

## Poli-fenilen-Sülfid Polimer Kompozitine Karşı Poliamit-6 Polimeri ile Mika ve Cam Elyaf Takviyeli Poliamit-6 Polimer Kompozitlerin Sürtünme ve Aşınma Davranışları

*Friction and Wear Behavior of Polyamide-6 Polymer and Mica and Glass Fiber Reinforced Polyamide-6 Polymer Composites against Poly-phenylene-Sulfide Polymer Composite*

Hüseyin ÜNAL<sup>1</sup> , Salih Hakan YETGİN<sup>2</sup> , Mustafa GÜLEŞEN<sup>3</sup> 

<sup>1</sup> Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malz. Müh. Böl., Sakarya, Türkiye

<sup>2</sup>Tarsus Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Tarsus/Mersin, Türkiye

<sup>3</sup>Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kütahya, Türkiye

### Öz

Bu çalışmada, katkısız Poliamit (PA6) polimeri ile ağırlık olarak %20 oranında mika katkılı Poliamit 6 (PA6/20M) ve %20 oranında mika/%10 oranında cam elyaf (CE) katkılı Poliamit 6 (PA6/20M/10CE) kompozitlerin tribolojik özellikleri incelenmiştir. PA6/20M ve PA6/20M/10CE kompozit granül üretimi için önce çift vidalı endüstriyel tip bir ekstruder kullanılmıştır. Test numunelerinin üretimi için ise geleneksel bir enjeksiyon makinası kullanılmıştır. Aşınma ve sürtünme testleri kuru ortam şartları altında %40 kısa cam elyaf takviyeli Poli-fenilen-Sülfid (PPS/40CE) polimer kompozit diskinde karşı yapılmıştır. Aşınma deneyleri ASTM G99 standardına uygun olarak pim-disk aşınma test cihazı kullanılarak oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Triboloji deneylerinde üç farklı yük (10-20-30 N) ve 0.5 m/s sabit kayma hızı kullanılmıştır. Çalışma şartları altındaki malzemelerin sürtünme katsayısı ve aşınma hacmi değişimi belirlenmiştir. Çalışma sonucunda uygulanan yükün artırılması ile katkısız PA6 polimeri ile PA6/20M ve PA6/20M/10CE kompozitlerin sürtünme katsayıları sırasıyla %25,2, %29,6 ve %15,2 oranlarında artış göstermiştir. PA6 polimerine ilave edilen %20 oranındaki mika katkısı sürtünme katsayısını %33,0 oranında artırmıştır. PA6/20M kompozitine ilave edilen %10 oranındaki cam elyaf ise sürtünme katsayısını %86,1 oranında azaltmıştır. Uygulanan yükün artırılması ile katkısız PA6 polimerinin aşınma hacmi %200 oranında artarken PA6/20M kompozitinde %291,3 oranında artmıştır. Buna ilaveten PA6/20M/10CE hibrit kompoziti aşınma hacmi ise %371,4 oranında artmıştır. Deneyler sonucunda en az aşınma hacmi diğer kombinasyonlarla kıyaslandığında minimum %20 oranında PA6/20M-10CE/PPS-40CE kombinasyonunda elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Poliamit, Poli-fenilen sülfid, Aşınma, Sürtünme, Cam elyaf, Mika

### Abstract

In this study, the tribological properties of Polyamide 6 (PA6/20M) and Polyamide 6 (PA6/20M/10CE) composites with 20% by weight mica filled and 20% mica/10% glass fiber (CE) reinforced, respectively, were investigated. For the production of PA6/20M and PA6/20M/10CE composite granules, a twin screw industrial type extruder was first used. A conventional injection molding machine was used to produce the test specimens. Friction and wear tests were carried out against a 40% short glass fiber reinforced Poly-phenylene-Sulfide (PPS/40CE) polymer composite disk under dry conditions. Wear tests were carried out at room temperature using a pin-disc wear test rig in accordance with ASTM G99 standard. Three different loads (10-20-30 N) and a constant sliding speed of 0.5 m/s were used in the tribology experiments. The coefficient of friction and wear volume changes of the materials under the operating conditions were determined. As a result, with the increase in applied load, the friction coefficients of unfilled PA6 polymer and PA6/20M and PA6/20M/10CE composites increased by 25.2%, 29.6% and 15.2%, respectively. The addition of 20% mica to PA6 polymer increased the coefficient of friction by 33.0%. The addition of 10% glass fiber to PA6/20M composite decreased the coefficient of friction by 86.1%. By increasing the applied load, the wear volume of the unfilled PA6 polymer increased by 200% while that of the PA6/20M composite increased by 291.3%. In addition, the wear volume of PA6/20M/10CE hybrid composite increased by 371.4%. As a result, the lowest wear volume was obtained in the PA6/20M-10CE/PPS-40CE combination with a minimum of 20% compared to other combinations.

