

Cam Elyaf Takviyeli Poli-fital-amit Polimer Kompozitlerin Aşınma ve Sürtünme Performanslarının Araştırılması

Gizem HATIPOĞLU¹, Hüseyin ÜNAL^{2*}, Salih Hakan YETGİN³

¹ Power Co SE, Industriestraße Nord 38239, Salzgitter, Germany

²Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

³Tarsus Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Tarsus, Mersin, Türkiye

¹<https://orcid.org/0000-0002-8215-7698>

²<https://orcid.org/0000-0003-0521-6647>

³<https://orcid.org/0000-0002-6068-9204>

*Sorumlu yazar: unal@subu.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihi:

Geliş tarihi: 03.04.2023

Kabul tarihi: 12.08.2023

Online Yayınlanma: 22.01.2024

Anahtar Kelimeler:

Poli-fital-amid

Cam elyaf

Aşınma

Sürtünme

ÖZ

Endüstrinin birçok alanında üretim makinelerinde hareket iletiminde polimer ve polimer esaslı kompozit malzemelerden imal edilmiş dişli kullanılmaktadır. Uygun malzeme çiftlerinin seçimi dişli mekanizmalarının çalışma ömrünü belirlemektedir. Yüksek performanslı poli-fital-amit (PPA) polimeri ve PPA kompozitleri makine elemanlarının ömrünü artıracak malzemelerdendir. Bu çalışmada, katkısız poli-fital-amit polimeri ile ağırlık olarak %30 oranında cam elyaf takviyeli poli-fital-amit (PPA/%30GF) kompozitinin aşınma ve sürtünme performansları incelenmiştir. Aşınma deneyleri çelik diske karşı kuru ortam şartları altında gerçekleştirilmiştir. Cam elyaf takviyeli PPA kompoziti ikiz vidalı endüstriyel bir ekstruderde granül olarak üretilmiş ardından enjeksiyon makinesinde aşınma test numuneleri basılmıştır. Aşınma testleri 0,5 ve 1,0 m/s kayma hızlarında, 20 N, 30 N ve 40 N yükler altında yapılmıştır. Deneyler, pim-disk aşınma test cihazı kullanılarak ortam sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Aşınma testleri sonucunda, cam elyaf takviyeli PPA kompozitin sürtünme katsayısı ve aşınma oranının katkısız PPA polimerine göre daha düşük olduğu belirlenmiştir. Uygulanan yükün artması ile sürtünme katsayısı artarken hızın artması ile sürtünme katsayısı azalmıştır. Aşınma oranı ise uygulanan yük ve kayma hızının artması ile artmıştır. Uygulanan tribolojik test çalışma şartlarında % 30 oranında cam elyaf takviyeli poli-fital-amit katkısız PPA'ya göre ortalama da en az 5 kat dirençli olduğu tespit edilmiştir.

Investigation of Wear and Friction Performances of Glass Fiber Reinforced Poly-phthalate-amide Polymer Composites

Research Article

Article History:

Received: 03.04.2023

Accepted: 12.08.2023

Published online: 22.01.2024

Keywords:

Polyphthalamide

Glass fiber

Wear

ABSTRACT

In many areas of the industry, gears made of polymer and polymer-based composite materials are used for motion transmission in production machines. The selection of suitable material pairs determines the working life of gear mechanisms. Using high performance poly-phthalate-amide (PPA) polymer and PPA composites can increase the life of machine elements. In this study, the wear and friction performances of unfilled poly-phthalate-amide polymer and 30wt% glass fiber reinforced poly-phthalate-amide composite (PPA/30%GF) were investigated. Wear tests

were carried out against a steel disc under dry ambient conditions. Glass fiber reinforced PPA composite was produced as granules in a twin screw industrial extruder and then wear test specimens were molded in an injection molding machine. The wear tests were performed under 20 N, 30 N and 40 N loads at sliding speeds of 0.5 and 1.0 m/s. The tests were accomplished at ambient temperature using a pin-disc abrasion tester. As a result of the wear tests, it was determined that the friction coefficient and wear rate of the glass fiber reinforced PPA composite were lower than the unfilled PPA polymer. While the coefficient of friction increased with the raise of the applied load, the coefficient of friction decreased with the increment of the sliding speed. The wear rate increased with the rising in applied load and sliding speed. In the tribological test working conditions applied, it was determined that glass fiber reinforced poly-phthalate-amide with 30 % glass fiber reinforcement was at least 5 times more resistant on average than PPA polymer.

To Cite: Hatipoğlu G., Ünal H., Yetgin SH. Cam Elyaf Takviyeli Poli-fital-amit Polimer Kompozitlerin Aşınma ve Sürtünme Performanslarının Araştırılması. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 2024; 7(1): 125-140.

1. Giriş

Polimer esaslı tribo-malzemeler son yıllarda büyük ilgi çekmektedir. Birbiri üzerinde mekanik olarak hareket eden parçalar için düşük sürtünme katsayısı ve yüksek aşınma direncine sahip tribo-malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Poliamit (PA) mühendislik polimeri mekanik ve tribolojik özellikler açısından ilk akla gelen malzeme olmakla birlikte kuru kayma şartları altında makul seviyelerde sürtünme katsayısına sahiptir (Yi-Lan ve ark., 2016; Neis ve ark., 2017; Takenaka ve ark., 2015). PA polimerinin çelik diske karşı tribolojik özelliklerinin incelendiği birçok çalışma mevcuttur (Pogacnik ve ark., 2017; Kumar ve Kanagaraj, 2016; Jozwik ve ark., 2020; Abdullah ve ark., 2018; Gyorgy ve ark., 2023; Kamlendra ve ark., 2023). Pogacnik ve ark. (2017) katkısız Poliamit 6 (PA6) polimerinin çelik diske karşı tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmalarında uygulanan yük, kayma hızı ve temas sıcaklığının etkileri araştırılmıştır. Kumar ve Kanagaraj (2016) katkısız ve % 0-40 oranlarında grafit katkılı PA6 kompozitlerin tribolojik özelliklerini inceledikleri çalışma sonucunda değişen yük ile sürtünme katsayısı ve aşınma oranının azaldığını belirtmişlerdir. Jozwik ve ark. (2020) farklı katı yağlayıcı katkılı PA6 ve PTFE polimer kompozitlerin tribolojik özelliklerini incelediklerini incelemişlerdir. Yük arttığında sürtünme katsayısının ve aşınma hacminin arttığını belirtmişlerdir. Li ve Xia (2010) karbon fiber takviyeli PA6 kompozitlerin katkısız PA6 polimerine göre daha iyi tribolojik özellikler gösterdiğini tespit etmişlerdir. Optimum aşınma azalımının % 20 karbon elyaf içeriğinde elde etmişlerdir. Sürtünme katsayısının artan yük ile arttığını ancak kayma frekansının artması ile sürtünme katsayısının azaldığını belirtmişlerdir. Yi-Lan ve ark. (2016) yaptığı çalışmada yükün artırılması ile birlikte sürtünme katsayısının ve aşınma oranının önemli oranda arttığını belirtmişlerdir. Çalışma sonunda en iyi tribolojik özelliklere % 15 cam elyaf + % 7 grafit + % 8 çok yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (ÇYMA-PE) katkılı PA6 hibrit kompozitinde ulaşılmıştır. Kamlendra ve ark. (2023) cam elyaf ve grafit katkılı PA6 kompozitlerin tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Yük ve kayma hızının artması ile sürtünme katsayısının ve spesifik aşınma oranının arttığını belirtmişlerdir. Literatürde görüldüğü gibi gerek katkısız PA6 polimeri gerekse katkılı PA6

