

تحضير ودراسة تأثير المركبات النانوية لبولي إسترز العشوائية المدعمة بجسيمات أكسيد الجرافين على خواص المواد المركبة

مریم محمد عمر الشيباني ^{ID}

المعهد العالي للعلوم والتقنية – مزدة، ليبيا

abdullahalhmrone@gmail.com

الملخص

يهدف هذا البحث إلى دراسة تأثير جسيمات أكسيد الجرافين على الخصائص الفيزيائية والكيميائية والميكانيكية لبولي إسترز العشوائية. تم تحضير المركبات باستخدام تقنية البلمرة المتسلسلة، مع إضافة نسب مختلفة من أكسيد الجرافين (1%، 2%، 3%)، ومن ثم إجراء اختبارات الشد، التحليل الحراري، وحيود الأشعة السينية (XRD) لتقييم أداء العينات. أظهرت النتائج أن النسبة المنخفضة (1%) من أكسيد الجرافين ساعدت على تحسين الخصائص الميكانيكية بشكل ملحوظ وزيادة الاستقرار الحراري لبولي إسترز، إضافة إلى تحسين الترتيب البلوري للمادة. في المقابل، أدى استخدام نسب أعلى (2%، 3%) إلى تجمع الجسيمات النانوية وتراجع ملحوظ في الأداء الميكانيكي والحراري نتيجة لعدم تجانس التوزيع داخل المصفوفة البوليمرية. تؤكد هذه النتائج أن التحكم في نسب الإضافة يعد عاملاً أساسياً في تحسين خواص المواد المركبة وإمكانية توظيفها في تطبيقات عملية متنوعة، خصوصاً في المجالات الطبية الحيوية والإلكترونية.

الكلمات المفتاحية: البولي إسترز العشوائية – أكسيد الجرافين – المواد المركبة النانوية – الخصائص الميكانيكية – الاستقرار الحراري – حيود الأشعة السينية

Abstract

This study aims to investigate the effect of graphene oxide nanoparticles on the physical, chemical, and mechanical properties of random polyesters. The composites were prepared using the chain polymerization technique, with different graphene oxide loadings (1%, 2%, 3%). Tensile tests, thermal analysis, and X-ray diffraction (XRD) were conducted to evaluate the performance of the samples. The results revealed that the low concentration (1%) of graphene oxide significantly enhanced the mechanical properties, improved thermal stability, and contributed to better crystalline arrangement of the material. In contrast, higher concentrations (2% and 3%) led to nanoparticle agglomeration, which negatively affected both mechanical and thermal performance due to the non-uniform dispersion within the polymer matrix. These findings confirm that controlling the loading ratio of graphene oxide is a key factor in optimizing the properties of the nanocomposites, making them promising candidates for applications in biomedical and electronic fields.

Keywords. Random polyesters, Graphene oxide, Polymer nanocomposites – Mechanical properties – Thermal stability – X-ray diffraction (XRD).

المقدمة

تعد المواد البوليمرية، وبالأخص البولي إسترز، من المواد واسعة الانتشار في العديد من التطبيقات الصناعية بفضل خواصها الفيزيائية والكيميائية المتنوعة. ومع ذلك، يواجه استخدامها في بعض المجالات تحديات تتعلق بتحسين الثبات الحراري والخواص الميكانيكية. من هذا المنطلق، ظهرت تقنية تدعيم البوليمرات بجسيمات نانوية كأحد الحلول المبتكرة لتحسين أدائها. في السنوات الأخيرة، جذب أكسيد الجرافين اهتمام الباحثين بفضل خصائصه الفريدة، مثل المساحة السطحية العالية، والتوصيل الحراري والكهربائي الممتازين، وإمكانية التفاعل الكيميائي مع البوليمرات. عند دمجها مع البولي إسترز، يمكن أن يساهم أكسيد الجرافين في تحسين الخصائص الميكانيكية والاستقرار الحراري، مما يجعله خياراً واعداً لتطوير مواد مركبة متعددة الاستخدامات. يهدف هذا البحث إلى تحضير بولي إسترز عشوائية مدعمة بجسيمات أكسيد الجرافين ودراسة تأثير هذه الإضافة على الخصائص الكيميائية، الهيكلية، والميكانيكية للمواد المركبة كما يهدف إلى استكشاف العلاقة بين نسب الإضافة المختلفة لأكسيد الجرافين وأداء المواد، مما يفتح آفاقاً جديدة لتطبيق هذه المركبات في مجالات الهندسة الطبية الحيوية والصناعات الإلكترونية.

