



## Investigation of wear behavior of graphite and wax added polyamide 6

Hüseyin Ünal<sup>1</sup>, Alim Kaştan<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Metallurgical and Materials Engineering, Faculty of Technology, 54050 Sakarya University of Applied Sciences, Serdivan, Sakarya, Turkey

<sup>2</sup>Düden Vocational and Technical Anatolian High School, 07020, Kepez/Antalya, Turkey

### Highlights:

- Solid lubricant
- Wear rate decrease
- Friction coefficient decrease

### Keywords:

- Polyamide 6
- Graphite
- Wax
- Friction
- Wear

### Article Info:

Research Article  
Received: 07.07.2020  
Accepted: 20.09.2021

### DOI:

10.17341/gazimmfd.766016

### Correspondence:

Author: Alim Kaştan  
e-mail:  
kastanalim@gmail.com  
phone: +90 242 417 2520

### Graphical/Tabular Abstract

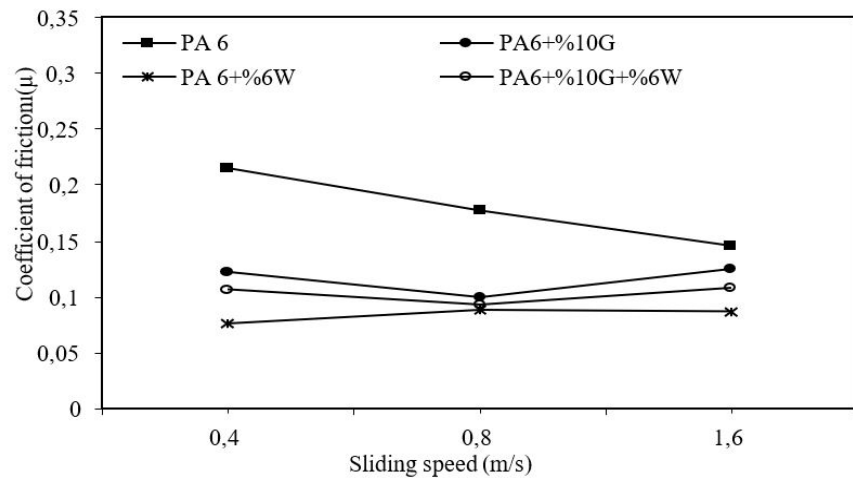


Figure A. Sliding speed- coefficient friction relationship of neat PA 6 and PA 6/G/V composites (load: 50N)

**Purpose:** This study investigated the tribological properties of composites under dry sliding conditions. Graphite and wax were added as solid lubricant into polyamide 6 (PA 6) polymer, which is a matrix material, to obtain composites.

### Theory and Methods:

For this study, pin samples from PA 6 and composites were prepared in 6 mm diameter and 50 mm length. Wear test were carried out on inhouse designed pin-on-disc arrangement test apparatus. Before each test, each sample was cleaned by alcohol and dried in air. For each material, the dry wear test was carried out for a sliding distance of 4000m, and under load values of 50N and 100N at sliding speeds of 0,4m/s, 0,8m/s, 1,2m/s. After each test the loss in pin mass were recorded. The wear rate was computed from the mass loss of the pin.

### Results:

The increase in load increased the friction coefficient of the pure PA6 and PA6. The pure PA6 had a higher coefficient of friction than PA6. The increase in speed reduced the coefficient of friction of pure PA6 but increased that of PA6 under the abrasion load of 50N. The increase in speed did not cause a change in the coefficient of friction of PA6/10%G but slightly increased that of the other composites under the abrasion load of 100N. The increase in sliding speed increased the wear rate of all specimens. The pure PA6 and PA 6+6% wax had the highest and lowest wear rate depending on sliding speed, respectively. The increase in abrasion load decreased the wear rate of PA 6.

### Conclusion:

It has been observed that the addition of WAX and Graphite together in PA6 improves the tribological properties positively.



## Grafit ve vaks ilave edilmiş poliamid 6'nın aşınma davranışlarının incelenmesi

Hüseyin Ünal<sup>1</sup>, Alim Kaştan<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 54050, Serdivan, Sakarya, Türkiye

<sup>2</sup>Düden Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi, 07020, Kepez, Antalya, Türkiye

### Ö N E Ç I K A N L A R

- Katı yağlayıcı
- Aşınma oranında azalma
- Sürtünme katsayısında azalma

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 07.07.2020

Kabul: 20.09.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.766016

### Anahtar Kelimeler:

Poliamid 6,  
grafit,  
vaks,  
sürtünme,  
aşınma

### ÖZ

Bu araştırmada, poliamid 6 (PA 6) matrisine katı yağlayıcı olarak grafit (G) ve vaks (V) ilave edilerek elde edilen kompozitlerin kuru kayma şartları altındaki tribolojik özellikleri incelenmiştir. PA 6/grafit/vaks polimer karışımları ikiz vidalı ekstruderde hazırlanmıştır. Araştırmada kullanılan numuneler enjeksiyonda kalıplama yöntemi ile üretilmiştir. Aşınma deneyleri, ASTM G99'a uygun olarak disk üzerinde pim aşınma cihazında gerçekleştirilmiştir. Deneyler 50N ve 100N aşındırma yükü altında 0,4 m/s, 0,8 m/s ve 1,2 m/s kayma hızında ve 4000m kayma mesafesinde gerçekleştirilmiştir. PA 6 matris içerisine ilave edilen katı yağlayıcılar (grafit, vaks) sayesinde sürtünme katsayısı ve aşınma oranında azalma olduğu görülmüştür. Deney sırasında pim üzerinde yapılan kayma yolu sıcaklık ölçümlerinde PA 6/vaks kompozitinin daha az ısındığı gözlemlenmiştir. Ayrıca PA 6/grafit/vaks kompozitlerin aşınma yüzeylerinin mikro-yapıları SEM yardımı ile incelenmiştir.