**Keywords:** Polyamide, poly-phenylene sulfide, Wear, Friction, Glass fiber, Mica

## I. GİRİŞ

Poliamit 6 (PA6) ve PA6 esaslı kompozitlerin kullanımı, elektrik/elektronik, havacılık, otomotiv ve kimya gibi endüstrilerde son yıllarda giderek artmaktadır. Bunun sebebi; PA6 polimerinin geleneksel malzemeler ile karşılaştırıldığında yüksek dayanım/ağırlık oranına, kendinden yağlamalı özelliğe, iyi sönümleme davranışına, korozyon direncine, UV ve gama radyasyon direncine sahip olması ve ayrıca kolay ve ekonomik bir şekilde üretilebilmesidir. Fakat, katkısız PA6 polimerinin mekanik özellikler seviyesinde sınırlı kalması, düşük ısı sapma sıcaklığı, yüksek su emme ve ölçüsel kararsızlığı kullanım alanlarını sınırlamaktadır. Yüksek sıcaklıklarda düşük mekanik özelliklere sahip olması, daha düşük termal iletkenlik ve daha yüksek termal genleşme katsayısına sahip olmaları poliamit polimerini sıcaklık değişimlerine çok daha hassas hale getirmektedir. Bu zorluğun üstesinden gelmek için birçok araştırmacı takviye edici katkı malzemeleri kullanarak PA6 polimerinin özelliklerini geliştirme çalışmaları yapmıştır. Polimer malzemelerin gerek mekanik, fiziksel veya termal özelliklerini geliştirmek gerekse tribolojik özelliklerini iyileştirmek için matris bünyesine takviye, dolgu ve katkı malzemeleri ilave edilebilmektedir [1-6]. Bu malzemelerin içerisinde cam elyaf (CE), diğer elyaf türlerine göre düşük maliyetli olması, üstün kimyasal dirence ve yüksek yalıtım özelliklerine sahip olmaması ve ayrıca kolay şekillendirme ve temin edilebilirlik gibi özellikleriyle en çok kullanılan ve tercih edilen elyaf türüdür [4-5, 7]. Nuruzzaman ve arkadaşları [8] farklı oranlarda (%5-20) CE takviyeli PA6 kompozitlerin mekanik özelliklerine CE takviye oranının etkisini incelemişlerdir. CE oranının artması ile kompozit malzemenin çekme mukavemeti, akma mukavemeti ve çekmedeki elastiklik modülü değerlerinin arttığı ancak kopmadaki uzama değerinin azaldığı belirtilmiştir. Darbe enerjisi miktarının ise CE miktarına bağlı olarak değiştiği, %15 CE takviye oranından daha yüksek CE oranlarında darbe enerjisinin arttığı belirtilmiştir. Zaldua ve arkadaşları [9] karbon elyaf (KE) ve CE takviyeli PA6 kompozit numunelerde CE ve KE oranının çekme mukavemeti ve çekmedeki elastiklik modülü değerlerini önemli oranda geliştirdikleri belirtilmiştir. Mariusz ve arkadaşları [4] %25 ve %30 oranlarında CE takviyeli PA6 ve PA66 kompozitlerin tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Moustafa Mahmoud ve arkadaşları [5] da hacimsel olarak %25, 33 ve 50 oranlarında CE takviyeli PA6 kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerini inceledikleri çalışma sonucunda, fiber oranına bağlı olarak mekanik özelliklerin geliştiği ancak aşınma miktarının ise fiber oranı ile ters orantılı olduğu belirtilmiştir. %33 CE takviye oranının aşınma direnci için optimum katkı miktarı olduğu ve aşınma oranının, PA6/25CE ve PA6/50CE kompozitlere göre yaklaşık %50,2 ve %65,59 oranlarında daha düşük olduğu belirtilmiştir.

Mika ise plaka benzeri kristal yapısı ile üstün mekanik ve termal özellikler, yüksek elektriksel yalıtım özellikleri ile polimer malzemelerden daha ucuz olması nedeniyle polimer kompozit malzeme üretiminde katkı malzemesi olarak en çok tercih edilen minerallerden birisidir [2, 10-14]. Suryasarathi ve arkadaşları [15] artan mika miktarı ile PA6 kompozitlerin çekme mukavemeti, eğme mukavemeti, çekme ve eğmedeki elastiklik modülü değerlerinin arttığını, % uzama ve darbe mukavemeti değerlerinin azaldığını belirtmişlerdir. Çalışmada ayrıca mekanik özelliklerin gelişmesinde mika partikül boyutunun önemli olduğu da belirtilmiştir. Lubomir ve arkadaşları [11] vollastonit ve mika katkılı yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Mika/YYPE kompozitlerin çekmedeki elastiklik modülü ve akma dayanımı değerleri artarken kopmadaki % uzama ve kırılma tokluğu değerlerinin azaldığını belirtmişlerdir. Termal özellikler açısından mika katkısının ergime sıcaklığını yaklaşık 3 oC azaltırken kristalleme oranını yaklaşık %30,2 oranında artırdığı belirtilmiştir. Ünal ve Mimaroglu [16] ağırlıkça %10, %20 ve %30 oranlarında mika katkılı ve CE takviyeli PA6 kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Polimer anan matrise mika ve CE ilavesi ile kompozitin çekme ve eğmedeki elastiklik modüllerinin arttığını gözlemlemişlerdir. Mika ilavesi ile PA kompozitlerin mekanik özelliklerinde pek değişikliğin olmadığı belirtilmiştir. Bununla birlikte, mika katkı oranının artması sonucunda darbe mukavemeti ve % uzama değerlerinin azaldığı belirtilmiştir. Gan ve arkadaşları [17] poli-aril-eterketon (PAEK) polimerine farklı oranlarda (ağırlıkça %0-40) ilave ettikleri mika katkısının mekanik ve tribolojik özelliklere etkisini incelemişlerdir. Mika katkı oranına bağlı olarak çekme mukavemeti ve çekmedeki elastiklik modülü değerlerinin arttığı % uzama değerinin ise azaldığı belirtilmiştir. Triboloji çalışmaları sonucunda sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerlerinin yük ile birlikte arttığı gözlenmiştir. %20 mika oranından daha yüksek katkı oranlarında sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerleri artmıştır.

Polimer malzemelerin tribolojik özellikleri oldukça karmaşık görünmekle birlikte polimer malzeme özelliklerine, karşı yüzey malzeme özelliklerine, matris malzemesine ilave edilen katkı maddesi çeşidine ve oranına, aynı zamanda uygulanan yük, kayma hızı, kayma mesafesi ve ortam şartlarına gibi proses şartlarına da bağlıdır. Polimer malzeme ve kompozitlerin çalışma ömrünün artırılması için çalışma şartlarına uygun doğru kurgulanmış malzeme çiftinin seçilmesi oldukça önemlidir. Triboloji çalışmalarında sürtünme katsayısının azaltılması ve aşınmaya direncinin artırılması için en uygun polimer-polimer veya polimer-metal malzeme kombinasyonunun seçilmesi gerekir. Pogacnik ve arkadaşları [18] çelik disk ve PA6 diske karşı PA6 polimerinin farklı yük ve