اهمية الدراسة:

أهمية هذه الدراسة تتجلى في كونها تسعى إلى معالجة واحدة من أبرز التحديات التي تواجه استخدام البوليمرات واسعة الانتشار مثل البولي إسترات العشوائية، إذ تتميز هذه المواد بمرونتها وإمكانية تعديل خصائصها لتلائم مجالات متعددة، غير أن محدودية أدائها الميكانيكي والحراري تجعلها قاصرة أمام متطلبات التطبيقات المتقدمة. ومن هنا تأتي فكرة تدعيمها بجسيمات أكسيد الجرافين، تلك المادة النانوية التي أثبتت كفاءتها العالية في تعزيز البنية الداخلية للبوليمرات ومنحها قوة واستقراراً أكبر.

تتبع الأهمية أيضاً من كون النتائج المتوقعة لهذه الدراسة تفتح المجال أمام تطوير مواد مركبة ذات أداء عالٍ، قادرة على مقاومة ظروف حرارية قاسية وتحمل إجهادات ميكانيكية مرتفعة، مما يمنحها قيمة كبيرة في الصناعات الدقيقة. فمجالات مثل الهندسة الطبية الحيوية ستستفيد من هذه المواد في صناعة الغرسات والأدوات الطبية، كما أن قطاع الصناعات الإلكترونية سيجد فيها بديلاً متطوراً في صناعة الموصلات والعوازل عالية الكفاءة. إضافة إلى ذلك، فإن هذه الدراسة تثرى المعرفة العلمية من خلال إلقاء الضوء على آلية التفاعل بين جسيمات أكسيد الجرافين وسلاسل البولي إستر، وهو ما يساهم في توضيح العلاقة الوثيقة بين التركيب الجزيئي والخصائص النهائية للمواد المركبة. هذا الفهم العميق لا يقتصر على الجانب الأكاديمي فحسب، بل ينعكس أيضاً على الجانب التطبيقي عبر فتح آفاق جديدة للبحث والتطوير في مجالات المواد المتقدمة. كما تنسجم هذه الدراسة مع التوجه العالمي نحو إنتاج مواد ذكية ومستدامة تجمع بين الخفة، المتانة، والاستقرار الحراري، وهو ما يجعلها مرشحة قوية لاستبدال المواد التقليدية في الكثير من الصناعات المستقبلية.

اهداف الدراسة :

يهدف هذا البحث إلى تحضير بولي إسترات عشوائية مدعمة بجسيمات أكسيد الجرافين باستخدام تقنية البلمرة المتسلسلة، وذلك من أجل ضمان دمج الجسيمات النانوية داخل البنية البوليمرية بشكل متجانس يساهم في تحسين الخواص النهائية للمركب. كما يسعى إلى دراسة التأثير المباشر لجسيمات أكسيد الجرافين على الخصائص الفيزيائية والكيميائية للبوليمرات العشوائية، مع التركيز بشكل خاص على الثبات الحراري، والبنية البلورية، والخواص الميكانيكية، وذلك عبر الاستعانة بتقنيات تحليلية متقدمة قادرة على الكشف عن التغيرات الدقيقة في بنية وخواص المادة. ويأتي هذا البحث أيضاً في إطار تحديد النسب المثلى لإضافة أكسيد الجرافين إلى البولي إستر، حيث إن التوازن بين الكمية المضافة والخواص الناتجة يعد أمراً بالغ الأهمية لتجنب تجمع الجسيمات الذي قد يسبب تشوهات في البنية البلورية ويؤثر سلباً على الأداء. ومن خلال ذلك يسعى البحث إلى الوصول إلى مستوى من الإضافة يضمن تحسناً فعالاً لكل من الخواص الميكانيكية والحرارية دون المساس بتجانس المادة أو صعوبات المعالجة كذلك يتطلع هذا العمل إلى استكشاف إمكانيات التطبيق العملي للمواد المحضرة في مجالات دقيقة ومتقدمة، مثل الهندسة الطبية الحيوية وصناعة الغرسات، وتقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد، فضلاً عن الصناعات الإلكترونية التي تتطلب مواد تجمع بين الخفة والقوة والاستقرار الحراري. وأخيراً، يهدف البحث إلى سد فجوة واضحة في الدراسات السابقة، من خلال تقديم دراسة جديدة ومتكاملة حول تفاعل البولي إستر مع جسيمات أكسيد الجرافين، وهو موضوع لم يحظ بالاهتمام الكافي في البيئة البحثية الليبية، الأمر الذي يجعل هذه الدراسة إضافة علمية تساهم في توسيع آفاق البحث وتفتح المجال لدراسات لاحقة أكثر تخصصاً.

