



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Katı Yağlayıcı Katkılı Poliamid Mühendislik Polimerinin Mekanik ve Tribolojik Performanslarının İncelenmesi

Hüseyin ÜNAL^{a,*}, Salih Hakan YETGİN^b

^a Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, TÜRKİYE

^b Makine Eğitimi Bölümü, Simav Teknik Eğitim Fakültesi, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: unal@sakarya.edu.tr

ÖZET

Bu deneysel çalışmada, katkısız poliamid 6 (PA 6), %15 grafit katkılı poliamid 6 (PA6-15G) kompozit ve %15 grafit ve %6 vaks katkılı poliamid 6 (PA6-15G-6W). kompozit malzemelerin kendi üzerlerinde kuru kayma şartları altındaki aşınma ve sürtünme davranışları araştırılmıştır. Kompozit malzemelerin karışımı ikiz vidalı ekstruder kullanılarak hazırlanmış, tüm test numuneleri de enjeksiyonla kalıplama tekniği kullanılarak üretilmiştir. Çekme, darbe ve aşınma deneyleri ASTM standartlarında yapılmıştır. Aşınma ve sürtünme testleri, pim-disk aşınma cihazında gerçekleştirilmiştir. Aşınma testleri 0,5 m/s kayma hızında, 10N, 20N ve 30N yüklerde oda sıcaklığında yapılmıştır. Yapılan aşınma deneyleri sonucunda, PA6-15G-6W kompozitinin tribolojik özelliklerinin katkısız PA6 ve PA6-15G kompozitine göre daha iyi olduğu tespit edilmiştir. PA6-15G kompozitine vaks ilave edilmesiyle, kompozitin sürtünme katsayısı ve spesifik aşınma oranının azaldığı tespit edilmiştir. Deneylerde kullanılan malzemelerin aşınma mekanizmalarını belirlemek için optik mikroskopta aşınma yüzey mikro-yapıları alınmıştır.

Anahtar Kelimeler: Polyamide, Triboloji, Mekanik özellikler, Grafit, Vaks, Katı yağlayıcı

The Investigation of Mechanical and Tribological Performance of Engineering Polyamide Polymer with Solid Lubricants

ABSTRACT

In this experimental study, friction and wear behavior of polyamide 6 and graphite filled and wax blended polyamide 6 sliding against themselves under dry sliding environment were studied. Materials used in the study are pure polyamide 6, 15wt% graphite filled polyamide 6 (PA6-15G) and polyamide 6 with 15%wt. graphite and 4%wax addition (PA6-15G-4W). The granules were produced in a twin screw extruder and then injection molded to provide the tensile, impact and wear test samples. Tensile, impact, and wear behaviors are evaluated according to ASTM standard. A pin-on-disc wear test rig is used for evaluating the friction and wear behavior. The friction and wear tests were conducted at applied loads of 10N, 20N and 30N and at sliding speeds of 0.5 m/s. It is found that the PA6-15G-4W compound have superior tribological behavior than that of pure PA6 polymer and PA6-15G composite. As a result of study, the coefficient of friction and specific wear rate of

polyamide 6 compounds with the addition of wax were reduced. Finally, optical microscope was used to examine the wear mechanism of polyamide 6 and its compounds.

Keywords: Polyamide, Tribology, Mechanical properties, Graphite, Wax, Solid lubricants

