تحليل تجريبي وعددي للخواص الميكانيكية والفيزيائية والحرارية لمادةHDPE المتقادمة حرارياً والمُعاد تدويرها

لوليا يحيى

دكتورة عضو هيئة تعليمية في قسم هندسة الإنتاج، كلية الهندسة الميكانيكية، جامعة حلب، حلب، الجمهورية العربية السورية
l.yehya@alepuniv.edu.sy
https://orcid.org/0009-0001-8953-3211

الملخص

تُقدِّم هذه الدراسة تقييماً تجريبياً منهجياً لتأثير التقادم الحراري وإعادة التدوير الميكانيكي على الخواص الميكانيكية والفيزيائية والحرارية لمادة HDPE من نوع SABIC® M300054 أُخضعت المادة البِكر لتقادم حراري داخل فرن ذي تهوية قسرية عند 100°C ± 2 لمدة 240 ساعة لمحاكاة الخدمة الحرارية طويلة الأمد دون بلوغ درجة الانصهار، طُحنت المادة المتقادمة وخُلطت مع المادة البِكر بنسب وزنية 100%، 50%، 30%، 10%، 0% لتشكيل خمس مجموعات، صُنِّعت العينات بآلة حقن في ظروف موحَّدة . أُجريت اختبارات MFR وفق ASTM D1238، والشد وفق ASTM D638، والصلادة Shore D وفق ASTM D2240، والكثافة وفق ASTM D1505، فضلاً عن الخواص الحرارية النوعية الثلاث: السعة الحرارية (C)، الناقلية الحرارية (k)، ومعامل التمدد الحراري (α) حيث قيس معامل التمدد الحراري (α) بطريقتين مستقلتين، بينما قيس كل من السعة الحرارية (C) والناقلية الحرارية (k) بطريقة واحدة. كشفت النتائج أن ارتفاع نسبة المادة المُعاد تدويرها يؤدي إلى زيادة تدريجية في MFR ومعامل المرونة والصلادة، في مقابل انخفاض ملحوظ في مقاومة الشد والاستطالة عند الكسر، بينما أظهرت الناقلية الحرارية (k) تغيراً محدوداً ضمن هامش الخطأ التجريبي. وتُشير النتائج في مجملها إلى سيطرة التأثيرات البنيوية المورفولوجية (تقصير السلاسل وإعادة التبلور) على السلوك الميكانيكي، مع احتمال حدوث أكسدة حرارية محدودة. ولمقارنة النتائج التجريبية بنتائج نمذجة رقمية، أُجريت محاكاة عددية لاختبار الشد باستخدام برنامجَي SolidWorks Simulation و COMSOL Multiphysics اللذين أكَّدا توافقاً جيداً مع القياسات المعملية. تبيّن أن نسبة 30% تُحقق أنسب توازن بين الأداء الميكانيكي ومتطلبات الاستدامة، إذ تحتفظ بنحو 89.7% من مقاومة الشد الأصلية ضمن منظومة الاقتصاد الدوري.

الكلمات المفتاحية: HDPE ، التقادم الحراري، إعادة التدوير الميكانيكي، معدل التدفق الانصهاري، الخواص الميكانيكية، نسب الخلط، المحاكاة العددية.

ورد للنشر بتاريخ : 2026/4/26

قبل للنشر بتاريخ : 2026/6/29

2026 © المؤلف (المؤلفون).هذا المقال منشور بنظام الوصول المفتوح بموجب ترخيصCC BY-NC-SA 4.0

Experimental and Numerical Analysis of the Mechanical, Physical, and Thermal Properties of Thermally Aged and Recycled HDPE

Lulia Yahya
Teacher in the Production Engineering Department, Faculty of Mechanical Engineering, Aleppo University, Aleppo, Syria
l.yehya@alepuniv.edu.sy
https://orcid.org/0009-0001-8953-3211

Abstract

This study presents a systematic experimental evaluation of the effects of thermal aging and mechanical recycling on the mechanical, physical, and thermal properties of HDPE grade SABIC® M300054. Virgin HDPE was thermally aged at 100°C ± 2 for 240 hours in a forced-convection oven, simulating long-term thermal service without reaching the melting point. The aged material was ground and blended with virgin HDPE at 10%, 30%, 50%, and 100% weight fractions, plus a 0% virgin reference, yielding five test groups. Specimens were injection-moulded under standardised conditions. Testing followed ASTM standards: melt flow rate (MFR) per D1238, tensile properties per D638, Shore D hardness per D2240, and density per D1505, alongside heat capacity (C), thermal conductivity (k), and coefficient of thermal expansion (α), with α measured by two independent methods and C and k each by one. Results show that increasing the aged-material fraction progressively raises MFR, elastic modulus, and hardness, while tensile strength and elongation at break decline; thermal conductivity remains stable within experimental error. These trends indicate that structural morphological effects, chain scission and secondary crystallisation, dominate the observed mechanical behaviour, with the possibility of limited thermal oxidation. Numerical tensile simulations using SolidWorks Simulation and COMSOL Multiphysics showed good agreement with laboratory measurements. A 30% blending ratio achieved the best balance between mechanical performance and sustainability, retaining approximately 89.7% of virgin tensile strength within a circular economy framework.

Keywords: HDPE, thermal aging, mechanical recycling, melt flow rate, mechanical properties, blending ratios, numerical simulation.

Received : 26/4/2026
Accepted : 29/6/2026

© 2026 Author(s). This article is published under the Open Access License CC BY-NC-SA 4.0

1. المقدمة

يُعدّ بولي إيتيلين عالي الكثافة (HDPE) من أوسع البوليمرات الحرارية استخداماً في التطبيقات الصناعية والاستهلاكية، نظراً لما يتمتع به من توازن متميز بين الخواص الميكانيكية كمقاومة الشد والصلادة، والخواص الكيميائية كمقاومة المواد الكيميائية مع سهولة التصنيع بالحقن والبثق والنفخ (Thakur & Amare, 2019). يُستخدم HDPE على نطاق واسع في صناعة الأنابيب، والتغليف الصناعي والغذائي، والمستلزمات المنزلية، وقطع السيارات. غير أن الأعباء البيئية المتصاعدة الناجمة عن تراكم النفايات البلاستيكية دفعت نحو تبني سياسات إعادة التدوير بوصفها خياراً استراتيجياً يجمع بين الحفاظ على الموارد والحدّ من التلوث (Thakur & Amare, 2019; Cruz et al., 2017). إلا أن إعادة التدوير الميكانيكي تُلحق تدهوراً تراكمياً بالبنية الجزيئية للبوليمر، يتمثل أساساً في تقصير السلاسل البوليمرية (Chain Scission) وزيادة درجة التبلور والأكسدة الحرارية (Awad et al., 2019). من هذا المنطلق، صُمِّمت الدراسة الحالية لتقييم تأثير التقادم الحراري المُسبَق 240 ساعة عند 100 °C على خواص HDPE عند نسب خلط متدرجة مع المادة البِكر، مع التحقق العددي من نتائج الشد وقياس الخواص الحرارية النوعية.

2. الدراسات المرجعية

2.1 بولي إيتيلين عالي الكثافة

يُمثِّل بولي إيتيلين عالي الكثافة (HDPE) نموذجاً كلاسيكياً للبوليمرات شبه البلورية (Semi-crystalline Polymers)، إذ يوجد في بنيته طوران متمايزان هيكلياً: الطور البلوري(Phase Crystalline) الذي تنتظم فيه السلاسل البوليمرية في صفائح مرتبة (Lamellae) تنتظم هي بدورها إشعاعياً داخل تشكيلات كروية تعرف بالـ Spherulites، والطور العشوائي اللابلوري (Amorphous-Phase) الذي تتشابك فيه السلاسل بصورة غير منتظمة مُكسِبةً المادة مرونتها وقدرتها على التشوه اللدن (Spychała et al., 2024; Awad et al., 2019). تتراوح درجة التبلور في HDPE التجاري عادةً بين 60% و80%، وهو ما يُفسِّر ارتفاع كثافته (0.941–0.965 g/cm³) مقارنةً بـ LDPE وLLDPE. وتتشكّل البنية البلورية أثناء التبريد من المصهور عبر عمليتَي تشكّل النوى (Nucleation) والنمو البلوري (Crystal Growth) وفق نظريتَي Avrami وLauritzen-Hoffman اللتين تصفان سرعة الانتشار البلوري بدلالة درجة الحرارة والوزن الجزيئي. تتحكم هذه البنية في معظم الخواص: فارتفاع نسبة التبلور يزيد الصلادة ومعامل المرونة ومقاومة الزحف، لكنه يُقلِّص المطيلية ومقاومة الصدم نظراً لتقليص الطور العشوائي المرن (Yin et al., 2015; Vidakis et al., 2021). وقد أثبتت دراسة Diby وآخرون (Diby et al., 2025) أن صفائح Lamellae في HDPE تؤدي دوراً محورياً في نقل الإجهاد عبر جزيئات الربط (Tie Molecules) التي تشكّل جسوراً بين المناطق البلورية المتجاورة، وأن أي تغيُّر في سُمك هذه الصفائح أو كثافتها ينعكس مباشرةً على معامل المرونة.

2.2 آليات التدهور الهيكلي في HDPE أثناء التقادم الحراري وإعادة التدوير

تشترك في HDPE آليات تدهور متعددة تتنافس في تأثيرها بحسب ظروف التعرض الحراري والميكانيكي:

أولاً — تقصير السلاسل (Chain Scission): تنكسر الروابط التساهمية C–C في العمود الفقري للسلسلة البوليمرية تحت تأثير الحرارة أو الإجهاد الميكانيكي، مما يُخفِّض الوزن الجزيئي المتوسط ويُقلِّل عدد جزيئات الربط (Tie Molecules) المسؤولة عن ربط المناطق البلورية ببعضها. يتجلى ذلك مباشرةً في ارتفاع MFR نظراً لانعكاس العلاقة بين اللزوجة والوزن الجزيئي (Thakur & Amare, 2019; Fayolle et al., 2007). وقد أكدت دراسة Fayolle وآخرون (Fayolle et al., 2008) أن انشطار السلاسل يُقلِّص الفراغ البيني (Interlamellar Spacing) ويزيد نسبة التبلور الكلية، مما يُفسِّر تزامن ارتفاع كلٍّ من E والصلادة مع انخفاض الاستطالة.

