

تأثير المعالجة الحرارية ووسيط التبريد على بعض الخواص الميكانيكية لأنابيب البولي إيثيلين عالي الكثافة HDPE

الدكتور رامي منصور*

تاريخ الإيداع 10 / 9 / 2009. قُبل للنشر في 14 / 4 / 2010

□ ملخص □

يهدف البحث إلى دراسة تأثير المعالجة الحرارية ووسيط التبريد على الخواص الميكانيكية الممثلة بالقيم المميزة لمنحنيات (القوة - الاستطالة) لعينات مقطوعة من أنابيب البولي إيثيلين عالي الكثافة المخصصة لمياه الشرب، وقد تمت المعالجة الحرارية وفق النظام التالي: درجات حرارة التسخين C° (100, 110, 120) وأزمنة التسخين (1, 3, 5, 6) hour. أظهرت نتائج الاختبارات أن أفضل قيم لقوة الخضوع وتشكل العنق والتحطم يتم الحصول عليها عند الدرجة C° 120 وزمن قدره 5 hour، وذلك عند استخدام الهواء كوسيط تبريد، كما أظهرت نتائج الاختبارات أن أفضل وسيط تبريد هو الهواء الطبيعي يليه التبريد القسري بالزيت ثم التبريد القسري بالماء.

الكلمات المفتاحية: المعالجة الحرارية، الخواص الميكانيكية، وسائط التبريد.

* أستاذ مساعد - قسم التصميم والإنتاج - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

The Effect of Heat Treatment and Cooling Mediums on Some Mechanical Properties of High Density Polyethylene (HDPE)

Dr. Rami Mansour *

(Received 10 / 9 / 2009. Accepted 14 / 4 / 2010)

□ ABSTRACT □

This search aims to study the effect of heat treatment conditions and cooling mediums on mechanicals properties, important values of (Load-Elongation) curves. For these reasons, we prepared many specimens from HDPE pipes for drinking water. The treatment system was the following: Heat treatment temperatures were (100, 110, 120) C° and the times of heating were (1, 3, 5, 6) hours.

The results show that we get the best values of force at yield, neck formation and at break after 5 hours heating at 120C° when we use the air like cooling medium, and the best mediums for cooling are at the following: the natural cooling by air, forced cooling by mineral oil then forced cooling by water

Key Words: Heat Treatment, Mechanical Properties, Cooling Medium

* Associate Professor, Department of Design and Production, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

مقدمة:

ينتمي البولي إيثيلين عالي الكثافة (HDPE) إلى البلاستيك الحراري، ويعدّ من المواد البوليميرية القابلة للتبلور، وهو ضمن مجموعة البولي إيثيلين يمثل أهم المواد من حيث قابليته للتبلور حيث يمكن أن تصل نسبة التبلور فيه إلى 90% بالمقارنة مع البولي إيثيلين منخفض الكثافة الذي لا تتجاوز نسبة التبلور فيه 40% [1,2,3].

تمثل البنية البلورية في HDPE أحد أهم خصائصه المهمة وتعدّ نسبة التبلور معياراً في تقييم خصائص المنتج النهائي، وتعتمد أبعاد البلورات وبنيتها وتوزعها وحالة الأجزاء غير المنتظمة بينها على الكتلة الجزيئية للبوليمير وسرعة تبريده، وعلى وجود مواد الإضافة ذات الوزن الجزيئي المنخفض والمعالجة اللاحقة للمنتج. واستناداً إلى ميزات البنية فوق الجزيئية المتشكلة في البوليمير وحالة المناطق اللابلورية (Amorphous Regions) المتشكلة بين البلورات تحدد مجموعة خواص المادة البوليميرية وإمكانات استثمارها [4].

تُعدّ البوليميرات القابلة للتبلور (Semi crystalline Polymer) أكثر المواد استخداماً في التطبيقات الصناعية، لأنها خلال عملية تصنيعها وتحويلها إلى منتجات نهائية، تتشكل في المنتج بنية سفيرووليتية ذات أبعاد وأشكال مختلفة ودرجات انتظام متباينة، كما وتتشكل مناطق انتقالية لا بلورية غير مترابطة متوضعة ضمن مكونات البنية البلورية.

تظهر المراجع العلمية [5] أن المناطق الانتقالية تكون عادة لا بلورية (Amorphous) أو متبلورة جزئياً، وأن البنية السفيرووليتية (Spherulites Structure) يمكن أن توجد بالحالتين الآتيتين:

- بنية سفيرووليتية كبيرة الحجم نسبياً مستقلة ضعيفة متوضعة حول مراكز تدعى النويات (Nucleus)
- بنية سفيرووليتية ناعمة متماسكة فيما بينها تكون أيضاً بتماس مع السفيرووليتات غير المتجانسة التي تملأ الفراغ المحيط بها.

أهمية البحث وأهدافه:

تظهر المصادر العلمية أن عملية تشكل البنية البلورية (Crystalline Structure) في البولي إيثيلين عالي الكثافة حتمية خلال التصنيع مهما اختلفت ظروف التبريد [1,2,5,9]، وتظهر أيضاً أن ظروف التصنيع تؤثر على نسبة التبلور وحجم البلورات وحجم المناطق الانتقالية بينها، فعندما يكون التبريد سريعاً تكون نسبة الإجهادات المتبقية (Residual Stresses) في المنتج عالية لأن التبريد السريع لا يتيح للجزيئات العملاقة بالاسترخاء (Stress Relaxation) بشكل يقلل من حدوث تغيرات لاحقة بالبنية، أما عندما يكون التبريد بطيئاً فإن جزءاً لا بأس به من هذه الإجهادات والانفعالات المتبقية يمكنها أن تتحرر من الجملة مما يتيح للجزيئات بالاصطفاف والترتيب فيما بينها مسببة بذلك انتظام حجم وبنية البلورات الناتجة، والاصطفاف الجيد للأجزاء الانتقالية بين البلورات [4,6,10].