hızlar altındaki tribolojik özelliklerini incelemiştir. Çalışmalarında PA6 pim/PA6 disk temasında, temas noktasında oluşan ısının uzaklaştırılmaması nedeniyle daha kötü tribolojik özelliklerin elde edildiği ifade edilmiştir. PA6 pim/PA6 disk temasındaki başlangıç aşamasının (running-in period), PA6 pim/çelik disk temasına göre yaklaşık 30 kat daha uzun olduğu belirtilmiştir. PA6 pim/Çelik disk temasında, yüksek PV (pressure x velocity) değerlerinde sürtünme katsayısı, aşınma oranı ve aşınma mekanizmasında ihmal edilebilir seviyede değişiklikler gözlemlendiği belirtilmiştir. Ünal ve arkadaşları [19] kuru ortam şartları altında, 0,5 m/s kayma hızında, 0,7, 1,41 ve 2,12 MPa basınç altında pim-disk sistemi ile %30 CE takviyeli Poli-eter-eterketon (PEEK) kompozitlerin aşınma ve sürtünme özelliklerini incelemişler ve PEEK/30CE pim numunesinin, PEI/10%PTFE disk numunesi ile çalıştığı en iyi aşınma ve sürtünme özellikleri sergilediğini belirtmişlerdir. Ünal ve arkadaşları [2] yaptıkları bir başka çalışmada, PA6 polimerine ilave ettikleri mika katkısının (%0-30 oranlarındaki) aşınma ve sürtünme özelliklerini, kuru ortam şartları altında, %30 oranında mika katkılı PA6 polimer kompozit ve %30 oranında CE takviye edilmiş PA6 polimer kompozit disklere karşı incelemiştir. Çalışma sonucunda, her iki polimer kompozit disklere karşı yapılan deneylerde mika katkı oranının artması ile aşınma oranının ve sürtünme katsayısının arttığı belirtilmiştir. Uygulanan yükün artması sonucunda PA6/Mika kompozitlerin aşınma oranı ve sürtünme katsayısı değerlerinin de arttığı belirtilmiştir. Demir [20] PA6/%20Mika ve Poli-sülfon (PSU)/%20CE kompozitlerin, AISI 316L paslanmaz çelik disk ve %30 CE takviyeli poli-fenilen-sülfite (PPS/30CE) polimer diske karşı kuru ortam şartları altında tribolojik özelliklerini incelemiştir. Deneyler 10, 20 ve 30 N yük ve 0,5 m/s kayma hızında yapılmıştır. PA6/%20Mika ve PSU/%20CE kompozitlerin, paslanmaz çelik diske karşı çalışması durumunda aşınma oranının ve sürtünme katsayısının azaldığını, PPS/30CE diske karşı çalışması durumunda ise aşınma oranı değerlerinin arttığı sürtünme katsayısının pek değişmediği bildirilmiştir. Çalışma sonucunda, sürtünme katsayısının malzeme kombinasyonu ile oldukça önemli olduğu belirtilmiştir.

Bu çalışmada, katkısız Poliamit (PA6) polimeri ile ağırlık olarak %20 oranında mika katkılı Poliamit 6 (PA6/20M) ve %20 oranında mika/%10 oranında cam elyaf katkılı Poliamit 6 (PA6/20M/10CE) kompozitlerin tribolojik özellikleri incelenmiştir. Çalışmada literatürden farklı olarak PA6 polimer kompozitlerin yüksek performanslı mühendislik polimerleri grubunda yer alan ve yüksek sıcaklıklara dirençli Poli-fenilen-sülfite (PPS) kompozit diskinde karşı tribolojik özellikleri incelenmiştir. Aynı zamanda, polimer matris bünyesine ilave edilen CE ve

mika gibi farklı özelliklere sahip katkı malzemelerinin aşınma hacmi ve sürtünme katsayısı gibi özelliklere etkisi de incelenmiştir.

## II. MATERYAL VE METOD

### 2.1. Malzeme

Bu çalışmada kullanılan ana matris polimer malzemeler katkısız halde iken bile yüksek performans özelliklerine sahip oldukları için seçilmiştir. Bu çalışmada, Domamid ticari kodlu Domopolymer firmasından temin edilen 1.13 g/cm<sup>3</sup> yoğunluğa sahip yüksek mukavemet ve tokluğa sahip mühendislik polimeri olan poliamit 6 (PA6) polimeri matris malzemesi olarak temin edilmiştir. Katkı malzemesi olarak kullanılan mika, elektriksel yalıtkanlığı yüksek olan bir katkı malzemesidir. Mika, 2,7 g/cm<sup>3</sup> yoğunluklu olup ortalama partikül büyüklüğü 10 mm olup Omya Madencilik firmasından temin edilmiştir. Cam elyaf ise polimerlerde mukavemet artırıcı özelliği olan bir katkıdır. Cam elyaf yüzeyleri üretici firma tarafından amino silan ile kaplanmıştır. Cam elyaflar, 10,5 µm çapında ortalama 3-4.5 mm uzunluğunda kısa cam elyaf olup Cam Elyaf Sanayi/Gebze firmasından temin edilmiştir. %40 cam elyaf takviyeli Poli-fenilen-Sülfite (PPS) kompoziti yüksek sıcaklıklara dayanıklı mühendislik polimerleri sınıfında yer almaktadır. PPS kompoziti, 1,66 g/cm<sup>3</sup> yoğunluklu olup Ryton PPS ticari adıyla Solvay firmasından temin edilmiştir.

### 2.2. Malzeme Üretimi

Mika/Cam elyaf/PA6 kompozit granül üretimleri NR-II-75 tip çift vidalı Werner Pflaederer marka bir compound makinasında gerçekleştirilmiştir. PA6/cam elyaf granülleri enjeksiyonla şekillendirme öncesinde 80 °C etüvde 4 saat süresince kurutulmuştur. Deney numuneleri 180 bar enjeksiyon basıncında ve 225-245 °C ısıtıcı sıcaklık aralığında ERAT marka bir enjeksiyon makinasında üretilmiştir. Aşınma deneyleri, disk üzerinde pim olacak şekilde dizayn edilmiş bir aşınma cihazında ASTM G99 standardına uygun olarak kuru ortam şartlarında gerçekleştirilmiştir. Tribolojik testlerde, karşı disk olarak %40 cam elyaf takviyeli Poli-fenilen-Sülfite (PPS) kompoziti kullanılmıştır. PPS disk malzemesi enjeksiyonla kalıplama tekniği ile 5 mm kalınlığında ve 100 mm çapında özel olarak dizayn edilmiş bir enjeksiyon kalıbında basılmıştır. PPS kompozit deney numuneleri 200 bar enjeksiyon basıncında ve 300-340 °C ısıtıcı sıcaklık aralığında yine ERAT marka enjeksiyon makinasında basılmıştır. Kalıp sıcaklığı ortalama 40 °C olup enjeksiyonla kalıplama esnasında kalıp ısıtıcısı kullanılmamıştır. PA6/20M ve PA6/20M/10CE kompozitler hem mukavemet hem de elektriksel yalıtkanlık özellikleri ve kullanılma alanı dikkate alınarak üretilmişlerdir.