ثانياً — الأكسدة الحرارية (Thermo-oxidative Degradation): في وجود الأكسجين وعند درجة حرارة مرتفعة، تُطلق الجذور الحرة (Free Radicals) سلسلةً من التفاعلات المتسلسلة تُنتج مجموعات كربونيل وهيدروبيروكسيد ومجموعات هيدروكسيل. وقد رصدت دراسة Zeng وآخرون (Zeng et al., 2024) باستخدام المحاكاة الجزيئية أن HDPE ذا درجة البلورة العالية أكثر ميلاً نحو التشابك (Cross-linking) منه نحو انشطار السلاسل أثناء الأكسدة الحرارية، في حين يسود انشطار السلاسل في الطور العشوائي. هذا يُوضح سبب تباين معدل التدهور بين الطورين وأهمية اختيار درجة حرارة التقادم بعناية دون الاقتراب من Tm. وقد أثبتت دراسة Fayolle وآخرون (Fayolle et al., 2007) على PE أن درجات الحرارة دون درجة الانصهار (80–90 C°) تُهيمن فيها آلية انشطار السلاسل بوصفها الآلية التدهورية الرئيسية، وهو ما يدعم اختيار درجة 100 C° في الدراسة الحالية بوصفها ضمن نطاق ما دون الانصهار الذي تتنشط فيه هذه الآلية.

ثالثاً — إعادة التبلور الثانوي (Secondary Crystallization) : السلاسل القصيرة الناتجة عن انشطار السلاسل أكثر حريةً في الحركة وقادرة على الانتظام في مشابك بلورية إضافية. هذه الظاهرة موثَّقة تجريبياً في PE100 إذ أثبتت دراسة Genet وآخرون في (Fayolle et al., 2007) أن التقادم الحراري عند 90 C° يرفع درجة التبلور ومعامل المرونة وإجهاد الخضوع دون تغيير كيميائي جذري في البنية، مع انخفاض موازٍ في حركة الطور العشوائي (Amorphous Phase Mobility)

رابعاً — تفرّع السلاسل البوليمرية (Chain Branching) : في الاستخدامات الصناعية المتكررة، قد يُعيد انشطار السلاسل ترتيب البنية مُنتِجاً تفرعات جانبية قصيرة أو طويلة، وهو ما يُحدث آثاراً ريولوجية مختلفة عن انشطار السلاسل بمفرده. وقد ميَّزت دراسة Pinheiro وآخرين في (Pinheiro et al., 2004) بين الحالتين بقياسات اللزوجة الجوهرية (Intrinsic Viscosity) ومؤشرات معامل التشتت الجزيئي (Polydispersity Index (PDI)).

2.3 الدراسات السابقة المتعلقة بإعادة التدوير وخواص HDPE

أجرى Spychała وآخرون (Spychała et al., 2024) دراسة بنيوية وميكانيكية على HDPE المعاد تدويره المدعم بمسحوق الألياف الزجاجية (GFRP)، وأثبتوا أن إضافة 10% من المسحوق تُعوِّض جزءاً ملموساً من التدهور الناجم عن إعادة المعالجة. وتتقاطع الدراستان في محور التدهور الهيكلي والبحث عن مسارات للحفاظ على الأداء الوظيفي. درس (Thakur & Amare, 2019) معدل التدفق الانصهاري لـ HDPE المعاد تدويره وأثبتا أنه يرتفع بصورة شبه خطية مع عدد دورات إعادة التدوير، مؤكدين أنه أداة تشخيصية موثوقة لتقدير انخفاض الوزن الجزيئي دون الحاجة إلى قياسات GPC معملية مكثفة.

بحث Awad وآخرون (Awad et al., 2019) في الخواص الميكانيكية والفيزيائية لـ PP وHDPE المعاد تدويرهما ولاحظوا أن HDPE يُحافظ على نسبة أعلى من خواصه الأصلية مقارنةً بـ PP، ويُعزى هذا إلى درجة التبلور المرتفعة في HDPE التي توفر طواراً بلورياً يستوعب قدراً من التدهور الميكانيكي دون انهيار بنيوي مفاجئ (Van Gisbergen, 2018; Hinczica et al., 2022). وثَّق Oblak وآخرون (Oblak et al., 2015) أن إعادة التدوير تؤثر بصورة أوضح على الخواص الميكانيكية كالاستطالة والشد مقارنةً بالخواص الحرارية كدرجة الانصهار. وأكّدوا أن السلاسل القصيرة الناتجة عن التدوير تُعيد التبلور في مشابك إضافية بدلاً من التحلل الكيميائي. أكد (Huang & Peng, 2021) أن MFR يتضاعف بعد خمس دورات من إعادة التدوير، وأوضح Chariyachotilert وآخرون (Chariyachotilert et al., 2022) أن إضافة 50% مادة بِكر يُحسِّن الخواص بشكل ملحوظ وإن لم يُعدها لمستوى المادة الأصلية. وأجرى Krantz وآخرين (Krantz et al., 2023) دراسة على تأثير معلمات الحقن على HDPE المعاد تدويره مؤكدين أهمية ضبط الضغط والتبريد للحد من آثار التدهور الريولوجي. على صعيد أشمل لدراسات الخلط، أجرى Zhang وآخرون (Zhang et al., 2023a) دراسةً منهجية شاملة على خلطات (recycled HDPE/virgin HDPE) عبر نطاق تركيز كامل (0–100% مُعاد تدويره)، وتوصلوا إلى أن كلاً من معامل المرونة ومقاومة الشد وأداء التعب الميكانيكي تتحسن مع زيادة محتوى المادة البِكر. كما لاحظوا أن طريقة المزج جاف مقابل ذوبان تُؤثر في التوزيع المورفولوجي لكلا المرحلتين.

وفي السياق ذاته، درس Vidakis وآخرون (Vidakis et al., 2021) تأثير دورات إعادة التدوير المتكررة على خواص HDPE في التصنيع الإضافي، وأثبتوا أن المادة تحتفظ بخصائص ميكانيكية مقبولة حتى الدورة الخامسة قبل أن تبدأ التدهورات الجوهرية. ويُشير هذا إلى هامش أمان موسَّع في استخدامات إعادة التدوير للمرة الواحدة التي تتناولها دراستنا. أما فيما يخص التأثير التراكمي لدورات الإعادة المتعددة، فقد تتبَّع Goupil وآخرون (Goupil et al., 2023) مؤشرات التدهور عبر حلقات إعادة تدوير متسلسلة على PPc وHDPE، ووجدوا أدلةً على انشطار السلاسل في PP وتفرع سلاسل (Chain Branching) في HDPE. والأهم أن كلا البوليمرين أظهرا تدهوراً محدوداً في الخواص الميكانيكية حتى ثلاث دورات متتالية، مما يُدعم القابلية الصناعية للإعادة. أثبتت دراسة Yin وآخرون (Yin et al., 2015) أن إعادة المعالجة الحرارية الميكانيكية المتكررة تؤدي إلى انخفاض نسبة الاستطالة ε بمعدل أكبر بكثير مقارنة بمعدل تغير الإجهاد σ. ويُعزى

ذلك إلى تراجع كثافة جزيئات الربط المسؤولة عن تمكين الانزلاق اللدن الكبير قبل الكسر. وفيما يتعلق بالتدهور المشترك في مزيج البوليمرات، رصدت دراسة Zhang وآخرون (Zhang et al., 2024) تأثير التدهور الضوئي والحراري في خلطات rPE/rPP، وأثبتت تكوّن مجموعات الكربونيل والهيدروكسيل الجديدة في كلٍّ من rPEو rPP بعد التعرض، مما يؤكد أن التقادم الحراري يُخلّف أثراً كيميائياً قابلاً للقياس باستخدام FTIR حتى عند درجات حرارة معتدلة مثل 100 °C.

2.4 الخواص الحرارية النوعية لـ HDPE: ثبات نسبي وتحولات بنيوية

تُشكِّل الخواص الحرارية النوعية (السعة الحرارية C، الناقلية الحرارية k، ومعامل التمدد الحراري α) مؤشراً تشخيصياً مهماً لتمييز التغيرات الفيزيائية البنيوية عن التحولات الكيميائية الجذرية. إذ تعكس كل من k وC وα طبيعة التركيب الجزيئي الأساسي (n(–CH₂–CH2–) وحركية السلاسل في الطورين البلوري وغير المتبلور، بينما تعكس الخواص الميكانيكية تغيرات الوزن الجزيئي وتوزيعه. تُشير الأدبيات إلى أن k لـ HDPE تتراوح في الحالة العامة بين 0.37 و0.52 W/m·K عند درجة الحرارة المحيطة (Spychała et al., 2024; Vidakis et al., 2021). والأهم هو ثبات النسبة بين المجموعات (تغيّر 7% فقط)، وهو ما يتوافق مع نتائج Oblak وآخرون (Oblak et al., 2015) الذين أكّدوا أن إعادة التدوير لا تُغيّر الطابع الكيميائي الجوهري للبوليمر . كذلك أثبتت دراسة إعادة تدوير HDPE لأنابيب الصرف الصحي التي أجراها Alzerreca وآخرون (Alzerreca et al., 2015) أن درجة الانصهار تبقى مستقرة حتى بعد إعادة المعالجة المتكررة، وأن التغيرات الحرارية المقاسة لا تتعدى هامش الخطأ التجريبي لقياسات DSC. أما السعة الحرارية النوعية C، فتتراوح قيمها في HDPE وفق الأدبيات بين (≈ 0.45–0.50 cal/g·°C) (SABIC, 2021) القيم المقاسة بالمسعر الحراري (0.90– 1.50 cal/g·°C) تُشير إلى احتمال وجود انحياز تجريبي ناتج عن فقدان حراري أثناء نقل العينة إلى المسعر أو عدم تحقق شروط العزل الحراري الكامل. لذلك تُستخدم هذه النتائج للمقارنة النسبية بين المجموعات فحسب وليس كقيم مطلقة مرجعية، والشاهد العلمي هو الاتجاه النسبي المتفق مع فرضية سيطرة التأثيرات البنيوية على التغيرات المقاسة.

2.5 خلاصة تحليلية للدراسات السابقة

تتشارك الدراسات المستعرضة في الخلاصة العلمية التالية: يُحدث التدهور الحراري والميكانيكي في HDPE تغيراً بنيوياً من المستوى الجزيئي (تقصير السلاسل، تغيُّر توزيع الأوزان الجزيئية، إعادة التبلور) دون إحداث تحوّل كيميائي جذري في الوحدة المتكررة (n(–CH₂–CH2–). يُفضي هذا إلى ثبات نسبي في k وC وTm في حين تتغيّر MFR وε وσ بصورة حساسة. كما تُؤكد الدراسات الحديثة [8،9،10] أن الخلط مع المادة البِكر يُوفِّر مساراً عملياً قابلاً للتحكم للحفاظ على مستوى مقبول من الأداء الميكانيكي ضمن منظومة الاقتصاد الدوري. ويُعزز هذا المفهوم أهمية قياس مجموعة متكاملة من الخواص (ميكانيكية وفيزيائية وحرارية) بدلاً من الاقتصار على مؤشر واحد، وهو ما يُميِّز هذه الدراسة عن أغلب الأعمال السابقة التي اكتفت بقياسَي MFR والشد فقط.