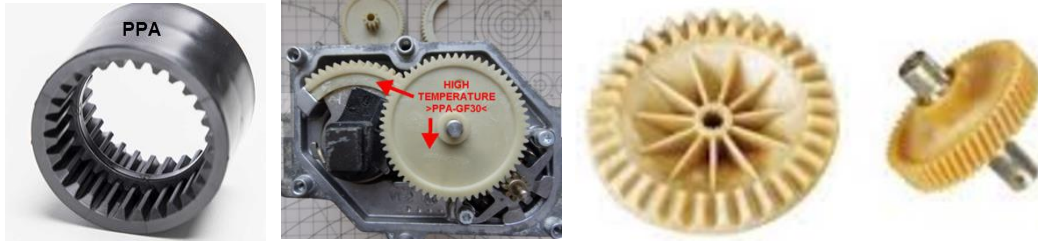
kompozitlerin tribolojik özelliklerinin incelendiği çalışmalarda katkı türü ve miktarının yanında uygulanan yük ve kayma hızının etkileri de incelenmiştir. PA/çelik teması için sürtünme katsayısı 0,3-0,5 arasında elde edilirken bazı çalışmalarda sürtünme katsayısı 2,0 olarak elde edilmiştir (Feyzullahoglu ve Saffak, 2008; Unal ve Mimaroglu, 2003; Meng ve ark., 2009; Kumar ve Kanagaraj, 2016; Zhou ve ark., 2014). Genel olarak, sürtünme katsayısının artan yük ile arttığı ancak bazı çalışmalarda ise artan yük ile azaldığı ifade edilmiştir (Kumar ve Kanagaraj, 2016; Unal ve Mimaroglu, 2003; Meng ve ark., 2009; Unal ve ark., 2004). Sürtünme katsayısındaki bu farklılığı ve değişkenliği özellikle polimer malzemenin ergimesi nedeniyle aşınma mekanizmasının değişmesine bağlamışlardır (Stachowiak ve Batchelor, 2006; Myshkin ve ark., 2015).

Aromatik ve alifatik fonksiyonelliklerin bir kombinasyonu olan Poli-fital-amid (PPA) polimeri, Poliamit (6, 66) gibi alifatik naylonlar ile Poli-aril-eter-keton (PAEK) ve Poli-eter-eter-keton (PEEK) gibi yüksek termal özelliklere sahip polimerler arasında fiyat/performans açısından bir köprü görevi görmektedirler (Hatipoğlu, 2014). PPA polimeri konfigürasyonunda kullanılan diaminlere ve tereftalik/izoftalik asit oranına bağlı olarak 300 ile 325 °C arasında değişen ergime sıcaklığına, 120 ile 125 °C arasında değişen ısıl sapma sıcaklığına (HDT) ve 2,5 ile 3,5 GPa arasında değişen elastiklik modülüne sahiptir (Mateo ve ark., 2020; 2021; 2022). PPA polimerinin zincirindeki aromatik grup(lar), yüksek ergime sıcaklığına, yüksek camsı geçiş sıcaklığına, düşük nem absorplama, yüksek kimyasal dirence ve yüksek ölçü kararlılığına sebep olmaktadır (Glenn , 1996; Djukic ve ark., 2020; Cao ve ark., 2016; Sandro ve ark., 2017). PPA polimeri bu özellikleri nedeniyle otomotiv sektörü başta olmak üzere elektrik-elektronik sektörü, havacılık ve uzay sektörü gibi alanlarda kullanım alanı bulmaktadır (Ferit ve ark., 2017; Gratzl ve ark., 2019). Cao ve ark. (2016) poli-fenilen-sülfid (PPS) polimerine ilave ettikleri poli-fital-amid (PPA) polimeri ile PPS/PPA karışımına ilave ettikleri % 3 ile % 20 arasında değişen oranlarda karbon nanotüp (KNT) katkının etkilerini incelemişlerdir. PPA polimeri, PPS polimerinin kristallliği üzerine çekirdekleyici etkisi gösterirken mekanik özellikleri geliştirmemiştir. KNT katkısı ise karışımın çekme ve eğilme dayanımını artırırken PPS polimerinin kristallenmesini de teşvik etmiştir. KNT, çekme ve eğilme dayanımını sırasıyla % 34,5 ve % 19,3 oranlarında artırmıştır. Mateo ve ark. (2021) farklı oranlarda PPA/Poliamit 4,10 (PA4,10) polimer karışımının mekanik özelliklerini istatistiksel olarak incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, çekme dayanımı, kopma uzaması ve darbe enerjisindeki değişikliklerin istatistiksel olarak anlamlı olmadığını ancak eğmedeki elastiklik modülü, çekmedeki elastiklik modülü, yoğunluk ve ısıl sapma sıcaklığı (HDT) değerlerindeki değişikliklerin anlamlı olduğunu belirtmişlerdir. Mekanik özelliklerden ödün vermeden ve yoğunluğu önemli bir şekilde artırmadan yüksek sıcaklık uygulamalarının gerekli olduğu yerlerde PPA polimerinin büyük bir potansiyel olduğu belirtilmiştir. Djukic ve ark. (2020) PPA polimerinin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda, PPA polimerinin düşük darbe dayanımından yüksek darbe dayanımına gevrek-sünek geçiş gösterdiği belirtilmiştir. Oda sıcaklığında, tüm PPA polimerlerinin kırılğan olduğu, çekme ve basma deneyleri sırasında gerilim sertleşmesi davranışının gözlemlendiği belirtilmiştir. Gerilim sertleşmesinin kristallik değerlerinden

bağımsız olduğu bildirilmiştir. Gomez-Mares ve ark. (2015) yakıt ile direkt temas halinde olacak % 35 oranında cam elyaf takviyeli PPA kompozitin termo-mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda, akma dayanımının % 50 oranında, çekme dayanımının ise % 51 oranında azaldığı, kopma uzamasının ise % 62,5 oranında arttığı belirtilmiştir. Aynı zamanda, çekmedeki elastiklik modülünün % 38 oranında, kırılma enerjisinin ise % 51 oranında azaldığı belirtilmiştir. Mekanik özelliklerdeki bu değişikliklerin polimer tarafından emilen yakıtın malzemeyi plastikleştirilen veya çözen polimer molekülleri ile etkileşime girdiği için olabileceği belirtilmiştir.

Poliamit polimerinin bir türü olan PPA polimeri, yüksek sıcaklık dirençli olup cam elyaf ve karbon elyaf gibi inorganik elyaflar ile takviye edilerek aynı zamanda politetrafloretillen (PTFE) ve grafit gibi katı yağlayıcılar ilave edilerek aşınma dirençli malzeme olarak kullanılmaktadır. PPA polimeri, PA6, PA66 ve PA46 gibi polimerlere alternatif olarak kullanılmaktadır (Takayuki ve Yosuke, 2019). Unal ve ark. (2016) katkısız PPA polimeri ile PPA/% 30 karbon elyaf (PPA/% 30KE) kompozitlerin çelik diske karşı kuru ortam şartları altında aşınma davranışlarını araştırmışlardır. Kayma hızı ile birlikte sürtünme katsayısı azalırken aşınma oranının arttığını gözlemlemişlerdir. Hatipoğlu (2014) % 5 PTFE katkılı PPA kompozitlerin AISI 440C paslanmaz çelik diske karşı tribolojik özelliklerini incelemiştir. Yaptığı çalışma sonucunda artan yük miktarı ile sürtünme katsayısının ve aşınma oranının arttığını belirtmiştir. Takayuki ve Yosuke (2019) PPA polimerinin bir türü olan ve PTFE ilaveli ve karbon elyaf takviyeli yarı-aromatik PA (PA10T) biyokütle kompozitin tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. PA10T polimerine ilave edilen PTFE polimerin sürtünme katsayısı, spesifik aşınma oranı ve P:V (pressure x velocity) faktörü gibi tribolojik özellikleri geliştirdiği belirtilmiştir. PTFE katkılı ve karbon elyaf takviyeli PA10T biyokütle hibrit kompozitin mekanik özelliklerinde pek değişiklik olmadığı belirtilmiştir. Yüksek sıcaklık dirençli yüksek performanslı PPA polimeri, geleneksel olarak kullanılan PA6, PA66, PA46, polioksimetilen (POM), ÇYMAPE ve PTFE gibi polimerlere aşınma ve sürtünmenin ön plana çıktığı uygulamalarda alternatif olarak kullanılabilir. Sözü edilen polimerlere göre pahalı olmasına rağmen sıcaklık direnci istenen tribolojik uygulamalarda ön plana çıkmaktadır.

