



جمهورية العراق
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة بابل
كلية التربية للعلوم الصرفة
قسم الفيزياء / الدراسة الصباحية

عنوان البحث

استخدام البوليمرات لقياس الجرعة الاشعاعية

بحث مقدم الى جامعة بابل/كلية التربية للعلوم الصرفة - قسم الفيزياء كجزء من متطلبات

نيل شهادة البكالوريوس في علوم الفيزياء

من قبل الطالبة

نبأ حيدر رضا

بإشراف

م.م.نور حيدر عباس

1447هـ

2026 م

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

﴿يَرْفَعُ اللَّهُ الَّذِينَ آمَنُوا مِنْكُمْ﴾

﴿وَالَّذِينَ أُوتُوا الْعِلْمَ دَرَجَاتٍ﴾

[1] المجادلة

الإهداء

إلى من كان لهم الفضل الأول في مسيرتي العلمية،
إلى والديّ العزيزين اللذين كانا سندي وداعمي في كل خطوة من خطوات حياتي.

إلى كل من علّمني حرفاً وأنار لي طريق العلم والمعرفة،
وإلى كل من شجعني وساندني لإكمال دراستي.

أهدي هذا الجهد المتواضع، راجيةً من الله تعالى أن يكون بدايةً لطريقٍ مليءٍ بالنجاح
والعطاء.

الشكر والتقدير

الحمد لله الذي وفقني لإتمام هذا البحث، وأعانني على إكمال هذه المرحلة من مسيرتي العلمية.

وأقدم بخالص الشكر والتقدير إلى الأستاذة المشرفة على هذا البحث، لما قدمه من توجيهات علمية ونصائح قيّمة كان لها الأثر الكبير في إنجاز هذا العمل.

كما أتقدم بجزيل الشكر والامتنان إلى أساتذتي الكرام في القسم على ما قدموه من علمٍ ومعرفة طوال سنوات الدراسة.

ولا يفوتني أن أتقدم بالشكر والتقدير إلى عائلتي الكريمة وأصدقائي، لما قدموه من دعمٍ وتشجيعٍ مستمرٍ

الخلاصة

يتناول هذا البحث دراسة البوليمرات والاشعاع وتأثيره عليها ،مع التركيز على الخصائص الفيزيائية والكيميائية لهذه المواد ودورها في التطبيقات العلمية المختلفة

يتضمن الفصل الاول التعريف بالبوليمرات حيث يوضح مفهومها وتركيبها الجزيئي وخصائصها المختلفة.اضافة الى تصنيفها وطرق تحضيرها والعوامل المؤثرة في سلوكها واستخداماتها في المجالات الصناعية والطبية.

اما الفصل الثاني فيتناول الاشعاع والجرعة الاشعاعية ، حيث يوضح انواع الاشعاع ومصادره الطبيعية والصناعية ،اضافة الى شرح الية تفاعل الاشعاع مع المادة واهمية الجرعة الاشعاعية في تحديد التأثيرات .

بينما يركز الفصل الثالث على دراسة تاثير الاشعاع على البوليمرات،حيث يوضح كيفية حدوث التغيرات في التركيب الجزيئي مثل تكسير السلاسل او التشابك . وانعكاس ذلك على الخصائص الفيزيائية والكيميائية مع بيان اهمية هذه التأثيرات في تحسين خصائص المواد واستخدامها في التطبيقات الصناعية والطبية.

قائمة المحتويات

الصفحة	المحتويات
II	الاية الكريمة
III	الاهداء
IV	الشكر والتقدير
V	الخلاصة
VI	المحتويات
1	الفصل الاول: مفهوم البوليمرات
2	مقدمة عامة
4	تعريف البوليمرات
5	تصنيف البوليمرات
6	طرق تحضير البوليمرات
7	الخصائص الفيزيائية والكيميائية للبوليمرات
10	التركيب الجزيئي للبوليمرات
11	هدف البحث
13	الفصل الثاني: الأشعاع والجرعة الاشعاعية
14	الاشعاع
15	انواع الاشعاع
19	مصادر الاشعاع
24	تفاعل الاشعاع مع المادة
32	الفصل الثالث

33	مقدمة
34	تفاعل الأشعاع مع البوليمرات
38	التأثيرات الفيزيائية والكيميائية للأشعاع
41	أسباب استخدام الأشعاع في معالجة البوليمرات
45	آلية امتصاص الطاقة الإشعاعية في البوليمرات
45	استنتاج البحث
47	المصادر

الفصل الاول

مفهوم البوليمرات

تُعدّ البوليمرات من أهم المواد التي يعتمد عليها علم المواد الحديث، إذ تتميز بتركيب جزيئي فريد يتكون من سلاسل طويلة ذات وزن جزيئي عالٍ ناتجة عن تكرار وحدات بنائية صغيرة تُعرف بالمونومرات، ترتبط فيما بينها بروابط كيميائية قوية لتشكل جزيئات عملاقة ذات خصائص متباينة. وقد أدى هذا التركيب إلى منح البوليمرات صفات فيزيائية وكيميائية مميزة مثل المرونة العالية، وخفة الوزن، والمقاومة الجيدة للعوامل الكيميائية والبيئية، إضافةً إلى سهولة تشكيلها وإمكانية التحكم بخصائصها من خلال تعديل بنيتها الجزيئية أو تغيير ظروف التحضير. وتنقسم البوليمرات إلى طبيعية وصناعية، كما يمكن تصنيفها حسب تركيبها الكيميائي وسلوكها الحراري، مما يوسع من مجالات استخدامها في التطبيقات الطبية والهندسية والتكنولوجية. ويُعد تفاعل البوليمرات مع العوامل الخارجية، ولا سيما الإشعاع المؤين، من الخصائص المهمة التي حظيت باهتمام واسع في الدراسات العلمية، إذ يؤدي التعرض للإشعاع إلى إحداث تغيرات في البنية الجزيئية للبوليمر مثل التشابك أو انشطار السلاسل، الأمر الذي يؤثر بشكل مباشر على خواصه الفيزيائية والكيميائية، ويجعل هذه المواد أساسًا علميًا مهمًا لتطبيقات متقدمة، من بينها استخدام البوليمرات في قياس الجرعات الإشعاعية، لما توفره من حساسية عالية ودقة مقبولة في رصد التأثيرات الإشعاعية المختلفة. وتكمن أهمية البوليمرات أيضًا في التنوع الكبير لبنائها الجزيئية، إذ يمكن أن تكون السلاسل البوليمرية خطية أو متفرعة أو متشابكة، ويؤثر هذا التنوع البنوي بشكل مباشر على سلوك المادة وأدائها تحت الظروف المختلفة. كما أن طبيعة الروابط الثانوية بين السلاسل، مثل الروابط الهيدروجينية وقوى فان دير فالس، تسهم في تحديد درجة التماسك الداخلي والاستقرار الحراري والميكانيكي للبوليمرات.

إضافةً إلى ذلك، فإن توزيع الأوزان الجزيئية وطول السلسلة يلعبان دورًا حاسمًا في تحديد الخواص النهائية للمادة البوليمرية، حيث تؤدي السلاسل الأطول إلى زيادة التشابك الداخلي وتحسين المتانة، في حين تؤثر السلاسل الأقصر على سهولة المعالجة والتشكيل. [1]

ومن الجوانب المهمة في دراسة البوليمرات هو فهم سلوكها عند تعرضها للعوامل الفيزيائية المختلفة مثل الحرارة، الضغط، والإشعاع، إذ تُظهر البوليمرات استجابة مميزة تختلف عن المواد الأخرى. فالتأثير الحراري قد يؤدي إلى انتقال البوليمر من الحالة الزجاجية إلى الحالة المطاطية، بينما يمكن للإشعاع المؤين أن يحدث تغيرات جوهريّة في التركيب الجزيئي، إما عن طريق زيادة التشابك بين السلاسل أو حدوث انشطار فيها، الأمر الذي ينعكس على الخواص الميكانيكية والكيميائية والكهربائية للمادة. وتُعد هذه الظواهر ذات أهمية خاصة في التطبيقات المتقدمة التي تتطلب مواد ذات استقرار عالٍ أو خواص محددة يمكن التحكم بها بدقة.

وقد ساهمت التطورات الحديثة في علم البوليمرات في توسيع نطاق استخدامها، حيث أصبحت تدخل في صناعات دقيقة مثل الصناعات الطبية الحيوية، وتقنيات النانو، والصناعات الفضائية، فضلاً عن تطبيقاتها في مجال الحماية من الإشعاع وقياس الجرعات الإشعاعية. وتعتمد هذه التطبيقات بشكل أساسي على القدرة على تعديل التركيب الجزيئي للبوليمرات وتحسين حساسيتها واستجابتها للعوامل الخارجية، مما يجعل البوليمرات مواد واعدة في تطوير تقنيات حديثة ذات كفاءة عالية وتكلفة اقتصادية مناسبة. [2]

1-2 تعريف البوليمرات

البوليمر هو مادة كيميائية تتكون من جزيئات كبيرة ذات وزن جزيئي مرتفع، تعرف بالجزيئات العملاقة (Macromolecules) ، والتي تتكون بدورها من تكرار وحدات بنائية صغيرة تسمى المونومرات، ترتبط معًا بروابط كيميائية قوية لتشكل سلاسل طويلة أو شبكات ثلاثية الأبعاد. ويُعتبر هذا الترتيب الجزيئي أساس الخصائص الفيزيائية والكيميائية المميزة للبوليمرات، مثل المرونة، الصلابة، المقاومة الحرارية والكيميائية، والقدرة على التشكيل بسهولة. وتختلف طبيعة البوليمرات بحسب نوع المونومر المستخدم، وطريقة البلمرة، وطول السلسلة البوليمرية، وهو ما يجعلها قابلة للتطبيق في مجالات متنوعة مثل الصناعات الطبية والهندسية والإلكترونية، وكذلك في التطبيقات المرتبطة بالإشعاع، حيث يمكن للبوليمرات أن تتفاعل مع الإشعاع المؤين بشكل يمكن قياسه وتحليله. ويُعد فهم تعريف البوليمر وتركيبه الجزيئي خطوة أساسية لدراسة خواصه واستخداماته العملية في التطبيقات العلمية الحديثة. [3]

تتميز البوليمرات بمرونتها العالية وقدرتها على التكيف مع مجموعة واسعة من الظروف البيئية والصناعية، مما يجعلها مواد مثالية للتطبيقات المختلفة بدءًا من الاستخدامات اليومية البسيطة وصولاً إلى التطبيقات المتقدمة في المجالات الطبية والإشعاعية. فالخصائص الفيزيائية للبوليمرات مثل الصلابة، المرونة، العزل الحراري والكهربائي، وكذلك مقاومتها الكيميائية، يمكن تعديلها والتحكم بها عبر اختيار نوع المونومر، وطريقة البلمرة، وظروف التفاعل، وهو ما يتيح تصميم بوليمرات

بخصائص محددة تلبي احتياجات التطبيقات المختلفة. علاوة على ذلك، تُظهر البوليمرات استجابة دقيقة للعوامل المؤثرة عليها مثل الحرارة والضغط والإشعاع، حيث تؤدي هذه العوامل إلى تغييرات في بنية السلاسل البوليمرية مثل زيادة التشابك أو الانشطار الجزئي، وهذه التغييرات يمكن قياسها وتحليلها، مما يجعل البوليمرات أدوات حساسة وموثوقة في التطبيقات العلمية المتقدمة، ومن أبرزها قياس الجرعات الإشعاعية بدقة عالية، وهو ما يفتح المجال لاستخدامها في تطوير كواشف متقدمة لحماية الإنسان والبيئة من الآثار الضارة للإشعاع.