## Investigation of wear behavior of graphite and wax added polyamide 6

### H I G H L I G H T S

- Solid lubricant
- Wear rate decrease
- Friction coefficient decrease

### Article Info

Research Article

Received: 07.07.2020

Accepted: 20.09.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.766016

### Keywords:

Polyamide 6,  
graphite,  
wax,  
friction,  
wear

### ABSTRACT

At this research, the tribological properties of the composites obtained by adding graphite (G) and wax (W) as solid lubricant in to the polyamide 6 (PA 6) matrix under dry shear conditions were investigated. PA 6/graphite/wax polymer blends were prepared in twin screw extruder. The samples used in the research were produced by injection molding method. Abrasion tests were carried out pin on disk wear device in accordance with ASTM G99 standard. The tests were carried out at sliding speeds of 0.4 m/sec, 0.8 m/sec and 1.2 m/sec and sliding distance of 4000 m under the abrasion loads of 50N and 100N. Thanks to the solid lubricants (graphite, wax) added to the PA 6 matrix, the friction coefficient and wear rate decreased. Slip path temperature measurements on the pin showed that the PA 6/wax had lower temperature. Microstructures of wear surfaces of PA 6/graphite/wax were investigated using SEM.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Farklı özelliklerdeki polimerlerin fiziksel yöntemlerle harmanlanarak kullanıma yönelik optimum özelliklere sahip yeni malzemelerin üretilmesi endüstriyel ve bilimsel çalışmalarda ilgi çekmeye devam etmektedir [1]. Kompozit malzemeler bileşenlerine göre daha üstün özelliklere sahiptir [2]. Kompozit malzemelerin daha ekonomik, daha üstün özelliklere sahip olması giderek azalan doğal kaynakların verimli kullanılmasına katkı sağlamıştır. Günümüzde kompozit malzemeler uzay sektöründe, havacılıkta, spor gereçlerinde, inşaat alanında, otomotiv alanında ve daha birçok alanda geleneksel malzemelerin yerine kullanılmaktadır [3]. Polimerler, abrasiv ve adhesiv aşınmaya maruz kalır. Metal üzerinde hareket eden polimerlerin davranışı, ikisi arasındaki adhesiv aşınmayı karakterize eder. Polimer-polimer sistemindeki aşınma polimer-metal sistemindeki aşınmadan daha şiddetlidir. Aşınma açısından en iyi sonuç, genellikle benzer olmayan plastiklerin birbiri üzerinde hareket etmesi ile kristal yapıdaki polimerlerden elde edilir. Sürtünme katsayısı, aşınma faktörü, hacimsel aşınma hızı ve basınç-hız (P-V) oranı polimer aşınma direncini tanımlamada kullanılan temel öğelerdir. Sürtünme katsayısı (sürtünme kuvvetinin uygulanan kuvvete oranı) bir malzemenin diğeri üzerinde ne kadar kolay kayacağını gösterir. Düşük sürtünme katsayısı genellikle aşınma direncinin en iyi göstergelerinden biridir [4]. Polimerik malzemelerde özelliklerin geliştirilmesi amacıyla fiberler (aramid, cam, karbon, bor) kullanılırken dolgu maddesi olarak da kaolin, talk ve mika yaygın olarak kullanılır. Ayrıca polimerik malzemenin aşınma direncini geliştirmek ve sürtünme katsayı değerini düşürmek amacıyla grafit, karbon, teflon ve katı yağlayıcılar yapıya ilave edilir [5]. Polimer ve çelik karşılıklı çalıştığında katı yağlayıcılar çelik yüzeyinde koruyucu film tabakası oluşturur. Bu durum sürtünme katsayısının azalmasına katkı sağlar [6]. Sertlik, sağlamlık ve aşınma gibi özellikler açısından PA 6 ve PA 66 diğer poliamid türlerine göre daha üstün özelliklere sahiptir [7]. Kayma hızının düşük olduğu şartlarda PA 6'nın servis ömrü metal esaslı malzemelerden 2 ile 10 kat daha fazladır. Ayrıca PA 6'ya katı yağlayıcıların ilave edilmesi ile kayma ve aşınma özellikleri daha iyi malzemeler oluşturulabilir [8]. PA 6'nın mükemmel özelliklerinin yanında nem çekme, ısıl sapma ve boyutsal kararsızlık en zayıf özellikleridir. Bu özellikler yapıya ilave edilecek katkı maddeleri ile geliştirilebilir. Polimerlerin aşınma davranışlarını çevre, servis şartları ve yapıya ilave edilen katkı maddesinin cinsi yakından etkilemektedir [9]. Grafit, karbon atomlarının aynı düzlemdeki diğer karbonlara kovalent bağlarla bağlanan ve sadece Van der Waals kuvvetlerinin birbirini izleyen katmanlar arasında hareket eden bir yapıdan oluşan katmanlı yapı malzemedir. Van der Waals kuvvetleri nispeten zayıf olduğundan grafit tabakaları arasında geniş bir aralıkta atomlar, moleküller ve iyonlar oluşabilmektedir [10]. Doğal grafit, saf olarak ya da bazı katkı maddeleri ilave edilerek elektrik üretiminde, döküm sektöründe, pil yapımında, çelik sektöründe, kalem üretiminde, gres yağlarında, boya imalatında ve daha birçok alanda kullanılmaktadır [11].

