطبيقية والهندسة، وتُستخدم بشكل واسع في دراسة المواد وقياس خصائصها، وكذلك في الأنظمة الإلكترونية والاتصالات. وتعتمد هذه التقنية على إرسال إشارة قصيرة (نبضة) وتحليل استجابتها بعد انتقالها خلال وسط معين

أولاً: تعريف تقنية النبضة

تقنية النبضة هي أسلوب يعتمد على توليد وإرسال إشارة زمنية قصيرة ذات طاقة محددة، ثم قياس الإشارة المرتدة أو المارة عبر الوسط لتحليل خصائصه الفيزيائية أو الهندسية

ثانياً: مبدأ عمل تقنية النبضة

تعتمد هذه التقنية على الخطوات التالية توليد نبضة قصيرة (كهربائية أو صوتية أو ضوئية)

إرسال النبضة عبر وسط معين استقبال الإشارة بعد انعكاسها أو انتقالها

ثالثاً: أنواع تقنية النبضة

تقنية النبضة الصوتية(Ultrasonic Pulse Technique)

تُستخدم موجات فوق سمعية لدراسة خصائص المواد مثل الكثافة والمرونة

تقنية النبضة الكهربائية

تُستخدم في الدوائر الإلكترونية لقياس الاستجابة الزمنية وتحليل الأنظمة

تقنية النبضة الضوئية(Laser Pulses)

تعتمد على استخدام نبضات ضوئية قصيرة جداً لدراسة التفاعلات السريعة

رابعاً: الخصائص الأساسية للنبضة

عرض النبضة(Pulse Width)

يمثل الزمن الذي تستغرقه النبضة، ويؤثر على دقة القياس

سعة النبضة(Amplitude)

تمثل شدة الإشارة، وتحدد كمية الطاقة المنقولة

زمن الوصول(Time of Flight)

هو الزمن الذي تستغرقه النبضة للانتقال بين نقطتين، ويُستخدم لحساب سرعة الموجة أو تحديد المسافة (7)

خامساً: تطبيقات تقنية النبضة في دراسة المواد والبوليمرات

تُستخدم لقياس معامل المرونة ، الكثافة

العيوب الداخلية في المواد ،في الطب

أجهزة السونار (التصوير بالموجات فوق الصوتية(قياس تدفق الدم في الاتصالات نقل البيانات الرقمية أنظمة الرادار

الفحص غير الإتلافي (NDT) في الصناعة تحديد العيوب والشقوق في المواد

تُعد تقنية النبضة من الأدوات المتقدمة في القياس والتحليل، حيث توفر معلومات دقيقة عن خصائص المواد وسلوكها. وتكمن أهميتها في تطبيقاتها الواسعة في مجالات متعددة مثل الطب والصناعة والاتصالات، مما يجعلها تقنية أساسية في البحث العلمي والتطبيق العملي

الفصل الثاني

الخواص الميكانيكية للبوليمرات

2 - 1 مقدمة

تُعدّ البوليمرات من أهم المواد الهندسية المستخدمة في العصر الحديث، لما تمتاز به من تنوع كبير في خصائصها الفيزيائية والميكانيكية، مما يجعلها بديلاً مناسبًا للعديد من المواد التقليدية مثل المعادن والسيراميك في تطبيقات متعددة

البوليمر هو مادة تتكون من سلاسل طويلة من وحدات بنائية متكررة تُعرف بالمونومرات، وترتبط هذه الوحدات بروابط كيميائية لتكوين تراكيب جزيئية ذات أوزان جزيئية عالية ، هذا التركيب الفريد يمنح البوليمرات خواصًا ميكانيكية مميزة تعتمد بشكل أساسي على طبيعة السلسلة الجزيئية، ودرجة التبلور، وقوى الترابط بين السلاسل