I. GİRİŞ

YARI-KRİSTALİN bir termoplastik olan Poliamid (PA) polimeri düşük yoğunluk, düşük ses ve kendinden yağlama gibi özellikleri nedeniyle geniş bir kullanım alanına sahiptir. Ancak, poliamid malzemelerin aşınma direnci mühendislik uygulamaları için tatmin edici değildir [1]. Poliamid kompozit malzemelerin tribolojik özelliklerini geliştirmek için farklı yöntemler mevcuttur. Birçok çalışmada polimerlere inorganik katkıların ilave edilmesi ile polimer kompozitlerin tribolojik özelliklerinin geliştiği görülmüştür. Tanaka ve Kawakami [2] cam fiber, ZrO₂ partikülleri ve katı yağlayıcı katkılı PTFE (poli-tetra-flor-etilen) esaslı kompozitlerin sürtünme ve aşınma davranışlarını çalışmışlardır. Çalışma sonucunda, cam fiber ve ZrO₂ partiküllerinin katı yağlayıcıya göre aşınma azalımı üzerine daha etkili olduğunu belirtmişlerdir. Fiber ve partikülün kompozitin yük taşıma kapasitesini artırdığını belirtmişlerdir. Yan ve arkadaşları [3] ise grafit katkılı PTFE kompozitin aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Xian ve Zhang [4] kısa karbon fiber katkılı polieterimid (PEI) kompozitlerin tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Hacimce %5-20 kısa karbon fiber eklenmesi ile sürtünme katsayısı azalmış aşınma direnci artmıştır. Bolvari ve arkadaşları [5] PTFE katkılı ve katısız PA66/aramid fiber kompozitlerin takım çeliğine karşı ring-on-blok sistemi ile aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Aramid fiber, %5-30 oranında ilave edilmiştir. PTFE katkı ise %10 oranında sabitlenmiştir. PTFE bulunmayan numunelerde aramid fiber miktarı ile çekme dayanımı artmıştır. %10 PTFE katkılı numunelerde, kopma uzaması, eğme özellikleri ve darbe dayanımı azalmıştır. Katısız PTFE numunelerinde, sürtünme katsayısı aramid miktarına bağlı olarak 0.6 civarında elde edilmiştir. Artan aramid miktarında %10PTFE eklenmesi ile sürtünme katsayısı %50 oranında azalmıştır. %5-15 fiber içeriğinde en fazla aşınma azalımı elde edilmiştir. Kang ve Chung [6] katı yağlayıcı miktarlarının mekanik ve tribolojik karakteristiklerini incelemişlerdir. %2-8 arasındaki katı yağlayıcı katkılı döküm PA 6 polimerinin özelliklerini incelemişlerdir. %6 yağlayıcı ilaveli PA6 için sürtünme katsayısı 0.18'den 0.12'ye azalmıştır. Vaks katkılı PA6 polimeri yağ katkılı PA6 polimerine göre daha düşük sürtünme katsayısı göstermiştir. Artan kayma hızı ve temas basıncı ile birlikte sürtünme katsayısı 0.08'e kadar azalmıştır. Kang ve arkadaşları [7] grafit katkılı PA6 polimerinin tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. %2-4 grafit katkılı bileşenlerde sürtünme katsayısı artarken %2 yağ katkılı bileşenlerde sürtünme katsayısı saf PA6 polimerinden daha düşük elde edilmiştir. Aşınma oranı, saf PA6'ya göre %10 oranında azalmıştır. Yağ ve PA6 tarafından oluşan yüzey film tabakası PA6'nın aşınmasını engellemiştir. You ve arkadaşları [8] nano-TiO₂(titanyum di oksit)/PA6 kompozitlere ilave ettikleri molibden di sülfid (MoS₂), çok yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (ÇYMAPE) ve PTFE katkıların aşınma ve sürtünme davranışlarını incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, UHMWPE veya PTFE katkı kullanıldığında sürtünme katsayısı ve aşınma oranı azalırken MoS₂ kullanıldığında TiO₂/PA6 nano kompozitlerin tribolojik özellikleri kötüleşmiştir. Zhang ve arkadaşları [9], kısa karbon fiber, mikro SiO₂ ve grafit katkılı poliimid (PI) polimerinin aşınma ve sürtünme davranışlarını inceledikleri çalışmada, tek başlarına katılan grafit ve kısa karbon fiber poliimid kompozitin tribolojik özelliklerini geliştirirken mikro SiO₂ sürtünme ve aşınma özelliklerini kötüleştirmiştir. Katkılar karışım olarak kullanıldığında ise aşınma ve sürtünme için en iyi özellikler elde edilmiştir.

