

AKÜ FEMÜBİD 22 (2022) 045702 (899-910)

AKU J. Sci.Eng. 22 (2022) 045702 (899-910)

DOI: 10.35414/ akufemubid.1112777

Araştırma Makalesi / Research Article

Sentetik Mika Takviyeli Poli-tetra-flor-etilen Polimer Kompozitin Tribolojik Özelliklerine Uygulanan Yükün ve Kayma Hızının Etkisinin Belirlenmesi

Ahmet MASLAVİ¹, Hüseyin ÜNAL², Alim KAŞTAN^{*3}¹Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye.²Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye.³*Düden Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi, Kepez/Antalya, Türkiye.

e-posta: ahmad.abdulkarim@ogr.sakarya.edu.tr

e-posta: unal@subu.edu.tr

* Sorumlu yazar e-posta: kastanalim@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9571-0640>ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0521-6647>ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6514-3796>

Geliş Tarihi: 06.05.2022

Kabul Tarihi: 23.08.2022

Öz

Saf PTFE endüstride düşük basınç keçeleri olarak kullanıldığında aşırı aşınma göstermektedir. Bu aşınma problemini azaltmak için sentetik mika (SM) takviyeli poli-tetra-flor-etilen (PTFE) polimer kompoziti alternatif malzeme olarak seçilmiş ve tribolojik performansları araştırılmıştır. Tribolojik deneyler çelik disk üzerinde kompozit pim olacak şekilde dizayn edilmiş aşınma test cihazında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde 10, 20, 40 ve 100 N olmak üzere dört farklı yük ve iki hız (0.5 ve 1.5 m/s) kullanılmıştır. Deneyler sonucunda sentetik mika takviyeli PTFE kompozitin (PTFE-SM) sürtünme katsayısı, pim ve çelik disk sıcaklığı ile spesifik aşınma hızı belirlenmiştir. Uygulanan yükün ve hızın artması ile pim ve çelik disk yüzey sıcaklıkları artarken spesifik aşınma hızı da artmış fakat sürtünme katsayısı azalmıştır. Kompozitin en düşük ve en yüksek sürtünme katsayısı değerleri sırasıyla 0.17 ve 0.25 olarak tespit edilmiştir. Benzer şekilde spesifik aşınma hızı aralığı olarak en düşük $0.217 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{N}$ ve en yüksek $25 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{N}$ olarak belirlenmiştir. Kompozitin aşınma yüzey incelemeleri optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı incelemeleri sonucunda çelik disk yüzeyinde ince film tabakası oluştuğu belirlenirken 100 N yük ve 1.5 m/s kayma hızında kompozit pim yüzeyinde çatlaklar olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler

PTFE; Sentetik mika;
Aşınma hızı; Sürtünme
katsayısı; Kompozit

Determination of the Effect of Applied Load and Sliding Speed on the Tribological Properties of Synthetic Mica Reinforced Poly-Tetra-Fluoro-Ethylene Polymer Composite

Abstract

Pure PTFE shows extreme wear when used in industry as low pressure seals. In order to reduce this wear problem, synthetic mica (SM) reinforced poly-tetra-fluoro-ethylene (PTFE) polymer composite was used as an alternative material and its tribological performances were investigated. In this study, tribological performances of synthetic mica (SM) reinforced poly-tetra-fluoro-ethylene (PTFE) polymer composite were investigated. Tribological experiments were carried out in a composite pin-on-steel disc (P-o-D) wear test device designed as a composite pin on a steel disc. Four different loads of 10, 20, 40 and 100 N and two sliding speeds (0.5 and 1.5 m/s) were used in the experiments. As a result of the experiments, the friction coefficient, pin and steel disc temperature and specific wear rate of the synthetic mica reinforced PTFE composite (PTFE-SM) were determined. As the applied load and sliding speed increased, the pin and steel disc surface temperatures increased, while the specific wear rate increased, but the friction coefficient decreased. The lowest and highest friction coefficient values of the composite were determined as 0.17 and 0.25, respectively. Similarly, the minimum specific wear rate range was determined as $0.217 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{N}$ and the highest $25 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{N}$. Wear surface examinations of the composite were carried out using optical microscope and scanning electron microscope (SEM). As a result of the microstructure investigations, it was determined that a thin film

Keywords

PTFE; Synthetic mica;
Wear rate; Friction
coefficient; Composite

layer was formed on the surface of the steel disc, and cracks were observed on the surface of the composite pin at the load of 100 N and a sliding speed of 1.5 m/s.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi.

1. Giriş

Havacılık, uzay, otomobil, makine ve gıda alanlarında teknolojinin hızlı gelişimi ile birlikte yüksek performanslı polimerler ve polimer kompozitler metalik malzemelerin yerini almaya başlamışlardır (Song *et al.* 2012). Polimer kompozitler, polimer modifikasyonu için çok önemlidir. Çünkü kolaylıkla işlenebilirler ve değişken özelliklere sahip malzemelerin üretilmesi için sınırsız olanaklar sunarlar (Rudresh *et al.* 2017).

Poli-tetra-flor-etilen (PTFE), 20.000-200.000 tekrar eden tetra-flor-etilen (CF₄) biriminden oluşan düz doğrusal zincirli bir polimer olup beyaz renkli yumuşak bir yapıya sahiptir (Friedrich and Schlarb 2008). Genellikle piyasada toz formunda satılan PTFE, termoplastik özellik gösteren bir polimer olup 327 °C'de yüksek ergime sıcaklığına sahip bir polimerdir. Herhangi bir katkı maddesi gerektirmeden endüstriyel ürünler üretilebilir ve mamul olarak tek başına kullanılabilir. Ayrıca birçok uygulamada katkı malzemesi olarak ta kullanılmaktadır (Xanthos 2010). PTFE polimeri, ısıya ve birçok kimyasala dayanıklılık göstermekle birlikte az nem alma ve iyi dielektrik özellikler göstermektedir. PTFE polimerinin sürtünme katsayısı diğer polimer malzemelere göre oldukça düşüktür ve kimyasal yapısı 260 °C üzerine çıktığında bozulmaya başlamaktadır (Bozan vd. 2014). PTFE, yüksek ısıya dayanıklı conta, keçe, bant, vana, boru, laboratuvar cihazları, filtre, diyafram, kablo yalıtkanı, izolatör, düşük sürtünmeli yataklar, burçlar, köprü ve binalar için kayar yataklar, mutfak araç ve gereçleri, pnömatik ve hidrolik makinaların bazı parçalarının aksamlarında kullanılır (Hatipoğlu 2014). Bunlara ilaveten PTFE polimeri, sızdırmazlık uygulamaları için de birçok avantaja sahiptir. Yüksek ısı kararlılık, birçok kimyasala direnç, düşük sürtünme katsayısı, kendi kendini yağlama özelliği ve yüksek ergime sıcaklığına sahiptir. PTFE, kuru ortam şartlarında çalışırken bile, herhangi bir yapışma etkisine maruz kalmadığından dinamik sızdırmazlık uygulamalarında kullanım için ideal bir malzemedir (www.fluorotec.com)



Şekil 1. PTFE keçeler

PTFE polimerinin farklı çalışma ortamlarında kullanılabilmesi ve endüstrinin beklediği özellikleri sağlayabilmesi için bünyesine cam elyaf, karbon elyaf, grafit, bronz, molibden di-sülfid ve mika gibi bazı katkı maddeleri katılır. Mika katkılardan sentetik mika diğer katkı malzemelerine göre bazı farklılıklar göstermektedir.