Polimerik malzemelerin tribolojik davranışları üzerine birçok akademik çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda matris malzemeye ilave edilen katkı maddesinin şekli, boyutu, oranı ile deney parametrelerinin (takım geometrisi, çevre şartları) etkileri belirlenmeye çalışılmıştır. Wan vd. [12], Kaştan vd. [13], Ünal vd. [9], Kumar vd. [14], Zhong vd. [15], Liu vd. [16], Pan vd. [17], Kang vd. [18], Özsoy vd. [19], Samyn vd. [20], Ünal vd. [21] yaptıkları çalışmalarda katı yağlayıcı olarak kullandıkları grafit, vaks ya da her ikisinin kompozitin aşınma özelliklerini olumlu yönde geliştirdiğini belirtmişlerdir. Bu çalışmada PA 6 matris içerisine grafit ve vaks ilave edilerek oluşturulan kompozitlerin aşınma davranışları incelenmiştir.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDY)

Bu çalışmada kullanılan matris malzemesi PA 6 Belçika'daki Domo polimerlerden, katı yağlayıcılardan grafik Sovitec Belçika firmasından, vaks ise Türkiye'deki Konwaks'tan temin edilmiştir. Çalışmada kullanılan granüller, 220°C ila 225°C arasındaki sıcaklıklarda çift vidalı ekstruder (NR II-75) vasıtası ile hazırlanmıştır. Granüller enjeksiyon işleminden önce 80°C' de 4 saat fırında kurutma işlemine tabi tutulmuştur. Numuneler 220°C ila 250°C sıcaklık aralığında enjeksiyonda kalıplanarak üretilmiştir. Bu çalışmada katkısız PA 6, PA 6+%6vaks, PA 6+%10G, PA 6+%10G+%6 vaks olmak üzere dört farklı kompozisyonda numune hazırlanmıştır. Aşınma deneylerinde kullanılan numunelerin çapı 6 mm ve uzunluğu 50 mm ölçülerinde üretilmiştir. Aşınma deneyleri, ASTM G99'a uygun olarak disk üzerinde pim aşınma cihazında gerçekleştirilmiştir. Deneyler 50N ve 100N aşındırma yükü altında 0,4m/s, 0,8m/s ve 1,2m/s kayma hızında ve 4000m kayma mesafesinde yapılmıştır. Aşınma deneyleri 23°C oda sıcaklığında yapılmıştır. Deneylerden önce aşınmanın yapılacağı disk yüzeyleri ve aşınacak olan pim numuneleri asetonla temizlenmiştir. Şekil 1'de aşınma deneylerinin yapıldığı disk üzerinde pim aşınma cihazının şematik görüntüsü verilmiştir. Bu cihaz elektrik motoru, bilgisayar, yük hücresi (Load cell), pim tutucu, devir ayarlayıcı ve aşınma yüklerinden oluşmaktadır. Aşınma numuneleri pim tutucuya bağlanmıştır. Devir ayarlayıcı ile elektrik motoru istenilen hızda döndürülmüştür. Pim koluna deneyde kullanılacak yük eklenmiştir. Pimin disk üzerine bırakılması ile aşınma deneyi başlatılmıştır.

Disk dönmeye yönünde uyguladığı yanal kuvvet yük hücresi tarafından ölçülür ve dakikada 1000 veri şeklinde bilgisayara kaydedilir. Yanal kuvvetin uygulanan yüke bölünmesi ile Eş. 1'deki formül kullanılarak sürtünme katsayısı hesaplanmıştır.

$$\mu = \frac{F_S}{F_N} \quad (1)$$

Burada  $\mu$ : Sürtünme katsayısını,  $F_S$ : Yanal sürtünme kuvvetini ve  $F_N$ : Numune üzerine uygulanan aşındırma yükünü ifade eder.

Aşınma sonucunda meydana gelen ağırlık kaybının bulunması için deneyden önceki ve deneyden sonraki pim numunenin ağırlıkları 0,001 gr hassasiyetindeki terazi ile ölçülüp deney öncesi ağırlıktan ( $M_1$ ) deney sonrası ağırlık ( $M_2$ ) çıkarılarak ağırlık kaybı ( $\Delta m$ ) hesaplanmıştır. Ağırlık kaybı Eş. 2'deki formül ile hesaplanır.

$$\Delta m = M_1 - M_2 \quad (2)$$

Spesifik aşınma oranı formülü ise Eş. 3'te verilmiştir.

$$K_0 = \frac{\Delta m}{L * \rho * F} \quad (m^2/N) \quad (3)$$

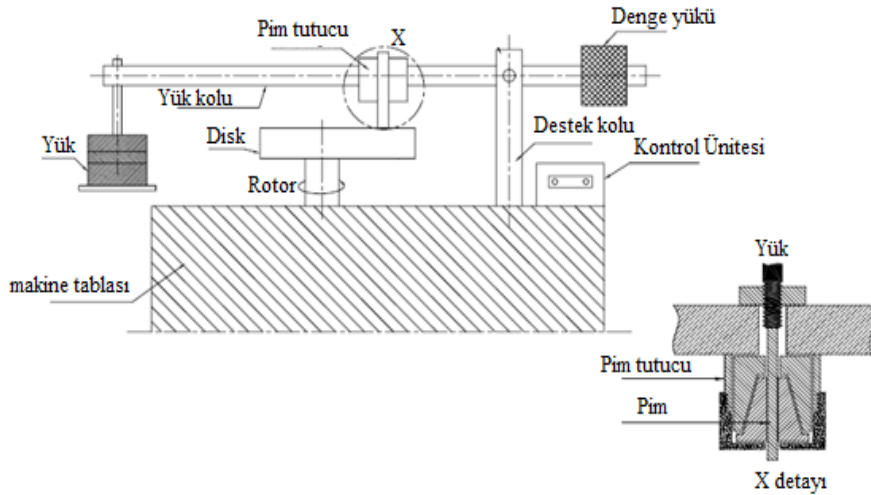
Bu formülde;  $K_0$ : spesifik aşınma oranını,  $L$ : metre cinsinden kayma mesafesini,  $\rho$ : deney numunelerinin yoğunluğunu ( $g/cm^3$ ) ve  $F$  Newton (N) cinsinden aşındırma yükünü ifade eder. Tablo 1'de aşınma deneylerinde kullanılan malzemelerin karışım oranları, deney sıcaklığı, kayma mesafesi, kayma hızı ve aşındırma yükü ile ilgili değerler verilmiştir.

