

Atıf İçin: Maslavi, A., Ünal, H. ve Kaştan, A. (2023). Grafit ve Poli-Tetra-Flor-Etilen Katkılı Poliamid-imid Polimer Kompozitin Tribolojik Performansına Kayma Hızının Etkisi. *İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 13(3): 2120-2129.

To Cite: Maslavi, A., Ünal, H. & Kaştan, A. (2023). The Effect of Sliding Speed on the Tribological Properties of Graphite and Poly-tetra-Fluoro-ethylene Filled Polyamide-imide Polymer Composite. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 13(3): 2120-2129.

Grafit ve Poli-Tetra-Flor-Etilen Katkılı Poliamid-imid Polimer Kompozitin Tribolojik Performansına Kayma Hızının Etkisi

Ahmet MASLAVİ^{1*}, Hüseyin ÜNAL², Alim KAŞTAN³

Öne Çıkanlar:

- Sürtünme katsayısında azalma
- Aşınma direncinin artması
- Alternatif ürün

Anahtar Kelimeler:

- Kompozit
- PTFE
- Grafit
- PAI
- Sürtünme
- Aşınma

ÖZET:

Makine, gıda, tekstil ve uçak/uzay sanayi gibi endüstriyel alanlarda makine elemanı olarak, rulman kafeslerinde, keçe, conta ve dişlilerde son yıllarda çok farklı polimer ve/veya polimer esaslı kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Bu malzemelerden birisi de grafit ve poli-tetra-flor-etilen (PTFE) katkı poliamid-imid (PAI) polimer kompozitidir. Düşük genleşme katsayısı, yüksek mukavemet, 275 °C gibi yüksek ısı direnci ve kimyasal direnci özellikleriyle geleneksel poliamid, polioksimetilen, poli-eter-eter-eton gibi malzemelere alternatif olabilecek özelliktedir. Bu çalışmada grafit ve poli-tetra-flor-etilen (PTFE) katkı poliamid-imidin aşınma ve sürtünme davranışları incelenmiştir. Aşınma ve sürtünme deneyleri pim-disk test cihazında yapılmıştır. Deneyler 1.06 MPa sabit basınç altında ve dört farklı hızda (1.0, 2.0, 3.0 ve 4.0 m/s) gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda grafit ve PTFE katkı PAI kompozitin (PAI-Grafit/PTFE) aşınma oranı, sürtünme katsayısı, pim ve çelik disk yüzey sıcaklığı tespit edilmiştir. Uygulanan hızın artırılması ile kompozitin spesifik aşınma oranı artarken sürtünme katsayısı azalmıştır. Buna ilave olarak kompozit pim ve çelik disk yüzey sıcaklıkları yaklaşık 46,8 °C sıcaklığa kadar artmıştır. Kompozitin en düşük aşınma oranı 2.69×10^{-15} m²/N olarak tespit edilirken en yüksek aşınma oranı 9.2×10^{-15} m²/N olarak belirlenmiştir. PAI esaslı kompozitin sürtünme katsayısı ise en düşük 0.31 ve en yüksek 0.36 olarak tespit edilmiştir. Ayrıca kompozitin aşınma yüzeyleri incelemeleri optik ve taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile incelenmiştir.

The Effect of Sliding Speed on the Tribological Properties of Graphite and Poly-tetra-Fluoro-ethylene Filled Polyamide-imide Polymer Composite

Highlights:

- Reduction in coefficient of friction
- Increased wear resistance
- Alternative product

Keywords:

- Composite
- PTFE
- Graphite
- PAI
- Friction
- Wear

ABSTRACT:

In recent years, many different polymer and/or polymer-based composite materials have been used in industrial areas such as machinery, food, textile and aircraft/space industries as machine elements, in bearing cages, felt, gasket and gears. One of these materials is graphite and poly-tetra-fluoro-ethylene (PTFE) filled polyamide-imide (PAI) polymer composite. It can be an alternative to traditional materials such as polyamide, poly-oxy-methylene, poly-ether-ether-ketone with its low expansion coefficient, high strength, high thermal resistance such as 275°C and chemical resistance. In this study, the wear and friction behavior of graphite and poly-tetra-fluorine-ethylene (PTFE) filled polyamide-imide composite were investigated. Wear and friction tests were carried out on a pin-disc tester. The experiments were carried out under constant pressure of 1.06 MPa and at four different speeds (1.0, 2.0, 3.0 and 4.0 m/s). As a result of the experiments, the wear rate, friction coefficient, pin and steel disc surface temperature of the graphite and PTFE filled PAI composite (PAI-Graphite/PTFE) were determined. With increasing sliding speed, the specific wear rate of the composite increased while the friction coefficient decreased. In addition, the composite pin and steel disc surface temperatures increased up to about 46.8 °C. The lowest wear rate of the composite was determined as 2.69×10^{-15} m²/N, while the highest wear rate was determined as 9.2×10^{-15} m²/N. The friction coefficient of the PAI-based composite was determined as the lowest 0.31 and the highest 0.36. In addition, the wear surfaces of the composite were examined by optical and scanning electron microscopy (SEM).

¹Ahmet MASLAVİ (Orcid ID: 0000-0002-9571-0640), Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

²Hüseyin ÜNAL (Orcid ID: 0000-0003-0521-6647), Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

³Alim KAŞTAN (Orcid ID: 0000-0002-6514-3796), Düden Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi, Kepez/Antalya, Türkiye

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Alim KAŞTAN, e-mail: kastanalim@gmail.com