Sentetik mika, bazı kimyasalların yüksek sıcaklıkta eritilmesi ve soğutulması sonucunda kristalize edilerek üretilir. Mikanın tek kristalinin moleküler formülü $KMg_3(AlSi_3O_{10})F_2$ 'dir. Şeffaf kristalin yapıya sahip olan sentetik mika beyaz renktedir. Sentetik mika, farklı yöntemlerle işlenerek ısıya dayanıklı çeşitli ürünlere dönüştürülebilir. Aynı zamanda elektriksel yalıtım, ısıya dayanıklılık, asit ve alkali kararlılığı gibi üstün özelliklere sahiptir. Ayrıca yüksek elastiklik, tokluk, kayganlık gibi diğer bazı özellikleri de çok iyi olan sentetik mikanın kaplanması kolaydır ve diğer malzemelere iyi yapışır. Sentetik mika doğal mikaya göre daha yüksek sıcaklığa dayanıklıdır. Örneğin 1000 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda uzun süre çalışabilir. Herhangi bir organik yapıştırıcı eklemeyen mika pulları birbirine yüzey kuvvetiyle yapışabilir, daha yüksek ergime sıcaklığı ve renksizlik derecesine sahiptir. Sentetik mikanın küçük kristal pullar halinde öğütülüp farklı boyutlara göre sınıflandırılması ile plastik, kauçuk ve boya vb. gibi endüstrinin ihtiyacı olan değişik yerlerde kullanılabilen bir dolgu maddesi üretilir (Hualing and Jun 2008). PTFE içerisine çeşitli dolgu maddelerinin

ilave edilmesi ile özelliklerinin bir kısmı veya tamamı iyileştirilebilir.

Literatürde PTFE polimeri ve PTFE polimer ana matrisine katılan bazı katkı malzemelerinden oluşan PTFE esaslı kompozitler ile ilgili daha önce yapılmış birçok çalışmaya rastlanmıştır. Rudresh *et al.* 2017, Alam *et al.* 2022, Wang *et al.* 2010, Riddar and Rudolphi 2014, Shojaei and Gholamalipour 2011, Heipl and Murrenhoff 2015, Okularczyk and Baranowski 2009, Soon *et al.* 2009, Ünal vd. 2010, Charfi *et al.* 2021, Sui *et al.* 1999, Khedkar *et al.* 2002, Zhang *et al.* 2008, Oshita *et al.* 2017, Meng 2020, Ünal ve Mimaroglu 2007, Ünal ve Yetkin 2010, Deaconescu and Deaconescu 2020, Kadioğlu 2003 tarafından yapılan bazı araştırmalar bunlardan bazılarıdır. Ancak sentetik mika katkılı PTFE esaslı kompozitler konusunda çok az literatüre rastlanmıştır. Wang *et al.* (2010) sentetik mika katkılı polipropilen kompozitlerin mekanik özellikleri incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda polipropilen polimerine ilave edilen sentetik mika katkısının kompozitin mukavemetini çok az artırdığını darbe mukavemeti değerlerini ise önemli oranda azalttığını gözlemlemişlerdir. Souza *et al.* 2014, Souza *et al.* 2012. Souza *et al.* 2013 polilaktik asit (PLA) polimerinin termal, reolojik ve termo-mekanik özelliklerine sentetik mika katkısının etkisini incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda mika katkının PLA esaslı kompozitin termal stabilitesini artırdığını yani camsı geçiş sıcaklığını artırdığını,

depolama ve kayıp modülü gibi termo-mekanik değerlerini artırdığını tespit etmişlerdir. Yapılan literatür araştırmalarında PTFE polimeri ve sentetik mika katkının tribolojik davranışları üzerine herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmada sentetik mika takviyeli poli-tetra-flor-etilen polimer kompozitin aşınma ve sürtünme davranışlarına uygulanan yükün ve kayma hızının etkisini incelemek amaçlanırken aynı zamanda literatürde görülen eksikliğe ışık tutmak amaçlanmıştır. Triboloji deneylerinde kayma hızı olarak 0.5 ve 1.5 m/s kayma hızları kullanılırken 10N, 20 N,40 N ve 100 N gibi dört farklı yük kullanılmıştır. Deneyler sonucunda kayma hızının ve uygulanan yüklerin sürtünme katsayısı ve aşınma hızına etkileri incelenmiştir. Disk ve pim aşınma yüzeyleri optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu kullanılarak incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Malzeme

Aşınma deneylerinde kullanılan sentetik mika takviyeli poli-tetra-flor-etilen polimer kompoziti Fluorosint 207 ticari koduyla 10 mm çapında ve 1000 mm uzunluğunda çubuk formunda Mitsubishi Chemical Advanced Materials firmasından ABD'den temin edilmiştir. Tribolojik deneylerde kullanılan sentetik mika takviyeli poli-tetra-flor-etilen kompozitinin fiziksel, mekanik ve termal özellikleri çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Sentetik mika takviyeli PTFE kompozitin fiziksel, mekanik ve termal özellikleri

| Malzeme Özellik | Birimi | PTFE-SM Birimi | Test standardı |
|--|--------|-------------------|-----------------|
| Yoğunluk | 2.30 | g/cm ³ | ASTM D792 |
| Su emme, (23 °C'de) doyma | 0.20 | % | ASTM D570(2) |
| Çekme mukavemeti | 10.3 | MPa | ASTM D638 |
| Elastiklik modülü (çekmede) | 1450 | MPa | ASTM D638 |
| Kopmadaki % uzama | >50 | % | ASTM D638 |
| Eğme mukavemeti | 13.8 | MPa | ASTM D790 |
| Elastiklik modülü (eğmede) | 2410 | MPa | ASTM D790 |
| İzod çentik darbe mukavemeti | 0.534 | j/cm | ASTM D256 Tip A |
| Sertlik | 50 | Rockwell R | ASTM D785 |
| Ergime sıcaklığı | 327 | °C | ASTM D3418 |
| Maksimum sürekli çalışma sıcaklığı 20000saat | 260 | °C | - |