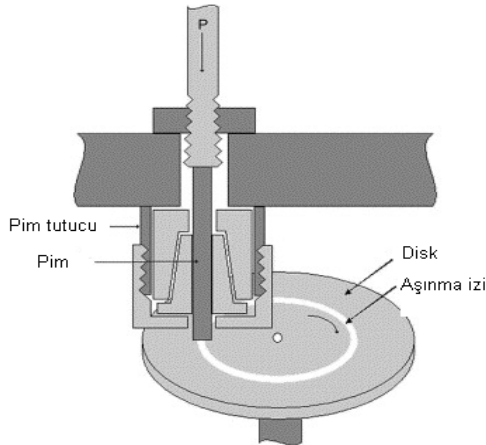
### 2.3. Aşınma Testleri

Her bir aşınma deneyi öncesi numune pim ağırlığı ( $m_1$ ) ve sonrası pim ağırlığı ( $m_2$ ) ölçülmüş ve ağırlık kaybı  $\Delta m$  yani ( $m_1 - m_2$ ) tespit edilmiştir. Aşınma hacmi ( $V_i$ ) ise Eşitlik (1)'de verilen formül ile hesaplanmıştır. Formülde,  $\rho$ ; malzemenin yoğunluğu ( $g/cm^3$ )'dur.

$$V_i = \frac{\Delta m}{\rho} \text{ mm}^3 \quad (1)$$

Deneylerde kullanılan pim numuneleri ile karşı PPS polimer kompozit disk arasındaki sürtünme katsayısı ( $\mu$ ), yanal kuvvetin normal kuvvete oranıdır ve Eşitlik (2)'de verilen formül ile hesaplanmıştır. Formülde  $\mu$ : sürtünme katsayısını,  $F_s$ : sürtünme kuvvetini (N) ve  $F_n$  ise normal kuvveti (N) göstermektedir. Aşınma deneyleri öncesinde numune ve disk yüzeyleri 1200 nolu zımpara ile düzeltilmiş ve yüzeyler sonrasında aseton ile temizlenmiştir. Pim-disk test cihazı için şematik resim Şekil 1'de gösterilmiştir [21]. Tablo 1'de ise aşınma testi için deney şartları verilmiştir.

$$\mu = F_s / F_n \quad (2)$$



Şekil 1. Pim-disk aşınma test cihazı şematik gösterimi [21]

Tablo 1. Aşınma testleri için deney şartları

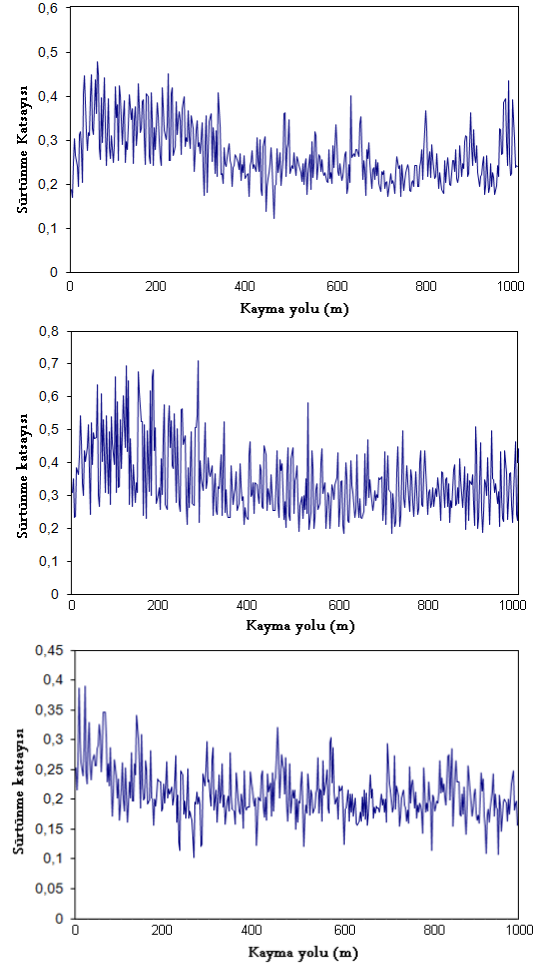
Parametreler	Deney şartları
Kayma hızı (m/s)	0.50
Yük (N)	10, 20, 30
Kayma mesafesi (m)	1000
Sıcaklık (°C)	22±2
Karşı disk malzemesi	%40 cam elyaf takviyeli Poli-fenilen-sülfid (PPS)

## III. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

### 3.1. Sürtünme Katsayısı-Kayma Yolu İlişkisi

Mika ve cam elyaf katkıların PA6 esaslı polimer kompozitlerin tribolojik özellikleri üzerine etkisini araştırmak için aşınma deneyleri yapılmıştır. Deneylerde kayma süresi boyunca malzemelerin sürtünme katsayısı değerleri belirlenmiştir. PA6 polimeri ile PA6/20M ve PA6/20M/10CE

kompozitlerin 0,5 m/s kayma hızındaki ve 10 N yük altındaki sürtünme katsayısı değişimleri kayma mesafesine bağlı olarak Şekil 2 a-c'de verilmiştir. Şekillerde görüldüğü gibi PA6 kompozitlerin sürtünme katsayısındaki değişimler mika katkı ve CE mukavemet artırıcı katkıya bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 2. Sürtünme katsayısı-kayma yolu grafiği  
a) PA6 polimer, b) PA6/20M kompozit,  
c) PA6/20M/10CE hibrit kompozit (Yük:10 N, Kayma hızı:0,5 m/s)

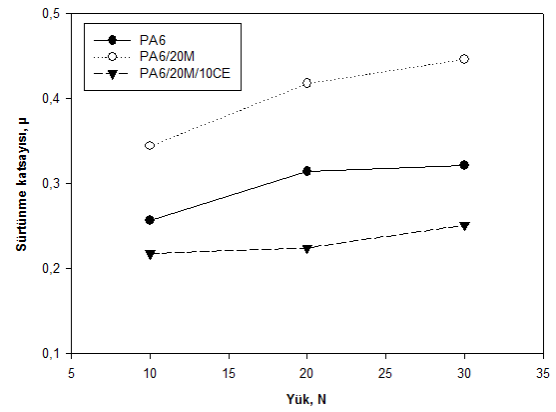
Gerek katkısız PA6 gerekse mikave ve CE katkılı PA6 kompozitlerin kayma mesafesine bağlı olarak sürtünme katsayısındaki değişim eğiliminin benzer olduğu görülmektedir. Yani, sürtünme katsayısı, kaymanın ilk aşamasında hızlı bir şekilde artmakta ve ardından kayma süresi boyunca kararlı olma eğilimine geçmektedir. Yapılan çalışmalarda, kararlı sürtünme aşamasından önce geometrik etki, deformasyon (yumuşama ve plastikleşme) ve malzeme transferi gibi sebeplerle başlangıç aşamasının oluştuğu belirtilmiştir [22-23]. Sürtünme katsayısının kaymanın ilk aşamasında hızlı bir şekilde yükselmesinin nedeni, karşı disk yüzeyinin pürüzlü olması ve pürüzlerin kayma süresince çok fazla oranda mikropulluklanmaya neden olmasıdır. Sürtünme süreci devam ederken, kararlı sürtünme durumuna gelmekte ve sürtünme katsayısı hemen hemen sabit