Bu çalışmada, katkısız PPA polimeri ile PPA/%30GF kompozitin tribolojik özellikleri incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. İki farklı kayma hızı (0,5 ve 1,0 m/s) ve üç farklı yük (20 N, 30 N ve 40 N) uygulanarak saf PPA polimeri ve PPA/%30GF kompozitin sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerleri tespit edilmiştir. PPA polimer ve kompozit malzemelerinin özellikle dişli mekanizmalarında aşınma ve sürtünme özellikleri ile ilgili alanlara ışık tutabilmesi amacıyla araştırma konusu olarak tercih edilmiştir. Şekil 1'de katkısız PPA polimeri ve PPA/%30GF kompozitten imal edilen ve tribolojik uygulamalarda kullanılan dişli sistemleri verilmiştir.



Şekil 1. PPA malzemeden imal edilen dişli sistemleri (<https://www.stagnoligears.com/en/motor-gears/polyamide-ppa/>, <http://www.hxgcs.com/en/product/288.html>).

2. Materyal ve Metot

Deneylerde Eurotec Mühendislik Plastikleri/İstanbul firmasından temin edilen Tecomid HT ticari isimli, $1,18 \text{ g/cm}^3$ yoğunluğa, $310 \text{ }^\circ\text{C}$ ergime sıcaklığına ve % 2,4 oranında nem oranına sahip katkısız poli-fital-amid polimeri matris malzemesi olarak kullanılmıştır. Takviye malzemesi olarak $10,5 \text{ }\mu\text{m}$ çapında ve $4,5 \text{ mm}$ uzunluğunda, % 0,6 oranında aminosilan bağlayıcı ile yüzeyi kaplanmış olan E tipi cam elyaf kullanılmıştır. PA2 tip kısa cam elyaf Cam Elyaf San. ve Tic. A.Ş/İstanbul'dan temin edilmiştir. DIN X40CrMoV5-1 kompozisyonlu çelik disk karşı disk malzeme olarak kullanılmıştır.

PPA/%30GF kompozit granül formunda endüstriyel tip çift vidalı bir kompond makinesi kullanılarak üretilmiştir. Ekstrüzyon prosesinde besleme hunisi ile ekstrüzyon kalıbı arasındaki sıcaklık dağılımı $310\text{-}345 \text{ }^\circ\text{C}$ olarak belirlenmiştir. Enjeksiyonla numune üretimi yapılmadan önce granüller, kurutulmuştur. Ekstrude edilen cam elyaf takviyeli PPA polimer granüller $120 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de 4 saat fırında kurutulduktan sonra enjeksiyon kalıplama yöntemi ile basılmıştır. Aşınma testlerinde kullanılan pim numuneler, çapı 6 mm ve uzunluğu 50 mm olacak şekilde özel olarak tasarlanmış kalıp kullanılarak üretilmiştir. Enjeksiyon kalıplama ile üretimlerde sıcaklık değerleri $310\text{-}340 \text{ }^\circ\text{C}$ arasında iken enjeksiyon basıncı 150 bar olarak ayarlanmıştır. Tablo 1'de kullanılan malzemeler, kısaltmaları ve üretim şartları verilmiştir.

Tablo 1. PPA esaslı polimer kompozitin kompozisyonları ve üretim şartları

Sıra No	PPA (ağırlık olarak)	Cam elyaf (ağırlık olarak)	Kısaltma	Üretim şartları
1	100	-	PPA	Çift vidalı kompond makinesi ısıtıcı sıcaklık aralığı: $310\text{-}345 \text{ }^\circ\text{C}$
2	70	30	PPA/%30GF	Enjeksiyon makinesi ısıtıcı sıcaklık aralığı: $310\text{-}345 \text{ }^\circ\text{C}$, Enjeksiyon basıncı: 150 bar

Aşınma testleri, DIN X40CrMoV5-1 çelik diske karşı katkısız PPA ve PPA/%30GF kompoziti kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Aşınma testleri, Şekil 2'de resmi verilen pim-disk cihazında, kuru ortam şartlarında, oda sıcaklığında ve ASTM G99 standardına uygun olarak yapılmıştır. Tablo 2'de deneylerde kullanılan polimer malzemeler ve aşınma deneyi proses şartlarının detayları verilmiştir. Pim numunelerin deney öncesi ve sonrası ağırlık ölçümleri Precia 220 marka $0,0001 \text{ gr}$ hassasiyetli hassas terazi ile yapılmış ve spesifik aşınma oranları (K_o) Eşitlik 1'de verilen denklem ile

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

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

Tablo 2. Kullanılan polimer malzemeler ve deney şartları

Malzeme	Yoğunluk (g/cm^3)	Ortam sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Kayma mesafesi (m)	Yük (N)	Kayma hızı (m/s)
PPA	1,18	21±2	2000	20	0,5
PPA/%30GF	1,40			30	1,0

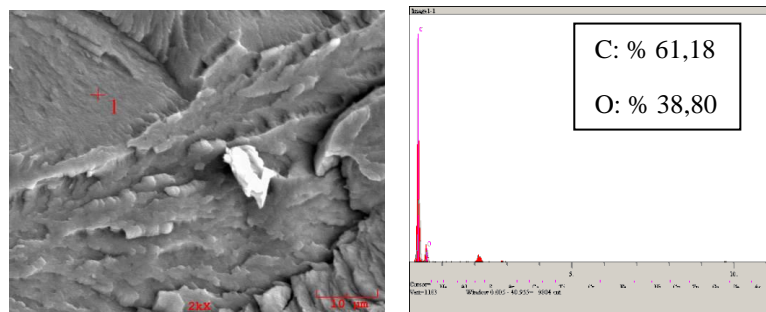


Şekil 2. Aşınma test cihazının gösterimi

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. EDS analiz sonuçları

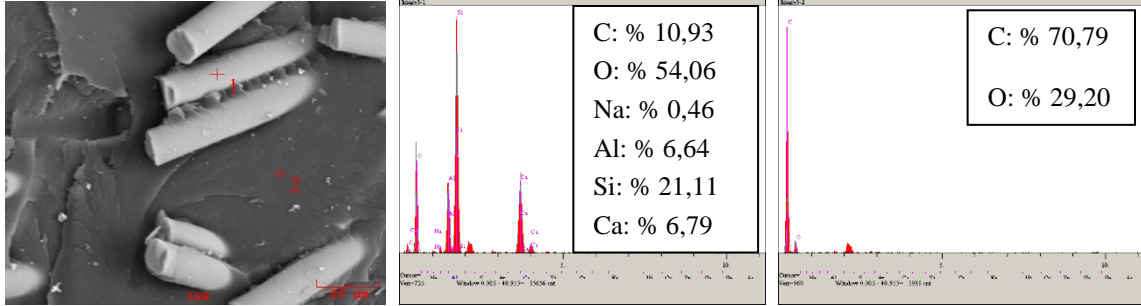
EDS analizi, malzemelerin elementel olarak bileşenlerini tanımlamak için kullanılan test yöntemlerinden birisidir. Şekil 3'te katkısız PPA polimerine ait EDS görüntüsü ve analiz sonucu verilmiştir. Şekil incelendiğinde, polimer yapısındaki karbon ve oksijen elementlerinin varlığı görülmektedir. Karbon miktarı ağırlıkça % 61,18 oranında iken oksijen miktarı ağırlıkça % 38,80 oranındadır.