2.2. Aşınma Testleri

Triboloji deneyleri, oda sıcaklığında ve kuru kayma şartlarında Şekil 2'de resimleri verilen pim-disk aşınma test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneylerinde 6 mm çapında ve 50 mm uzunluğunda test numuneleri kullanılmaktadır. 10 mm çapındaki PTFE esaslı sentetik mika katkılı polimer kompoziti 6 mm çapına düşürmek için revolver torna tezgahı kullanılmıştır. Karşı disk malzeme olarak AISI 304 paslanmaz çelik disk

kullanılmıştır. Çelik disk malzemesi 90 mm çapında ve 5 mm kalınlığında olacak şekilde önce kesilmiş sonra alın ve silindirik yüzey tornalaması yapılmış ve daha sonrasında ise düzlem yüzey taşlama cihazında taşlanmıştır. Taşlama yapılan diskin yüzey pürüzlülüğü ölçülmüş ve yüzey pürüzlülüğü ortalama 0,35-0,48 µm olarak ölçülmüştür. Her bir aşınma deneyi öncesinde çelik disk ve polimer kompozit pim yüzeyleri asetonla temizlenip kurutulmuştur.



Şekil 2. Pim-disk aşınma test cihazı

Çizelge 2'de triboloji deneylerinde kullanılan sentetik mika katkılı PTFE polimer kompozit malzemeler için aşınma test proses şartları verilmiştir. Her bir aşınma deneyi öncesinde polimer kompozit pim ağırlığı (m_1) ve aşınma deneyi sonrası pim ağırlığı (m_2) 0,0001 g hassasiyetli hassas terazi kullanılarak ölçülmüş ve ağırlık kaybı Δm yani ($m_1 - m_2$) tespit edilmiştir. PTFE esaslı kompozit

malzemenin aşınma oranı (Wr) ise aşağıda verilen Eşitlik (1)'deki formül kullanılarak hesaplanmıştır. Formülde, S ; kayma yolunu (m), ρ ; PTFE kompozitin yoğunluğunu (g/cm^3) ve F ise; uygulanan yükü (N) göstermektedir.

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

Çizelge 2. Aşınma deneyi proses parametreleri

| Malzeme | Test Sıcaklığı (°C) | Kayma yolu (m) | Nem (%) | Uygulanan Yük (N) | Kayma hızı (m/s) |
|---------|---------------------|----------------|---------|-------------------|------------------|
| PTFE-SM | 22±1 | 2000 | 52±3 | 10 | |
| | | | | 20 | 0.5 |
| | | | | 40 | 1.5 |
| | | | | 100 | |

Polimer kompozit numunelerin sürtünme katsayısı değerlerinin ölçümleri için pim-disk aşınma cihazı

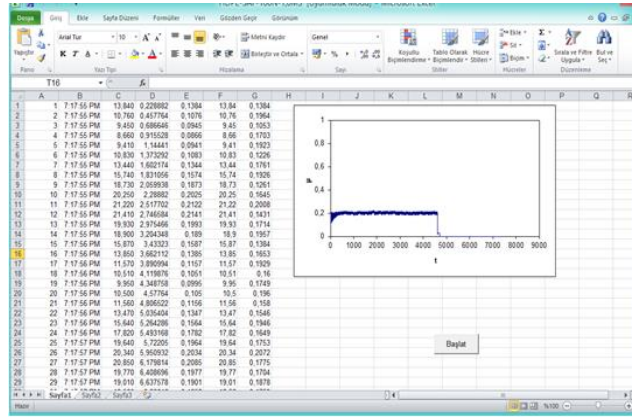
dizayn edilmiştir. Aşınma deney cihazı, makinenin ana gövdesi üzerine monte edilmiş 2.2 kW gücünde

bir elektrik motoru, bir yük kolu, bir elektronik yük hücresi (load-cell) ve verilerin alındığı bir masaüstü bilgisayardan oluşmuştur. Aşınma cihazının ana gövdesinde dönen bir disk vardır. Bu disk, aşınma cihazına enerji veren güçlü bir elektrik motoru sayesinde dönmektedir. Diskin üzerinde deneyde kullanılan paslanmaz çelik disk M10 bir vida yardımıyla bağlanmaktadır. Deneylerde kullanılacak sentetik mika katkılı PTFE polimer kompozit pim numunesi 6 mm çapa ve 50 mm uzunluğuna getirilmiş olup aşınma test düzeneğinde olan kola bağlanır. Aşınma cihazı çalıştırıldıktan sonra kola bağlanan PTFE kompozit pim numunesi disk üzerine yavaşça bırakılır. Pim numunesinin hareket halindeki diske temas etmesi sonucu oluşan sürtünmeyle birlikte numune bağlı olan kol aparatı dönüş yönüne göre hareket eder. Bu harekete yanal kuvvet olarak adlandırılır. Bu yanal kuvvet aşınma cihazına bağlı olan bir yük hücresi ile ölçülüp bilgisayara aktarılarak excel programında kaydedilir. Aşınma cihazı, aşınma yapılacak olan deneyler için dakikada yaklaşık 999 veri alınabilecek şekilde ayarlanmıştır. Deney süresince yanal yükü ölçen

minimum 17.000 veri alınmıştır. Ölçülen yanal yük verileri bilgisayarda Excel programında bir sütuna kaydedilmiştir. Daha sonra yanal yük verileri deney sırasında kullanılan yüke bölünerek sürtünme katsayısı hesaplanmıştır. Excell programında sürtünme katsayısı-zaman ilişkisi grafikleri Şekil 3'te gösterildiği gibi elde edilmiştir. Deneylerde kullanılan PTFE kompozit pim malzemesi ile paslanmaz çelik disk arasındaki sürtünme katsayısı (μ), ölçülen yanal kuvvetin uygulanan normal kuvvete oranı olup, Eşitlik (2)'de verilen formül ile hesaplanmıştır. Formülde μ : sürtünme katsayısını, F_s : sürtünme kuvvetini (N) ve F_N ise normal kuvveti (N) göstermektedir.

$$\mu = \frac{F_s}{F_N} \quad (2)$$

Pim yüzey sıcaklıkları kızılötesi termometre ile deney süresince ölçülerek bilgisayara kaydedilmiştir. Çelik disk yüzey pürüzlülüğü ölçümü için PCE-RT 2300 marka cihaz kullanılmıştır.