تُعرّف الخواص الميكانيكية للبوليمرات بأنها استجابتها للقوى الخارجية المؤثرة عليها، مثل الشد، الضغط، والانحناء، وتشمل هذه الخواص: المتانة، الصلابة، المرونة، ومقاومة الكسر ، وتختلف هذه الخصائص بشكل كبير مقارنة بالمواد الأخرى بسبب الطبيعة المرنة لسلاسل البوليمر وحركتها الداخلية

تتأثر الخواص الميكانيكية للبوليمرات بعدة عوامل، منها درجة الحرارة، معدل التحميل، التركيب الكيميائي، والظروف البيئية المحيطة، مما يجعل دراسة هذه الخواص أمرًا ضروريًا لفهم سلوك المادة أثناء الاستخدام الفعلي

وبسبب هذه الخصائص المتغيرة، أصبحت البوليمرات تُستخدم على نطاق واسع في العديد من التطبيقات الصناعية مثل الصناعات الطبية، ومواد البناء، والصناعات الكهربائية، وصناعة السيارات

2 - 2 : سرعة الموجات فوق السمعية في البوليمرات

تُعدّ الموجات فوق السمعية (Ultrasonic Waves) من التقنيات الحديثة المستخدمة في دراسة الخواص الميكانيكية للمواد، ومنها البوليمرات، حيث تتيح هذه الطريقة فحص المادة دون إتلافها، مما يجعلها ذات أهمية كبيرة في التطبيقات الهندسية والصناعية .

تُعرّف سرعة الموجات فوق السمعية بأنها سرعة انتقال الموجات الميكانيكية ذات التردد العالي (أكبر من 20 كيلوهرتز) خلال المادة، وتعتمد هذه السرعة على طبيعة الوسط وخصائصه الفيزيائية مثل الكثافة والمرونة

في المواد البوليمرية، ترتبط سرعة الموجات فوق السمعية بشكل مباشر بمعامل المرونة والكثافة، ويمكن التعبير عنها بالعلاقة التالية :

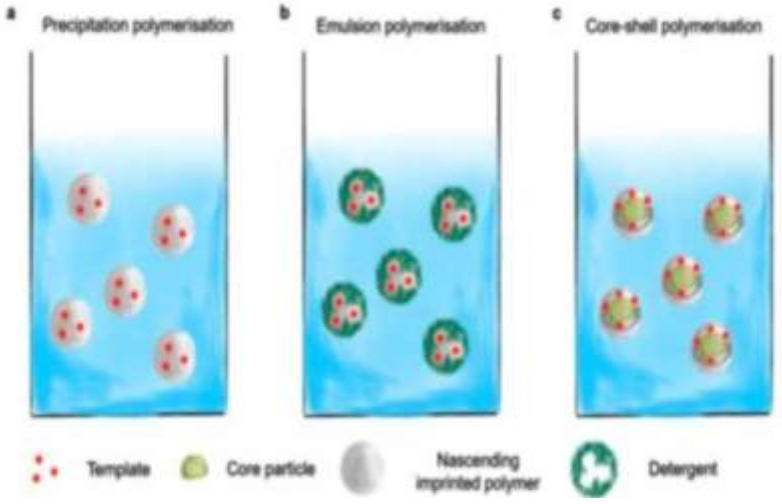
حيث أن: تمثل سرعة الموجة داخل المادة، معامل يونغ معامل المرونة ، الكثافة 3

تشير هذه العلاقة إلى أن المواد ذات معامل المرونة العالي تسمح بانتشار أسرع للموجات، في حين أن زيادة الكثافة تؤدي إلى تقليل سرعة الموجة .