bir seviyede kalmaktadır. PA6 polimeri ile PA6/20M kompoziti yaklaşık olarak 300 m kayma yolu civarında sabit seviyeye ulaşırken PA6/20M/10CE hibrit kompoziti yaklaşık olarak 200 m kayma yolu civarında ulaşmıştır. Şekillerde görüldüğü gibi PA6 polimerine ilave edilen %20 oranındaki mika sürtünme katsayısını artırırken PA6/20M kompozitine ilave edilen %10 oranındaki cam elyaf sürtünme katsayısını azaltmıştır. Bunun sebebi ise karşı disk yüzeyinde oluşan transfer film tabakası ile açıklanabilir [24-25]. Chukov ve arkadaşları [26] yaptıkları çalışma sonucunda da ÇYMAPE polimerinin kararlı hal aşamasının başlangıç aşamasına göre daha düşük sürtünme katsayısı elde edilmesinin sebebinin transfer film tabakası oluşumu ile açıklanmıştır.

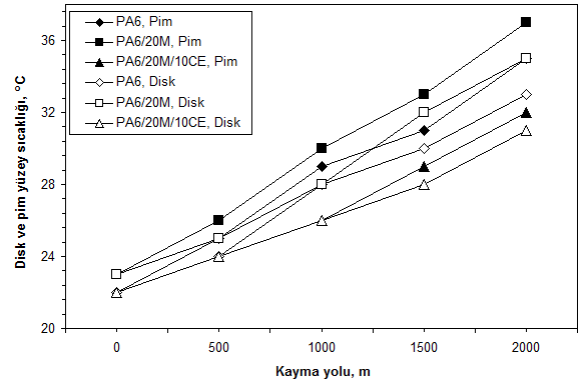
### 3.2. Sürtünme Katsayısı-Yük İlişkisi

Şekil 3'te PA6 polimeri ile PA6/20M kompozit ve PA6/20M/10CE hibrit kompozitin uygulanan yüke bağlı olarak %40 cam elyaf takviyeli PPS polimer kompozit diske karşı sürtünme katsayılarındaki değişim verilmiştir. Yapılan çalışmalarda her bir noktadaki hata payının yaklaşık olarak %4-6 aralığında olduğu gözlenmiştir. Şekilde görüldüğü gibi en yüksek sürtünme katsayısı PA6/20M kompozitinde daha sonra PA 6 polimerinde en düşük sürtünme katsayısı ise PA6/20M/10CE hibrit kompozitinde elde edilmiştir. Buna ilaveten uygulanan yükün artırılması ile deneylerde kullanılan tüm malzemelerin sürtünme katsayısının arttığı belirlenmiştir. Katkısız PA6 polimeri için uygulanan yük değerinin 10 N'dan 30 N'a artırılması ile sürtünme katsayısı %25,2 oranında artmıştır. PA6/20M kompoziti için sürtünme katsayısındaki değişim %29,6 oranında elde edilirken PA6/20M/10CE hibrit kompoziti için bu oran %15,2 oranında artış yönünde elde edilmiştir. Yi-Lan ve arkadaşları [25] tarafından yapılan çalışmada artan yük ile sürtünme katsayısının artmasının sebebi olarak fiberlerin yüksek yüklerde kırılarak abrasif aşınma mekanizmasının daha baskın hale geldiği ve gerçek temas alanının arttığını belirtmişlerdir. PA6 polimeri ilave edilen %20 oranındaki mika katkısı sürtünme katsayısını artırmıştır. Bu artış yüke bağlı olarak değişiklik göstermiş ve sabit 20 N yük altında, PA6/20M kompozitine ilave edilen %10 oranındaki CE ise sürtünme katsayısını %86,1 oranında azaltmıştır. PA6/20M/10CE hibrit kompozitin sürtünme katsayısı katkısız PA6 polimerinin sürtünme katsayısı ile karşılaştırıldığında ise sürtünme katsayısı %39,9 oranında azalmıştır. Bilindiği gibi, polimer kompozit yapısında mevcut olan fiberler, kısmi basıncı paylaşarak gerçek temas alanının azalmasına katkı sağlarlar ve dolayısıyla daha düşük sürtünme katsayısı ve daha düşük aşınma oranı elde edilmektedir [25]. Cam elyaf takviyesi ile tribolojik özelliklerin gelişmesinin bir sebebi olarak kompozitin yüksek mekanik özellikleri ve yumuşak olan PA6 polimerinin deformasyonunun engellenmesi olarak açıklanmıştır [27]. Şekil 4'de PA6 polimeri ile

PA6/20M kompozit ve PA6/20M/10CE hibrit kompozitin 30N yük altında kayma yoluna bağlı olarak %40 cam elyaf takviyeli PPS polimer kompozit diske karşı çalışması durumundaki pim ve disk malzemelerin yüzey sıcaklıklarının değişimi verilmiştir. Şekil incelendiğinde deneylerde kullanılan malzemelerin temas halindeki pimve disk yüzey sıcaklıklarının sırasıyla maksimum 35 °C' ve 37 °C' yi geçmediği gözlenmiştir. Bu ise saf PA 6 polimeri camı geçiş sıcaklığı ( $T_g=55$  °C) [28] ile saf PPS polimerinin camı geçiş sıcaklığının ( $T_g=85$  °C) [29] çok altında kaldığını göstermektedir. Yani aşınma deneylerinde pim ve disk temas noktalarında oluşan sıcaklığın polimerin yumuşamasına ve aşınmayı artırmasına etkisi olmadığı düşünülmektedir.