### 3. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA (EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION)

Şekil 2 ve Şekil 3'te katkısız PA 6 ve PA 6+%6vaks, PA 6+%10G, PA 6+%10G+%6 vaks polimer karışımlarının 0,4m/s, 0,8m/s, 1,2m/s kayma hızlarında, 50N ve 100N aşındırma yüklerindeki kayma hızı-sürtünme katsayısı grafikleri verilmiştir. Şekil 2 incelendiğinde katkısız PA 6'nın en yüksek sürtünme katsayısı değerine sahip olduğu görülür. Artan kayma hızı ile birlikte sürtünme katsayısı

değerinde azalma gözlemlenmiştir. PA 6 içerisine ilave edilen hem grafitin hem de vaks sürtünme katsayısının değerini düşürmüştür. Yetkin vd.[5] yapmış oldukları çalışmada PA 6 içerisine ilave edilen vaksın sürtünme katsayısını düşürdüğünü belirtmişlerdir. PA 6+%6 vaks kompozitinde en düşük sürtünme katsayısı değeri gözlemlenmiştir. Kayma hızının artması ile birlikte sürtünme katsayısı değeri ciddi bir değişiklik olmamıştır. PA 6+%10G ve PA 6+%10G+%6 vaks kompozitlerinin kayma hızı-sürtünme katsayısı ilişkisinin benzer olduğu gözlemlenmiştir. Her iki kompozitinde 0,8m/s kayma hızında sürtünme katsayısı değeri azalmış, 12m/s kayma hızında ise artış göstermiştir. Aşındırma yükünün 100N'a çıkarılması ile tüm malzemelerin kayma hızına bağlı olarak sürtünme katsayısı değerlerinde değişim gözlemlenmiştir. 50N yük altında tüm hızlarda en düşük sürtünme katsayısı değeri sahip kompozit PA 6+%6 vaks iken, 100N yük altında ise PA 6+%10G+%6 vaks kompozitidir. Buradan hareketle düşük yüklerde PA 6 içerisine ilave edilen vaksın sürtünme katsayısını düşürdüğü ancak artan aşındırma yükü ile birlikte bu etkinin azaldığı söylenebilir. Pan vd. [17] yapmış oldukları çalışmalarda vaksın tribolojik özelliklerin geliştirilmesi bakımından etkili ve ucuz bir modifiye edici olduğunu belirtmişlerdir.

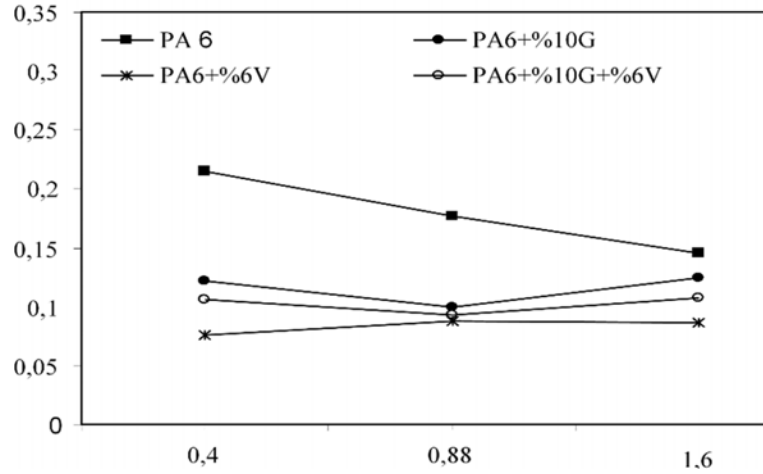
Şekil 4'te katkısız PA 6 ve PA 6+%6vaks, PA 6+%10G, PA 6+%10G+%6 vaks polimer karışımlarının 0,4m/s, 0,8m/s, 12m/s kayma hızlarında, 50N ve 100N aşındırma yükleri altındaki kayma mesafesi boyunca pim yüzeyindeki sıcaklık değişimi görülmektedir. Tüm numunelerin artan kayma mesafesi ile sıcaklık değerlerinin arttığı söylenebilir. Ancak bu artışlarda farklılıklar gözlemlenmiştir. 2300m'den sonra