1-3 تصنيف البوليمرات

يمكن تصنيف البوليمرات وفق عدة معايير رئيسية تعكس طبيعة تركيبها وخصائصها الفيزيائية والكيميائية، مما يسهل فهم سلوكها واختيار النوع المناسب للتطبيق المطلوب. فمن حيث المصدر، تنقسم البوليمرات إلى طبيعية مثل السليلوز، البروتينات، والمطاط الطبيعي، والتي تستخلص من الكائنات الحية، وبوليمرات صناعية يتم تصنيعها كيميائيًا لتلبية احتياجات صناعية دقيقة، مثل البولي إيثيلين والبولي فينيل كلوريد. أما من حيث التركيب الكيميائي، فتُصنّف إلى بوليمرات متجانسة تتكون من نوع واحد فقط من المونومرات، وبوليمرات مشتركة تتألف من أكثر من نوع من المونومرات، مما يتيح لها امتلاك خصائص متعددة تجمع بين المرونة والمتانة أو المقاومة الكيميائية. كما يمكن تصنيف البوليمرات بحسب السلوك الحراري إلى بوليمرات لدنة حراريًا (Thermoplastics) التي تلين عند التسخين ويمكن إعادة تشكيلها بسهولة، وبوليمرات متصلدة حراريًا (Thermosets) التي

تتصلب بشكل دائم بعد البلمرة ولا يمكن إعادة صهرها، بالإضافة إلى تصنيفها بحسب البنية الداخلية إلى سلاسل خطية أو متفرعة أو شبكية، حيث يؤثر هذا التصنيف على الصلابة، المرونة، ومقاومة البوليمر للتشوه الحراري والميكانيكي. ويُعد فهم هذا التصنيف أساسيًا عند اختيار البوليمر المناسب لتطبيقات محددة، مثل قياس الجرعات الإشعاعية، إذ يلعب نوع البوليمر وبنيته الدور الأكبر في استجابته للإشعاع وقدرته على تسجيل التغيرات الفيزيائية أو الكيميائية الناتجة عنه بدقة عالية .

[4]

4-1 طرق تحضير البوليمرات

تُحضَّر البوليمرات عادةً عبر تفاعلات كيميائية تعرف بالبلمرة، والتي تهدف إلى ربط عدد كبير من وحدات المونومر لتشكيل سلاسل طويلة أو شبكات ثلاثية الأبعاد ذات وزن جزيئي عالٍ. وتنقسم طرق تحضير البوليمرات بشكل رئيسي إلى بلمرة الإضافة وبلمرة التكاثف. في بلمرة الإضافة (Addition Polymerization)، ترتبط المونومرات مباشرة مع بعضها دون فقدان أي نواتج ثانوية، ويحدث هذا عادةً عبر تفاعلات سلسلية تشمل تكوين جذور حرة أو أيونات، كما في تحضير البولي إيثيلين والبولي بروبيلين، وتتميز هذه الطريقة بسرعة التفاعل وقدرتها على إنتاج بوليمرات طويلة ذات خصائص محددة بدقة. أما بلمرة التكاثف (Condensation Polymerization)، فتتضمن ارتباط المونومرات مع بعضها البعض مع إنتاج نواتج ثانوية مثل الماء أو الكحول، كما في تحضير النايلون والبولي إستر، وتتميز هذه الطريقة بإمكانية التحكم في ترتيب المونومرات وطول السلسلة الناتجة، مما يؤثر مباشرة على الخواص الميكانيكية والحرارية للبوليمر النهائي. وتلعب ظروف البلمرة

مثل درجة الحرارة، الضغط، نوع المذيبات والمحفظات دورًا مهمًا في تحديد بنية البوليمر ووزنه الجزيئي واستجابته للعوامل البيئية والإشعاعية، وهو ما يجعل فهم طرق التحضير أساسيًا لتصميم بوليمرات مناسبة لتطبيقات محددة مثل قياس الجرعات الإشعاعية، حيث تؤثر طريقة التحضير على حساسية البوليمر واستقراره وقدرته على تسجيل التغيرات الناتجة عن التعرض للإشعاع بدقة عالية . [5]

5-1 الخصائص الفيزيائية والكيميائية للبوليمرات

تُعد البوليمرات من المواد الأساسية في العلوم الهندسية والتطبيقية نظرًا لتنوع خصائصها الفيزيائية والكيميائية التي تنتج عن طبيعة تركيبها الجزيئي وطول سلاسلها البوليمرية وطريقة ترابط الوحدات البنائية فيما بينها. إن هذه الخصائص تمنح البوليمرات مرونة عالية في الاستخدام مقارنة بالمواد التقليدية مثل المعادن والسيراميك، حيث يمكن التحكم في خواصها بما يتناسب مع متطلبات التطبيقات المختلفة.

من أهم الخصائص الفيزيائية للبوليمرات الوزن الجزيئي، إذ يؤثر بشكل مباشر على السلوك الميكانيكي والحراري للمادة البوليمرية. فكلما ازداد الوزن الجزيئي زادت قوة الشد والتمتانة ومقاومة التمزق، في حين تزداد اللزوجة وصعوبة المعالجة. كما أن توزيع الأوزان الجزيئية يلعب دورًا مهمًا في تحديد قابلية البوليمر للتشكيل، حيث إن البوليمرات ذات التوزيع الضيق تظهر خواص أكثر انتظامًا واستقرارًا.

تُعد الكثافة خاصية فيزيائية أخرى ترتبط ارتباطاً وثيقاً بدرجة التبلور داخل البوليمر. فالبوليمرات المتبلورة تمتلك كثافة أعلى نتيجة انتظام السلاسل البوليمرية وتقاربها، بينما تكون الكثافة أقل في البوليمرات غير المتبلورة بسبب العشوائية في ترتيب السلاسل. ويؤثر هذا العامل بشكل واضح على الخواص الميكانيكية مثل الصلابة والمقاومة الميكانيكية. [6]

تلعب الخواص الميكانيكية دوراً محورياً في تحديد استخدام البوليمرات، وتشمل هذه الخواص المرونة، المتانة، الصلابة، وقوة الشد. وتعتمد هذه الخصائص على طبيعة الروابط بين السلاسل البوليمرية ودرجة التشابك بينها، إضافة إلى وجود الملدنات التي تزيد من مرونة البوليمر وتقلل من هشاشته. فالبوليمرات المطاطية تتميز بقدرتها العالية على الاستطالة والعودة إلى شكلها الأصلي، في حين تُظهر البوليمرات الحرارية الصلبة صلابة عالية ومقاومة كبيرة للتشوه.

أما الخصائص الحرارية للبوليمرات فتُعد من العوامل الأساسية التي تحدد مدى ملاءمتها للاستخدام في ظروف درجات الحرارة المختلفة. وتُعد درجة الانتقال الزجاجي من أهم هذه الخصائص، حيث تمثل درجة الحرارة التي يتحول عندها البوليمر من حالة صلبة وهشة إلى حالة مرنة. كما أن درجة الانصهار تُميز البوليمرات المتبلورة، وتحدد الحد الأعلى لاستخدام البوليمر في التطبيقات الحرارية دون فقدان بنيته. [7]

تتميز معظم البوليمرات بخصائص كهربائية جيدة، إذ تُعد عوازل فعالة للتيار الكهربائي بسبب غياب الإلكترونات الحرة في بنيتها، مما يجعلها مناسبة للاستخدام في الصناعات الكهربائية والإلكترونية.

كما تمتلك بعض البوليمرات خصائص بصرية مميزة مثل الشفافية العالية أو القدرة على تشتيت الضوء، مما يتيح استخدامها في التطبيقات البصرية والطبية.

من الناحية الكيميائية، يعتمد سلوك البوليمرات بشكل أساسي على تركيبها الكيميائي وطبيعة المجموعات الوظيفية الموجودة في سلسلتها. فوجود مجموعات قطبية مثل الهيدروكسيل أو الكربوكسيل يزيد من قابلية البوليمر للتفاعل مع الماء والمواد الكيميائية، في حين أن البوليمرات غير القطبية تُظهر مقاومة كيميائية أعلى تجاه المذيبات والأحماض.

تتميز العديد من البوليمرات بمقاومة جيدة للتفاعلات الكيميائية مثل الأحماض والقلويات، إلا أن هذه المقاومة قد تختلف باختلاف التركيب الجزيئي ودرجة التبلور. فالبوليمرات عالية التبلور غالبًا ما تكون أكثر مقاومة للتحلل الكيميائي بسبب صعوبة اختراق المواد الكيميائية إلى داخل بنيتها.

تخضع بعض البوليمرات إلى تفاعلات كيميائية مختلفة مثل الأكسدة، التحلل المائي، أو التشابك الكيميائي، والتي قد تؤدي إلى تغير في الخواص الفيزيائية والميكانيكية للمادة. وقد يكون لهذه التفاعلات تأثير إيجابي مثل زيادة المتانة، أو تأثير سلبي يؤدي إلى تقادم البوليمر وفقدان خواصه مع مرور الزمن.

تشير قابلية التحلل إلى قدرة البوليمر على التفكك تحت تأثير العوامل البيئية مثل الرطوبة، الحرارة، أو الكائنات الحية الدقيقة. وقد حظيت البوليمرات القابلة للتحلل الحيوي باهتمام متزايد في السنوات

الأخيرة نظرًا لدورها في تقليل التلوث البيئي، إذ تتحلل إلى مركبات غير ضارة مقارنة بالبوليمرات التقليدية غير القابلة للتحلل. [8]

يمكن القول إن الخصائص الفيزيائية والكيميائية للبوليمرات مترابطة بشكل وثيق مع تركيبها الجزيئي وبنيتها الداخلية، ويُعد فهم هذه الخصائص أساسًا مهمًا لتطوير مواد بوليمرية جديدة ذات أداء محسّن تلبي متطلبات التطبيقات الصناعية والطبية والبيئية الحديثة .