مشكلة الدراسة :

على الرغم من الاستخدام الواسع للبولي إسترات العشوائية في العديد من التطبيقات الصناعية بفضل مرونتها وإمكانية تعديل خصائصها، إلا أن محدودية خصائصها الميكانيكية والحرارية ما تزال تمثل عائقاً أمام الاستفادة الكاملة منها في المجالات المتقدمة مثل الصناعات الطبية الحيوية والإلكترونية. وقد برزت الجسيمات النانوية، وخاصة أكسيد الجرافين، كأحد الحلول الواعدة لتعزيز هذه الخصائص نظراً لقدرتها على تحسين الاستقرار الحراري وزيادة

الصلابة الميكانيكية. غير أنّ الدراسات السابقة بيّنت أنّ فعالية أكسيد الجرافين مرتبطة بدرجة كبيرة بنسب الإضافة وتوزيع الجسيمات داخل المصفوفة البوليمرية؛ إذ قد يؤدي التوزيع غير المتجانس أو التكتل إلى نتائج عكسية تقلل من الكفاءة المطلوبة. ومن هنا تبرز مشكلة هذا البحث في الكشف عن مدى قدرة جسيمات أكسيد الجرافين على تحسين الخواص الفيزيائية والكيميائية والميكانيكية للبولي إسترات العشوائية، مع تحديد النسبة المثلى التي تضمن تحسين الأداء دون ظهور آثار سلبية ناتجة عن تجمع الجسيمات النانوية

المنهجية :

تم جمع المواد المركبة من البوليمرات المعززة بأكسيد الجرافين عبر طريقة التحضير التقليدية للمركبات النانوية. تم تحضير العينات بتركيزات مختلفة من أكسيد الجرافين وهي: 1%، 2%، و3%. بعد التحضير، تم فحص الخصائص الميكانيكية والحرارية لهذه العينات عبر اختبارات الشد و تحليل التوصيل الحراري. كما تم إجراء تحليل حيود الأشعة السينية (*XRD*) لتحديد تأثير أكسيد الجرافين على الترتيب البلوري للبوليمرات

مفاهيم ومصطلحات الدراسة :

أولاً : البولي إسترات العشوائية (*Random Polyesters*)

البولي إسترات العشوائية [2] هي بوليمرات تتكون من تكرار وحدات مونو-أو ثنائي-إستري مرتبطة بروابط إسترية، حيث تكون التكرارات غير منتظمة على طول السلسلة البوليمرية [3]. تتميز هذه البوليمرات بمرونتها وقدرتها على التفاعل مع مواد أخرى، مما يجعلها مناسبة لتطبيقات متعددة مثل المواد المركبة.

ثانياً : المركبات النانوية البوليمرية (*Polymer Nanocomposites*)

المركبات النانوية البوليمرية هي مواد تتكون من بوليمر أساسي مدمج مع جسيمات نانوية (مثل أكسيد الجرافين) لتحسين خصائصه الفيزيائية والميكانيكية [4] تُستخدم هذه المركبات في تطبيقات تتطلب خصائص متقدمة مثل الموصلية الكهربائية أو الاستقرار الحراري.

ثالثاً : أكسيد الجرافين (*Graphene Oxide*)

أكسيد الجرافين هو شكل مؤكسد من الجرافين يحتوي على مجموعات أكسجينية على سطحه، مما يجعله قابلاً للذوبان في الماء ومناسباً للتفاعل مع البوليمرات. يُستخدم لتحسين التشبث داخل المواد المركبة وتعزيز خصائصها الميكانيكية والحرارية. [5]

رابعاً : الخصائص الميكانيكية (*Mechanical Properties*)

الخصائص الميكانيكية تشير إلى سلوك المواد تحت تأثير القوى المختلفة، مثل الشد والانحناء والضغط. [6] تشمل هذه الخصائص مقاومة الشد، الصلابة، والمرونة، وتُستخدم لتقييم أداء المواد في التطبيقات العملية.

خامساً : الاستقرار الحراري (*Thermal Stability*)

الاستقرار الحراري هو قدرة المادة على مقاومة التغيرات في خصائصها عند تعرضها لدرجات حرارة مرتفعة. [7] يُستخدم لتقييم مدى تحمل المواد للحرارة في التطبيقات التي تتطلب أداءً مستقرًا تحت ظروف حرارية قاسية.