2.6 حدود الدراسات السابقة

استناداً إلى مراجعة الأدبيات، يتضح أن معظم الدراسات السابقة اقتصرت على ثلاث نسب خلط كحدٍّ أقصى (Thakur & Amare, 2019; Awad et al., 2019; Chariyachotilert et al., 2022)، ولم تُدمج التقادم الحراري الموثَّق مع إعادة التدوير الميكانيكي ضمن منهجية تجريبية تشمل خمس نسب متدرجة مع قياس الخواص الحرارية النوعية الثلاث (C،k ،α) بطريقتين مستقلتين والتحقق العددي بأداتين رقميتين مختلفتين. ورغم أن دراسة Zhang وآخرون (Zhang et al., 2023a) تناولت نطاقاً كاملاً للخلط، إلا أنها لم تُدرج تقادماً حرارياً مُسبَقاً ولم تقِس الخواص الحرارية النوعية.

يسعى هذا البحث إلى تغطية هذا النقص المعرفي بتقديم قاعدة بيانات كمية متعددة المستويات، مدعومةً بالتحقق وقياس الخواص الحرارية النوعية.

3. أهمية البحث وأهدافه

يهدف البحث إلى:

1. دراسة تأثير أربع نسب خلط (10%، 30%، 50%، 100%) من المادة المُتقادمة حرارياً (240 ساعة عند 100°C) والمُعاد تدويرها مع المادة البِكر على الخواص الميكانيكية والفيزيائية لـ HDPE.
2. إجراء مقارنة كمية ورسم منحنيات استجابة لجميع الخواص عبر نطاق نسب الخلط الكامل.
3. قياس الخواص الحرارية النوعية C،k ،(α).
4. محاكاة اختبار الشد باستخدام SolidWorks Simulation وCOMSOL Multiphysics.
5. تحديد نسبة الخلط الأفضل التي تحقق التوازن بين الأداء الميكانيكي والاستدامة البيئية.

4. المواد والأجهزة المستخدمة

4.1 المادة الأولية

استُخدمت مادة HDPE من إنتاج شركة SABIC السعودية، نوع SABIC® HDPE M300054. وفقاً لنشرة الشركة المصنّعة (SABIC, 2021): معدل تدفق 30 g/10min، وكثافة 0.954 g/cm³، ودرجة انصهار ~128 °C. قبل أي معالجة، غُسلت الكريّات بالماء المقطر وجُفِّفت عند 80 °C لمدة 4 ساعات.

4.2 أجهزة التجارب

جميع الاختبارات أُجريت في مختبرات كلية الهندسة الميكانيكية، جامعة حلب:

- جهاز (Melt mass Flow rate- MFR) — مختبر البلاستيك
- جهاز اختبار الشد الشامل — مختبر البلاستيك
- جهاز الصلادة Shore D — مختبر البلاستيك
- جهاز قياس درجة حرارة الانصهار— مختبر الغزل والنسيج
- جهاز الإيصالية الحرارية وجهاز السعة الحرارية — مختبر الفيزياء
- جهاز قياس الكثافة، ميزان إلكتروني دقيق (BH-150) — مختبر الكيمياء
- جهاز (Falling Weight) — مختبر البلاستيك

5. منهجية البحث

5.1 إجراء التقادم الحراري

وُضعت كريّات HDPE البِكر في أطباق معدنية مسطحة داخل فرن حراري ذي تهوية قسرية مضبوط عند 100°C ± 2، واستُمرّ التقادم 240 ساعة متواصلة (اختيرت هذه المدة استناداً إلى بروتوكولات التقادم المعجَّل المعتمدة في الأدبيات لمحاكاة ظروف الخدمة طويلة الأمد عند درجات حرارة معتدلة (Fayolle et al., 2007; Yin et al., 2015). يُفعِّل هذا الإجراء آليات التقادم الحراري–التأكسدي: تقصير السلاسل البوليمرية، تكوين مجموعات كربونيل وهيدروبيروكسيد، وإعادة الترتيب البلوري الجزئي. درجة الحرارة المختارة تقل بـ 28–30°C عن درجة انصهار HDPE مما يُقلِّل احتمال التحلل الجذري للوحدة المتكررة، وإن كانت الأكسدة الحرارية المحدودة لا يمكن استبعادها دون تحليل طيفي.

5.2 الطحن وإعداد نسب الخلط (إعادة التدوير)

طُحنت المادة المتقادمة بطاحونة مخبرية للحصول على حبيبات بقطر 2–4 mm، ثم جُفِّفت مجدداً عند 80°C لمدة ساعتين. مُزجت مع المادة البِكر بدقة وزنية لإعداد خمس مجموعات: V0 (0%) R10 (10%)،R50 (50%) ،R100(100%) R30 (30%)

5.3 تحضير العينات

صُنِّعت العينات باستخدام آلة حقن بمسمار لولبي وفق الظروف الموصى بها في نشرة الشركة المصنّعة (SABIC, 2021)، إذ ضُبطت درجة حرارة المصهور عند 200–210 °C، ودرجة حرارة القالب عند 40°C، وضغط الحقن عند 100 MPa. تجدر الإشارة إلى أن الآلة المستخدمة تعمل بنظام شبه تلقائي يضبط معلمات الحقن المتبقية تلقائياً بناءً على نوع المادة المُدخَلة، مما يضمن الاتساق بين جميع مجموعات العينات (Ahmed et al., 2024).

أُعدّت عينات الشد وفق المعيار ASTM D638 Type I (الطول الفعّال 50mm، سماكة 5mm، عرض 13mm، سرعة الشد 10mm/min). تُركت جميع العينات لمدة 24 ساعة عند 23°C ورطوبة نسبية 50% قبل الاختبار. لكل مجموعة ثلاث عينات مكررة.

5.4 الاختبارات التجريبية

1. معدل التدفق الانصهاري MFR: ASTM D1238-04 – 190 °C، 2.16 kg، 10 min (ASTM International, 2004).
2. اختبار الشد: ASTM D638 – سرعة 10 mm/min، قياس (E، ε،σ) (ASTM International, 2022a).
3. صلادة Shore D : ASTM D2240 (ASTM International, 2022b).
4. الكثافة: إزاحة الأسيتون عند 23 °C
5. درجة حرارة الانصهار: أنبوب شعري في زيت السيليكون.
6. السعة الحرارية النوعية C: مسعر حراري.

7. الناقلية الحرارية (V=8V:k، I=1.2A)

8. معامل التمدد الحراري الطولي α: طريقتان مستقلتان.

9. طاقة الصدم: حمل 5 kg، ارتفاع 0.5 – 2.0 m

6. تحليل الخواص المقاسة وتفسيرها

يَستعرض هذا القسم المبادئ الفيزيائية والتفسيرية لكل خاصية من الخواص المقاسة في الدراسة، ويُوضح الصلة المباشرة بين كل قياس وبين آليات التدهور البنيوي الناجم عن التقادم الحراري وإعادة التدوير.

6.1 معدل التدفق الانصهاري MFR (g/10min)

معدل التدفق الانصهاري (MFR) هو كمية البوليمر المنصهر التي تتدفق خلال فتحة معيارية خلال 10 دقائق عند 190 °C وحمل 2.16 kg ، ويُستخدم كمؤشر ريولوجي مباشر على الوزن الجزيئي. تنخفض لزوجة المصهور مع انخفاض الوزن الجزيئي الناتج عن تقصير السلاسل أثناء التقادم الحراري أو إعادة التدوير، مما يؤدي إلى ارتفاع MFR. لذلك يُعد ارتفاع MFR دلالة على سهولة التشغيل مع تراجع في الخواص الميكانيكية. القيمة الاسمية للمادة البِكر في هذه الدراسة هي 30 g/10min، وأي تغير عنها يعكس تأثير التقادم و إعادة التدوير، يُبيِّن الشكل (1) جهاز اختبار معدل التدفق الانصهاري MFR والميزان الإلكتروني BH−150 .

الشكل (1): جهاز اختبار معدل التدفق الانصهاري MFR والميزان الإلكتروني BH−150

6.2 مقاومة الشد σ (MPa)

مقاومة الشد σ هي أقصى إجهاد شدي تتحمله المادة قبل الكسر النهائي، وتُحسب بقسمة أقصى قوة شد على المقطع العرضي الأصلي للعينة. تُجرى الاختبارات على عينات Type I بسماكة 5 mm وعرض 13 mm وسرعة تحميل 10 mm/min. وتُعرّف σ بأنها خاصية ميكانيكية أساسية تعكس استجابة المادة تحت التحميل الشدي حتى لحظة الفشل، يُبيِّن الشكل (2) عينة الاختبار Type I والشكل (3) جهاز اختبار الشد.

الشكل (2): عينة الاختبار Type I

الشكل (3): جهاز اختبار الشد

6.3 الاستطالة عند الكسر(%) ε

الاستطالة عند الكسر ε هي النسبة المئوية لمقدار التمدد الطولي الذي تتحمله العينة من البداية حتى لحظة الكسر، وتُعدّ من أهم مؤشرات المطيلية في المواد البوليمرية. تُقاس على العينة ذاتها في اختبار الشد وفق ASTM D638 .

6.4 صلادة Shore D

تقيس صلادة Shore D مقاومة سطح البوليمير لاختراق رأس مخروطي (Indenter) بقوة ثابتة لمدة 15 ثانية. تُجرى الاختبارات على سطح مستوٍ، يُبيّن الشكل (4) جهاز الصلادة Shore D والعينة المختبرة.

الشكل (4): جهاز الصلادة Shore D والعينة المختبرة

6.5 معامل المرونة E (MPa)

معامل المرونة E (Young's Modulus) هو مقياس صلابة المادة في منطقة التشوه المرن الخطي، ويُحسب من ميل منحنى الإجهاد– الانفعال في المنطقة الخطية.

6.6 الكثافة ρ (g/cm³)

تم قياس الكثافة بطريقة الإزاحة في الأسيتون عند 23 °C، من خلال مقارنة وزن العينة في الهواء وداخل السائل لحساب الحجم المزاح ومن ثم الكثافة بوحدة g/cm³. وتُعد الكثافة خاصية فيزيائية مهمة تُستخدم لتوصيف المادة وتقييم تجانسها وضبط الجودة والتطبيقات الصناعية، يُبيِّن الشكل (5) جهاز الكثافة.

الشكل (5): جهاز الكثافة

6.7 درجة الانصهار Tm (°C)

تُقاس درجة انصهار البوليمر بطريقة الأنبوب الشعري عبر تسخين عينة مطحونة تدريجياً في حمام زيت السيليكون وتحديد درجة الانصهار من متوسط درجتي البدء والاكتمال. وتُعد Tm خاصية حرارية تعكس استقرار الطور البلوري، وهي غير مرتبطة مباشرة بالوزن الجزيئي، لذلك تبقى شبه ثابتة حتى مع حدوث تغييرات مثل انشطار السلاسل أو إعادة التبلور طالما لم يتغير تركيب البوليمر، يُبيِّن الشكل (6) جهاز قياس درجة الانصهار.