Bu çalışmada, katkısız PA6 polimeri, %15 grafit katkılı PA 6 (PA 6+%15G) ve %15 grafit/%6waks katkılı PA6 (PA6+%15G+%6W) polimerleri kullanılarak mekanik ve tribolojik özellikler incelenmiştir. Katkıların mekanik özellikler üzerine etkisini incelemek için çekme testleri yapılmıştır. Aşınma testleri ise pim-on-disk sistemi kullanılarak kuru ortam şartlarında 0.5m/s kayma hızında ve üç farklı yük (10-20-30N) altında gerçekleştirilmiştir.

II. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu deneysel çalışmada, matris malzemesi olarak Volgamid ticari isimli Rusya'dan temin edilen poliamid 6 polimeri kullanılmıştır. Grafit ve wax sırasıyla Odak Ltd. Şti/ İstanbul ve Konsan/Konya'dan temin edilmiştir. Grafit ve vaks katkılı poliamid6 kompozit malzemeler endüstriyel amaçlı NR-II tip ikiz vidalı ekstruderde granül formunda üretilmişlerdir. Ekstruder ısıtıcı sıcaklıkları ise 220°C ile 240°C arasında ayarlanmıştır. Çekme, darbe ve aşınma test numuneleri ERAT marka enjeksiyon makinesi kullanılarak üretilmiş olup, enjeksiyon ısıtıcı sıcaklıkları 225-240°C arasında ve enjeksiyon basıncı ise 80MPa olarak ayarlanmıştır. Çekme deney numuneleri ASTM D638 standardına uygun olacak şekilde üretilmiş ve Zwick Z020 tip çekme cihazı kullanılarak 10mm/dk hızla çekilmiştir. Darbe test numuneleri ise ASTM D256 standardına uygun şekilde üretilmiş ve Zwick marka darbe test cihazı kullanılarak darbe testleri gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneylerinde kullanılan pim malzemeler enjeksiyonla kalıplama tekniği kullanılarak 6mm çapında ve 50mm uzunluğunda olacak şekilde kalıpta basılmıştır. Aşınma deneyleri, kuru ortam şartlarında, oda sıcaklığında ve pim-disk aşınma cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. PA6 polimeri ve grafit/vaks katkılı PA6 polimer kompozit pim malzemeleri, PA6 ve grafit/vaks katkılı PA6 disklerine karşı test edilmiştir. Her test öncesi disk ve pim yüzeyleri asetonla temizlenip kurutulmuştur. Tablo 1'de bu çalışmada kullanılan malzemeler için yoğunluk, çalışma ortam sıcaklığı, uygulanan yük ve kayma hızı gibi test şartları verilmiştir. Her testten önce (m_1) ve sonra (m_2) pim ağırlıkları ölçülmüş ve ağırlık kaybı (Δm) tespit edilmiştir ve Eş. 1'de verilen formül ile spesifik aşınma oranları (K_0) hesaplanmıştır.

$$K_0 = \frac{\Delta m}{L\rho F} \quad (m^2/N) \quad (1)$$

Burada, Δm : ağırlık kaybı (g), L: kayma mesafesi (m), ρ : malzemelerin yoğunluğu (g/cm^3) ve F: uygulanan yük (N)'tür.

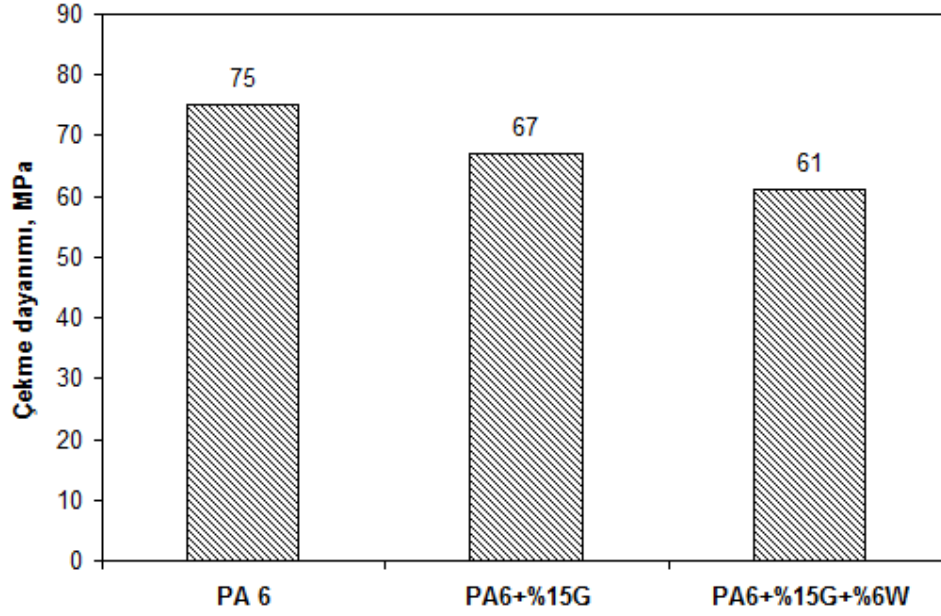
Tablo 1. Aşınma ve sürtünme deneylerinde kullanılan polimer malzemeler ve deney şartları