6-1 التركيب الجزيئي للبوليمرات

يعتمد التركيب الجزيئي للبوليمرات على وحدات بنائية صغيرة تُعرف بالمونومرات، ترتبط فيما بينها بروابط تساهمية قوية لتكوين سلاسل طويلة قد تكون خطية أو متفرعة أو متشابكة، ويُعد هذا التركيب الجزيئي العامل الأساسي الذي يحدد الخواص الفيزيائية والكيميائية للبوليمر. تختلف البوليمرات فيما بينها من حيث نوع المونومر المستخدم وطبيعة الروابط بين الوحدات المتكررة، إذ قد تكون السلسلة البوليمرية مكوّنة من نوع واحد من المونومرات فيما يُعرف بالبوليمرات المتجانسة، أو من أكثر من نوع في البوليمرات المشتركة، مما يؤثر بشكل مباشر على انتظام السلسلة ودرجة التبلور. كما تلعب طبيعة الروابط الثانوية بين السلاسل، مثل الروابط الهيدروجينية وقوى فان دير فالس، دورًا مهمًا في تماسك السلاسل وتقاربها، وبالتالي في تحديد قوة المادة واستقرارها. ويؤثر طول السلسلة البوليمرية والوزن الجزيئي بشكل كبير على حركة السلاسل ومرونتها، حيث إن السلاسل الطويلة ذات الوزن الجزيئي العالي تؤدي إلى زيادة التشابك بين السلاسل، مما يمنح البوليمر متانة أعلى ومقاومة أكبر

للتشوه. إضافةً إلى ذلك، فإن وجود مجموعات وظيفية مختلفة على السلسلة البوليمرية مثل الهيدروكسيل أو الأمين أو الكربوكسيل يحدد سلوك البوليمر الكيميائي وتفاعله مع الوسط المحيط، ويؤثر على ذوبانيته ومقاومته الكيميائية. إن هذا التنوع في التركيب الجزيئي يمنح البوليمرات قدرة فريدة على التكيف مع متطلبات التطبيقات الصناعية والطبية والبيئية، ويجعل التحكم في التركيب الجزيئي أساسًا رئيسيًا في تصميم وتطوير مواد بوليمرية ذات خصائص محددة. [9]

1-7 هدف البحث

يهدف هذا البحث إلى تقديم دراسة علمية شاملة عن البوليمرات من حيث مفهومها، تركيبها الجزيئي، وأنواع الروابط التي تكوّن سلاسلها، وبيان تأثير ذلك على خصائصها الفيزيائية والكيميائية. كما يتناول البحث طرق تحضير البوليمرات مثل بلمرة الإضافة وبلمرة التكاثف، والعوامل المؤثرة في تكوينها وخواصها النهائية. ويسعى البحث كذلك إلى تصنيف البوليمرات وفق المصدر والتركيب والسلوك الحراري والبنية الداخلية، مع توضيح العلاقة بين التركيب الجزيئي والخواص الميكانيكية والحرارية والكهربائية والبصرية. كما يسلط الضوء على تأثير العوامل البيئية والإشعاع على استقرار البوليمرات وتغيراتها البنيوية. وفي الجانب التطبيقي، يهدف البحث إلى إبراز أهمية البوليمرات في المجالات العلمية والهندسية والطبية، خصوصًا في التطبيقات الإشعاعية وقياس الجرعات، ودورها في تطوير مواد متقدمة عالية الكفاءة وذات جدوى اقتصادية يهدف هذا البحث إلى تقديم دراسة علمية شاملة عن البوليمرات من حيث مفهومها، تركيبها الجزيئي، وأنواع الروابط التي تكوّن سلاسلها، وبيان

تأثير ذلك على خصائصها الفيزيائية والكيميائية. كما يتناول البحث طرق تحضير البوليمرات مثل بلمرة الإضافة وبلمرة التكاثف، والعوامل المؤثرة في تكوينها وخواصها النهائية. ويسعى البحث كذلك إلى تصنيف البوليمرات وفق المصدر والتركيب والسلوك الحراري والبنية الداخلية، مع توضيح العلاقة بين التركيب الجزيئي والخواص الميكانيكية والحرارية والكهربائية والبصرية. كما يسلط الضوء على تأثير العوامل البيئية والإشعاع على استقرار البوليمرات وتغيراتها البنيوية.

وفي الجانب التطبيقي، يهدف البحث إلى إبراز أهمية البوليمرات في المجالات العلمية والهندسية والطبية، خصوصًا في التطبيقات الإشعاعية وقياس الجرعات، ودورها في تطوير مواد متقدمة عالية الكفاءة وذات جدوى اقتصادية.

الفصل الثاني

الاشعاع والجرعة الاشعاعية

1-2 الإشعاع

الإشعاع هو عملية انتقال الطاقة من مصدرٍ ما على شكل موجات كهرومغناطيسية أو جسيمات دون الحاجة إلى وسط مادي ناقل، ولذلك يمكنه الانتقال في الفراغ كما يحدث مع أشعة الشمس التي تصل إلى الأرض عبر الفضاء. ينقسم الإشعاع بشكل أساسي إلى نوعين: إشعاع غير مؤين، مثل موجات الراديو والميكروويف والأشعة تحت الحمراء والضوء المرئي، وهذا النوع يمتلك طاقة منخفضة لا تكفي لإزالة الإلكترونات من الذرات، لذلك تكون آثاره البيولوجية محدودة غالبًا وتقتصر على التسخين أو الإثارة الجزيئية؛ وإشعاع مؤين، مثل الأشعة السينية وأشعة غاما وجسيمات ألفا وبيتا، وهو يمتلك طاقة عالية قادرة على تأيين الذرات وكسر الروابط الكيميائية داخل الخلايا، مما قد يؤدي إلى تلف في الحمض النووي وزيادة خطر الطفرات والأمراض السرطانية عند التعرض لجرعات مرتفعة أو لفترات طويلة. مصادر الإشعاع قد تكون طبيعية، كالإشعاع الكوني والعناصر المشعة الموجودة في القشرة الأرضية مثل اليورانيوم والرادون، أو صناعية ناتجة عن النشاط البشري مثل الأجهزة الطبية (التصوير بالأشعة)، المفاعلات النووية، وبعض التطبيقات الصناعية. ويُقاس تأثير الإشعاع على الإنسان بوحدات تعكس كمية الطاقة الممتصة وتأثيرها الحيوي، مع الأخذ بنظر الاعتبار نوع الإشعاع وحساسية الأنسجة المعرضة. ورغم المخاطر المحتملة، فإن للإشعاع استخدامات واسعة ومهمة في الطب للتشخيص والعلاج، وفي الصناعة لفحص المواد، وفي البحث العلمي، مما يجعل فهم خصائصه وطرق الوقاية منه أمرًا أساسيًا لتحقيق الاستفادة القصوى منه مع تقليل مخاطره.

ويُعد الإشعاع ظاهرة فيزيائية أساسية ترتبط بالبنية الذرية للمادة وبالتغيرات التي تحدث داخل النواة أو في مستويات الطاقة للإلكترونات. فعندما تفقد الذرة حالة الاستقرار، سواء نتيجة تفاعلات نووية أو انتقالات إلكترونية، فإنها تطلق طاقة على شكل إشعاع. لذلك يظهر الإشعاع في العديد من الظواهر الطبيعية مثل ضوء الشمس، والحرارة، والأشعة الكونية. [10]

2-2 انواع الاشعاع

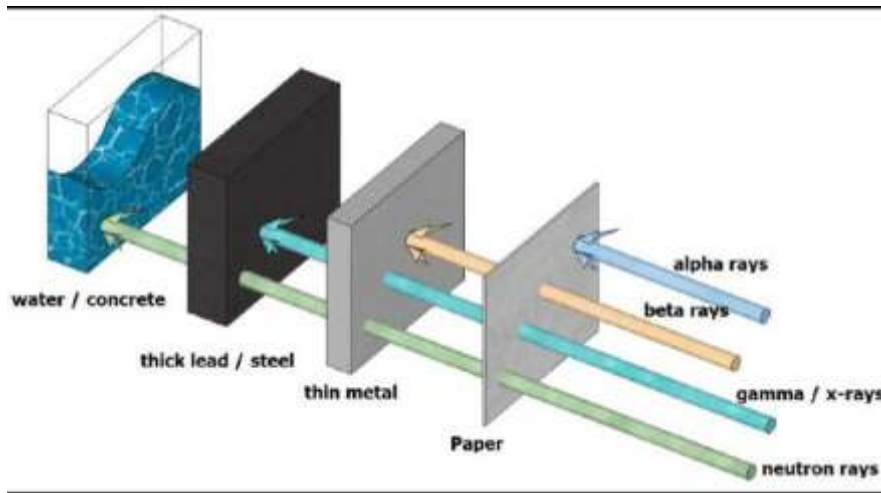
• اشعاع الفا :-

إشعاع ألفا هو نوع من الإشعاع النووي المؤيّن ينشأ من تحلل النوى الثقيلة غير المستقرة مثل اليورانيوم والراديو، حيث تطلق النواة جسيم ألفا الذي يتكوّن من بروتونين ونيوترونين (أي نواة ذرة هيليوم)، وبذلك ينخفض العدد الذري للعنصر بمقدار 2 والعدد الكتلي بمقدار 4، مما يؤدي إلى تكوّن عنصر جديد أخف وأكثر استقرارًا. تمتاز جسيمات ألفا بكتلة كبيرة نسبيًا وشحنة موجبة مزدوجة، لذلك تمتلك قدرة تأيين عالية جدًا لأنها تفقد طاقتها بسرعة عند مرورها في المادة وتنتزع الإلكترونات من الذرات بكفاءة كبيرة، لكنها بالمقابل ذات قدرة اختراق ضعيفة جدًا فلا تستطيع اختراق ورقة أو الطبقة الخارجية من جلد الإنسان، ويمكن إيقافها ببضعة سنتيمترات من الهواء. الخطر الحقيقي لإشعاع ألفا يظهر عند دخول المواد الباعثة له إلى الجسم عن طريق الاستنشاق أو الابتلاع أو الجروح، إذ تُحدث تأينًا كثيفًا داخل الأنسجة الحية قد يسبب تلفًا شديدًا في الخلايا والحمض النووي ويزيد من خطر السرطان. ورغم ذلك، يُستفاد من خصائصه في بعض التطبيقات مثل كواشف

الدخان، ومصادر الطاقة في المركبات الفضائية (المولدات الحرارية النظرية)، وأبحاث الفيزياء النووية، ما يجعله إشعاعاً ذا خطورة بيولوجية عالية داخلياً وأهمية علمية وتقنية كبيرة .

جسيمات ألفا هي نوى ذرات الهيليوم، تتكون من بروتونين ونيوترونين، لذلك فهي ثقيلة وتحمل شحنة موجبة مزدوجة. تنبعث عادةً من تحلل العناصر الثقيلة مثل اليورانيوم والراديو. بسبب كتلتها الكبيرة وشحنتها العالية، تفقد طاقتها بسرعة عند مرورها في المادة، لذلك قدرتها على الاختراق ضعيفة جداً؛ إذ يمكن لورقة أو عدة سنتيمترات من الهواء إيقافها. لكن بالمقابل تمتلك قدرة تأيين شديدة جداً لأنها تتفاعل بقوة مع الذرات التي تصطدم بها. خارجياً لا تشكل خطراً كبيراً، لكن إذا دخلت للجسم عن طريق الاستنشاق أو الابتلاع فإنها قد تُحدث تلفاً شديداً في الأنسجة الداخلية، خصوصاً الرئتين.