Şekil 3. PA6 polimer, PA6/20M kompoziti ve PA6/20M/10CE hibrit kompozitin PPS polimer kompozit diske karşı sürtünme katsayısı-yol ilişkisi

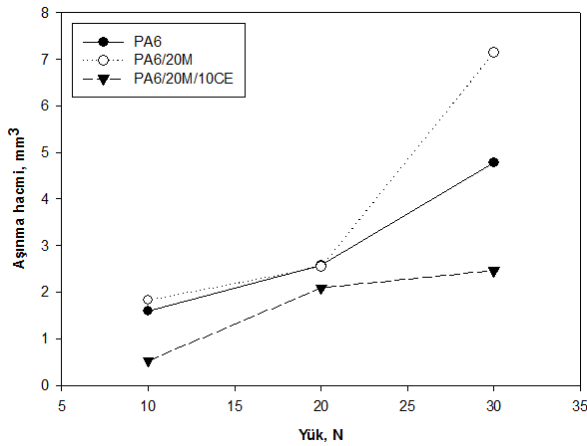


Şekil 4. PA6, PA6/20M kompoziti ve PA6/20M/10CE hibrit kompozitin PPS polimer kompozit diske karşı çalışması durumundaki pim ve disk yüzey sıcaklıklarının değişimi (Yük:30N, Hız:0.5 m/s)

### 3.3. Aşınma Hacmi-Yük İlişkisi

Şekil 5'te PA6 polimeri ile PA6/20M kompozit ve PA6/20M/10CE hibrit kompozitin uygulanan yüke bağlı olarak aşınma hacmi değişimleri verilmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda her bir noktanın hata payı yaklaşık olarak %3 civarında olduğu tespit edilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi uygulanan yükün artması ile aşınma hacminin önemli oranda arttığı belirlenmiştir. Katkısız PA6 polimeri için uygulanan

yük değerinin %200 oranında artırılması ile aşınma hacmi %200 oranında artmıştır. PA6/20M kompoziti için aşınma hacmindeki artış %291,3 oranında elde edilirken PA6/20M/10CE hibrit kompoziti için bu oran %371,4 oranında elde edilmiştir. PA6 polimeri ilave edilen %20 oranındaki mika katkısı düşük yüklerde aşınma hacmini pek etkilemezken 30 N yük altında aşınma hacmi % 49,4 oranında artmıştır. PA6/20M kompozitine ilave edilen %10 oranındaki cam elyaf ise aşınma hacmini %190 oranında azaltmıştır. PA6/20M/10CE hibrit kompozitin aşınma hacmi katkısız PA6 polimerinin sürtünme katsayısı ile karşılaştırıldığında ise aşınma hacmi % 94 oranında azalmıştır. Benzer sonuçlar Autay [30], Venkatesan [31] ve Kunishima [32] tarafından yapılan çalışmalarda da elde edilmiştir. Venkatesan ve arkadaşları [31], cam elyaf ve karbon nanotüp ile güçlendirilmiş hibrit polimer kompozit numunelerde, uygulanan yük ve kayma hızının artmasıyla sürtünme katsayısı ve aşınma oranının arttığını belirtmişlerdir. Kunishima ve arkadaşları [32] ise PA66 polimeri ile cam elyaflar arasındaki yüksek arayüzey kayma direnci nedeniyle kompozitlerin sürtünme katsayısının ve aşınma miktarlarının azaldığını belirtmişlerdir. PA66 polimeri ile cam elyaf arasındaki iyi yapışma aşınma deneyindeki kayma süresince cam elyafların soyulmasını, çiziklerin başlamasını ve ilerlemesini engelleyerek mekanik özellikleri koruduğu ve tribolojik özelliklerin geliştiği belirtilmiştir. Moustafa Mahmoud ve arkadaşları da [5] PA6 polimerine ilave edilen daha rijit olan katkıları nedeniyle kompozitlerin aşınma direncinin arttığını belirtmişlerdir.

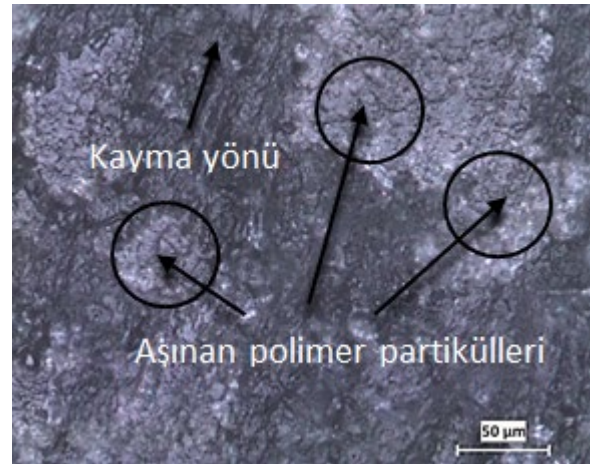


Şekil 5. PA6 polimer, PA6/20M kompoziti ve PA6/20M/10CE hibrit kompozitin PPS polimer kompozit diske karşı aşınma hacmi-yük ilişkisi

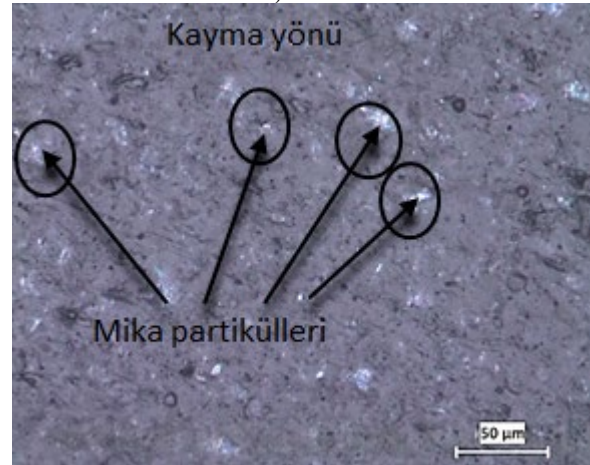
### 3.4. Mikroyapı İncelemeleri

Şekil 6 a-c'de PA6 polimer, PA6/20M kompoziti ve PA6/20M/10CE hibrit kompozitin %40 cam elyaf takviyeli PPS polimer kompozitine karşı çalışması durumundaki aşınma yüzeyi optik mikroskop mikroyapı görüntüleri verilmiştir. PA 6 polimer ana matris malzemenin %40 cam elyaf takviyeli PPS kompoziti ile teması neticesinde PA6 polimeri aşınmış