Şekil 3. PPA polimerinin EDS analizi

Şekil 4'teki EDS analizinde ise PPA/%30GF kompozitin yapısındaki elementel sonuçlar verilmiştir. 1 numaralı nokta cam elyaf iken 2 numaralı nokta PPA polimerini göstermektedir. Sodyum, kalsiyum,

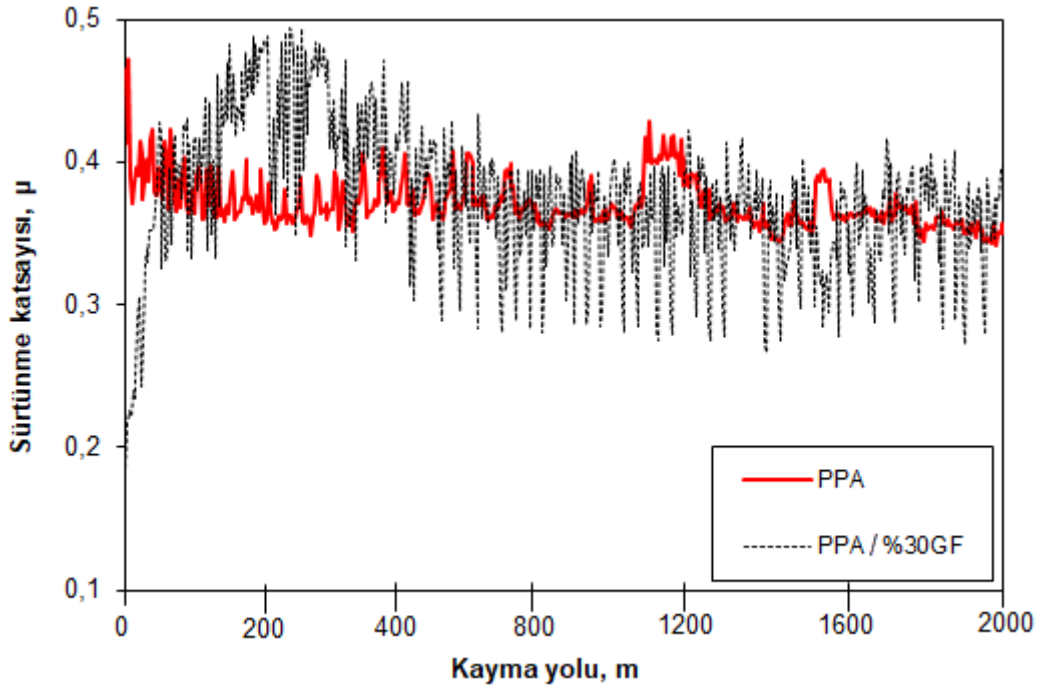
silisyum ve alüminyum gibi cam elyaf bileşiminde bulunan elementlerin varlığı gözlenirken 1 ve 2 numaralı noktalarda karbon ve oksijen elementlerinin yapıda var olduğu da görülmektedir. 1 numaralı EDS analizi sonucunda karbon, oksijen, sodyum, alüminyum, silisyum ve kalsiyumun oranları ağırlıkça sırasıyla % 10,93, % 54,06, % 0,46, % 6,64, % 21,11 ve % 6,79 olarak elde edilmiştir.



Şekil 4. PPA/%30GF kompozitin EDS analizi

3.2. Tribolojik Testler

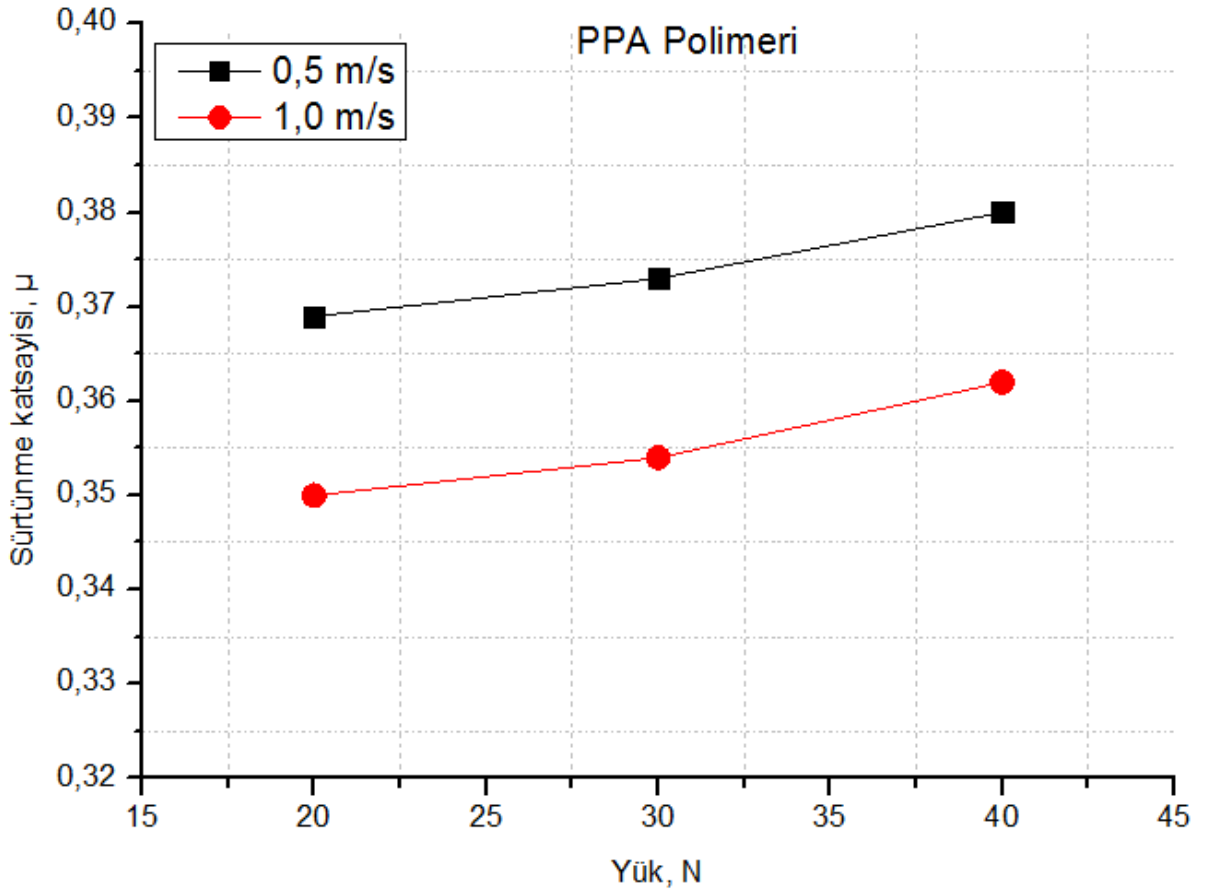
PPA polimeri ile PPA/%30GF polimer kompozitin 1,0 m/s kayma hızında ve 40 N yük altındaki kayma mesafesi-sürtünme katsayısı grafiği Şekil 5'te verilmiştir. Başlangıç ve kararlı hal aşamaları olarak adlandırılan ve iki aşamada gerçekleşen sürtünme katsayısı değişimleri şekilde görülmektedir. PPA polimeri için kararlı hal aşamasına yaklaşık 100 m gibi kısa bir kayma mesafesi ile ulaşılırken PPA/%30GF polimer kompoziti için yaklaşık 400 m kayma mesafesinden sonra kararlı hal aşamasına ulaşılmıştır. Aşınma deneylerinin başlangıç aşamalarında, hem karşı disk hem de polimer pim numunelerin yüzey pürüzlülükleri yüksektir. Bu durum temas eden yüzeyler arasında kuvvetli etkileşime sebep olmakta ve yüksek sürtünme katsayısı oluşturmaktadır. Aşınma testi devam ettiği sürece karşı diskin kaba yüzey profili azalacak ve aynı zamanda test numunesi ısınacaktır. Uygulanan yük düşük olduğunda, karşı disk ve numune arasındaki temas bölgesindeki gerilimde daha düşük olacaktır. Aynı zamanda sürtünme ısı da daha düşük olacaktır. Uygulanan yük ve kayma hızı arttığında test malzemeleri arasındaki sürtünme ısı da artacak ve ilave aşınma parçacıkları numune üzerine yapışacaktır. Bu durum karşı disk yüzeyinde transfer film tabakası adı verilen ince bir film tabakasının oluşmasına ve dolayısıyla polimer-disk arasındaki temasın kesilerek sürtünme ve aşınma miktarının azalmasında önemli rol oynayacaktır. Carmona-Cervantes ve ark. (2022) yaptıkları çalışmada da dolgu malzemelerinin, sert polimer matrise ilave edilmesi ile tribo-çift arasında bir transfer filmi oluşturan katı yağlayıcılar olarak hareket ettiğini ve sürtünme katsayısını azalttığını belirtmişlerdir.



