A Study Of The Effect Of Heat Treatment On Some Mechanical Properties Of Unsaturated Polyester Composites Filled With Particles Of Aluminum Oxide And Carbon Black

Hiba Mohsen Ghadir*

(Received 16 / 7 / 2024. Accepted 22 / 12 / 2024)

□ ABSTRACT □

This research aims to study the effect of heat treatment on some mechanical properties (such as frictional properties, wear and surface hardness) of unsaturated polyester composites filled with aluminum oxide (AL_2O_3) and carbon black (CB) particles. To achieve this goal, samples were prepared by mixing the fillers in different weight fractions and separately with the matrix (unsaturated polyester) using an electric mixer, then the hardener MEPK (methyl ethyl ketone peroxide) was added at a rate of 1.5 % until homogeneity of the mixture mass. After the good mixing process, the composite polymer material was poured into prepared cylindrical molds and left to solidify at room temperature. Then, a heat treatment process was carried out for the composite material samples (UPR composites containing AL_2O_3 and containing CB) at two temperatures of 60 °C and 80 °C and at different heat treatment times (2, 4, 6, 24) h. The results of the heat treatment showed that a decrease in the volumetric loss values when both the heat treatment time and temperature were increased. In order to verify the validity of the results of the heat treatment effect, the change of surface hardness was studied according to Shore D in terms of the treatment regime followed.

Keywords: Unsaturated polyester resin, AL_2O_3, CB, Shore D, friction, wear.

Copyright **:**Tishreen University journal-Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

***Academic Assistant, Department of Design and Production Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria. hiba.m.ghadir@tishreen.edu.sy**

دراسة تأثير المعالجة الحرارية على بعض الخصائص الميكانيكية لمركبات البولي استر غير المشبع المحشوَة بجزيئات من أوكسيد الألمنيوم وهباب الفحم

هبة محسن غدير*

(تاريخ الإيداع 16 / 7 / 2024. قُبِل للنشر في 22/ 12 / 2024)

□ ملخّص □

يهدف هذا البحث إلى دراسة تأثير المعالجة الحرارية على بعض الخصائص الميكانيكية (مثل خواص الاحتكاك، الاهتراء والقساوة السطحية) لمركبات البولي استر غير المشبع المحشوّة بجزيئات من أوكسيد الألمنيوم وهباب الكربون. لتحقيق ذلك تم تحضير العينات عن طريق مزج مواد الحشوّ بنسب وزنية مختلفة وبشكل منفصل مع المادة الرابطة (البولي استر غير المشبع) باستخدام خلاط كهربائي، وبعد ذلك تم إضافة المادة المقسية MEPK (methyl ethyl ketone peroxide) بنسبة % 1.5 حتى حدوث التجانس بكتلة المزيج. وبعد عملية المزج الجيد تم صب المادة البوليميرية المركبة في قوالب اسطوانية محضرة وتركها حتى حدوث التصلب ضمن درجة حرارة الغرفة. ثم تم إجراء عملية معالجة حرارية لعينات المواد المركبة (مركبات UPR الحاوية على AL_2O_3 والحاوية على CB) وذلك عند درجتي حرارة معالجة 60 °C و 80 °C وأزمنة معالجة حرارية مختلفة h (2, 4, 6, 24). أظهرت نتائج المعالجة الحرارية انخفاض بقيم حجم الاهتراء عند زيادة كل من زمن ودرجة حرارة المعالجة الحرارية، وللتأكد من صحة نتائج تأثير المعالجة الحرارية تم دراسة تغير القساوة السطحية حسب Shore D بدلالة نظام المعالجة المتبع.

الكلمات المفتاحية: البولي استر غير المشبع، أوكسيد الألمنيوم، هباب الفحم، القساوة السطحية، الاحتكاك، الاهتراء

حقوق النشر : مجلة جامعة تشرين– سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص CC BY–NC–SA 04

* **قائم بالأعمال –قسم هندسة التصميم والإنتاج– كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية– جامعة تشرين– اللاذقية– سورية– إيميل hiba.m.ghadir@tishreen.edu.sy**

مقدمة:

أصبحت المواد المركبة ذات الأساس البوليميري ((Polymer matrix composites (PMCs) موضع تركيز بحثي رئيسي مؤخرًا نظرًا لخصائصها الفائقة والمناسبة تمامًا للعديد من التطبيقات الهندسية، حيث أن المواد المركبة تمتلك مقاومة ومتانة معزّزة مع سهولة المعالجة وأقل تكلفة [1]. يتم استخدام البوليمرات بشكل متزايد كبدائل للمعادن في التطبيقات الصناعية بسبب مقاومتها الأفضل للاهتراء ونسبة القوة إلى الوزن الجيدة. على الرغم من خفة الوزن وقابلية التصنيع الجيدة، إلا أن استخدام البوليميرات مقيد في التطبيقات التي تحتوي على الاهتراء. للتغلب على هذا القيد، يمكن تعزيز البوليمرات باستخدام مواد مالئة (محشوّة) لزيادة مقاومة الاهتراء للمواد المركبة اعتمادًا على: نوع الجسيم، حجم الجسيمات، توزيع الحجم، الإجراءات البينية بين الحشوّ وراتنج مادة الأساس، محتوى الجسيمات، مستوى تشتّت الجسيمات في المادة المركبة، وظروف اختبار الاهتراء مثل: وضع الاهتراء (دبوس على القرص، Taber Abraser)، الجسم المضاد، سرعة الانزلاق، مسافة الانزلاق، الحمل المطبق ودرجة حرارة الاختبار. لا يتبع علم ترايبولوجيا البوليميرات قوانين الاحتكاك كما هو معروف في المعادن، ويعتمد معامل الاحتكاك μ على عوامل مختلفة مثل الحمل العادي، وسرعة الانزلاق، ودرجة الحرارة (البوليمرات أقل بكثير نقاط الانصهار)، ودرجة حرارة التحول الزجاجي (T_g) [2].

أهمية البحث وأهدافه:

تتجلى أهمية البحث في تناوله لموضوع تأثير المعالجة الحرارية على خواص الاحتكاك والاهتراء والقساوة السطحية لمركبات البولي استر غير المشبع الحاوية على بعض أنواع الحشوات مثل أوكسيد الألمنيوم (AL_2O_3) وهباب الفحم (CB) وذلك بغية تحسين القساوة السطحية للعينات وتقليل الاحتكاك والاهتراء في التطبيقات الهندسية المختلفة.

- **هدف البحث:**

1) دراسة تأثير درجة حرارة المعالجة على خواص الاحتكاك والاهتراء وكذلك على القساوة السطحية للمادة البوليميرية المركبة.
2) دراسة تأثير زمن المعالجة على خواص الاحتكاك والاهتراء وكذلك على القساوة السطحية للمادة البوليميرية المركبة.