Malzeme	Yoğunluk ($g\ cm^{-3}$)	Ortam Sıcaklığı (°C)	Kayma Mesafesi (m)	Kayma hızı ($m\ s^{-1}$)	Yük (N)
PA 6	1.08				10
PA 6+%15G	1.21	23±2	1000	0.5m/s	20
PA 6+%15G+%6W	1.20				30

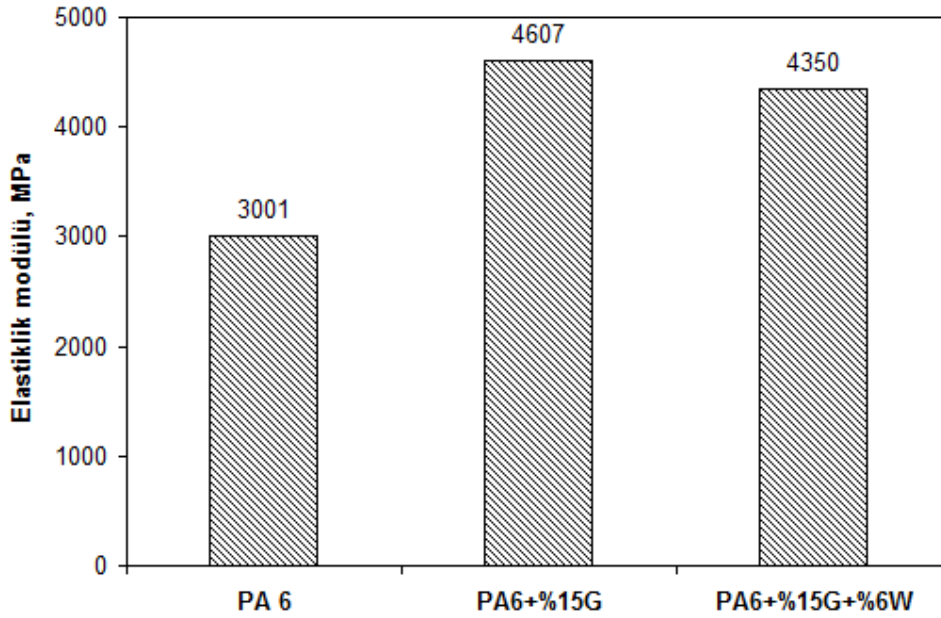
III. BULGULAR ve TARTIŞMA

Şekil 1-3'de katkısız PA 6, PA 6+%15G ve PA 6+%15G+%6W polimerleri için mekanik testler sonrası elde edilen çekme dayanımı, elastiklik modülü ve darbe dayanımı sonuçları verilmiştir. PA 6