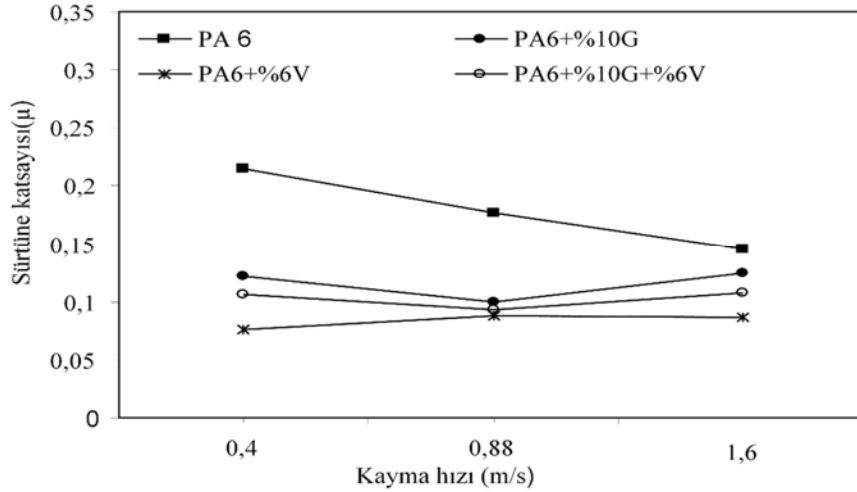
Şekil 1. Aşınma cihazı (Wear device)

Tablo 1. Aşınma deney malzemeleri ve test koşulları (Wear test Materials and conditions)

Malzeme	Deney sıcaklığı (°C)	Kayma Mesafesi (m)	Kayma hızı (m/s)	Aşındırma yükü (N)
Katkısız PA6	23±2	4000	0,4	50
PA6+%6Vaks			0,8	
PA6+%10Grafit			1,2	
PA6+%10Grafit+%6Vaks				



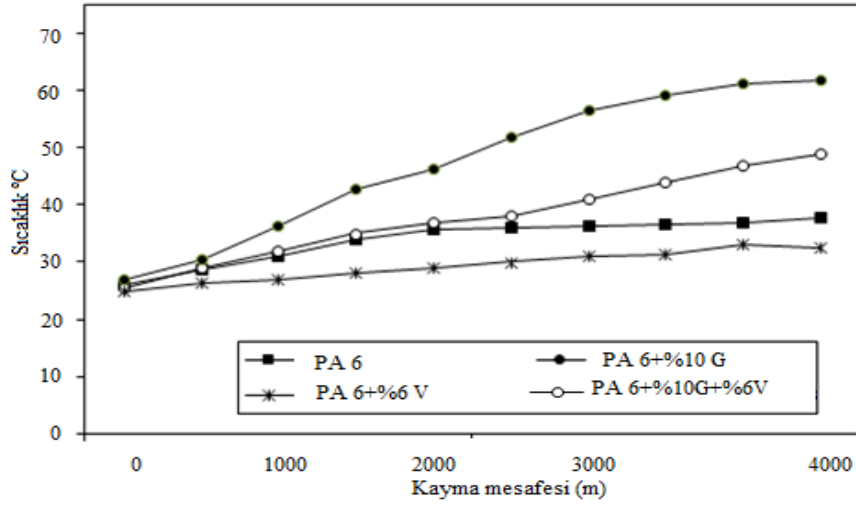
**Şekil 2.** Katkısız PA 6 ve PA 6 /G/V kompozitlerinin kayma hızı-sürtünme katsayısı ilişkisi, yük: 50N.  
(Sliding speed- coefficient friction relationship of neat PA 6 and PA 6 /G/V composites, load: 50N)



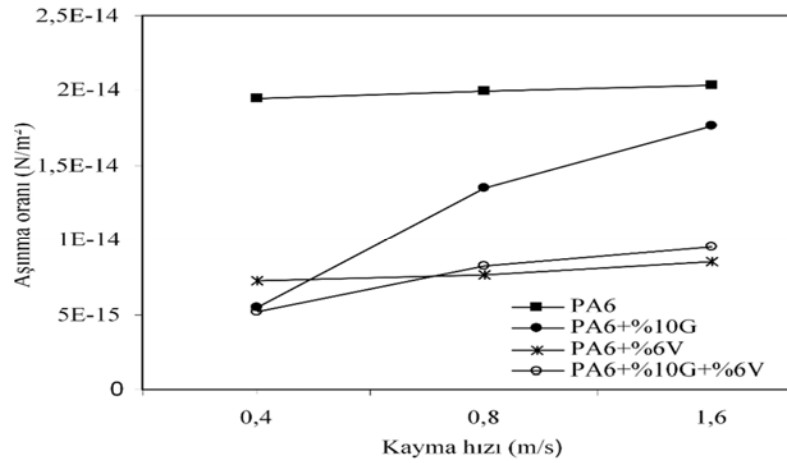
**Şekil 3.** Katkısız PA 6 ve PA 6 /G/V kompozitlerinin kayma hızı-sürtünme katsayısı ilişkisi, yük: 100N.  
(Sliding speed- coefficient friction relationship of neat PA 6 and PA 6 /G/V composites, load: 100N)

katkısız PA 6 ve PA 6+%6vaks karışımlarının sıcaklık değerlerinde önemli bir artış gözlemlenmemiştir. Fakat PA 6+%10G+%6vaks ve PA 6+%10G karışımlarının artan kayma yolu ile pim sıcaklıklarının artışı devam etmiştir. Yapılan deneylerde en yüksek pim sıcaklığı PA 6+%10G kompozitinde görülürken, en düşük pim sıcaklığı ise PA 6+%6vaks kompozitinde gözlemlenmiştir. PA6+%5 G ve PA6+%15 G kompozitlerinin disk yüzey sıcaklığının PA 6'nın camsı geçiş sıcaklığının ( $T_g = 52^\circ\text{C}$ ) üzerinde yaklaşık  $65^\circ\text{C}$ 'ye ulaştığı Şekil 4'ten anlaşılmaktadır. Bu sıcaklık polimer molekül zincirlerinin gevşemesine neden olmuştur. Ünal vd. [21] yapmış oldukları çalışmada da benzer sonuçları bulmuşlar ve bu durumun aşınma sırasında polimer yüzey moleküllerinin preslenme, çekilme ve kesilme sonucunda aktif radikallerin, kırılmamış zincirlerle reaksiyona girerek bir dizi yeni zincirin ortaya çıkmasına neden olduğunu ve bu olayın grafit dolgu maddesi kullanılan kompozitlerde oldukça aktif olarak görüldüğünü belirtmişlerdir.