1- الدراسات المرجعية:

قام Shakuntala Ojha وآخرون عام 2014 [3] بدراسة خصائص وسلوك اهتراء المواد المركبة البوليميرية المحشوّة بهباب الفحم. حيث تم الحصول على هباب الفحم المشتق من قشرة التفاح الخشبية، عن طريق الانحلال (التحلّل) الحراري لجزيئات قشرة التفاح الخشبية عند 400 °C، ويتميز بمحلل EDS (EDS analyzer) ويستخدم كمواد حشو في المواد المركبة البوليميرية. تم إجراء دراسة تجريبية لمقارنة سلوك الاهتراء لكل من جزيئات هباب الفحم المشتق من قشرة التفاح الخشبية والخام المحشوّة بالمادة الرابطة راتنجات الإيبوكسي. تم تحليل تأثير تركيز جزيئات قشرة التفاح الخشبي بزوايا اصطدام مختلفة (30°, 45°, 60°, 90°) عند سرعة صدم ثابتة 48 m/ sec على معدل اهتراء المادة المركبة. ومع ذلك، فقد وجد أن مركب جسيمات هباب الفحم يُظهر الحد الأدنى من الاهتراء مقارنةً بمركب الجسيمات الخام. بالإضافة إلى ذلك تم فحص مورفولوجيا السطح المهترئ باستخدام المجهر الإلكتروني الماسح scanning electron microscope (SEM). كما تم ملاحظة أن الحد الأدنى من الاهتراء حدث لمركب هباب الفحم عند حشو بنسبة 20 % wt مقارنة بمركب الحشو الخام بنسبة 10 % wt.

قامت Nafisa Gull وآخرون عام 2015 [4] بدراسة مركبات البولي استر الحاوية على أوكسيد الزنك (ZnO) والمحشوّة بالألياف الزجاجية. حيث تم تصنيع مركبات البولي استر المحشوّ بألياف الزجاج (GFRP) والمحشوّ بأوكسيد الزنك (ZnO) باستخدام تراكيز مختلفة من المادة المحشوّة والبحث في سلوكها الميكانيكي والحراري. وأظهرت النتائج أن الخصائص الميكانيكية والحرارية وكذلك القساوة لمركب البولي استر المحشوّ بألياف الزجاج قد تحسّنت مع زيادة أوكسيد الزنك ZnO.

قام S.A. Bello وآخرون عام 2015 [5] بدراسة مراجعة للخواص الميكانيكية والترايبولوجية للمواد المركبة ذات المادة الرابطة (راتنج الإيبوكسي). لقد شكل الاستهلاك المرتفع للوقود من قبل السيارات والمركبات الفضائية المصنوعة من السبائك القديمة تحديًا كبيرًا لمهندسي التصميم والمواد العالميين. وقد دعا هذا إلى إجراء أبحاث في تطوير المواد لإنتاج مواد أخف ذات خصائص ميكانيكية مماثلة أو حتى متفوقة على المواد الموجودة في هذا المجال من التطبيقات. ويشكل ذلك جزءاً من الجهود المبذولة لتحقيق الرؤية العالمية 2025، أي تقليل استهلاك الوقود في السيارات والمركبات الفضائية بنسبة % 75 على الأقل. وقد حدد العديد من الباحثين المواد المركبة المتقدمة كمواد مناسبة في هذا الصدد. من بين المواد الرابطة الشائعة المستخدمة لتطوير المواد المركبة المتقدمة، حققت راتنجات الإيبوكسي السيطرة بين نظيراتها بسبب خصائصها الجيدة بما في ذلك خصائص المقاومة الكيميائية والحرارية والكهربائية، والخواص الميكانيكية واستقرار الأبعاد.

درس Ayman A. Ay عام 2015 [6] المعالجة الحرارية للبوليميرات، حيث تعتبر واحدة من أكثر الطرق فعالية بسبب تطبيقاتها الكثيرة. إن المعالجة الحرارية للبوليميرات تحسّن خواصها الميكانيكية والترايبولوجية. وهذا التأثير ناتج عن زيادة الحالة البللورية (crystal phase) في بنية البوليمير، حيث يزيد الجزء المرن من لزوجة البوليمير مما يسبب زيادة كبيرة في قوة الضغط والتوصيل الحراري.

تم إجراء دراسة استقصائية أظهرت أن الاهتمام بالمعالجة الحرارية للمواد المركبة ذات الأساس البوليميري من أجل التطبيقات التقنية تخفّض الاحتكاك والاهتراء. كما أظهرت أن الخواص الميكانيكية التي تم تحسينها تتضمن: مقاومة التعب، صلابة الكسر، مقاومة الاهتراء ومعامل الاحتكاك. وكان من نتائج الدراسات التي أجريت أنه عند معدل تبريد منخفض تزداد قساوة البوليميرات، وبالتالي ينخفض معامل الاحتكاك بشكل ملحوظ. كما يزداد التباين في معامل الاحتكاك مع زيادة درجة حرارة المعالجة الحرارية. وكذلك انخفض اهتراء البوليميرات المختبرة عند انخفاض معدل التبريد حيث يزداد تأثير المعالجة الحرارية على الاهتراء مع زيادة درجة حرارة المعالجة الحرارية. ويمكن أن يعود التغير في خصائص الاهتراء والاحتكاك للبوليميرات الناتجة عن المعالجة الحرارية إلى تغير تبلورها.

قام Balazs Jakab وآخرون [2] عام 2021 بدراسة عمل مواد الحشو في تحسين الأداء الترايبولوجي للطلاءات المواد المركبة ذات المادة الرابطة الإيبوكسي. تؤدي إضافة المواد المحشوّة (البوليمر والحشوات المعدنية) إلى المادة الرابطة راتنجات الإيبوكسي إلى تحسين الأداء العام للمادة المركبة، مما يسمح بتطبيق هذه المواد كمواد ترايبولوجية في التطبيقات الصناعية. يتم تحسين الخواص الترايبولوجية (معامل الاحتكاك المنخفض، وزيادة مقاومة الاهتراء وخصائص عدم الالتصاق) للطلاءات الإيبوكسي عن طريق دمج مواد حشو بأحجام جسيمات مختلفة وبأجزاء مختلفة من حجم الحشو. الهدف من هذه الدراسة هو تحديد العوامل المؤثرة على آليات تقليل الاهتراء للحشوات. تم ذلك عن طريق اختبارات الاهتراء التي تم إجراؤها على جهاز مسمار – قرص (a pin-on-disc) وعلى جهاز Taber Abraser. تم تسجيل انخفاض كبير في معدل الاهتراء مع التركيبات التي تحتوي على حشوات البوليمر مثل بولي تترافلوروإيثيلين

(PTFE)، والبولي إيثيلين (PE) وبروبيلين الإيثيلين المفلور (Fluorinated ethylene propylene (FEP))، وذلك بسبب طبيعة التشحيم الذاتي الخاصة بها. تم إيجاد أن حجم جسيمات حشوات السيليكا (SiO_2) تلعب دورًا مهمًا، حيث تقلل الجزيئات الخشنة من معدل الاهتراء بسبب الرابطة الموجودة في سطح الراتنج/ الحشو. لقد تبين أن جميع مواد الحشو لم تساعد في تحسين مقاومة الاهتراء، كان لحشوات SiO_2 ذات حجم الجسيمات الأقل تأثير سلبي على مقاومة الاهتراء لطلاء الإيبوكسي، من خلال التسبب في انقطاعات في المادة. وتم تحليل الأسطح المهترئة باستخدام المجهر الضوئي والمجهر الإلكتروني الماسح (SEM)، للمساعدة في فهم آليات الاهتراء المعنية بشكل أفضل.