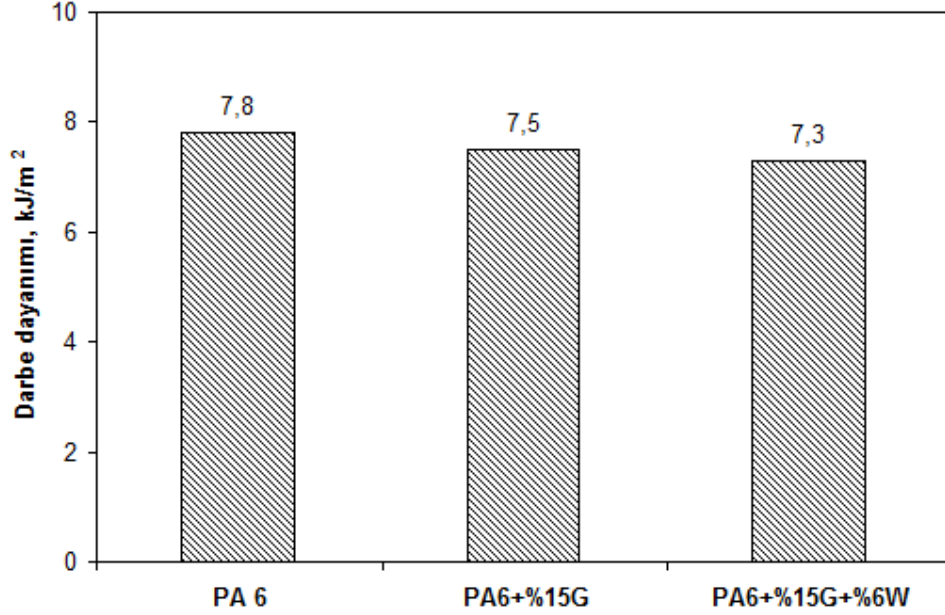
polimerine ilave edilen grafit ve vaks katkıları polimerin çekme dayanımını azaltmıştır. Bu azalma PA 6+%15G ve PA 6+%15G+%6W polimerleri için sırasıyla %10 ve %18 oranlarında elde edilmiştir. PA 6, PA 6+%15G ve PA 6+%15G+%6W polimerlerinin elastiklik modülü değerleri sırasıyla 3001, 4607 ve 4350MPa olarak elde edilmiştir. PA 6 polimerine %15 oranında ilave edilen grafit elastiklik modülünü %53 oranında artırırken %6 vaks katkısı elastiklik modülünü %6 oranında azaltmıştır. Darbe dayanımı sonuçları incelendiğinde, PA6 polimerine ilave edilen grafit ve vaks katkıları darbe dayanımını azaltmıştır. PA 6 polimerinin 7.8kJ/m² olan darbe dayanımı %15 grafit eklenmesi ile 7.5kJ/m², %15Grafit+%6vaks eklenmesi ile 7.3kJ/m² elde edilmiştir.



Şekil 1. PA 6 ve kompozitlerinin çekme dayanımı grafiği



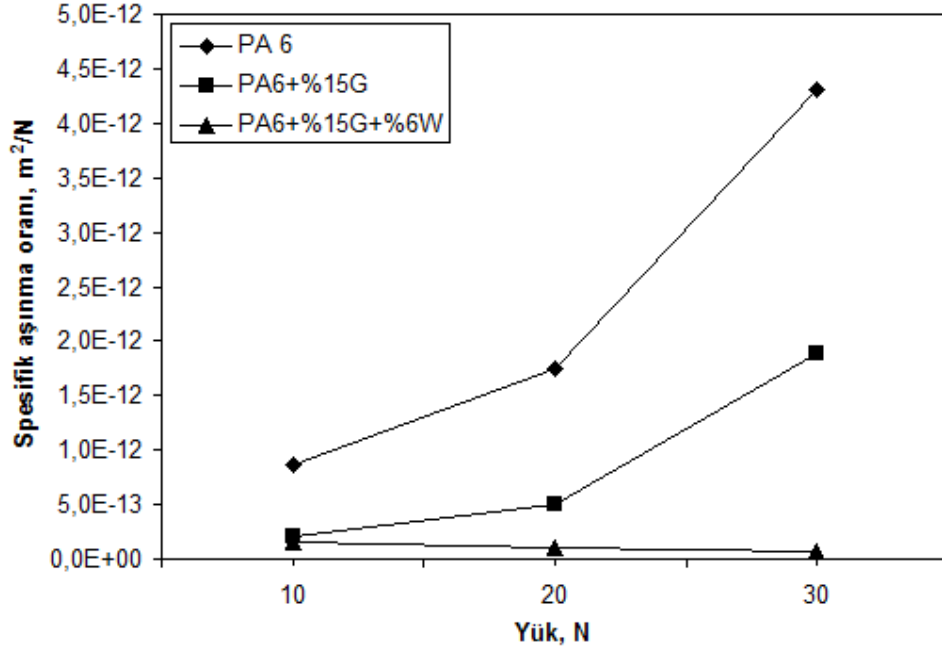
Şekil 2. PA 6 ve kompozitlerinin elastiklik modülü grafiği