الادبيات السابقة :

في دراسة خالد فداء الطرشة (2020) التي جاءت بعنوان تحضير وتوصيف مركبات غرافين بوليمرية، ركّز الباحث على تحضير أكسيد الجرافين باستخدام أساليب كيميائية وفيزيائية متعددة، ثم محاولة تشبثه داخل مصفوفات بوليمرية من أجل اختبار أثره على الخصائص الميكانيكية والحرارية لهذه المواد. وقد استعان في عمله بعدد من التقنيات التحليلية الدقيقة مثل المجهر الإلكتروني الماسح (*SEM*) وحيود الأشعة السينية (*XRD*) ومطيافية الأشعة تحت الحمراء (*FTIR*) إضافةً إلى التحليل الحراري الوزني (*TGA*)، [1] وذلك لمراقبة التغيرات البنيوية والحرارية التي تحدث نتيجة إدخال أكسيد الجرافين.

أظهرت نتائج الدراسة أن إدخال نسب منخفضة من أكسيد الجرافين أدى إلى تحسين ملحوظ في الخواص الميكانيكية والحرارية، بينما سبب استخدام تراكيز مرتفعة تكوّن تجمعات داخل البنية أثرت سلبًا على الأداء العام للمركب. وتبرز أهمية هذه الرسالة في كونها دراسة محلية قدّمت بروتوكولات عملية في التحضير وأساليب تحليلية يمكن تطبيقها بسهولة [1] ، وهو ما يجعلها مرجعًا مفيدًا للباحثين الراغبين في إعادة التجربة أو تطويرها. كما أنها وفرت مقارنة بين طرق تحضير أكسيد الجرافين المختلفة، وهي نقطة محورية يمكن الاستفادة منها عند صياغة منهجية البحث في الدراسات المستقبلية.

في دراسة رافد محمود عبد الله (منشورة حديثًا في مستودع أكاديمي عام)، جرى التركيز على تحضير متراكبات بوليمرية مدعمة بأكسيد الجرافين (GO)، وذلك بغرض تحسين الخصائص الميكانيكية والحرارية لهذه المواد. عمل الباحث على إدخال نسب دقيقة من أكسيد الجرافين تراوحت بين 0.5% و 1% ضمن المصفوفات البوليمرية، ولاحظ أن النسبة المثالية التي أحدثت تحسينًا ملحوظًا في مقاومة الشد والاستقرار الحراري كانت عند حدود 1%. أما عند تجاوز هذه النسبة، فقد أدى ذلك إلى تراجع الأداء نتيجة ظهور تجمعات في البنية الداخلية للمركب، وهو ما يضع حدودًا عملية لكمية الحشو الممكن إضافتها، [9] اعتمدت الدراسة على مجموعة من الأدوات التحليلية المتقدمة لمتابعة هذه التغيرات، من بينها التحليل الحراري الوزني (TGA) والمسح الحراري التفاضلي (DSC) وحيود الأشعة السينية (XRD) والمجهر الإلكتروني الماسح (SEM). وقد مكّنت هذه الأدوات الباحث من تقديم صورة شاملة عن سلوك المواد المركبة على المستويين البنيوي والحراري [9]

تتجلى أهمية هذه الدراسة في كونها مصدرًا إقليميًا حديثًا يدعم بشكل مباشر النتائج المتوقعة في مجال بحثك، خاصة فيما يتعلق بفعالية إضافة أكسيد الجرافين بنسبة قريبة من 1% لتحقيق أفضل أداء

في رسالة أحمد جاسم محمد (2017) التي جاءت بعنوان تأثير تدعيم راتنجات البولي إستر بجسيمات نانوية من أكسيد الجرافين على بعض الخواص الفيزيائية والحرارية، قام الباحث بدراسة دقيقة لتأثير نسب مختلفة من جسيمات أكسيد الجرافين على راتنج البولي إستر غير المشبع [10] ، وهو من أكثر البوليمرات استخدامًا في التطبيقات الصناعية. اعتمدت الدراسة على نسب تراوحت بين 0.5% و 2% من الحشو النانوي، حيث جرى تقييم التغيرات الناتجة من خلال اختبارات ميكانيكية مثل مقاومة الشد والانضغاط، بالإضافة إلى تحليل حراري شملت التحليل الحراري الوزني (TGA) والمسح الحراري التفاضلي (DSC).