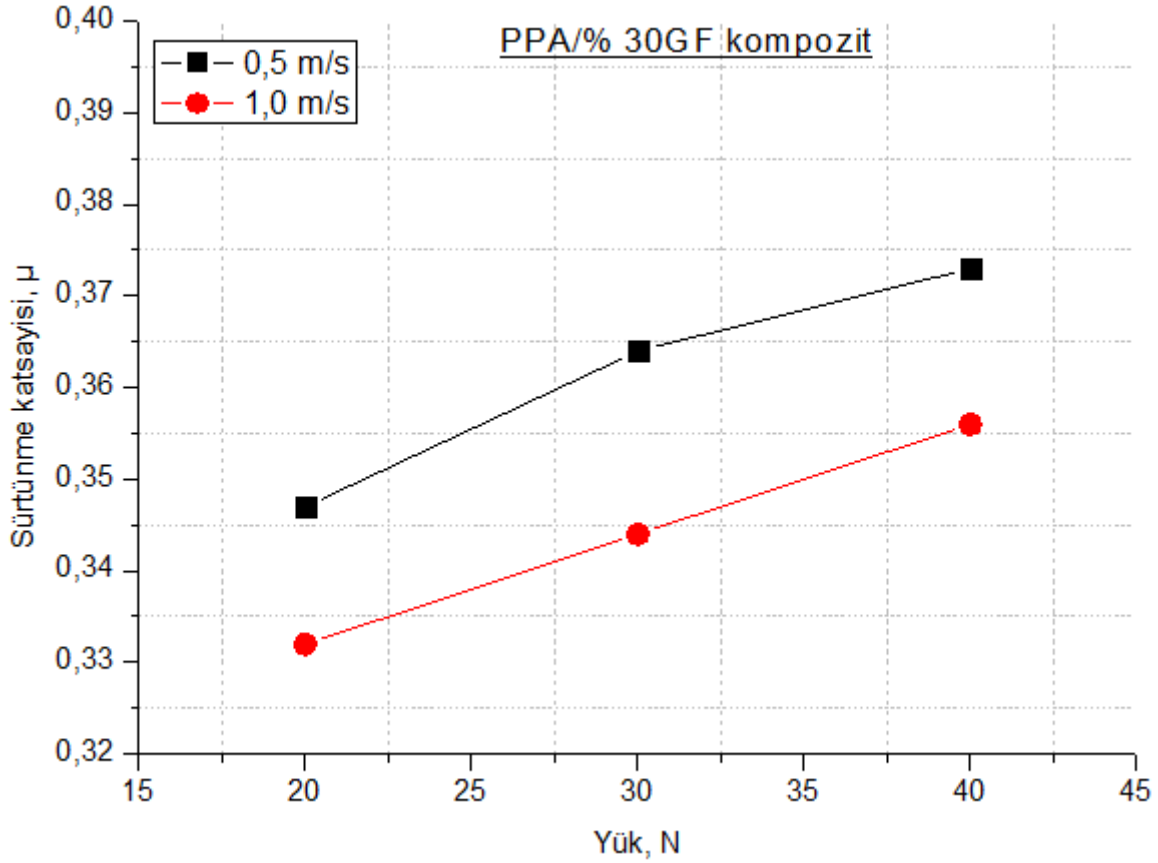
Şekil 5. PPA polimeri ve PPA/%30GF kompozitin kayma yolu-sürtünme katsayısı değişimi (Yük: 40 N, Hız 1,0 m/s)

Şekil 6’da katkısız PPA polimerinin 0,5 m/s ve 1,0 m/s kayma hızlarında yüke bağlı olarak sürtünme katsayılarındaki değişim verilmiştir. Şekilde görüldüğü düşük ve yüksek kayma hızlarında uygulanan yükün artması ile sürtünme katsayısı artmıştır. 0,5 m/s kayma hızında yükün 20 N’dan 40 N’a artırılması ile sürtünme katsayısı % 2,98 oranında artarken 1,0 m/s kayma hızında yükün artması ile sürtünme katsayısı % 3,4 oranında artmıştır. PPA polimeri için hızın sürtünme katsayısı üzerindeki etkisi incelendiğinde ise hızın artması ile sürtünme katsayısı yaklaşık olarak % 5 oranında azalmıştır. Uygulanan yük ve kayma hızı aralıklarında PPA polimeri için sürtünme katsayısı 0,35-0,38 arasında değiştiği belirlenmiştir. Şekil 7’de ise PPA/%30GF kompozitlerin uygulanan yük ve kayma hızlarında sürtünme katsayılarındaki değişim verilmiştir. Katkısız PPA polimerine benzer şekilde artan yük ve kayma hızı ile sürtünme katsayısının arttığı belirlenmiştir. 0,5 m/s sabit kayma hızında yükün artması ile birlikte PPA kompozitin sürtünme katsayısı % 7,4 oranında artış ile 0,347’den 0,373’e yükselmiştir. 1,0 m/s kayma hızı dikkate alındığında ise sürtünme katsayısı % 7,22 oranında artmıştır. Kayma hızının PPA kompozitlerin sürtünme katsayısı üzerine etkisi incelendiğinde ise artan kayma hızı ile birlikte sürtünme katsayısının azaldığı belirlenmiştir. Bu azalma 20, 30 ve 40 N yükler için sırasıyla % 4,5, % 5,8 ve % 4,7 oranlarında elde edilmiştir. Katkısız PPA polimeri ile PPA/%30GF kompozitin sürtünme katsayısı değerleri karşılaştırıldığında, PPA polimerine katılan % 30 oranındaki cam elyafın sürtünme katsayısını % 6,3 oranında azalttığı belirlenmiştir. Uygulanan kayma hızı ve yük aralıklarında en yüksek sürtünme katsayısı katkısız PPA polimerinde elde edilirken en düşük sürtünme katsayısı PPA/%30GF kompozitinde elde edilmiştir. Srinath ve Gnanamoorth (2005) yaptıkları çalışmada cam elyaf takviyeli naylon66 kompozitinin sürtünme katsayısının, katkısız naylon66 polimerinin sürtünme katsayısından daha düşük olduğunu gözlemlemişlerdir. Sürtünme katsayısında

yaşanan bu düşüşün sebebinin ise cam elyafların yapısındaki yüksek orandaki silisyumun etkisi ile adeta çelik disk yüzeyini zımparalayarak daha düzgün ve pürüzsüz yüzey oluşturması ile açıklamışlardır. Daha pürüzsüz yüzeylerin çelik disk yüzeyinde oluşması muhtemel sıcaklık artışı engelleyici ifade edilmiştir. Kim ve ark. (2014) ise PA 66 kompozitindeki kısa cam elyaflarının, kompozit yüzey üzerinde yüksek orandaki cam elyafı ile temas platoları oluşturarak sürtünme katsayısını azalttığını belirtmişlerdir. Cam elyaf ilavesi ile sürtünme özelliklerindeki değişimin temas yüzeylerinin değişen doğası ve özelliklerinden kaynaklandığını belirtmişlerdir. Temas sırasında, sert yüzey olan çelik disk ile yumuşak olan polimer arasındaki sistemden sert olan çelik ile yine sert olan cam elyaf temasına dönüşecektir. İlk durum daha yumuşak bir aşınma sürtünme mekanizmasını teşvik ederken ikinci durumda daha şiddetli bir aşınma sürtünme mekanizmasının baskın olacağı ve dolayısıyla polimer içerisindeki elyaf miktarı ile sürtünme katsayısının azaltılabileceği belirtilmiştir.