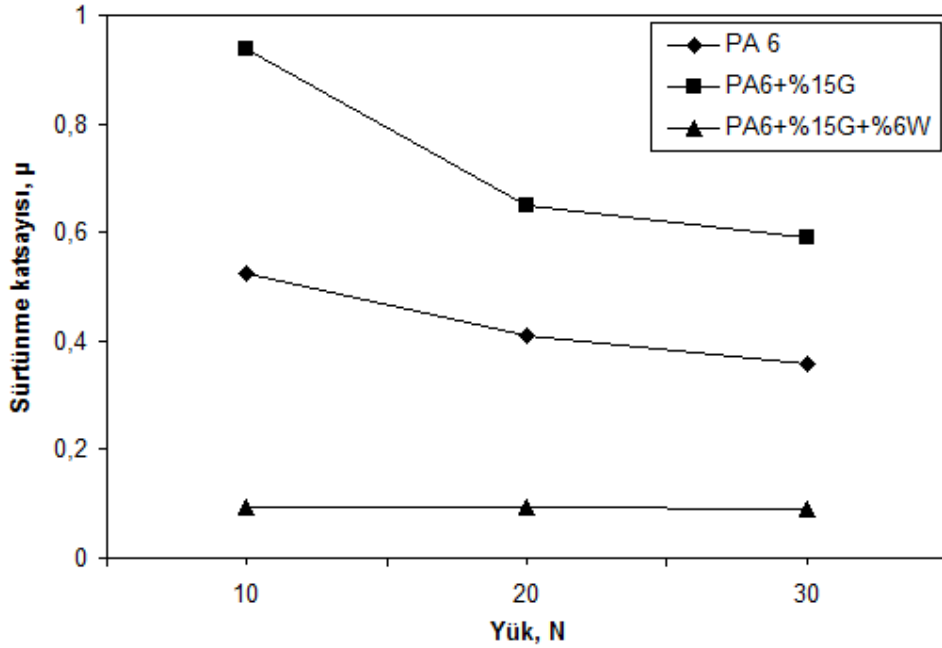
Şekil 3. PA 6 ve kompozitlerinin darbe dayanımı grafiği

Şekil 4'de uygulanan yük aralıklarında katkısız PA6, PA6+%15G ve PA6+%15G+%6W polimerleri için elde edilen spesifik aşınma oranı sonuçları verilmiştir. Uygulanan yükün artması ile birlikte PA6 ve PA6+%15G polimerlerinde aşınma oranı artarken PA6+%15G+%6W polimerinde azalmıştır. PA6 polimerine ilave edilen %15 grafit ve %6 vaks katkıları aşınma oranını önemli oranda azaltmıştır. Bu azalma, 30N sabit yük altında, PA6+%15G polimeri için %56 oranında elde edilirken PA6+%15G+%6W polimeri için %98 oranında elde edilmiştir. En yüksek aşınma oranı 30N yük altında $4.3 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$ değeri ile PA6 polimerinde elde edilirken en düşük aşınma oranı $6.7 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{N}$ değeri ile PA6+%15G+%6W polimerinde elde edilmiştir. Benzer sonuçlar You ve arkadaşları [8] tarafından yapılan çalışmada da elde edilmiştir. Cai ve Wang [10], karbon fiber katkılı PA66 polimer kompozit numunesinde artan basınç ile birlikte aşınma oranının arttığını belirtmiştir.