تثبت الدراسات العلمية [7,8] ظاهرة استمرار عملية التبلور تلقائياً في البوليميرات القابلة للتبلور التي تمتلك درجة حرارة تزعج (T_g = Glass Transition Temperature) أصغر بكثير من درجة حرارة الاستثمار، وتظهر أيضاً أن هذه البوليميرات لا يمكنها أن تستمر بالتبلور عند استثمارها بدرجات حرارة أصغر من T_g، في حين يمكنها القيام بذلك عند الاستثمار بدرجات حرارة أعلى من T_g، كما هو الحال في البولي إيثيلين عالي الكثافة الذي درجة حرارة تزعجه (T_g = - 160 C°)، وهذا يعني أنه عند استثمار أنابيب مياه الشرب المصنوعة من HDPE بدرجات

حرارة الوسط المحيط فإن حادثة التبلور سوف تستمر خلال تقادم المنتج، ونتيجة لذلك يحدث تغيرات بالخواص الميكانيكية - الفيزيائية وانخفاض بالحجم النوعي مصحوباً بظاهرتي التقلص (Shrinkage) والاعوجاج (Warping)، وهذه الظواهر مهمة جداً لتقييم استقرار أبعاد المنتج النهائي خلال الاستثمار [1,2,11].

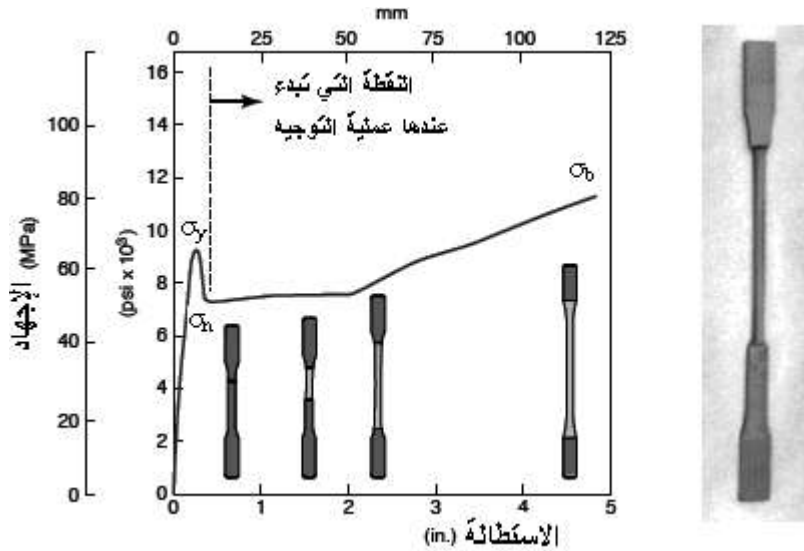
يعتمد التقييم الأمثل لعمليات التصنيع بشكل أساسي على الخواص النهائية للمنتج النهائي، وعلى استقرارها خلال زمن الاستثمار، ويُعدُّ استقرار الخواص في المنتجات ذات عمر الاستثمار الطويل، كما هو الحال في أنابيب البولي إيثيلين المخصصة لجر مياه الشرب، مهمة جداً من أجل تحقيق الديمومة التصميمية لهذه الأنابيب والمقدرة عادة بعمر وسطي 50 year. تمثل المعالجة الحرارية لعينات مقطوعة من هذه الأنابيب إحدى الطرائق المستخدمة في تقييم التغيرات التي ستؤول إليها خواص هذه الأنابيب خلال زمن الاستثمار لأنها تساعد على تسريع التغيرات المحتملة في البنية وتحسين درجة انتظام المناطق الانتقالية اللابلورية، واستناداً لهذا يمكن بالواقع التكهن بمقدار الفقد الحاصل بخواص المنتج النهائي من جراء النظام التكنولوجي المستخدم بعمليات الإنتاج (Processing Operations)، ومعرفة التغيرات التي ستحدث خلال الاستثمار.

يُعدُّ الماء سائل التبريد الأساسي المستخدم بخطوط إنتاج البلاستيك [3,5]، وتمثل عملية التبريد بالماء حادثة تبريد قسرية لا يمكن تفاديها نظراً لضرورات العملية الإنتاجية، واستناداً لأسلوب التبريد المعتمد بخطوط إنتاج أنابيب البولي إيثيلين عالي الكثافة، فإن نشوء الانفعالات والإجهادات المتبقية هي حوادث حتمية لا يمكن تفاديها أيضاً. ويُعدُّ الاختلاف بسرعة التبريد بين مركز المنتج وسطحه الخارجي، عند التبريد السريع، من الأسباب الرئيسة في تشكل الإجهادات الداخلية المتبقية. فالجزئيات الموجهة قسراً لا تمتلك الزمن الكافي للاسترخاء والترتب فيما بينها، كما أن التدرج الحراري يسبب نشوء بنية في المركز أكثر ترتيباً من البنية السطحية بسبب التفاوت الزمني لتأثير عملية التبريد، الأمر الذي يسهم أيضاً بتشكيل عدم تجانس بالبنية على كامل سماكة المنتج النهائي [7].

يُعدُّ منحنيًا (القوة - الاستطالة) من المنحنيات المعتمدة في تقييم خصائص المواد بشكل عام، وتظهر المراجع العلمية [1,2,3,10] أن سلوك المواد البوليميرية على الشد مختلف فيما بينها، فبعض هذه المواد تبدي سلوكاً هشاً عند تحطمها كما هو الحال في البولي فينيل كلوريد القاسي (Rigid polyvinyl chloride) والبولي ستيرين (Polystyrene) وبعضها الآخر تبدي خواص اللدونة في أثناء عملية الشد حيث يلاحظ أنها تستطيل بثبات الإجهاد المطبق قبل الوصول إلى إجهاد التحطم كما هو موضح بالشكل (1)، ومثل هذه المواد البولي إيثيلين عالي الكثافة HDPE. تظهر المراجع العلمية أيضاً أن هبوط الحمل أو الإجهاد في منطقة تشكل العنق كما هو موضح بالشكل (1) يؤول إلى الانخفاض الحاصل في المقطع العرضي خلال عملية تشكل العنق التي تبدأ عندها عملية التحول من البنية البلورية الكروية (Original Spherulitic Structure) إلى البنية الليفية الميكروية (Microfibrillar Structure).