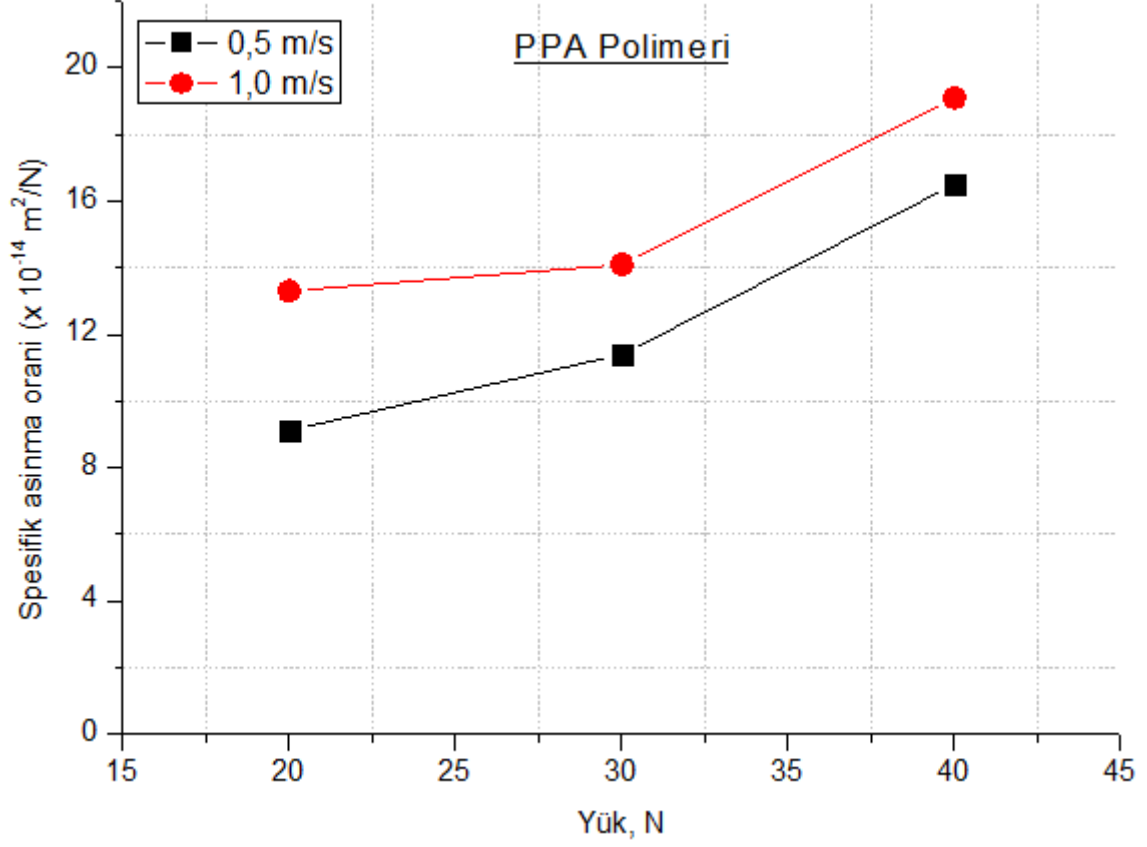
Şekil 6. PPA polimerinin yük-sürtünme katsayısı değişimi



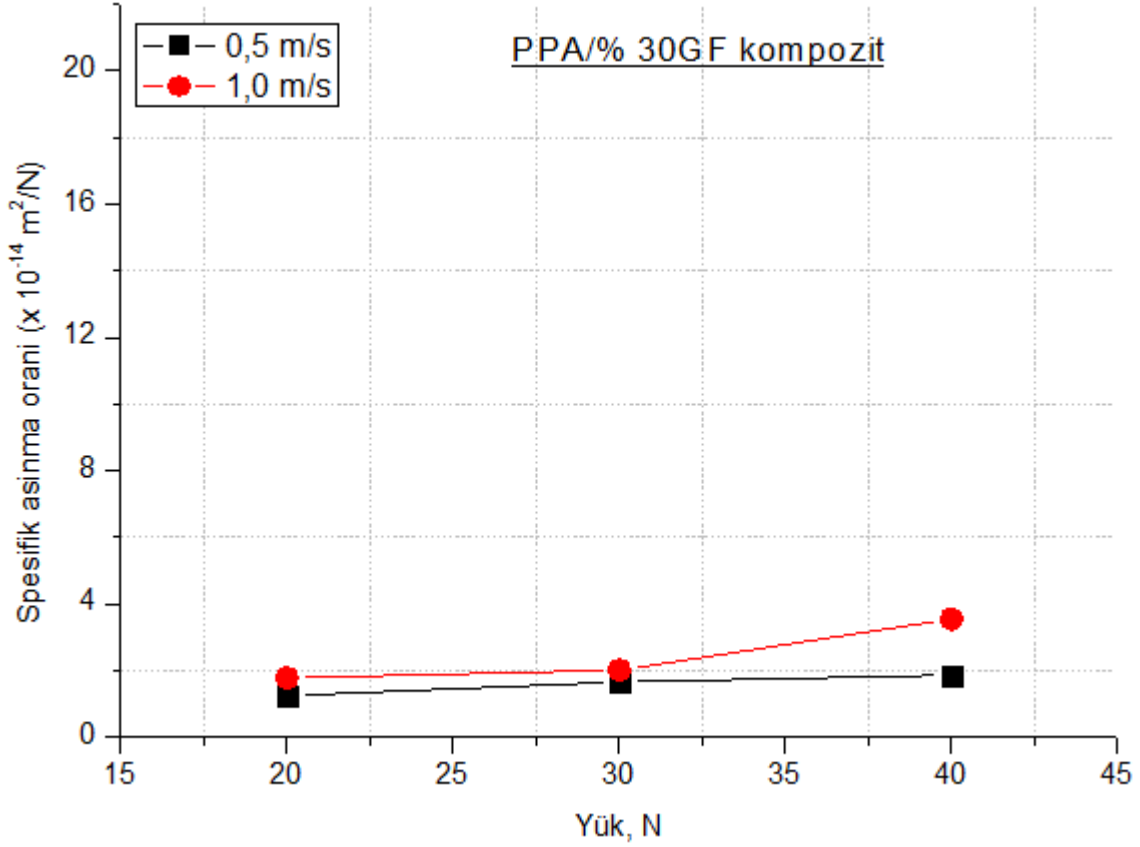
Şekil 7. PPA/%30GF kompozitin yük-sürtünme katsayısı değişimi

Şekil 8 ve 9'da sırasıyla katkısız PPA polimeri ile PPA/%30GF kompozitin uygulanan yük ve kayma hızlarına bağlı olarak spesifik aşınma oranı değişimleri verilmiştir. Her iki grafik incelendiğinde artan yüke bağlı olarak spesifik aşınma oranının arttığı belirlenmiştir. Bu artış katkısız PPA polimeri için 0,5 m/s kayma hızında % 81,1 oranında iken 1,0 m/s kayma hızında % 43,6 oranında elde edilmiştir. PPA/%30GF kompoziti için ise artan yük ile birlikte kayma hızına bağlı olarak artış oranları % 50 ve % 100 olarak elde edilmiştir. Şekil 8 ve 9'da görüldüğü gibi katkısız PPA polimerinde kayma hızının artması spesifik aşınma oranını artırmıştır. Her üç yük değeri için değerlendirme yapıldığında spesifik aşınma oranının ortalama % 28,4 oranında arttığı belirlenmiştir. Bu artış oranı PPA/%30GF kompoziti için ise ortalama % 51,6 oranında elde edilmiştir. PPA polimerine ilave edilen % 30 oranındaki cam elyafın etkisi incelendiğinde ise 0,5 m/s kayma hızında spesifik aşınma oranı ortalama % 670, 1,0 m/s kayma hızında ise % 564 oranında azaldığı belirtilmiştir. Uygulanan kayma hızı, yük ve katkı miktarı dikkate alındığında spesifik aşınma oranı üzerine etkili olan en önemli parametrenin katkı miktarının oranı olduğu belirlenmiştir. Bilindiği gibi, polimer malzemelerin aşınma prosesi, kırılma, tribokimyasal etki ve plastik akış kısımlarından meydana gelmektedir. Unal ve ark. (2006) yaptıkları çalışma sonucunda yükün artması sonucunda matris ve fiber arasındaki ara-yüzey bağının zayıflamasına sebep olarak kırılma mekanizmasının gerçekleşmesi ile aşınma oranının artacağı belirtilmiştir. Zhou ve ark. (2013) ile Luo ve ark. (2016), artan yapışma kuvveti ve pulluk nedeniyle

çok sayıda fiberin polimer matrisinden ayrıldığını ve polimer matrisin şiddetli mikro pulluk ve mikro kesme ile uzağa aktarıldığını, dolayısıyla uygulanan yükün artması ile kompozitlerin aşınma direncinin kötüleştiğini açıklamışlardır.

