

تأثير بودرة الألمنيوم على نسبة وأنماط التآكل في مركبات البولي إستر المتصلب حرارياً غير المشبع

هدية عفيصة*

(تاريخ الإيداع 13 / 5 / 2015. قُبل للنشر في 24 / 8 / 2015)

□ ملخص □

يدرس البحث تأثير بودرة الألمنيوم كمادة إضافة لراتنج البولي إستر غير المشبع المتصلب حرارياً (UPR) على نسبة التآكل بالنسبة للزمن وعلى تغير نمط التآكل. بينت النتائج أن نسبة التآكل تزداد مع زيادة زمن الاختبار نتيجة زيادة درجة حرارة الاحتكاك بمرور الزمن وذلك لجميع العينات النقية والحاوية على بودرة الألمنيوم، ولكن عند إضافة بودرة الألمنيوم إلى البولي إستر نلاحظ انخفاض نسبة التآكل مقارنة بالحالة النقية ويزداد هذا الانخفاض مع زيادة نسبة المادة المألثة، أي تزداد مقاومة مادة UPR للتآكل عند زيادة نسبة بودرة الألمنيوم نتيجة زيادة الموصلية الحرارية مما يؤدي إلى انخفاض الحرارة عند سطوح التماس مؤدياً في النهاية إلى تآكل أقل. أما نمط التآكل الناتج بالفحص المجهرى لسطح العينة المتآكل فقد كان يتغير من التآكل الالتصاقى عند القيم المنخفضة لزمن الاختبار ويصبح تآكلاً حاتاً (3-body) عند الأزمنة المرتفعة للاختبار من دون الوصول إلى مرحلة الانهيار في كل مراحل الاختبار ومع اختلاف المادة المختبرة.

الكلمات المفتاحية: البولي إستر غير المشبع، المواد المتصلبة حرارياً، المواد المألثة، بودرة الألمنيوم، معامل التوصيل الحراري، حرارة الاحتكاك.

* عضو هيئة فنية - قسم هندسة التصميم والإنتاج - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

The Effect of Aluminum Powder on the Wear Rate and Mechanisms of Unsaturated Thermosetting Polyester Resin

Hindya Afisa *

(Received 13 / 5 / 2015. Accepted 24 / 8 / 2015)

□ ABSTRACT □

This experiment investigates the effect of aluminum powder as metallic filler of unsaturated thermosetting polyester resin on the wear rate and its mechanisms according to time.

The obtained results show that the rate of wear increases with increase of time as a result of increase the temperature generated of friction in all specimens. But when we add the particles either Aluminum to polyester matrix, the rate of wear reduce as a result of increase the thermal conductivity of polyester matrix, that leads reduction of the temperature of contact surface, that leads less wear. We study the mechanisms of wear by microscope of the worn surface. It found that the predominant mechanisms of wear vary from adhesive wear at the lowest value of test time to abrasive wear (3- body) at the highest value of test time.

Keywords: Unsaturated Polyester, Thermosetting Materials, Filler Materials, Aluminum Powder, Friction Temperature.

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

مقدمة:

إن التطور السريع للصناعة جعل الجميع يتجه لاستخدام مواد تتمتع بمزايا جيدة وكلفة قليلة، فتم استخدام المواد البوليميرية، حيث إن مزايا المواد البلاستيكية جعلتها تزيح الكثير من المواد الأخرى المختلفة عن كثير من مجالات الاستخدام وتحل محلها، فهي مواد خفيفة الوزن، مقاومة للتآكل و للرطوبة، سهلة التصنيع، قليلة الهدر الصناعي، اقتصادية جداً، ويمكن تحسين أصناف كثيرة منها (بإضافة بعض المواد الإضافية ، وكذلك بإضافة مواد التسليح المختلفة) لتلائم كل الاحتياجات والخواص المطلوبة: فمنها القاسي والمتين ومنها المقاوم والمرن. ولكن هذا لا يعني بالتأكيد خلوها من العيوب، إنما مقارنة الميزات مع المساوئ جعل العالم كله يتجه إليها من دون تردد [1].

للبوليميرات مزايا كثيرة تسمح باستخدامها كمحامل منها: قدرة المحامل البوليميرية على العمل بشروط جافة (لا تحتاج إلى تزييت)، تملك بعض المواد البوليميرية مقاومة صدم ممتازة مثل البولي إيثيلين عالي الكثافة والبولي كاربونات، تبدي المحامل البوليميرية معامل احتكاكٍ منخفضٍ، كما تملك البوليميرات مقاومة جيدة للصدأ ومقاومة كيميائية وكهربائية جيدة- ومعظم اللدائن لها وزن نوعي منخفض يتراوح بين $[1.1-1.6] \text{ gr/cm}^3$ ولذلك فهي ضمن المواد الأخفض وزناً من المواد الهندسية، كما تبدي البوليميرات قدرة تشكيل عالية، وتتمتع بكلفة إنتاج منخفضة ومعدل إنتاجية عال. بالإضافة للمزايا التي تسمح باستخدام المواد البوليميرية كمحامل. وهناك بعض المساوئ التي تقيد استخدامها من مثل: أن البوليميرات لها موصلية حرارية قليلة مقارنة بالمعادن لذلك تكون أقل قدرة على تبديد الحرارة الناتجة عن الاحتكاك عند سطوح التماس، وقدرة رفع الحمل للمحامل البوليميرية هي أقل بكثير من تلك التي للمحامل المعدنية التي لها الحجم نفسه، فضلاً عن عدم استقرار الأبعاد لبعض البوليميرات بسبب معامل تمددها الحراري المرتفع وقدرتها على امتصاص بعض السوائل [2,3].

إن السبب الرئيسي لانتهيار أجزاء الآلات هو نمط التآكل الحاصل ونسبته، والحل الطبيعي لمشكلة التآكل هو استخدام مواد ذات مقاومة جيدة للتآكل بالإضافة إلى تزييت جيد ولكن في بعض التطبيقات مثل الصناعات الغذائية تكون زيوت التشحيم غير مسموح بها ولذلك كان حل هذه المشكلة عن طريق استخدام المواد المركبة.

أهمية البحث وأهدافه:

إن الهدف الرئيسي لهذا البحث هو دراسة استخدام المادة المركبة المؤلفة من البولي إستر غير المشبع وبودرة الألمنيوم كمحمل في الآلات الغذائية المنزلية. كما تكمن أهمية البحث في السعي لتقليل التآكل الحاصل نتيجة الحرارة الناتجة عن الاحتكاك في أجزاء الآلات التي تستخدم المواد المركبة البوليميرية المتصلبة حرارياً (البولي إستر غير المشبع) عن طريق تدعيم هذه المواد بمواد إضافية معدنية (بودرة الألمنيوم). أي سنقوم بدراسة تأثير تدعيم البولي إستر ببودرة الألمنيوم على نسبة التآكل الحاصلة ونمطه وفقاً لتغير درجة حرارة الاحتكاك. الدراسات المرجعية:

درس Lan-Hui Sun وآخرون [4] سلوك التآكل والاحتكاك للبولي إستر المدعم ببودرة البولي تيترا فلورو إيثيلين (PTFE)، وبينت النتائج أن إضافة (PTFE) أدت إلى تحسين خصائص التآكل والاحتكاك لمركب البولي إستر، حيث تم تخفيض كل من نسبة التآكل ومعامل الاحتكاك.

درس Jawahar وآخرون [5] سلوك التآكل والاحتكاك لمركب البولي إستر غير المشبع المدعم بطين عضوي Organic Clay تاراً وطين لا عضوي Inorganic Clay تاراً أخرى. بينت النتائج انخفاض كل من معامل الاحتكاك ونسبة التآكل بشكل ملحوظ عند التدعيم بالطين العضوي، بينما يزداد مع الزيادة في نسبة التدعيم بالطين اللاعضوي.