Şekil 5'de ise uygulanan yük aralıklarında katkısız PA6, PA6+%15G ve PA6+%15G+%6W polimerleri için elde edilen sürtünme katsayısı sonuçları verilmiştir. Genel olarak, artan yük ile birlikte sürtünme katsayısı azalmıştır. Uygulanan yükün %200 oranında artması ile sürtünme katsayıları PA6, PA6+%15G ve PA6+%15G+%6W polimerleri için sırasıyla %31, %59 ve %6 oranlarında azalmıştır. PA 6 polimerine ilave edilen %15 grafit katkısı polimerin sürtünme katsayısını artırırken %6 vaks katkısı sürtünme katsayısını önemli oranda azaltmıştır. Benzer sonuçlar Kang ve arkadaşları [6] tarafından yapılan grafit katkılı PA6 polimer kompozitlerinde de elde edilmiştir. Li ve arkadaşları [11] tarafından %15 cam fiber katkılı PA6 polimerine ilave ettikleri farklı oranlardaki PTFE ve UHMWPE katkıların tribolojik özellikler üzerine etkisini çalışmışlar ve artan yük ile birlikte sürtünme katsayısının azaldığını aşınma oranının ise arttığını belirlemişlerdir.



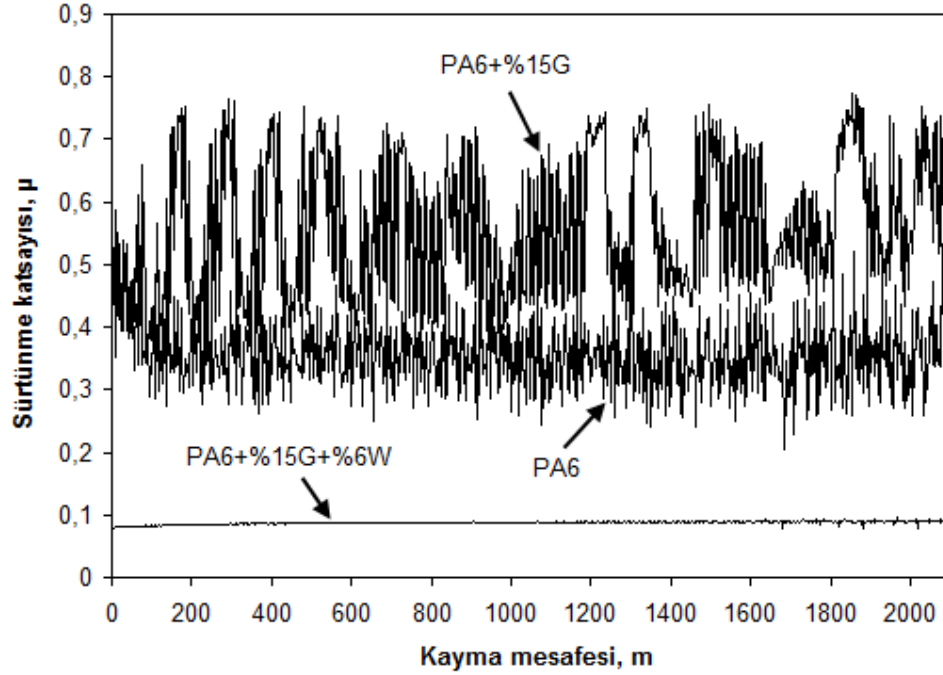
Şekil 4. PA6 polimeri ve PA6 polimer kompozitleri için spesifik aşınma oranı-yük değişimi



Şekil 5. PA6 polimeri ve PA6 polimer kompozitleri için sürtünme katsayısı-yük değişimi

Şekil 6'da saf PA6 polimeri ile PA6+%15G ve PA6+%15G+%6W polimer kompozitlerin 0.5m/s kayma hızında ve 30N yük altındaki kayma mesafesi-sürtünme katsayısı arasındaki ilişki verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi PA6 ve PA6+%15G polimerlerinin sürtünme katsayısı değişimi başlangıç ve sürekli kayma şartları olarak iki aşamada gerçekleşmiştir. Sürtünme katsayısı yaklaşık 100m kayma mesafesinden sonra kararlı hal aşamasına ulaşmıştır. PA6+%15G+%6W polimerinde ise test süresince karşı disk yüzeyinde oluşan film tabakası nedeniyle başlangıç aşaması gözlenmeden kararlı hal aşaması elde edilmiştir. Palabıyk ve Bahadur [12] yaptıkları çalışmada, poliamid 6 ve yüksek