تُعرف عملية نمو العنق خلال اختبار الشد بالسحب على البارد (cold-drawing) [1,2]، ويرافق هذه العملية تطور أكتاف العنق وزيادة في طول العينة مع استمرار تناقص المقطع العرضي، وخلال عملية الشد يحدث توجيه واستطالة للجزئيات العملاقة (Orientation) بشكل كبير باتجاه الشد قبل الوصول إلى نقطة التحطم، وباستمرار انفعال العينة فإنه إضافة لعملية التوجيه والاستطالة يحدث انقطاع كامل أو جزئي أو تدريجي لإحدى أو بعض الروابط المختلفة فيما بينها بطاقة الارتباط، أو تحطم بالحلقات الفيزيائية في مادة الأساس، أو بروابط الجزئيات العملاقة،

ونتيجة لهذا يزداد الانفعال بشكل كبير ويتناقض، وبشكل مستمر، المقطع العرضي للعينة المدروسة عندما $\sigma = \text{const}$.



الشكل (1) - مخطط الشد - الانفعال لمادتي البولي إيثيلين عالي الكثافة مأخوذ من [12]

استناداً لما سبق في الدراسة النظرية، فإن البحث يهدف إلى تقييم استقرار بنية الأنابيب التي اقتطعت منها عينات الاختبار، ودراسة تأثير نظام التبريد على الخواص المدروسة المتمثلة بالبارامترات الأساسية لمنحني القوة - الاستطالة، ولتحقيق هذا الهدف أجريت المعالجة الحرارية لعينات مقطعة من أنابيب البولي إيثيلين عالي الكثافة HDPE المستخدمة في جر مياه الشرب وفق نظام المعالجة الحرارية الآتي:

• درجات الحرارة المستخدمة بالمعالجة الحرارية $T = (100, 110, 120) C^{\circ}$

• الأزمنة المستخدمة بالمعالجة الحرارية $t = (1, 3, 5, 6) \text{ hour}$

واستخدم لتبريد العينات بعد معالجتها وسائط التبريد الآتية:

- التبريد البطيء بالهواء حيث وضعت العينات بعد إخراجها من الفرن بتماس مباشر مع هواء الوسط المحيط
- التبريد القسري بالماء حيث وضعت العينات المعالجة بحوض مائي مباشرة بعد إخراجها من الفرن
- التبريد القسري بزيت محركات وقد استخدم لهذا الهدف حوض يحتوي على زيت محركات عيار 40 بهدف وضع العينات مباشرة بعد إخراجها من الفرن

طرائق البحث ومواده:

عينات من أنابيب البولي إيثيلين عالي الكثافة المستخدمة في جر مياه الشرب إنتاج حلب - سورية لها

المواصفات والخواص الآتية:

(1) اللون أزرق - السطوح الداخلية والخارجية ملساء وخالية من العيوب

(2) الكثافة $\rho = 0.954 \text{ g/cm}^3$

(3) القيمة الوسطى المواد المتطايرة 200 mg / kg

(4) القيمة الوسطى لامتناسية الماء 180 mg / kg

(5) درجة حرارة فيكات (Vicat) أو درجة حرارة التلين $t_v = 120 \text{ C}^\circ$

(6) دليل جريان المنصهر البوليميري $\text{MFR} = 0.32 \text{ g / 10 min}$

(7) القيمة الوسطية للارتداد الطولي بالدرجة 110 C° خلال زمن قدره 1 hour تقريباً 1.25%

وقد استخدم لإنجاز الجزء التجريبي الأجهزة الآتية:

1 - فرن تجفيف ألماني الصنع نوع memmert مبين بالشكل (2) مؤتمت مزود بموقت مع إمكانية التحكم بالزمن ودرجات الحرارة متوفر بكلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين، وقد تقبت عينات الشد المحضرة حسب المواصفة القياسية العالمية ISO 6259 جميعها من أحد أطرافها بهدف تعليقها فراغياً بمركز الفرن في أثناء المعالجة الحرارية، وجهاز لهذا الغرض قوائم قابلة للوقوف ضمن الفرن وعلقت العينات بين هذه القوائم بوساطة سلك معدني بحيث تتدلى العينات في وسط الفرن بهدف تحقيق تجانس بالتسخين خلال المعالجة الحراري

2 - أحواض تبريد تحتوي على الماء والزيت بهدف استخدامها كوسيط تبريد سريع للعينات المسخنة حتى درجة حرارة الوسط المحيط.

3- بياكوليس رقمي بدقة قياس حتى 0.01 mm

4 - آلة شد ألمانية الصنع - ماركة Test المبينة بالشكل (3) مبرمجة متوفرة بجامعة دمشق، وقد أجريت الاختبارات بدرجة حرارة اختبار 22 C° - رطوبة نسبية 50% - سرعة شد للعينات 50 mm/min وفق المواصفة القياسية ISO 6259.



الشكل (3) - آلة اختبار الشد



الشكل (2) - فرن تجفيف

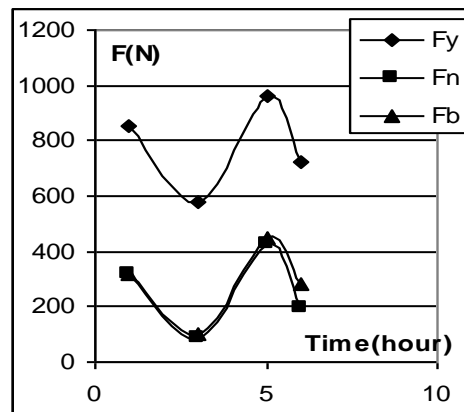
النتائج والمناقشة:

تظهر المراجع العلمية [13] أن إجراء المعالجة الحرارية على بعض المركبات البوليميرية بالدرجة 50 C° غير كافية لتحقيق استرخاء الانفعالات العالية المرونة وللاستقرار أبعاد المنتج النهائي، وأنه يتم الوصول إلى حالة الاستقرار بالأبعاد باستمرار عملية التسخين لمدة 48 hour بالدرجة 80 C° .