Şekil 3. Aşınma deneyinden excell formatında elde edilen sürtünme katsayısı-zaman grafiği

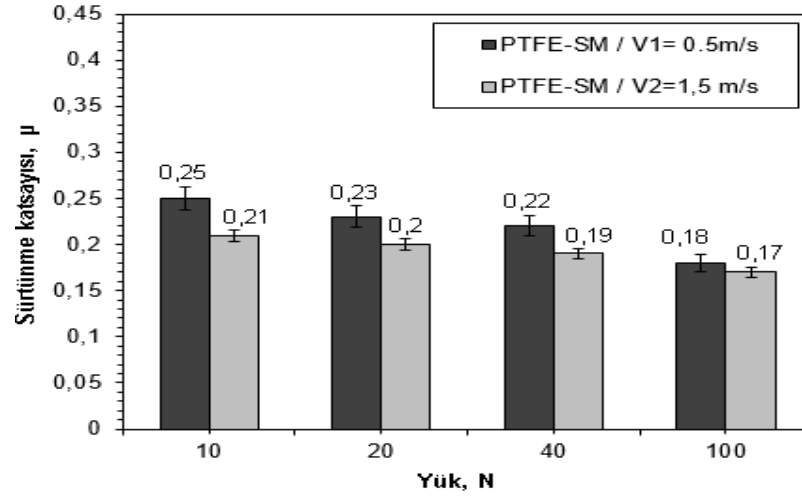
3. Bulgular ve Tartışma

Şekil 4'te sentetik mika takviyeli PTFE polimer kompozitin sürtünme katsayısının farklı yük ve hızlardaki değişimi verilmiştir. Aşındırma yükünün ve kayma hızının artması ile sürtünme katsayısında azalma görülmüştür. En yüksek sürtünme katsayısı 0.5 m/s hızda 0.25, en düşük sürtünme katsayısı ise 1.5 m/s hızda 0.17 olarak hesaplanmıştır. 0.5 m/s kayma hızında aşındırma yükünün %100 arttırılması ile sürtünme katsayısında %8, %400 arttırılması ile %12 ve %1000 arttırılması ile %28 azalma olmuştur.

Kayma hızının 1.5 m/s olduğu deneylerde ise aşındırma yükünün %100 arttırılması ile sürtünme katsayısında %5, %400 arttırılması ile %9 ve %1000 arttırılması ile %19 azalma görülmüştür. Benzer yüklerde yapılan deney sonuçları incelendiğinde daha yüksek hızlarda yapılan deneyler de yükün artması ile sürtünme katsayısında daha az azalma olduğu söylenebilir. 10 N aşındırma yükü altında yapılan deneyde kayma hızı 0.5 m/s'den 10 m/s'ye arttırılması ile sürtünme katsayısı değerinde 0.4, 20 N yükte 0.3, 40 N yükte 0.3 ve 100 N yükte ise 0.1 azalma olmuştur. Sui et al. (1999) PTFE contaların

sürtünme ve aşınma davranışları üzerine yapmış oldukları çalışmada 2000-6000 rpm arasındaki dönüş hızlarında artan temas gerilimi ve kayma hızı ile sürtünme katsayısında azalma olduğunu belirtmişlerdir. Zhang *et al.* (2008) PTFE düşük yüzey enerjisi ve zayıf sürünme direncinden dolayı uygulanan aşındırma kuvveti ile matristen kolaylıkla ayrılır ve kopan parçalar karşı disk yüzeyinde sürekli transfer film tabakası oluşturulduğunu ifade

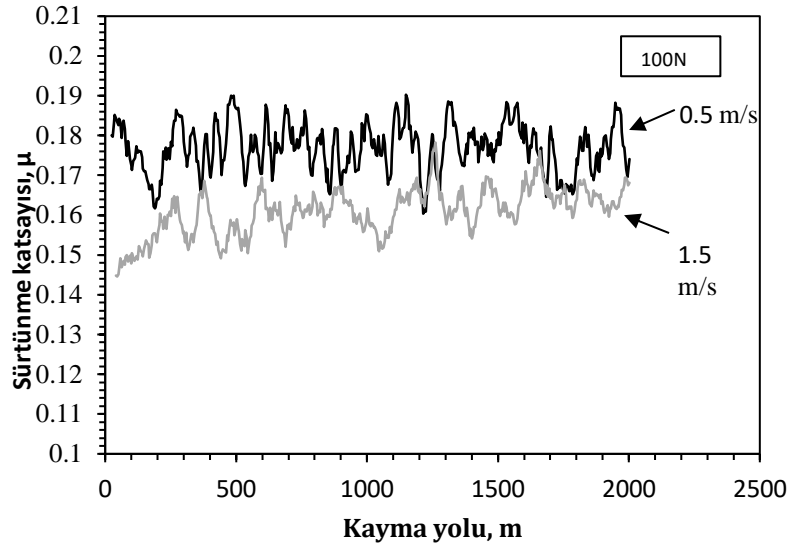
etmişlerdir. Ünal ve Mimaroglu (2010) saf PTFE ve PTFE+%20GFR kompozitlerin aşınma davranışını incelemişlerdir. Saf PTFE'nin 40 N aşındırma yükünde 0.14 civarında olan sürtünme katsayısının PTFE+%20GFR kompozitlerinde ise 0.12 değerine düştüğünü belirtmişlerdir. Ayrıca sürtünme katsayısının artan yük ile birlikte azaldığını belirtmişlerdir.



Şekil 4. Sentetik mika takviyeli PTFE polimer kompozitin sürtünme katsayısının aşındırma yükü- kayma hızı ilişkisi

Şekil 5'te sentetik mika takviyeli PTFE polimer kompozitin sürtünme katsayısı-kayma yolu ilişkisi görülmektedir. Genel olarak polimer malzemelerin sürtünme grafikleri başlangıç aşaması ve sürtünmenin daha stabil olduğu ikinci aşamadan oluşmaktadır. 0.5 m/s kayma hızında yapılan deneyin ilk başlangıcında sürtünme katsayısı daha kararsız ve sürtünme katsayısı grafiğinin pikleri daha geniştir. 400 m'den sonra sürtünme grafiğinin piklerinin daraldığı görülmektedir. Bu durum sürtünme yüzeyinde oluşan koruyucu film tabakasından kaynaklanmaktadır. Şekil 9'da çelik disk yüzeyinde oluşan koruyucu film tabakası açık olarak görülmektedir. Sürtünme katsayısı kayma yolu boyunca 0.165-0.185 aralığında değişkenlik göstermiştir. 1.5 m/s kayma hızında yapılan deneyin sürtünme katsayısı grafikten de anlaşıldığı üzere 0.5 m/s hıza göre daha düşüktür. Deney