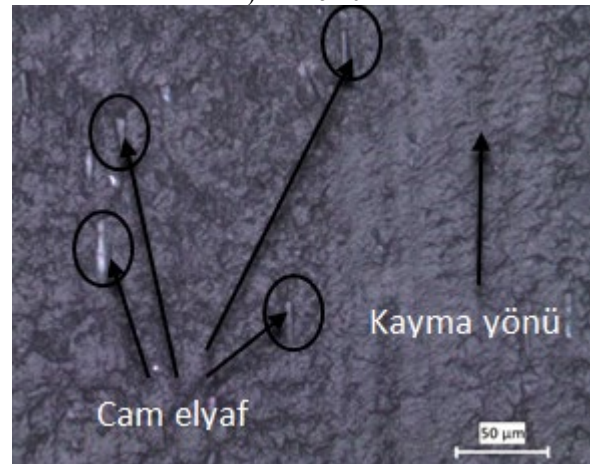
ve aşınan partiküller temas neticesinde PA6 matris yüzeyine yapışmıştır (Şekil 6-a).



a) PA6



b) PA6/20M



c) PA6/20M/10CE

Şekil 6. PA6 polimer, PA6/20M kompoziti ve PA6/20M/10CE hibrit kompozitin PPS polimer kompozitine karşı çalışması durumundaki aşınma yüzeyi optik mikroskop mikroyapı görüntüleri

PA6 polimerine ilave edilen %20 oranındaki mika katkı polimer ana matris malzeme ile iyi bir arayüzey bağı oluşturamamış olup karşı disk malzeme ile temasında mika partikülleri kalkarak aşırı aşınma

oluşumuna sebep olmuştur (Şekil 5). Ana matrizen sıyrılan mika partikülleri karşı disk cam elyaf takviyeli PPS kompozit arasına sıkışarak sürtünme katsayısının artmasına da sebep olmaktadır. (Şekil 3). Sıyrılan mika partikülleri transfer film tabakası oluşumunu azaltmıştır. Artan mika oranının topaklanmaya sebep olduğu ve durumun gerilim yığılmalarını tetiklediği ve aynı zamanda disk yüzeyinde aşınma oranı ve sürtünme katsayısının şekillenmesinde önemli rol oynayan transfer film tabakası oluşumunu azalttığı düşünülmektedir. Bu durum Şekil 6-b'de görüldüğü gibi aşınma yüzeylerinde PPS polimer bünyesindeki cam elyaflar aşınma izlerinin oluşumuna sebep olmuştur. PA6/20M kompozitine ilave edilen %10 oranındaki cam elyafın ise yapı içerisinde homojen olarak dağıldığı ve polimer matris ile iyi bir bağ yaptığı görülmektedir. Bu durum PA6 kompozitin daha rijit hale gelmesine sebep olmuş ve PA6 bünyesindeki cam elyaflar aşınmaya ve sürtünmeye dirençli hale getirmiştir. Bu durum Şekil 6-c'de görüldüğü gibi PA6/20M/10CE hibrit kompozitin pim aşınma yüzeylerinde daha az aşınma izi oluşmuştur.

#### IV. SONUÇ

PA6 polimeri ile %20 oranında mika katkılı PA6 ve %20 oranında mika/%10 oranında cam elyaf katkılı PA6 kompozitlerin PPS/40CE polimer kompozitine karşı çalışması durumundaki aşınma özelliklerinin incelendiği çalışma sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

1.Katkısız PA6 polimeri ile PA6/20M ve PA6/20M/10CE kompozitleri için uygulanan yükün artırılması ile sürtünme katsayısı değerleri sırasıyla %25,2, %29,6 ve %15,2 oranlarında artmıştır.

2.PA6 polimeri ilave edilen %20 oranındaki mika katkısı sürtünme katsayısını %33,0 oranında artırırken PA6/20M kompozitine ilave edilen %10 oranındaki cam elyaf ise sürtünme katsayısını %86,1 oranında azaltmıştır.

3.PA6/20M kompoziti için uygulanan yükün artması ile aşınma hacmi %291,3 oranında artarken katkısız PA6 polimeri için aşınma hacmi %200 oranında artmış, PA6/20M/10CE hibrit kompoziti için ise %371,4 oranında artış gözlenmiştir.

4.Diğer kombinasyonlara göre kıyaslandığında PPS/40CE-PA6/20M/10CE disk-pim kombinasyonunda en az aşınma hacmi (yani minimum %20 oranında) ve sürtünme katsayısı elde edilirken PPS/40CE-PA6/20M disk-pim kombinasyonunda en fazla aşınma hacmi ve sürtünme katsayısı elde edilmiştir.

5.Elektrik/elektronik sektöründe aşınmanın olduğu uygulamalarda kullanılmak üzere birbirleriyle temas eden ve en az aşınma gösteren PPS/40CE-PA6/20M/10CE kombinasyonu seçilmesi uzun çalışma ömrü açısından önerilebilir.

#### KAYNAKLAR

[1] Sathees Kumar, S., & Kanagaraj, G., (2016). Investigation on mechanical performances of PA6

and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> reinforced pa6 polymer composites. International Journal of Advanced Engineering Technology, VII(I), 69-74.

- [2] Unal, H., Saylan, T., & Mimaroglu, A., (2014). Thermal, mechanical and tribological performance of polymer composites rubbed against polymer composites in application in electrical contact breakers. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 228(6), 608–615.
- [3] Gyorgy, C., Anna, S., & Dora, J., (2023). Effect of different fillers on thermal conductivity, tribological properties of Polyamide 6. Scientific Reports, 13, 845.
- [4] Mariusz, W., Mirosław, S., & Daniel, P., (2022). E-effect of water absorption on tribological properties of thermoplastics matrix composites reinforced with glass fibres. Advances in Science and Technology Research Journal, 16(2), 232–239.
- [5] Moustafa Mahmoud, Y.Z., Karen, S., Martin, V., & Michael, T.H., (2023). Mechanical and tribological performances of thermoplastic polymers reinforced with glass fibres at variable fibre volume fractions. Polymers, 15, 694.
- [6] Yi, W., & Jun, T., (2021). Development of carbon fiber-reinforced thermoplastics for mass-produced automotive applications in Japan. Journal of Composites Science, 5, 86.
- [7] Dipen, K.R., Pratiksha, H.W., & Emanoil, L., (2021). Manufacturing technologies of carbon/glass fiber-reinforced polymer composites and their properties: A Review. Polymers, 13, 3721.
- [8] Nuruzzaman, D.M., Iqbal Asif, A.K.M., Oumer, A.N., Ismail, N.M. & Basri, S., (2016). Experimental investigation on the mechanical properties of glass fiber reinforced nylon. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 114, 012118.
- [9] Zaldua N., Jon M., Amaia de la C., Sonia G.A., Cristina E., Isabel H., Agnieszka T., & Alejandro J.M., (2019). Nucleation and crystallization of PA6 composites prepared by T-RTM: Effects of carbon and glass fiber loading. Polymers, 11, 1680.
- [10] Fahmi, A., Jawaid, M., Hassan, A., & Wahit, M.U., (2013). Mechanical properties of mica-filled Polycarbonate/Poly(Acrylonitrile-Butadiene-Styrene) composites. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 52, 727-736.
- [11] Lubomir, L., David, M., Barbora, L., Martin, V., Michal, S., Klara, C., Jakub, V., Kristian, E.W., Richard, W.G., & Neil, A.R., (2018). Effect of filler particle shape on plastic-elastic mechanical behaviour of high density poly (ethylene)/mica and poly (ethylene)/wollastonite composites. Composites Part B, 141, 92-99.