ذلك تُستخدم هذه التقنية في تقييم صلابة البوليمرات ودراسة بنيتها الداخلية تتأثر سرعة الموجات فوق السمعية في البوليمرات بعدة عوامل، منها درجة الحرارة، حيث تؤدي زيادة درجة الحرارة إلى تقليل السرعة نتيجة زيادة حركة السلاسل البوليمرية وانخفاض الصلابة

كما تؤثر درجة التبلور والتركيب الجزيئي، إذ تكون السرعة أعلى في البوليمرات المتبلورة مقارنة بغير المتبلورة

تُستخدم هذه الطريقة عمليًا في الكشف عن العيوب الداخلية مثل الفراغات والشقوق، وكذلك في تقييم تجانس المادة، مما يجعلها من أهم وسائل الفحص غير الإتلافي في المواد البوليمرية



شكل (7): تأثير الموجات فوق السمعية في البوليمرات

2 - 3 : الاسترخاء في السوائل

يُعدّ الاسترخاء (Relaxation) من الظواهر الفيزيائية المهمة في دراسة سلوك المواد، خاصةً السوائل والبوليمرات، حيث يعبّر عن الزمن اللازم لعودة النظام إلى حالة الاتزان بعد إزالة المؤثر الخارجي مثل الإجهاد أو التشوه

في السوائل، يرتبط الاسترخاء بحركة الجزيئات وقدرتها على إعادة ترتيب نفسها بعد تعرضها لقوة خارجية، ويُعرف بزمن الاسترخاء(Relaxation Time) ، وهو مقياس لسرعة استجابة السائل للتغيرات الميكانيكية

يمكن تعريف زمن الاسترخاء بأنه الزمن الذي تنخفض خلاله قيمة الإجهاد إلى نسبة معينة من قيمته الابتدائية بعد إزالة القوة المؤثرة، وغالبًا ما يُوصف سلوك الاسترخاء بعلاقة أسية من الشكل

حيث أن :

الإجهاد عند الزمن الإجهاد الابتدائي، زمن الاسترخاء

تشير هذه العلاقة إلى أن الإجهاد يتناقص مع الزمن بشكل أسي، وكلما كان زمن الاسترخاء صغيرًا كان السائل أسرع في فقدان الإجهاد والعودة إلى حالة الاتزان

في السوائل البسيطة، يكون زمن الاسترخاء قصيرًا جدًا بسبب حرية حركة الجزيئات، بينما في السوائل اللزجة أو البوليمرات المنصهرة يكون زمن الاسترخاء أطول نتيجة التشابك بين السلاسل الجزيئية

كما يتأثر زمن الاسترخاء بعدة عوامل، منها درجة الحرارة، حيث تؤدي زيادة درجة الحرارة إلى تقليل زمن الاسترخاء بسبب زيادة الطاقة الحركية للجزيئات ، كذلك تلعب اللزوجة دورًا أساسيًا، إذ يزداد زمن الاسترخاء بزيادة لزوجة السائل

2 - 3 - 1 : الاسترخاء اللزوجي اللزوجة المرنة

يُعدّ الاسترخاء اللزوجي (Viscoelastic Relaxation) من الخصائص الأساسية للمواد البوليمرية، حيث يجمع سلوكها بين خصائص المواد المرنة (Elastic) والمواد اللزجة(Viscous) ، لذلك تُعرف هذه المواد بأنها مواد لزجة-مرنة (Viscoelastic Materials)

يعبر الاسترخاء اللزوجي عن التغير في الإجهاد مع الزمن عند تعريض المادة لتشوه ثابت، حيث لا يبقى الإجهاد ثابتًا كما في المواد المرنة المثالية، بل يتناقص تدريجيًا نتيجة حركة السلاسل البوليمرية وإعادة ترتيبها

يُوصف سلوك الاسترخاء اللزوجي غالبًا باستخدام نموذج ماكسويل(Maxwell Model) الذي يمثل المادة بنابض (يمثل المرونة) ومخمّد لزج (يمثل اللزوجة) موصولين على التوالي

يمكن التعبير عن الاسترخاء اللزوجي بالعلاقة التالية :

حيث أن الإجهاد مع الزمن، الإجهاد الابتدائي،:

زمن الاسترخاء اللزوجي، ويُعطى بالعلاقة

حيث : اللزوجة، معامل المرونة

يشير هذا إلى أن زمن الاسترخاء يعتمد على نسبة اللزوجة إلى المرونة، فكلما زادت اللزوجة أو قلت المرونة زاد زمن الاسترخاء

تتميز البوليمرات بزمن استرخاء طويل نسبيًا مقارنة بالسوائل البسيطة، وذلك بسبب التشابك بين السلاسل الجزيئية، مما يعيق حركتها ويؤخر عودتها إلى حالة الاتزان

كما يتأثر الاسترخاء اللزوجي بعوامل عديدة، منها درجة الحرارة، حيث تؤدي زيادتها إلى تقليل اللزوجة وبالتالي تقليل زمن الاسترخاء، إضافة إلى تأثير الوزن الجزيئي ودرجة التبلور

تُعد دراسة الاسترخاء اللزوجي ضرورية لفهم سلوك البوليمرات في التطبيقات العملية، مثل عمليات التشكيل (البثق، القولبة) وكذلك في تحديد الأداء الميكانيكي طويل الأمد للمواد

2 - 3 - 2 : الاسترخاء الحراري

يُعدّ الاسترخاء الحراري (Thermal Relaxation) من الظواهر المهمة في دراسة سلوك البوليمرات، حيث يعبّر عن تأثير درجة الحرارة على استجابة المادة للإجهادات والتشوهات مع الزمن ، ويُعد هذا النوع من الاسترخاء مرتبطًا بشكل مباشر بالحركة الحرارية للسلاسل البوليمرية

عند تعريض البوليمر لزيادة في درجة الحرارة، تزداد الطاقة الحركية للجزيئات، مما يؤدي إلى زيادة مرونة السلاسل وسهولة حركتها، وبالتالي تسارع عملية الاسترخاء وانخفاض الإجهاد مع الزمن

يُوصف الاسترخاء الحراري غالبًا بعلاقة تعتمد على درجة الحرارة، ومن أشهرها علاقة أرهينيوس (Arrhenius Equation)التي تعبّر عن اعتماد زمن الاسترخاء على درجة الحرارة

حيث أن : زمن الاسترخاء، ثابت زمني، طاقة التنشيط، ثابت الغازات العام

درجة الحرارة المطلقة

تشير هذه العلاقة إلى أن زمن الاسترخاء يقل مع زيادة درجة الحرارة، لأن الجزيئات تمتلك طاقة أكبر لتجاوز الحواجز الحركية .

في البوليمرات، يظهر الاسترخاء الحراري بوضوح بالقرب من درجة الانتقال الزجاجي (Glass Transition Temperature)، حيث تتحول المادة من حالة صلبة قاسية إلى حالة مطاطية أكثر مرونة . في هذه المنطقة، يحدث تغير كبير في الخواص الميكانيكية نتيجة زيادة حركة السلاسل البوليمرية

كما يتأثر الاسترخاء الحراري بعوامل أخرى مثل الوزن الجزيئي، ودرجة التبلور، وطبيعة الروابط بين السلاسل، حيث تؤدي الروابط القوية والتشابك العالي إلى إبطاء عملية الاسترخاء

2- 3 - 3 : الاسترخاء التركيبي

يُعدّ الاسترخاء التركيبي (Structural Relaxation) من الظواهر المهمة في علم البوليمرات، حيث يعبّر عن التغيرات التي تحدث في البنية الداخلية للمادة مع الزمن نتيجة تعرضها لإجهادات أو تغيرات حرارية، مما يؤدي إلى إعادة ترتيب السلاسل البوليمرية نحو حالة أكثر استقرارًا

يرتبط الاسترخاء التركيبي بشكل وثيق بالبنية الميكروسكوبية للبوليمر، حيث تتحرك السلاسل الجزيئية تدريجيًا لتقليل الطاقة الداخلية للنظام، خاصة في المواد غير المتبلورة أو شبه المتبلورة .