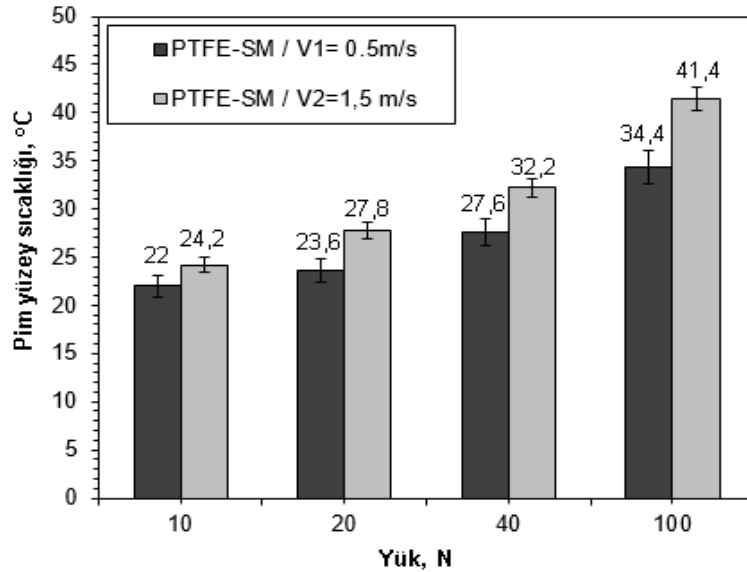
başlangıcında sürtünme katsayısı 0.145 değerinde ölçülmüş deney süresince 0.17 değerine kadar yükselen pikler görülse de ortalama sürtünme katsayısı 0.16 civarında ölçülmüştür. İlk 300 m kayma yolundan sonra sürtünme katsayısı piklerinin benzer şekilde oluştuğu gözlemlenmiştir. Khedkar *et al.* (2002) PTFE ve kompozitleri üzerine yapmış oldukları çalışmada 500 m kayma yolundan sonra sürtünme katsayısının çok fazla değişmeyip neredeyse stabil kaldığını belirtmişlerdir. Katkısız PTFE'nin sürtünme katsayısının 0.12 iken %75PTFE+%20 cam elyaf +%5MoS₂'nin 0.1 civarına gerilediğini rapor etmişlerdir. Oshita *et al.* (2017) sentetik mikanın katman aralığının genişlemesiyle, dinamik sürtünme katsayısının yaklaşık 0.5'ten 0.10-0.11 aralığına gerileyerek önemli ölçüde azaldığını ifade etmişlerdir. Ayrıca tribolojik testlerde sürtünme katsayısı 0.07-0.09 aralığında olan MoS₂'ye yakın yağlayıcılık etkisi gösterdiğini ifade etmişlerdir.



Şekil 5. Sentetik mika takviyeli PTFE polimer kompozitin sürtünme katsayısı-kayma yolu ilişkisi

Şekil 6'da sentetik mika takviyeli PTFE polimer kompozitin pim sıcaklığının yük ile değişimi görülmektedir. Kayma hızının 0.5 m/s olduğu deneyde aşındırma yükü 10 N iken pim sıcaklığı 22 °C, 20 N iken 23.6 °C, 40 N iken 27.6 °C ve 100 N iken ise 34.4 °C değerine ulaşmıştır. Kayma hızının 1.5 m/s olduğu deneyde de benzer şekilde sıcaklık artışları görülmüş. Aşındırma yükü 10 N iken pim sıcaklığı 22.4 °C, 20 N iken 27.8 °C, 40 N iken 32.2 °C ve 100 N iken ise 41.4 °C olarak ölçülmüştür. Genel olarak kayma hızının artması ile pim sıcaklığının arttığı söylenebilir. Aşındırma yükünün sabit tutulup kayma hızının artırılması ile pim yüzey sıcaklığının arttığı tespit edilmiştir. 10 N aşındırma yükü altında 0.5 m/s kayma hızında pim yüzey sıcaklığı 22 °C iken, kayma hızının 1.5 m/s hıza çıkarılması ile pim yüzey sıcaklığı 2.2 °C artarak 22.2 °C olmuştur. Pim yüzey

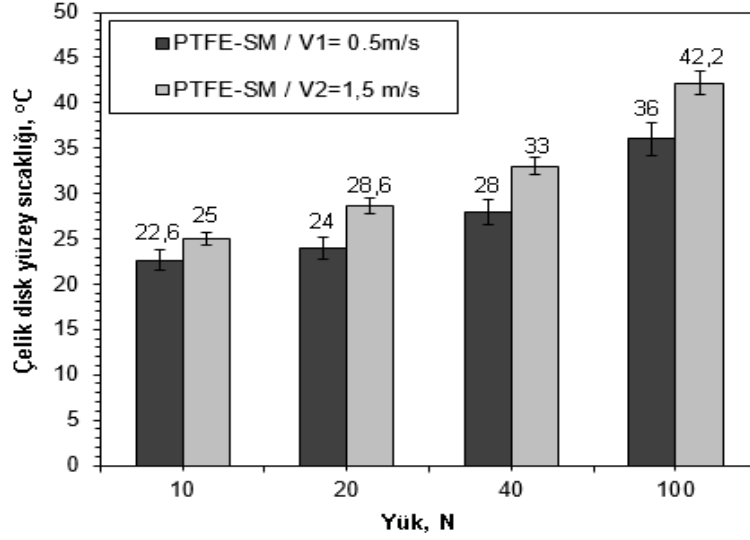
sıcaklığındaki artışın kayma hızının 0.5 m/s'den 1.5 m/s hıza çıkarılması ile 20 N aşındırma yükünde 4.2 °C, 40 N aşındırma yükünde 4.6 °C ve 100 N yükte ise 7 °C olduğu tespit edilmiştir. Bu duruma aşındırma yükünün artması ile disk yüzeyine pim tarafından uygulanan kuvvetin artmasının sebep olduğu düşünülmektedir. Meng *et al.* (2020) yüksek yoğunluklu polietilen içerisine ilave ettikleri sentetik mikanın polietilenin termal özelliklerini geliştirdiğini rapor etmişlerdir. Sentetik mikanın katkısız yüksek yoğunluklu polietilenin ergime sıcaklığını 1.7 °C, kristallik oranını da %4.8 artırdığını rapor etmişlerdir. Kompozitlerin termal stabilitesinin artırmasının nedenleri, yüksek sıcaklık altında difüzyon sonucunda bozulmanın engellenmesi ve kompozitlerin kristalinitesinin artmasıdır.