GİRİŞ

Polimer esaslı malzemeler fonksiyonel özelliklere sahip olduklarından son yıllarda polimer çalışmaları ve polimer bilimi hızla gelişmektedir. Buna bağlı olarak polimer kompozitler üzerine yapılan araştırmalar da artmaktadır. Kompozit malzemeler orijinal ve saf malzeme özelliklerine göre daha gelişmiş özellikler göstermektedir. Polimer kompozitler daha iyi elastiklik modülü, daha iyi termal özellikler, mukavemet, sertlik, darbe direnci, kimyasal ve elektriksel özelliklere sahiptir. Metal veya metal esaslı kompozitlere göre polimer kompozitlere çok daha fazla ihtiyaç talebinin olduğu çeşitli uygulamalar vardır. Polimer kompozitler, havacılık, denizcilik ve otomobil endüstrisi, elektrik/elektronik sektörü, spor ekipmanları, müzik aletleri, rüzgar türbini kanatları vb. alanlarda geleneksel malzemelerin önüne geçmektedir. Polimer matris içerisine ilave edilen çeşitli elyaflar veya katkıları sayesinde daha iyi özelliklere sahip ürünler ortaya çıkmaktadır. Polimer kompozitler hedeflenen özellikler doğrultusunda farklı yöntemlerle üretilirken (Zia ve ark., 2007) termoset veya termoplastik esaslı olabilirler. İnsanoğlunun istekleri ve talepleri doğrultusunda hep daha iyi özelliklere sahip polimerler kullanılır. Mühendislik polimerleri arasında termoplastik ve yarı kristal özelliğe sahip poliamid-imid (PAI), polimerleri iyi özelliklere sahiptir. Bu polimer aromatik ve imid grubunun birleşimi sonucunda meydana gelmektedir. Poliamid-imid yüksek tokluk, yüksek termal kararlılık, yüksek cam geçiş sıcaklığı, kimyasal direnç gibi özelliklerinin iyi olmasından dolayı elektrik, havacılık ve enerji alanları uygulamalarda tercih edilen bir polimerdir. Alev geciktirici özelliğinden dolayı yavaş yandığı için 260 °C üzerindeki sıcaklıklarda bile kullanılabilir. Amid grubu sayesinde basma dayanımı yüksek olup yük altında çok az deformasyona uğrar. Elektriksel özelliklerinin iyi olmasından dolayı elektrik/elektronik sektöründe kullanılan birçok parçanın üretiminde sıklıkla tercih edilir. Poliamid-imid polimeri enjeksiyon kalıplama yöntemi ile üretilebilmektedir (Kaya, 2005). PAI esaslı kompozitler, yağlanmamış yataklar, valf yuvaları, contalar, keçeler, piston segmanları, şeritler, rulman yatak kafesleri, baskı pulları, kanatlar ve pistonlu kompresör parçaları gibi ağır hizmet alanlarında aşınma direnci özelliğinden dolayı kullanılmaktadır (Helmroth, 2002; Ünal ve Fındık, 2008). Şekil 1’de PAI kompozitlerden yapılmış dişliler görülmektedir. PTFE polimeri ise genel olarak teflon ticari adıyla bilinmekte olup flor içeren bir termoplastiktir. Flor atomlarıyla doymuş uzun ve düz bir karbon zincire sahip olan PTFE, atomlar arasındaki kuvvetli bağdan dolayı inert özelliktedir. Yüksek ısıya, kimyasallara ve neme karşı son derece dayanıklıdır. PTFE, yapışmazlık özelliğine sahip olduğundan herhangi bir maddeye yapışmaz ve bu özelliği ile düşük sürtünme katsayısına sahiptir. PTFE polimeri 260 °C’ den sonra bozulmaya başlar (Bozan, 2014). Düşük sürtünme katsayısına sahip olan PTFE aşınmaya ve kimyasallara karşı dayanıklıdır (Akıncı, 2003; McKeen, 2006).



Şekil 1. PAI malzemenin yapılmış dişliler(<https://korean.alibaba.com/p-detail/Precision-60493010231.html?spm=a2700.details.0.0.7bde2a210sSVnE>)

Grafit(G), yüksek termal direnci, elektrik iletkenliği, kimyasal direnci, yüksek mekanik mukavemeti, düşük termal genleşmesi, hızlı sıcaklık değişimleri altında mükemmel termal şok direnci, kendinden yağlama ve hava sızdırmazlık özelliğinden dolayı değişik endüstriyel alanlarda kullanılmaktadır (Liu, 2008; Gao, 2015; Lee, 20021). Grafite ince levhasal yapılı olup hekzagonal kristal yapısına sahiptir. Düzlemler arasında bağlar zayıf iken düzlem içerisinde bağlar güçlüdür. Bu durum karbon levhaların birbirleri üzerinden kolayca kaymasına ve grafitin önemli bir katı yağlayıcı olma özelliği kazanmasına sebep olur. Döküm ve refrakter sanayii, pota ve laboratuvar malzemeleri, elektrot, motor fırçaları, pil çubuklar, elektronik aletler, kurşun kalem uçları, hareketli metal parçaların yağlanması, lastik ve plastik malzeme üretiminde, balatalarda, ateşe dayanıklı boyalarda ve madeni yağlarda grafit sıklıkla kullanılır (Çuhadaroğlu, 2018). Literatürde grafit ve karbon ilave edilmiş metal ve polimer esaslı birçok kompozitin aşınma ve sürtünme davranışları incelenmiştir. Buna ilaveten PAI polimeri ve PAI esaslı kompozitler üzerine yapılmış birçok çalışmaya rastlanmıştır. Sheiretov ve ark., 1995; Pieskachevsky & Smurugov,1997; Gao ve ark., 2007; Suresha ve ark., 2009; Ünal ve Mimaroğlu, 2010; Kurt., 2011; Ünal ve ark., 2012; Wang & Gao., 2013; Samyn ve ark., 2015; Li ve ark., 2017; Yu ve ark., 2018; Zhao ve ark., 2021; Ünal ve Yetgin., 2021; Kamda ve ark., 2022, Topcu ve Karaman, 2019 tarafından yapılan araştırmalar bunlardan bazılarıdır. Genel olarak yapılan çalışmaların birçoğu polimer ve katkıdan oluşan ikili polimer kompozitler üzerinedir. Bu deneysel çalışmada PAI polimer ana matris içerisine aynı anda grafit ve PTFE ilave edilerek hazırlanmış üç katkılı kompozitin tribolojik özellikleri incelenmiştir. Çalışmada kayma hızının etkisi araştırılırken PAI polimer kompozitin aşınmanın öne çıktığı alanlarda alternatif malzeme olarak kullanılabilirliği hakkında literatüre katkı sağlamakta amaçlanmıştır.