أظهرت الدراسة التي أجريت على عينات مقطعة من أنابيب البولي إيثيلين عالي الكثافة [14] أن المعالجة الحرارية بالدرجات $(60-80-100) \text{ C}^\circ$ تسبب تحسناً واضحاً في القيم المميزة لمنحنيات الشد (إجهاد الخضوع σ_y - إجهاد تشكل العنق σ_n - إجهاد التحطم σ_b)، وأن المعالجة الحرارية لمدة 48 hour بدرجات الحرارة $(60-80) \text{ C}^\circ$ غير كافية لتحقيق الاستقرار في القيم المميزة لمنحنيات (الشد - الانفعال) وأن المجال الفعال للمعالجة

الحرارية عند الدرجة 100 C° يقع بين (6 - 1) hour وأنه ليس من الضروري الاستمرار بالتسخين لزمن أكبر من 6 hour بسبب استقرار الخواص المدروسة، واستناداً لهذه الدراسة اعتمد بالبحث الأنظمة الحرارية للمعالجة الواردة سابقاً. أظهرت نتائج اختبارات الشد التي أجريت في هذا البحث أن العينات كافة، بطوروف اختبار ثابتة (سرعة الشد 50 mm/min - درجة حرارة الاختبار 22 C° - الرطوبة النسبية % 50) والمقتطعة من الأنابيب والمعالجة وفق الأنظمة الحرارية المعتمدة في القسم العملي، تبدي منطقة تشكل العنق بوضوح، وأن الاستطالة النسبية في هذه المنطقة تظهر بوضوح السلوك المرن عند الشد لمادة HDPE.

يوضح الشكل (4) أن المعالجة الحرارية بالدرجة 100 C° بدلالة الزمن تبدي تأثيراً غير مستقر على القيم المميزة لمنحنيات (القوة - الاستطالة) الممثلة بقوة الخضوع F_y و قوة تشكل العنق F_n و قوة التحطم F_b ، ويمكن القول استناداً إلى هذه النتيجة أن المعالجة بالدرجة 100 C° غير كافٍ بسبب وجود البنية بحالة عدم توازن ديناميكي، ويمكن تفسير هذا استناداً للعلاقة بين القوى الانتروبية المتواجدة ضمن الجزئيات، وبين تأثير درجة حرارة التسخين على متانة البنية الداخلية التي تعكسها قوى الارتباط الداخلية على اختلاف أنواعها. إن هذا التأثير غير المستقر للمعالجة عند هذه الدرجة يظهر أنه من الضروري إجراء المعالجة عند درجات حرارة أعلى من 100 C° وأنه من المفضل الاقتراب أكثر من درجة حرارة انصهار البلورات ($t_{\text{melt}} = 135\text{ C}^\circ$).



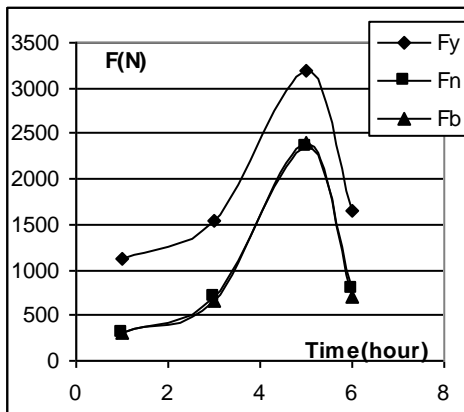
الشكل (4) - منحنيات تغير كل من قوة الخضوع وقوة تشكل العنق وقوة التحطم لعينات

من البولي إيثيلين عالي الكثافة بدلالة زمن المعالجة الحرارية بالدرجة 100 C° - العينات مبردة تبريداً بطيئاً بالهواء

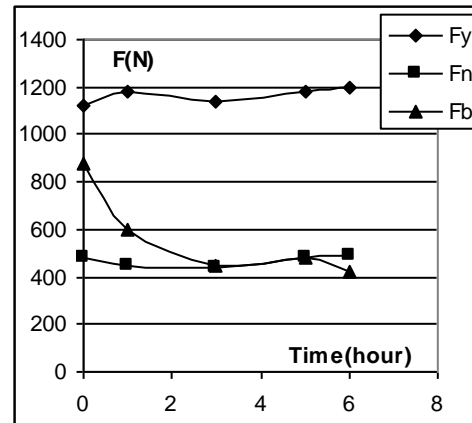
ويظهر الشكل (4) أيضاً تطابق واضح لمنحنيات تغير كل من F_n و F_b وهذا يدل على أن استطالة وتوجيه الجزئيات الانتقالية يحدث فقط ضمن منطقة انفعال العنق، وأن تحطم العينة يحدث فقط عند نهاية هذه المنطقة. إن هذه النتيجة مهمة كونها تظهر أنه وخلال الانفعال ضمن منطقة تطور العنق يحدث تركيز للإجهاد في المناطق التي لا تنتظم فيها البنية نتيجة المعالجة الحرارية، وهذا ما يؤدي إلى انقطاع الروابط الكيميائية في نهاية هذه المنطقة.

يظهر الشكل (5) أن المعالجة الحرارية عند الدرجة 110 C° تبدي تأثيراً مختلفاً على منحنيات القيم المميزة لمنحنيات القوة - الانفعال. كما هو واضح من الشكل (5) أن كل من قوة الخضوع F_y وقوة تشكل العنق F_n يمتلكان تقريباً قيم ثابتة بدلالة زمن التسخين بالمقارنة مع القيم الابتدائية قبل المعالجة في حين نلاحظ أن قيم القوى اللازمة لتحطم F_b العينات تتناقص بدلالة الزمن لتصبح ثابتة بعد ذلك. تشير هذه النتيجة إلى أن المعالجة الحرارية ضمن هذا

النظام يحقق تجانس نسبي بأبعاد البلورات في البنية وهذا ما يؤكد استقرار قيم كل من F_y و F_n المبينة بالشكل (5)، كما وتظهر أيضاً ازدياد قساوة البنية في منطقة تشكل العنق، وهذا ما يسبب انخفاض بقيم قوى التحطم بدلالة زمن المعالجة. يمكن القول إنّه وبسبب استقرار الخواص بالمعالجة بالدرجة 110 C° فإن انتظاماً ما طرأ على مستوى الجزيئات الانتقالية اللا بلورية الموجودة ضمن المناطق البلورية، وأن حجم البلورات أصبح متجانساً نسبياً، وهذا ما عكسته القيم المميزة F_y و F_n ، ويمكن القول أيضاً إنّ عملية التبريد بالهواء قد أعطت الفرصة الكافية لحدوث الانتظام المطلوب في البنية بيد أن درجة الحرارة المستخدمة 110 C° لم تمكننا من إجراء استقراء للتحسن النهائي المتوقع على الخواص المدروسة.