Şekil 6. Sentetik mika takviyeli PTFE polimer kompozitin pim sıcaklığının yük ile değişimi ilişkisi

Şekil 7'de sentetik mika takviyeli PTFE polimer kompozitin pimin çalıştığı çelik disk yüzey sıcaklığının yük ile değişimi görülmektedir. Pim yüzey sıcaklığında olduğu gibi disk yüzey sıcaklığı da artan hıza ve aşındırma yüküne bağlı artış göstermiştir. Disk sıcaklığı en düşük 0.5 m/s hızda ve 10 N aşındırma yükünde, en yüksek ise 1.5 m/s kayma hızında ve 100 N aşındırma yükünün uygulandığı deneyde gerçekleşmiştir. 1.5 m/s hızda

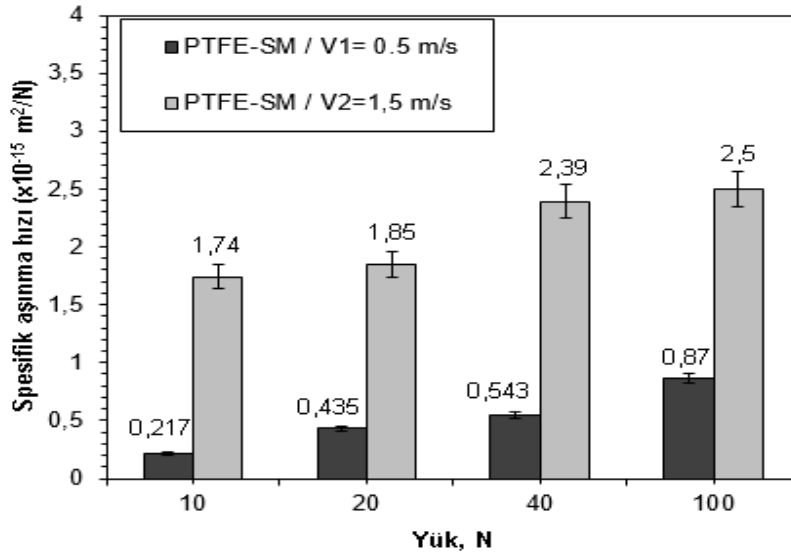
yapılan tüm deneylerin disk yüzey sıcaklığı 0.5 m/s hızda yapılan deneylerden daha yüksek ölçülmüştür. Her iki kayma hızında ve uygulanan tüm yükler de disk yüzey sıcaklığı pim yüzey sıcaklığından daha yüksek değere ulaşmıştır. Benzer aşındırma yüklerinde kayma hızının artması ile disk yüzey sıcaklığı en az 10 N yükte 2.4 °C ve en fazla ise 100 N yükte 6.2 °C yükselmiştir.



Şekil 7. Sentetik mika takviyeli PTFE polimer kompozitin pimin çalıştığı çelik diskin yüzey sıcaklığının yük ile değişimi

Şekil 8'de sentetik mika takviyeli PTFE polimer kompozitin spesifik aşınma hızının farklı yük ve hızlardaki değişimi verilmiştir. Kayma hızının 0.5 m/s ve aşındırma yükünün 10 N olduğu deneyde spesifik aşınma hızı değeri $0.217 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{N}$ olmuştur. Aynı kayma hızında yükün %100 arttırılması ile spesifik aşınma hızı %200 artarak $0.435 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{N}$ değerine, yükün %400 arttırılması ile aşınma hızı %250 artarak $0.543 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{N}$ ve yükün %1000 arttırılması ile aşınma hızı %400 artarak $0.87 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{N}$ olmuştur. Kayma hızı 1.5 m/s'de ve 10 N yükte yapılan deneyde spesifik aşınma hızı $1.74 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{N}$ olarak hesaplanmıştır. Aynı hızda aşındırma yükünün %100 arttırılması ile spesifik aşınma hızı %10 artarak $1.85 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{N}$ değerine, yükün %400 arttırılması ile aşınma hızı %37 artarak $2.39 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{N}$ ve yükün %1000 arttırılması ile aşınma hızı %43 artarak $2,5 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{N}$ değerine ulaşmıştır. Şekil 6'da görüldüğü gibi aşındırma yükünün sabit tutulduğu deneylerde kayma hızının artması ile aşınma hızı da artmıştır. Aşınma hızındaki en fazla artış 10 N yükte hızın 0.5 m/s hızdan 1.5 m/s hıza yükseltilmesiyle

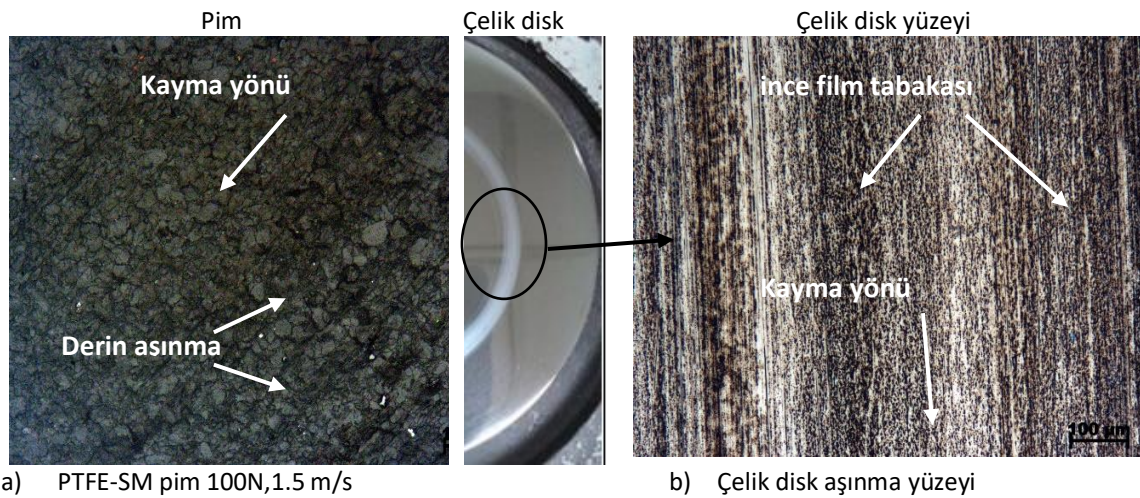
%800 ve en az artış ise %287 ile 100 N yükte gerçekleşmiştir. Daha önce Ünal vd. (23) PTFE içerisine grafit, cam fiber ve bronz ilave ederek yaptıkları çalışmada katkı maddelerinin aşınma oranını azalttığını belirtmişlerdir. Ayrıca genel olarak, PTFE kompozitlere cam fiber takviyesinin PTFE'nin aşınma oranını azaltmada en fazla etkiye sahip olduğunu, bronz katkısının da, PTFE'nin aşınma oranını düşürmede faydalı olduğunu, grafitin ise daha az oranda aşınma performansını geliştirdiğini ifade etmişlerdir. Bir başka çalışmada Ünal ve Yetkin (2010) PTFE içerisine karbon ve cam fiber ilave ederek yapmış oldukları çalışmada aşınma oranındaki maksimum azalmanın PTFE+17%GFR kompozit ile elde edildiğini, saf PTFE için spesifik aşınma oranının $10^{-13} \text{ m}^2/\text{N}$ düzeyinde, karbon dolgululu PTFE kompozit için aşınma oranı değerlerin $10^{-14} \text{ m}^2/\text{N}$, cam elyaf takviyeli PTFE kompozit için aşınma oranı değerleri ise $10^{-15} \text{ m}^2/\text{N}$ olduğunu belirtmişlerdir. Bu veriler doğrultusunda sentetik mikanın spesifik aşınma oranı üzerinde olumlu etkisinin olduğu söylenebilir.