MATERYAL VE METOT

Malzeme

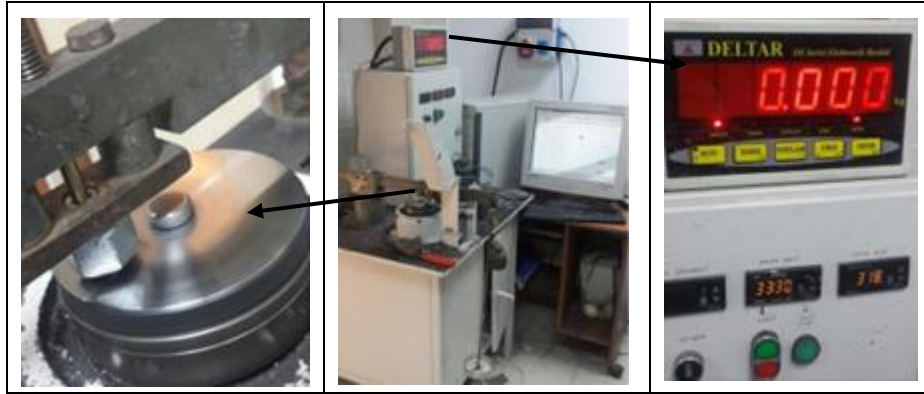
Aşınma testlerinde kullanılan %12 oranında grafit ve %3 oranında PTFE katkılı PAI polimer kompozit malzemesi 1.46 g/cm^3 yoğunluğuna sahip Torlon 4301 ticari koduyla Quatrand Engineering Polymers firmasından temin edilmiştir. Malzeme, 10mm çapında ve 1000mm uzunluğunda çubuk formunda elde edilmiştir. Aşınma ve sürtünme deneylerinde kullanılan grafit ve PTFE katkılı poliamid-imid polimer kompozitin üretici firmadan alınan özellikleri çizelge 1’de görülmektedir.

Çizelge 1. Grafite ve PTFE katkılı PAI kompozitin genel özellikleri

Malzeme Özellik	Değeri	PAI-Grafite/PTFE Ölçü Birimi	Test standardı
Yoğunluk	1.46	g/cm^3	ASTM D792
Su emme, (24 saat)	0.28	%	ASTM D570
Çekme mukavemeti	113	MPa	ASTM D638
Elastiklik modülü (çekmede)	6830	MPa	ASTM D638
Kopmadaki % uzama	3.3	%	ASTM D638
Eğme mukavemeti	215	MPa	ASTM D790
Elastiklik modülü (eğmede)	6890	MPa	ASTM D790
İzod çentik darbe mukavemeti	64	J/m	ASTM D256
Termal iletkenlik	0.53	$\text{w./m}^\circ\text{K}$	ASTM C177
HDT (1.8 MPa)	279	$^\circ\text{C}$	ASTM D 648
Sertlik	106	Rockwell M	ASTM D785
Camsı geçiş sıcaklığı	275	$^\circ\text{C}$	ASTM D3418
Maksimum sürekli çalışma sıcaklığı	260	$^\circ\text{C}$	
Sürtünme katsayısı, (çeliğe karşı, kuru ortam) statik	0.25	-	PTM55007
Sürtünme katsayısı, (çeliğe karşı, kuru ortam) dinamik	0.20	-	PTM55007

Aşınma Testleri

Triboloji deneyleri, Şekil 2’de resmi verilen pim-disk cihazında yapılmıştır. Deneylerde ASTM G99 standardına uygun 6 mm x 50 mm ölçülerinde numuneler kullanılmıştır. Bunun için 10 mm çapında temin edilen çubuklar revolver tornada 6 mm çapında hassas olarak tornalanmıştır. Triboloji deneylerinde karşı disk malzeme olarak yüzey pürüzlülüğü ortalama 0.32-0.49 µm arasında olan AISI 304 paslanmaz çelik disk seçilmiştir. Her bir deneyden önce ve sonra çelik disk ve pim numuneler asetonla temizlenmiştir.



Şekil 2. Pim-disk aşınma test cihazı

Çizelge 2’de aşınma deneylerinde kullanılan PAI/PTFE/G kompozitlerin test şartları verilmiştir. Test numuneleri aşınma deneylerinden önce ve sonra 0.0001 g hassasiyetindeki hassas terazi ile ölçülmüştür. PAI/PTFE/G kompozitlerin aşınma oranı (W_r) ise eşitlik 1’e göre hesaplanmıştır.

$$W_r = \frac{\Delta m}{S * \rho * F} \quad (1)$$

Formüle, S; kayma yolunu (m), ρ ; grafit ve PAI/PTFE/G kompozitin genel yoğunluğunu (g/cm^3) ve F ise; uygulanan yükü (N) göstermektedir.

Çizelge 2. Triboloji deney parametreleri

Malzeme	Test Sıcaklığı (°C)	Aşınma mesafesi (m)	Nem (%)	Uygulanan yük MPa	Kayma hızı (m/s)
PAI-Grafit/PTFE	22±1	2000	553±3	1.06	1.0
					2.0
					3.0
					4.0

Polimer kompozit numunelerin sürtünme katsayısı değerlerinin ölçümleri için pim-disk aşınma cihazına bağlanan bilgisayar sayesinde veriler excell formatında kaydedilmiştir. Deneyler süresince her bir deneyde yaklaşık 60000 yanal yük verisi okunmuş ve bilgisayarda hazırlanan program sayesinde sürtünme katsayısı (μ) yanal kuvvetin yüke bölünmesi ile eşitlik 2’ye göre hesaplanmıştır.