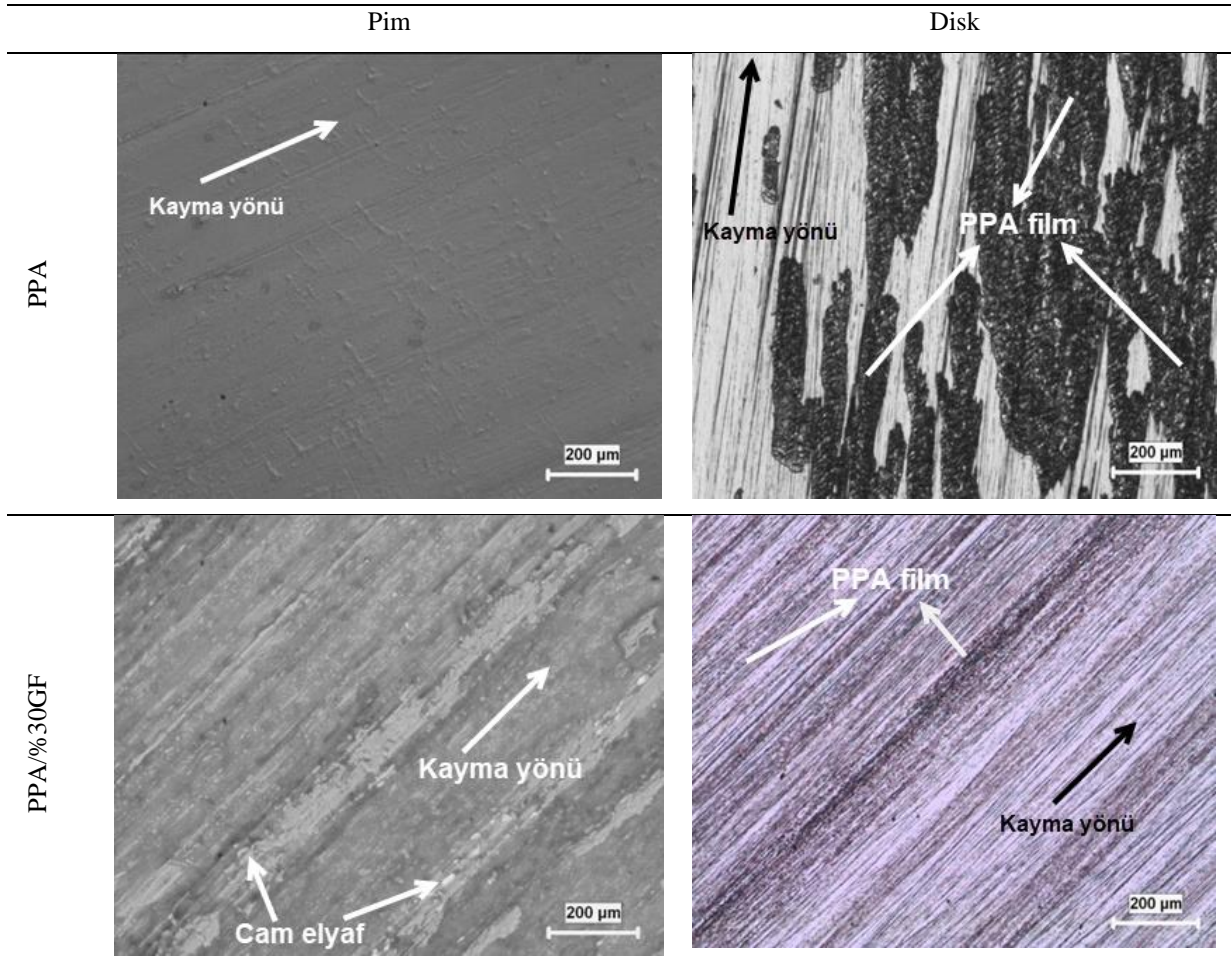


Şekil 8. PPA polimerinin yük-spesifik aşınma oranının değişimi



Şekil 9. PPA/%30GF kompozitin yük-spesifik aşınma oranının değişimi

Şekil 10'da PPA polimeri ile PPA/%30GF kompozit numunelere ait aşınma testi sonrası elde edilen pim ve disk optik resimleri verilmiştir. Katkısız PPA polimerinin aşınma yüzeylerinde kayma yönünde ince ama fazla sayıda aşınma kanalı yer aldığı, çelik diskte ise düzensiz bir şekilde transfer film tabakasının oluştuğu gözlenmiştir. Katkısız PPA polimerinin sünek özelliği nedeniyle kuru kayma şartları altında çelik diske yapıştığı dolayısıyla aşınma mekanizmasının abrazyif aşınma yerine adhezif (yapışma) şeklinde gerçekleştiği düşünülmektedir. PPA/%30GF kompozitine ait mikroyapı görüntülerinden, kompozite ait pim numunesi yüzeyinde, yapıda yer alan cam elyaflar görülebilmektedir. Aynı zamanda kayma yönünde aşınma kanalları da görülmektedir. Bunun yanında, çelik disk yüzeylerinde daha ince ancak tüm yüzey boyunca yayılmış ve homojen olarak dağılmış transfer film tabakasının şekillendiği görülmektedir. Fiber takviyeli PA66 kompozitin tribolojik özelliklerine metalik karşı diskin etkisi üzerine bir çalışma yapan Chen ve ark. (2003) temas süresince metalik karşı diskin çeşidine (alüminyum, pirinç veya farklı yüzey işlemleri veya ısıl işlemleri çelik) bağlı olarak cam elyaf takviyeli PA66 kompozitin aşınma direnci ve sürtünme katsayısını üzerine önemli oranda etkiye sahip olduklarını belirtmişlerdir. Metal yüzeyin kararlı bir polimer transfer filmi oluşturma kabiliyetinin tribolojik özelliklerde önemli derecede iyileşme sağladığı belirtilmiştir.



Şekil 10. Saf PPA polimeri ve PPA/%30GF kompozitin optik mikroskop görüntüleri (Yük: 40 N, Hız 1,0 m/s)

4. Sonuç

Katkısız PPA polimeri ile PPA/%30GF kompozitlerin tribolojik özelliklerinin incelendiği çalışma sonucunda aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır.

Katkısız PPA polimeri ile PPA/%30GF kompozitlerin uygulanan yükün artması ile sürtünme katsayısı artarken kayma hızının artması ile azalmıştır. Kayma hızı ve yüke bağlı olarak PPA polimerinin sürtünme katsayısı 0,35-0,38 aralığında değişirken cam elyaf takviyeli PPA kompozitinde 0,33-0,375 aralığında değiştiği tespit edilmiştir. 0,5 m/s kayma hızı ve 40 N yük altında katkısız PPA polimerinde en yüksek sürtünme katsayısı elde edilirken 1,0 m/s kayma hızı ve 20 N yük altında PPA/%30GF kompozitinde en düşük sürtünme katsayısı elde edilmiştir. Artan yük ve kayma hızı etkisi altında PPA polimeri ile PPA/%30GF kompozitlerin spesifik aşınma oranları artmıştır. PPA polimerine ilave edilen %30 oranındaki cam elyaf kompozitin spesifik aşınma oranını yaklaşık olarak en az 5 kat azalmasına sebep olmuştur. Cam elyaf takviyeli kompozit kullanımı katkısız PPA polimerine göre en az 5 kat çalışma ömrünü artıracığı tespit edilmiştir. PPA polimerinde adhezif aşınma mekanizması gözlenirken cam elyaf takviyeli PPA kompozitinde cam elyaflardan dolayı abrazif aşınma mekanizması gözlenmiştir.

Teşekkür

Bu çalışma Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından desteklenmiştir (Proje No: 2013-50-01-006).

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan eder.