الشكل (6): جهاز قياس درجة الانصهار

6.8 الخواص الحرارية النوعية

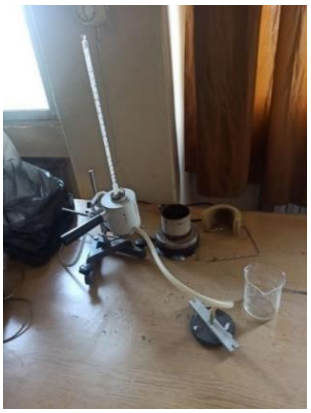
6.8.1 اختبار السعة الحرارية النوعية (Specific Heat Capacity)

تُقاس السعة الحرارية النوعية C باستخدام مسعر حراري. حيث تُسخَّن قطع صغيرة من المادة إلى درجة حرارة Θ، ثم تُغمَر داخل وعاء المسعر الذي يحتوي على كتلة m_1 من الماء المقطر عند درجة حرارة ابتدائية Θ_0 . عند الوصول إلى حالة الاتزان الحراري تصبح درجة الحرارة النهائية للنظام Θ_1. تُحسب السعة الحرارية

النوعية اعتماداً على قانون التوازن الحراري، وذلك وفق مبدأ توازن الطاقة الحرارية المتبادلة بين العينة والماء والمسعر، يُبيّن الشكل (7) الادوات التي تم استخدامها لقياس السعه الحراريه.

$$C = [(m_1 \cdot c_1 + m_2 \cdot c_2) \cdot (\Theta - \Theta_1)] / [m \cdot (\Theta_1 - \Theta_0)] \ (cal/gr \cdot °C)$$

$m_2 = 140$ gr (ثابت) ، $c_2 = 0.2$ cal/gr·°C (المسعر) ، $c_1 = 1$ cal/gr·°C (الماء)



الشكل (7): الادوات التي تم استخدامها لقياس السعة الحرارية

6.8.2 اختبار معامل التمدد الحراري الطولي

قيس معامل التمدد الحراري الخطي (α) من خلال تحديد مقدار التغير في طول العينة قبل التسخين وبعده باستخدام ميكرومتر دقيق عالي الحساسية. تم تطبيق طريقتين حراريتين مستقلتين لضمان دقة النتائج والتحقق من موثوقية القياس، وهما التسخين باستخدام بخار الماء عند فرق درجة حرارة ($\Delta T = 65$ °C)، والتسخين باستخدام مقاومات حرارية عند فرق درجة حرارة ($\Delta T = 50$ °C) ، يُحسب معامل التمدد الحراري الخطي وفق العلاقة:

$$\alpha = \Delta l / (l \cdot \Delta T) \ (°C^{-1})$$

6.8.3 اختبار الناقلية الحرارية (Thermal Conductivity)

تُقاس الناقلية الحرارية k باستخدام عينة دائرية الشكل ($d = 5$ mm،$r = 6$ cm) تُوضع في حمام حراري، يرصد حساسان رقميان 1Θ (الوجه السفلي) و2Θ (الوجه العلوي) حتى الثبات ثم يُطبَّق قانون فوريه، يُبيّن الشكل (8) الأدوات التي تم استخدامها لقياس الناقلية الحرارية.

$$k = (d \cdot V \cdot I) / (A \cdot \Delta\Theta) \ (W/m \cdot K)$$

$d = 5\times10^{-3}$ m ، $A = 0.01131$ m² ، $V = 8$V ، $I = 1.2$A ، $d \cdot V \cdot I = 0.048$ (ثابت)

الشكل (8) : الأدوات التي تم استخدامها لقياس الناقلية الحرارية

6.9 اختبار الصدم (Impact Test)

أُجري تقييم نوعي لسلوك العينات تحت الصدم، لم يتم قياس الطاقة الممتصة الفعلية أو عتبة الكسر بصورة معيارية كاملة، لذلك تقتصر النتائج على المقارنة الوصفية لآلية الفشل وأنماط الاستجابة بين المجموعات. استُخدمت كتلة ساقطة مقدارها 5 kg عند ارتفاعات تتراوح بين 0.5–2.0 m (طاقة 24.5–98.1 J)، بهدف تحديد عتبة الارتفاع الحرج الذي تبدأ عنده الشقوق بالظهور لكل تركيبة. وعينات دائرية بسماكة 5 mm وقطر 60 mm، مع ثلاث مكررات لكل مجموعة لضمان دقة النتائج، حيث استُخدمت القيم الناتجة لتقييم قدرة المادة على امتصاص الطاقة والتمييز بين السلوك الهش والمطيل، يُبيّن الشكل (9) جهاز الصدم. تعتمد طاقة الصدم على الطاقة الكامنة للجسم الساقط وفق العلاقة: $E = m \cdot g \cdot h$ **حيث: m (kg) كتلة الجسم الساقط ، $g = 9.81 m/s^2$ تسارع الجاذبية الأرضية، ارتفاع السقوط h (m)**

الشكل (9): جهاز الصدم

7. النتائج

- **المادة البِكر — مجموعة V0**

يُوضح الجدول (1) الخواص الميكانيكية والفيزيائية المقاسة لعينة 100% من المادة البِكر (0% المادة المُعاد تدويرها)، وقد جاءت متوافقةً مع القيم المرجعية في نشرة (SABIC, 2021)، مما يؤكد سلامة إجراءات التحضير والاختبار.

الجدول (1): الخواص الميكانيكية والفيزيائية للمادة البِكر (0% — V0)

العينة	MFR (g/10min)	σ (MPa)	ε (%)	Shore D	E (MPa)	ρ (g/cm³)	Tm (°C)
S1	29.5	28.7	198	67	1180	0.953	128.3
S2	30.2	29.0	201	68	1210	0.954	127.9
S3	30.8	29.3	202	68	1225	0.954	129.2
المتوسط	30.17	29.0	200	68	1205	0.954	128

- **المادة المُعاد تدويرها — مجموعة R100**

يُبيّن الجدول (2) خلطة R100 لعينة 100% من المادة المُعاد تدويرها (0% المادة البِكر) وتأثيرها على الخواص الميكانيكية والفيزيائية: ارتفاع MFR بنسبة 82.5%، انخفاض σ بنسبة 15.2%، تراجع ε من 200% إلى 65% (انخفاض 67.5%)، وارتفاع E بنسبة 18.3% والصلادة Shore بمقدار 5 وحدات.

الجدول (2): خواص المادة المُعاد تدويرها ((100% — R100

العينة	MFR (g/10min)	σ (MPa)	ε (%)	Shore D	E (MPa)	ρ (g/cm³)	Tm (°C)
S1	54.0	25.0	70	72	1400	0.962	129.1
S2	55.0	24.7	65	73	1425	0.963	128.5
S3	56.2	24.2	60	73	1450	0.964	129.4
المتوسط	55.07	24.6	65	73	1425	0.963	129

- **خلطة R10 — 10% مُعاد تدويره**

يُبيّن الجدول (3) خلطة R10 لعينة 10% من المادة المُعاد تدويرها مع 90% من المادة البِكر.

الجدول (3): خلطة R10 (10% معاد تدويره)

العينة	MFR (g/10min)	σ (MPa)	ε (%)	Shore D	E (MPa)	ρ (g/cm³)	Tm (°C)
S1	32.0	27.8	170	69	1230	0.956	126.7
S2	33.0	27.6	165	70	1250	0.957	128.3
S3	34.5	27.2	160	70	1265	0.958	127.7
المتوسط	33.17	27.5	165	70	1248	0.957	128

- **خلطة R30 — 30% مُعاد تدويره**

يُبيّن الجدول (4) خلطة R30 لعينة 30% من المادة المُعاد تدويرها مع 70% من المادة البِكر.

الجدول (4): خلطة R30 (30% مُعاد تدويره)

العينة	MFR (g/10min)	σ (MPa)	ε (%)	Shore D	E (MPa)	ρ (g/cm³)	Tm (°C)
S1	37.0	26.4	130	71	1300	0.958	128.7
S2	38.5	26.0	125	71	1320	0.959	129.3
S3	39.8	25.6	120	72	1340	0.960	128.2
المتوسط	38.43	26.0	125	71	1320	0.959	129

- **خلطة R50 — 50% مُعاد تدويره**

يُبيّن الجدول (5) خلطة R50 لعينة 50% من المادة المُعاد تدويرها مع 50% من المادة البِكر.

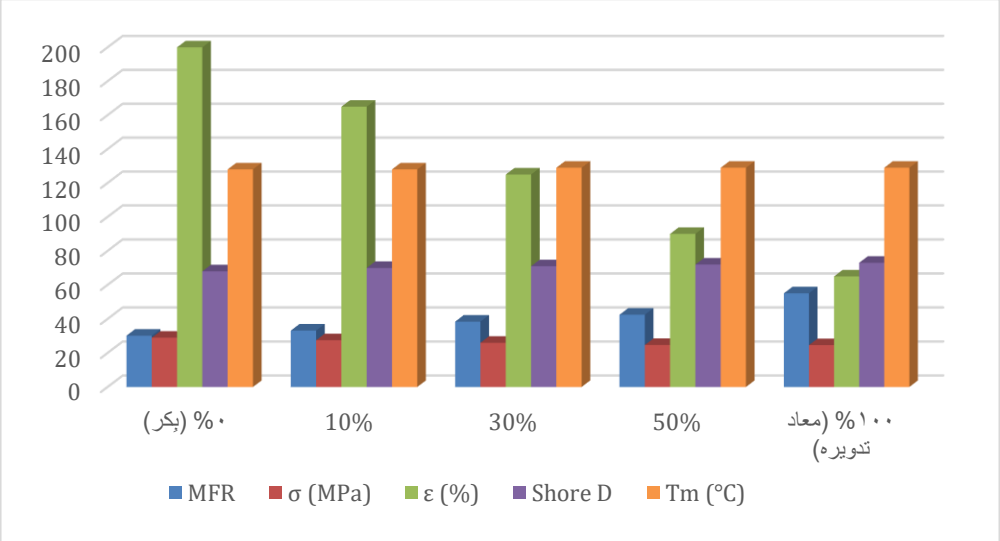
الجدول (5): خلطة R50 (50% مُعاد تدويره)

العينة	MFR (g/10min)	σ (MPa)	ε (%)	Shore D	E (MPa)	ρ (g/cm³)	Tm (°C)
S1	41.5	25.0	95	72	1360	0.958	129.4
S2	42.3	24.8	90	72	1380	0.959	129.1
S3	43.7	24.4	85	73	1400	0.960	129.1
المتوسط	42.50	24.7	90	72	1380	0.959	129