الشكل (6) - منحنيات تغير كل من قوة الخضوع وقوة تشكل العنق وقوة التحطم بدلالة زمن المعالجة الحرارية لعينات من HDPE معالجة بالدرجة 120 C° ومبردة تبريداً بطيئاً بالهواء



الشكل (5) - منحنيات تغير كل من قوة الخضوع وقوة تشكل العنق وقوة التحطم بدلالة زمن المعالجة الحرارية لعينات من HDPE معالجة بالدرجة 110 C° ومبردة تبريداً بطيئاً بالهواء

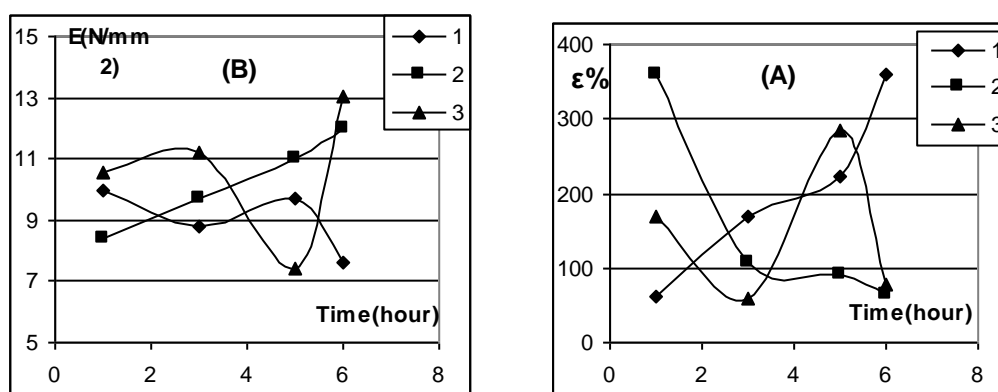
يظهر الشكل (6) منحنيات تغير كل من (F_y , F_n , F_b) عند المعالجة بالدرجة 120 C° مع المحافظة على النظام الزمني، وكما هو واضح أن الدرجة 120 C° تسبب ضمن أزمنة المعالجة تحسناً واضحاً في القيم المميزة لمنحنيات (القوة - الاستطالة) كافة حيث يلاحظ زيادة قيم هذه البارامترات بدلالة زمن المعالجة. ويظهر الشكل أيضاً أن المنحنيات المميزة للبارامترات المدروسة تظهر قيم عظمى عند زمن للمعالجة مقداره 5 hour لتعود بعد ذلك للانخفاض، وأن قيم F_y , F_n , F_b تزداد بزيادة زمن المعالجة حيث يلاحظ أنه وعلى الرغم من انخفاض قيمها عند زمن للمعالجة 6 hour إلا أنها تبقى أعلى من القيم عند زمن للمعالجة 1 hour.

تؤكد هذه النتائج حدوث تحسن بالبنية على مستوى البلورات، وعلى مستوى المناطق الانتقالية بينها. فالتحسن في القيم المميزة لبارامترات منحنيات (القوة - الاستطالة) دليل واضح على الاصطفاف والترتيب الجيد لأجزاء الجزيئات العملاقة الداخلة في تركيب المناطق الانتقالية ، وعلى تحسن انتظام البنية البلورية.

كما هو معلوم في المصادر العلمية [7] أن الاستطالة النسبية تتناقص بحدّة بزيادة حجم البلورات في البنية وإنه عند انفعال البلورات الحاوية على عيوب داخلية قليلة، فإن عملية الانفعال تبدأ من الفراغ الموجود بين البلورات عند الحدود السطحية الفاصلة حيث تتشكل الشقوق (Crack)، وفي هذه الحالة فإن البوليمير يتحطم بشكل هش دون أن يحدث تحطم أو تشوه بالبلورات، وعلى العكس فإنه وعند وجود عيوب كثيرة داخل البلورات ، وهذا ما يطابق تطور

العنق، فإن تحطم البوليمير يكون لئناً. تؤكد المصادر العلمية أيضاً [13] أن المعالجات الحرارية للبولي إيثيلين عالي الكثافة HDPE تبدي تأثيراً واضحاً على البنية السفيروليتيية Spherulite Structure التي تتألف منها المادة أساساً حيث تتجزأ السفيروليتيات الكبيرة إلى حبيبات من السفيروليتي الناعمة، ويفترض أن يرافق هذه العمليات إعادة ترتيب وتنظيم لهذه البنية السفيروليتيية.

استناداً لذلك يمكن القول إن المعالجة بالدرجة $100C^{\circ}$ تسبب بنشوء بلورات صغيرة الحجم موزعة بشكل غير متجانس على كامل كتلة عينة الاختبار، وهذا ما يفسر تذبذب تأثير زمن المعالجة على قيم F_y , F_n , F_b . فالمعالجة الحرارية بالدرجة $100C^{\circ}$ يسمح للبنية الانتظام بشكل نسبي على مستوى البلورات (تصغير حجم البلورات)، وعلى مستوى المناطق الانتقالية بين البلورات، والتذبذب بمنحنيات القيم المميزة المدروسة يعود إلى عدم قدرة هذه الدرجة بالتأثير على كامل التشكيلات فوق الجزيئية في البنية.



الشكل (7) - منحنيات تغير كل من الانفعال النسبي عند الانقطاع (A) ومعامل المرونة (B) بدلالة

زمن المعالجة الحرارية لعينات من البولي إيثيلين عالي الكثافة عند درجات حرارة مختلفة

$$120C^{\circ} - 3, \quad 110C^{\circ} - 2, \quad 100C^{\circ} - 1$$

يؤكد الشكل (7-A) أن التحسين في البنية عند المعالجة بالدرجة $100C^{\circ}$ يتجلى بتزايد الاستطالة النسبية بدلالة زمن المعالجة، وكون هذا التزايد غير خطي، فإن ذلك يعكس التأثير النسبي لنظام المعالجة عند هذه الدرجة على البنية الداخلية ككل. يؤكد الشكل (7-B) صحة النتائج التي تم التوصل إليها حيث تظهر أنه عند المعالجة بالدرجة $100C^{\circ}$ فإن معامل المرونة يتناقص بزيادة زمن المعالجة وهذا دليل على انخفاض الصلابة وزيادة في اللدونة الأمر الذي يؤكد التزايد الحاصل بالاستطالة النسبية.