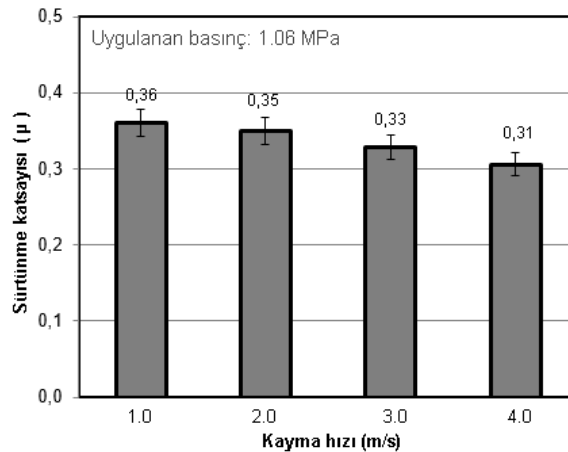
$$\mu: F_s / F_N \quad (2)$$

Formüle μ : sürtünme katsayısını, F_s : sürtünme kuvvetini (N) ve F_N ise normal kuvveti (N) göstermektedir.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Şekil 3’te PTFE ve grafit katkılı poliamid-imid polimer kompozitin 1.06 MPa basınç altında kayma hızına bağlı olarak sürtünme katsayısında meydana gelen değişim görülmektedir. En yüksek sürtünme katsayısına 0.36 değeri ile 1 m/s kayma hızında ulaşılmıştır. 2 m/s kayma hızında bu değer

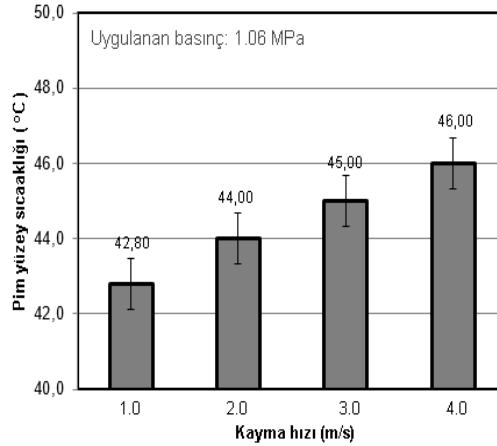
0.35 olarak ölçülmüştür. Kayma hızının 3 m/s 'ye yükseltildiği deneylerde sürtünme katsayısı değeri 0.33 olarak ölçülmüştür. Kayma hızının 4 m/s hıza yükselmesiyle bu değer ortalama 0.31 değerine düşmüştür. Bu sonuçlar doğrultusunda yapılan tüm deneylerde kayma hızının artırılmasıyla birlikte sürtünme katsayısında azalma gözlenmiştir. Kamda ve ark. (2022) PA66/PTFE kompozitler ile ilgili yaptıkları çalışmada artan kayma hızı ile birlikte sürtünme katsayısında azalma olduğunu rapor etmişlerdir. Sürtünme katsayısındaki azalmanın, yağlayıcı özelliği gösteren parçacıkların transferinden kaynaklandığını belirtmişlerdir. Pieskachevsky&Smurugov (1997) termoplastik elastomer (TPE) üzerine yaptığı çalışmada sürtünme katsayısının artan kayma hızına bağlı olarak azaldığını belirtmişlerdir. Düşük yükler ve kayma hızında sürtünme katsayısının hemen hemen aynı değerlerde olduğunu ifade etmişlerdir. Ancak artan yük ve hıza bağlı olarak oluşan transfer tabakasının daha etkin bir şekilde oluştuğunu belirtmişlerdir. Ünal ve Mimaroglu (2010) katkısız PTFE polimer, %20 oranında grafit katkılı PTFE ve %20 cam elyaf takviyeli PTFE (PTFE+%20CE) kompozitlerin tribolojik özelliklerini araştırmışlardır. Katkısız PTFE'nin 40N yük altındaki sürtünme katsayısı ortalama 0.14 civarında elde edilirken PTFE+%20CE kompozitin ise 0.12'ye düştüğü rapor edilmiştir. Sheiretov ve ark. (1995), 20–120°C arasında kuru ortam şartlarında PAI polimerinin tribolojik özelliklerini incelemiştir. Dolgu maddesi olarak grafit ve PTFE kompozitlerin sürtünme katsayısı değerlerinin düştüğü bildirilmiştir.



Şekil 3. PTFE ve Grafit katkılı Poliamid-imid kompozitin kayma hızına bağlı olarak sürtünme katsayısının değişimi

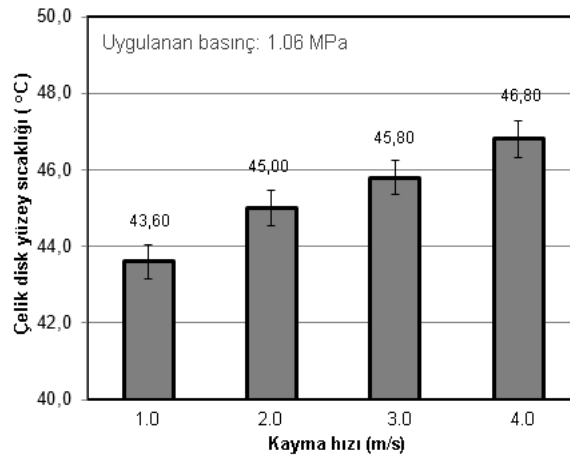
Şekil 4'te PTFE ve Grafit katkılı Poliamid-imid kompozitlerin kayma hızına bağlı olarak polimer pim sıcaklığının değişimi verilmiştir. En düşük pim sıcaklığı kayma hızının 1 m/s olduğu deneyde 42.8 °C olarak ölçülmüştür. Kayma hızının 2 m/s hıza çıkarılmasıyla pim sıcaklığı 44 °C'ye yükselmiştir. Kayma hızının 3 m/s olduğu deneyde pim sıcaklığı 45 °C ve 4 m/s hızda ise 46 °C'ye yükselmiştir. Yapılan tüm deneylerde kayma hızının artması ile polimer pim sıcaklığında artış olmuştur. Ancak kayma hızının 4 kat artırılması sonucunda pim sıcaklığında yaklaşık 3.2 °C artış gözlemlenmiştir. Deneylerde pim numunelerde elde edilen en yüksek sıcaklık olan 46 °C, PAI polimerin camsı geçiş sıcaklığının (275 °C) oldukça altında olduğu gözlenmiştir. Bu sıcaklık artışının sınırlı olması PAI kompozit malzemenin yüksek hızlarda çalışan makine elemanlarının sürtünmeli ortamlarda rahatlıkla kullanılmasına olanak sağlayacaktır. Ünal ve ark. (2012) PAI/PTFE/G kompozitler ile yaptıkları bir çalışmada pim sıcaklığının maksimum 40 °C'ye ulaştığını, bu değer polimerin geçiş sıcaklığı 275 °C'den çok daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. Wang&Gao (2012) ABS kompozit, %30 karbon fiberle takviye edilmiş poliamid-imid (CFR-PAI) ve %30 karbon fiberle takviye edilmiş polietereterketon kompozitlerin (CFR-PEEK) sulu ortam şartlarında aşınma deneyleri yapmışlardır. Deneylerde ABS kompozitlerin deney şartlarındaki su sıcaklığı 35 °C'ye ulaşırken CFR-