[11]



شكل يوضح اشعاع الفا

• اشعاع بيتا :

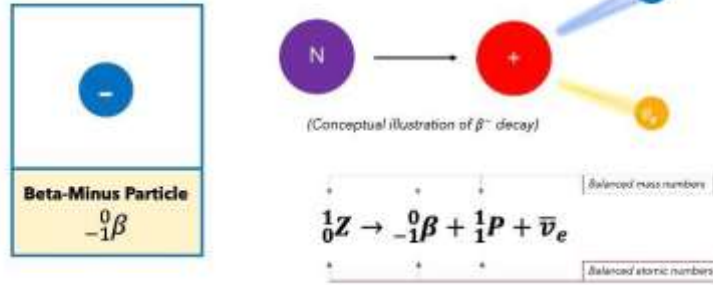
يتكون من إلكترونات سالبة (بيتا-) أو بوزيترونات موجبة (بيتا+)، تنبعث من النواة عندما يتحول نيوترون إلى بروتون أو العكس. كتلته صغيرة جدًا مقارنة بألفا، لذلك قدرته على الاختراق أكبر، إذ يمكنه المرور عبر الجلد لمسافة قصيرة. يسبب تأيينًا متوسط الشدة. التعرض الخارجي قد يؤدي إلى حروق إشعاعية سطحية، أما داخليًا فيمكن أن يضر الأنسجة والأعضاء. يُوقَف عادةً بمواد خفيفة مثل البلاستيك أو الألمنيوم، لأن المواد الثقيلة قد تولد إشعاعًا ثانويًا (فرملة إشعاعية). إشعاع بيتا هو أحد أشكال الإشعاع النووي المؤيّن وينشأ من تحلل النوى الذرية غير المستقرة سريعًا للوصول إلى حالة أكثر استقرارًا، تمتاز جسيمات بيتا بكتلة صغيرة جدًا وشحنة كهربائية، ما يمنحها قدرة تأيين متوسطة واختراقًا أكبر من جسيمات ألفا وأقل من أشعة غاما، إذ يمكن إيقافها بصفائح رقيقة من الألمنيوم أو البلاستيك. يؤثر إشعاع بيتا حيويًا في المادة عبر إحداث تأيين داخل الخلايا، مما قد يسبب تلفًا في الأنسجة والحمض النووي عند التعرض المرتفع أو الداخلي، لذلك يُعد خطره ملحوظًا خصوصًا إذا دخلت المواد المشعة إلى الجسم. ورغم مخاطره، يُستخدم على نطاق واسع في الطب النووي (مثل التصوير البوزيتروني PET والعلاج الإشعاعي الموضعي) وفي الصناعة لقياس السماكات ومراقبة الجودة، مما يجعله ذا أهمية علمية وتطبيقية كبيرة. [12]

Beta-Minus Decay

In Beta Minus Decay, a **beta particle** is an **electron** emitted from the nucleus.

For simplicity's sake, you can imagine a neutron splitting into a proton and an electron.

An **antineutrino** is also emitted and has no effective mass.



• اشعاع النيوترونات :

إشعاع النيوترونات هو نوع من الإشعاع النووي يتكوّن من نيوترونات حرة غير مشحونة تنبعث من التفاعلات النووية مثل الانشطار في المفاعلات أو بعض التحللات الإشعاعية والتفاعلات الاندماجية، ويمتاز بأنه غير مؤيّن بشكل مباشر لغياب الشحنة الكهربائية، لكنه يُعد شديد الخطورة بيولوجيًا لأنه يسبب تأيّنًا غير مباشر عبر اصطدامه بأنوية الذرات داخل المادة الحية، خصوصًا نوى الهيدروجين، مما يولّد جسيمات مشحونة ثانوية عالية الطاقة (مثل البروتونات المرتدة) تُحدث تلفًا كثيفًا في الأنسجة والحمض النووي. يتمتع إشعاع النيوترونات بقدرة اختراق عالية جدًا مقارنةً بألفا وبيتا، ويصعب إيقافه بالمعادن الثقيلة وحدها، لذا تُستخدم مواد غنية بالهيدروجين مثل الماء أو البارافين أو الخرسانة الخاصة لإبطائه وامتصاصه عبر عمليات التصادم والالتقاط النووي. كما أن للنيوترونات قدرة على جعل المواد مشعّة من خلال ما يُعرف بالتنشيط الإشعاعي عندما تمتصها النوى، وهو ما يزيد من تعقيد الحماية الإشعاعية. يُقاس تأثيره الحيوي بمعامل ترجيح إشعاعي مرتفع

بسبب شدة الضرر المجهرى الذي يسببه، ويُستخدم في تطبيقات مهمة مثل تشغيل المفاعلات النووية، التحليل بالتنشيط النيوتروني، أبحاث فيزياء المواد، وبعض أنواع العلاج الإشعاعي المتقدم، مما يجعله ذا أهمية علمية وصناعية كبيرة رغم تحديات الوقاية منه. [13]

2-3 مصادر الإشعاع (Sources of Radiation)

تُعرّف مصادر الإشعاع بأنها جميع المنابع الطبيعية أو الاصطناعية التي تُصدر طاقة على شكل موجات كهرومغناطيسية أو جسيمات دون ذرية، قادرة على إحداث تآين في المادة عند امتلاكها طاقة كافية. وتنقسم مصادر الإشعاع بصورة عامة إلى مصادر طبيعية موجودة في البيئة منذ نشأة الأرض، ومصادر صناعية ناتجة عن الأنشطة البشرية والتقدم التكنولوجي، لا سيما في المجالات الطبية والصناعية والنووية. وتمثل دراسة مصادر الإشعاع محورًا أساسيًا في علوم الفيزياء النووية والوقاية الإشعاعية، لما لها من تأثيرات بيولوجية وبيئية محتملة تعتمد على الجرعة ونوع الإشعاع وزمن التعرض. [14]

أولاً: المصادر الطبيعية للإشعاع (Natural Sources of Radiation)

تشكل المصادر الطبيعية النسبة الأكبر من التعرض الإشعاعي الذي يتلقاه الإنسان سنويًا، وهي جزء من البيئة المحيطة بنا. ويمكن تصنيفها إلى ما يأتي:

(1) الإشعاع الكوني (Cosmic Radiation)

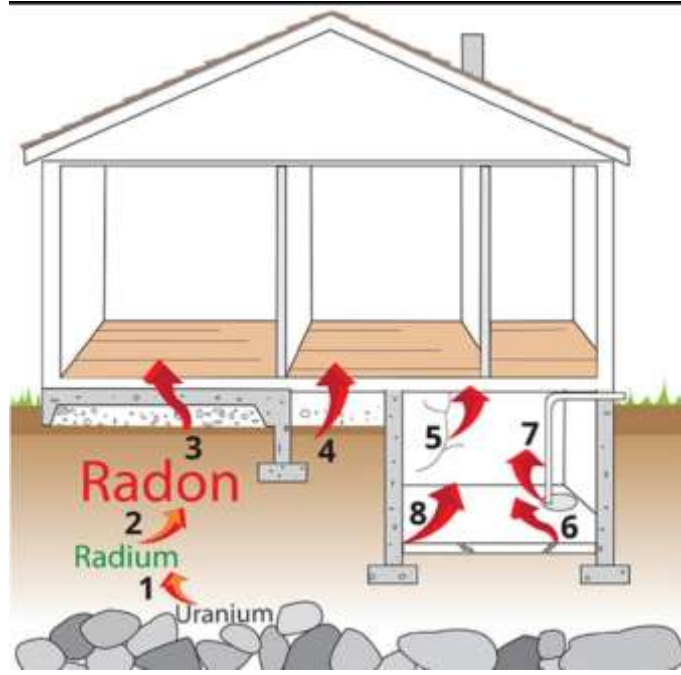
الإشعاع الكوني هو إشعاع عالي الطاقة مصدره الفضاء الخارجي، وينتج عن تفاعلات نووية تحدث في الشمس والنجوم البعيدة والمستعرات العظمى. يتكون هذا الإشعاع من جسيمات مشحونة مثل البروتونات والنيوترونات والنوى الثقيلة، وعند دخولها الغلاف الجوي للأرض تتفاعل مع الذرات مكونة جسيمات ثانوية مثل الميونات والنيوترونات.

تزداد شدة الإشعاع الكوني كلما ارتفعنا عن سطح البحر بسبب انخفاض سماكة الغلاف الجوي الذي يعمل كدرع واقٍ، لذلك يكون التعرض أعلى لدى العاملين في الطيران وسكان المناطق الجبلية.

(2) غاز الرادون (Radon Gas)

يُعد غاز الرادون من أهم مصادر الإشعاع الطبيعي، وهو غاز نبيل مشع ينتج من التحلل الإشعاعي لليورانيوم الموجود في التربة والصخور. يتسرب الرادون إلى المباني عبر الشقوق الأرضية ويتراكم في الأماكن المغلقة سيئة التهوية.

تكمن خطورته في كونه غير مرئي وعديم الرائحة، وعند استنشاقه يترسب في الرئتين، حيث تستمر نواتج تحلله في إصدار جسيمات ألفا، مما يزيد احتمالية التأثيرات البيولوجية على أنسجة الرئة.



شكل يوضح غاز الرادون كمصدر للإشعاع الطبيعي

(3) النظائر المشعة في القشرة الأرضية

تحتوي الصخور والتربة بطبيعتها على نظائر مشعة مثل اليورانيوم والثوريوم والبوتاسيوم-40. هذه العناصر تطلق إشعاعات ألفا وبيتا وغاما خلال عمليات التحلل الإشعاعي الطويلة الأمد. كما تدخل بعض هذه النظائر إلى جسم الإنسان عبر الماء والغذاء، مما يؤدي إلى تعرض داخلي منخفض المستوى ولكنه مستمر.

4) الإشعاع الداخلي في جسم الإنسان

يحتوي جسم الإنسان نفسه على كميات ضئيلة من النظائر المشعة الطبيعية مثل البوتاسيوم-40 والكربون-14، والتي تصدر إشعاعات ضعيفة نتيجة النشاط الإشعاعي الطبيعي للأنسجة. [15]

ثانياً: المصادر الصناعية للإشعاع (Artificial Sources of Radiation)

ظهرت المصادر الصناعية نتيجة التطور العلمي في القرن العشرين، وأصبحت تمثل جزءاً مهماً من الاستخدامات الطبية والصناعية.

1) المصادر الطبية

تعد التطبيقات الطبية أكبر مصدر للتعرض الإشعاعي الصناعي، وتشمل:

- أجهزة الأشعة السينية (X-ray).
- التصوير المقطعي المحوسب (CT).
- العلاج الإشعاعي لعلاج الأورام.

تعتمد هذه التقنيات على توجيه جرعات محسوبة من الإشعاع لأغراض التشخيص أو العلاج، مع مراعاة معايير الحماية الإشعاعية لتقليل الجرعة الممتصة في الأنسجة السليمة.