يظهر الشكل (7-A) أنه عند المعالجة بالدرجة $110C^{\circ}$ ، مع المحافظة على النظام الزمني نفسه، فإن الاستطالة النسبية تتناقص، وهذا دليل على تأثير هذه الدرجة على حجم البنية البلورية، فالمعالجة الحرارية واعتماد الهواء وسيلة للتبريد يتيح للبلورات بالنمو ويسبب تجانس نسبي في حجمها وهذا ما تؤكد نتائج الشكل (5) التي تظهر ثبات قيم كل من (F_y, F_n) بدلالة زمن المعالجة، كما يتيح للبنية المتجانسة بالتراص بشكل جيد وهذا ما تعكسه نتائج الشكل (7-B) التي تظهر تزايد معامل المرونة للعينات من جراء المعالجة الحرارية.

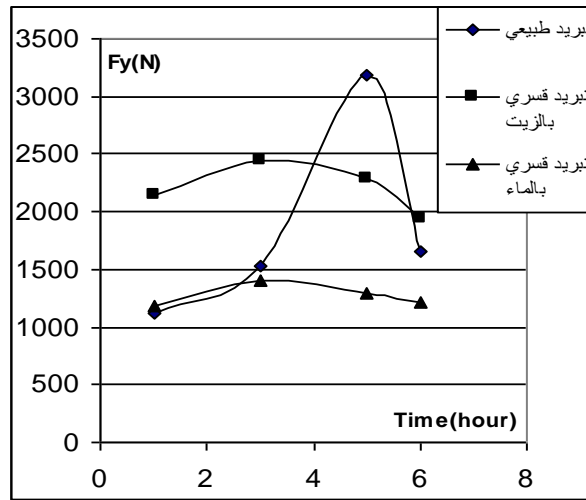
من النتائج المثيرة للاهتمام تمثله المعالجة بالدرجة $120C^{\circ}$ حيث يلاحظ تحسناً واضحاً للقيم المميزة لمنحنيات

(القوة - الاستطالة) بزيادة زمن المعالجة، ومميزاً عند الزمن 5 hour.

من خلال هذه المناقشة أصبح أكيداً أن تحسناً قد طرأ على مستوى البلورات وعلى مستوى المناطق الانتقالية وهذا ما تؤكدته نتائج منحنيات تغير قيم (F_y, F_n, F_b) ، ويمكن تفسير القيم العالية لهذه القيم عند الزمن 5 hour أنه عند هذه الدرجة يحدث انتظام وتجانس في كامل البنية وتراص جيد بين مكوناتها، وهذا ما تؤكدته القيمة العالية للاستطالة النسبية التي يقابلها معامل مرونة منخفض المبينة بالشكل (7).

إن التبريد البطيء بالهواء أسلوب غير مطبق في الحياة العملية عند إنتاج أنابيب من مواد البلاستيك الحراري. ويتم عادة استخدام وسائط تبريد سريعة في خطوط الإنتاج بهدف زيادة الإنتاجية، كما وأظهرت النتائج وجود تأثير واضح لعملية التبريد البطيء بالهواء على خواص المتانة، وذلك استناداً للنتائج التي تم ذكرها في المنحنيات السابقة، استناداً لهذا فإن الأسلوب التجريبي المتبع في دراسة تأثير وسيط التبريد على القيم المميزة المدروسة يتمثل في إجراء المعالجة الحرارية عند الدرجة 120°C بسبب التأثير الواضح لهذه الدرجة على القيم المميزة لمنحنيات القوة - الاستطالة.

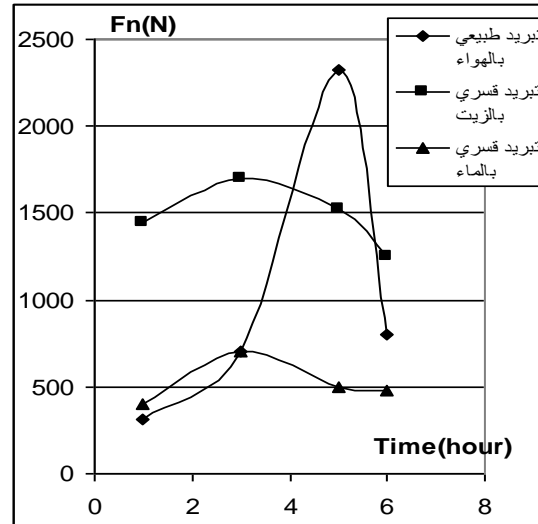
يظهر الشكل (8) تأثير أسلوب التبريد على قوة الخضوع بدلالة زمن المعالجة عند الدرجة 120°C . كما هو واضح من الشكل أن أعلى قيم للخضوع يتم الحصول عليها بالتبريد البطيء بالهواء بعد زمن معالجة 5 hour ثم بالتبريد القسري بالزيت بعد 2 hour معالجة، وأن أصغر القيم يتم الحصول عليها بعد المعالجة لمدة 2 hour وتبريد قسري بالماء.



الشكل (8) - منحنيات تغير قوة الخضوع بدلالة زمن المعالجة الحرارية و باختلاف وسيط التبريد لعينات معالجة بالدرجة 120°C

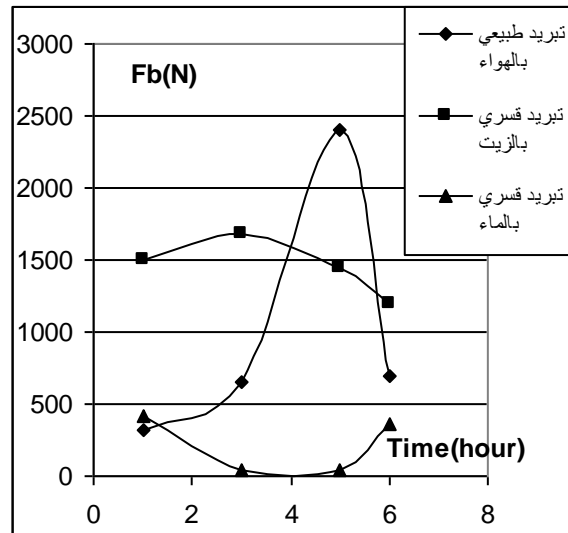
إن هذه النتيجة مهمة من الناحية التطبيقية فهي تظهر أن للماء دوراً كبيراً في كبح نمو البلورات وانتظام المناطق الانتقالية للحد الذي تتحقق عنده قيم عالية لقوى الخضوع. فالتبريد المائي حقيقة قائمة في خطوط الإنتاج وتأثيره كافة على استقرار البنية واضح، لأن الماء يقوم بتجميد الجزيئات (Frozen) في الوضعية التي تشغلها بعد خروجها من أداة تشكيل الأنابيب، ولا يمنحها الوقت الكافي للقيام بعملية الاسترخاء، في حين ونتيجة للتأثير البطيء لزيت التبريد على عملية التبريد، فإن الجزيئات تمتلك بعض الوقت لإنجاز ما يمكن إنجازها من استرخاء لإجهاد ومن تحقيق تجانس نسبي في عملية التبريد وهذا ما ينعكس إيجاباً على انتظام البنية، و على قوة الخضوع.