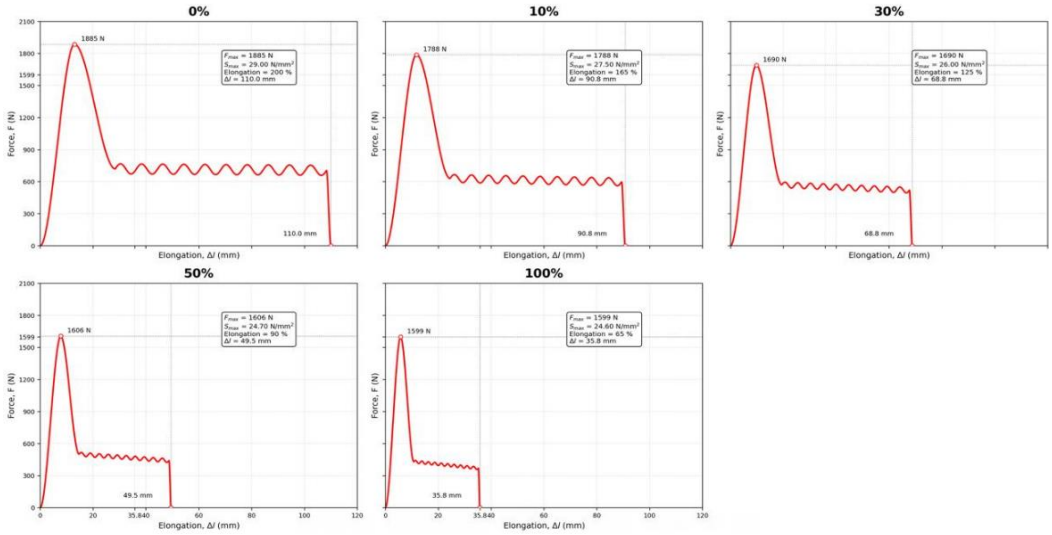
يُبيِّن الجدول (6) مقارنة شاملة لجميع مجموعات الخلط (نسبة المادة المُعاد تدويرها مع المادة البِكر). والشكل (10) يُوضح أعمدة بيانية لسلوك الخواص الميكانيكية والفيزيائية المقاسة بدلالة نسب المادة المُعاد تدويرها. كما تُظهر الأشكال (10–أ) منحنيات الشد (قوة بدلالة الاستطالة) الفروق بين السلوك القصف نسبياً والسلوك المطيلي المصحوب بمنطقة الخضوع.

الجدول (6): مقارنة شاملة لجميع مجموعات الخلط

نسبة المعاد تدويره	MFR (g/10min)	σ (MPa)	ε (%)	Shore D	E (MPa)	ρ (g/cm³)	Tm (°C)
0% بِكر	30.17	29.0	200	68	1205	0.954	128
10%	33.17	27.5	165	70	1248	0.957	128
30%	38.43	26.0	125	71	1320	0.959	129
50%	42.50	24.7	90	72	1380	0.959	129
100% معاد تدويره	55.07	24.6	65	73	1425	0.963	129



الشكل (10): منحنيات سلوك MFR ومقاومة الشد σ والاستطالة ε والصلادة Shore D والكثافة ρ بدلالة نسب المادة المعاد تدويرها



الأشكال (10–أ): منحنيات الشد.

- **الخواص الحرارية النوعية**

1. اختبار السعة الحرارية النوعية (Specific Heat Capacity)

يُبيِّن الجدول (7) البيانات الأولية لتجربة السعة الحرارية النوعية لإجراء الحسابات المطلوبة.

الجدول (7): بيانات تجربة السعة الحرارية النوعية

المعطيات	V0 (0%)	R10 (10%)	R30 (30%)	R50 (50%)	R100 (100%)
m1 كتلة الماء (gr)	50	50	44	42	45
θ0 الدرجة البدائية (°C)	22	22	23	22	22
θ درجة حرارة العينة (°C)	75	75	80	82	85
θ1 درجة التوازن (°C)	65	67	72	73	75
m كتلة العينة (gr)	12	12	13	12	12
C المحسوبة (cal/gr·°C)	1.50	1.16	0.90	1.03	1.15

2. اختبار معامل التمدد الحراري الطولي

تُبيِّن الجداول (8) (9) (10) نتائج الطريقة الأولى لقياس معامل التمدد الحراري الطولي (باستخدام بخار الماء) لعينات (V0 مادة بكر، جميع المجموعات، R100 معاد تدويرها).

الجدول (8): قياسات معامل التمدد الطولي (بخار الماء) — V0مادة بكر

القياس	l_1 (mm)	l_2 (mm)	l_3 (mm)
قبل التسخين	4.96	4.93	4.91
بعد التسخين	5.01	4.97	4.96
Δl (mm)	0.05	0.04	0.05
α_i ($\times 10^{-5}$ °C^{-1})	15.7	12.5	15.5

المتوسط $\bar{\alpha}V0 = 14.70 \times 10^{-5}$ °C^{-1}

الجدول (9): معامل التمدد الطولي (بخار الماء) — جميع المجموعات

القياس	V0 (0%)	R10 (10%)	R30 (30%)	R50 (50%)
l(mm) قبل التسخين	4.95	4.95	4.96	4.96
Δl (mm) متوسط	0.047	0.036	0.025	0.029
ΔT (°C)	65	65	65	65
ᾱ (×10⁻⁵ °C⁻¹)	14.70	10.97	7.75	8.79

الجدول (10): قياسات التمدد الطولي (بخار الماء) — 100R (مادة معاد تدويرها)

القياس	l_1 (mm)	l_2 (mm)	l_3 (mm)
قبل التسخين	4.97	4.95	4.96
بعد التسخين	5.00	4.98	5.00
Δl (mm)	0.03	0.03	0.04
α_i (×10⁻⁵ °C⁻¹)	12.4	9.32	9.29

المتوسط $\bar{\alpha}R100 = (12.4 + 9.32 + 9.29) / 3 = 10.34 \times 10^{-5}\ °C^{-1}$

يُبيِّن الجدول (11) نتائج الطريقة الثانية لقياس معامل التمدد الحراري الطولي (باستخدام المقاومات الحرارية)

الجدول (11): معامل التمدد الطولي (المقاومات الحرارية)

القياس	V0 (0%)	R10 (10%)	R30 (30%)	R50 (50%)
Δlمتوسط(mm)	0.023	0.030	0.033	0.035
ΔT (°C)	50	50	50	50
ᾱ (×10⁻⁵ °C⁻¹)	9.44	12.10	13.40	14.17

$V0: \bar{\alpha} = 9.44 \times 10^{-5}\ °C^{-1}$
$R10: \bar{\alpha} = 12.10 \times 10^{-5}\ °C^{-1}$
$R30: \bar{\alpha} = 13.40 \times 10^{-5}\ °C^{-1}$
$R50: \bar{\alpha} = 14.17 \times 10^{-5}\ °C^{-1}$
$R100: \bar{\alpha} = 14.78 \times 10^{-5}\ °C^{-1}$

حساب الخطأ

$\Delta\alpha/\alpha = \Delta(\Delta l)/\Delta l + \Delta l/l + \Delta(\Delta T)/\Delta T$ تطبيقاً على 0V (الطريقة الأولى)

$\Delta\alpha/\alpha = 0.005/0.047 + 0.005/4.95 + 0.5/65 = 0.106 + 0.001 + 0.008 = 0.115$

$\Delta\alpha = 0.115 \times 14.70 \times 10^{-5} = 1.69 \times 10^{-5}\ °C^{-1}$

$\alpha V0 = (14.70 \pm 1.69) \times 10^{-5}\ °C^{-1}$

3. اختبار الناقلية الحرارية (Thermal Conductivity)

يُبيِّن الجدول (12) بيانات تطور درجات الحرارة لعينة V0 مادة بكر والجدول (13) الناقلية الحرارية لجميع المجموعات بعد القيام بالعمليات الحسابية اللازمة

الجدول (12): تطور درجات الحرارة — 0V مادة بكر

t (min)	0	5	10	15	20	30
θ_1السفلي(°C)	22.2	29.0	44.5	57.1	63.2	66.5
θ_2العلوي(°C)	26.0	26.5	28.1	30.8	33.5	36.7

t (min)	0	5	10	15	20	30
Δθ (°C)	−3.8	2.5	16.4	26.3	29.7	29.8

$$kV0 = 0.048 / (0.01131 \times 29.8) = 0.146\ W/m\cdot K$$

عند الزمن ($t = 30$ دقيقة): $\theta_1 = 66.5\ °C$، $\theta_2 = 36.7\ °C$، $\Delta\theta = 29.8\ °C$

حسابات جميع المجموعات $k\ R10 = 0.141\ W/m\cdot K$

$$k\ R30 = 0.136\ W/m\cdot K$$
$$k\ R50 = 0.137\ W/m\cdot K$$
$$k\ R100 = 0.137\ W/m\cdot K$$

الجدول (13): الناقلية الحرارية — جميع المجموعات

المجموعة	V0 (0%)	R10 (10%)	R30 (30%)	R50 (50%)	R100 (100%)
Δθ عند الثبات (°C)	29.8	30.4	31.2	31.6	31.8
k (W/m·K)	0.146	0.141	0.136	0.137	0.137

حساب الخطأ

$$\Delta k/k = 0.001 + 0.006 + 0.042 + 2\times0.083 + 0.016 = 0.231$$
$$\Delta k = 0.231 \times 0.137 = 0.032 \rightarrow k \approx 0.137 \pm 0.03\ W/m\cdot K$$

يُبيّن الجدول (14) ملخصاً شاملاً لقيم الخواص الحرارية النوعية C وk وα لجميع المجموعات.

الجدول (14): الخواص الحرارية النوعية

نسبة المعاد تدويره	C (cal/g·°C)	k (W/m·K)	ᾱ بخار ماء ($\times10^{-5}$)	ᾱ مقاومات ($\times10^{-5}$)
0%	1.50	0.146	14.70	9.44
10% — R10	1.16	0.141	10.97	12.10
30% — R30	0.90	0.136	7.75	13.40
50% — R50	1.03	0.137	8.79	14.17
100% — R100	1.15	0.137	10.34	14.78

- **اختبار الصدم (Impact Test)**

يُبيّن الجدول (15) حساب طاقة الصدم المُطبَّقة عند ارتفاعات مختلفة ($m = 5\ kg$، $g = 9.81\ m/s^2$)

الجدول :(15) طاقة الصدم

الارتفاع h (m)	0.5	1.0	1.5	2.0
طاقة الصدم E (J)	24.5	49.1	73.6	98.1

تمّ ملاحظة الفوارق التالية عند الارتفاع الأقصى ($h = 2.0\ m$، $E \approx 98.1\ J$):

V0 (مادة بكر): لا يوجد تشوه ظاهر، استرداد مرن كامل تقريباً.

R10 وR30: انبعاج سطحي طفيف عند نقطة التماس، لا يوجد تشقق.

R50: ظهور مناطق بيضاء (Stress Whitening) حول نقطة الصدم.

R100: انبعاج أوضح مع مناطق بيضاء أوسع وبداية تشققات دقيقة على الحافة في بعض العينات.