PAI kompozitlerin su sıcaklığı 33,8 °C'ye ve CFR-PEEK kompozitlerin su sıcaklığının ise 32,2 °C olduğunu belirtmişlerdir. Sıcaklık artışının sürtünme katsayısı ile ilişkili olduğunu ve artan sürtünme katsayısı ile sıcaklığın hızla yükseldiğini fakat polimere ilave edilen karbon elyafın sürtünme katsayısını azalttığını belirtmişlerdir.



Şekil 4. PTFE ve Grafite katkılı Poliamid-imid kompozitin kayma hızına bağlı olarak pim sıcaklığının değişimi

Şekil 5'te PTFE ve grafit katkılı poliamid-imid kompozitlerde kullanılan çelik diskin yüzey sıcaklığının hıza bağlı değişimi verilmiştir. En düşük disk yüzey sıcaklığı 1m/s kayma hızında 43.6 °C olarak ölçülmüştür. Hızın 2m/s'ye çıkarılması ile disk yüzey sıcaklığı 1.4 °C artışla 45 °C'ye ulaşmıştır. Kayma hızının 3m/s hıza yükseltilmesiyle disk yüzey sıcaklığı 45.8 °C ve 4m/s hızda ise 46.8 °C olduğu tespit edilmiştir. Disk yüzey sıcaklık artışlarının son derece sınırlı olduğu söylenebilir. Bu sınırlı artışın poliamid-imid içerisine ilave edilen grafit ve PTFE gibi katı yağlayıcıların termal iletkenlik üzerinde de etkili olduğu düşünülmektedir. Suresha ve ark. (2009) grafitin yalnızca aşınma oranını ve sürtünme katsayısını azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda polimerik matrislerin mekanik özelliklerini ve termal iletkenliğini de iyileştirdiğini bildirmiştir. Bu durumun grafitin iletkenlik ve aşınma sırasında kendi kendini yağlayabilme özelliklerinden kaynaklanmıştır. Disk yüzey sıcaklığı ile pim sıcaklıkları kıyaslandığında disk yüzey sıcaklığının yapılan tüm deneylerde daha yüksek olduğu bulunmuştur. Hem disk yüzey sıcaklıkları ve hem de pim sıcaklıkları artan kayma hızı ile birlikte artmıştır.

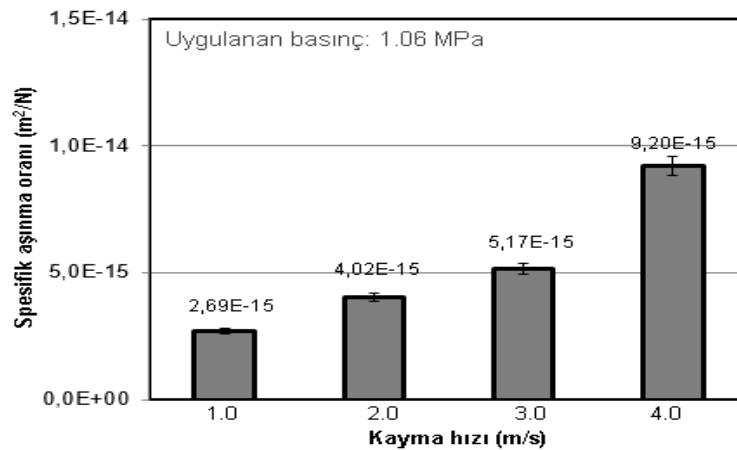


Şekil 5. PTFE ve Grafite katkılı Poliamid-imid kompozitlerde kullanılan çelik diskin yüzey sıcaklığının hıza bağlı değişimi

Şekil 6'da PTFE ve Grafite katkılı PIA kompozitin kayma hızına bağlı olarak spesifik aşınma oranındaki değişim verilmiştir. En düşük aşınma oranı 1 m/s kayma hızında 2.69×10^{-15} m²/N olarak