Şekil 8. Sentetik mika takviyeli PTFE polimer kompozitin spesifik aşınma hızının yük ile değişimi

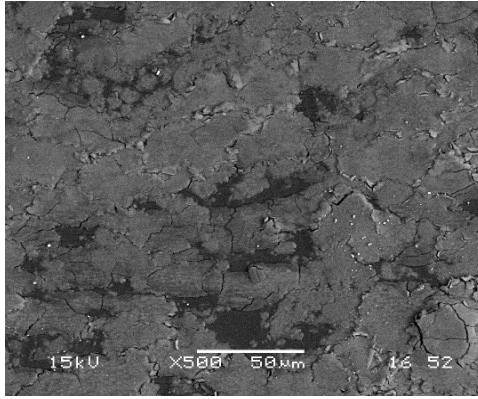
Şekil 9'da PTFE-SM kompozitlerin pim ve disk yüzeylerinin 100 N yük ve 1.5 m/s kayma hızında yapılan deneyden elde edilen aşınma yüzeylerinin optik mikroskop aşınma yüzey görüntüsü verilmiştir. Şekil 9 a'da görüldüğü gibi kayma yönünde derin aşınma izleri meydana gelmiştir. Aşınmanın yüzeyden parça koparak oluştuğu söylenebilir. Burada abrasiv aşınma mekanizması daha etkin olmuştur. Şekil 9 b'deki çelik disk yüzeyinde aşınma sonrasında polimer pimdenden kopan parçaların oluşturduğu film tabakası açıkça görülmektedir. Disk yüzeyine daha detaylı bakıldığında aşınmanın gerçekleştiği yüzeyin tamamına yakınının polimer pimdenden kopan polimer parçacıkları tarafından kaplanarak yüzeyde koruyucu ince bir film tabakası

oluşturduğu görülmektedir. Film tabakasının oluşumuna sentetik mika parçacıklarının etkin yapışma özelliğinin katkı sağladığı sanılmaktadır. Oluşan film tabakasının morfolojisini pimin ve diskin yüzey profili yakından etkilemektedir. Ayrıca aşındırma yükü ve kayma hızı da koruyucu film oluşturmada etkilidir. Meng *et al.* (2020) sentetik mikanın katman boyutunun büyük ve ara katman kuvvetinin zayıf olduğunu, bu nedenle sentetik mika katmanlarının birbirinden ayrılmasının kolay olmasından dolayı çelik bilye üzerinde yoğun ve düzensiz koruyucu transfer film oluşumuna katkı sağladığını ifade etmişlerdir. Deaconescu and Deaconescu (2020) koruyucu filmin kalınlığının artan nispi hız ile büyüdüğünü belirtmişlerdir.

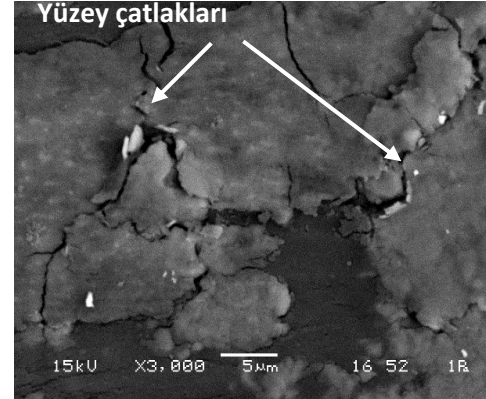


Şekil 9. Aşınma deney sonrası elde edilen a) PTFE-SM kompozit pim ve b) çelik disk optik mikroskop aşınma yüzey görüntüsü (Yük:100 N, kayma hızı:1.5 m/s)

Şekil 10'da 100 N yük ve 1.5 m/s kayma hızında yapılan aşınma deney sonrası elde edilen sentetik mika katkılı PTFE kompozit pimin taramalı elektron mikroskopunda alınan aşınma yüzey görüntüsü verilmiştir. Pim yüzeyinde çok sayıda, değişik boyutta ve derinlikte çatlaklar oluştuğu görülmektedir. Aşınma yüzeyinde görülen koyu alanlar ise ilerleyen çatlaklar sonucunda pimden kopan parçacıkların oluşturduğu oyukları göstermektedir. Aşınma yüzeyinde çok sayıda görülen oyuklar kayma yolu boyunca yüzeyden kopan parçacıklar sonucunda aşınmanın devam ettiğini



göstermektedir. PTFE polimerine ilave edilen sentetik mikanın pullu yapısının aşınma rejimini olumlu yönde etkilediği düşünülmektedir. Çünkü sentetik mika pullarının birbirine yapışma eğilimi oldukça yüksek olup aşınmaya karşı oldukça fazla direnç gösterdiği bilinmektedir. Bu durum abrasiv aşınmanın yanında adhesiv aşınma mekanizmasının da gerçekleştiğini desteklemektedir. Klaasa *et al.* (2005) PTFE içerisine ilave ettikleri cam bocukların, çelik karşı yüzey üzerinde transfer filmin gelişiminin ve oluşumunun etkili olduğu belirtmişlerdir.



Şekil 10. Aşınma deney sonrası elde edilen PTFE-SM kompozit pimin taramalı elektron mikroskopunda alınan aşınma yüzey görüntüsü (Yük:100 N, kayma hızı:1.5 m/s)

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada sentetik mika takviyeli PTFE-SM kompozitin tribolojik özelliklerine uygulanan yükün ve kayma hızının etkisi deneysel olarak araştırılmış ve aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

1. PTFE-SM kompozite uygulanan aşındırma yükünün artması ile sürtünme katsayısında azalma görülmüştür. Aşındırma yükü sabit tutulduğunda kayma hızının artması ile de sürtünme katsayısında azalma tespit edilmiştir.
2. Sürtünme katsayısı kayma yolunun ilk 400 m'sinde artış göstermiş, daha sonra neredeyse stabil kalmıştır. Kayma yolu boyunca 0.5 m/s hızda yapılan deneyin sürtünme katsayısı 0.185, 1.5 m/s hızda yapılan deneyin sürtünme katsayısı 0.165 olarak ölçülmüştür. Kayma hızının artması ile sürtünme katsayısında azalma görülmüştür.
3. PTFE-SM kompozitlerin pim yüzey sıcaklığı ve disk yüzey sıcaklığı uygulanan aşındırma yükünün ve kayma hızının artması ile birlikte artış göstermiştir.

Pim yüzey sıcaklığı 22 °C'den 41.4 °C'ye, disk yüzey sıcaklığı da 22.6 °C'den 42.2 °C'ye yükselmiştir.