درس Hashmi وآخرون [6] سلوك الاحتكاك والتآكل الانزلاقي لمركبات البولي إستر المدعمة بألياف قطن عند إضافة حبيبات الغرافيت إليها. بينت النتائج أن نسبة تآكل البولي إستر تنخفض عند تدعيمه بألياف القطن وتنخفض أكثر عند إضافة حبيبات الغرافيت، وأن معامل الاحتكاك يزداد عند تدعيمه بألياف القطن ولكنه ينخفض بشكل ملحوظ عند إضافة حبيبات الغرافيت ويزداد انخفاضه مع زيادة نسبة حبيبات الغرافيت، حيث يقوم الغرافيت بدور مزيت في شروط الانزلاق الجاف.

درس Yousif [7] سلوك الاحتكاك والتآكل لمركبات البولي إستر المدعمة بألياف جوز الهند المركبة بشكل متعدد الطبقات ثلاث أو أربع طبقات، فبينت النتائج أن معامل الاحتكاك الأعلى كان في المركبات ذات الطبقات الأربع، وتبدي المركبات ذات الطبقات الثلاث أداءً احتكاكياً وتآكلياً أفضل مقارنة مع تلك الحاوية على أربع طبقات والبولي إستر النقي.

درس Hashmi وآخرون [8] سلوك التآكل والاحتكاك لمركبات البولي إستر المدعمة بألياف القطن عند إضافة البولي إيثيلين ذي الوزن الجزيئي العالي (UHMWPE) إليها. بينت النتائج أنه تم تخفيض نسبة تآكل البولي إستر عند تدعيمه بألياف القطن وبإضافة UHMWPE، وازداد معامل الاحتكاك بتدعيمه بالقطن ونقص بشكل كبير بإضافة UHMWPE.

درس Yousif و El-Tayeb [9] تأثير تدعيم البولي إستر بألياف نخلة الزيت Oil Palm المعالجة وغير المعالجة على خصائص التآكل الحات Body-3. بينت النتائج أن المركبات المدعمة بألياف Oil Palm المعالجة تبدي سلوكاً تآكلياً أفضل مقارنة مع تلك المركبات المدعمة بألياف Oil Palm غير المعالجة أي الالتصاق البيئي للألياف المعالجة في البولي إستر كان أفضل مقارنة بالألياف غير المعالجة. علاوة على ذلك، فإن ألياف Oil Palm المعالجة خفضت مسامية المركب، وكذلك حسنت خصائص السطح الاحتكاكية.

درس Yousif و El-Tayeb [10] تأثير تدعيم البولي إستر بألياف طبيعية Oil Palm تاراً وبألياف صناعية (ألياف زجاجية) تاراً أخرى على التآكل، بينت النتائج أن المركبات المدعمة بألياف Oil Palm تبدي خصائص تآكل أفضل مقارنة مع تلك المدعمة بألياف زجاجية.

درس Me William وآخرون [11] سلوك الاحتكاك والتآكل الالتصاق لمركب البولي إستر المدعم بألياف betelnut (بذرة الفوفل: نوع من النخيل) في شروط التماس الرطب والجاف. بينت النتائج أن مركب البولي إستر المدعم بألياف betelnut يملك سلوكاً احتكاكياً وتآكلياً أفضل في شروط التماس الرطب مقارنة مع الجاف.

درس Samyn وآخرون [12] سلوك الاحتكاك والتآكل الانزلاقي لمركب البولي إستر المدعم بألياف زجاجية، وتم الحصول على أغشية مزاحة من سطح المركب تبين أن لها دوراً في تخفيض الاحتكاك.

طرائق البحث ومواد:

1. مواد البحث:

إن المواد المستخدمة في هذه الدراسة هي البولي إستر غير المشبع بشكل راتنج (ريزن) والمجفف (الكوبالت نفتنات) والمقسي (بيروكسيد الميثيل إيثيل كيتون (MEKP)) ومادة التدعيم وهي بودرة الألمنيوم، وجميع هذه المواد متوافرة في السوق في سورية.

أ. البولي إستر غير المشبع (المادة الأساس):

تم استخدام مادة البولي إستر غير المشبع (Unsaturated Polyester Resin) إنتاج شركة Zhejiang Tianhe Resin Coltd-Made in China كمادة بوليميرية أساسية في البحث، حيث تتميز البولي إسترات غير المشبعة (UP) بأنها متعددة المزايا، فيمكن أن تكون صلبة، رجوعية بعد امتطاطها، مرنة، مقاومة للاحتكاك و للتآكل، مقاومة لتغيرات الظروف الجوية، ومثبطة للهب Flame-Retardant، وتتمتع أيضاً بثبات حجمي، صلابة كبيرة جداً، تماسك ممتاز مع مواد التدعيم، ثبات كيميائي مقبول، عازليه كهربائية عالية، قابلية للتلون، متانة عالية، مقاومة عالية للتعب، خفة الوزن، سهولة التصنيع.

ويمكن أن تكون محشوة (مقواة) أو غير محشوة، كما يمكن استعمالها في درجة حرارة الجو المحيط أو في درجات الحرارة العالية، وهي مادة رخيصة الثمن ومتوافرة بالسوق.

تتحسن خواص البولي إستر غير المشبع الميكانيكية والكهربائية والحرارية بوجود مواد المائلة فمثلاً: يثبت البولي إستر غير المقوى بألياف زجاجية أمام درجة حرارة تصل حتى $70^{\circ}C$ أما البولي إستر المقوى بألياف زجاجية فإنه يصمد أمام درجة حرارة تصل حتى $200[1,13]^{\circ}C$.

تمتلك مواد البولي إستر غير المشبع العديد من الميزات الهامة قبل تصلبها مثل:

- اللزوجة المناسبة التي تسمح باستخدامها على نطاق واسع بعملية التشكيل بالسكب.
- خاصية التصلب حتى بدرجات الحرارة العادية، كما هي بدرجات الحرارة العالية.
- عدم إطلاقها مواد متطايرة أثناء حدوث التفاعل، وبعد حدوث التصلب.

تتميز التفاعلات الحاصلة في أثناء عملية التصلب بأنها تفاعلات ناشرة للحرارة إذ يمكن أن تصل درجة حرارة المزيج إلى أكثر من $200^{\circ}C$. ويمكن لعملية التصلب أن تتم على البارد، أي بدرجة حرارة الغرفة، أو على الساخن وذلك وفقاً لمقتضيات عملية التصنيع.

ومن خواص هذه المادة أنها شفافة شبه معتمة، مقاومة للماء والظروف المناخية (مع مرور الزمن)، مقاومة

للأبخرة الكيميائية [14,15]. ويبين الجدول (1) بعض خواص البولي إستر المتصلب حرارياً:

الجدول(1): خواص البولي إستر غير المشبع [13].

الوزن النوعي	gf / cm^3 1.1-1.46
الحجم النوعي	cm^3 / g 0.684-0.907
مقاومة الشد	kgf / cm^2 422-914
الاستطالة	<5 %
عامل مرونة الشد	$2.1-4.5 kgf / cm^2 \times 10^4$
مقاومة الضغط	kgf / cm^2 914-2109
مقاومة الانعطاف	kgf / cm^2 597-1617
قساوة روكويل أو شور	70M-115M
الناقلية الحرارية	$cal / cm.sec.^{\circ}C \times 10^{-4}$ 4.6
عامل التمدد الحراري	$\frac{mm}{mm} .^{\circ}C \times 10^{-5}$ 3.5-1.0
أكبر درجة حرارة تقاومها المادة بشكل مستمر	$121^{\circ}C$
الصفة البصرية	شفاف-كامد
تأثير أشعة الشمس	يصفّر
تأثير الحموض القوية	يتأثر قليلاً
قابلية التشغيل	جيد

ب. بودرة الألمنيوم (المادة المألثة):

الألمنيوم هو فلز ذو لون أبيض فضي وهو معدن مطلي، وعنصر غير ذواب في الماء والكحول، يتوافر بكثرة ويمتاز بمقاومته للتآكل وبخفة وزنه حيث يدخل في صناعة الطائرات. وهو معدن متين، غير ممغنط، جيد التوصيل للحرارة والكهرباء. مقاومة الخضوع للألمنيوم النقي هي $7-11 [Mpa]$ ، ولالألمنيوم نحو ثلث كثافة وجساءة الفولاذ وهو سهل التشغيل والسباكة والبيثق، وهو قابل للسحب والطرق حيث يمكن قولبته بشكل سهل نسبياً. تعود قدرة الألمنيوم الممتازة على مقاومة التآكل إلى الطبقة السطحية الرقيقة من أكسيد الألمنيوم التي تتشكل عندما يتعرض الفلز للهواء مما يمنع استمرار عملية الأكسدة.