ölçülmüştür. Kayma hızının 2 m/s'ye çıkarılmasıyla spesifik aşınma oranı $4.02 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{N}$ değerine yükselmiştir. Hız 3 m/s değerine çıkarıldığında ise kompozitin spesifik aşınma oranı $5.17 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{N}$ değerine ulaşmıştır. Kayma hızı 4m/s'ye çıkarılmasıyla kompozitin spesifik aşınma oranı 9.20×10^{-15} değerine yükselmiştir. Genel olarak artan kayma hızına bağlı olarak kompozitin spesifik aşınma oranı da artmıştır. Zhao ve ark. (2021) poliamid-imid/poli-tetra-flor-etilen içerisine ilave ettikleri sentezlenmiş CeO_2 kompozitin aşınma davranışını incelemişlerdir. CeO_2 eklenmesi, kaplamaların aşınma önleme performansını etkili bir şekilde desteklediğini ifade etmişlerdir. Ayrıca, ağırlıkça %5 CeO_2 ilave edilmiş PAI/PTFE kompozitlerin, üstün mikro sertlik ve aşınma direnci sergilediğini ve pratik uygulamalarda, ağırlıkça %5 CeO_2 ilave edilmiş PAI/PTFE yağlayıcı kaplama, yüksek maksimum kayma hızı ve düşük yükler için daha uygun olduğunu rapor etmişlerdir. Kurt (2011) saf PAI le grafit ve PTFE katkılı kompozitleri ile yapmış olduğu çalışmada kayma hızının artması ile tüm malzemelerin aşınma oranlarının da arttığını belirtmiştir. Ünal ve Yetkin (2021) grafit katkılı PTFE ve PTFE katkılı poliamit-6 polimerlerinin aşınma ve sürtünme performanslarını incelemişlerdir. Artan kayma hızı ile birlikte hem grafit katkılı PTFE ve PTFE katkılı poliamit-6'nın aşınma oranında artış gözlemlenmiştir. Polimer içerisine ilave edilen katkıların disk yüzeyinde gözle görülebilen mikron boyutlu olduğu düşünülen transfer film tabakasının oluşmasına katkı sağladığını ve böylece aşınmaya karşı daha dirençli malzemeler elde edildiğini belirtmişlerdir. Elde edilen deney sonuçlarının daha önce literatürde yapılan çalışmalarla uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

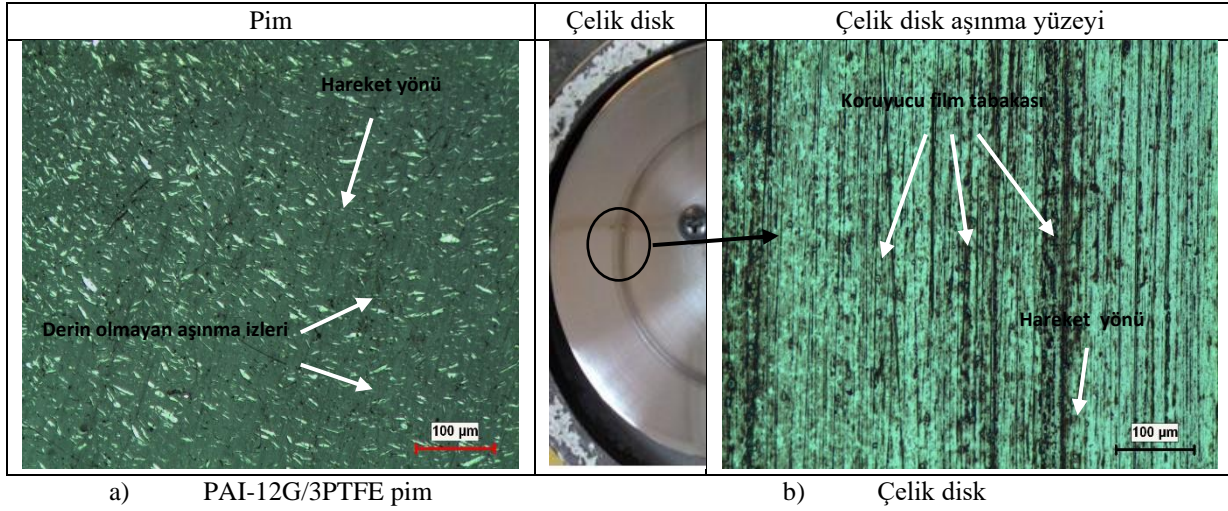
Şekil 7'de PAI/12G/3PTFE kompozitin aşınan polimer pim ve çelik diskin çelik disk optik mikroskop görüntüsü verilmiştir. Şekil 7a incelendiğinde kayma yönü doğrultusunda aşınma izleri görülmektedir. Ancak bu aşınma izleri çok derin değildir. Şekil 7b'de ise çelik disk yüzeyinde aşınma sırasında meydana gelen film tabakası verilmiştir. Koruyucu film tabakasının ince ancak üniform olduğu söylenebilir. Pim yüzeyindeki aşınma izleri abrazyonun gerçekleştiğini gösterirken, pim yüzeyinde oluşan koruyucu film tabakası da adhesizyonun da varlığına işaret eder. Çelik disk yüzeyi üzerinde oluşan koruyucu film tabakası aşınma rejimini son derece etkilemektedir.



Şekil 6. PTFE ve Grafit katkılı Poliamid-imid kompozitin kayma hızına bağlı olarak spesifik aşınma oranının değişimi

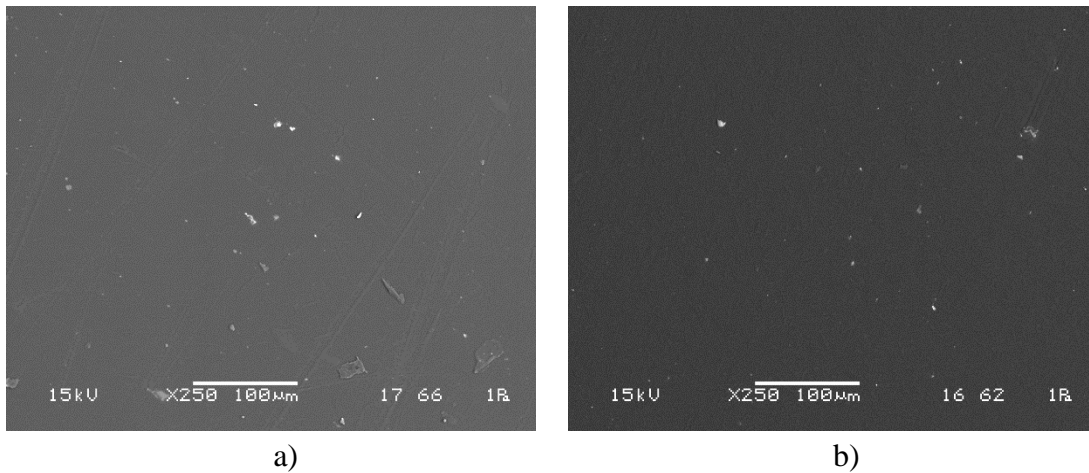
PAI içerisine ilave edilen hem grafitin ve hem de PTFE katı yağlayıcıların disk üzerinde koruyucu film tabakası oluşumuna katkı sağladığı düşünülmektedir. Grafitin tabakalı yapısı aşınma sırasında birbirinden ayrılarak polimer pim ile çelik disk arasında aşınmaya karşı koruyucu etki göstermektedir. Yine benzer şekilde PTFE'de aşınma sırasında koruyucu film oluşumuna katkının yanında kopan küçük parçacıkların pim ve disk arasındaki sürtünme yüzeyini azalttığı sanılmaktadır. Samyn ve ark. (2007) katı yağlayıcıların sürtünen yüzeyler arasında daha homojen bir koruyucu film