yoğunluklu polietilen (YYPE) karışımında sürtünme katsayısının %40 YYPE içeriğinde 0.81'den 0.17'ye azaldığını belirtmişlerdir. YYPE ve Poliamid arasındaki kuvvetli bağ katı bir yağlayıcı gibi davranarak üniform ve ince transfer film tabakası oluşturmuş, sürtünme katsayısı ve aşınma oranının azaldığını belirlemişlerdir. Shaofeng ve arkadaşları da [1], %5-15 karbon fiber katkılı PA6/PPS (polifenilen sülfid) karışımında benzer sonuçları elde etmişlerdir. Başlangıç aşamasında artan sürtünme katsayısının test süresince kararlı hal aşamasına ulaştığını ve bunun sebebinin ise karşı disk yüzeyinde şekillenen transfer film tabakasının olduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 6. Katkısız PA6 ve grafit/vaks katkılı PA6 polimerlerinin sürtünme katsayısı-kayma mesafesi ilişkisi
(Kayma hızı: 0.5m/s, Uygulanan Yük: 30N)

IV. SONUÇ

Farklı kayma hızları kullanılarak PA6 polimeri ve PA6+%15G ve PA6+%15G+%6W polimer kompozit numunelerinin mekanik ve aşınma davranışlarının incelendiği çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

1. PA 6 polimerine ilave edilen grafit ve vaks katkıları polimerin çekme dayanımını azaltmıştır.
2. PA 6 polimerine %15 oranında ilave edilen grafit elastiklik modülünü %53 oranında artırırken %6 vaks katkısı elastiklik modülünü %6 oranında azaltmıştır.
3. PA 6 polimerinin 7.8kJ/m² olan darbe dayanımı %15 grafit eklenmesi ile 7.5kJ/m², %15Grafit+%6vaks ilave edilmesiyle 7.3kJ/m² elde edilmiştir.
4. Uygulanan yükün artması ile birlikte PA6 polimer ve PA6+%15G polimer kompozitlerinde aşınma oranı artarken PA6+%15G+%6W polimerinde azalmıştır.
5. Artan yük ile birlikte sürtünme katsayısı azalmıştır.
6. Uygulanan yükün %200 oranında artması ile sürtünme katsayıları PA6 polimer, PA6+%15G ve PA6+%15G+%6W polimer kompozitleri için sırasıyla %31, %59 ve %6 oranlarında azalmıştır.

TEŞEKKÜR: Bu çalışma Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından desteklenmiştir (Proje no: 2008-50-02-007).

V. KAYNAKLAR

- [1] Z. Shaofeng, Z. Qiaoxin, W. Chaoqun, , H. Jin, *Materials and Design* **(44)** (2013) 493.
- [2] K. Tanaka, S. Kawakami, *Wear* **(79)** (1982) 221.
- [3] F. Yan, W. Wang, Q. Xue, W. Long, *J. Appl. Polym. Sci.* **(61)** (1996) 1231.
- [4] G. Xian, Z. Zhang, *Wear* **(258)** (2005) 776.
- [5] A. Bolvari, S. Glenn, R. Janssen, C. Ellis, *Wear* **(203–204)** (1997) 697.
- [6] S.C. Kang, D.W. Chung, *Wear* **(254)** (2003) 103.
- [7] S. C. Kang, D. W. Chung, *Wear* **(239)** (2000) 244.
- [8] Yi-L. You, Du-X. Li, Gao-J. Si, X. Deng, *Wear* (311) (2014) 57.
- [9] Xin-R. Zhang, Xian-Q. Pei, Qi-H. Wang, *Materials and Design* **(30)** (2009) 4414.
- [10] Z.Y. Cai, W.X. Wang, *Appl Mech Mater* **(148–149)** (2012) 612.
- [11] Du-X. Li, Y. Yi-Lan, D. Xin, Wen-Juan, L., Ying, X., *Materials and Design* **(46)** (2013) 809.
- [12] M. Palabiyik, S. Bahadur, *Wear* **(246)** (2000) 149.