Şekil 5 ve Şekil 6'da katkısız PA 6 ve PA 6+%6vaks, PA 6+%10G, PA 6+%10G+%6 vaks polimer karışımlarının 0,4m/s, 0,8m/s, 12m/s kayma hızlarında, 50N ve 100N aşındırma yükleri altındaki aşınma oranı hız grafikleri verilmiştir. Her iki aşındırma yükünde de en yüksek aşınma oranı katkısız PA 6 kompozitinde görülmüştür. Katkısız PA 6 polimerinin 50N aşındırma yükü altında yapılan deneylerde aşınma oranının artan hıza bağlı olarak değişmediği tespit edilmiştir. Ancak Şekil 6'da görüldüğü gibi aşındırma yükünün 100N'a çıkarılması ile birlikte artan kayma hızına bağlı olarak aşınma oranı değerlerinde de artış gözlemlenmiştir. Aşınma yüzeyinin daha fazla ısınmasının bu duruma sebep olduğu düşünülmektedir. Şekil 4'te görüldüğü gibi deney sırasında sürekli artan sıcaklık camsı geçiş sıcaklığının üzerine çıkmıştır. Gevşeyen polimer zincirleri PA 6 matrisin mukavemetinin düşmesine neden olduğu sanılmaktadır. Bunun sonucunda aşınma oranında artış gözlemlenmiştir. PA 6+%6vaks kompoziti, hem 50N ve hem de 100N aşındırma yükünde yapılan deneylerde en



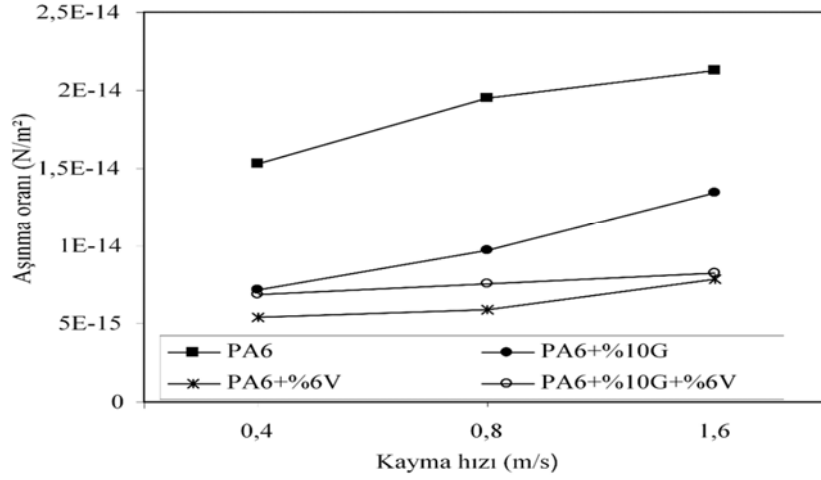
Şekil 4. PA 6 and PA 6/G/V kompozitlerin kayma mesafesi- sıcaklık ilişkisi (Sliding distance- temperature relationship of neat PA 6 and PA 6/G/V composites (load: 50N))



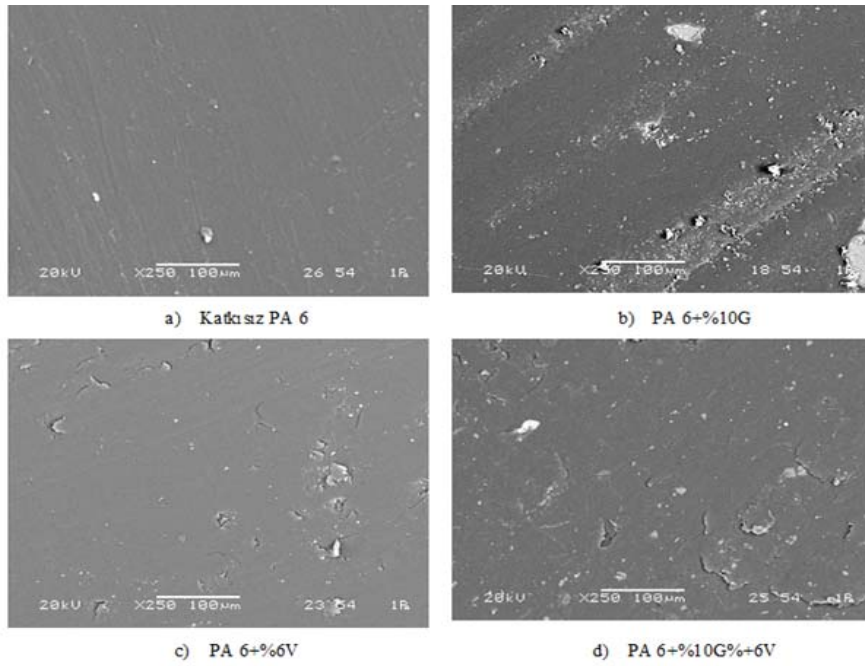
Şekil 5. Katkısız PA 6 ve PA 6 /G/V kompozitlerinin kayma hızı - spesifik aşınma oranı ilişkisi, yük: 50N. (Sliding speed- specific wear rate relationship of neat PA 6 and PA 6 /G/V composites, load: 50N)