4. PTFE-SM kompozitlerin aşınma oranı uygulanan yükün artması ile artmıştır. Kayma hızının artırılması da aşınma oranında artışa neden olmuştur. Bu değerler $0.217 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{N}$ ile $2,5 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{N}$ aralığında değişiklik göstermiştir.

5. Aşınma deney sonrası elde edilen optik ve SEM mikroskop görüntüleri incelendiğinde pim yüzeyinde kayma yönünde derin aşınma izleri, çok sayıda farklı boyutlarda çatakların ve oyukların olduğu görülmektedir. Etkin olarak abrasiv ve kısmen de adhesiv aşınma gerçekleşmiştir. Ayrıca çelik disk yüzeyinde neredeyse üniform diyebileceğimiz koruyucu film tabakası oluşmuştur. PTFE içerisine ilave edilen sentetik mikanın koruyucu film oluşumunda etkili olduğu düşünülmektedir.

Yazarların Katkısı

Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

6. Kaynaklar

- Alam, K. I., Bragaw, P., Burris, D. L., 2022. Isolating the tribochemical and mechanical effects of nanofillers on PTFE wear. *Wear*, 494-495, 204256.
- Bozan, U., Altuncu, E., Üstel, F., 2014. Nano partikül takviyeli teflon kaplamaların üretilmesi ve karakterizasyonu. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 18, 1, 21-30.
- Charfi, A., Neili, S., Kharrat, M., Dammak, M., 2021. Tribological behaviors of PTFE-based composites filled with bronze micro particles. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 34, 12, 1639–1653.
- Deaconescu, A., Deaconescu, T., 2020. Tribological behavior of hydraulic cylinder coaxial sealing systems made from PTFE and PTFE compounds. *Polymers*, 12, 155, 2-14.
- Friedrich, K., Schlarb, A. K., 2008. Tribology of polymeric nanocomposites. *Elsevier*, ISSN 1572-3364 404.
- Hatipoğlu, G., 2014. Polifitalamid kompozitlerin mekanik, termal ve tribolojik özelliklerinin deneysel incelenmesi, Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya Üniversitesi, 238.
- Heipl, O., Murrenhoff, H., 2015. Friction of hydraulic rod seals at high velocities. *Tribology International*, 85, 66–73.
- Hualing, L., Jun, W., 2005. Application of synthetic mica and some technical problems in production, proceedings electrical insulation. Conference and electrical manufacturing expo, Indianapolis ,IN.
- Kadioğlu, Ü., 2003. Bronz katkılı PTFE'nin kuru kayma halinde sürtünme ve aşınma davranışları. *SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 7, 1, 62-66.
- Khedkar, J., Negulescu, I., Meletis, E. I., 2002. Sliding wear behavior of PTFE composites. *Wear*, 252, 361–369.
- Klaasa, N.V., Marcusa, K., Kellockb, C., 2005. The tribological behaviour of glass filled polytetrafluoroethylene. *Tribology International*, 38, 824–833.
- Meng, ZJ., Wang, YX., Xin, X.C., Liu, H., Yan, YF., Yan, FY., 2020. The influence of several silicates on the fretting behavior of UHMWPE composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 137, 49335.
- Okularczyk, W., Baranowski, W., 2009. Experimental investigations of guiderings made of uhmwpe and ptfe composite in water hydraulics stems. *Kompozyty*, 9, 1, 53-57.
- Oshita, K., Yanagi, M., Okada, Y., Komiyama, S., 2017. Tribological properties of a synthetic mica-organic intercalation compound used as a solid lubricant. *Surface & Coatings Technology*, 325, 738–745.
- Riddar, F., Rudolphi, Å. K., 2014. Comparison of friction performance of four anodised aluminium surfaces foruse in a clutchactuator. *Wear*, 319, 227–233.
- Rudresh B. M., Kumar, B. N. R., Lingesh, B. V., 2017. Hybridization Effect on the Mechanical Behavior of Monophase Reinforced PA66/Teflon Blend Based Hybrid Thermo plastic Composites. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 70, 9, 2335–2346.
- Shojaei, A., Gholamalipour, S., 2011. Effect of chemical treatment of teflon powder on the properties of polyamide 66/teflon composites prepared by melt mixing. *Macromolecular Research*, 19, 6, 613-621.
- Song, H. J., Li, N., Li, Y., Min, C., Wang, Z., 2012. Preparation and tribological properties of graphene/poly(etheretherketone) nanocomposites. *Journal of Material Science*, 47, 6436–6443.
- Soon, K. H., Harkin J. E., Rajeev, R. S., Menary, G., McNally, T., Martin, P.J., Armstrong, C., 2009. Characterisation of melt-processed poly(ethyleneterephthalate)/synthetic mica nanocomposite sheet and its biaxial deformation behaviour. *Polymer International*, 58, 1134–1141.
- Souza D. H. S., Andrade C.T., Dias, M.L., 2013. Rheological behavior of poly (lacticacid)/synthetic mica nano composites. *Materials Science and Engineering: C* 33, 3, 1, 1795-1799.
- Souza D. H. S., Andrade, C. T. M., Dias, L., 2014. Effect of synthetic mica on the thermal properties of poly(lacticacid). *Polímeros*, 24, 20-24.
- Souza D. H. S., Borges, S.V., Dias, M.L., Andrade C.T., 2012. Structural evaluation and thermal properties of poly(lacticacid) and different synthetic micas nano composites, *Polymer Composites*, 33(4).
- Sui. H., Pohl, H., Schomburg, U., Upper, G., Heine, S., 1999. Wear and friction of PTFE seals. *Wear*, 224, 1999, 175–182.

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**, 808–817.

Ünal, H., Şen, U., Mimaroglu, A., 2007. Study of abrasive wear volume map for PTFE and PTFE Composites. *Applied Composites Material*, **14**, 287–306.

Ünal, H., Yetgin, S. H., 2010. The effect of test parameters on friction and wear performance of PTFE and PTFE composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, **29**, 1978-1986.

Wang, L., Xie, B.Hu., Yang, W., Yang, M.B., 2010. Grafted polyolefin-coated synthetic mica-filled polypropylene-co-ethylene composites: A study on the interfacial morphology and *properties*. *Journal of Macromolecular Science®, Part B: Physics*, **49**, **1**, 1-17.

Xanthos, M., Functional fillers for plastics, 2010. ISBN: 978-3-527-32361-6 374-377.

Zhang, X., Liao, G., Jin, Q., Feng, X., Jian, X., 2008. On dry sliding friction and wear behavior of PPESK filled with PTFE and graphite. *Tribology International*, **41**, 195-201.

İnternet kaynakları

1-<https://www.fluorotec.com/media/2191/aft-seals-design-handbook.pdf>, (20.4.2022).