وللألمنيوم خواص أخرى هامة منها: صلابته العالية، مقاومته العالية للصدأ، مقاومته الجيدة للحريق بفعل عدم اشتعاله فالألمنيوم ينصهر عند درجة حرارة $660^{\circ}C$ ، عازليته للماء، إمكانية إعادة استخدامه (Recycling) من دون أن تفقد المادة خصائصها. وتعتبر عمليات إعادة استخدام الألمنيوم ناجحة جداً اقتصادياً حيث توفر من الطاقة اللازمة لتصنيع الألمنيوم من جديد [16]، ويبين الجدول (2) بعض خواص الألمنيوم:

الجدول(2): خواص الألمنيوم [17].

الحالة	صلب
كثافته عند درجة حرارة الغرفة	2.7 gr/cm^3
نقطة الانصهار	660.32°C
نقطة الغليان	2519°C
طاقة حرارة الانصهار	10.71 KJ/mol
طاقة حرارة التبخر	294.5 KJ/mol

2. طريقة البحث:

أ. تحضير العينات:

تم تصميم وتنفيذ قالب لصب العينات (صنع من الألمنيوم) للحصول على عينات بالأبعاد التالية: للعينة شكل حلقة قطرها الداخلي 20[mm] وقطرها الخارجي 40[mm] وارتفاعها 15[mm]. تم خلط المادة الأساس (البولي إستر) مع المقسي والمجفف بعد وزنه بميزان حساس دقته 0.001[g] حيث كانت النسب الوزنية كما يأتي: 100[gr] (بولي إستر غير مشبع): 2 (كوبالت): 1 (مقسي) [18]، ثم إضافة بودرة الألمنيوم وفق نسبتي أحدهما منخفضة 10% والأخرى مرتفعة 30%. ثم تترك العينات (18 عينة: 6 نقية، 6 حاوية على بودرة الألمنيوم بنسبة منخفضة 10%، 6 حاوية على بودرة الألمنيوم بنسبة مرتفعة 30%) لمدة 7 أيام ليكتمل تصلبها وإزالة الإجهادات المتبقية الناتجة عن التحريك والصب منها قبل اختبارها. تم التأكد من أن لجميع العينات النقية والمدعمة القساوة نفسها وذلك بإجراء اختبار روكويل للقساوة عليها، حيث كانت قيمتها 35HRH. يوضح الشكل (1) شكل العينات قبل الاختبار:



عينة بولي إستر مدعمة بـ 30% Al.



عينة بولي إستر مدعمة بـ 10% Al.



عينة بولي إستر نقية.

الشكل (1): شكل العينات قبل الاختبار.

ب. الأجهزة المستخدمة: تم استخدام ميزان حساس لقياس وزن العينة قبل الاختبار وبعده، وهو من النوع Sartorius TE 1535، والوزن الأعظمي الذي يتم وزنه هو $W_{\max} = 150 \text{ [gr]}$ ، وحساسية الميزان $d = 0.001 \text{ [gr]}$ ، ومجهر لتكبير سطح العينة (تم التكبير 100 مرة) وإظهار نوع التآكل الحاصل ومقياس حرارة حساس لقياس درجة الحرارة الناتجة عن الاحتكاك تحت تأثير ظروف التشغيل، مجال قياسه ($-50 \div 140^\circ\text{C}$) ومؤقت زمني لقياس زمن الاختبار لكل عينة و جهاز قياس التآكل وهو الجهاز الذي تم تصميمه خصيصاً لغرض البحث أي لإجراء اختبارات التآكل للعينات المصبوبة، والأجهزة المستخدمة موضحة بالشكل(2):



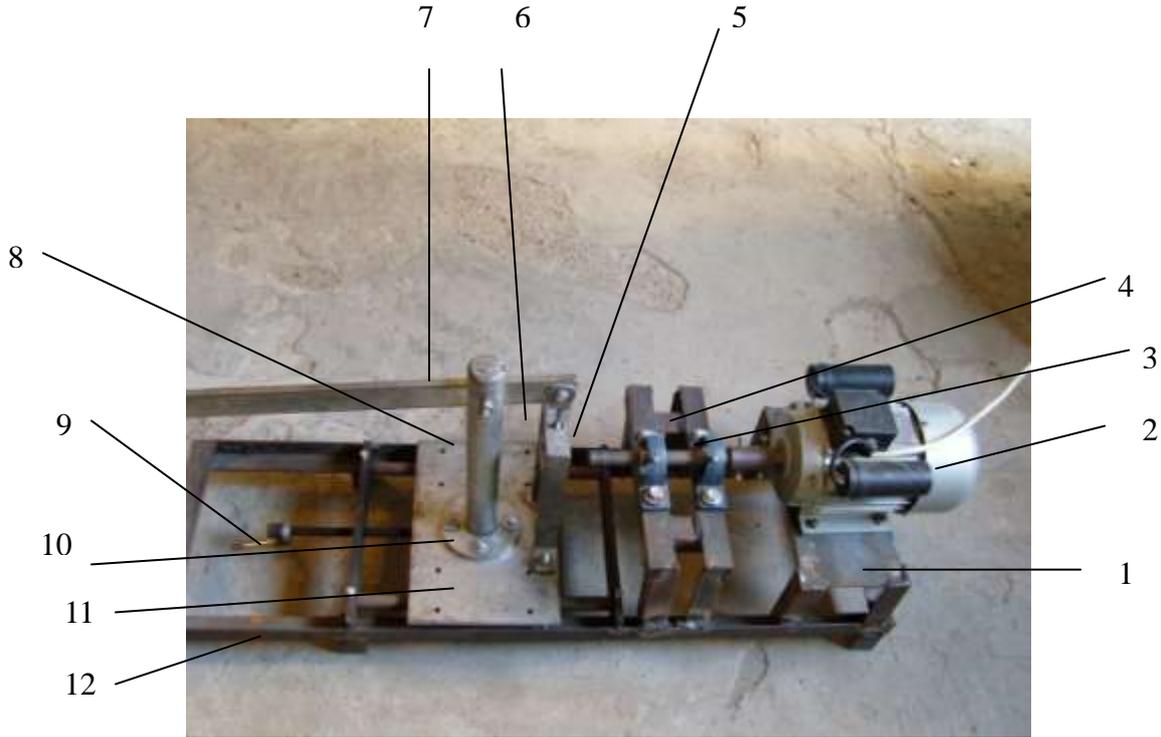
المجهر المستخدم.



مقياس الحرارة.



الميزان الحساس.



جهاز قياس التآكل المصمم مع ملحقاته.