düşük aşınma oranı değerine sahiptir. Her iki deneyde de artan kayma hızı ile birlikte aşınma oranında da artış gözlemlenmiştir. Kayma hızındaki değişim en fazla PA 6+%10G kompozitinin aşınma oranını değiştirmiştir. Artan kayma hızı ile birlikte aşınma oranında yüksek oranda artış meydana gelmiştir. Ancak %6 vaks ilavesi ile elde edilen PA 6+%10G+%6 kompozitinin kayma hızına bağlı aşınma oranı değerindeki artış azalmıştır. Buradan hareketle PA 6 içerisine grafit ve vaksın beraber ilave edilmesi ile hıza bağlı olarak aşınma oranının değerinin düştüğü ve daha kararlı hale geldiği söylenebilir. Yetkin vd. [5] ile Samyın vd. [20] yapmış oldukları çalışmalarda benzer sonuçlar bulmuşlardır. Yine başka bir çalışmada Özsoy vd. [19] PA 6 içerisine ilave edilen vaksın aşınma oranında %73'e kadar azalma olduğunu belirtmişlerdir. Şekil 7'de 100N aşındırma yükü ve 1,6 m/s kayma hızında yapılan deneylerden elde edilen katkısız PA 6 polimeri ile PA 6+%6 vaks, PA 6+%10G, PA

6+%10G+%6 vaks kompozitlerinin pim aşınma yüzeylerinin SEM resimleri görülmektedir. Şekil 7a'da katkısız PA 6'nın aşınma yüzeyinin düzgün olduğu, kopan parçaların yüzeye yapışmadığı ve aşınmanın sürekli devam ettiği görülmüştür. Şekil 7b'de aşınma yüzeyinde çok sayıda kopmuş parçacıklar görülmektedir. Bu durum grafit tabakaları arasındaki zayıf Van der Waals kuvvetlerinden dolayı aşınma sırasında sürekli kopan grafitlerin sebep olduğu sanılmaktadır. Ayrıca kopan parçalar pim ile aşınma yüzeyinde film tabakası oluşturarak aşınmayı azaltmaktadır. Şekil 7c'de PA 6+%6 vaks kompozitinin pim yüzeyinin aşınma resmi görülmektedir. Yüzeyin düzgün olduğu, bazı noktalarda ayrılmaların olsa da kopmaların daha az olduğu görülmektedir. Bunun sebebinin PA 6'ya ilave edilen vaksın aşınma yüzeyi üzerindeki birleştirici etkisi ile kopmaları en aza indirmesinden ve katı yağlayıcı etkisinden kaynaklandığı sanılmaktadır. Böylece malzemede ki kütle



**Şekil 6.** Katkısız PA 6 ve PA 6 /G/V kompozitlerinin kayma hızı-spesifik aşınma oranı ilişkisi, yük: 100N.  
(Sliding speed- specific wear rate relationship of neat PA 6 and PA 6 /G/V composites, load: 100N)



**Şekil 7.** PA 6 ve PA 6/G/W kompozitlerin aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri, yük: 100N, kayma hızı: 1.6 m/s, a) Katkısız PA 6, b) PA 6+%10G, c) PA 6+%6V, d) PA 6+%10G+%6V  
(SEM of wear pin surfaces of PA 6 and PA 6/G/W composites under 100N load and at 1.6m/s sliding speed. a) Pure PA 6, b) PA 6+%10G, c) PA 6+%6V, d) PA 6+%10G+%6V)

kaybı azalmış ve aşınma direnci artmıştır. Daha önce Ünal vd. [9] yaptıkları çalışmada matris içerisine ilave edilen vaks dolgusu ile pim yüzeyinde transfer filmin daha aktif, stabil ve farklı kompozisyonda oluştuğunu, bunun sonucunda sürtünme yüzeylerini koruyarak çok daha düşük sürtünme katsayıları ile aşınma oranı değerleri elde edildiğini belirtmişlerdir. Samyn vd. [20] katı yağlayıcıların aşınma

sırasında daha homojen bir transfer film oluşturması nedeniyle düşük sürtünme ve aşınma için en uygun katkıları olduğunu belirtmişlerdir. Şekil 7d'de Şekil 7a'ya benzer bir aşınma davranışı görülmektedir. Ancak vaksın PA 6 matris içerisine grafit ile birlikte ilave edilmesi ile aşınmaya karşı direnci azaltmış ve daha fazla kütle kaybı oluşmuştur. Matris içerisindeki katkı maddesi oranının artması ile vaksın

birleştirici etkisinin azalması sonucunda aşınmanın arttığı düşünülmektedir.

#### 4. SİMGELER (SYMBOLS)

PA 6	: Poliamid 6
$M_1$	: Numunenin aşınma öncesi ağırlığı
$M_2$	: Numunenin aşınma sonrası ağırlığı
$\Delta m$	: Numunenin aşınma öncesi ile aşınma sonrası arasındaki ağırlık farkı (g)
g	: gram
L	: Kayma mesafesi (m)
m	: metre
$\rho$	: Numune yoğunluğu (g/cm <sup>3</sup> )
F	: Aşındırma yükü (N)
N	: Newton
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu

#### 5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada katkısız PA 6 ve PA 6 kompozitlerin tribolojik özellikleri incelenmiş ve aşağıdaki sonuçlar bulunmuştur.