8. محاكاة اختبار الشد

8.1 نظرة عامة وأهداف المحاكاة

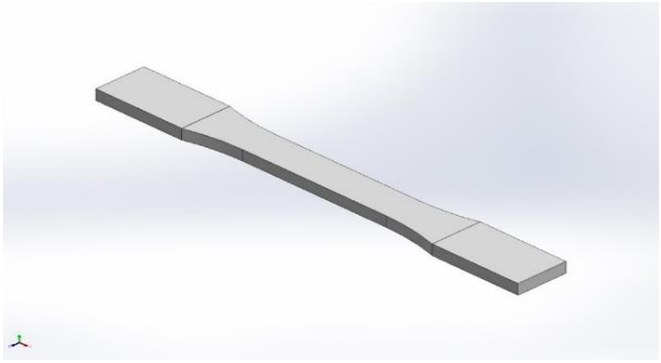
أُجريت محاكاة عددية لاختبار الشد الميكانيكي الاستاتيكي باستخدام برنامجَي SolidWorks Simulation وCOMSOL Multiphysics، وذلك بهدف مقارنة النتائج العددية بالنتائج التجريبية وإضافة بُعد رقمي يُوضح توزع الإجهاد والاستطالة في عينات HDPE المصنّعة بالقولبة بالحقن. تهدف هذه المحاكاة إلى تقييم مدى توافق النتائج العددية مع النتائج التجريبية وتعزيز استخدام النماذج العددية في الدراسات الأوسع للخواص الميكانيكية.

8.2 المنهجية العددية

- الهندسة: استيراد نموذج ASTM D638 Type I بصيغة STEP
- شروط الحدود: تثبيت أحد الطرفين وتطبيق حمل محوري على الطرف الآخر
- نموذج المادة: المرونة الخطية مع قيم معامل يونغ المقاسة تجريبياً لكل مجموعة
- استراتيجية الشبكة: شبكة تلقائية بعناصر رباعية السطوح (Standard Mesh) في SolidWorks Simulation بدقة متوسطة، مع تكثيف تلقائي عند مناطق الانتقال الهندسي في العينة.

8.3 المحاكاة باستخدام SolidWorks Simulation

تمّ استخدام برنامج SolidWorks Simulation لمحاكاة اختبار الشد أحادي المحور لعينات HDPE (Zhang, 2017)، اعتماداً على الخواص الميكانيكية المقاسة تجريبياً (معامل يونغ، مقاومة الشد، والاستطالة) ويُبيّن الشكل (11) نموذج عينة الشد SolidWorks (Type I) .



الشكل (11): نموذج عينة الشد Type I SolidWorks

8.3.1 توزع الإجهادات (Von Mises Stress)

أظهرت النتائج تركّز أعلى قيم الإجهاد في المنطقة الوسطى من العينة، وهو ما يتوافق مع موضع الكسر الفعلي المُلاحَظ تجريبياً، مما يؤكد أن هندسة العينة المصنَّعة بالحقن تُولِّد توزع إجهاد متوقع في المجال المرن، ويدعم موثوقية الخواص الميكانيكية المقاسة، كما يُؤكد هذا التوافق أن عينات الشد المصنَّعة بالحقن تتمتع بهندسة سليمة تُنتج توزع إجهاد متجانس، مما يُعزز موثوقية نتائج الخواص الميكانيكية المقاسة في المجال المرن.

8.3.2 توزع الانفعالات

بيّنت خرائط الانفعال أن القيم القصوى تتركز أيضاً في منتصف العينة مع تدرج منتظم نحو مناطق التثبيت، دون ظهور تركّزات غير واقعية، مما يعكس صحة شروط التثبيت والتحميل في النموذج.

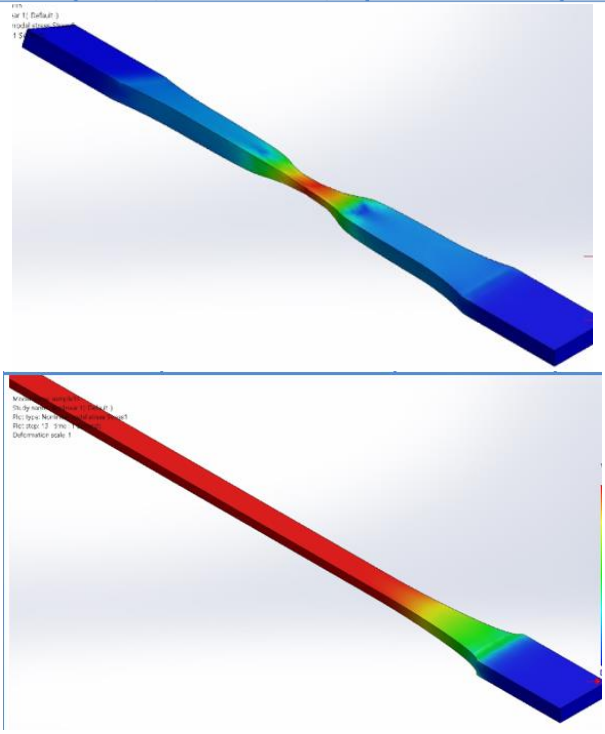
8.3.3 التنبؤ بموقع الإجهاد الأقصى

أظهرت جميع الحالات تطابقاً مكانياً بين منطقة تركّز الإجهاد في النموذج العددي ومنطقة الانكسار التجريبي، حيث تركّز الإجهاد الأقصى في منتصف العينة في كلتا الحالتين. تجدر الإشارة إلى أن هذا التطابق المكاني مقتصر على توزع الإجهاد في النطاق المرن الأولي، ولا يُعدّ تنبؤاً بآلية الكسر أو سلوك الكسر النهائي الذي يتطلب نمذجة اللدونة غير الخطية، حيث يُبيّن الشكل (12) توزع الإجهاد والانفعال على عينة الشد Type I −SolidWorks Simulation .

Study Results

Name	Type	Min	Max
Stress1	VON: von Mises Stress at Step No: 2609(4.19328e-317 Seconds)	1.326e+01 N/mm² Node: 5485	2.76e+01 N/mm² Node: 9472

Name	Type	Min	Max
Strain1	ESTRN: Equivalent Strain at Step No: 2609(4.19423e-317 Seconds)	1.03e+00 Element: 6576	1.85e+00 Element: 7282



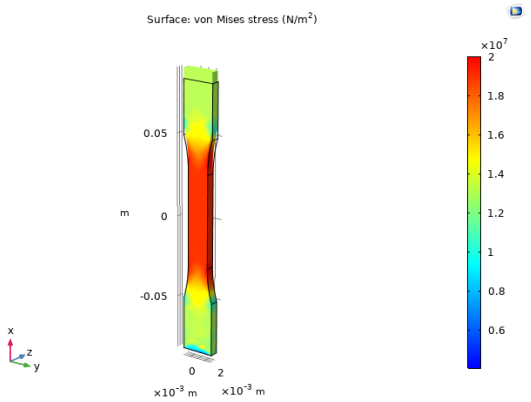
الشكل (12): توزع الإجهاد والانفعال على عينة الشد Type I- SolidWorks Simulation

8.4 نتائج المحاكاة باستخدام COMSOL Multiphysics

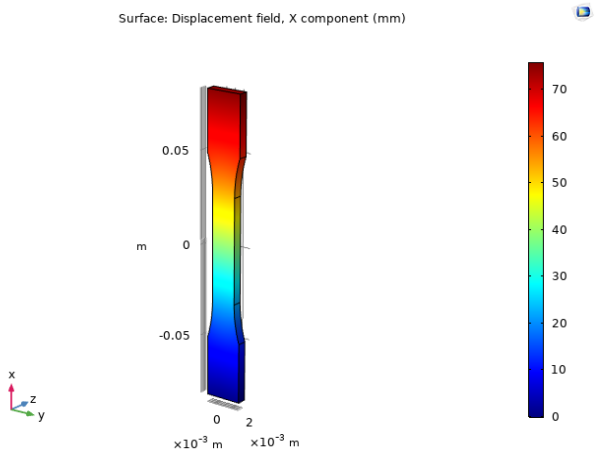
تمّ إجراء محاكاة عددية لاختبار الشد أحادي المحور باستخدام برنامج COMSOL Multiphysics بهدف التحقق المتقاطع من النتائج وتوفير توزع ثلاثي الأبعاد لحقول الإجهاد والانفعال.

8.4.1 حقول الإجهاد والانفعال ثلاثية الأبعاد

أظهر التحليل ثلاثي الأبعاد توزعاً منتظماً للإجهاد والانفعال، مع تركّز القيم القصوى في المنطقة الوسطية للعينة، بما يتوافق مع نتائج SolidWorks والنتائج التجريبية، تُبيّن الأشكال (13) (14) توزع الإجهاد والانفعال على عينة الشد COMSOL Multiphysics



الشكل (13): توزع الإجهاد على عينة الشد COMSOL Multiphysics



الشكل (14): توزع الاستطالة على عينة الشد COMSOL Multiphysics

8.4.2 المقارنة مع نتائج SolidWorks

أظهر التحقق المتقاطع بين الأداتين توافقاً جيداً في القيم القصوى ونمط التوزيع المكاني، مما يعزز موثوقية كلا النموذجين ويقلل احتمالية الأخطاء العددية المنهجية.

8.5 المقارنة بين النتائج التجريبية والعددية

أظهرت المقارنة توافقاً جيداً بين القيم العددية والتجريبية، حيث لم تتجاوز نسبة الفرق في الإجهاد 5.8%، الانفعال 10.4%، وهي قيم مقبولة أكاديمياً في سياق محاكاة مواد بوليمرية ذات سلوك لدن معقد يُلخِّص الجدول (16) مقارنةَ نتائج محاكاة SolidWorks Simulation مع النتائج التجريبية لكلٍّ من الإجهاد والانفعال.

الجدول (16): المقارنة لكلٍ من المادة البِكر وخلطة 30% المعاد تدويرها، وهما الحالتان اللتان أُجريت عليهما المحاكاة العددية.