- | | |
|-----|---|
| 1. | قاعدة تثبيت المحرك. |
| 2. | المحرك. |
| 3. | رولمان. |
| 4. | قواعد تثبيت العمود. |
| 5. | العمود. |
| 6. | مجري يجوي إطار العينة. |
| 7. | ذراع متأرجحة تؤمن الحمل للعينة. |
| 8. | عمود يسند الذراع المتأرجحة ويؤمن حركتها. |
| 9. | محور دوران. |
| 10. | فلنجة. |
| 11. | قاعدة تثبيت جهاز قياس التآكل. |
| 12. | قاعدة تثبيت الجهاز مع ملحقاته (قاعدة أساسية). |

الشكل (2): الأجهزة المستخدمة.

ج. اختبار التآكل:

إن الآلة الغذائية المدروسة هي الخلاط (خلاط الفواكه) وقد تم اختيارها لدراسة الاحتكاك والتآكل بين القطعتين البلاستيكيتين الموجودتين أسفل الخلاط، حيث تم تغيير المادة التي صنعت منها هاتان القطعتان بهدف تقليل التآكل، حيث استخدمنا مادة البولي إستر وقمنا بإضافة بودرة ألمنيوم بنسبة منخفضة (10%) ونسبة مرتفعة (30%) لندرس الفرق بينها من ناحية مقدار التآكل الحاصل ونمطه مع تغير درجة حرارة الاحتكاك الناتجة ومن ثم اختيار المادة الأنسب لهذه القطعة أي أن نسبة التآكل الأكثر انخفاضاً ونمط التآكل الأقل حدةً (لا يصل إلى نمط التآكل بالتعب)

الموافقين لدرجة حرارة الاحتكاك الناتجة الأخفض قيمةً توافقان المادة الأنسب للاستخدام في هذه القطعة. أما باقي البارامترات مثل السرعة فهي ثابتة بالخلاط وتساوي إلى سرعة المحرك 1500[r.p.m] وهي قيمة مرتفعة نسبياً وتؤدي إلى توليد حرارة مرتفعة نسبياً، وكذلك الأمر بالنسبة للحمل فهو ثابت تقريباً في الخلاط وإن تغير فبنسبة منخفضة حيث تكون عادةً كمية المواد الغذائية المستخدمة في الخلاط قليلة وقد افترضنا وسطياً قيمةً للحمل [kgf] 2، أما بالنسبة للزمن فقد قمنا بإجراء التجارب تحت تأثير أزمنة مختلفة حتى [min] 30 حيث يتم عادةً استخدام الخلاط لمدة أقل من [min] 30، وقد تم التركيز في الدراسة على نوع المادة فقط (بولي إستر نقي، بولي إستر مع مادة مألثة وهي بودرة ألومنيوم) حيث تتغير درجة الحرارة الناتجة عن الاحتكاك بتغييرها، وبالتالي تتغير نسب التآكل وأنماطه في العينات المختبرة لدراسة تأثير هذه الإضافات على نسبة التآكل ونمطه وقرارنا بين العينات النقية والمملوءة للوصول إلى الأفضل.

تمت جميع الاختبارات في درجة حرارة الغرفة، وتم حساب نسبة التآكل بطريقة فرق الوزن قبل اختبار العينة وبعده من العلاقة:

$$w_r = \frac{\Delta M / t}{\rho} \left[\frac{mm^3}{sec} \right]$$

حيث:

$$\frac{\Delta M}{t} = \frac{m_2 - m_1}{t}$$

حيث: $\Delta M / t$: الوزن المفقود خلال الزمن ويقدر بـ $\left[\frac{gr}{sec} \right]$. ΔM فرق الكتلة [gr].

m_2 : الوزن قبل الاختبار [gr]. m_1 : الوزن بعد الاختبار [gr]. t: الزمن [sec]. ρ : الكثافة [gr / mm^3].

النتائج والمناقشة:

1. قيمة نسبة التآكل ونمطه في عينات البولي إستر النقية (غير المملوءة):

تم صب ست عينات من البولي إستر النقي ثم اختبرت العينات في جهاز قياس التآكل في ظروف التشغيل السابقة لمعرفة نسبة التآكل ونمطه الحاصل بتأثير حرارة الاحتكاك وذلك عن طريق رسم مخططات التآكل (علاقة نسبة التآكل مع الزمن) ومن ثم دراسة علاقة درجة الحرارة مع نسبة التآكل.

يظهر الشكل (3) أنماط التآكل الحاصلة في سطح عينة نقية.



التآكل الحات في المرحلة الثالثة



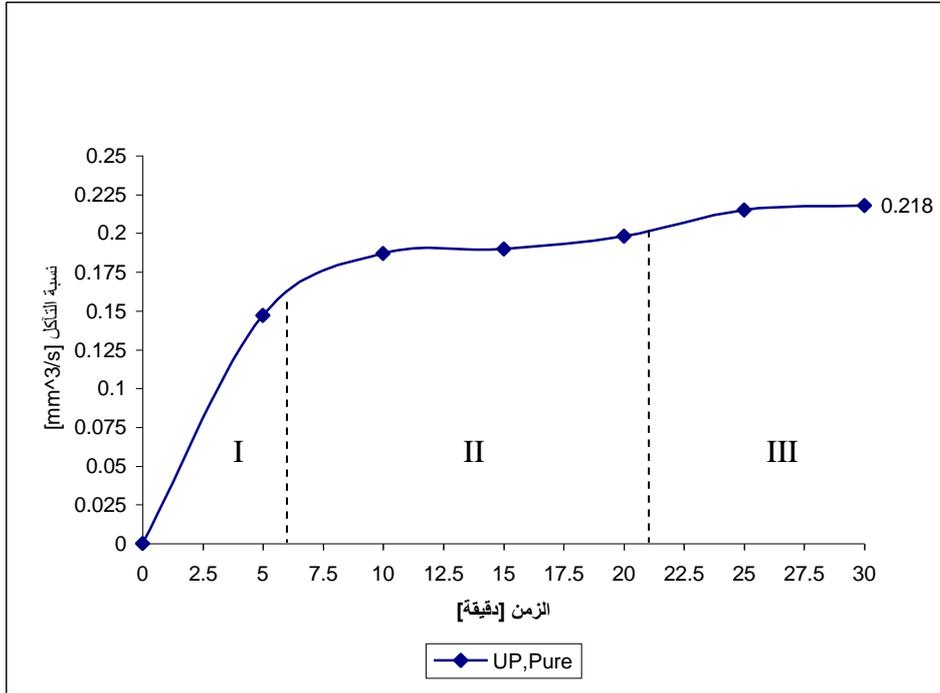
التآكل الحات في المرحلة الثانية



التآكل الالتصاقي في المرحلة الأولى

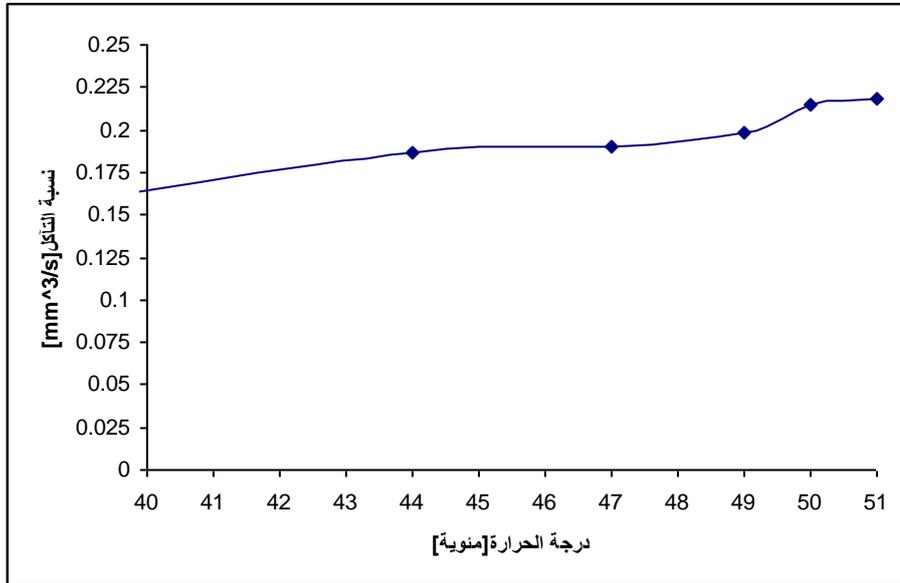
الشكل (3): أنماط التآكل الحاصلة في سطح عينة نقية.