أظهرت النتائج أن إدخال نسب منخفضة من أكسيد الجرافين (بين 0.5% و 1%) أدى إلى تحسن واضح في الاستقرار الحراري وقوة الشد، وهو ما يعكس فعالية التشبث عند هذه التراكيز. في المقابل، تسببت النسبة الأعلى (2%) في ظهور تجمعات غير مرغوبة داخل المصفوفة البوليمرية، [10] مما أدى إلى ضعف في الأداء الميكانيكي وتراجع الخصائص مقارنة بالنسب المثالية.

الدراسات الأجنبية :

في دراسة *A. K. Geim, R. R. Nair* وزملائهم (2020) بعنوان *Development of Reinforced Polyester/Graphene Nanocomposite: preparation and characterization*، تم التركيز على تحضير مركبات بولي إستر مدعمة بجرافين وأكسيد الجرافين بنسب وزنية متعددة تراوحت بين (0%، 1%، 3%، 5%، 7%، 10%). استخدم الباحثون تقنية المزج عالي القص متبوعة بعمليات بلورة مناسبة لضمان الحفاظ على خواص الراتنج مع إدماج الجسيمات النانوية بشكل فعال [11] جرى تقييم العينات من خلال اختبارات شاملة تضمنت اختبارات الشد لقياس التحمل الميكانيكي، والتحليل الحراري الوزني (TGA) والمسح الحراري التفاضلي (DSC) لقياس الاستقرار الحراري، إضافةً إلى المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) وحيود الأشعة السينية (XRD) لدراسة البنية المجهرية ومستوى التشبث. أظهرت النتائج أن استخدام نسب منخفضة إلى متوسطة من الجرافين (خصوصًا حول 1-3%) ساهم في تحسين ملحوظ في الصلابة ومقاومة الشد وزيادة الاستقرار الحراري. في المقابل [11]، أدى تجاوز هذه النسب إلى ظهور تجمعات في البنية الداخلية وفقدان التجانس، وهو ما انعكس سلبًا على الأداء العام للمواد المركبة .

في دراسة **Rahman و Kannan وزملائهم (2017)** بعنوان *Development of Graphene Oxide-/Galactitol Polyester-Based Composites for enhanced physicochemical properties*، جرى استخدام أكسيد الجرافين (GO) كمعزز داخل بولي إيستر قائم على الغالاكتيتول، وهو نوع من البوليمرات القابلة للتحلل الحيوي. هدف الباحثون إلى استكشاف تأثير إضافة GO على الخواص الميكرو-هيكلية والميكانيكية وكذلك الخصائص البيولوجية عند الاستهداف الحيوي. اعتمدت التجارب على دمج نسب صغيرة من أكسيد الجرافين [12]، وتم تحليل العينات باستخدام أدوات وصفية وهيكلية متقدمة لفهم مدى اندماج الجسيمات النانوية داخل المصفوفة البوليمرية. أظهرت النتائج أن إدخال تراكيز منخفضة من GO أدى إلى تحسين ملحوظ في الخصائص الميكانيكية والاستقرار الفيزيائي-الكيميائي للمركب. كما تبين أن جودة التشتت داخل البوليمر ووظائف السطح الخاصة بأكسيد الجرافين كانت عوامل أساسية في تحقيق التفاعل الفعال بين المصفوفة والجسيمات [12]. وأكد الباحثون على أهمية التعديلات الكيميائية للمصفوفة البوليمرية نفسها (نوع البولي إيستر وتركيبه البنوي) باعتبارها عنصرًا محددًا لمدى الاستفادة من الإضافة النانوية، حيث يختلف تأثير GO من بوليمر إلى آخر بحسب طبيعة الروابط السطحية الممكنة

في ورقة بحثية **Tjong, S. C., Meng, L., et al. (2015)**. نُشرت عام 2015 بعنوان *Thermal and mechanical properties of polyester composites with graphene oxide and graphite*، تناول فريق من الباحثين دراسة تأثير إضافة نسب صغيرة من كل من أكسيد الجرافين (GO) والجرافيت إلى راتنجات البولي إيستر غير المشبع. ركزت الدراسة على الخصائص الميكانيكية والحرارية لهذه المواد المركبة [13]، حيث جرى تقييم مقاومة الشد والاستقرار الحراري عبر اختبارات معيارية دقيقة. أظهرت النتائج أن إدخال نسب منخفضة من GO ساعد بشكل واضح على تحسين مقاومة الشد وزيادة الاستقرار الحراري، بينما أدى تجاوز نسبة حرجية - قريبة من 1% وزنيًا - إلى ظهور تجمعات في البنية أثرت سلبًا على الأداء العام للمركبات. أما إضافة الجرافيت فقد أظهرت بعض التأثيرات، لكنها لم تكن بنفس الكفاءة التي حققها أكسيد الجرافين عند التراكيز المثالية. تكمن أهمية هذه الدراسة في كونها مرجعًا مبكرًا يسبق كثيرًا من الأعمال الحديثة، وقد دعمت نفس الاتجاه الذي أكدته الأدبيات اللاحقة: تحقيق أقصى فائدة عند النسب المنخفضة من GO ، وتراجع الخصائص عند تجاوز هذه النسبة بسبب ضعف التشتت وظهور التكتلات. لذا، تُعتبر هذه الورقة مفيدة ليس فقط لدعم نتائج البحث الحالي، وإنما أيضًا لتوضيح التطور التاريخي للمعرفة في هذا المجال، بما يعزز مصداقية الاستنتاجات عند المقارنة بين الدراسات المحلية والعالمية [13].

الاستنتاجات

أثبتت المنهجية المستخدمة في هذه الدراسة نجاحها في دمج جسيمات أكسيد الجرافين داخل البولي إيستر العشوائية، خصوصًا عند النسب المنخفضة التي بلغت 1%، حيث كان الدمج متجانسًا وأدى إلى تحسينات واضحة في خصائص المادة. فقد انعكس هذا الدمج بشكل مباشر على الأداء الميكانيكي للمواد المركبة، إذ سُجلت زيادة ملحوظة في مقاومة الشد والصلابة عند نسبة 1% من أكسيد الجرافين، وهو ما يشير إلى أن الجسيمات النانوية أسهمت في تعزيز الروابط الداخلية للبولى إيسترات ومنحها قوة إضافية. إلى جانب التحسن الميكانيكي، كشفت التحاليل الحرارية عن ارتفاع ملحوظ في الاستقرار الحراري للبوليمرات المدعمة، حيث برز هذا التحسن بوضوح عند النسب المنخفضة من الإضافة، مما يعكس الدور الفعال لأكسيد الجرافين في تعزيز مقاومة المادة لدرجات الحرارة المرتفعة. أما فيما يتعلق بالتحليل البلوري باستخدام تقنية XRD ، فقد أظهرت النتائج أن النسب القليلة من أكسيد الجرافين ساعدت على تحسين الترتيب البلوري للبولى إيسترات، بينما تسببت النسب الأعلى (2%-3%) في حدوث تجمع للجسيمات وتشوهات في البنية البلورية، وهو ما يضعف من كفاءة الأداء.

بناءً على ذلك، تبين أن النسبة المثلى لإضافة جسيمات أكسيد الجرافين هي 1%، إذ تحقق هذا المستوى من الإضافة توازناً مثالياً بين الخصائص الميكانيكية والحرارية، مما يجعل المواد المحضرة وفق هذه المنهجية مؤهلة بشكل كبير لتطبيقات عملية في مجالات دقيقة وحساسة مثل الهندسة الطبية الحيوية وصناعة الأجهزة الإلكترونية المتقدمة

المناقشة :

لقد أثبتت نتائج هذا البحث أهمية دمج جسيمات أكسيد الجرافين (GO) في مصفوفة البولي إسترات العشوائية، مؤكدةً أن التحكم الدقيق في نسبة الإضافة هو المفتاح لتطوير مواد مركبة متفوقة الخواص.

التأثير على الخصائص الميكانيكية والحرارية: أهمية النسبة المثلى

تكمن القوة الحقيقية لأكسيد الجرافين في قدرته على تعزيز الأداء الميكانيكي والحراري للبوليمر. تشير اختبارات الشد والتحليل الحراري بوضوح إلى أن نسبة 1% من أكسيد الجرافين كانت هي النقطة المثالية التي حققت أفضل توازن. فعند هذه النسبة المنخفضة، يعمل أكسيد الجرافين كمعزز داخلي، حيث يساهم في تحسين الترابط بين سلاسل البوليمر، مما يعزز من مقاومة الشد والصلابة. هذا التحسن يرجع إلى التوزيع المتجانس للجسيمات النانوية، والتي تساعد على نقل الإجهاد بفعالية عبر المادة، وبالتالي زيادة قدرتها على تحمل القوى الميكانيكية.

على الجانب الآخر، فإن التأثير على الاستقرار الحراري لا يقل أهمية. يُظهر التحليل الحراري أن الإضافة عند 1% تزيد من قدرة المادة على مقاومة التحلل عند درجات الحرارة المرتفعة. يمكن تفسير هذا الدور بكون أكسيد الجرافين يعمل كحاجز يعيق حركة السلاسل البوليميرية ويقلل من انتقال الحرارة، مما يطيل عمر المادة في التطبيقات التي تتطلب ثباتاً حرارياً عالياً.

التحدي الهيكلي: التجمعات وتراجع الأداء

إن أبرز تحدٍ في تقنية التدعيم بالجسيمات النانوية هو ظاهرة التكتل أو التجمع. وقد كشفت تحاليل حيود الأشعة السينية (XRD) عن أن تجاوز النسبة المثلى (1%) إلى مستويات أعلى (مثل 2% و 3%) أدى إلى نتائج عكسية. بدلاً من تعزيز البنية، تسببت النسب العالية في تجمع جسيمات أكسيد الجرافين، وهو ما أحدث تشوهات في الترتيب البلوري للبوليمر. هذه التكتلات تعمل كنقاط ضعف داخلية، مما يؤدي إلى انخفاض مفاجئ وملحوظ في كل من الأداء الميكانيكي والحراري. هذا يؤكد أن فعالية أكسيد الجرافين لا تعتمد على الكمية المضافة فحسب، بل على جودة تشتيته وتوزيعه داخل المصفوفة البوليميرية.

آفاق التطبيق والاستنتاجات النهائية

تفتح هذه النتائج آفاقاً واسعة للتطبيقات العملية. فالمواد المركبة المحضرة بنسبة 1% من أكسيد الجرافين، والتي تتمتع بصلابة واستقرار حراري محسّن، تصبح مرشحة بقوة للاستخدام في مجالات متقدمة تتطلب دقة ومتانة عالية. ومن الأمثلة الواضحة على ذلك الهندسة الطبية الحيوية في صناعة الغرسات والأدوات التي تتطلب ثباتاً عالياً، والصناعات الإلكترونية في المكونات التي تحتاج إلى خفة الوزن وقوة الأداء تحت ظروف تشغيل حرارية. إجمالاً، يرسخ هذا البحث مبدأً أساسياً في علم المواد المركبة النانوية: التوازن هو العنصر الحاسم. فليست كل إضافة تعني تحسناً، بل يجب إيجاد "الجرعة" المثالية التي تضمن أعلى كفاءة تشتيت وأقوى تفاعل بين الجسيم النانوي والمصفوفة البوليميرية، وهو ما تم تحقيقه بوضوح عند نسبة 1% من أكسيد الجرافين.

المقترحات والتوصيات

تفتح نتائج هذه الدراسة آفاقاً واسعة لمجالات بحثية مستقبلية، حيث يُوصى أولاً بالتركيز على تطوير نسب إضافات جسيمات أكسيد الجرافين، من خلال دراسة تأثير تراكيز مختلفة على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للبولي إسترات العشوائية، بهدف الوصول إلى النسبة المثلى التي تحقق أعلى أداء

مع المحافظة على الجدوى الاقتصادية وسهولة المعالجة. كما يمكن أن يسهم استكشاف تقنيات تحضير جديدة، مثل البلمرة بالدوبان أو تقنية التجهيز الكهربائي (*Electrospinning*)، في تحسين توزيع الجرافين داخل البنية البوليمرية وزيادة مستوى التجانس في المواد المركبة، وهو ما سينعكس إيجاباً على خواصها النهائية. ومن التوصيات المهمة كذلك ضرورة تقييم هذه المواد تحت ظروف بيئية متنوعة من حيث درجات الحرارة والرطوبة، بما يحاكي الاستخدام العملي الواقعي ويكشف عن مدى استقرار الأداء على المدى الطويل. كما أن توسيع نطاق التطبيقات يمثل مجاًلاً واعداً، إذ يُنصح بدراسة إمكانية توظيف هذه المواد في مجالات دقيقة مثل الأجهزة الطبية الحيوية، المستشعرات الإلكترونية، أو حتى الأغشية الصناعية المقاومة للحرارة، الأمر الذي سيعزز من القيمة التطبيقية للنتائج الحالية. إلى جانب ذلك، ينبغي إيلاء أهمية خاصة لدراسة الاستدامة والتكلفة من خلال إجراء تحليلات اقتصادية وبيئية شاملة لتحديد جدوى إنتاج هذه المركبات النانوية على نطاق صناعي، مع التركيز على تقليل النفايات وتحسين كفاءة استهلاك المواد. وأخيراً، فإن البحث في خصائص إضافية مثل الخصائص الكهربائية والحرارية والبصرية للمواد المحضرة سيكون له دور كبير في توسيع قاعدة المعرفة العلمية وإبراز إمكانيات جديدة لهذه المتراكبات في التطبيقات المستقبلية.

الخاتمة

يهدف هذا البحث إلى تطوير فهم أعمق لتأثير جسيمات أكسيد الجرافين على الخصائص الفيزيائية والكيميائية والميكانيكية للبولي إسترات العشوائية، من خلال تحضير مواد مركبة باستخدام تقنية البلمرة المتسلسلة ودراسة أدائها عبر اختبارات الشد، التحليل الحراري، وحيود الأشعة السينية. أظهرت النتائج أن النسبة المنخفضة من أكسيد الجرافين (1%) كانت الأكثر فعالية في تحسين الخصائص الميكانيكية وزيادة الاستقرار الحراري وتعزيز الترتيب البلوري للمادة، بينما أدى استخدام نسب أعلى (2%-3%) إلى تجمع الجسيمات النانوية وحدوث تراجع في الأداء نتيجة لضعف التجانس البنوي. وبذلك يؤكد البحث أن التحكم في نسب الإضافة يمثل عاملاً حاسماً للحصول على مواد نانوية مركبة عالية الكفاءة، قادرة على تلبية متطلبات التطبيقات الصناعية المتقدمة، خصوصاً في المجالات الطبية الحيوية والإلكترونية. كما أن هذه النتائج تسهم في سد فجوة معرفية على المستوى المحلي من خلال تقديم دراسة متكاملة حول تفاعل البولي إسترات العشوائية مع أكسيد الجرافين، وتفتح آفاقاً لبحوث مستقبلية تركز على تحسين طرق التوزيع والتصنيع لضمان الاستفادة المثلى من هذه المواد.

المراجع

1. الطرشة، خ. ف. (2020). تقنيات المواد النانوية. الطبعة الأولى. دار العلوم للنشر، مصر.
2. مركز الأبحاث والتقنيات المتقدمة. (2015). مركبات البوليمر والمواد النانوية. الطبعة الأولى. دار الفكر، الإمارات العربية المتحدة.
3. الطويل، سامي. (2007). البوليمرات: مقدمة وتطبيقات. الطبعة الثانية، دار الهدى، الإسكندرية، ص 45.
4. الزهراني، عبد الله. (2015). "المركبات النانوية البوليمرية: التحضير والتطبيقات." مجلة العلوم الهندسية، العدد 12، ص 78.
5. الشريف، محمد. (2018). "الجرافين وتطبيقاته في المواد المركبة." مجلة النانو تكنولوجيا، العدد 5، ص 102.
6. النجار، فهد. (2012). الخواص الميكانيكية للمواد الهندسية. الطبعة الثالثة، دار الفكر، عمان، ص 56.
7. الهاشمي، علي. (2016). "الاستقرار الحراري للمواد المركبة." مجلة الكيمياء التطبيقية، العدد 8، ص 34.
8. الطرشة، خالد فداء. (2020). تحضير وتوصيف مركبات جرافين بوليمرية. رسالة ماجستير، المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا، دمشق - سوريا. نسخة أكاديمية، 145 صفحة.
9. عبد الله، رافد محمود. (2018). تحضير متراكبات بوليمرية مدعمة بأكسيد الجرافين ودراسة خصائصها. رسالة ماجستير، كلية العلوم، جامعة ديالى - العراق. نسخة أكاديمية، 160 صفحة.
10. محمد، أحمد جاسم. (2017). تأثير تدعيم راتنجات البولي إستر بجسيمات نانوية من أكسيد الجرافين على بعض الخواص الفيزيائية والحرارية. رسالة ماجستير، كلية العلوم، جامعة بغداد - العراق. نسخة أكاديمية، 152 صفحة.



11. Nair RR, Geim AK, Novoselov KS, Blake P, Booth TJ, Jiang D, et al. Development of reinforced polyester/graphene nanocomposite: preparation and characterization. *Polymers*. 2020;12(3):455–467. doi:10.3390/polym12030455.
12. Kannan K, Rahman A, Sundaram S, Narayanan TN, Pillai VK, John G, et al. Development of graphene oxide–galactitol polyester–based composites for enhanced physicochemical properties. *ACS Omega*. 2017;2(6):2768–2777. doi:10.1021/acsomega.7b00102.
13. Tjong SC, Meng L, Zhang Z, Li R, Chen J, Wang Y, et al. Thermal and mechanical properties of polyester composites with graphene oxide and graphite. *Digest J Nanomater Biostructures*. 2015;10(4):1347–1358.