oluşturması sonucunda düşük sürtünme ve aşınma için en uygun katkıları olduğunu ifade etmişlerdir. Gao ve ark. (2015) karbon elyafların kuru sürtünme sırasında transfer film oluşumunda etkin rol oynadıklarını belirtmişlerdir.



Şekil 7. Tribolojik testlerden elde edilen optik mikroskop resimleri a) PAI-12G/3PTFE pim, b) çelik disk (Basınç: 1.06 MPa, Hız: 4.0 m/s)

Şekil 8'a ve b'de PTFE/G katkıları PAI kompozitin 1.06 MPa basınçta 1.0 ve 4.0 m/s kayma hızlarında yapılan deneylerin aşınma yüzeylerinin taramalı elektron mikroskopunda alınan görüntüleri verilmiştir. Şekil 8a'da pimin yüzeyinde aşınma sırasında oluşan derin olmayan izler görülmektedir. Ayrıca aşınma sırasında pim yüzeyinden kopan ve tekrar yüzeye yapışan parçalar da mevcuttur. Şekil 8b'de ise aşınan pim yüzeyinin daha düzgün olduğu görülmektedir. Artan deney hızına bağlı olarak sürtünen yüzeyin sıcaklığının artması aşınma izlerinin belirginliğini azaltmıştır. Ayrıca aşınma sırasında kopan ve tekrar yüzeye yapışan parçacıklar yoktur. Bu duruma artan hızla birlikte moment etkisi ile kopan parçacıkların savrulmasının neden olduğu düşünülmektedir. Li ve ark. (2017) PAI içerisine katı yağlayıcı olarak ilave ettikleri molibden disülfür (MoS_2)'ün kaplamanın taşıma kapasitesi ve aşınma direncini geliştirdiğini rapor etmişlerdir. Yu ve ark. (2018) özellikle, NH2-POSS'un %7 eklenmesinin PAI/PTFE kompozitlerin aşınma oranında yaklaşık %50 azalmaya yol açtığını belirtmişlerdir. Bu durumu polimer matris kaplamaların yük taşıma kapasitesindeki artış ve yüzey enerjisindeki azalmaya bağlamışlardır.



Şekil 8. Aşınma deney sonrası pim yüzeyinden elde edilen PAI/PTFE/G kompozitin a) Kayma hızı: 1.0 m/s ve b) 4.0m/s kayma hızındaki taramalı elektron mikroskopunda alınan aşınma yüzey görüntüsü (Uygulanan basınç: 1.06 MPa)

SONUÇ

Bu deneysel çalışmada PAI/PTFE/G kompozitin aşınma özelliklerinin kayma hızı ile değişimi incelenmiş ve şu sonuçlara ulaşılmıştır.

1. PAI/PTFE/G kompozitine uygulanan kayma hızı artırıldığında sürtünme katsayısında azalma gözlenmiştir. 1,0m/s kayma hızında sürtünme katsayısı ortalama 0.36 civarında iken 4.0 m/s kayma hızında sürtünme katsayısı ortalama 0.31 değerine azalma göstermiştir.
2. Kayma hızının artırılması ile PAI/PTFE/G kompozitin çelik disk ile temasında pim yüzey sıcaklığı maksimum 46 °C ve disk yüzey sıcaklığı ise 46.8 °C 'ye ulaşmıştır.
3. PAI/PTFE/G kompozitinin spesifik aşınma oranı uygulanan kayma hızının artırılması ile artmıştır. En düşük aşınma oranı 1.0 m/s kayma hızında $2.69 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{N}$ iken en yüksek aşınma oranı 4.0 m/s kayma hızında $9.20 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{N}$ olarak elde edilmiştir.
4. Aşınma deney sonrası test numuneleri üzerinden alınan optik ve taramalı elektron mikroskobu görüntülerinden PAI/PTFE/G polimer pimlerin yüzeyinde hareket yönünde çok fazla derin olmayan aşınma izlerinin olduğu gözlenmiştir. Çelik karşı disk yüzeyinde ise artan kayma hızına bağlı olarak çok ince bir film tabakasının oluştuğu tespit edilmiştir.
5. 1.06 MPa basınç altında PAI/PTFE/G kompozitinin kayma hızı 1.0m/s 'den 4.0 m/s hıza 4 kat artırılmasıyla kompozitin aşınma oranı $2.69 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{N}$ değerinden $9.20 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{N}$ değerine yaklaşık 2.42 kez artış göstermiştir. Sürtünme katsayısı ise %13.8 oranında azalmıştır.
6. Deneylerden elde edilen veriler sonucunda triboloji alanında çalışan birçok sektörde kullanılan yüksek hızlarda çalışan makine elemanı imalatında grafit ve PTFE katkılı poli-amid-imid polimer kompoziti geleneksel olarak kullanılan poliamid, poli-oksi-metilen ve PEEK gibi polimer malzemelere alternatif olarak kullanılabilirliği sonucuna varılmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri kapsamında 008-2020 proje no ile desteklenmiş olup Yazarlar ilgili Kuruma teşekkür eder.

Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Yazar Katkısı

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan eder.