Kaynakça

- Cao L., Shuling D., Ziqin H., Zhidan L., Mingqing L., Peng Z., Wei L. Effects of carbon nanotube on mechanical, crystallization, and electrical properties of binary blends of poly(phenylene sulfide) and polyphthalamide. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 2016; 125: 927-934.
- Carmona-Cervantes IA., Paredes-Mogica EA., Lopez-Cabrera HR., Figueroa-Lopez U., Vieyra-Ruiz H., Guevara-Morales A. Tribological behavior of glass fiber reinforced polyamide (PA-GF) and recycled polyvinyl butyral (r-PVB) blends. *Materials Letters* 2022; 319: 132261.
- Chen YK., Modi OP., Mhay AS., Chrysanthou A., O’Sullivan JM. The effect of different metallic counterface materials and different surface treatments on the wear and friction of polyamide 66 and its composite in rolling-sliding contact. *Wear* 2003; 255: 714-721.
- Djukic S., Anthony B., Jerome B., Didier RL. Mechanical properties of amorphous and semi-crystalline semi-aromatic polyamides. *Heliyon* 2020; 6: 03857.
- Feyzullahoglu E., Saffak Z. The tribological behaviour of different engineering plastics under dry friction conditions. *Materials and Design* 2008; 29: 205–211.
- Fıçıcı F., Ayparcası Z., Unal H. Influence of cutting tool and conditions on machinability aspects of polyphthalamide (PPA) matrix composite materials with 30 % glass fiber reinforced. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2017; 90: 3067-3073.
- Glenn PD. Characterization and properties of polyphthalamide/polyamide blends and polyphthalamide/polyamide/polyolefin blends. *Journal of Vinyl & Additive Technology* 1996; 2(3): 229-234.
- Gomez-Mares M., Arroyo-Ortega G., Martinez-Ortega ME., Reyes-Blas H., Hernandez-Paz JF., Marquez-Marquez C. Study of the effects of FAM B (test fuel) on the mechanical properties of an automotive polymer from the polyamide family (PA). *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology* 2015; 42(2): 61-66.
- Gratzl T., Van Dijk Y., Schramm N., Kroll L. Influence of the automotive paint shop on mechanical properties of continuous fibre-reinforced thermoplastics. *Composite Structures* 2019; 208: 557-565

- Gyorgy C., Anna S., Dora J. Effect of different fillers on thermal conductivity, tribological properties of Polyamide 6. *Scientific Reports* 2023; 13; 845
- Hatipoğlu G. Poli-tetra-flor-etilen katkılı poli-fital-amid polimer karışımlarının mekanik ve tribolojik özelliklerinin incelenmesi. *Academic Platform Journal of Engineering and Smart Systems* 2014; II-III: 09-14.
- <http://www.hxgcs.com/en/product/288.html> (Erişim 03.03.2023)
- <https://www.stagnoligears.com/en/motor-gears/polyamide-ppa/> (Erişim 03.03.2023).
- Jozwik J., Krzysztof D., Marcin B., Mykhaylo P. Analysis and comparative assessment of basic tribological properties of selected polymer composites. *Materials* 2020; 13: 75.
- Kamlendra V., Shubrajit B., Sumit P. Effect of graphite on tribological and mechanical properties of PA6/5GF composites. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 2023; 148: 3341–3355.
- Kim JW., Jang H., Kim JWO. Friction and wear of monolithic and glass-fiber reinforced PA66 in humid conditions. *Wear* 2014; 309: 82-88.
- Kumar SS., Kanagaraj G. Investigation on mechanical and tribological behaviors of PA6 and graphite-reinforced PA6 polymer composites. *Arabian Journal for Science and Engineering* 2016; 41: 4347-4357.
- Li J., Xia YC. The friction and wear properties of thermoplastic PA6 composites filled with carbon fiber. *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 2010; 23: 337-349.
- Luo W., Liu Q., Li Y., Zhou S., Zou H., Mei L. Enhanced mechanical and tribological properties in polyphenylene sulfide/polytetrafluoroethylene composites reinforced by short carbon fiber. *Composites Part B: Engineering* 2016; 91: 579-588.
- Mateo G de G., Manjusri M., Amar KM. Polyphthalamide polymers: A review on synthesis, properties, and advance manufacturing and emerging applications. *Journal of Applied Polymer Science* 2022; 139: 52965.
- Mateo G de G., Manjusri M., Arturo RU., Amar KM. Insights on the structure-performance relationship of polyphthalamide (PPA) composites reinforced with high-temperature produced biocarbon. *RSC Advances - The Royal Society of Chemistry* 2020; 10: 26917.
- Mateo G de G., Manjusri M., Stefano G., Amar KM. Statistical Design of Biocarbon Reinforced Sustainable Composites from Blends of Polyphthalamide (PPA) and Polyamide 4,10 (PA410). *Molecules* 2021; 26: 5387.
- Meng H., Sui GX., Xie GY., Yang R. Friction and wear behavior of carbon nanotubes reinforced polyamide6 composites under dry sliding and water lubricated condition. *Composites Science and Technology* 2009; 69: 606-611.
- Mimaroglu A., Unal H., Yetgin SH. Tribological properties of nanoclay reinforced polyamide-6/polypropylene blend. *Macromolecular Symposia* 2018; 379: 1700022.
- Myshkin NK., Pesetskii SS., Grigoriev AY. Polymer tribology: currentstate and applications. *Tribology in Industry* 2015; 37: 284-290.

- Neis PD., Ferreira NF., Poletto JC., Sukumaran J., Andó M., Zhang Y. Tribological behavior of polyamide-6 plastics and their potential use in industrial applications. *Wear* 2017; 376-377: 1391-1398.
- Pogacnik A., Kupec A., Kalin M. Tribological properties of polyamide (PA6) in self-mated contacts and against steel as a stationary and moving body. *Wear* 2017; 378-379: 17-26.
- Sandro DM., Antidio de OSN., Maria Odila HC, Eduardo CB. Replacement of metallic parts for polymer composite materials in motorcycle oil pumps. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 2017; 36(2): 149-160.
- Srinath G., Gnanamoorthy R. Effect of short fibre reinforcement on the friction and wear behaviour of nylon 66. *Applied Composite Materials* 2005; 12: 369-383
- Stachowiak GW., Batchelor AW. *Wear of non-metallic materials*. In *Engineering Tribology Third Ed.* Burlington: Elsevier Butterworth-Heinemann 2006; 651-704.
- Takayuki O., Yosuke N. Influence of Addition of PTFE on the Tribological Properties of CF Reinforced Plant-Derived Semi-Aromatic Polyamide (PA10T) Biomass Composites. *AIP Conference Proceedings* 2019; 2065: 040008.
- Takenaka Y., Nishitani Y., Kitano T. Tribological properties of PTFE filled plants-derived semi-aromatic polyamide (PA10T) and GF reinforced PTFE/PA10T composites. *AIP Conference Proceedings* 2015; 1664(1): 060009.
- Unal H., Gizem H., Yetgin SH. Poli-Fital-Amid (PPA) Polimerinin tribolojik özelliklerine karbon fiber ve kayma hızının etkisinin incelenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi* 2016; 4: 167-175.
- Unal H., Mimaroglu A., Serdar V. Dry sliding performance of thermoplastics against reinforced unsaturated polyester (BMC): In use in electrical contact breakers components. *Wear* 2006; 841-847.
- Unal H., Mimaroglu A. Friction and wear behaviour of unfilled engineering thermoplastics. *Materials and Design* 2003; 24: 183-187.
- Unal H., Sen U., Mimaroglu A. Dry sliding wear characteristics of some industrial polymers against steel counterface. *Tribology International* 2004; 37: 727-732.
- Yi-Lan Y., Du-Xin L., Gao-Jie S., Ruo-Yun L., Xin D. Improvement in the tribological properties of polyamide 6: Talc, glass fiber, graphite, and ultrahigh-molecular-weight polyethylene. *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 2016; 29(4): 494-507.
- Zhou S., Huang J., Zhang Q. Mechanical and tribological properties of poly-amide-based composites modified by thermoplastic polyurethane. *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 2014; 27: 8-34.
- Zhou S., Qiaoxin Z., Chaoqun W., Jin H. Effect of carbon fiber reinforcement on the mechanical and tribological properties of polyamide6/polyphenylene sulfide composites. *Materials & Design* 2013; 44: 493-499.