- Yapılan deneyler sonucunda katkısız PA 6 ve PA 6 kompozitlerin yükün artması ile birlikte sürtünme katsayılarının da arttığı gözlemlenmiştir. Katkısız PA 6'nın sürtünme katsayısı değerinin PA 6 kompozitlere göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.
- 50N aşındırma yükü altında yapılan deneylerde hızın artması ile birlikte katkısız PA 6'nın sürtünme katsayısı değeri azalırken PA 6 kompozitler ise artış eğilimi göstermiştir. 100N yük altında yapılan deneylere ise PA 6/%10G kompozitinin hızla bağlı sürtünme katsayısı değeri stabil iken diğer kompozitler ise az da olsa artış göstermiştir.
- Deneyde kullanılan tüm malzemelerde genel olarak artan kayma hızı ile birlikte aşınma oranı da artmıştır. Bu artış değeri en büyük katkısız PA 6'da iken en küçük ise PA 6+6%vaks kompozitinde tespit edilmiştir.
- PA 6 ve PA 6 kompozitlere uygulanan aşındırma yükünün artması ile aşınma oranı değerlerinde azalma gözlemlenmiştir.
- Deney numunelerinin aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri incelendiğinde katkısız PA 6 ve PA 6/G/V kompozitlerin aşınma yüzey morfolojisinin farklı olduğu tespit edilmiştir. Buradan hareketle PA 6 içerisine ilave edilen grafit ve vaksın polimerin aşınma davranışını olumlu yönde geliştirdiği söylenebilir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Compatibilization of polyoxymethylene (POM) / polypropylene (PP) blends and investigation of mechanical, rheological and solid-state creep properties, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35 (4), 2225-2238, 2020.
2. Tuttle M.E., Structural Analysis of Polymeric Composite Materials, Marcel Dekker, Inc., New York, 2004.

3. Doğanay, S., Ulcay, Y., Farklı Oranlarda Takviye Edilmiş Cam Lifi Polyester Kompozitlerin Deniz Suyu Etkisi Altında Yorulma Davranışının İncelenmesi, Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 12 (2), 85-95, 2007.
4. Savaşçı, T., Kısa Açıklamalarıyla En Yaygın Kullanılan Fiziksel Nitelikli Standart Plastik Testleri, TMMOB, Plastik Teknolojisi 1 seminer notları, İstanbul, 52-77, 1996.
5. Yetgin, S. H., Ünal, H., Mimaroglu, A., Fındık, F., Influence of Process Parameters on the Mechanical and Foaming Properties of PP Polymer and PP/TALC/EPDM Composites, Polymer-Plastics Technology and Engineering, 52 (5), 433-439, 2013.
6. Cenna, A.A., Dastoor, P., Beehag, A., Page, N.W., Effects of graphite particle addition upon the abrasive wear of polymer surfaces, Journal of Materials Science, 36, 891-900, 2001.
7. Billmeyer, F., Textbook of Polymer Science, John Wiley & Sons Inc., Canada, 407-413, 1990.
8. Keskin, S., Plastik İşleme Teknikleri ve Kalite Kontrol, Kimya Mühendisleri Odası, İstanbul, 142-145, 1989.
9. Ünal, H., Yetgin, S. H., The Investigation of Tribological Performance of Polyamide 6 Polymer and Polyamide 6/Wax Blend Against Themselves, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 31 (2), 457-463, 2016.
10. Selig H, Ebert LB. Adv Inorg Radiochem, 23, 289-327, 1980.
11. Lwecinska, B., Mineralogy of Natural Graphites, Polska Akademia Oddzial, Poland, 1980.
12. Wan, H., Ye, Y., Chen, L., Chen, J., Zhou, H., Influence of Polyfluoro-Wax on the Friction and Wear Behavior of Polyimide/Epoxy Resin-Molybdenum Disulfide Bonded Solid Lubricant Coating, Tribology Transactions 59 (5), 889-895, 2016.
13. Kaştan A., Salman, S., Ünal, H., Grafit Katkılı Poliamid 6'nın Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Journal of Bartın University Engineering and Technological Sciences 4 (2), 50-55, 2016.
14. Kumar, S. S., Kanagaraj, G., Investigation on Mechanical and Tribological Behaviors of PA 6 and Graphite-Reinforced PA 6 Polymer Composites, Arabian Journal for Science and Engineering, 41, 4347-4357, 2016.
15. Zhong, X., Xia, Y., Feng, X., Tribological application and mechanism of epicuticular wax, Friction, 7 (1), 44-58, 2019.
16. Liu, L., Yan, F., Li, M., Zhang, M., Xiao, L., Shang, L., Yuhui, A., Improving interfacial properties of hierarchical reinforcement carbon fibers modified by graphene oxide with different bonding type, Composites Part A 107, 616-625, 2018.
17. Pan, B., Zhao, J., Zhang, Y., Zhang Y., Wear Performance and Mechanisms of Polyphenylene Sulfide/Polytetrafluoroethylene Wax Composite Coatings Reinforced by Graphene, Journal of Macromolecular Science, Part B: Physics, 51,1218-1227, 2012.



18. Kang SC., Chung, DW., Improvement of frictional properties and abrasive wear resistance of nylon/graphite composite by oil impregnation, *Wear*, 254 (1-2), 103-110, 2003.
19. Özsoy, İ., Özsoy, N., Ünal, H., Mimaroglu, A., Evaluation of the influences of wax content on the tribological and mechanical performance of polytetrafluoroethylene-blended polyamide, *Proceedings of the institution of mechanical engineers part Journal of Engineering Tribology*, 227 (12) 1399-1405, 2013.
20. Samyn, P., Baets, P. D., Schoukens, G., Driessche, I. V., Friction, wear and transfer of pure and internally lubricated cast polyamides at various testing scales, *Wear*, 262, 1433–1449, 2007.
21. Ünal, H., Mimaroglu, A., Friction and wear performance of polyamide 6 and graphite and wax polyamide 6 composites under dry sliding conditions, *Wear*, 289, 132-137, 2012.