KAYNAKLAR

- Akıncı, A., Akbulut, H., & Yılmaz, F. (2003). Floropolimer (Teflon) kaplamaların yapı ve özellikleri. *UCTEA J. Chamb. Metall. Mater. Eng*, 133, 53-59.
- Bozan, U., Altuncu, E., & Üstel, F. (2014). Nano partikül takviyeli teflon kaplamaların üretilmesi ve karakterizasyonu. *Sakarya University Journal of Science*, 18(1), 21-30.
- Cao, H., Dong, X., Qu, D., Dong, C., Zhao, C., Sun, D., ... & Wu, B. (2022). Transfer film growth of continuous carbon fiber reinforced thermoplastic poly (ether ether ketone) facilitated by surface texture during dry sliding. *Journal of Materials Science*, 57(1), 383-397.
- Çuhadaroğlu, A. D., & Erdal, K. A. R. A. (2018). Grafit: Bir genel değerlendirme. *Teknik Bilimler Dergisi*, 8(1), 14-33.
- Gao, Q., Jin, S., Guo, C., Zhang, R., & Jin, M. (2015). Effects of heat-treatment temperature and binder content on the microstructure and thermal conductivity of graphite flake-carbon composites. *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*, 23(12), 1043-1050.

- Helmroth, E., Rijk, R., Dekker, M., & Jongen, W. (2002). Predictive modelling of migration from packaging materials into food products for regulatory purposes. *Trends in Food Science & Technology*, 13(3), 102-109.
- Kamga, L. S., Nguyen, T. D., Emrich, S., Oehler, M., Schmidt, T., Gedan-Smolka, M., ... & Sauer, B. (2022). The effect of irradiated PTFE on the friction and wear behavior of chemically bonded PA46-PTFE-cb and PA66-PTFE-cb compounds. *Wear*, 204380.
- Kaya, F. (2005). *Ana hatlariyla plastikler ve katkı maddeleri*. Birsen yayınevi.
- Kurt, M. (2011). Yüksek performanslı endüstriyel termoplastiklerin yüksek sıcaklıklardaki tribolojik davranışları.
- Lee, S. M., Lee, S. H., Kang, D. S., & Roh, J. S. (2021). A Study on the Possibility of Bulk Graphite Manufacturing using Coal Tar as a Binder and an Impregnant. *Composites Research*, 34(1), 51-56.
- Li, B., Wan, H., Ye, Y., Chen, L., Zhou, H., & Chen, J. (2017). Investigating the effect of LaF3 on the tribological performances of an environment friendly hydrophilic polyamide imide resin bonded solid lubricating coating. *Tribology International*, 116, 164-171.
- Liu, Z., Guo, Q., Shi, J., Zhai, G., & Liu, L. (2008). Graphite blocks with high thermal conductivity derived from natural graphite flake. *Carbon*, 46(3), 414-421.
- McKeen, L. W. (2006). 4-Binders. *Fluorinated Coatings and Finishes Handbook*; McKeen, LW, Ed.; William Andrew Publishing: Norwich, NY, USA, 45-58.
- Pleskachevsky, Y. M., & Smurugov, V. A. (1997). Thermal fluctuations at PTFE friction and transfer. *Wear*, 209(1-2), 123-127.
- Samyn, P., De Baets, P., Schoukens, G., & Van Driessche, I. (2007). Friction, wear and transfer of pure and internally lubricated cast polyamides at various testing scales. *Wear*, 262(11-12), 1433-1449.
- Sheiretov, T., Van Glabbeek, W., & Cusano, C. (1995). Evaluation of the tribological properties of polyimide and poly (amide-imide) polymers in a refrigerant environment. *Tribology transactions*, 38(4), 914-922.
- Topcu, İ. & Karaman, E. (2019). Çok Duvarlı Karbon Nanotüp Takviyeli Düzenli/ Düzensiz Şekilli Ti-6Al-4V Kompozitlerin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7 (3) , 1249-1260
- Ünal, H., & Findik, F. (2008). Friction and wear behaviours of some industrial polyamides against different polymer counterparts under dry conditions. *Industrial Lubrication and Tribology*, 60(4), 195-200.
- Ünal, H., & Yetgin, S. H. (2021). Rulmanlı Yatak Uygulamaları İçin Grafrit Katkılı PTFE ve PTFE Katkılı Poliamit-6 Polimerlerinin Aşınma ve Sürtünme Performanslarının Karşılaştırılması. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 25(2), 335-344.
- Ünal, H., Kurt, M., & Mimaroglu, A. (2012). Tribological performance of industrial polyamide-imide and its composite under different cooling conditions.
- Ünal, H., Mimaroglu, A., & Demir, Z. (2010). Tribological performance of POM, PTFE and PSU composites used in electrical engineering applications. *International Journal of Polymeric Materials*, 59(10), 808-817..
- Wang, Z., & Gao, D. (2013). Comparative investigation on the tribological behavior of reinforced plastic composite under natural seawater lubrication. *Materials & Design*, 51, 983-988.
- Yingfei, G., Jihua, X., & Hui, Y. (2010). Diamond tools wear and their applicability when ultra-precision turning of SiCp/2009Al matrix composite. *Wear*, 269(11-12), 699-708.
- Yu, C., Wan, H., Chen, L., Li, H., Cui, H., Ju, P., ... & Chen, J. (2018). Marvelous abilities for polyhedral oligomeric silsesquioxane to improve tribological properties of polyamide-imide/polytetrafluoroethylene coatings. *Journal of Materials Science*, 53(17), 12616-12627.
- Zhao, Z., Ma, Y., Wan, H., Ye, Y., Chen, L., Zhou, H., & Chen, J. (2021). Preparation and tribological behaviors of polyamide-imide/polytetrafluoroethylene lubricating coatings reinforced by in-situ synthesized CeO2 nanoparticles. *Polymer Testing*, 96, 107100.
- Zia, K. M., Bhatti, H. N., & Bhatti, I. A. (2007). Methods for polyurethane and polyurethane composites, recycling and recovery: A review. *Reactive and functional polymers*, 67(8), 675-692.