(2) المفاعلات النووية ومحطات الطاقة

تستخدم المفاعلات النووية عملية الانشطار النووي لإنتاج الطاقة الحرارية التي تتحول إلى كهرباء. وخلال هذه العملية تنتج نواتج انشطار مشعة تتطلب أنظمة احتواء وتخزين دقيقة لمنع تسرب المواد المشعة إلى البيئة.

ورغم إجراءات الأمان العالية، فإن الحوادث النووية النادرة قد تؤدي إلى إطلاق مواد مشعة تؤثر بيئياً وصحياً.

(3) الاستخدامات الصناعية

يُستخدم الإشعاع في المجالات الصناعية لفحص جودة اللحام والكشف عن العيوب الداخلية في المعادن عبر تقنيات التصوير الإشعاعي الصناعي. كما يُستعمل في قياس السماكة والكثافة، وفي تعقيم المعدات الطبية والأغذية.

(4) الأسلحة والتجارب النووية

أدت التجارب النووية السابقة إلى انتشار بعض النظائر المشعة في الغلاف الجوي، مما ساهم في زيادة الخلفية الإشعاعية عالمياً لفترات زمنية طويلة. [16]

(Radiation–Matter Interaction)

يُعد تفاعل الإشعاع مع المادة عملية فيزيائية أساسية تحدد سلوك الإشعاع عند مروره في وسط مادي، كما تحدد مقدار الطاقة المنتقلة إلى ذلك الوسط ونوع التأثير الناتج. عندما يخترق الإشعاع مادة ما، فإنه لا ينتقل دون تأثير، بل يخضع لسلسلة من التفاعلات المجهرية مع إلكترونات الذرات وأنويتها، مما يؤدي إلى فقدان تدريجي للطاقة عبر عمليات التأين والإثارة والتشتت والتحويلات النووية. ويعتمد نوع التفاعل السائد على طبيعة الإشعاع (جسمي أو فوتوني)، طاقته الحركية أو الكهرومغناطيسية، إضافة إلى الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمادة مثل العدد الذري والكثافة والتركيب الإلكتروني

يعتبر تفاعل الإشعاع مع المادة من الركائز الأساسية في الفيزياء الإشعاعية، إذ تعتمد التأثيرات الفيزيائية والبيولوجية للإشعاع على طبيعة هذا التفاعل وآليته. عند مرور الإشعاع خلال مادة معينة، سواء كانت صلبة أو سائلة أو غازية، فإنه ينقل جزءاً من طاقته إلى ذرات وجزيئات تلك المادة عبر عمليات متعددة تؤدي إلى التأين (Ionization) أو الإثارة (Excitation). ويعتمد نمط التفاعل على نوع الإشعاع (جسمي أو كهرومغناطيسي)، وطاقته، وعدد الذرات في الوسط، إضافة إلى العدد الذري للمادة وكثافتها . [17]

أولاً: الآليات المجهرية لنقل الطاقة

عند دخول جسيم أو فوتون إلى مادة، تبدأ عملية تبادل الطاقة عبر تصادمات مجهرية. يمكن تصنيف هذه العمليات إلى:

(1) التأين (Ionization)

يحدث عندما يمتلك الإشعاع طاقة كافية لاقتلاع إلكترون من مداره الذري، مما يؤدي إلى تكوين أيون موجب وإلكترون حر. يمثل التأين العملية الأساسية المسؤولة عن معظم التأثيرات البيولوجية للإشعاع، لأن تكوين الأيونات يغيّر البنية الكيميائية للجزيئات، خصوصاً في الأنظمة الحيوية.

(2) الإثارة (Excitation)

في هذه الحالة تنتقل طاقة جزئية إلى الإلكترون دون طرده من الذرة، فيرتفع إلى مستوى طاقة أعلى مؤقتاً ثم يعود إلى حالته الأصلية مطلقاً طاقة على شكل فوتون أو حرارة. رغم أن الإثارة أقل خطورة من التأين، إلا أنها قد تحدث تغيرات كيميائية غير مباشرة.

ثانياً: فقدان الطاقة للإشعاع الجسيمي (Stopping Powe)

الإشعاعات الجسيمية مثل ألفا وبيتا تفقد طاقتها بصورة مستمرة أثناء مرورها بالمادة نتيجة التفاعلات الكهروستاتيكية مع الإلكترونات. يُعبّر عن معدل فقدان الطاقة بمفهوم قدرة الإيقاف (Stopping

Power)، وهو مقدار الطاقة المفقودة لكل وحدة طول من المسار. [18]

جسيمات ألفا

- تمتلك كتلة كبيرة وشحنة موجبة مزدوجة.
- تسبب تأينًا كثيفًا جدًا على مسار قصير.
- تتميز بقيمة عالية من انتقال الطاقة الخطي (LET).
- تأثيرها موضعي لكنه شديد الكثافة.

جسيمات بيتا

- أخف كتلة وأكثر سرعة.
- تسبب تأينًا أقل كثافة من ألفا.
- مسارها أطول وقد تنتج إشعاع كبح عند انحرافها قرب أنوية ثقيلة.

ثالثاً: تفاعل الفوتونات (أشعة غاما والأشعة السينية)

الفوتونات لا تمتلك شحنة، لذلك لا تفقد طاقتها تدريجياً، بل تتفاعل عبر أحداث منفصلة تعتمد على

طاقتها:

1) التأثير الكهروضوئي

يهيمن عند الطاقات المنخفضة نسبيًا وفي المواد ذات العدد الذري العالي. يمتص الإلكترون طاقة الفوتون بالكامل ويغادر الذرة، مما يؤدي إلى سلسلة من الانبعاثات الثانوية.

2) تشتت كومبتون

يمثل التفاعل السائد في الطاقات المتوسطة. ينقل الفوتون جزءًا من طاقته إلى إلكترون حر، ويستمر بطاقة أقل. يؤدي ذلك إلى انتشار الإشعاع داخل المادة بدل امتصاصه الكامل.

3) إنتاج الأزواج

يحدث عند الطاقات العالية جدًا، حيث يتحول الفوتون إلى إلكترون وبوزيترون قرب النواة. يمثل هذا التفاعل تحويلًا مباشرًا للطاقة إلى كتلة وفق معادلة أينشتاين $E=mc^2$ [19].

رابعاً: قانون التوهين الإشعاعي

عند مرور حزمة فوتونية خلال مادة، تنخفض شدتها وفق علاقة أسية:

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

حيث:

- I_0 الشدة الابتدائية
- I الشدة بعد الاختراق
- μ معامل التوهين
- x سمك المادة

يمثل معامل التوهين احتمال حدوث تفاعل لكل وحدة طول، ويزداد بزيادة العدد الذري والكثافة.

خامساً: التفاعل مع المواد الحيوية

في الأنسجة الحية، يشكل الماء حوالي 70% من الكتلة، لذلك فإن معظم التفاعلات تحدث مع جزيئات الماء. يؤدي التأين إلى تكوين جذور حرة مثل:

$\text{OH} \cdot$ و $\text{H} \cdot$

وهذه الجذور عالية التفاعل قد تهاجم:

• الحمض النووي (DNA)

• البروتينات

• الأغشية الخلوية

مما يؤدي إلى طفرات جينية أو موت خلوي إذا لم يتم إصلاح الضرر. [20]

يعتمد تفاعل الإشعاع مع المادة على مفاهيم ميكانيكا الكم، إذ يتم تحديد احتمالية التفاعل عبر ما يُعرف بالمقطع العرضي (Cross Section)، وهو مقياس لاحتمال حدوث تصادم معين بين الجسيم والإلكترون أو النواة. كلما زادت قيمة المقطع العرضي، زادت احتمالية التفاعل.

كما أن توزيع الطاقة المترسبة داخل المادة لا يكون متجانساً، بل يحدث على شكل مسارات دقيقة تُعرف بمسارات التأين (Ionization Tracks)، وهي المسؤولة عن تحديد شدة التأثير البيولوجي.

تفاعل الإشعاع مع المادة عملية معقدة متعددة الآليات، تشمل انتقال الطاقة عبر التأين والإثارة والتشتت والتحويلات النووية. وتختلف طبيعة التفاعل باختلاف نوع الإشعاع وطاقته وخصائص المادة الممتصة. تمثل هذه التفاعلات الأساس النظري لفهم التطبيقات الطبية مثل العلاج الإشعاعي، وأنظمة الحماية الإشعاعية، وتصميم الدروع الواقية، فضلاً عن تفسير التأثيرات البيولوجية على

المستوى الجزيئي والخلوي. [21]

تعتبر الجرعة الإشعاعية مقياسًا حيويًا لتحديد كمية الطاقة التي ينقلها الإشعاع إلى المادة، وهي ليست مجرد قيمة كمية فحسب، بل تعكس القدرة الحقيقية للإشعاع على إحداث تغييرات في البنية الجزيئية والكيميائية للمركبات. هذا المفهوم يصبح أكثر أهمية عند دراسة المواد البوليمرية، حيث أن التفاعل بين الإشعاع والبوليمرات يمكن أن يؤدي إلى تعديلات دقيقة في التركيب الكيميائي، ما يترتب عليه تغييرات في الخصائص الفيزيائية والميكانيكية والحرارية للمادة. ومن خلال التحكم في الجرعة الإشعاعية، يمكن توجيه عملية التعديل بطريقة منهجية، بحيث تتحقق أهداف محددة مثل تحسين الاستقرار الحراري، زيادة المقاومة الكيميائية، أو تعزيز الخصائص الميكانيكية للبوليمر.

إن فهم العلاقة بين الجرعة الإشعاعية والبوليمرات يوفر إطارًا متكاملًا لدراسة تفاعلات التعديلات الجزيئية والتحفيز الإشعاعي، حيث يمكن من خلاله استكشاف كيفية تفعيل الروابط الكيميائية، تكوين الشبكات البوليمرية، وتغيير سلوك المواد على المستوى النانوي والجزيئي. وهذا الفهم العلمي ليس مجرد قاعدة نظرية، بل يشكل أساسًا لتطوير تطبيقات عملية متنوعة في المجالات الطبية، الصناعية، والهندسية، حيث يمكن تصميم مواد ذات خصائص محددة ومضبوطة وفق متطلبات الاستخدام النهائي.

وبالتالي، تشكل الجرعة الإشعاعية الجسر الأساسي الذي يربط الفصل الثاني بالفصل الثالث، حيث يفتح المجال للتعلم في آليات التأثير الإشعاعي على البوليمرات، وتحليل كيفية استجابة المواد المختلفة لمستويات الجرعة المتنوعة، وما ينتج عن ذلك من تغييرات في البنية الكيميائية، الخصائص الفيزيائية، والأداء التطبيقي. إن هذا التوجه البحثي يعكس التداخل بين علوم الفيزياء والكيمياء

والهندسة المادية، ويوفر قاعدة متينة لتفسير النتائج والتطبيقات العملية التي ستتم مناقشتها بشكل موسع في الفصل التالي.