وتكون هذه العملية بطيئة نسبيًا بسبب القيود الناتجة عن التشابك بين السلاسل الجزيئية

يظهر هذا النوع من الاسترخاء بوضوح عند تعريض البوليمرات إلى تغير مفاجئ في درجة الحرارة أو الإجهاد، حيث لا تصل المادة مباشرة إلى حالة الاتزان، بل تمر بمرحلة انتقالية يحدث خلالها تعديل في التركيب الداخلي

يمكن وصف الاسترخاء التركيبي باستخدام علاقات زمنية مشابهة لسلوك الاسترخاء العام، حيث يتناقص الإجهاد أو الطاقة الداخلية مع الزمن بشكل تدريجي.

يتأثر الاسترخاء التركيبي بعدة عوامل، منها درجة الحرارة، حيث تزداد سرعة الاسترخاء بارتفاعها نتيجة زيادة حركة السلاسل البوليمرية ،. كما يلعب الوزن الجزيئي ودرجة التبلور دورًا مهمًا، إذ تؤدي زيادة التشابك أو التبلور إلى إبطاء عملية الاسترخاء

يُعدّ الاسترخاء التركيبي مهمًا في تفسير ظواهر مثل الشيخوخة الفيزيائيةPhysical Aging) حيث تتغير خواص البوليمر مع الزمن حتى في غياب المؤثرات الخارجية، نتيجة إعادة ترتيب بنيته الداخلية

كما تُستخدم دراسة هذا النوع من الاسترخاء في تحسين أداء المواد البوليمرية، خاصة في التطبيقات التي تتطلب ثباتًا طويل الأمد في الخواص الميكانيكية، مثل الصناعات الهندسية والمواد العازلة

2- 4 : الانضغاطية

تُعدّ الانضغاطية (Compressibility) من الخصائص الميكانيكية المهمة للمواد، حيث تعبّر عن قابلية المادة لتقليل حجمها عند تعرضها لضغط خارجي ، وتكتسب هذه الخاصية أهمية خاصة في دراسة سلوك البوليمرات تحت تأثير الأحمال المختلفة.

تُعرّف الانضغاطية بأنها مقدار التغير النسبي في الحجم نتيجة تغير الضغط المؤثر على المادة

في البوليمرات، تكون الانضغاطية أعلى نسبيًا مقارنة بالمواد الصلبة مثل المعادن، وذلك بسبب وجود فراغات بين السلاسل الجزيئية وقابلية هذه السلاسل للحركة وإعادة الترتيب

تتأثر الانضغاطية بعدة عوامل، منها درجة الحرارة، حيث تؤدي زيادة درجة الحرارة إلى زيادة الانضغاطية نتيجة ازدياد حركة السلاسل البوليمرية

كما يلعب الضغط نفسه دورًا مهمًا، إذ قد تقل الانضغاطية عند الضغوط العالية بسبب تقارب الجزيئات بشكل أكبر كما تعتمد الانضغاطية على التركيب الجزيئي للبوليمر، حيث تكون أقل في البوليمرات المتبلورة مقارنة بالبوليمرات غير المتبلورة، وذلك بسبب الترتيب المنتظم للسلاسل في الحالة المتبلورة

2-5 : معامل المرونة

يُعدّ معامل المرونة (Modulus of Elasticity) من أهم الخواص الميكانيكية التي تعبّر عن مقاومة المادة للتشوه عند تعرضها لإجهاد خارجي، حيث يحدد مدى صلابة المادة أو مرونتها

ويُستخدم هذا المعامل بشكل واسع في توصيف سلوك البوليمرات تحت تأثير الأحمال المختلفة.