يظهر الشكل (4) مخطط التآكل لعينات البولوي إستر النقية:



الشكل (4): العلاقة بين نسبة التآكل وزمن الاختبار لعينات البولوي إستر النقية.

يوضح الشكل (5) تغير درجة حرارة الاحتكاك مع نسبة التآكل لعينات البولوي إستر النقية:



الشكل (5): تغير درجة حرارة الاحتكاك مع نسبة التآكل لعينات البولوي إستر النقية.

نلاحظ من الشكل (4) أن التآكل يمر بثلاثة مراحل خلال عمر العينة، ففي المرحلة الأولى تزداد نسبة التآكل بشكل كبير جداً خلال فترة زمنية قصيرة بحيث تصل إلى $0.1471 \left[\frac{mm^3}{sec} \right]$ عند الزمن $5[min]$ وفي هذه المرحلة تزداد درجات الحرارة (التي كانت $29^\circ C$ في بداية الاختبار) مع زيادة زمن الاختبار بشكل سريع حتى تصل إلى القيمة $37^\circ C$ عند الزمن $5[min]$ وعند نسبة التآكل $0.1471 \left[\frac{mm^3}{sec} \right]$ كما في الشكل (5) ويبين تحليل سطح العينة المتآكل أن نمط التآكل الحاصل تحت ظروف التشغيل كان تآكل التصاق وخلال المرحلة الثانية من عمر العينة الشكل (4) تزداد نسبة التآكل بشكل أقل مما في المرحلة الأولى أي يستمر التآكل في الازدياد بعد المرحلة الأولى بنسبة أقل مائلاً إلى قيمة ثابتة تقريباً حيث لا تتأثر نسبة التآكل كثيراً بزمن الاختبار حيث تصل نسبة التآكل في نهاية المرحلة الثانية من عمر العينة إلى $0.198 \left[\frac{mm^3}{sec} \right]$ عند الزمن $20[min]$ وتكون عندها درجة حرارة الاحتكاك المقابلة $49^\circ C$ الشكل (5)، حيث نلاحظ زيادة درجة الحرارة مترافقة مع زيادة نسبة التآكل وكان نمط التآكل السائد في هذه المرحلة هو تآكل حات، أما في المرحلة الثالثة فتزداد نسبة التآكل بشكل بسيط من دون الوصول إلى مرحلة الانهيار، حيث تصل إلى $0.218 \left[\frac{mm^3}{sec} \right]$ عند الزمن $30[min]$ وتكون عندها درجة حرارة الاحتكاك المقابلة $51^\circ C$ وأيضاً كان نمط التآكل السائد فيها هو حات ولا يوجد أي دليل على وصول المادة لمرحلة التعب.

2. قيمة نسبة التآكل ونمطه في عينات البولي إستر المملوءة بوردرة الألمنيوم بنسبة 10%:

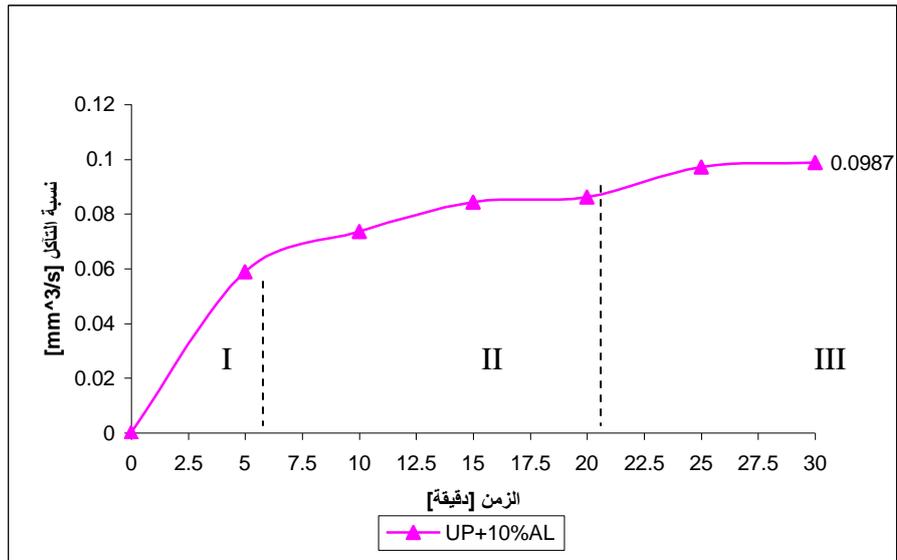
تم صب ست عينات من البولي إستر المملوءة بوردرة الألمنيوم بنسبة 10%، ثم اختبرت العينات في جهاز قياس التآكل في ظروف التشغيل السابقة لمعرفة نسبة التآكل ونمطه الحاصل بتأثير حرارة الاحتكاك وذلك عن طريق رسم مخططات التآكل (علاقة نسبة التآكل مع الزمن) ومن ثم دراسة علاقة درجة الحرارة مع نسبة التآكل، يظهر الشكل (6) أنماط التآكل الحاصلة في سطح عينة تحوي 10%AL.



التآكل الالتصاق في المرحلة الأولى التآكل الحات في المرحلة الثانية التآكل الحات في المرحلة الثالثة

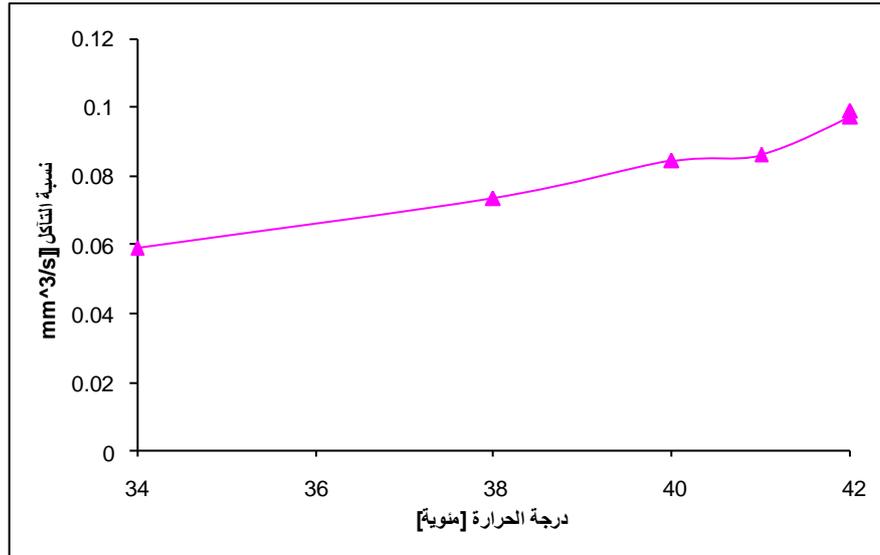
الشكل (6): أنماط التآكل الحاصلة في سطح عينة تحوي 10%AL.

يظهر الشكل (7) مخطط التآكل لعينات البولي إستر المملوءة 10%AL:



الشكل (7): العلاقة بين نسبة التآكل وزمن الاختبار لعينات البولي إستر المملوءة 10%AL.

يوضح الشكل (8) تغير درجة حرارة الاحتكاك مع نسبة التآكل لعينات البولي إستر المملوءة 10%AL:



الشكل (8): تغير درجة حرارة الاحتكاك مع نسبة التآكل لعينات البولي إستر المملوءة 10%AL.