ويشكل مشابه يوضح الشكل (9) أن أكبر قيمة لقوة تشكل العنق يتحقق عند التبريد البطيء بالهواء بعد 5 hour لزمان المعالجة يليها التبريد بزيت المحركات بعد 2 hour، والتبريد السريع بالماء بعد مرور 2 hour معالجة بالدرجة المذكورة.



الشكل (9) - منحنيات تغير قوة تشكل العنق بدلالة زمن المعالجة الحرارية و باختلاف وسيط التبريد لعينات معالجة بالدرجة 120 C°

إن هذه النتيجة تعكس بالواقع مقدار الفقد الحاصل بقيم القوى عند الخضوع وعند تشكل العنق نتيجة للتبريد القسري بالماء أو بالزيت، وتظهر أن التبريد بالهواء يمنح البنية زمناً أكبر للقيام بالعمليات الاسترخائية، وبالتحرر بشكل كبير من الانفعالات والإجهادات الداخلية الناتجة عن العملية التكنولوجية، كما ويسمح للبلورات الناعمة المتشكلة من جراء المعالجة بالتجانس وبالتوزع المنتظم ضمن البنية.

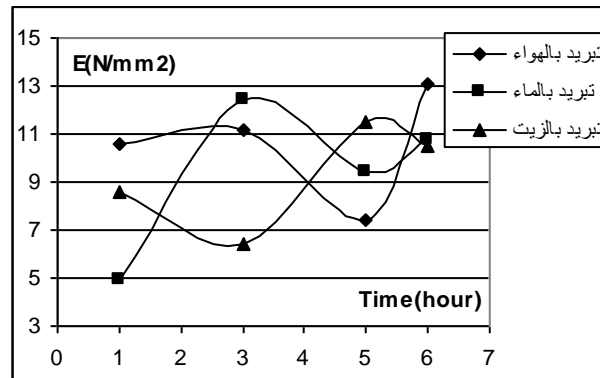


الشكل (10) - منحنيات تغير قيم قوة التحطم لعينات معالجة بالدرجة 120 C° بدلالة زمن المعالجة ونوع وسيط التبريد

يظهر الشكل (10) منحنيات تغير قيم القوة عند التحطم بدلالة زمن المعالجة ووسيط التبريد مع المحافظة على كافة ظروف الاختبار الأخرى ثابتة، وكما هو واضح أن المنحنيات الثلاثة تمتلك مسارات مختلفة فيما بينها، وأن

السلوك المميز لمنحنيات تغير قوة الخضوع وقوة تشكل العنق حافظ على المسار نفسه عند التبريد البطيء بالهواء والتبريد القسري بالزيت، في حين اختلف كلياً سلوك منحنيات قوى التحطم عند التبريد القسري بالماء. من خلال مقارنة منحنيات الشكل (10) يمكن بوضوح قراءة تأثير وسيط التبريد حيث يلاحظ أن قيم F_b عند التبريد القسري تتناقص بزيادة زمن المعالجة في حين تحافظ منحنيات تغير F_b عند التبريد بالهواء والزيت على مسارات مشابهة لمنحنيات تغير كل من F_n , F_y ويمكن تفسير ذلك إلى أن الدرجة 120 C° تسبب نشوء بنية بلورية متجانسة في العينات المدروسة، وأن التبريد السريع بالماء لا يمنح هذه البنية الزمن اللازم للاسترخاء والتحرر من الانفعالات والإجهادات المتبقية، وهذا ما يسبب نشوء مناطق تنصف بعدم الانتظام، وبمعنى آخر نشوء مراكز إجهاد في البنية، تساهم أثناء تطور منطقة العنق إلى حدوث تحطام جزئية بالبنية الداخلية، وهذا ما يفسر انخفاض قيم F_b عند التبريد السريع بالماء.

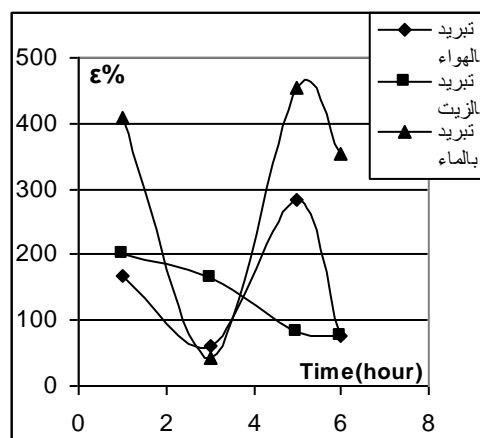
من المفيد ذكره هنا أن التبريد بالزيت يحتل تقريباً مكانة وسطية بين التبريد بالهواء والتبريد بالماء، وهذا ما توضحه الأشكال السابقة، ويعود السبب في هذا إلى التأثير البطيء للزيت، كوسيط تبريد، الأمر الذي يسمح لعناصر البنية بالاسترخاء جزئياً، والتحرر النسبي أيضاً من بعض الانفعالات والإجهادات، والانتظام بشكل جيد نسبياً، بالمقارنة مع التبريد المائي، بسبب توفر زمن نسبي جيد لحدوث هذه التغيرات.