الفصل الثالث

تفاعل الاشعاع مع البوليمرات وتأثيره

في خصائصها وتطبيقاتها

تُعد البوليمرات من أهم المواد المستخدمة في العديد من التطبيقات الصناعية والطبية والهندسية، وذلك لما تتميز به من خصائص فيزيائية وكيميائية قابلة للتعديل والتحسين وفق متطلبات الاستخدام المختلفة. وقد أدى التقدم العلمي في مجالات الفيزياء والكيمياء إلى تطوير تقنيات متعددة لتعديل خواص البوليمرات، ومن بين هذه التقنيات تبرز تقنية المعالجة الإشعاعية التي تعتمد على استخدام أنواع مختلفة من الإشعاعات المؤينة لإحداث تغييرات دقيقة في البنية الجزيئية للمواد البوليمرية.

يمثل التفاعل بين الإشعاع والبوليمرات مجالاً علمياً مهماً يجمع بين مفاهيم الفيزياء النووية والكيمياء الجزيئية وعلوم المواد، حيث تعمل الطاقة الإشعاعية المنقولة إلى المادة على إحداث عمليات تأين وإثارة في الجزيئات، الأمر الذي يؤدي إلى تكوين جسيمات فعالة كيميائياً مثل الجذور الحرة. وتُعد هذه الجذور الحرة نقطة البداية لسلسلة من التفاعلات الكيميائية التي يمكن أن تُحدث تغييرات ملحوظة في التركيب البنوي للبوليمرات، مثل تكسير السلاسل الجزيئية أو تكوين روابط تشابكية بين السلاسل المختلفة، مما ينعكس بشكل مباشر على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للمادة. [22]

إن دراسة تأثير الإشعاع على البوليمرات لا تقتصر على الجانب النظري فحسب، بل تمتد لتشمل العديد من التطبيقات العملية التي تعتمد على هذه الظاهرة في تطوير مواد ذات خصائص محسنة. فعلى سبيل المثال، يمكن استخدام الإشعاع لزيادة مقاومة البوليمرات للحرارة أو المواد الكيميائية، أو لتحسين متانتها الميكانيكية، أو لإنتاج مواد بوليمرية ذات بنية شبكية أكثر استقراراً. كما تُستخدم

المعالجة الإشعاعية في تعقيم المواد الطبية المصنوعة من البوليمرات دون الحاجة إلى استخدام مواد كيميائية قد تؤثر في خصائصها.

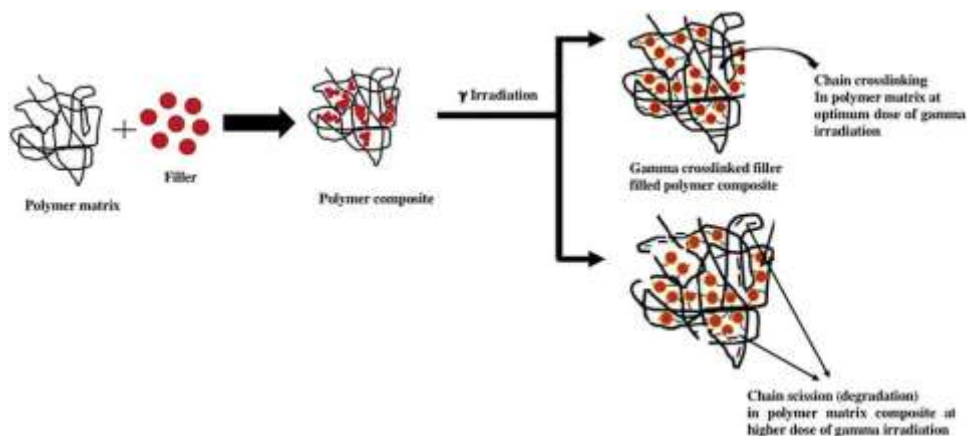
ويعتمد مدى تأثير الإشعاع على البوليمرات على مجموعة من العوامل المهمة، من أبرزها نوع الإشعاع المستخدم وطاقته، والجرعة الإشعاعية الممتصة، بالإضافة إلى طبيعة البوليمر وتركيبه الكيميائي والظروف البيئية المحيطة أثناء عملية التشعيع. لذلك فإن فهم آليات التفاعل الإشعاعي مع البوليمرات يُعد خطوة أساسية لتوجيه هذه العملية بطريقة علمية تتيح التحكم في التغيرات البنوية والخصائص الناتجة عنها.

وبناءً على ما تم تناوله في الفصل الثاني حول طبيعة الإشعاعات النووية والجرعات الإشعاعية وتأثيرها في المواد، يأتي هذا الفصل ليتناول بصورة أكثر تفصيلاً كيفية تفاعل الإشعاع مع المواد البوليمرية، مع التركيز على الآليات الأساسية لهذا التفاعل والتغيرات الفيزيائية والكيميائية الناتجة عنه. كما سيتم توضيح الأسباب التي دفعت إلى استخدام الإشعاع كوسيلة فعالة لمعالجة البوليمرات، إضافة إلى استعراض أهم التطبيقات العملية للبوليمرات المعالجة إشعاعياً في المجالات الصناعية والطبية والتكنولوجية المختلفة. [23]

3-1 تفاعل الإشعاع مع البوليمرات

عند تعرض المواد البوليمرية للإشعاع المؤين مثل أشعة غاما أو الأشعة السينية أو حزم الإلكترونات، تنتقل الطاقة الإشعاعية إلى جزيئات البوليمر بطريقة تؤدي إلى حدوث تغيرات في البنية الجزيئية للمادة. وتبدأ هذه العملية بامتصاص البوليمر للطاقة الإشعاعية، حيث تعمل هذه الطاقة على إثارة

الذرات أو تأيينها، مما يؤدي إلى تحرير إلكترونات من مواقعها الأصلية داخل الجزيئات. ونتيجة لذلك تتكوّن جسيمات عالية النشاط تعرف باسم الجذور الحرة، وهي جزيئات أو ذرات تمتلك إلكترونات غير مزدوجة تجعلها شديدة التفاعل مع الجزيئات المجاورة.



شكل يوضح تفاعل الاشعاع مع البوليمر

تلعب الجذور الحرة دوراً أساسياً في التفاعلات التي تحدث داخل البوليمر بعد عملية التشعيع، إذ يمكن لهذه الجذور أن تتفاعل مع سلاسل بوليمرية أخرى أو مع جزيئات موجودة في الوسط المحيط مثل الأكسجين، مما يؤدي إلى سلسلة من التفاعلات الكيميائية التي تغير البنية الجزيئية للمادة. ومن أبرز هذه التفاعلات تكسير السلاسل البوليمرية، حيث تنفصل السلسلة الطويلة للبوليمر إلى سلاسل أقصر نتيجة كسر الروابط الكيميائية بين الوحدات المتكررة. يؤدي هذا النوع من التفاعلات

عادةً إلى انخفاض الوزن الجزيئي للبوليمر، الأمر الذي قد ينعكس على خصائصه الميكانيكية مثل القوة والمتانة. [24]

في المقابل، قد تؤدي التفاعلات الإشعاعية في بعض الحالات إلى حدوث عملية معاكسة تعرف باسم التشابك الشبكي أو الربط المتقاطع، حيث تتكون روابط كيميائية جديدة بين سلاسل بوليمرية مختلفة، مما يؤدي إلى تكوين شبكة ثلاثية الأبعاد أكثر تماسكاً. ويؤدي هذا التشابك عادةً إلى تحسين العديد من الخصائص الفيزيائية للبوليمر مثل زيادة مقاومته للحرارة وتحسين استقراره الميكانيكي والكيميائي. ولا يقتصر تأثير الإشعاع على التفاعلات الكيميائية فقط، بل يمكن أن يؤدي أيضاً إلى تغييرات في البنية المجهرية للبوليمر، مثل إعادة ترتيب السلاسل الجزيئية أو تغيير درجة التبلور داخل المادة. وهذه التغييرات البنيوية قد تؤثر بدورها في مجموعة من الخصائص الفيزيائية المهمة مثل الكثافة، والمرونة، وقابلية الذوبان، والموصلية الحرارية. [25]

كما يعتمد نوع التفاعل الذي يحدث داخل البوليمر على عدة عوامل، من أهمها طبيعة البوليمر نفسه، إذ تختلف استجابة البوليمرات للإشعاع تبعاً لتركيبها الكيميائي ونوع الروابط الموجودة فيها. فبعض البوليمرات تميل إلى تكوين روابط تشابكية عند تعرضها للإشعاع، في حين أن بعضها الآخر يكون أكثر عرضة لتكسير السلاسل الجزيئية. إضافة إلى ذلك، تلعب الجرعة الإشعاعية ودرجة الحرارة ووجود الأكسجين دوراً مهماً في تحديد طبيعة التفاعلات الناتجة.

وبناءً على ذلك، فإن فهم آلية تفاعل الإشعاع مع البوليمرات يُعد أمراً ضرورياً لتطوير تقنيات المعالجة الإشعاعية المستخدمة في تحسين خصائص هذه المواد. فمن خلال التحكم في نوع الإشعاع والجرعة الإشعاعية وظروف المعالجة، يمكن توجيه التفاعلات داخل البوليمر بطريقة تحقق الخصائص المطلوبة للتطبيقات المختلفة ولا يقتصر تأثير الإشعاع على التفاعلات الكيميائية فقط، بل يمكن أن يؤدي أيضاً إلى تغييرات في البنية المجهرية للبوليمر، مثل إعادة ترتيب السلاسل الجزيئية أو تغيير درجة التبلور داخل المادة. وهذه التغييرات البنيوية قد تؤثر بدورها في مجموعة من الخصائص الفيزيائية المهمة مثل الكثافة، والمرونة، وقابلية الذوبان، والموصلية الحرارية. [26]

كما يعتمد نوع التفاعل الذي يحدث داخل البوليمر على عدة عوامل، من أهمها طبيعة البوليمر نفسه، إذ تختلف استجابة البوليمرات للإشعاع تبعاً لتركيبها الكيميائي ونوع الروابط الموجودة فيها. فبعض البوليمرات تميل إلى تكوين روابط تشابكية عند تعرضها للإشعاع، في حين أن بعضها الآخر يكون أكثر عرضة لتكسير السلاسل الجزيئية. إضافة إلى ذلك، تلعب الجرعة الإشعاعية ودرجة الحرارة ووجود الأكسجين دوراً مهماً في تحديد طبيعة التفاعلات الناتجة.