نلاحظ من الشكل (7) أن التآكل يمر بثلاث مراحل خلال عمر العينة، ففي المرحلة الأولى تزداد نسبة التآكل

بشكل كبير جداً خلال مدة زمنية قصيرة بحيث تصل إلى $0.0588 \left[\frac{mm^3}{sec} \right]$ عند الزمن 5 [min] وفي هذه المرحلة

تزداد درجات الحرارة (التي كانت 29 °C في بداية الاختبار) مع زيادة زمن الاختبار بشكل سريع حتى تصل إلى

القيمة 34 °C عند الزمن 5 [min] وعند نسبة التآكل $0.0588 \left[\frac{mm^3}{sec} \right]$ كما في الشكل (8) ويبين تحليل سطح

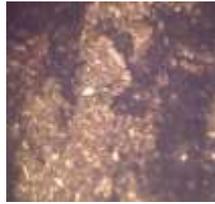
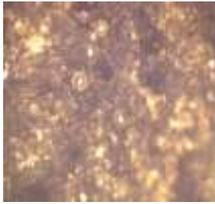
العينة المتآكل أن نمط التآكل الحاصل تحت ظروف التشغيل كان تآكل التصاق وخلال المرحلة الثانية من عمر العينة

الشكل (7) تزداد نسبة التآكل بشكل أقل مما في المرحلة الأولى أي يستمر التآكل في الازدياد بعد المرحلة الأولى

بنسبة أقل مائلاً إلى قيمة ثابتة تقريباً حيث لا تتأثر نسبة التآكل كثيراً بزمن الاختبار حيث تصل نسبة التآكل في نهاية المرحلة الثانية من عمر العينة إلى $0.0861 \left[\frac{mm^3}{sec} \right]$ عند الزمن $20[min]$ وتكون عندها درجة حرارة الاحتكاك المقابلة $41^{\circ}C$ الشكل (8)، حيث نلاحظ زيادة درجة الحرارة مترافقة مع زيادة نسبة التآكل وكان نمط التآكل السائد في هذه المرحلة هو تآكل حات، أما في المرحلة الثالثة فتزداد نسبة التآكل بشكل بسيط من دون الوصول إلى مرحلة الانهيار، حيث تصل إلى $0.0987 \left[\frac{mm^3}{sec} \right]$ عند الزمن $30[min]$ وتكون عندها درجة حرارة الاحتكاك المقابلة $42^{\circ}C$ وأيضاً كان نمط التآكل السائد فيها هو حات ولا يوجد أي دليل على وصول المادة لمرحلة التعب.

3. قيمة نسبة التآكل ونمطه في عينات البولي إستر المملوءة بوردرة الألمنيوم بنسبة 30%:

تم صب ست عينات من البولي إستر المملوءة بوردرة الألمنيوم بنسبة 30%، ثم اختبرت العينات في جهاز قياس التآكل في ظروف التشغيل السابقة لمعرفة نسبة التآكل ونمطه الحاصل بتأثير حرارة الاحتكاك وذلك عن طريق رسم مخططات التآكل (علاقة نسبة التآكل مع الزمن) ومن ثم دراسة علاقة درجة الحرارة مع نسبة التآكل. يظهر الشكل (9) أنماط التآكل الحاصلة في سطح عينة تحوي بوردرة الألمنيوم بنسبة 30%.



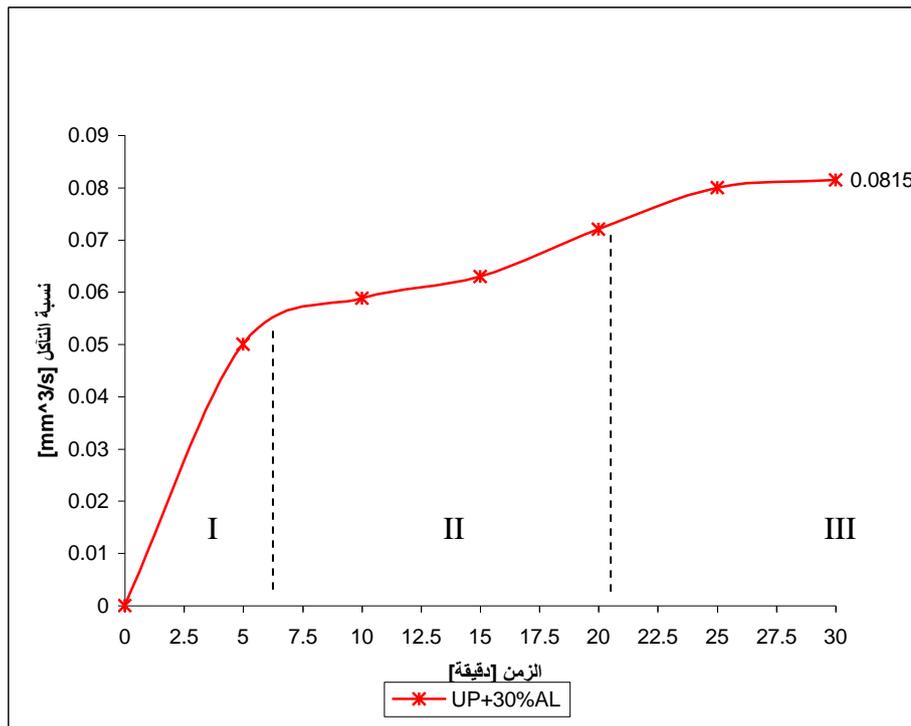
التآكل الحات في المرحلة الثالثة

التآكل الحات في المرحلة الثانية

التآكل الالتصافي في المرحلة الأولى

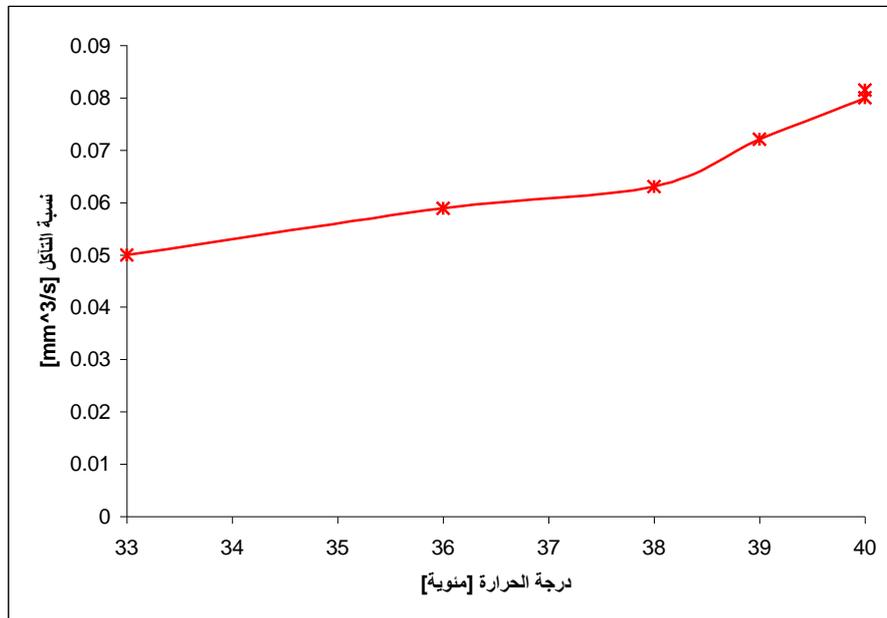
الشكل (9): أنماط التآكل الحاصلة في سطح عينة تحوي 30%AL.

يظهر الشكل (10) مخطط التآكل لعينات البولي إستر المملوءة 30%AL:



الشكل (10): العلاقة بين نسبة التآكل وزمن الاختبار لعينات البولي إستر المملوءة 30%AL.