يُعرّف معامل المرونة، وخاصة معامل يونغ، بأنه النسبة بين الإجهاد والانفعال ضمن حدود المرونة، أي قبل حدوث تشوه دائم في المادة

تشير هذه العلاقة إلى أن المواد ذات معامل المرونة العالي تكون أكثر صلابة وتقاوم التشوه، بينما المواد ذات المعامل المنخفض تكون أكثر مرونة وقابلية للتشوه

في البوليمرات، يكون معامل المرونة أقل عمومًا مقارنة بالمعادن، وذلك بسبب الطبيعة المرنة للسلاسل الجزيئية وإمكانية انزلاقها بالنسبة لبعضها البعض

ومع ذلك، يمكن أن يختلف هذا المعامل بشكل كبير اعتمادًا على نوع البوليمر وتركيبه الجزيئي.

يتأثر معامل المرونة بعدة عوامل، من أهمها درجة الحرارة، حيث يؤدي ارتفاعها إلى تقليل معامل المرونة نتيجة زيادة حركة السلاسل البوليمرية .

2-6 : الممانعة الصوتية النوعية

تُعدّ الممانعة الصوتية النوعية (Specific Acoustic Impedance) من الخصائص الفيزيائية المهمة المرتبطة بانتشار الموجات الصوتية في المواد، ومنها البوليمرات، حيث تعبّر عن مقاومة المادة لمرور الموجات الصوتية خلالها

تُعرّف الممانعة الصوتية النوعية بأنها حاصل ضرب كثافة المادة في سرعة انتشار الموجة الصوتية فيها .

تشير هذه العلاقة إلى أن المواد ذات الكثافة العالية أو التي تسمح بانتشار سريع للموجات الصوتية تمتلك ممانعة صوتية أعلى في البوليمرات، تكون الممانعة الصوتية أقل مقارنة بالمعادن، وذلك بسبب انخفاض الكثافة ومعامل المرونة، مما يؤدي إلى انخفاض سرعة الموجات الصوتية داخلها

تُعد الممانعة الصوتية عاملًا مهمًا عند انتقال الموجات بين وسطين مختلفين، حيث يحدث انعكاس أو انكسار للموجة اعتمادًا على الفرق في الممانعة الصوتية بين الوسطين

لذلك تُستخدم هذه الخاصية في تطبيقات الفحص غير الإتلافي للكشف عن العيوب الداخلية في المواد البوليمرية

كما تتأثر الممانعة الصوتية بعدة عوامل، منها درجة الحرارة والتركيب الجزيئي، حيث تؤدي زيادة درجة الحرارة إلى تقليل الكثافة وسرعة الموجة، وبالتالي تقليل الممانعة الصوتية

تُستخدم دراسة الممانعة الصوتية في العديد من التطبيقات العملية، مثل تصميم المواد العازلة للصوت، وتحسين كفاءة انتقال الموجات في الأجهزة الطبية، وكذلك في تحليل جودة المواد البوليمرية

قائمة المصادر

1. حسن، أحمد محمد. علم البوليمرات: الأسس والتطبيقات. دار المسيرة للنشر، عمّان، 2018.
2. عبد الكريم، محمد عبد الله. كيمياء البوليمرات. جامعة بغداد – كلية العلوم، 2016.
3. الجبوري، سعدون حميد. خواص المواد الهندسية. دار الكتب العلمية، بيروت، 2017.
4. الراوي، محمود حسين. علم المواد الهندسية. وزارة التعليم العالي والبحث العلمي، العراق، 2015.
5. السامرائي، علي كاظم. الخواص الميكانيكية للمواد. جامعة الموصل، 2014.
6. Callister, William D. & Rethwisch, David G. Materials Science and Engineering: An Introduction. 9th Edition, Wiley, 2014.
7. Billmeyer, Fred W. Textbook of Polymer Science. 3rd Edition, Wiley-Interscience, 1984.
8. Sperling, Leslie H. Introduction to Physical Polymer Science. 4th Edition, Wiley, 2006.
9. Flory, Paul J. Principles of Polymer Chemistry. Cornell University Press, 1953.
10. Odian, George. Principles of Polymerization. 4th Edition, Wiley, 2004.