قام Manickam Ramesh عام 2022 وفق [6] بدراسة تأثير مادة الحشو على خواص المواد المركبة البوليميرية المسلّحة بالألياف. وصل استخدام المركبات المسلّحة بالألياف إلى ذروته مؤخرًا في معظم التطبيقات الهندسية. بناءً على المتطلبات، تمت حشو المواد المركبة المسلّحة بالألياف إما بمواد حشو صناعية أو طبيعية. تناولت هذه الدراسة بشكل شامل توصيف وخصائص المواد المركبة المسلّحة بالألياف والمحشوّة والتي يمكن من خلالها الحصول على بعض الاستنتاجات البارزة. في كثير من الحالات تساعد مواد الحشو في الحصول على خواص ميكانيكية وحرارية أعلى للمواد المركبة والتي لا يمكن الحصول عليها بواسطة المواد المركبة المسلّحة بالألياف دون مواد حشو. من أجل تطوير المواد المركبة النانوية، عادةً ما يتم تعزيز الحشوات الطبيعية أو الصناعية بحجم النانو وفقًا للمتطلبات. لوحظ أن مواد الحشو النانوية تعمل على تحسين الخصائص إلى حد ما، ولكن أبعد من ذلك، وجد أن خصائص المواد المركبة تنخفض بسبب تكتلها (agglomeration). ويرجع ذلك إلى قوى فاندر فال القوية التي تحفز التصاق جزيئات الحشو مع بعضها البعض. يؤدي هذا إلى انخفاض في الخواص الميكانيكية وضعف الالتصاق بين الأسطح، والذي يخضع بشكل مباشر لهندسة وتركيز الحشو. ولكن إذا تم استخدام الحشوات (المالئات) الطبيعية في المواد المركبة الطبيعية المسلّحة بالألياف، فإنها تعزز تجدد واستدامة المواد المركبة. من ناحية أخرى، تعمل مواد الحشو على زيادة الالتصاق بين الألياف والمادة الرابطة وبالتالي تعزيز مقاومة الماء للمواد المركبة عن طريق إعاقة تغلغل (نفاذ) الماء. عادةً ما تتم إضافة مواد الحشو إلى المواد المركبة بناءً على التطبيقات، المواد المستخدمة والخصائص المطلوبة. من ناحية أخرى، تعمل الحشوات الصناعية على تعزيز الخواص الترايبولوجية للمواد المركبة، والتي تعتمد أيضًا على توافق الحشو مع مادة الأساس (المادة الرابطة). تؤدي إضافة الحشوات إلى زيادة معامل امتصاص الصوت للمادة المركبة بسبب مسامية مواد الحشو. تتناقص المقاومة الحرارية وتزداد الموصلية الحرارية للمادة المركبة المسلّحة بمادة حشو طبيعية بسبب الواجهة الحرارية المتوافقة المتولدة بين مادة الحشو، الألياف والمادة الرابطة. إن تحسين الالتصاق السطحي البيني مع المادة الرابطة، والتحكم في حجم الجسيمات لمادة الحشو، والتحكم في جزء حجم/ وزن مادة الحشو، واختيار المادة الرابطة يجعل المواد المركبة البوليميرية المسلّحة بالحشو أفضل مع خصائص محسنة.

قام Ramkumar Yadav وآخرون عام 2023 [7] بدراسة مراجعة لدور مواد الحشو في تعزيز الخصائص الميكانيكية والحرارية والاهتراء للمواد المركبة البوليمرية. لقد اعتمد البشر دائمًا بشكل كبير على المواد في حياتهم اليومية واستخدموا المواد التقليدية لتلبية احتياجاتهم، ولكن كان لا بد من تطوير مواد جديدة لتلبية متطلبات المجتمع الحديث. ومن خلال دمج عناصر جديدة، من الممكن تغيير خصائص المواد التقليدية. ونتيجة لذلك، يتم مزج مواد مقوّاة (مسلّحة) (بعض المواد الإضافية مثل الألياف، الجسيمات النانوية والمعادن وما إلى ذلك) مع المواد التقليدية لزيادة صفاتها المتنوعة. تتناول هذه الدراسة تأثير مواد الحشوات على الخصائص المختلفة لمركب البوليمير. يتم أيضًا

دراسة متغيرات التحكم لتحليلات الاهتراء المختلفة لمركبات البوليمير. وقد لوحظ أن مواد الحشو لعبت دوراً هاماً في تعزيز الخواص الميكانيكية والحرارية والاهتراء للمواد البوليميرية المركبة.

حيث يتم تصنيف الدراسات للمواد المركبة ذات الأساس البوليميري اعتماداً على:

- طرق تصنيع المواد المركبة ذات الأساس البوليميري.
- تأثير الحشوات على الخواص الفيزيائية والميكانيكية للمواد المركبة ذات الأساس البوليميري.
- تأثير الحشوات على الخواص الحرارية والميكانيكية الحرارية للمواد المركبة ذات الأساس البوليميري.
- تأثير الحشوات على سلوك الاهتراء الكاشط للمواد المركبة ذات الأساس البوليميري.

طرائق البحث ومواده:

A. المادة البوليميرية الرابطة: تم استخدام البولي استر غير المشبع UPR كمادة رابطة إنتاج المملكة العربية السعودية TOPAZ-1600 AT (H.G.T) (MARBLE GRADE (LOW EXOTHERM) PRE-ACCELERATED)

B. المادة البادئة: وهي الميثيل إيثيل كيتون بيروكسيد ((methyl ethyl ketone peroxide (MEKP)) وتضاف إلى مادة البولي استر غير المشبع بنسبة 1.5 % لحدوث التفاعلات في المزيج المستخدم وتحقيق التصلب المطلوب بالمنتج النهائي.