- [12] Deshmukh, S.P., & Rao, A.C., (2012). Mica filled PVC composites: Performance enhancement in dielectric and mechanical properties with treated/untreated mica of different particle size and different concentration. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, 11(2), 169-181.
- [13] Suryasarathi, B., & Mahanwar, P.A., (2005). Influence of particle size and particle size distribution on MICA filled nylon 6 composite. *Journal of Materials Science*, 40, 6423–6428.
- [14] Sreekanth, M.S., Joseph, S., Mhaske, S.T. & Mahanwar, P.A., (2011). Effects of mica and fly ash concentration on the properties of polyester Thermoplastic Elastomer Composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 24, 317-331.
- [15] Suryasarathi, B., & Mahanwar, P.A. (2004). Effect of Particle Size of Filler on Properties of Nylon-6. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, 3(1), 23-31.
- [16] Unal, H., & Mimaroglu, A., (2012). Mechanical and Morphological Properties of Mica and Short Glass Fiber Reinforced Polyamide 6 Composites. *International Journal of Polymeric Materials*, 61, 834-846.
- [17] Gan, D., Lu, S., Caisheng, S. & Zhijian, W. (2001). Mechanical properties and frictional behaviour of a mica-filled poly (aryl ether ketone) composites. *European Polymer Journal*, 37, 1359-1365.
- [18] Pogacnik, A., Kupec, A. & Kalin, M. (2017). Tribological properties of polyamide (PA6) in self-mated contacts and against steel as a stationary and moving body. *Wear*, 378-379, 17–26.
- [19] Unal, H., Abdullah, M. & Ahmet, O. (2017). Friction and wear performance of glass fiber reinforced poly-ether-ether-ketone composite against different polymer counterparts. *MOJ Polymer Science*, 1(5), 188-190.
- [20] Demir, Z., (2013). Tribological performance of polymer composites used in electrical engineering applications. *Bulletin of Materials Science*, 36(2), 341-344.
- [21] Unal, H., Mimaroglu, A. & Serdar, V. (2006). Dry sliding performance of thermoplastics against reinforced unsaturated polyester (BMC): In use in electrical contact breakers components. *Wear*, 261, 841–847.
- [22] Samyn, P., De Baets, P. & Schoukens, G. (2009). Influence of internal lubricants (PTFE and silicon oil) in short carbon fibre-reinforced polyimide composites on performance properties. *Tribology Letters*, 36(2), 135-146.
- [23] Wei, L., Qi, L., Yi, L., Shengtai, Z., Huawei, Z., & Mei, L. (2016). Enhanced mechanical and tribological properties in polyphenylene sulfide/polytetrafluoroethylene composites reinforced by short carbon fiber. *Composites Part B*, 91, 579-588
- [24] Shaofeng, Z., Qiaoxin, Z., Chaoqun W., & Jin H. (2013). Effect of carbon fiber reinforcement on the mechanical and tribological properties of polyamide6/polyphenylene sulfide composites. *Materials and Design*, 44, 493–499.
- [25] Yi-Lan, Y., Du-Xin, L., Gao-Jie, S., Ruo-Yun, L., & Xin, D., (2016). Improvement in the tribological properties of polyamide 6: Talc, glass fiber, graphite, and ultrahigh-molecular-weight polyethylene. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 29(4), 494–507.
- [26] Chukov, D. I., Stepashkin, A.A., Maksimkin, A.V., Tcherdyntsev, V.V., Kaloshkin, S. D., Kuskov, K.V., & Bugakov, V.I., (2015). Investigation of structure, mechanical and tribological properties of short carbon fiber reinforced UHMWPE-matrix composites. *Composites Part B*, 76, 79-88.
- [27] Li, D. X., Xie, Y., Li, W.J., Yilan, Y., & Xin. D., (2013). Tribological and mechanical behaviors of polyamide 6/glass fiber composite filled with various solid lubricants. *The Scientific World Journal*, 2013, 320837.
- [28] Unal H, Kaya U.A., Esmer K, Mimaroglu, A, Poyraz, B., (2016). Influence of wax content on the electrical, thermal and tribological behaviour of a polyamide 6/graphite composite, *J Polymer Engineering*, 36(3), 279–286.
- [29] [https://www.solvay.com/sites/g/files/srpend221/files/2018-08/Ryton-PPS-Types\\_EN-v1.2\\_0.pdf](https://www.solvay.com/sites/g/files/srpend221/files/2018-08/Ryton-PPS-Types_EN-v1.2_0.pdf)
- [30] Autay, R., Missaoui, S., Mars, J., & Dammak, F., (2019). Mechanical and tribological study of short glass fiber-reinforced PA 66. *Polymers and Polymer Composites*, 27(9), 587–596.
- [31] Venkatesan, M., Palanikumar, K., & Rajendra Boopathy, S., (2017). Experimental investigation and analysis on the wear properties of glass fiber and CNT reinforced hybrid polymer composites. *Science Engineering Composite Materials*, 1-12.
- [32] Kunishima, T., Yasuharu, N., Setsuo, N., Takanori, K., Gaetan, B., Jean-Christophe, A., Vincent, F., & Philippe, K. (2020). Effects of glass fiber properties and polymer molecular mass on the mechanical and tribological properties of a polyamide-66-based composite in contact with carbon steel under grease lubrication. *Wear*, 462-463, 203500.