يوضح الشكل (11) تغير درجة حرارة الاحتكاك مع نسبة التآكل لعينات البولي إستر المملوءة 30%AL:



الشكل (11): تغير درجة حرارة الاحتكاك مع نسبة التآكل لعينات البولي إستر المملوءة 30%AL.

نلاحظ من الشكل (10) أن التآكل يمر بثلاث مراحل خلال عمر العينة، ففي المرحلة الأولى تزداد نسبة التآكل

بشكل كبير جداً خلال فترة زمنية قصيرة بحيث تصل إلى $0.05 \left[\frac{mm^3}{sec} \right]$ عند الزمن $5 [min]$ وفي هذه المرحلة

تزداد درجات الحرارة (التي كانت $29^{\circ}C$ في بداية الاختبار) مع زيادة زمن الاختبار بشكل سريع حتى تصل إلى القيمة $33^{\circ}C$ عند الزمن $5[\text{min}]$ وعند نسبة التآكل $0.05 \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{sec}} \right]$ كما في الشكل (11) ويبين تحليل سطح العينة المتآكل أن نمط التآكل الحاصل تحت ظروف التشغيل كان تآكل التصاق وخلال المرحلة الثانية من عمر العينة الشكل (10) تزداد نسبة التآكل بشكل أقل مما في المرحلة الأولى أي يستمر التآكل في الازدياد بعد المرحلة الأولى بنسبة أقل مائلاً إلى قيمة ثابتة تقريباً حيث لا تتأثر نسبة التآكل كثيراً بزمن الاختبار حيث تصل نسبة التآكل في نهاية المرحلة الثانية من عمر العينة إلى $0.072 \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{sec}} \right]$ عند الزمن $20[\text{min}]$ وتكون عندها درجة حرارة الاحتكاك المقابلة $39^{\circ}C$ الشكل (11)، حيث نلاحظ زيادة درجة الحرارة مترافقة مع زيادة نسبة التآكل وكان نمط التآكل السائد في هذه المرحلة هو تآكل حات، أما في المرحلة الثالثة فتزداد نسبة التآكل بشكل بسيط من دون الوصول إلى مرحلة الانهيار، حيث تصل إلى $0.0815 \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{sec}} \right]$ عند الزمن $30[\text{min}]$ وتكون عندها درجة حرارة الاحتكاك المقابلة $40^{\circ}C$ وأيضاً كان نمط التآكل السائد فيها هو حات ولا يوجد أي دليل على وصول المادة لمرحلة التعب.

التفسير:

نلاحظ انخفاضاً واضحاً في درجة الحرارة الناتجة عن الاحتكاك في العينات المملوءة ببودرة الألمنيوم، يزداد هذا الانخفاض في درجة الحرارة مع زيادة نسبة المواد المائلة وذلك من أجل جميع أزمنة الاختبار المدروسة، وهذا يعود لتأثير بودرة الألمنيوم التي تلعب دور مزيت صلب يخفض الاحتكاك وبالتالي يخفض درجة الحرارة الناتجة عنه، حيث أعطت العينات المملوءة بـ $30\%AL$ أقل مقدار لارتفاع درجة الحرارة الناتجة عن الاحتكاك تليها العينات المملوءة بـ $10\%AL$ وأخيراً كان للعينات النقية غير المملوءة أكبر مقدار من الحرارة الناتجة عن الاحتكاك، حيث تؤدي هذه البودرة دور تشحيم ذاتي، بالإضافة إلى أن البوليميرات تملك موصلية حرارية قليلة جداً لذلك تكون أقل قدرة على تبديد الحرارة الناتجة عن الاحتكاك عند سطوح التماس، وبسبب ارتفاع معامل التوصيل الحراري للألمنيوم $(2.37 \text{ Wcm}^{-1} \text{ K}^{-1})$ في درجة حرارة الغرفة [19] فإن إضافة بودرة الألمنيوم إلى البولي إستر تحسن موصليته الحرارية، فتبديد العينات المملوءة ببودرة الألمنيوم الحرارة الناتجة عن الاحتكاك بشكل أكبر وأسرع وبالتالي تنخفض درجة حرارة السطوح المتماسية، وبالتالي كلما ازدادت نسبة بودرة الألمنيوم أصبحت المادة أكثر قدرة على تبديد الحرارة الناتجة عن الاحتكاك [20].

تم ملاحظة بعض الظواهر في أثناء إجراء الاختبارات مثل صدور صوت متقطع مرتفع في بداية الاختبار ثم ينخفض إلى أن ينعدم مع ازدياد زمن الاختبار وهذا يعود إلى الاحتكاك الجاف بين العينة والعمود نتيجة التماس المباشر والكامل بينهما في بداية الاختبار ومع استمرار الاختبار (ازدياد الزمن) يصبح الاحتكاك التصاقاً لذلك ينخفض صدور الصوت (الضجة). وبشكل عام هذه الحادثة هي ظاهرة اعتيادية في المركبات البوليميرية وتعود إلى تمركز الإجهادات عند مساحة تماس حقيقية صغيرة. بالإضافة لذلك لوحظ خلال عملية التآكل انبعاث أبخرة كانت قوية في بداية الاختبار ثم أخذت بالانخفاض إلى أن تلاشت تقريباً مع استمرار الاختبار (مع زيادة الزمن). في المرحلة الأولى من مراحل عمر العينة ونتيجة الاحتكاك والتماس الجاف بين البوليمير (النقي والمملوء) والفولاذ يحدد (يقص ويشد) سطح العينة البوليميرية، وهذا يؤدي إلى فقدان حبيبات من العينة البوليميرية والتي تأتي بين المادتين المتماستين

المتحاكنتين معاً وهذه الحبيبات تحك سطح العينة على طول خطوط التخليد ، هذه الحبيبات الحاكة تعطي فقداناً أكبر للحبيبات من سطح العينة والتي تحوي على أطراف حادة تحك وتآكل بالمادة الأقل نعومة. في نهاية المرحلة الأولى تصبح الحبيبات بحجم أصغر نتيجة الاحتكاك الزائد بين السطحين فتتشكل طبقة رقيقة من الحبيبات تلعب دور سطح واق للعينة يقلل كثيراً من ازدياد التآكل مما يجعل المادة تمر بمرحلة الثبات بنسبة التآكل وهي المرحلة الثابتة من عمر عينة التآكل، ومع استمرار الاختبار (ازدياد الزمن) يحدث تمركز إجهادات في مساحات تماس حقيقية صغيرة مما يؤدي إلى زيادة نسبة التآكل بشكل قليل جداً (مهمل) أي أن المادة لا تصل إلى الانهيار ولا يبدو عليها أي آثار من التعب. وعند مقارنة قيم درجات الحرارة الناتجة عن الاحتكاك مع نسب التآكل للعينات المختبرة تبين أن ازدياد درجة الحرارة يترافق مع زيادة نسبة التآكل وذلك من أجل جميع أزمنة الاختبار المدروسة. فمن المعلوم أن درجة حرارة الاحتكاك تؤثر بشكل كبير على نسبة التآكل ، إذ إن توليد الحرارة العالية خلال الانزلاق يمكن أن يؤدي إلى الأكسدة أو أي نوع آخر من تشوه البوليمير، وعندما يحدث تسخين للبوليميرات المعرضة للاحتكاك مع سطح آخر ، يحدث إزالة كبيرة للجزيئات المتماصة ويكون معها حجم التلف أكبر. فعند درجات الحرارة المنخفضة يحدث التآكل الالتصاقى، أما عند درجات الحرارة العالية فيحدث الفشل في البوليمير بتأثير التعب والزحف، أي أن درجة الحرارة تؤثر كثيراً على أنماط التآكل الحاصلة على سطوح العينة فيتغير نمط التآكل من الالتصاقى إلى الحات إلى التعب، لذلك من المهم تخفيضها إلى أدنى قيمة ممكنة عن طريق إضافة زيوت تشحيم صلبة ألا وهي المواد المائلة. وفي بحثنا يتغير سلوك التآكل من التآكل الالتصاقى إلى التآكل الحات خلال التجارب والاختبارات كلها ولجميع العينات النقية والمملوءة ، حيث كان نمط التآكل في المرحلة الأولى (running -in) للاختبار هو تآكل التصاق حيث إن سطح الفولاذ أملس. أما نمط التآكل في المرحلة الثانية (steady-state) فهو التآكل الحات وفيه تتشكل بودة بين الجسمين المنزلقين ويسمى أيضاً (3-body).