الشكل (11) - منحنيات تغير معامل المرونة E بدلالة زمن المعالجة ونوع وسيط التبريد لعينات معالجة بالدرجة 120 C°

إن التغيرات الواضحة في منحنيات تغير كل من (F_y , F_n , F_b) وتأثير وسيط التبريد عليها لا تعكس السلوك العام لتغير منحنيات معامل المرونة E والاستطالة النسبية % ϵ بدلالة زمن المعالجة عند الدرجة 120 C° ، فكما هو واضح من الشكلين (11,12) الممثلين لتغير كل من معامل المرونة والاستطالة النسبية أن المعالجة الحرارية تبدي تأثيرات متباينة على هذه المنحنيات، وأن كل نقطة من هذه المنحنيات تعكس بنية خاصة للمادة تشكلت من جراء ظرف المعالجة الموجودة فيها.

وعلى الرغم من الخصوصية التي تظهرها منحنيات (E) و (% ϵ) من حيث سلوك مساراتها إلا أنه تتوافق فيما بينها حيث يلاحظ أن القيم العالية لمعامل المرونة تقابلها قيم منخفض للاستطالة النسبية، والعكس صحيح. كما ويلاحظ أن التبريد بالزيت يجعل هذه المنحنيات تحتل مكانة وسطية بين التبريد بالهواء والماء



الشكل (12) - منحنيات تغير الاستطالة النسبية % ε بدلالة زمن المعالجة ونوع وسيط التبريد لعينات معالجة بالدرجة 120C°

الاستنتاجات والتوصيات:

- 1 - أظهرت الدراسة التجريبية أنه لإحداث تحسن واضح بالقيم المميزة لمنحنيات (القوة - الاستطالة) ينبغي إجراء المعالجة الحرارية بالدرجة 120C° القريبة من درجة حرارة انصهار البلورات 140C°، وهذا دليل على أن كمية الإجهادات والانفعالات المتبقية وعدم التجانس بالبنية الداخلية ناتج عن سوء عملية التبريد في أثناء تصنيع الأنابيب.
- 2 - أظهرت نتائج الاختبارات أن أسوأ نتائج للقيم المميزة لمنحنيات (القوة - الاستطالة) يتم الحصول عليها عند التبريد القسري بالماء يليها الزيت ، وأن أفضل هذه النتائج هي عند التبريد الطبيعي بالهواء.
- 3 - إن الاختلاف الواضح بالقيم المميزة المدروسة بين التبريد بالهواء والتبريد بالماء يظهر مقدار الفقد الحاصل بالخواص من جراء التبريد القسري بالماء، وإن هذا الاختلاف يمثل بالواقع مقدار التغيير المتوقع حدوثه، بخواص الأنابيب المستخدمة في جر مياه الشرب، خلال زمن الاستثمار
- 4 - أظهرت نتائج الاختبارات أن أفضل القيم المميزة للمنحنيات المدروسة يتم الحصول عند نظام للمعالجة الحرارية (120C° - 5 hour).

استناداً لنتائج البحث يمكننا اقتراح التوصيات الآتية:

- 1 - ضرورة إجراء المعالجة الحرارية على عينات مقطعة من أنابيب جر مياه الشرب المصممة لعمر استثمار طويل (حوالي 50 years) بهدف استقراء تأثير الظروف التكنولوجية لعملية التصنيع على خواص المنتج النهائي، ومعرفة التغيرات التي ستؤول إليها هذه الأنابيب خلال عملية التقادم والاستثمار.
- 2 - ضرورة مراقبة التغيرات الفيزيائية (النقل الطولي - الإعوجاج) الحاصلة في العينات المدروسة بدلالة نظام المعالجة الحرارية، إلى جانب الخواص الميكانيكية.
- 3 - ضرورة اعتماد المعالجة الحرارية أسلوب دراسة أساسي في المشاريع الاستراتيجية، مثل مشاريع جر مياه الشرب ومشاريع الري والسقاية والصرف الصحي.

المراجع:

- 1- RICHARD, C. JAMES, L . *Polymer Engineering Principles- Properties , Processes , Tests for Design* , 1997 , 395
- 2- DOMINCK .R .V .*Plastic Processing Data Handbook* – 1998 - 683
- 3- EDWIN, T. J. *Mechanical Properties of Solid Polymer*-Technische Universiteit Eindhoven, 2005, 155
- 4- ГАНЧЕВА, Т. *Структура и Свойства на Конструкционните Материали*—София , Техника ,1982 ,280
- 5- Brydson , J. *Plastics Materials* – Seven Edition , 1999 , 920
- 6- ГАНЧЕВА, Т. *Полимерно Материалознание на Термопластините Полимерни Матери , Бързо Кристализращи Полимери* –София , 1983 , 250
- 7- МОСКАТОВ, К. А. *Термическая Обработка Платмассовых и Резиновых Деталей Машин* - Москва, Машеностроение, 1976, 199
- 8- APONE,S.; BONGIOVANNI,R.; BRAGLIA,M.; SCALIA,D.; PRIALA, A. - *Effect of Thermo-mechanical Treatment on HDPE Used for TLC Ducts* - Polymer Testing, 2003, 22, 275,280
- 9- HAN, E .H .; GOVAERT, E .Leon – *Mechanical Performance of Polymer Systems: The Relation Between Structure and Properties* –Prog .Polym .Sci ,30, 2005, 915-938
- 10- BERNARD. A.G.; SCHRAUWEN, R.; JASSEN, P .M .; LEON.; GOVAERT, E.;; HAN .E .H .MEIJER – *Intrinsic Deformation Behavior of Semi crystalline Polymer* – Macromolecules – 2004, 37, 6069 – 6078
- 11- ANDREAS LENDLEIN, STEFFEN KELCH – *Shape Memory Polymer*- Angew. Chem. Int. Ed, 2002, 41, 2034-2057
- 12- *Manufacturing Processes for Engineering Materials*, 5th ed. Kalpakjian. Schmid – 2008 , Pearson Education, ISBN No.0-13-227271-7
- 13- ГАНЧЕВА ,Т . *Полимерно Материалознание на Термопластините Полимерни Матери , Бързо Кристализращи Полимери* –София – 1993 - 250
- 14- منصور. ر، تأثير المعالجة الحرارية على قيم منحنيات (الشد - الانفعال) للبولي إيثيلين عالي الكثافة HDPE ، أرسلت للنشر بتاريخ 2008/9/10 م ، قبلت للنشر بتاريخ 2009/4/28 م في سلسلة العلوم الهندسية بمجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية