



## دراسة تجريبية للسلوك التريبولوجي لمادتي التفلون والولي أميد في حالة الاحتكاك الدحروجي

ميساء علي شاش<sup>1</sup>، حسن هيثم حسامو<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> قسم المعدات والآليات، كلية الهندسة التقنية، جامعة طرطوس، مدينة طرطوس، سوريا. Maisaashash@tartous\_univ.edu.sy

<sup>2</sup> مؤسسة الأعلاف، طرطوس، سوريا، Mahmoudhusamo@gmail.com

\* ميساء علي شاش، Maisaashash@tartous\_univ.edu.sy

نشر في: 30 ايلول 2020

**الخلاصة** – تعد العناصر الدحروجية في المحامل أو المسننات أساساً للكثير من الآلات، والتي قد لا تستطيع العمل بشكل ملائم في حال غيابها، وتُصنع عناصر الآلات لهذا النوع عادةً من أنواع مختلفة من الفولاذ، حيث تجري عمليات التقسية بغرض زيادة عمرها وتقليل البلى، كما ويتوجب إجراء التزييت المناسب لهذه الأنظمة التريبولوجية لضمان أمان التشغيل خلال فترة تشغيل المكونات، وقد ظهرت في السنوات الأخيرة بوليميرات عالية الأداء مثل البولي إيثر إيثر كيتون (PEEK) و البولي أميد 46 (PA46)، حيث أصبحت خياراً في استعمالات اتصالات الانزلاق/دحرجة، وذلك نظراً لانخفاض كثافتها وفعاليتها وعملية تصنيعها كالبوليمير بالحقن، حيث تقدم البوليميرات حلول تصميمية بأوزان خفيفة وكلفة مادية منخفضة، في هذا البحث تمت دراسة مقارنة للخواص التريبولوجية تتضمن بحث سلوك البلى والاحتكاك لمادتين بوليميريتين (بولي أميد 6 PA و بوليمير رباعي فلور الأيثيلين PTFE)، حيث تم تحضير العينات عن طريق التشغيل الميكانيكي لأسطوانات مسبقة الصنع من هذه المواد، وتم إجراء التجارب باستخدام جهاز مُعد خصيصاً لهذا الغرض وذلك باستخدام اثنين من البارامترات (سرعة التدرج والحمولة المُطبقة)، وتم ملاحظة تشكل الغشاء البوليميري الانتقالي لكلا المادتين والذي يقوم بدور تزييتي في شروط العمل الجافة، وقد لوحظ أن الخواص الاحتكاكية لـ PTFE كانت أفضل من مثيلاتها في الـ PA 6 الذي صدرت أصوات عالية أثناء اختباره نتيجة حصول روابط التصاقية مع السطح المعدني المقابل، وكانت آلية البلى الرئيسي الحاصل في الـ PA 6 هو الحفر الميكروي الميكانيكي والتشوه، بينما كان في الـ PTFE هو البلى الالتصاق، وقد أبدى الـ PTFE معدل بلى مرتفع جداً مقارنة بالـ PA 6 الذي عانى من بلى انفصال الطبقات في بعض الحالات.

**الكلمات الرئيسية** – تزييت ذاتي، ظروف عمل جافة، تريبولوجيا، بلى، بولي أميد .

### 1. المقدمة

التريبولوجية [15]، وتعتبر الحركة الدحروجية تفاعل معقد ما بين زوجي الاتصال، حيث تكون البنية الهندسية للاتصال في كل الحالات غير مثالية، وفي الواقع العملي لا يوجد حدوث لحركة دحرجة صافية ما بين زوجي الاتصال، وبدلاً من هذا يحدث تراكب من حركتي الدحرجة والانزلاق، فعلى سبيل المثال في تفاعلات المسننات يحصل انزلاق في رأس السن و أسفله بينما تكون الحركة دحرجية في جانب السن [14].

### 2. الدراسات السابقة

درس (Harrass,2010) وآخرون [14] سلوك البلى بالدرجة لمواد الـ PA6 غير المدعم والـ POM والـ PEEK باستخدام أجهزة بلى مختلفة (تدرجت في معظمها كرة فولاذية على سطح مستوي بوليميري وفق حركة دورانية وخطية)، وقد بينت النتائج قصور في مناسبة المألآت و المواد الداعمة في غالب الحالات مقارنةً مع المواد غير المملوءة حيث لم تُحسن من مقاومة البلى بالدرجة، وقد أظهرت مادة الـ PA6 المملوءة ببلورة البيزو فقط سلوك بلى مُحسن مقارنة بمادة الأساس، حيث بدأ بلى الدرجة لسطح المواد البوليميرية بتشوه غير مرن خلال احتكاك الدرجة، وقد نتجت شقوق عرضية و طولية في الـ PA6 و اتحدت معاً، وقد أزيلت حطامات البلى فيما بعد و زادت الألياف من بلى الدرجة حيث شكلت مواقع ضعف، فيما لم يظهر الـ POM أي شقوق ولكن كان معدل اهتزاؤه عالي بسبب البلى الالتصاق، وقد وجدوا أن القساوة أسفل أخاديد البلى لـ POM تشير إلى حدوث تليين في أقسام من المادة و انخفاض في خواصها. بحث (Miao, 2018) وآخرون [11] التزييت الذاتي لمحمل دحروجي حديث التصميم (يُستخدم في مضخة توربينية لمحرك صاروخ عالي الدفع، حيث تقل لزوجة الزيوت نتيجة استخدام الدفع بسوائل عالية التبريد) باستخدام جهاز خاص لاختبار المحامل تحت حمولة دفعية 20 KN و

عرف التريبولوجيا بكونها علم و هندسة السطوح المتفاعلة والتي بينها حركة نسبية، وتشتمل على دراسة و استخدامات مبادئ الاحتكاك و التزييت و البلى، ويُعد هذا العلم واسع التخصصات ويعتمد على الكثير من المجالات الأكاديمية كالفيزياء و الكيمياء و علوم و هندسة المواد [10]، وقد تركزت الكثير من الاهتمامات على دراسة تريبولوجيا الاتصال لـ معدن/معدن و معدن/سباميك، و عموماً فقد حُلَّت المكونات البوليميرية بشكل متزايد مكان المعادن في الإنشاءات و المساكن و المحامل، وبخاصة في استعمالات تخفيض الوزن، حيث تتميز بسرعة تشكيلها عبر القولبة بالحقن أو الصب أو التشغيل الميكانيكي و برخص أثمانها و مقاومتها للتآكل و عدم حاجتها للصيانة [13]، ولذلك فالحاجة الآن للاهتمام بالاتصالات التريبولوجية لـ معدن/بوليمير و بوليمير/بوليمير [10]، وتُعد تريبولوجيا البوليميرات من احتكاك و آليات بلى معقدة أكثر بكثير من مثيلاتها في المعادن و غير مفهومة بشكل جيد، ويرجع السبب في ذلك إلى اللبونة النسبية للبوليميرات مقارنةً مع المعادن و إلى الانخفاض الكبير في موصليتها الحرارية المصاحب للحرارة المتولدة في الاتصالات و درجات الانصهار المنخفضة [11]، و يشتمل الاحتكاك في البوليميرات على ثلاث عوامل مميزة : (1) الروابط الالتصاقية (2) القص و التمزق في المواد المحنكة (3) مساحة الاتصال الحقيقية [9]، و يُعتقد أن الروابط الالتصاقية التي تتشكل عندما تتلامس خشونات الأسطح المتقابلة مع بعضها البعض تخفض من الإسهام الرئيسي للبوليميرات في الاحتكاك [16]، كما و تتعرض خشونات زوجي الاحتكاك خلال الحركة النسبية لقوى قص عالية، و يمكن أن يحصل في هذه الحالة للبوليميرات تشوه مرن و لدن و لزج-مرن اعتماداً على نوع المادة، وتلعب مساحة الاتصال الحقيقية دوراً هاماً لعلاقتها في تشكيل الغشاء الانتقالي و الذي يُعد آلية هامة للبوليميرات و له تأثير كبير جداً في خواصها

العالية و التغير في آلية البلى، وقد ساعدت المغنطة التريبولوجية خلال الاحتكاك من حركة الجسيمات الفيرومغناطيسية الموجودة تحت السطح في مواد PTFE المركبة باتجاه السطح حيث تتجمع على السطح، وتلتصق بشكل متين على السطح المقابل، وتؤدي دور نواة في تشكيل الغشاء الانتقالي و تثبيته على السطح المقابل، ولذلك تُعزز المغنطة التريبولوجية من تشكيل الغشاء الانتقالي.

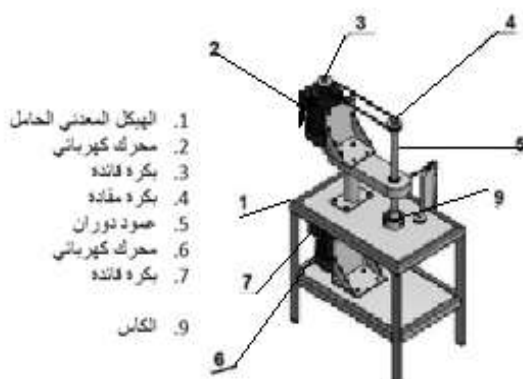
### 3. أهمية البحث و أهدافه

استُخدمت البوليميرات بشكل كبير في التطبيقات التريبولوجية نظراً لمرونتها وملامتها للحمولات الصدمية وقلة احتكاكها ومقاومتها للبلى، وعلى العموم فتريبولوجيا البوليميرات مختلفة عن تريبولوجيا المعادن لعدة أسباب، فبالمقارنة مع المعادن تعتبر البوليميرات مواد لزجة - مرنة وتعتمد خواصها على الزمن، كما أنها تتأثر بسهولة بظروف التشغيل و البيئة السائدة، وبالرغم من ذلك فالبوليميرات مفضلة لكونها قابلة للتعديل سواء في السطح أو الكتلة بمختلف الوسائل الكيميائية و الفيزيائية لتناسب الاستخدام المحدد، ولهذا السبب فهي مواد واعدة بشكل كبير في التريبولوجيا مع إمكان التحكم باحتكاكها و سلوك بلدها، وهذا ما نتج عنه أنظمة تريبولوجية مكونة من البوليميرات و المعادن و المواد السيراميكية في مواقع الاتصال التريبولوجية سواءً الانزلاقية أو الدحرجية. لذلك هدف البحث الى اجراء دراسة تجريبية لتحديد سلوك البلى و الاحتكاك لمادتي البولي أميد PA6 و التفلون PTFE في حالة الحركة الدحرجية، وتبيان مدى امكانية استخدامها كطبقة بوليميرية ذاتية التزييت في المحامل الدحرجية.

### 4. مواد وطرائق العمل

#### 4.1 جهاز ومواد الاختبار

تم إجراء الاختبار باستخدام جهاز معد خصيصاً لدراسة تأثير خشونة السطح على الاحتكاك و البلى في عقد الاحتكاك، حيث يعتمد الجهاز على الاحتكاك بالدحرجة، وقد تم تصميم الجهاز وفق الدراسة [1]، يتكون الجهاز من المكونات و الأجزاء الأساسية التالية الموضحة بـ (الشكل 1: الأجزاء الأساسية للألة) بينما يوضح (الشكل 2: صورة لجهاز الاختبار).



الشكل 1: الأجزاء الأساسية للألة

سرعة 20000 r.p.m بوجود التدرجين السائل، حيث تم الاختبار على حواجز (retainer) من الـ PTFE الصافي بحيث يتم مزاجته مع مجرى المحمل الذي سبق ترسيب أغشية زيتية أساسها الفضة عليه، وقد جرى الاختبار لفترة (1200-2400) sec على الترتيب، حيث أشارت النتائج الى أنه حصلت ظروف تزييت جيدة في كافة النتائج و أن المحمل الدحرجي ذاتي التزييت يعمل بثبات لأكثر من 2400 sec تحت السرعة العالية و الحمولات الثقيلة و ظروف التبريد العالية ويعتبر هذا الزمن عشرة أضعاف زمن الخدمة المطلوب والمتوقع لهذه المضخات التوربينية، وقد تشكلت أغشية انتقالية متماسكة من الـ PTFE على كلاً من سطحي الكرات و المجرى للمحمل المختبر، ولم تكن الـ PTFE دائمة الانتقال من الحاجر إلى سطوح كريات المحمل و المجرى مع استمرار التشغيل، وقد كانت مورفولوجيا الأغشية الانتقالية لـ PTFE المتشكلة على كريات و مجاري المحامل المختبرة مختلفة، حيث تشكلت الأغشية الانتقالية المتكثلة الواضحة فقط عند اختبار المحامل لزمن 1200 sec، وقد أظهر الغشاء الزيتي الذي أساسه الفضة التصاق جيد بالمادة الأساس للمحمل، وتمكن من تادية دور تزييتي جيد على الأقل حتى تشكلت أغشية PTFE الانتقالية المتماسكة.

بحث (Prabu, 2014) و آخرون [17] سلوك البلى الالتصاقى لكل من بوليمير البولي أسيتال عالي التبلور (POM) و البوليميرات نصف المتبلورة (ومثالها البولي أميدات الأليفاتية : Nylon 6، Nylon 66)، حيث أظهرت المواد الثلاث قيم متماثلة تقريباً لمعامل الاحتكاك عند التماس الانزلاقي مع سطح فولاذي ناعم، وازداد معامل الاحتكاك بشكل مستمر مع زيادة مسافة الانزلاق و الحمل للمواد الثلاث، وكان سبب ارتفاع قيم معاملات الاحتكاك لـ Nylon 66 عند الحمولات العالية عائداً لـ التحول لزج-مرن الحاصل بسبب ارتفاع درجة الحرارة البيئية، وقد أبدى البولي أسيتال أقل معدل بلى و معامل احتكاك معتدل و لم تحصل له ظاهرة الانزلاق اللاصق (stick-slip) بغض النظر عن الحمولة و السرعة، وهذا ربما يعود لتبلوره الكبير، وعند الحمولات الكبيرة تشكل غشاء نتيجة الحرارة المرتفعة في المنطقة البيئية والانصهار الموضعي و هذا ما ساعد على تقليل الاحتكاك ؛ وكانت معدلات البلى لكل من ( Nylon 6 and Nylon 66) عالية مقارنةً بتلك الخاصة بالبولي أسيتال، ولقد أبدى الـ Nylon 6 بلى كبير بسبب قوة التمزيق التي تشكلت من الالتصاق الاحتكاكي البيئي و تأثير القص خلال الاحتكاك، كما و يملك الـ Nylon 6 مقاومة لتدفق السطح أي تُصبح مقاومته للقص أكبر كلما زادت سرعة الإنزلاق ما يُساهم في رفع الحرارة و هذا يؤدي إلى ارتباط قوي للغشاء الانتقالي على السطح المعدني المقابل كون (Nylon 6) مادة لدنة حرارياً.

درس (Singh, 2018) و آخرون [7] آلية جزيئات ميكروية من PTFE مُخَرَّشة كيميائياً (chemically etched) في تحسين السلوك التريبولوجي لمواد الـ (POM) المركبة المدعمة بـ ألياف الزجاج، و ذلك باستخدام جهاز ترددي وفق منهجية ASTM G133-95، حيث تم تحضير العينات بنسب وزنية لـ PTFE هي (0, 1.7, 4.0, 9.5, 15.0 and 17.3) wt.%، وقد تم زيادة الطاقة السطحية لجزيئات PTFE الميكروية بخدشها لمدة 10 min باستخدام ملح نيتالين الصوديوم في رباعي هيدرو الفوران، حيث وجدوا أنه عند غياب الـ PTFE تتسبب الاجهادات المتولدة عن الحركة الترددية في تكسير ألياف الزجاج ما يتسبب بضرر لسطح الـ POM، و تمنع ألياف الزجاج الكاشطة بدورها تشكل غشاء انتقالي من الـ POM، بينما أسهمت إضافة الـ PTFE في تحسين الخواص التريبولوجية بشكل كبير عن طريق تشكيل غشاء انتقالي من PTFE قادر على تحمل كشط ألياف الزجاج، وقد كانت السطوح المهترئة ذاتية الإصلاح مع زيادة المحتوى من الـ PTFE، و أبدت سطوح الـ PTFE المخدوشة قابلية التصاق أكبر مع الـ POM خلال التشابك الميكانيكي. درس (Xie, 2019) و آخرون [19] السلوك و المغنطة التريبولوجيين للمواد المركبة (Fe(or Co, or Ni)/PTFE)، وقد وجدوا أن كثافة الحقل المغناطيسي المتعرض عن الاحتكاك للمواد المركبة تزداد ببطء مع زيادة الحمل، وتتنخفض تدريجياً مع زيادة السرعة، وتزداد بزيادة محتوى المالنات، وقد انخفض معامل الاحتكاك للمواد المركبة بشكل قليل مع زيادة المغنطة التريبولوجية، و انخفض الفقد بالبلى لـ Fe/PTFE و Co/PTFE مع زيادة كثافة التدفق المغناطيسي، ما يشير إلى أهمية المغنطة التريبولوجية في تقليل الاحتكاك و البلى للمواد المركبة، بينما ازداد الفقد بالبلى لـ Ni/PTFE بشكل تدريجي بسبب المغنطة التريبولوجية

قطن مشرب بالأسيتون و تجفيفها، وتم قياس خشونتها السطحية ومن ثم وزن العينات قبل الاختبار وبعده باستخدام ميزان بحساسية 0.0001 g.

الجدول 1: خواص مادتي عينات الاختبار [18]

PA 6	PTFE	نوع المادة	الخاصية
			
$(C_6H_{11}NO)_n$	$(C_2F_4)_n$	الصيغة الكيميائية	
$\rho = 1.12 - 1.15$ $g/cm^3$	$\rho = 2.15 - 2.20$ $g/cm^3$	الكثافة	
493 K (220 °C)	327, 600 K °C	درجة حرارة الانصهار	
0.29 W/mK	0.25 W/mK	النقلية الحرارية	
80/100 °C	250 °C	درجة حرارة الخدمة العظمى (لوقت طويل)	
140/180 °C	300 °C	درجة حرارة الخدمة العظمى (لوقت قصير)	
1.7 KJ/KgK	1 KJ/KgK	درجة الحرارة النوعية	
70/85 N/mm <sup>2</sup>	25/36 N/mm <sup>2</sup>	مقاومة الشد	
200/300 %	350/550 %	الاستطالة عند الكسر	
1400 N/mm <sup>2</sup>	410 N/mm <sup>2</sup>	معامل المرونة	
80 (10 <sup>-6</sup> /°C)	130 (10 <sup>-6</sup> /°C)	معامل التمدد	

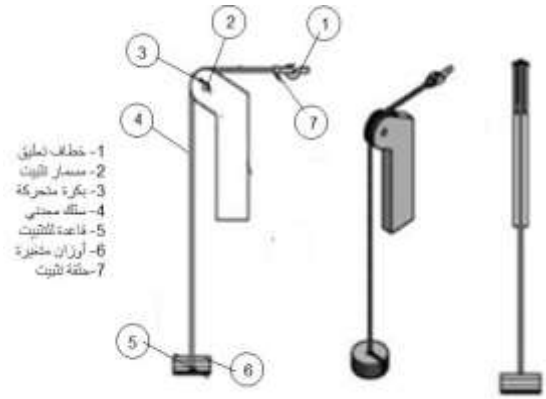
عينة الكأس : على شكل قرص اسطواني من فولاذ (St37) ذي قطر داخلي 70 mm وقطر خارجي 90 mm وبارتفاع 15 mm، يتم سحجها قبل و بعد كل اختبار بواسطة ورق صنفرة مائبة من نوع كربيد السيلكون (SiC) وتنظيفها باستخدام قطن مشرب بالأسيتون، وقياس خشونتها السطحية باستخدام جهاز قياس الخشونة في مخبر القياسات تبين أن لها  $R_a = 0.875 \mu m$ ، حيث توضع في الكأس وتعطى السرعة المطلوبة بحيث يشارك سطحها الداخلي في عملية الاحتكاك، و يوضح (الشكل 4: توضع العينتين أثناء الاختبار).



الشكل 2: صورة لجهاز الاختبار

حيث استخدمت محركات من نوع القفص السنجابي (الأفضل من الناحية الاقتصادية والصيانة والإقلاع المباشر) بقدرة قدرها 0.5 Hp للمحرك الواحد و يمكن تغيير عدد دوراته من (4-3000) r.p.m بواسطة جهاز تحويل من نوع E1 TOPTEK TOPVERT باستطاعة 3 Hp.

تتألف آلية التحميل كما هو مبين في (الشكل 3) من سلك معدني يتصل بالكتلة المتحركة بواسطة خطاف معدني و يمر فوق بكرة مثبتة على طاولة الاختبار، حيث يتم إضافة الأوزان على هذا السلك لدراسة تأثير الحمل كبار متر من بارامترات التجربة.



الشكل 3: آلية التحميل

#### 4.2 عينات الاختبار:

الجهاز مصمم لاختبار عينات اسطوانية الشكل ذات أبعاد متفاوتة:

عينة عمود الدوران: على شكل أسطوانة قطرها الداخلي 22 mm تركيب على عمود الدوران و تثبت بلولب وارتفاع العينة المشارك بالاحتكاك 15 mm، يتم إعطاؤها السرعة المطلوبة بحيث يشارك سطح العينة الخارجي في اختبار الاحتكاك، حيث قمنا باختبار مادتين بوليميريتين مختلفتين لتكونا مادتا صنع لعينات عمود الدوران التي قمنا باختبارها ، هما : البولي أميد (PA6) و التفلون (PTFE) وتعرف هاتين المادتين بكونهما مختلفتين في خواصهما سواء من حيث الخواص الميكانيكية أو الحرارية أو الميل لاجتذاب جزيئات الماء، حيث كانت الأبعاد لعينات الـ PTFE : mm (25.3 \* قطر 57.2) و الـ PA 6 : mm (56.6 \* قطر 51.5)، وقد تم تحضير العينات من قضبان مسبقة الصنع متوافرة في الأسواق، و يظهر (الجدول 1: خواص مواد عينات الاختبار [14] ) وقيل الاختبار تم سحج العينات باستخدام ورق صنفرة مائي من نوع كربيد السيلكون (SiC) بـ 3 قياسات مختلفة من فئة 800 و 1000 و 2000 وتم مسح العينات باستخدام

حيث يتم تحديد سرعة الدوران باستخدام المعادلة (1):

$$V = V_1 \mp V_2$$

حيث :

$V_1$  : السرعة المحيطة لنقطة من السطح الداخلي لعينة الكأس

$V_2$  : السرعة المحيطة لنقطة من السطح الخارجي للعينة البوليميرية .

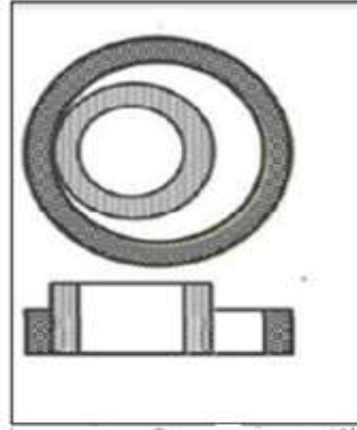
إشارة - : عندما يدور كل من الكأس و العينة البوليميرية باتجاهين متعاكسين .

إشارة + : عندما يدور كل من الكأس و المحور بنفس الاتجاه

تم حساب  $V_1$  بالمعادلة (2):

$$V_1 = \omega D_1 = \frac{2\pi n}{60} * 35$$

يعرض (الجدول 2) مقارنة للخواص الحديدية في استعمال المحامل البلاستيكية [2].



الشكل 4: توضع العينات أثناء الاختبار

الجدول 2: مقارنة للخواص الحديدية في استعمال المحامل البلاستيكية

المادة	أقصى سرعة V(m/sec)	أقصى ضغط P (MN/m <sup>2</sup> )	PV الحديدية (MN/m sec)	أقصى درجة حرارة (°C)
PA6	3	5	0.90	90
PTFE	0.3	3.4	0.04	250

حيث أن 35 هي نصف القطر الداخلي لعينة الكأس (70 mm)

و بالمثل يمكن حساب  $V_2$  .

فيكون :

$$n = \frac{60 V}{2 \pi (D_1 \mp D_2)} \quad (3)$$

$D_1$ : القطر الداخلي لعينة الكأس.

$D_2$ : القطر الخارجي لعينة الكأس.

إنّ الازدواج التدرجي الحاصل ذو تماس خطي، حيث يتعرض الجسمين المتلامسين إلى إجهاد عصر في منطقة التلامس، وهو لا يتوزع بانتظام على مساحة التلامس، وإنما يكون بشكل قطع مكافئ، وتُحسب قيمة إجهاد عصر التدرج الأعظمية وفقاً لقانون العالم الألماني هرتز [15] بالمعادلة (4):

$$P_{max} = \sqrt{0.35 \frac{FE}{b} \cdot \left( \frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)} \quad (4)$$

حيث :

F : القوة الضاغطة على الجسمين (N)

E : عامل المرونة و يقاس بـ (N/mm<sup>2</sup>)، وعندما يكون الجسمان من مادتين مختلفتين يتم حساب عامل المرونة المكافئ بالمعادلة (5) :

حيث تستخدم محدوديات العمل الأربعة الواردة في الجدول للمساعدة في توضيح المجال المفيد لعمل اللدائن، (1) درجة الحرارة العظمى والتي فوقها من المتوقع التدهور الفيزيائي أو التلدين غير الطبيعي، (2) الحمل الأعظم عند السرعة الدنيا والذي يعكس مقاومة الخضوع للانضغاط، (3) PV الحديدية عند سرعات متوسطة، (4) السرعة العظمى للسطح عند التشغيل بحمولات منخفضة، ومن المرجح أنها مقيدة بالانصهار و التشوهات المحلية للخشونة، و مع معامل احتكاك مُعطى نحصل على قيمة الـ PV من حاصل جداء الحمل P MPa (psi)، بسرعة السطح V m/s (ft/min)، والتي تعطي قياساً للتسخين الحراري الاحتكاكي و لارتفاع الحرارة، حيث P هو كامل الحمولة

مقسومة على مساحة المحمل سواء للمحمل المحوري أو لأي سطحين منبسطين، ويعطى لمحمل الجريدة بقسمة حمولة المحمل على المساحة (قطر الجريدة x طول المحمل L) [12].

#### 4.3 ضبط جهاز الاختبار و اختيار السرعة :

قمنا بضبط جهاز الانفرتر لتعويض عزم المحرك و تعويض الانزلاق ، ومراجعة كافة بارامترات الإدخال ، و عرض محتوى الاستخدام ليظهر لنا سرعة الدوران .

## 5. التجارب و النتائج:

$$E = \frac{2E_1.E_2}{E_1+E_2} \quad (5)$$

### 5.1 الاختبار العملي

$d_1, d_2$  : أقطار الجسمين المتلامسين (mm)

$b$  : عرض الجسمين المتلامسين (mm)

$P_{max}$  : إجهاد العصر الأعظم ( $N/mm^2$ )

#### 5.1.1 اختبار عينات البولي أميد PA6:

قمنا بإجراء الاختبار على عينات الـ PA6 باستخدام ثلاث سرع تدرج وهي (0.5 , 0.7 , 1.8) m/sec تقابل عدد دورات (516, 726, 1854) باستخدام حمولتين مختلفتين (10, 30) N لمدة 60 min، حيث يكون أعظم إجهاد عصر حاصل (عند حمولة الـ 10N :

فيكون عامل المرونة المكافئ في حالة استخدام الـ PA6

$$(E = \frac{2 \times 200000 \times 1400}{200000 + 1400} = 2780.536 \text{ MPA})$$

و (عند حمولة الـ 30N :  $P_{max} = 4.676 \text{ MPa}$ ) و (عند حمولة الـ 30N :  $P_{max} = 8.099 \text{ MPa}$ ) ، وتم ملاحظة طبيعة حطامات البلى المتشكلة والأخاديد والحزوز المتشكلة على العينة البوليميرية والغشاء الانتقالي البوليميري المتشكل على السطح الفولاذي المقابل .

بينما يكون في حالة استخدام الـ PTFE

$$(E = \frac{2 \times 200000 \times 410}{200000 + 410} = 818.322439 \text{ MPA})$$

#### 4.4 حساب البلى:

يتم بعد الاختبار تنظيف العينات من بقايا البلى و مسحها بقطن مشرب بالأسيتون، وذلك قبل أن يتم وزنهم، ويتم حساب معدل البلى وفق المعادلة (6): [4] .

$$\Delta V = 1000 \frac{m}{\rho} \quad (6)$$

حيث:

$\Delta V$  : حجم الفقد ،  $mm^3$  .

$m$  : كتلة الفقد ، g .

$\rho$  : الكثافة ،  $\rho(\text{PTFE}) = 2.20, \rho(\text{PA6}) = 1.12 \text{ g/cm}^3$

و يتم حساب معامل البلى أو معدل البلى النوعي لكل عينة وفق المعادلة (7):

$$k = \frac{\Delta V}{F \Delta S} \quad (7)$$

حيث :

$K$  : معدل البلى النوعي،  $mm^3/Nm$  .

$\Delta V$  : حجم الفقد،  $mm^3$  .

$F$  : الحمل المطبق ، N .

$\Delta S$  : مسافة الاحتكاك، m .

$\Delta S$  : مسافة الاحتكاك بـ m وتحسب من العلاقة:

$$\Delta S = V2.t \text{ حيث } t: \text{ زمن التجربة}$$

$V2$  سرعة التدرج بـ m/s .



الشكل 5: حطامات بلى من عينة PA6

كما ويلاحظ أن مسارات البلى على سطح عينة الـ PA6 تكون موازية لمسارات الاحتكاك، حيث يظهر (الشكل 6: مسارات بلى على سطح عينة الـ PA6) خلال التجربة على سرعة 0.7m/sec و حمولة 10 N .








الشكل 6: مسارات بلى على سطح عينة PA6

ويحدث انتقال إلى السطح المعدني المقابل ويبدأ الغشاء الانتقالي بالمتشكل، وقد تفاوتت مواصفات الغشاء الانتقالي المتشكل خلال التجارب حيث

وقد صدرت بعض الأصوات العالية خلال التجارب على حمولات 30 N، حيث تشير هذه الأصوات إلى حصول التصاق و مقاومة للتدحرج، و يبين الجدول 4 معدل البلى الحاصل في تجارب الـ PA6.

يعرض (الجدول 3: صور لبعض الأغشية الانتقالية) المتشكلة في التجارب، حيث يظهر بشكل واضح أن الأغشية الانتقالية المتشكلة عند حمولة الـ 30 N كانت أفضل بكثير من تلك المتشكلة عند حمولة الـ 10N.

الجدول 3: صور لبعض الأغشية الانتقالية

شكل الغشاء الانتقالي	الحمل المطبق (N)	سرعة التدحرج (m/sec)
	10	0.5
	30	0.5
	30	0.7
	10	1.8
	30	1.8



الجدول 4: معدل البلى الحاصل في تجارب الـ PA6

رقم العينة	$R_a$ ( $m\mu$ )	سرعة التدرج [m/sec]	الحمل المطبق [N]	الوزن قبل الاختبار [g]	الوزن بعد الاختبار [g]	مقدار كتلة البلى [g]	حجم الفقد [ $mm^3$ ]	معدل البلى النوعي [ $10^{-5} * [mm^3/Nm]$ ]
1	0.665	0.5	10	105.0577	105.0363	0.0214	19.52768	108.4871417
2	1.192	0.5	30	105.1553	105.1217	0.0336	30.66029	56.778317
3	0.743	0.7	10	105.3595	105.3313	0.0282	25.732744	102.114065
4	0.849	0.7	30	104.7780	104.7200	0.058	52.925502	70.0072788
5	0.806	1.8	10	104.8097	104.7733	0.0364	33.215315	51.258203
6	0.627	1.8	30	106.1253	105.7506	0.3747	341.916998	175.883229

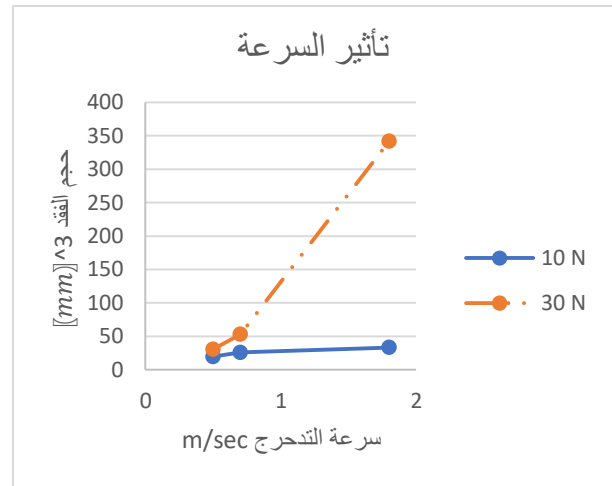
10N تكون نقطتي تركّز اجهادات تحت السطح حيث تميل المنطقة السطحية لتطور في البلى الحاصل، و يظهر ذلك في الشكل (8) بوضوح.

يبين (الشكل 7): تأثير الحمل المطبق والسرعة على الحجم المفقود بالبلى في الـ PA6.



الشكل 8: مناطق تركّز اجهادات تحت السطح في الـ PA6

ويلاحظ أن البلى يتطور خلال التجربة على سرعة 1.8 m/sec و حمولة 30 N ليصبح من نوع بلى انفصال طبقات، لاحظ ( الشكل 9: بلى انفصال الطبقات)، حيث يعرف هذا النوع من البلى بكونه بلى كلال سطوح متقدم تكون فيه عملية التعب مطبقة على مساحة أكبر من البوليمير [1]، الأمر الذي يرفع بشكل كبير من مقدار البلى الحاصل في العينة البوليميرية، حيث يعرض (الشكل 10: عينة PA6 التي عانت من حصول بلى انفصال طبقات) وهي صورة للعينة في نهاية التجربة.



الشكل 7: تأثير الحمل المطبق والسرعة على الحجم المفقود بالبلى في الـ PA6.

و بمقارنة للنتائج يلاحظ أن معدل البلى يزداد مع زيادة الضغط و سرعة التدرج و يعود السبب في ذلك إلى ارتفاع درجة الحرارة البيئية بفعل التسخين الاحتكاكي المرافق لزيادة الضغط و زيادة السرعة ، كما و يمكن ملاحظة ارتفاع معدل البلى بشكل أكبر في السرعة الأعلى (1.8) m/sec و يُعزا هذا إلى أن الـ PA6 يمتلك مقاومة تدفق سطح ؛ أي و بمعنى

آخر تزداد مقاومته للقص مع ارتفاع سرعة التدرج .

ونظراً لكون درجة حرارة الانتقال الزجاجية ( $T_g$ ) لـ PA6 هي

$40 - 50$  °C منخفضة [6]، الأمر الذي يؤدي إلى انصهار موضعي و تقليل في الخواص الميكانيكية للبولي أميد و ينتج عن هذا تشوهات تحت سطحية ، حيث لوحظ خلال التجربة على سرعة 1.8 m/sec عند حمولة

**الشكل 11:** صورة للطبقة البوليميرية مقشورة عن السطح المعدني للكأس

### 5.1.2 اختبار عينات الـ PTFE :

تم إجراء الاختبار على عينات الـ PTFE عند سرعتي تدرج وهي  $0.25$  ،  $0.7$  ) m/sec باستخدام حمولتين مختلفتين (  $10$  ،  $30$  ) N لمدة 60 دقيقة، حيث يكون أعظم إجهاد عصر حاصل (عند حمولة الـ  $10$  N :  $P_{max} = 2.4629$  MPa) و (عند حمولة الـ  $30$  N :  $P_{max} = 4.26587$  MPa)، وتم ملاحظة البلى الذي يحصل من حيث تشكل حطامات البلى و تكون الغشاء الانتقالي البوليميري على السطح الفولاذي المقابل.

### 5.1.2.1 البلى عند سرعة $0.7$ m/sec .

تم إجراء الاختبار أولاً على سرعة تدرج  $0.7$  m/sec (تقابل عدد دورات  $1044$  r.p.m لكل من الكأس و العينة البوليميرية) و حمولة  $10$  N و  $30$ ، وقد لوحظ ارتفاع كبير في معدل البلى الحاصل نظراً لأن هذه السرعة هي من خارج السرعة الحدية الموصى باتباعها عند استخدام هذه المادة، يلاحظ من الدقيقة الأولى بدء تشكل حطامات بلى تساهم بالفصل في منطقة التماس و تكون بشكل ندف كبيرة في حجمها و تستمر بالتشكل والخروج من منطقة الاحتكاك، وتساعد في عدم اصدار أصوات عالية .

وعند استخدام الحمولة  $30$  N لاحظنا بعد فترة (حوالي  $12.30$  min) تبدأ حطامات بلى بأحجام أصغر بالتشكل بالإضافة لتلك كبيرة الحجم، وقد بدأت أصغر أحجامها بالتشكل بعد  $19.35$  min من زمن التجربة ، و استمرت حطامات البلى بالتشكل طيلة فترة التجربة، لاحظ (الشكل 12: تشكل كبير لحطامات البلى في تجربة PTFE) ما أدى لحدوث بلى كبير في المادة .

كما و لوحظ في حالتي الحمولة  $10$  &  $30$  ) عند هذه السرعة لم يتشكل غشاء انتقالي على سطح عينة الكأس.



**الشكل 9:** بلى انفصال الطبقات في الـ PA6



**الشكل 10:** عينة PA6 التي عانت من بلى انفصال الطبقات

وتتجمد الطبقة المنصهرة المنقلبة إلى سطح عينة الكأس المعدنية بصورة طبقة هشة لا بلورية رقيقة، حيث يقوم البلى الجانح (المرافق عادةً للأحمال والمسافات الكبيرة) بنمزيق هذه الطبقة، ويعرض (الشكل 11: صورة للطبقة البوليميرية مقشورة عن السطح المعدني للكأس) والتي يمكن إزالتها بالرغم من قوة التصاقها بالسطح المعدني للكأس



**الشكل 12:** تشكل كبير لحطامات البلى في تجربة PTFE

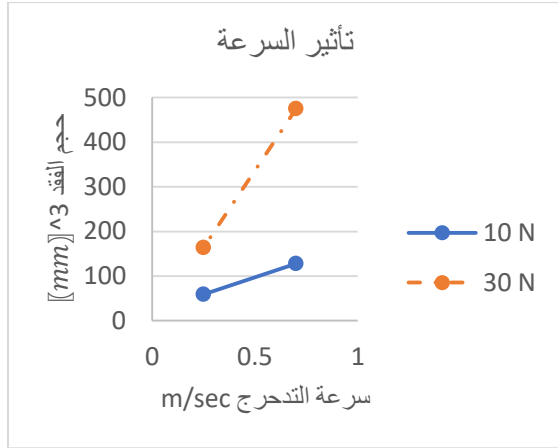
### 5.1.2.2 البلى عند سرعة $0.25$ m/sec .

تم اختبار العينات باستخدام الحمولتين  $10$  &  $30$  ) N عند سرعة  $0.25$  m/sec (تقابل عدد دورات  $372$  r.p.m) .

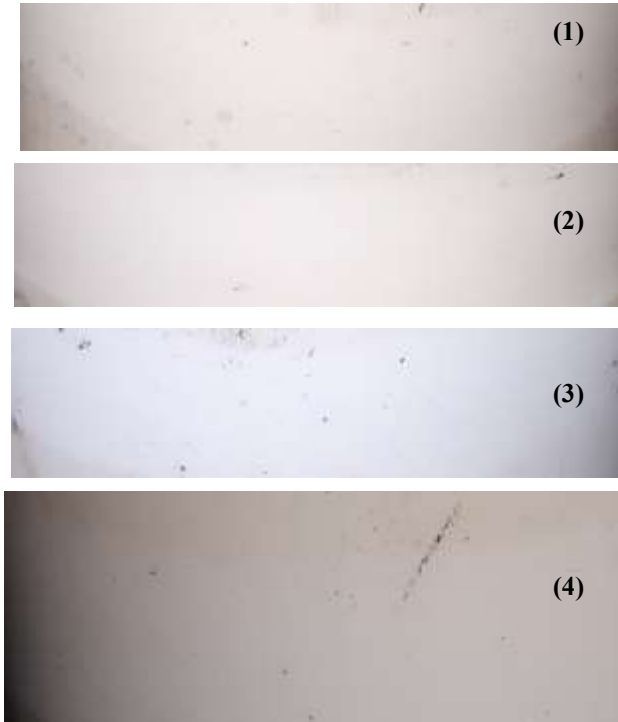
عند حمولة  $10$  N تشكلت حطامات البلى في المنطقة البيئية وساهمت في تقليل الاحتكاك، ويظهر (الشكل 13-a) حطامات البلى المتراكمة على







يمكن ملاحظة معدلات البلى الكبيرة لـ PTFE في كافة الحملات المطبقة وسرعات التدرج المستخدمة مقارنة بـ PA6 حيث يعود السبب في ذلك إلى ضعف التصاق حطامات البلى بالسطح المعدني لعينة الكأس، وقد لوحظ في كافة تجارب الـ PTFE غياب وجود أكاسيد أو أي من مظاهر البلى بالكشط على السطح، ما يعني أن البلى الحاصل في الـ PTFE و بلى التصاق، لاحظ صور السطح في (الشكل 16: سطوح البلى في عينات الـ PTFE) وهذه النتيجة متوافقة مع [5] و [8].



الشكل 16: سطوح البلى في عينات الـ PTFE

تعود الخواص الاحتكاكية المميزة لـ PTFE إلى انخفاض مقاومة القص لأغشيته الانتقالية المتشكلة على السطح المعدني لعينة الكأس، ولكن تزال هذه الأغشية مع استمرار التدرج، ويتسبب التشكيل والإزالة المستمرين لهذا الغشاء بارتفاع معدلات البلى للمادة. و يعرض (الجدول 5: معدل البلى الحاصل في عينات الـ PTFE).

سطح عينة الكأس بعد (20.46 min)، فيما يظهر (الشكل 13-b) تلك المتشكلة بعد (46.12 min) حيث يُلاحظ أن حطامات البلى تغطي نطاق أوسع من سطح عينة الكأس كما و يمكن مشاهدة الغشاء الانتقالي المتشكل .



الشكل 13 : صور لحطامات بلى الـ PTFE مأخوذة خلال فترة التجربة

عند حمولة 30N : تمت ملاحظة الغشاء الانتقالي المتشكل في نهاية التجربة و كانت خواصه أفضل من تلك المتشكلة على حمولة 10 N، و يظهر (الشكل 14: صوراً للأغشية المتشكلة في الحالتين a) الغشاء المتشكل على حمولة 10 N فيما يعرض (b) الغشاء المتشكل على حمولة 30N) .



الشكل 14 : الغشاء الانتقالي المتشكل لـ PTFE عند سرعة m/sec

0.25 وحمولة (a) 10 N (b) 30 N

يبين (الشكل 15: تأثير الحمل المطبق و السرعة على حجم الفقد في بلى الـ PTFE).

الشكل 15: تأثير الحمل المطبق و السرعة على حجم الفقد في بلى الـ PTFE

الجدول 5: معدل البلى الحاصل في عينات الـ PTFE

رقم العينة	$R_a$ (m $\mu$ )	سرعة التدرج [m/sec]	الحمل المطبق [N]	الوزن قبل الاختبار [g]	الوزن بعد الاختبار [g]	مقدار كتلة البلى [g]	الحجم المفقود [mm <sup>3</sup> ]	معدل البلى النوعي [mm <sup>3</sup> /Nm * 10 <sup>-5</sup> ]
1	0.430	0.7	10	253.25	252.97	0.28	127.9309	507.66266
2	0.809	0.7	30	250.42	249.38	1.04	475.1722	628.53472
3	0.724	0.25	10	248.48	248.35	0.13	59.3965	659.96145
4	0.999	0.25	30	250.39	250.03	0.36	164.4827	609.19519

## 6. الاستنتاجات

- إجراء اختبارات تريبولوجية باستخدام خلائط بوليميرية .

## المصادر

- يمكن استعمال الـ PA6 بشكله الصافي في التطبيقات التريبولوجية عند استخدامه بسرعة تدرج (0.5\_0.7) m/sec أو أقل ضمن مجالات الـ PV المسموحة، حيث يزداد معدل اهتارؤه في سرعة التدرج العالية ؛ فيما لا يمكن استعمال الـ PTFE بشكله الصافي.
  - إن معدلات البلى لـ PTFE الصافي هي أعلى بكثير من مثيلاتها في الـ PA6 وذلك بسبب صعوبة التصاق حطامات البلى الخاصة به بالسطح المعدني المقابل لعينة الكأس.
  - تشكّل الغشاء الانتقالي في البولي أميد (ذو البنية نصف المتبلورة) عند سرعة التدرج التي تم استخدامها، بينما لم يتشكل الغشاء البوليميري الانتقالي لـ PTFE (العالي في نسبة تبلوره) عند السرعة 0.7 m/sec و تشكّل عند السرعة 0.25 m/sec
  - حصلت أصوات عالية عند استخدام البولي أميد على حمولة N 30 في كافة سرع التدرج تشير إلى حدوث روابط أنصاقية مع السطح المعدني للكأس، فيما لم تحصل هذه الظاهرة في الـ PTFE.
  - حصل بلى انفصال طبقات لعينة الـ PA6 عند اختبارها على سرعة تدرج 1.8 m/sec و حمولة 30N .
  - إن آلية البلى الرئيسي الحاصل في البولي أميد هو الحفر الميكروي الميكانيكي و التشوه، بينما يكون البلى الحاصل في الـ PTFE هو البلى الالتصاقية.
  - 7. التوصيات
  - إجراء اختبارات تريبولوجية على بولي أميدات أروماتية لكونها ذات درجات انصهار عالية حرارة الانصهار .
- [1] رانيت. سويقات، "تصميم و تنفيذ آلة اختبار لدراسة تأثير خشونة السطوح على الاحتكاك و البلى" ، رسالة أعدت لنيل شهادة الماجستير في هندسة التصميم والإنتاج،(2014-2013)،جامعة تشرين كلية الهندسة الميكانيكية و الكهربائية.
- [2] نوفل. الأحمد، "تصميم الآلات 2"،(2010-2009) ، جامعة تشرين-كلية الهندسة التقنية.
- [3] Ahmed Abdelbary, "Wear of Polymers and Composites", Woodhead Publishing is an imprint of Elsevier,(2014).
- [4] Alireza Khoddamzadeh," Development of Lead-free PTFE Based Sliding Bearing Material", A thesis submitted to The Faculty of Graduate Studies and Research in partial fulfilment of the degree requirements of Master of Applied Science , Carleton University , Ottawa, Ontario, Canada , August, (2007).
- [5] Bekir Sadık Ünlü a, Enver Atik b,1, Sinan Köksal, "Tribological properties of polymer-based journal bearings ", sciencedirect (2009), Materials and Design 30.
- [6] F. Van De Velde , P. De Baets , "The friction and wear behavior of polyamide 6 sliding against steel at low velocity under very high contact pressures", sciencedirect wear 209,(1997).

- [13] M. Fox, Polymer Tribology, vol. 135, Lube Magazine, 2016, pp 32–37.
- [14] M. Harrass, K. Friedric, A.A. Almajid, Tribological behavior of selected engineering polymers under rolling contact, Tribology International 43 (2010) 635–646.
- [15] S. Bahadur, The development of transfer layers and their role in polymer tribology, Wear, vol. 245, no. 1, pp. 92–99, 2000.
- [16] S. K. Sinha and B. J. Briscoe, Polymer tribology. World Scientific, 2009.
- [17] S. Senthur Prabu, S. Prathiba, Ashu Sharma, Saurabh Garg, G. Manikandan, C. Sriram, "Investigation on Adhesive Wear Behaviour of Industrial Crystalline and Semi-Crystalline Polymers against Steel Counterface", International Journal of ChemTech Research, Vol.6, No.7, (2014).
- [18] Tim A. Osswald & Georg Menges, "Material Science of Polymers for Engineers 3rd Edition", (2012), Carl Hanser Verlag, Munich.
- [19] Ting Xie, Shihao Feng, Zhaoming Yan, Tingting Yang, "Tribo-magnetization of the PTFE composites containing ferromagnetic fillers of Fe, Co, or Ni " ,(2019), Wear, sciencedirect.
- [7] Jasbir Singh, Kunnan Singh, Yern Chee Ching, De Shin Liu, Kuan Yong Ching, Shaifulazuar Razali and Seng Neon Gan, " Effects of PTFE Micro- Particles on the Fiber-Matrix Interface of Polyoxymethylene/Glass Fiber/Polytetrafluoroethylene Composites", (2018), Materials, MDPI.
- [8] Jianzhang Wang, Fengyuan Yan, Qunji Xue , " Tribological behavior of PTFE sliding against steel in sea water ",(2009) , sciencedirect wear 267.
- [9] J. Moder, F. Grün, F. Summer, M. Kohlhauser, M. Wohlfahrt, Application of high performance composite polymers with steel counterparts in dry rolling/sliding contacts, Polymer Testing(2018).
- [10] K applications. Friedrich, Polymer composites for tribological, Advanced Industrial and Engineering Polymer Research (2018).
- [11] Miao X, Hu M, Li A, Wang D, Weng L, Li X, Zhang G, Investigation on the lubricity of self-lubricating ball bearings for cryogenic turbine pump, Tribology International (2018).
- [12] Michael M. Khonsari & E. Richard Booser, "Applied Tribology (Bearing Design and Lubrication) Second Edition" , (2008) , John Wiley & Sons.

## Experimental study on tribological behaviors of PA6 and PTFE polymers in the case of rolling friction

Mayssa Shash<sup>1\*</sup>, Hasan Hsamou<sup>2</sup>,

<sup>1</sup>Equipments and Machinery, Faculty of Technology Engineering, Tartous university, Tartous city, Syria, Maisaashash@tartous\_univ.edu.sy

<sup>2</sup>Agricultural Mechanization Engineering, engineer at Feed Establishment. Tartous City, Syria, Mahmoudhusamo@gmail.com.

\*Mayssa Shash, Maisaashash@tartous\_univ.edu.Sy

Published online: 30 September 2020

**Abstract—** Rolling/sliding contacts, such as rolling-element bearings or gears, are a keystone of many machines, which could not properly operate in absence of these components. Machine elements of this kind are typically made of certain variants of steel, whereby hardening processes are carried out in order to increase lifetime and reduce wear. Furthermore, proper lubrication of these tribo-systems is inevitable in order to guarantee a safe operation throughout the component's lifetime. In recent years high performance polymers, such as Polyether ether ketone (PEEK) or polyamid 46 (PA46), have become an option for application in rolling/sliding contacts. Due to the low density and effective manufacturing processes, such as injection moulding, polymers enable lightweight design solutions under relatively low cost. A comparative investigation based on tribological properties including the friction and wear behaviour of two polymers (Polyamide 6, Polytetrafluoroethylene) was researched in this study. Where samples were prepared by machining for precast cylinders of these materials, and experiments were carried out using a device designed for this purpose, with two parameters (rolling speeds and loads) in select. The morphology of the polymeric transfer film which plays a lubricating role in the dry operation conditions was observed for both materials. The obtained results showed that the friction feature of PTFE was better than that of PA 6 which released high sounds during testing duo to adhesion bonds with metallic counterface. The main wear mechanism of polyamide was micro mechanical machining and deformation, while was adhesive wear for PTFE, and the wear rate of PTFE was very high compared to PA 6 which suffered from delamination wear in some cases.

**Keywords—**"Self-lubricating, Dry operation conditions, Tripology, Polyamide".