C. مادة الحشو: تم استخدام نوعين مختلفين من مواد الحشو وهي:

1. أوكسيد الألمنيوم أو الألومينا: يتميّز بدرجة انصهار عالية تصل إلى حوالي 2054°C، وقد تم استخدامه على شكل مسحوق أبيض ناعم إنتاج (Lobachemie) وبنقاوة 99.5 % وحجم حبيبي (53 -50) µm ويبين الشكل (1) بنية أوكسيد الألمنيوم:

الشكل (1) بنية أوكسيد الألمنيوم

ويوضح الجدول (1) بعضاً من الخواص الفيزيائية والحرارية لأوكسيد الألمنيوم:

جدول (1) الخواص الفيزيائية والحرارية لأوكسيد الألمنيوم

Melting Point درجة الانصهار	2000 +/- 30 ºC
Density at RT الكثافة	3.9 g/cm^3
Water Absorption-Saturation امتصاص الماء – الإشباع	0 %
Thermal Conductivity at 20 ºC الموصلية الحرارية	28 – 35 W/m-K
Thermal Expansivity, 20 – 1000 ºC التمدد الحراري	8.0 x10-6 m/m-K
Upper Continuous Use Temperature درجة حرارة الاستخدام المستمر الأعلى	1800 ºC

ويوضح الجدول (2) الخواص الميكانيكية:

جدول (2) الخواص الميكانيكية لأوكسيد الألمنيوم

Compressive Strength قوة الضغط	2200 - 2600 MPa
Shear Strength قوة القص	330 MPa
Hardness-Vickers قساوة فيكرز	1500 - 1650 kgf/ mm^2
Tensile Modulus معامل الشد	330 - 400 GPa

2. هباب الفحم Carbon black: تم استخدام هباب الفحم ذو حجم حبيبات nm (50- 30) إنتاج شركة (Al Dewania) لصناعة الإطارات في العراق.

D. تحضير العينات:

- تم تحضير قوالب لتشكيل عينات اسطوانية بقطر داخلي 15 mm وارتفاع يتراوح بين mm (16 -12) كما يظهر الشكل (2):

الشكل (2) قوالب صب العينات

- تم مزج مواد الحشوّ بنسب وزنية مختلفة وبشكل منفصل مع المادة الرابطة (البولي استر غير المشبع) باستخدام خلاط كهربائي، وبعد ذلك تم إضافة المادة المقسية MEPK (methyl ethyl ketone peroxide) بنسبة 1.5 % حتى حدوث التجانس بكتلة المزيج وتم تحضير العينات على الشكل التالي :

A. 5 % مادة حشو + بولي استر غير مشبع.

B. 10 % مادة حشو + بولي استر غير مشبع.

C. 15 % مادة حشو + بولي استر غير مشبع.

- بعد عملية المزج الجيد تم صب المادة البوليميرية المركبة في القوالب المحضرة وتركها حتى حدوث التصلب ضمن درجة حرارة الغرفة. يبين الشكل (3) بعض العينات المنتجة:

الشكل (3) بعض العينات المنتجة

E- القسم التجريبي:

1) حساب الكثافة:

تم حساب كثافة العينة المختبرة بالاعتماد على العلاقة التالية:

$$\rho = \frac{m_1}{v_1}$$

حيث: m_1: وزن العينة قبل الاختبار.

v_1: حجم العينة الاسطوانية المختبرة ويحسب من العلاقة التالية:

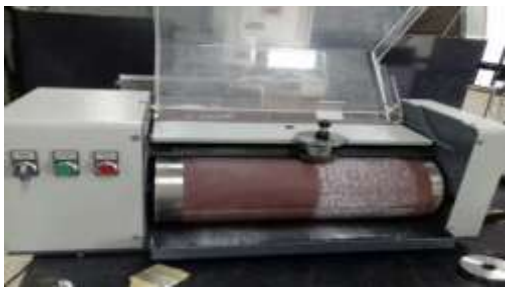
$$v = \pi . r^2 . h$$

وتم استخدام قيم الكثافة الناتجة في حساب حجم الاهتراء (معدل الفقد الحجمي) للعينات المدروسة.

2) تم إجراء عملية معالجة حرارية لعينات المواد المركبة (مركبات UPR الحاوية على AL_2O_3 والحاوية على CB) وذلك عند درجتي حرارة معالجة 60 °C و 80 °C وأزمنة معالجة حرارية مختلفة h (2, 4, 6, 24).

3) جهاز اختبار مقاومة الاهتراء DIN Abrasion Test:

تم تحديد حجم الاهتراء (مقدار الفقد الحجمي) الحاصل لعينات الاختبار بعد إجراء عملية المعالجة الحرارية لها باستخدام جهاز مقاومة الاهتراء (DIN Abrasion Tester) المبين بالشكل (4) والذي يعتمد على تمرير العينة على ورق صنفرة لمسافة شوط معين (40 m) وقياس حجم الاهتراء لهذه العينة نتيجة احتكاكها مع ورق الصنفرة.



الشكل (4) يمثل جهاز مقاومة الاهتراء (DIN)

تم حساب حجم الاهتراء وفق العلاقة التالية:

$$\Delta V = \frac{\Delta m \times 200}{P . \rho}$$

حيث أن: ΔV: الحجم المفقود cm^3/N.

$\Delta m = m_1 - m_2$: وزن المادة المزالة g.

m_1: وزن العينة قبل الاختبار g.

m_2: وزن العينة بعد الاختبار g.

200: ثابت عمل الجهاز.

P: قوة كشط ورق الصنفرة المستخدم حيث تم استخدام ورق صنفرة ذو دليل نعومة P60 وقوة كشط 472 N.

ρ: كثافة العينة المختبرة g/cm^3.

4) جهاز اختبار القساوة Shore D:

يوجد عدة مقاييس لقساوة التحمل وتستخدم من أجل المواد بخصائص مختلفة. حيث المقياسان الأكثر انتشاراً باستخدام نظم قياس مختلفة قليلاً هما : shore A و shore D.

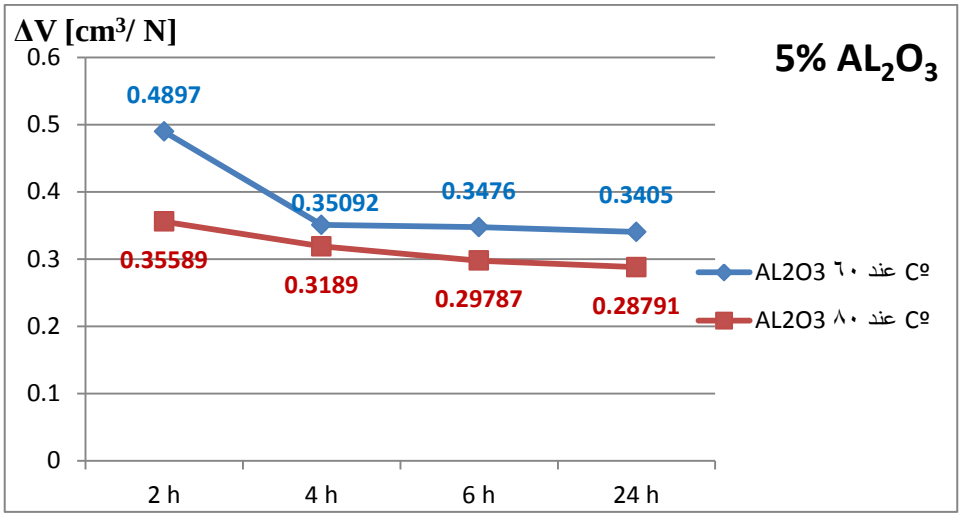
يستخدم مقياس Shore A لاختبار اللدائن المرنة اللينة (soft elastomers) كالمطاط والبوليميرات اللينة الأخرى. بينما يستخدم مقياس Shore D للأنواع الصلبة أكثر حيث يتم قياس قساوة اللدائن المرنة الصلبة ومعظم المواد البوليميرية الأخرى (اللدائن الحرارية Thermoplastic، واللدائن المتصلبة حرارياً Thermostes). في بحثنا هذا تم اختبار قساوة العينات على جهاز قياس القساوة نوع:

(Digital Zwick 3130 Hardness tester to shore) Zwick/ Roell، وتم استخدام مقياس (Shore D) الخاص بقياس قساوة مواد البلاستيك المتصلب حرارياً (thermosetting polymer) وهو عبارة عن ثلم محمّل (indenter loaded) بنابض معايرة (a calibrated spring). ويتم تحديد القساوة بوساطة قياس عمق اختراق الثلم تحت تأثير الحمل، ويعتمد هذا العمق على قساوة المادة، خصائصها اللزجة ومدة الاختبار. وهو مقدار ليس له وحدة قياس، ولا يوجد علاقة بسيطة بين مقياس التحمل للمادة في مقياس واحد ومقياس التحمل في أي مقياس آخر أو عن طريق أي جهاز اختبار قساوة آخر. وبما أن القساوة تتغير مع الزمن تم ضبط زمن الجهاز عند 2 sec. تتضمن طريقة الفحص وضع الجهاز بشكل عمودي على العينة المراد قياس قساوتها لكي تغرز الإبرة (الثلم) في سطح العينة ولفترة انتظار تم ضبطها حوالي ثانيتان بعدها تم قراءة قيمة القساوة من الجهاز، إن الوزن المسلط على العينات يكون حسب المواصفات (DIN 53505) ويساوي 50 N بالنسبة لقساوة Shore D وقد تم أخذ مالا يقل عن خمس قراءات في أماكن مختلفة من سطح العينة. العينة المستخدمة للاختبار هي بقطر 15 mm وارتفاع 6 mm .

النتائج والمناقشة:

تشير الدراسات المرجعية أنه يمكن تسريع عملية التصلب اللاحق الذي يساعد على تحقيق النضج الكامل في بنية المنتج النهائي بواسطة المعالجة الحرارية للمنتجات. وفي دراستنا التجريبية أجريت المعالجات الحرارية وفق النظام الحراري الوارد ذكره بالقسم الخاص بالمواد وطرق الاختبار.

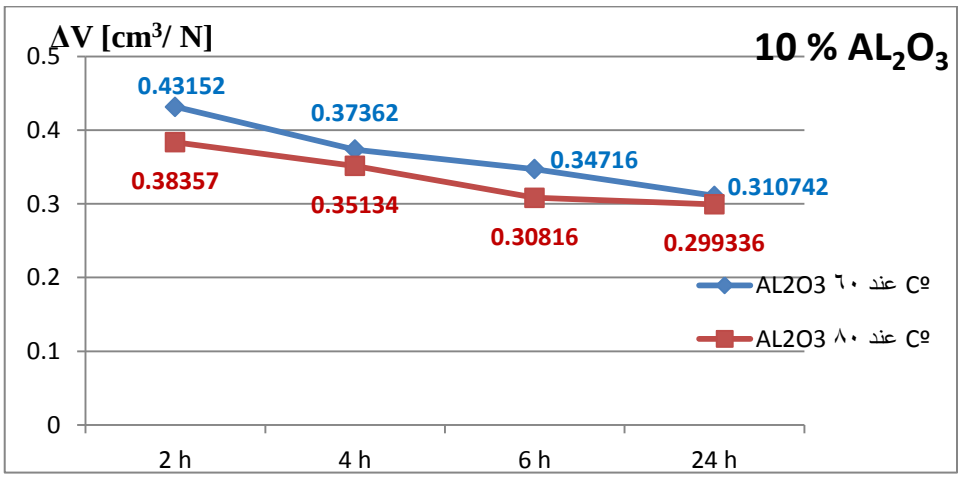
لقد أظهرت النتائج التجريبية التي أجريت لقياس كل من مقاومة الاهتراء والقساوة السطحية عند تطبيق المعالجة الحرارية بدرجات حرارة 60 °C و 80 °C لأزمنة مختلفة (2, 4, 6, 24) h وجود تحسّن واضح بالخواص المذكورة. يظهر الشكل (5) تأثير زمن المعالجة الحرارية ودرجة الحرارة على حجم الاهتراء لمركبات البولي استر غير المشبع الحاوية على 5 % AL_2O_3.



الشكل (5) تأثير زمن المعالجة الحرارية ودرجة الحرارة على حجم الاهتراء لمركبات UPR الحاوية على 1.5 % MEKP و 5 % AL_2O3

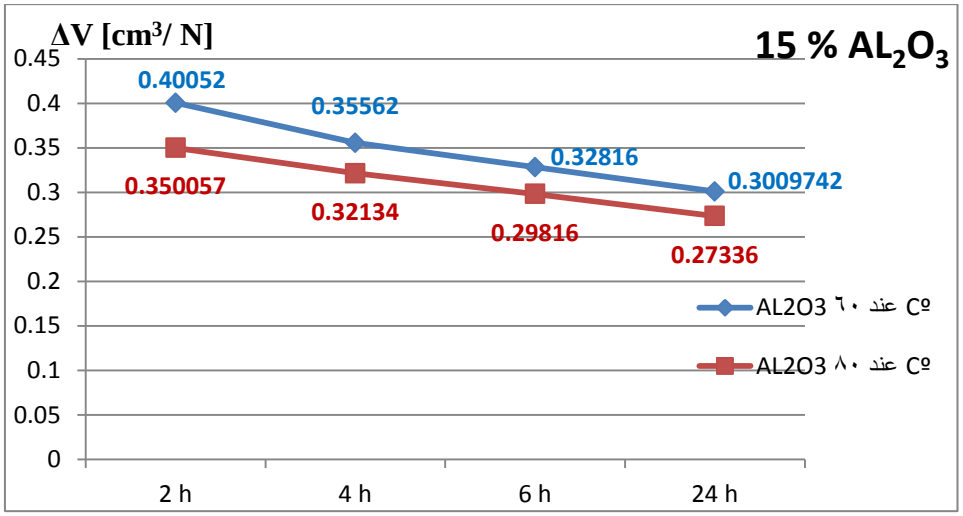
كما هو واضح من الشكل (5) نلاحظ حدوث انخفاض بقيم حجم الاهتراء بدلالة زمن المعالجة، كما نلاحظ استقرار بقيم حجم الاهتراء عند أزمنة المعالجة الحرارية h (24, 6) بالرغم من اختلاف درجة حرارة المعالجة. وتظهر هذه النتيجة أن الزمن المناسب في هذه الحالة هو h 6. من جهة أخرى أيضاً يظهر الشكل (5) تأثير درجة حرارة المعالجة حيث نلاحظ أن المعالجة بالدرجة 80 ºC تحقق نتائج أفضل بالمقارنة مع نتائج المعالجة بالدرجة 60 Cº وهذا ما يظهر بوضوح بانخفاض قيم حجم الاهتراء بزيادة درجة حرارة المعالجة.

بشكل مشابه للنسبة 5 % AL_2O_3 أجريت المعالجة الحرارية على عينات UPR الحاوية على 10 % AL_2O_3 وبشكل مشابه لنظام المعالجة الحرارية. يوضح الشكل (6) التشابه الواضح لمنحنيات حجم الاهتراء مع منحنيات الشكل (5) حيث يلاحظ انخفاض بقيم حجم الاهتراء بزيادة كل من زمن المعالجة ودرجة حرارة المعالجة الحرارية، كما ويلاحظ التقارب بقيم حجم الاهتراء وخاصة عند المعالجة بالدرجة 80 ºC كما نلاحظ ازدياد التحسن بزيادة زمن المعالجة الحرارية عند الدرجة 60 ºC الأمر الذي يشير إلى ضرورة زيادة زمن المعالجة عند هذه الدرجة لعدم الوصول إلى حالة الاستقرار.



الشكل (6) تأثير زمن المعالجة الحرارية ودرجة الحرارة على حجم الاهتراء لمركبات UPR الحاوية على 1.5 % MEKP و 10 % AL_2O3

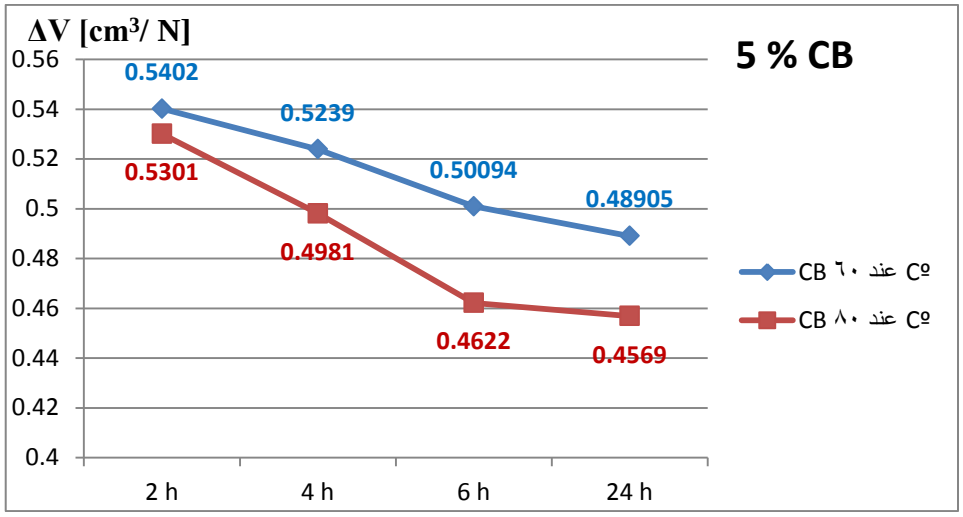
ولهذا السبب تمت دراسة التغيرات الحاصلة بمقدار حجم الاهتراء لعينات من UPR حاوية على نسبة 15 % AL_2O_3 ويظهر الشكل (7) منحنيات حجم الاهتراء بدلالة نظام المعالجة المستخدم. يلاحظ من الشكل (7) انخفاض بقيم حجم الاهتراء بدلالة كل من زمن المعالجة ودرجة الحرارة وعدم الوصول إلى حالة الاستقرار الواضحة بالشكل (5).



الشكل (7) تأثير زمن المعالجة الحرارية ودرجة الحرارة على حجم الاهتراء لمركبات UPR الحاوية على MEKP % 1.5 وAL_2O_3 % 15

أصبح واضحاً أن زيادة نسبة المادة المحشوّة يجعل العينات بحاجة إلى زمن معالجة أكبر للوصول إلى حالة الاستقرار بقيم حجم الاهتراء، وأن تجربة الاهتراء التي تجرى للعينات ستسبب فقد حجمي على الرغم من نظام المعالجة المعتمد، كما ويلاحظ أن قيم حجم الاهتراء الحاصلة متقاربة جداً على الرغم من اختلاف نسب المواد المحشوّة وهي تتراوح من 0.27336 cm^3/N عند النسبة 15% AL_2O_3 ودرجة حرارة للمعالجة 80 Cº والقيمة0.28791 cm^3/N عند النسبة 5 % AL_2O_3 عند الدرجة 80. °C بشكل عام فإن الدراسات التجريبية لقياس مقدار حجم الاهتراء لكافة النسب المدروسة السابقة الذكر وعند درجات حرارة المعالجة الحرارية أظهرت التقارب الكبير بقيم حجم الاهتراء.

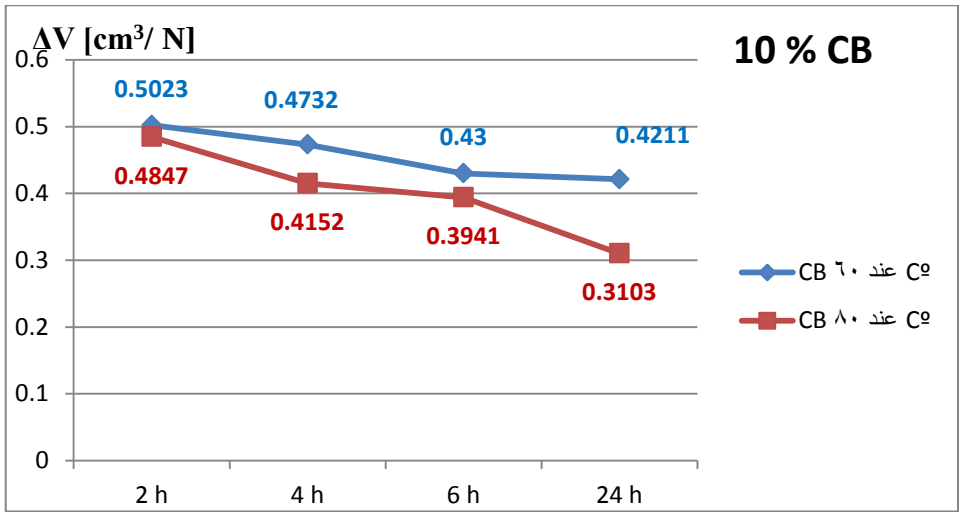
تم دراسة أثر المعالجة الحرارية لمركبات UPR الحاوية على المواد المحشوّة CB حيث يبين الشكل (8) تأثير درجة الحرارة وزمن المعالجة الحرارية على حجم الاهتراء لمركبات UPR الحاوية على نسبة 5 % CB بدلالة النظام الحراري المستخدم بالبحث.



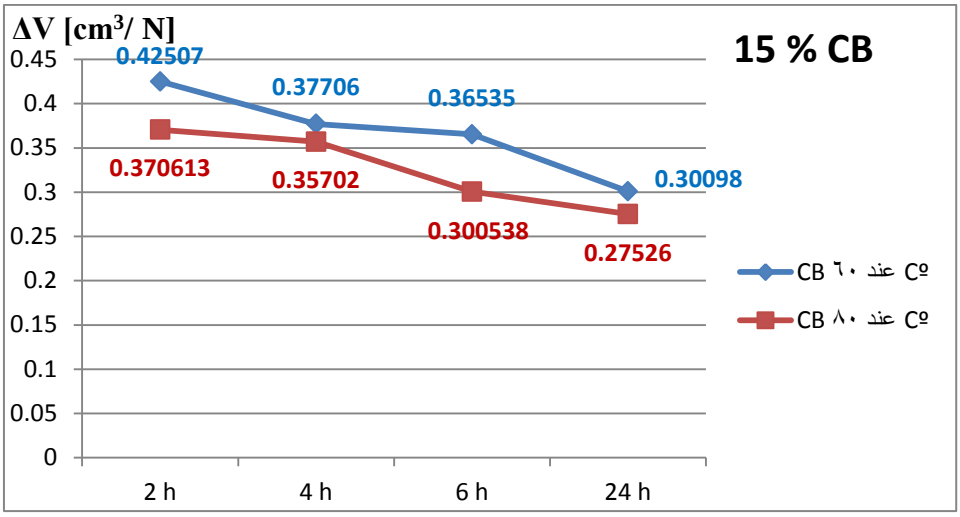
الشكل (8) تأثير زمن المعالجة الحرارية ودرجة الحرارة على حجم الاهتراء لمركبات UPR الحاوية على 1.5 % MEKP و 5 % CB

كما هو واضح من الشكل (8) حدوث انخفاض بقيم حجم الاهتراء بزيادة كل من زمن المعالجة الحرارية ودرجة الحرارة وعدم الوصول إلى الاستقرار بالرغم من استمرار زمن المعالجة لمدة 24 h على عكس النتائج المبينة بالشكل (5) التي أظهرت استقرار نسبي بقيم حجم الاهتراء بعد الزمن 6 h، كما نلاحظ من الشكل (8) أن قيم حجم الاهتراء بإضافة 5 % CB أعلى من القيم عند استخدام 5 % AL_2O_3 .

بهدف إجراء المقارنة الدقيقة لتأثير هباب الفحم مع أوكسيد الألمنيوم تم دراسة تأثير النسب 10, 15) % CB) ويوضح الشكلان (9) و(10) منحنيات حجم الاهتراء لهذه المركبات.



الشكل (9) تأثير زمن المعالجة الحرارية ودرجة الحرارة على حجم الاهتراء لمركبات UPR الحاوية على 1.5 % MEKP و 10 % CB



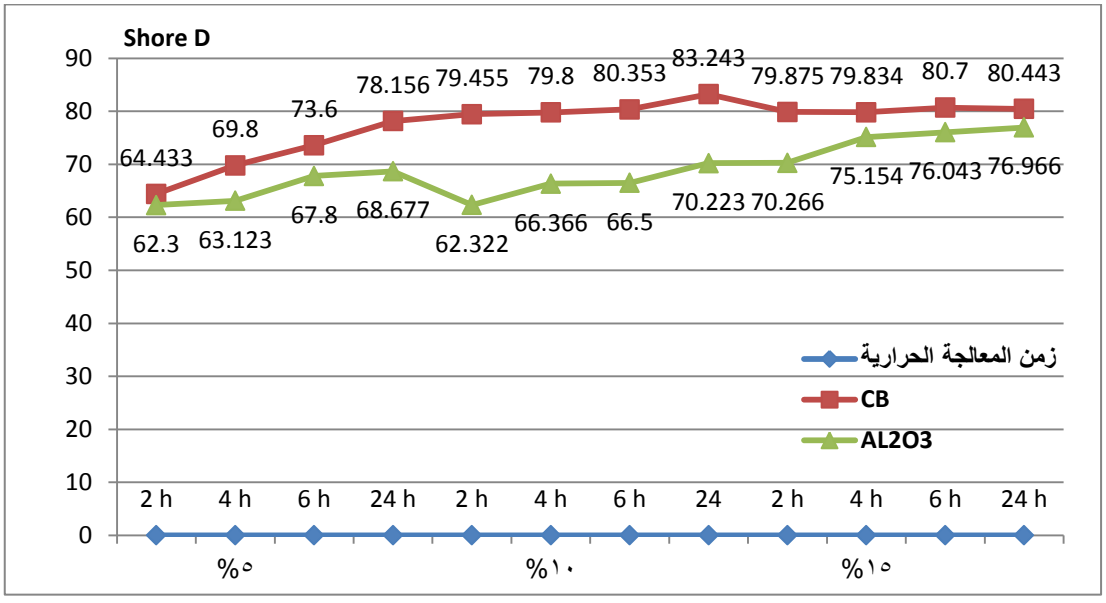
الشكل (10) تأثير زمن المعالجة الحرارية ودرجة الحرارة على حجم الاهتراء لمركبات UPR الحاوية على MEKP % 1.5 و CB % 15

كما هو واضح من الشكلين (9) و(10) انخفاض بقيم حجم الاهتراء للمركبات المدروسة بدلالة نظام المعالجة الحرارية المستخدم عند النسب المذكورة للمادة المحشوّة.

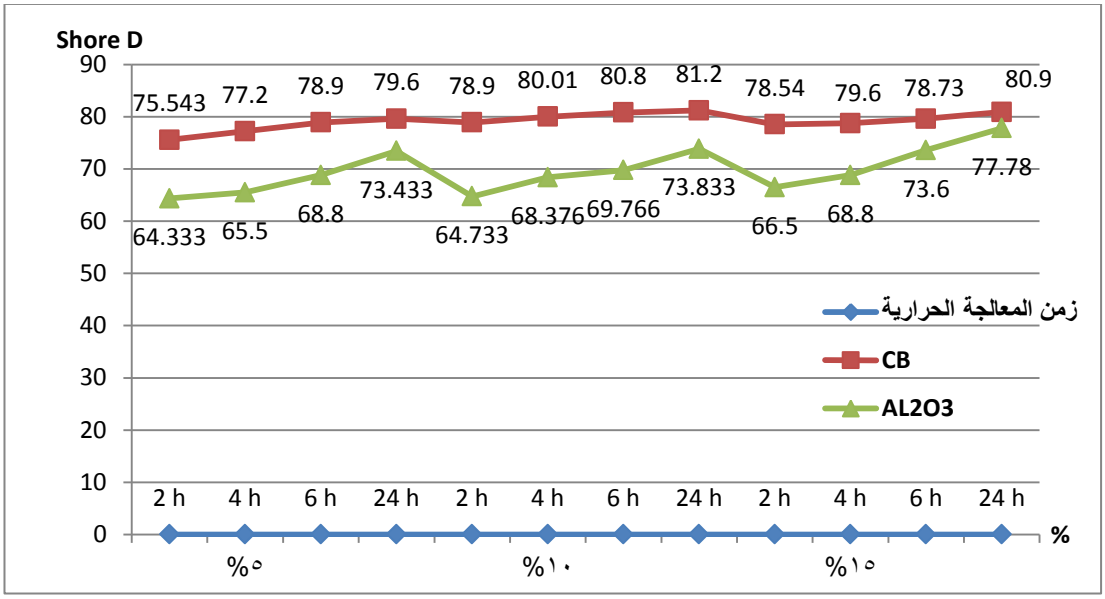
تؤكد النتائج المبينة بالأشكال السابقة ضرورة إجراء المعالجة الحرارية للمنتجات المصنوعة من البولي استر غير المشبع لما لهذه العملية من أثر إيجابي على الخواص المدروسة في هذا البحث لأن المعالجة الحرارية تلعب دوراً مهماً في تحسين البنية الداخلية لمادة البولي استر غير المشبع الحاوية على المواد المحشوّة المستخدمة.

للتأكد من صحة نتائج أثر المعالجة الحرارية السابقة تم دراسة تغير القساوة السطحية حسب Shore D بدلالة نظام المعالجة المتبع.

يظهر الشكلين (11) و(12) تأثير درجة حرارة المعالجة الحرارية وزمن المعالجة على قيم القساوة السطحية Shore D للمركبات الحاوية على نسب مختلفة من AL_2O_3 و CB.



الشكل (10) تأثير درجة حرارة المعالجة الحرارية وزمن المعالجة على قيم القساوة السطحية Shore D للمركبات الحاوية على نسب مختلفة من AL_2O_3 و CB عند درجة حرارة معالجة 60°C



الشكل (11) تأثير درجة حرارة المعالجة الحرارية وزمن المعالجة على قيم القساوة السطحية Shore D للمركبات الحاوية على نسب مختلفة من AL_2O_3 و CB عند درجة حرارة معالجة 80°C

تؤكد نتائج قياس القساوة السطحية صحة النتائج المبينة بمنحنيات حجم الاهتراء حيث تظهر هذه النتائج حدوث تحسن واضح بقيم القساوة السطحية وفق نظام المعالجة الحرارية المعتمد. كما نلاحظ من مخططات القساوة Shore D أن قساوة هباب الفحم CB أفضل من قساوة أوكسيد الألمنيوم AL_2O_3.

الاستنتاجات والتوصيات:

- **الاستنتاجات:**

أظهرت نتائج الاختبارات:

1. إمكانية استخدام مواد الإضافة في تحسين مقاومة السطوح المصنوعة من UPR الاهتراء.
2. وجود تحسّن في حجم الاهتراء عند تطبيق المعالجة الحرارية بدرجات حرارة 60 °C و 80 °C لأزمنة مختلفة (2, 4, 6, 24) h.
3. أظهرت نتائج اختبار الاهتراء بعد تطبيق المعالجة الحرارية أن مركبات UPR الحاوية على AL_2O_3 ذات مقاومة اهتراء أفضل من المركبات الحاوية على CB.
4. وجود تحسّن بقيم القساوة السطحية Shore D بزيادة زمن المعالجة الحرارية.
5. أظهرت نتائج اختبار القساوة Shore D بعد تطبيق المعالجة الحرارية أن مركبات UPR الحاوية على CB ذات قساوة أفضل من المركبات الحاوية على AL_2O_3.

- **التوصيات:**

1. إعادة الدراسة باستخدام أنواع أخرى من مواد البلاستيك المتصلب حرارياً مثل: الإيبوكسي.
2. إعادة الدراسة باستخدام أنواع أخرى من الحشوات سواء مواد عضوية أو لا عضوية.

References:

[1] Ramesh, M., Rajeshkumar, L. N., Srinivasan, N., Kumar, D. V., & Balaji, D. Influence of filler material on properties of fiber-reinforced polymer composites: A review. e-Polymers, 2022; 22(1), 898-916.

[2] Jakab, B., Panaitescu, I., & Gamsjäger, N. The action of fillers in the enhancement of the tribological performance of epoxy composite coatings. Polymer Testing, 2021; 100, 107243.

[3] Ojha, S., Acharya, S. K., & Gujjala, R. Characterization and wear behavior of carbon black filled polymer composites. Procedia Materials Science, 2014; 6, 468-475.

[4] GULL, N; KHAN, SH; MUNAWAR, M; SHAFIQ, M; ANJUM, F; BUTT, M; JAMIL, T. Synthesis and characterization of zinc oxide (ZnO) filled glass fiber reinforced polyester composites. Materials and Design, 2015, PP. 313–317.

[5] Bello, S. A., Agunsoye, J. O., Hassan, S. E. A., & Kana, M. Z. Epoxy resin based composites, mechanical and tribological properties: A review. Tribology in Industry, 2015; 37(4), 500.

[6] ALY, A. A. Heat treatment of polymers: a review. International Journal Of Materials Chemistry and Physics, 2015, 1(2), 132-140.

[7] Yadav, R., Singh, M., Shekhawat, D., Lee, S. Y., & Park, S. J. The role of fillers to enhance the mechanical, thermal, and wear characteristics of polymer composite materials: A review. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2023; 175, 107775.