وبناءً على ذلك، فإن فهم آلية تفاعل الإشعاع مع البوليمرات يُعد أمراً ضرورياً لتطوير تقنيات المعالجة الإشعاعية المستخدمة في تحسين خصائص هذه المواد. فمن خلال التحكم في نوع الإشعاع والجرعة الإشعاعية وظروف المعالجة، يمكن توجيه التفاعلات داخل البوليمر بطريقة تحقق الخصائص المطلوبة للتطبيقات المختلفة. [27]

3-2 التأثيرات الفيزيائية والكيميائية للإشعاع على البوليمرات

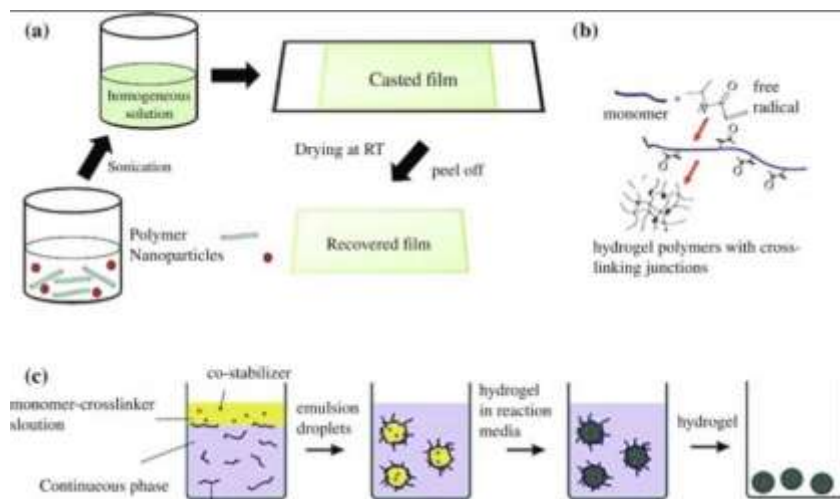
عند تعرّض البوليمرات للإشعاع المؤين تحدث سلسلة من التغيرات المعقدة في بنيتها الجزيئية، حيث تؤدي الطاقة الإشعاعية الممتصة إلى تحفيز عدد من التفاعلات الكيميائية والفيزيائية داخل المادة. وتعد هذه التغيرات نتيجة مباشرة لعمليات التأين والإثارة التي تصيب الذرات والجزيئات المكوّنة للسلاسل البوليمرية، مما يؤدي إلى تكوين أنواع كيميائية نشطة مثل الجذور الحرة والأيونات. وتعمل هذه الجسيمات النشطة على بدء تفاعلات متسلسلة تؤثر في التركيب البنوي للبوليمر وفي خصائصه الفيزيائية والميكانيكية.

من الناحية الكيميائية، يُعد تكسير السلاسل البوليمرية من أهم التأثيرات التي يمكن أن تنتج عن تعرض البوليمرات للإشعاع. تحدث هذه العملية عندما تؤدي الطاقة الإشعاعية إلى كسر الروابط الكيميائية بين الوحدات المتكررة في السلسلة البوليمرية، مما يؤدي إلى انقسام السلاسل الطويلة إلى أجزاء أقصر ذات وزن جزيئي أقل. ويترتب على ذلك تغير في العديد من الخصائص الكيميائية والفيزيائية للمادة، حيث يؤدي انخفاض الوزن الجزيئي عادةً إلى تقليل قوة المادة ومتانتها، كما قد يزيد من قابليتها للذوبان أو التحلل الكيميائي. ويُلاحظ هذا النوع من التأثيرات بشكل واضح في بعض البوليمرات الحساسة للإشعاع والتي تميل إلى التحلل بدلاً من تكوين روابط جديدة. [28]

وفي المقابل، قد يؤدي الإشعاع في بعض الحالات إلى حدوث ظاهرة أخرى تعرف باسم التشابك الشبكي بين السلاسل البوليمرية. في هذه العملية تتكوّن روابط كيميائية جديدة بين سلاسل بوليمرية

مختلفة نتيجة تفاعل الجذور الحرة المتكوّنة أثناء التشعيع. ويؤدي ذلك إلى تكوين شبكة ثلاثية الأبعاد أكثر تعقيداً وتماسكاً داخل المادة. ويُعد هذا التأثير من الظواهر المهمة في مجال تعديل البوليمرات، إذ يمكن أن يؤدي إلى تحسين العديد من الخصائص الفيزيائية مثل زيادة الصلابة والمتانة وتحسين مقاومة المادة للحرارة والمواد الكيميائية. كما أن التشابك الشبكي قد يقلل من قابلية البوليمر للانصهار أو الذوبان، مما يجعله أكثر استقراراً في البيئات القاسية. [29]

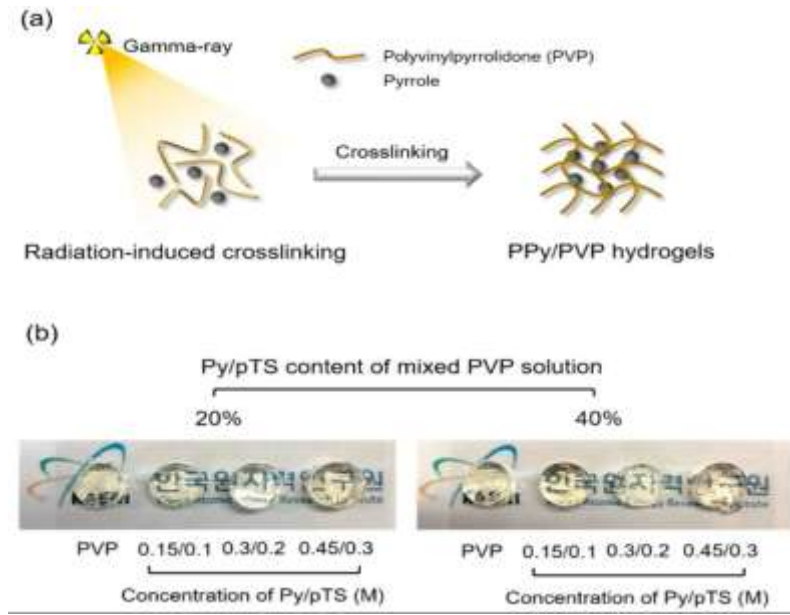
إضافة إلى التغيرات الكيميائية، تحدث أيضاً تأثيرات فيزيائية مهمة نتيجة تعرض البوليمرات للإشعاع. فمن المعروف أن التركيب الجزيئي للبوليمر يلعب دوراً أساسياً في تحديد خصائصه الفيزيائية مثل الكثافة والمرونة والصلابة. وعندما تتغير البنية الجزيئية نتيجة التفاعلات الإشعاعية، فإن هذه الخصائص تتغير بدورها. فعلى سبيل المثال، قد يؤدي التشابك الشبكي إلى زيادة صلابة المادة وتقليل مرونتها، بينما قد يؤدي تكسير السلاسل إلى زيادة مرونة البوليمر أو تقليل مقاومته الميكانيكية. [30]



شكل التأثير الكيميائي للإشعاع على البوليمر

كما يمكن أن يؤثر الإشعاع أيضاً في الخصائص الحرارية للبوليمرات، مثل درجة الانصهار ودرجة التحلل الحراري. ففي بعض الحالات يؤدي التشابك الشبكي إلى رفع درجة الاستقرار الحراري للمادة، مما يسمح باستخدامها في درجات حرارة أعلى دون أن تتعرض للتلف أو التحلل. أما في حالات أخرى، فإن تكسير السلاسل البوليمرية قد يؤدي إلى انخفاض الاستقرار الحراري للمادة وزيادة قابليتها للتحلل عند التعرض للحرارة.

ومن التأثيرات الفيزيائية الأخرى التي قد تنتج عن التشعيع حدوث تغييرات في التركيب البلوري أو درجة التبلور داخل البوليمر. فبعض البوليمرات تحتوي على مناطق بلورية وأخرى غير بلورية، ويؤدي التفاعل مع الإشعاع في بعض الأحيان إلى إعادة ترتيب السلاسل الجزيئية داخل هذه المناطق. وقد يؤدي ذلك إلى زيادة أو نقصان درجة التبلور، الأمر الذي ينعكس بدوره على خصائص المادة مثل الشفافية والكثافة والصلابة. ويجدر بالذكر أن حجم التأثيرات الفيزيائية والكيميائية الناتجة عن الإشعاع يعتمد بدرجة كبيرة على الجرعة الإشعاعية الممتصة، إذ إن زيادة الجرعة قد تؤدي إلى زيادة عدد التفاعلات الكيميائية التي تحدث داخل البوليمر. كما أن نوع الإشعاع المستخدم وطاقته يلعبان دوراً مهماً في تحديد طبيعة التغييرات الناتجة. بالإضافة إلى ذلك، فإن الظروف البيئية المحيطة مثل وجود الأكسجين أو درجة الحرارة قد تؤثر بشكل كبير في مسار التفاعلات الإشعاعية وفي نوع المنتجات المتكوّنة داخل المادة. [31]



شكل التأثير الفيزيائي للإشعاع على البوليمر

لذلك فإن دراسة التأثيرات الفيزيائية والكيميائية للإشعاع على البوليمرات تُعد خطوة أساسية لفهم كيفية تعديل خصائص هذه المواد والتحكم فيها. ومن خلال التحكم في الجرعة الإشعاعية ونوع الإشعاع وظروف المعالجة يمكن تحقيق توازن مناسب بين عمليات تكسير السلاسل والتشابك الشبكي، الأمر الذي يسمح بتطوير مواد بوليمرية ذات خصائص محسنة تلبي متطلبات التطبيقات الصناعية والطبية المختلفة. [32]

3-3 أسباب استخدام الإشعاع في معالجة البوليمرات

تُعد المعالجة الإشعاعية للبوليمرات من التقنيات الحديثة التي حظيت باهتمام كبير في مجالات علوم المواد والهندسة الكيميائية، وذلك لما توفره من إمكانيات واسعة لتعديل خصائص المواد البوليمرية بطريقة دقيقة وفعّالة. ويعود السبب في ذلك إلى قدرة الإشعاع المؤين على إحداث تغييرات مباشرة

في البنية الجزيئية للبوليمرات دون الحاجة إلى استخدام كواشف كيميائية إضافية قد تؤثر في نقاء المادة أو خصائصها. فالإشعاع يعمل كمصدر طاقة قادر على تحفيز التفاعلات الكيميائية داخل المادة نفسها، مما يسمح بإجراء عمليات تعديل بنيوي دقيقة في السلاسل البوليمرية. وقد أدى هذا الأمر إلى اعتماد المعالجة الإشعاعية في العديد من التطبيقات الصناعية والتكنولوجية التي تتطلب مواد ذات خصائص محسنة أو معدلة. [33]

من أهم الأسباب التي تدفع إلى استخدام الإشعاع في معالجة البوليمرات هو إمكانية التحكم في التركيب البنيوي للمادة. فعند تعريض البوليمر لجرعات محددة من الإشعاع يمكن إحداث توازن معين بين عمليتي تكسير السلاسل البوليمرية والتشابك الشبكي بينها. ومن خلال هذا التحكم يمكن تعديل الوزن الجزيئي للبوليمر أو زيادة درجة التشابك بين السلاسل، الأمر الذي يؤدي إلى تغيير خصائص المادة مثل الصلابة والمرونة ومقاومة الشد. وتعد هذه القدرة على التحكم في الخصائص البنيوية للمادة من العوامل المهمة التي تجعل المعالجة الإشعاعية وسيلة فعالة في تحسين أداء البوليمرات المستخدمة في التطبيقات الهندسية المختلفة. [34]

كما تتميز المعالجة الإشعاعية بأنها عملية نظيفة نسبياً من الناحية الكيميائية، إذ لا تتطلب عادةً إضافة مواد محفزة أو مذيبات كيميائية قد تترك آثاراً غير مرغوبة في المنتج النهائي. وفي العديد من العمليات الصناعية التقليدية يتم استخدام مواد كيميائية لتحفيز تفاعلات البلمرة أو التشابك، إلا أن هذه المواد قد تظل موجودة في المنتج النهائي أو قد تحتاج إلى عمليات تنقية إضافية لإزالتها.

أما في المعالجة الإشعاعية فإن الطاقة الإشعاعية نفسها تؤدي دور العامل المحفز للتفاعلات الكيميائية، مما يقلل من الحاجة إلى المواد الكيميائية ويجعل العملية أكثر أماناً في بعض التطبيقات، خاصة تلك المتعلقة بالصناعات الطبية والغذائية. [35]

ومن الأسباب المهمة أيضاً لاستخدام الإشعاع في معالجة البوليمرات إمكانية إجراء المعالجة في درجات حرارة منخفضة نسبياً مقارنة ببعض الطرق الحرارية أو الكيميائية الأخرى. فبعض البوليمرات قد تكون حساسة للحرارة المرتفعة، وقد يؤدي تسخينها إلى تحللها أو فقدان بعض خصائصها الأساسية. أما المعالجة الإشعاعية فتسمح بإحداث التفاعلات الكيميائية المطلوبة داخل المادة دون الحاجة إلى رفع درجة الحرارة بشكل كبير، حيث تعمل الطاقة الإشعاعية على تنشيط الجزيئات مباشرة داخل المادة. وهذا الأمر يجعل هذه التقنية مناسبة لمعالجة المواد الحساسة للحرارة أو المواد المركبة التي تحتوي على مكونات مختلفة قد تتأثر بدرجات الحرارة العالية. [36]

إضافة إلى ذلك، تتميز المعالجة الإشعاعية بقدرتها على اختراق المواد بعمق نسبي، خاصة في حالة استخدام أشعة غاما أو حزم الإلكترونات ذات الطاقة العالية. فهذه الخاصية تسمح بمعالجة المواد البوليمرية بشكل متجانس حتى في الأجزاء الداخلية من المنتج، وهو ما يصعب تحقيقه في بعض طرق المعالجة السطحية التقليدية. وتعد هذه الميزة مهمة بشكل خاص في الصناعات التي تتطلب تجانس الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للمادة في جميع أجزائها، مثل صناعة الكابلات الكهربائية أو المواد العازلة أو بعض المنتجات البلاستيكية المستخدمة في التطبيقات الهندسية. [37]

ومن الجوانب المهمة التي ساهمت في انتشار استخدام الإشعاع في معالجة البوليمرات القدرة على دمج عملية التعقيم مع عملية التعديل البنيوي للمادة. ففي بعض التطبيقات الطبية، مثل الأدوات الجراحية أو المواد البلاستيكية المستخدمة في الأجهزة الطبية، يمكن استخدام الإشعاع المؤين لتعقيم المنتج والقضاء على الكائنات الحية الدقيقة الموجودة عليه، وفي الوقت نفسه إحداث تعديلات في الخصائص البنيوية للبوليمر لتحسين أدائه أو زيادة مقاومته للحرارة والمواد الكيميائية. وبذلك يمكن تحقيق فائدتين في عملية واحدة، مما يوفر الوقت والجهد ويزيد من كفاءة عمليات الإنتاج. [38]

كما أن التطور التكنولوجي في مجال مصادر الإشعاع ومسرات الإلكترونات ساهم بشكل كبير في توسيع نطاق استخدام المعالجة الإشعاعية في الصناعة. فقد أصبحت الأجهزة المستخدمة لإنتاج الإشعاع أكثر دقة وكفاءة، مما يسمح بالتحكم في الجرعات الإشعاعية المطبقة على المواد البوليمرية. ويساعد هذا التحكم الدقيق في تحقيق النتائج المطلوبة دون التسبب في أضرار غير مرغوبة للمادة، حيث يمكن اختيار الجرعة المناسبة لكل نوع من البوليمرات وفقاً لطبيعته التركيبية الكيميائي والخصائص المراد تعديلها.

وبناءً على ما سبق، يمكن القول إن استخدام الإشعاع في معالجة البوليمرات يمثل تقنية متقدمة تتيح إمكانية تعديل خصائص المواد بطريقة فعالة ومتحكم بها. وقد ساهمت هذه التقنية في تطوير العديد من المواد البوليمرية التي تتمتع بخصائص محسنة تلائم متطلبات التطبيقات الصناعية والطبية والتكنولوجية الحديثة، الأمر الذي جعلها من الوسائل المهمة في مجال هندسة المواد وعلوم البوليمرات. [39]

3-4 آلية امتصاص الطاقة الإشعاعية في البوليمرات

عند سقوط الإشعاع المؤين على مادة بوليمرية، فإن أول خطوة تحدث هي امتصاص الطاقة الإشعاعية بواسطة الذرات والجزيئات الموجودة داخل البوليمر. تعتمد كمية الطاقة الممتصة على نوع الإشعاع وطبيعته وكذلك على تركيب المادة البوليمرية نفسها. عندما تنتقل الطاقة إلى الجزيئات، فإنها قد تسبب إثارة إلكترونات الذرات أو قد تؤدي إلى تأينها، أي فقدان أو اكتساب إلكترونات.

نتيجة لهذه العملية تتكون الجذور الحرة داخل السلسلة البوليمرية، وهي ذرات أو جزيئات تحتوي على إلكترون غير مزدوج مما يجعلها غير مستقرة كيميائياً. تحاول هذه الجذور الحرة الوصول إلى حالة الاستقرار من خلال التفاعل مع الجزيئات الأخرى القريبة منها. وقد تؤدي هذه التفاعلات إلى تغيرات كبيرة في البنية الجزيئية للبوليمر. كما أن وجود الأكسجين في الوسط المحيط بالبوليمر قد يؤدي إلى تفاعلات إضافية، حيث تتفاعل الجذور الحرة مع الأكسجين لتكوين مركبات مؤكسدة تؤثر بشكل مباشر على الخواص الفيزيائية والكيميائية للمادة. لذلك فإن الظروف البيئية مثل وجود الهواء أو درجة الحرارة تلعب دوراً مهماً في تحديد طبيعة التغيرات التي تحدث في البوليمرات عند تعرضها للإشعاع. [40]

الاستنتاج الختامي للبحث

نستنتج أن التفاعل بين الإشعاع والبوليمرات يسمح بالتحكم الدقيق في خصائص المواد عبر عمليات التشابك والتكسير. هذا الترابط يجعل البوليمرات كواشف ذكية ودقيقة لقياس الجرعات الإشعاعية

ومحاكاة الأنسجة البشرية، مما يدمج بين الفيزياء النووية والتطبيقات الطبية لضمان الأمان والابتكار الصناعي.

المصادر

- .1 Chapiro, A. Radiation Chemistry of Polymeric Systems. Interscience Publishers, 1962.
- .2 Charlesby, A. Atomic Radiation and Polymers. Pergamon Press, 1960.
- .3 Woods, R. J., & Pikaev, A. K. Applied Radiation Chemistry: Radiation Processing. Wiley, 1994.
- .4 Billmeyer, F. W. Textbook of Polymer Science. Wiley-Interscience, 1984.
- .5 Odian, G. Principles of Polymerization. Wiley, 2004.
- .6 Seymour, R. B., & Carraher, C. E. Polymer Chemistry: An Introduction. Marcel Dekker, 2003.
- .7 Fried, J. R. Polymer Science and Technology. Prentice Hall, 2014.
- .8 Young, R. J., & Lovell, P. A. Introduction to Polymers. CRC Press, 2011.

- .9 Peacock, A. J. Handbook of Polyethylene. CRC Press, 2000.
- .10 Mark, J. E. Physical Properties of Polymers Handbook. Springer, 2007.
- .11 Attix, F. H. Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry. Wiley, 1986.
- .12 Knoll, G. F. Radiation Detection and Measurement. Wiley, 2010.
- .13 Hall, E. J., & Giaccia, A. J. Radiobiology for the Radiologist. Lippincott Williams & Wilkins, 2012.
- .14 Spinks, J. W. T., & Woods, R. J. An Introduction to Radiation Chemistry. Wiley, 1990.
- .15 Drobny, J. G. Radiation Technology for Polymers. CRC Press, 2010.
- .16 Gupta, B. Radiation Modification of Polymers. Springer, 2003.
- .17 Clough, R. L., & Shalaby, S. W. Radiation Effects on Polymers. ACS Symposium Series, 1991.

- .18 Nasef, M. M., & Güven, O. Radiation–Grafted Polymers for Biomedical Applications. Progress in Polymer Science, 2012.
- .19 Silverman, J. Polymer Chemistry. CRC Press, 2015.
- .20 Rudin, A. The Elements of Polymer Science and Engineering. Academic Press, 1999.
- .21 Cowie, J. M. G. Polymers: Chemistry and Physics of Modern Materials. CRC Press, 2007.
- .22 Sperling, L. H. Introduction to Physical Polymer Science. Wiley, 2005.
- .23 Mano, E. B. Introduction to Polymer Chemistry. Wiley, 1987.
- .24 Hiemenz, P. C., & Lodge, T. P. Polymer Chemistry. CRC Press, 2007.
- .25 Allcock, H. R., Lampe, F. W., & Mark, J. E. Contemporary Polymer Chemistry. Pearson, 2003.
- .26 Kroschwitz, J. I. Polymer Science and Technology Encyclopedia. Wiley, 1990.

- .27 Hagiwara, M. Radiation Chemistry of Polymers. Elsevier, 1995.
- .28 O'Donnell, J. H., & Sangster, D. F. Principles of Radiation Chemistry. Elsevier, 1970.
- .29 Cleland, M. R. Applications for Radiation Processing of Materials. Nuclear Instruments Journal, 2003.
- .30 Fink, D. Fundamentals of Ion-Irradiated Polymers. Springer, 2004.
- .31 Ziegler, L. H. Radiation Physics and Chemistry of Polymers. Academic Press, 1998.
- .32 Keller, A. Polymer Crystals. Wiley, 1968.
- .33 Flory, P. J. Principles of Polymer Chemistry. Cornell University Press, 1953.
- .34 Jenkins, A. D. Polymer Science Dictionary. Elsevier, 1989.
- .35 Crank, J. The Mathematics of Diffusion in Polymers. Oxford University Press, 1975.

.36 Gedde, U. W. Polymer Physics. Springer, 1995.

.37 Feller, R. L. Accelerated Aging: Photochemical and Thermal Aspects. Getty Publications, 1994.

.38 Rabek, J. F. Polymer Photodegradation. Springer, 1995.

.39 Horie, K. Structure and Properties of Polymers. Springer, 1999.

.40 Carraher, C. E. Introduction to Polymer Chemistry. CRC Press, 2017.