الحالة	σ_exp (MPa)	σ_sim (MPa)	الفرق%	ε_exp %	ε_sim %	الفرق%
HDPE بِكر	29.0	27.6	4.8	200	185	7.5
HDPE 30% معاد تدويره	26.0	24.5	5.8	125	112	10.4

8.6 مناقشة الفوارق بين النتائج التجريبية والعددية

اقتصر التحقق العددي على تمثيل الاستجابة المرنة الأولية وتوزع الإجهادات في المنطقة الخطية، ولا يُعدّ نموذجاً تنبؤياً لسلوك اللدونة أو الكسر النهائي. وتجدر الإشارة إلى أن مقاومة الشد (σ) تُقاس تجريبياً وهي فعلاً من ضمن السلوك اللدن، غير أن المحاكاة العددية في هذه الدراسة اقتصرت على المجال المرن الخطي بهدف التحقق من توزع الإجهاد وتحديد موضع تركّزه، دون ادعاء نمذجة السلوك اللدن أو التنبؤ بقيمة مقاومة الشد عددياً. وبالتالي فإن مقاومة الشد المُدرجة في جدول المقارنة (16) هي قيمة تجريبية مقاسة مباشرة، وليست ناتجاً من النموذج العددي. تعود الفوارق المحدودة بين النتائج العددية والتجريبية إلى جملة من العوامل المنهجية، أبرزها:

- افتراض تجانس المادة في النموذج العددي، في حين تُظهر العينات الفعلية عدم انتظام بنيوي لا سيما في المواد المعاد تدويرها.
- إهمال العيوب المجهرية (المسامية، الشقوق الدقيقة) التي تؤثر على مقاومة الشد الفعلية.
- عدم نمذجة السلوك اللدن المتقدم (Nonlinear Plasticity) بشكل كامل، إذ اقتصر النموذج على المرونة الخطية.
- التباين في خصائص العينات المعاد تدويرها نتيجة التدهور الحراري والميكانيكي المتراكم.
- تجدر الإشارة إلى أن هذه الفوارق تعكس قيوداً في النمذجة وليس خطأً في النتائج التجريبية، التي تبقى المرجع الأساسي للتحليل.

8.7 حدود المحاكاة ونطاق التحقق

اقتصر توظيف المحاكاة العددية في هذه الدراسة على مقارنة النتائج العددية بالنتائج التجريبية وتوفير بُعد رقمي داعم (Numerical Comparison) ، ولم يُستخدم للتنبؤ بالسلوك المستقبلي أو تحسين الخواص الميكانيكية. وتتمثل الحدود الرئيسية في:

- اقتصر النموذج على المرونة الخطية دون تضمين مرحلة اللدونة أو الكسر
- عدم محاكاة تأثيرات التصنيع (الإجهادات المتبقية من القولبة بالحقن)
- إهمال التأثيرات الحرارية وظروف الرطوبة أثناء الاختبار

بناءً على ذلك، تُعطى الأولوية في التحليل والاستنتاجات للنتائج التجريبية المقاسة مباشرة، فيما تُوظَّف النتائج العددية بوصفها أداة تحقق داعمة.

9. المناقشة

1. معدل التدفق الانصهاري MFR

يرتفع MFR بصورة تدريجية وشبه خطية من 30.17 إلى 55.07 g/10min (+82.5%) مع زيادة نسبة البوليمر المعاد تدويره، يُعزى هذا إلى انخفاض الوزن الجزيئي الناجم عن انشطار السلاسل (Thakur & Amare, 2019; Huang & Peng, 2021). وتجدر الإشارة إلى أن بيانات الجدول (6) تُظهر أن هذه العلاقة تقترب من الخطية عبر نطاق الخلط الكامل، مما يجعلها مؤشراً موثوقاً لتتبع درجة التدهور. يتوافق هذا مع نتائج (Thakur & Amare, 2019) والتوجه الخطي الذي وثّقه (Huang & Peng, 2021; Dimas, 2020).

2. مقاومة الشد والاستطالة عند الكسر

مع زيادة نسبة البوليمير المعاد تدوير تتراجع σ من 29.0 إلى 24.6 MPa (-15.2%) و ε من 200% إلى65% (-67.5%) تراجع ε أسرع بكثير من σ، هذا النمط يتوافق مع ما وثّقته Yin وآخرون (Yin et al., 2015). خلطة R30 تُبقي على 89.7% من σ و62.5% من ε

3. معامل المرونة والصلادة Shore D

يرتفع E (+18.2%) والصلادة Shore D (من 68 إلى73) بسبب التبلور الثانوي، السلاسل القصيرة تنتظم في مشابك بلورية إضافية رافعةً صلابة الطور البلوري (Vidakis et al., 2021; Alzerreca et al., 2015؛ سعيد، 2011؛ جمهور، 2023).

4. الكثافة ودرجة الانصهار

ترتفع الكثافة (0.954 → 0.963 g/cm³) بما يتوافق مع حدوث التبلور الثانوي، بينما تبقى درجة الانصهار (Tm) ثابتة ضمن المجال (128–129°C) ، مما يؤكد عدم تغيّر نوع الطور البلوري.

5. الخواص الحرارية النوعية

تُظهر الناقلية الحرارية k ثباتاً ملحوظاً عبر نطاق الخلط (0.136–0.146 W/m·K)، مع تغير لا يتجاوز 7% وهو ضمن هامش الخطأ التجريبي 23%. كما تتراوح قيم السعة الحرارية النوعية C بين (0.90 – 1.50 cal/gr·°C)، ويُعزى هذا التباين إلى حساسية القياس التجريبي واختلاف كتلة العينات وتأثيرات المسعر. أما معامل التمدد الحراري α فقد تراوح بين (7.23 – 14.78 × 10^{-5} $°C^{-1}$) تبعاً لطريقة القياس المستخدمة.

بشكل عام، أظهرت الناقلية الحرارية تغيراً محدوداً ضمن هامش الخطأ التجريبي، في حين أظهرت السعة تشتتاً ملحوظاً يُرجَّح أنه يعكس حساسية هذه الخواص لمنهجية القياس وحدود الأجهزة المستخدمة. لذلك لا يمكن اعتبار جميع الخواص الحرارية مستقرة بالدرجة ذاتها ويتوافق ثبات k و Tm مع ما ورد في الدراسات (Alzerreca et al., 2015) و (Chariyachotilert et al., 2022) مما يدعم فرضية سيطرة التأثيرات البنيوية

(تقصير السلاسل وإعادة التبلور) على السلوك الميكانيكي الملاحظ، مع الإشارة إلى احتمال حدوث أكسدة حرارية محدودة.

6. تأثير طاقة الصدم

تتوافق نتائج اختبار الصدم مع الأدبيات العلمية التي تشير إلى أن HDPE يحتفظ بمقاومة صدم جيدة نسبياً حتى بعد إعادة التدوير، وذلك لأن انخفاض طول السلاسل الجزيئية يؤثر بشكل أوضح على (ε) مقارنة بمقاومة الصدم التي يتم تقييمها من خلال الحمل والاستجابة السريعين. وتعتمد مقاومة الصدم الجيدة أساساً على قدرة المادة على امتصاص الطاقة خلال زمن قصير جداً، وهي خاصية ناتجة عن البنية شبه البلورية (Semi-crystalline) التي تسمح بحدوث تشوه لدن قبل الكسر. كما أن حدوث ظاهرة التشقق الدقيق ومناطق الابيضاض الناتج عن الإجهاد Stress Whitening في عينات R50 وR100 يشير إلى بداية آليات الفشل المرتبطة بتفكك التشقق في الطور غير المتبلور (Crazing)، والتي تمثل مرحلة تمهيدية للكسر النهائي. من الناحية التجريبية، لم تُظهر العينات تغيرات بصرية ملحوظة حتى R50 عند طاقة صدم تصل إلى 73.6 J، بينما بدأت علامات الابيضاض الناتج عن الإجهاد Stress Whitening والتشققات الدقيقة بالظهور في R100 عند ارتفاع سقوط h = 2.0 m

7. نتائج المحاكاة

أظهرت المحاكاة توزيعاً منتظماً للإجهاد (في تزايده باتجاه وسط العينة) مع تركزه الأقصى في منطقة العنق، متوافقاً مع موضع الكسر الفعلي. بلغ الفرق في الإجهاد أقل من 5.8%، بينما بلغ الفرق في الانفعال حتى 10.4%، وهي قيم مقبولة ضمن حدود النمذجة الخطية لمواد بوليمرية. يُشار إلى أن مقارنة انفعال المحاكاة بالاستطالة عند الكسر تجريبياً محدودة الأثر نظراً لعدم نمذجة سلوك اللدونة.

8. التوافق مع الدراسات المرجعية

تُشير النتائج إلى توافق عام مع المنظومة الأدبية: ارتفاع MFR (Thakur & Amare, 2019; Huang & Peng, 2021)، تراجع ε (الاستطالة عند الكسر) الأسرع من σ (مقاومة الشد) (Yin et al., 2015)، ثبات Tm (Oblak et al., 2015)، وثبات k الذي يدعم فرضية سيطرة التأثيرات البنيوية على التغيرات المقاسة (Alzerreca et al., 2015; Oblak et al., 2015).

- **التوافق مع دراسات معدل التدفق الانصهاري (MFR)**

يتوافق ارتفاع MFR في هذه الدراسة من 30.17 إلى 55.07 g/10min (+82.5%) توافقاً وثيقاً مع ما وثّقه (Thakur & Amare, 2019) الذين أكّدوا أن MFR يرتفع بصورة شبه خطية مع دورات إعادة التدوير، نتيجة تقصير السلاسل البوليمرية (Chain Scission) وانخفاض الوزن الجزيئي. كما يتوافق مع نتائج (Huang & Peng, 2021) الذين رصدوا تضاعف MFR بعد خمس دورات متتالية.

- **التوافق مع دراسات مقاومة الشد والاستطالة**

يتفق نمط تراجع مقاومة الشد σ (−15.2%) والاستطالة ε (−67.5%) مع ما رصده Yin وآخرون (Yin et al., 2015) الذين أثبتوا أن ε تنخفض بمعدل أسرع بكثير من σ في HDPE المُعاد تدويره، كذلك

يتوافق مع Zhang وآخرون (Zhang et al., 2023a) وجدوا في دراستهم الشاملة على خلطات rHDPE/vHDPE أن كلاً من مقاومة الشد ومعامل المرونة تتحسن مع زيادة محتوى المادة البِكر، وأن نسبة 30% من المادة المعاد تدويرها تمثّل نقطة توازن مقبولة. وتتطابق نسبة الاحتفاظ بالخواص لدينا عند 30R (89.7% من σ) مع النطاق الذي حدّده Chariyachotilert وآخرون (Chariyachotilert et al., 2022) والذي تتراوح فيه خلطات 50% بِكر وما فوقها بين 85–95% من خواص المادة الأصلية.

❖ **التوافق مع دراسات معامل المرونة والصلادة**

يتوافق ارتفاع معامل المرونة E (+18.2%) وصلادة Shore D (من68 إلى73) مع ما أكّده Oblak وآخرون (Oblak et al., 2015)من أن التدوير يؤدي إلى تبلور ثانوي تنتظم فيه السلاسل القصيرة الناتجة عن انشطار السلاسل في مشابك بلورية جديدة، رافعةً بذلك صلابة الطور البلوري. ويتفق هذا الارتفاع أيضاً مع Goupil وآخرون (Goupil et al., 2023) الذين رصدوا ظاهرة مماثلة في HDPE عبر دورات إعادة تدوير متسلسلة.

❖ **التوافق مع دراسات درجة الانصهار والخواص الحرارية**

ثبات درجة الانصهار (128–129°C) Tm عبر جميع مجموعات الخلط يتوافق تماماً مع نتائج Oblak وآخرون (Oblak et al., 2015)الذين أكّدوا أن إعادة التدوير لا تُغيّر درجة انصهار HDPE ما لم يطرأ تحوّل كيميائي جذري على الوحدة المتكررة. ويتفق أيضاً مع Alzerreca وآخرون (Alzerreca et al., 2015) الذين وثّقوا ثبات Tm في HDPE أنابيب الصرف الصحي حتى بعد إعادة المعالجة المتكررة. أما ثبات الناقلية الحرارية k (0.136–0.146 W/m·K) فيتوافق مع التوجه الذي رصده Oblak وآخرون (Oblak et al., 2015).

❖ **التوافق مع الإطار النظري لآليات التدهور**

على الصعيد النظري، يتوافق مجمل نتائجنا مع دراسة Fayolle وآخرون (Fayolle et al., 2008) بشأن آلية انشطار السلاسل في PE. كذلك يُعزِّز نتائجنا ما توصّل إليه Vidakis وآخرون (Vidakis et al., 2021) من أن HDPE يحتفظ بخصائص ميكانيكية مقبولة حتى الدورة الخامسة من إعادة التدوير، إذ تُمثّل دراستنا دورةً واحدة فقط (تقادم + طحن) مما يُبرِّر مستويات الاحتفاظ العالية التي رصدناها لدى خلطات 10R و30R

❖ **ما تنفرد به هذه الدراسة مقارنةً بالأدبيات**

في حين تناولت معظم الدراسات السابقة (Thakur & Amare, 2019; Awad et al., 2019; Yin et al., 2015; Vidakis et al., 2021) إعادة التدوير الميكانيكي المجردة دون تقادم حراري مُسبَق، تجمع هذه الدراسة بين الأثرين معاً مقدِّمةً قاعدة بيانات خمسية المستويات (0–10–30–50–100%) مدعومةً بقياس ثلاث خواص حرارية نوعية وتحقق عددي بأداتين مستقلتين. وهذا ما يُتيح مقارنة أكثر دقةً مع الأدبيات.

10 . الاستنتاجات والتوصيات

1. التقادم الحراري (240 ساعة عند 100 °C) يُحدث تدهوراً ريولوجياً وميكانيكياً واضحاً
2. تتغير جميع الخواص الميكانيكية والريولوجية بصورة تدريجية ومنتظمة (0–100%)
3. نسبة R30 هي نقطة التوازن المثلى: 89.7% من σ، 62.5% من ε، و MFR = 38.43 g/10min مقبول لمعظم تطبيقات الحقن الصناعي.
4. أظهرت الناقلية الحرارية (k) ثباتاً ملحوظاً عبر نطاق الخلط، في حين أظهرت السعة الحرارية (C) ومعامل التمدد الحراري (α) تشتتاً يستوجب التحقق بأجهزة معيارية، ومجمل نتائج (C، k، α) يدعم فرضية سيطرة التأثيرات البنيوية المورفولوجية.
5. التحقق العددي بـ SolidWorks وCOMSOL أكّد صحة توزيع الإجهاد في النطاق المرن بفارق لا يتجاوز 5.8% في الإجهاد و10.4% في الانفعال.
6. الخلطات حتى R30 مناسبة للتطبيقات غير الحرجة، لا يُنصح بتجاوز 50% في التطبيقات ذات ε > 100% أو الأحمال الديناميكية.
7. التقادم الحراري يُضخِّم أثر إعادة التدوير الميكانيكي على MFR وε بصورة تراكمية.
8. ثبات درجة الانصهار (Tm) عبر جميع نسب الخلط يُؤكد بصورة مباشرة أن التدهور الناجم عن التقادم الحراري وإعادة التدوير ذو طابع بنيوي بحت ولا يمس الهوية الكيميائية للوحدة المتكررة.
9. يُسهم الجمع بين التقادم الحراري الموثَّق وإعادة التدوير الميكانيكي وقياس الخواص الحرارية النوعية فجوةً صريحة في الأدبيات أشار إليها Zhang وآخرين (Zhang et al., 2023a) الذين نوّهوا إلى غياب بيانات التقادم الحراري من دراستهم الشاملة.

المراجع

Ahmed, R., Zubair, M., Alqarni, M. A., Alzahrani, S. M., & Sajid, M. (2024). **Effect of Injection Molding Process Parameters on Mechanical Properties.** Processes, 11(2), 414.

Alzerreca, M., Paris, M., Boyron, O., Orditz, D., Louarn, G., & Correc, O. (2015). **Mechanical Properties and Molecular Structures of Virgin and Recycled HDPE Polymers Used in Gravity Sewer Systems.** Polymer Testing, 46, 1–8. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2015.06.012

ASTM International. (2004). **ASTM D1238-04: Standard Test Method for Melt Flow Rates of Thermoplastics.** ASTM International.

ASTM International. (2022a). **ASTM D638-22: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics.** ASTM International.

ASTM International. (2022b). **ASTM D2240-15(2021): Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness.** ASTM International.

Awad, A. H., Elgamsy, R., & Abdellatif, M. H. (2019). **Mechanical and Physical Properties of PP and HDPE.** Journal of Engineering Sciences, 47(4), 552–568.

Chariyachotilert, S., Kooudomrut, N., & Rittisith, W. (2022). **Evaluation of Tensile and Flexural Strength Properties of Virgin and Recycled High-Density Polyethylene** (HDPE) **for Pipe Fitting Application.** Materials Today: Proceedings, 56, 2208–2213. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.202

Cruz, F., Lanza, S., Boudaoud, H., Hoppe, S., & Camargo, M. (2017). **Polymer Recycling and Additive Manufacturing in an Open-Source Context.** Resources, Conservation and Recycling, 127, 37–48.

Diby, I. C. P., Belkhiri, N., Nohair, B., Kazeruni, M., Ruiz, E., & Kaliaguine, S. (2025). **HDPE Crystalline Lamellae in Composites Involving Pyrolytic Carbon Black: Effect on Elastic Modulus.** Polymer Composites. https://doi.org/10.1002/pc.28986

Dimas, E. (2020). **The Effect of Recycling Frequency on the Melt Flow Rate.** Polymer Engineering & Science, 60(5), 1151–1159.

Fayolle, B., Colin, X., Audouin, L., & Verdu, J. (2007). **Mechanism of Degradation Induced Embrittlement in Polyethylene.** Polymer Degradation and Stability, 92(2), 231–238.

Fayolle, B., Richaud, E., Colin, X., & Verdu, J. (2008). **Review: Degradation-Induced Embrittlement in Semi-Crystalline Polymers Having Their Amorphous Phase in Rubbery State.** Journal of Materials Science, 43, 6999–7012. https://doi.org/10.1007/s10853-008-2847-3

Goupil, G., Balieu, R., Kari, L., & Starkman, B. (2023). **Degradation Indicators in Multiple Recycling Processing Loops of Impact Polypropylene and High-Density Polyethylene.** Polymer Degradation and Stability, 217, 110366.

Hinczica, J., Li, X., Ma, C., & Zhang, Z. (2022). **Influence of Recyclates on Mechanical Properties.** Polymer Testing, 105, 107416.

Huang, P.-W., & Peng, H.-S. (2021). **Number of Times Recycled and Its Effect on the Recyclability, Fluidity and Tensile Properties of Polypropylene Injection Molded Parts.** Sustainability, 13, 11085.

Krantz, J., Nieduzak, Z., Kazmer, E., Licata, J., Ferki, O., Gao, P., Sobkowicz, M. J., & Masato, D. (2023). **Investigation of Pressure-Controlled Injection Molding on Recycled HDPE.** Sustainable Materials and Technologies, 36, e00651.

Oblak, P., Gonzalez-Gutierrez, J., Zupancic, B., Aulova, A., & Emri, I. (2015). **Processability and Mechanical Properties of Extensively Recycled High Density Polyethylene.** Polymer Degradation and Stability, 114, 133–145.

Pinheiro, L. A., Chinelatto, M. A., & Canevarolo, S. V. (2004). **The Role of Chain Scission and Chain Branching in High Density Polyethylene during Thermo-Mechanical Degradation.** Polymer Degradation and Stability, 86(3), 445–453.

SABIC. (2021). **Technical Datasheet: SABIC® HDPE M300054.** SABIC, Riyadh, Saudi Arabia.

Spychała, M. J., Latko-Durałek, P., Miedzińska, D., Sałasińska, K., Cetnar, I., Popławski, A., & Boczkowska, A. (2024). **Structural and Mechanical Properties of Recycled HDPE with Milled GFRP as a Filler.** Materials, 17(23), 5875.

Thakur, A., & Amare, T. (2019). **Melt Flow Rate Study of Recycled High-Density Polyethylene.** International Journal of Scientific Research, 8(4), 12–16.

Van Gisbergen, J. (2018). **Investigation into the Mechanical Recycling of Plastics.** Bachelor's Thesis, Fontys University of Applied Sciences.

Vidakis, N., Petousis, M., & Maniadi, A. (2021). **Sustainable Additive Manufacturing: Mechanical Response of High-Density Polyethylene over Multiple Recycling Processes.** Recycling, 6(1), 4.

Yin, S., Tuladhar, R., Shi, F., Shanks, R. A., Combe, M., & Collister, T. (2015). **Mechanical Reprocessing of Polyolefin Waste: A Review.** Polymer Engineering & Science, 55(12), 2899–2909.

Zeng, S., Lu, D., & Yang, R. (2024). **Effects of Crystallinity and Branched Chain on Thermal Degradation of Polyethylene: A SCC-DFTB Molecular Dynamics Study.** Polymers, 16(21), 3038.

Zhang, Y. (2017). **Application of SolidWorks Plastic in Mechanical Engineering Training.** Journal of Physics: Conference Series.

Zhang, J., Hirschberg, V., & Rodrigue, D. (2023a). **Blending Recycled High-Density Polyethylene (rHDPE) with Virgin (vHDPE) as an Effective Approach to Improve the Mechanical Properties.** Recycling, 8(1), 2.

Zhang, W., Shen, J., Guo, X., Wang, K., Jia, J., Zhao, J., & Zhang, J. (2024). **Comprehensive Investigation into the Impact of Degradation of Recycled Polyethylene and Recycled Polypropylene on the Thermo-Mechanical Characteristics and Thermal Stability of Blends.** Molecules, 29(18), 4499.

جمهور، هناء. (2023). **دراسة سلوك صلادة المواد المركبة من البولي إيثيلين عالي الكثافة.** مجلة جامعة سبها للعلوم البحتة والتطبيقية، طرابلس.

سعيد، أريج رياض. (2011). **دراسة الخصائص الميكانيكية لمتراكبات البولي إيثيلين المدعَّم بدقائق مسحوق الصدف.** مجلة الهندسة والتكنولوجيا، الجامعة التكنولوجية — بغداد.