نلاحظ من الأشكال السابقة ازدياد نسبة التآكل مع ارتفاع درجة الحرارة في جميع العينات المختبرة عند زمن محدد. كما نلاحظ تحول نمط التآكل من الالتصاقى في درجات الحرارة المنخفضة إلى الحات في درجات الحرارة المرتفعة وذلك عند جميع العينات، ولكن ليس بالدرجة نفسها عند كل العينات فمثلاً العينات المملوءة بـ 30%AL (ذات المقاومة الأكبر) والمختبرة لمدة 30 دقيقة يحدث على سطحها تآكل حات بشكل خطوط ناعمة تكاد تكون غير ملحوظة بالعين المجردة، أما العينات النقية المختبرة لمدة 30 دقيقة فيحدث بها تآكل حات (Three Body) يترك على سطحها تجاويف ترى بالعين المجردة، وقد تم تصوير سطوح جميع العينات بعد الاختبار بدرجة تكبير 100 مرة لتوضيح نمط التآكل الحاصل في سطح العينة.

الاستنتاجات والتوصيات:

من المعطيات والملاحظات التجريبية، حصلنا على النتائج التالية:

- يمر التآكل في العينات المختبرة بثلاث مراحل خلال عمر العينة، ففي المرحلة الأولى تزداد نسبة التآكل بشكل حاد خلال مدة قصيرة، أما المرحلة الثانية وهي المرحلة الأهم من عمر العينة والأطول زمناً فيكون فيها ازدياد نسبة التآكل بالنسبة للزمن بشكل شبه ثابت، أما المرحلة الثالثة فحصل فيها ازدياد نسبة التآكل بشكل بسيط حيث لم تصل العينات إلى مرحلة الانهيار.

- تزداد نسبة التآكل في جميع العينات مع زيادة الزمن رغم ثبات البارامترات الأخرى كالحمل والسرعة وتحت ظروف تشغيل جافة.
 - نمط التآكل في جميع العينات المختبرة هو تآكل التصاق يحدث في المراحل الأولى من عمر العينة (مخطط التآكل) ثم يتحول إلى التآكل الحات
 - تملك العينات النقية أعلى قيمة لنسبة التآكل وأعلى معدل لارتفاع درجة الحرارة الناتجة عن الاحتكاك وذلك من أجل أزمنة الاختبار المختلفة.
 - تملك العينات المملوءة بـ 30%AL أخفض قيمة لنسبة التآكل وأخفض قيمة لدرجة الحرارة الناتجة عن الاحتكاك، تليها العينات المملوءة بنسبة أخفض من الألمنيوم أي 10%AL.
- يخدم هذا البحث التنمية من خلال متابعة الدراسات التي أجريت بغية استبدال المواد المعدنية بالمواد المركبة البوليميرية لتوافرها وسهولة استخدامها وعدم تأثيرها الضار لاسيما في أجزاء الآلات الغذائية التي هي موضوع بحثنا ولاسيما أن هذه المواد لها قدرة العمل الجيد من دون تزييت.
- هذا البحث هو أحد البحوث الكثيرة التي أجريت في مجال تقليل التآكل والاحتكاك بين المواد ولاسيما المستخدمة كأجزاء للآلات، وهو يفتح المجال لأبحاث لاحقة في هذا المجال.

المراجع:

- [1] جاويش، معتز. البلاستيك وآلاته. جامعة دمشق، 1981-1982م.
- [2] RICHARD, M. O. W. *Polymer Engineering Composites*. applied science publishers LTD, London, 1992.
- [3] PAULE GAEMO, E.; TEMPLE BLACK, J.; KOHSER, R. A. *Material and Processes in Manufacturing*. Macmillan Publishing Company, New York, 1990.
- [4] LAN- HUI SUN; ZHEN- GUO YANG; XIAO-HUI LI. *Tensile and Tribological Properties of PTFE and Nanoparticles Modified Epoxy- Based Polyester Fabric Composites*. Materials Science and Engineering: A, 497 (2008) 487-494.
- [5] JAWAHAR, P.; GNANAMOORTHY, R.; BALASUBRAMANIAN, M. *Tribological Behaviour of Clay- Thermoset Polyester Nanocomposites*. Wear, 261 (2006) 835-840.
- [6] HASHMI, S. A. R.; DWIVEDI, U. K.; CHAND, N. *Graphite Modified Cotton Fibre Reinforced Polyester Composites Under Sliding Wear Conditions*. Wear, 262 (2007) 1426-1432.
- [7] YOUSIF, B. F. *Frictional and Wear Performance of Polyester Composites Based on Coir Fibers*. Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 223 (2009) 51-59.
- [8] HASHMI, S. A. R.; DWIVEDI, U. K.; CHAND, N. *Friction and Sliding Wear of UHMWPE Modified Cotton Fibre Reinforced Polyester Composites*. Tribology Letters, 21 (2006) 79-87.
- [9] YOUSIF, B. F.; EL- TAYEB, N. S. M. *High- Stress Three- Body Abrasive Wear of Treated and Untreated Oil Palm Fibre- Reinforced Polyester Composites*. Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 222 (2008) 637-646.

- [10] YOUSIF, B. F.; EL- TAYEB, N. S. M. *Mechanical and Wear Properties of Oil Palm and Glass Fibres Reinforced Polyester Composites*. International Journal of Precision Technology, 1 (2009) 213-222.
- [11] YOUSIF, B. F.; SAJOD, T. W. L ; MEWILLIAM, S. *Polyester Composite Based on Betelnut Fibre for Tribological Applications*. Tribology International, 43 (2010) 503-511.
- [12] QUINTELIER, J.; De BAETS, P.; SAMYN, P.; VAN HEMELRIJCK, D. *On The SEM Features of Glass- Polyester Composite System Subjected to Dry Sliding Wear*. Wear, 261 (2006) 703-714.
- [13] خليفة، سليمان.؛ عمران، جمال. البلاستيك: تصميم وإنتاج. دار دمشق، 1991م.
- [14] منصور، رامي.؛ هترة، علي. تأثير المائات العضوية على منحنيات التصلب لمركبات البولي إستر غير المشبع. مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية، سلسلة العلوم الهندسية، المجلد 27، العدد 1، 2005.
- [15] فياي، عدنان حميد. الزحف في البولي إستر غير المشبع المدعم وتأثير درجة الحرارة فيه . الجامعة التكنولوجية، قسم العلوم التطبيقية، مجلة الهندسة والتكنولوجيا، المجلد 25، العدد 9، 2007.
- [16] COCHRAN, J. F.; MAPOTHER, D. E. *Superconducting Transition in Aluminum*. Physical Review 111(1): 132-142, June(1958).
- [17] WWW.Wikipedia.org
- [18] WARRING, R. H. *The new Glass fiber book*. Published by Model and Allied PUBLTD. 1971.
- [19] ROBERTC, WEAST. *Handbook Chemistry and Physics*. ph.D. published by CRC press Cleveland, Ohio, 57th, 1926-1977.
- [20] VASCONCELOS, P. V.; LINO, F. J.; BAPTISTA, A. M.; NETO, R. J. L. *Tribological Behaviour of Epoxy Based Composites for Rapid Tooling*. Wear, 260 (2006) 30-39.