



ARAŞTIRMA MAKALESİ / RESEARCH ARTICLE

Cam Elyaf Takviyeli Poli-amit 6 Kompozitler ile Poliamit-6 Polimerinin %30 Cam Elyaf Takviyeli Poli-amit 6 Kompozitine Karşı Aşınma ve Sürtünme Davranışları

Wear and Friction Behaviour of Glass Fiber Reinforced Polyamide 6 Composites and Polyamide-6 Polymer against 30% Glass Fiber Reinforced Polyamide 6 Composite

Tacettin Saylan¹, Hüseyin Ünal^{2*}, Salih Hakan Yetgin³

¹ Işık Perde Rayları San. ve Tic. A. Ş. İstanbul, TÜRKİYE

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

³ Tarsus Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Tarsus/Mersin, TÜRKİYE

Sorumlu Yazar / Corresponding Author*: unal@subu.edu.tr

Öz

Bu çalışmada, katkısız poli-amit polimeri ile ağırlık olarak farklı oranlarda (%10-%20-%30) kısa cam elyaf (CE) takviyeli poli-amit kompozitlerin aşınma ve sürtünme davranışları incelenmiştir. Aşınma deneyleri %30 kısa cam elyaf takviyeli poli-amit 6 (PA6+%30CE) kompozit diske karşı kuru ortam şartları altında gerçekleştirilmiştir. Cam elyaf takviyeli PA6 esaslı kompozitler önce ikiz vidalı bir ekstruderde granül formunda üretilmiş ardından enjeksiyon makinasında aşınma test numuneleri basılmıştır. Aşınma testleri 0,5 m/s kayma hızı, 20-30-40 N yükte ve 1500 m kayma mesafesinde yapılmıştır. Deneyler, pim-disk aşınma test cihazı kullanılarak ortam sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda, katkısız PA6 polimerinin sürtünme katsayısı ve aşınma oranı uygulanan yük ile artış göstermiştir. Kısa CE takviyeli PA6 kompozitlerin sürtünme katsayısı da artarken aşınma oranında ise pek artış gözlenmemiştir. En düşük sürtünme katsayısı ve aşınma oranı %30 CE takviyeli PA6 kompozitinde elde edilmiştir. PA6 polimerine %30 oranında CE takviyesi ile kompozitin aşınma direnci katkısız PA6 polimerine göre en az %48 oranında artmıştır.

Anahtar Kelimeler: Poli-amit, Cam fiber, Aşınma, Sürtünme

Abstract

In this study, the wear and friction behaviors of unfilled poly-amide polymer and short glass fiber (GF) reinforced polyamide composites with different weight ratios (10%-20%-30%) were investigated. Wear tests were carried out under dry conditions against a 30% short glass fiber reinforced polyamide 6 (PA6+30%GF) composite disc. Glass fiber reinforced PA6 based composites were first produced in granule form in a twin screw extruder and then wear test specimens were molded in an injection molding machine. Wear tests were carried out under 20 N, 30 N and 40 N loads at a sliding speed of 0,5 m/s and sliding distance of 1500 m. The tests were carried out at ambient temperature using a pin-disc wear tester. As a result of the experiments, the friction coefficient and wear rate of the unfilled PA6 polymer increased with the applied load. The coefficient of friction of short GF reinforced PA6 composites also increased, while the wear rate did not increase much. The lowest coefficient of friction and wear rate were obtained in PA6 composite with 30% GF reinforcement. With 30% GF reinforcement of polyamide polymer, the wear resistance of the composite increased by at least 48% compared to the unfilled PA6 polymer.

Keywords: Poly-amide, Glass fiber, Wear, Friction

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

In many areas of the industry and in different sectors, there are many machine elements in which polymer-based materials are used. Polymers and polymer composites are widely used in applications where friction and wear are prominent, especially in gear mechanisms. Machine elements made of polymer materials sometimes work in contact with steel-based materials and sometimes in contact with polymer or polymer composite materials. Polymer/polymer wear pairs wear more than polymer/steel wear pairs. In wear applications, the

polymer/polymer wear pair must be selected consciously. For this, a good knowledge of materials and a good literature research is needed. In order for polymer and polymer-based composite gear wheels in contact with each other to operate smoothly and to be used for a long life, it is very important to choose the right material suitable for the working conditions. In the literature, studies describing the properties of some wear resistant materials have been found. The most preferred polymer gear materials that can be produced by injection molding or machining methods in industry are High density polyethylene

DOI:10.21205/deufmd.2024267617

Atf şekli / How to cite:

Saylan, T., Unal, H., Yetgin, H.S. (2024). Cam Elyaf Takviyeli Poli-amit 6 Kompozitler ile Poliamit-6 Polimerinin %30 Cam Elyaf Takviyeli Poli-amit 6 Kompozitine Karşı Aşınma ve Sürtünme Davranışları. DEUFMD, 26(76), 148-155.

Geliş Tarihi / Received: 16.05.2023

Kabul Tarihi / Accepted: 07.08.2023

(HDPE), Acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS), polyacetal (POM), polycarbonate (PC), poly-ether-ether-ketone (PEEK), polyamide 6 (PA6) and polyamide 66 (PA66) polymers [4,5-7]. PA polymer is a type of polymer with wear resistance, toughness and strength, which is preferred when metallic gears can operate for long periods without lubrication [5]. PEEK polymer, on the other hand, has high strength and hardness and low thermal expansion coefficient required for gears. For this reason, it is an important polymer type for gear manufacturing [8]. POM polymer is tough and has high fatigue strength and is widely used in wear-related fields. However, it has also been reported to wear excessively or fail under severe loads applied in gear systems [9]. When the literature was examined, few studies on polymer/polymer contact wear studies were found. Abdulkhalq [4] investigated the wear mechanisms of PA66 and acetal (POM) polymers produced by machining and PA46 and PC polymer gears produced by injection molding against their own polymer gears. It is stated that the amount of wear increases in POM and PA gears depending on the load and the amount of wear is independent of the production method. Mao et al [11] investigated the wear mechanisms of a polyacetal polymer gear produced by machining and injection molding when running against its own polymer gear (POM/POM). It was reported that when the load reaches a critical value for a given geometry, the gear wear rate for POM gears increases significantly. Li et al [12] investigated the wear and friction properties of polymer gear systems using finite element method. In the study, tribological properties of Acetal/Acetal, Polyamide/Acetal, Polyamide/Polyamide, Acetal/Polyamide, PEEK/PEEK, PEEK/Steel and Steel/PEEK systems were evaluated. The acetal gear started to melt at load torques higher than 9 N.m and fracture occurred when the load was 10 N.m and above. It was reported that the Acetal/Polyamide and Polyamide/Acetal systems did not meet the tribological properties due to high gear tip and gear root wear. Although some preliminary findings on PEEK gears have been reported, much more research is needed to understand PEEK gear performance and to significantly expand gear application. Yelle and Poupards [13] investigated the usability of very high molecular weight polyethylene (MHMAPE) polymer for powertrain. However, the high mechanical properties and high chemical and abrasion resistance of CYMAPE polymer, as well as its high cost and inability to be used at temperatures above 57 °C, limited the use of this polymer in the field of gear wheels. While there are many wear studies on polymer/metal contact in the literature [17-21], there is still a lack of studies on the wear performance of polymer/polymer pairs or composite pairs. The study was carried out to expand and increase the perspective of these studies, which are widely used in industry but scientifically limited.

Materials and Methods

In this study, short glass fiber reinforced composites with 10, 20 and 30 wt% were produced. Glass fiber reinforced PA6 composites with different compositions were produced in granule form in a twin screw compounding machine. Then, cylindrical wear test specimens with a diameter of 6 mm and a length of 50 mm were molded by injection molding method. Wear tests were carried out in a pin-on-disc wear machine under dry conditions in accordance with ASTM G99 standard. The tests were carried out under 20, 30 and 40N loads and 0.5 m/s sliding speed against a 30% glass fiber reinforced PA6 composite disc. The coefficient of friction and specific wear rates of PA6 and PA6 composites were determined.

Results and Discussion

In the study of PA6 polymer against PA6+30%CE composite under 40 N load and 0.5 m/s sliding speed, the coefficient of friction of the unfilled PA6 polymer was obtained in the range of 0.12 to 0.167. The coefficient of friction of PA6+10%GF composite was obtained in the range of approximately 0.10 to 0.11, the coefficient of friction of PA6+20%GF composite was obtained in the range of 0.09 to 0.11, while the coefficient of friction of PA6+30%CE composite was obtained around 0.096 on average. In the study conducted by Autay et al. [26], the coefficient of friction of unfilled PA polymer was around 0.6-0.7, while the coefficient of friction of fiber reinforced PA composites was obtained between 0.5-0.6. In previous studies, it was stated that the fibers in the composite structure share the partial pressure, reduce the actual contact area and the friction coefficient of the composite decreases with the increase in the fiber ratio [27]. Li and Xia [28] explained that the reason for the decrease in the friction coefficient of PA6/CF composite is the improvement of the interface between the carbon fiber (CF) and PA6 matrix and the increase in the modulus of elasticity. In other studies [30-33], the thin film layer formed by the polymer on the steel disc surface was also explained as the reason for the decrease in the coefficient of friction. In the load ranges of 20-40N, the specific wear rate decreased with the increase in the glass fiber ratio added to the PA6 matrix, while an increase was observed in the unfilled PA6 polymer. The specific wear rate of unfilled PA6 increased by about 47% with increasing the load. The specific wear rates of PA6 composites with different percentages (10%, 20% and 30wt.%) of GF reinforcement decreased by 28%, 28% and 20%, respectively. The unfilled PA6 polymer wears more and the specific wear rate increases with increasing applied load against PA6+30%GF composite. However, as the GF content in the PA6 base matrix increases, the specific wear rate decreases. Increasing the GF ratio in the matrix reduces the contact between the matrix and the disc and causes the specific wear rate to decrease (see Figure 7).

Conclusion

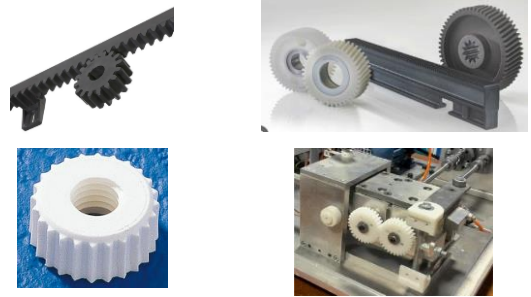
There are many materials in which polymers and polymer composites are used in different fields of industry. They are also widely used in tribological applications, especially in gear mechanisms. Polymer materials sometimes work in contact with steel-based materials and sometimes in contact with polymer or polymer composite materials. In order for polymer and polymer-based composite gear wheels that come into contact with each other to work without any problems and to be used for a long life, it is very important to choose the right material suitable for the working conditions. This study was carried out in order to make the right material selection. The PA6+30%GF/PA6+30%GF composite pair wore approximately 48% less than the Pure PA6/PA6+30%GF composite wear pair. When the load or pressure applied to the material pair was increased, the specific wear rate of pure PA6 polymer increased by about 47%, while the specific wear rate of PA6+30%GF composite decreased by 20%. The coefficient of friction of the pure PA6 polymer was obtained in the range of 0.12 to 0.167, while the coefficient of friction of the composites with different proportions of glass fiber reinforcement was obtained in the range of approximately 0.096 to 0.11.

1. Giriş

Polimer dişliler, metalik dişlilere göre hafiflik, düşük üretim maliyeti, dişli geometrisinde yüksek serbestlik derecesi, azalan gürültü seviyesi ve kendi kendini yağlaması gibi avantajları nedeniyle fotokopi, faks ve yazıcı makinelerinin çeşitli parçalarında ve kılavuz raylar ile yapay mafsallar gibi tribolojik uygulamalarda tercih edilir hale gelmiştir [1-6]. Enjeksiyon kalıplama veya talaşlı imalat yöntemleri ile üretilebilen ve en çok tercih edilen polimer dişli malzemeleri Yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE), Akrilonitril-bütadien-stiren (ABS), poliasetal (POM), polikarbonat (PC), Poli-eter-eter-keton (PEEK), Poliamit 6 (PA6) ve Poliamit 66 (PA66) polimerleridir [5-7]. Bu polimerler içerisinde PA polimeri, metalik dişlilerin kısa ömürlü olduğu aşındırıcı koşullar altında, yağlama olmadan uzun süreler çalışabilmesi nedeniyle yaygın olarak kullanılan bir polimer türüdür [5]. Ayrıca, PA polimeri aşınma direnci, tokluk ve mukavemet değerleri ile de dikkat çekmektedir. PEEK polimeri, dişli için gerekli olan yüksek mukavemet ve sertliğe, düşük termal genleşme katsayısına sahip olması nedeniyle polimer dişliler için diğer önemli bir polimer türüdür [8]. POM polimerinin yüksek yorulma mukavemetine sahip olduğu ancak dişli sistemlerinde uygulanan şiddetli yükler altında aşırı şekilde aşındığı veya bozulduğu da bildirilmiştir [9]. Prashant ve arkadaşları [10] enjeksiyon kalıplama yöntemi ile ürettikleri ABS dişlisinde dişlilerde aşırı derecede aşınmadan, YYPE dişlisinde ise diş kökündeki çatlaklardan dolayı bozulmaların meydana geldiğini belirtmişlerdir. ABS ve YYPE dişlilerinin 0,5 ve 1,1 milyon çevrimde deforme olduğu POM dişlisinin ise deforme olmadan 2 milyon çevrim çalıştığı belirlenmiştir. Khalid Abdulkhalik [4] talaşlı imalat ile ürettiği PA66 ve asetal (POM) polimerleri ile enjeksiyon kalıplama ile ürettiği PA46 ve PC polimer dişlilerin kendi polimer dişlilerine karşı çalışması durumundaki aşınma mekanizmalarını incelemiştir. POM ve PA dişlilerinde yüke bağlı olarak aşınma miktarlarının arttığı, aşınma miktarının üretim yönteminden bağımsız olduğu belirtilmiştir. Benzer şekilde dönme hızına bağlı olarak da aşınma miktarının arttığı belirtilmiştir. Mao ve arkadaşları [11] talaşlı imalat ve enjeksiyon kalıplama yöntemi ile ürettikleri poliasetal polimer dişlisinin kendi polimer dişlisine (POM/POM) karşı çalışması durumundaki aşınma mekanizmalarını incelemiştir. Yük belirli bir geometri için kritik bir değere ulaştığında, asetal dişliler için dişli aşınma oranının önemli ölçüde arttığı belirtilmiştir. Li ve arkadaşları [12] sonlu elemanlar yöntemi ile polimer dişli sistemlerinin aşınma ve sürtünme özelliklerini incelemiştir. Çalışmada, Asetal/Asetal, Poliamit/Asetal, Poliamit/Poliamit, Asetal/Poliamit, PEEK/PEEK, PEEK/Çelik ve Çelik/PEEK sistemlerinin tribolojik özellikleri değerlendirilmiştir. Asetal dişli 9 N.m'den yüksek yük torklarında erimeye başlamış ve yük 10 N.m ve üzerinde olduğunda kırılma meydana gelmiştir. Yüksek uç ve kök aşınmaları nedeniyle Asetal/Poliamit ve Poliamit/Asetal sisteminin tribolojik özellikleri karşılamadığı belirtilmiştir. PEEK dişlileriyle ilgili bazı ilk bulgular rapor edilmiş olsa da, PEEK dişli performansını anlamak ve dişli uygulamasını önemli ölçüde genişletmek için çok daha fazla araştırma yapılması gerektiği belirtilmiştir. Yelle ve Poupards [13] güç aktarım organları için çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen (ÇYMAPE) polimerinin kullanılabilirliğini araştırmıştır. Ancak, ÇYMAPE polimerinin yüksek mekanik özellikleri ile yüksek kimyasal ve aşınma direncinin yanında pahalı olması ve 57 °C üzerindeki sıcaklıklarda kullanılamaması bu polimerin dişli çark alanında kullanımını sınırlamıştır. Polimer esaslı malzemelerin dişli çarklarda yaygın olarak kullanımını sınırlayan diğer özellikler ise düşük yük taşıma

kapasiteleri, düşük ısı iletkenliği ve ağır yük ve yüksek sıcaklık şartları altında deforme olmalarıdır [14]. Bu dezavantajları ortadan kaldırmak için polimer malzemelere cam elyaf, karbon elyaf (KE) ve aramid elyaf gibi mukavemet artırıcı elemanlar katılırken aşınma ve sürtünme özelliklerinin geliştirilmesi için katı yağlayıcı olarak adlandırılan politetrafloretillen (PTFE), Vaks, grafit ve Molibden disülfid (MoS_2) gibi katkı elemanları kullanılmaktadır [2-3, 5, 12]. Masaya ve arkadaşları [6] enjeksiyon kalıplama yöntemi ile ürettikleri karbon fiber (KF) takviyeli Poliamit 12 (PA12) polimerinin yine karbon fiber takviyeli PA6, PA66 ve PA46 kompozitler ile dişli performansını karşılaştırmışlardır. Çalışma sonucunda, PA12/KF dişlisinin, araştırılan tüm poliamitler arasında en yüksek yük kapasitesi, mükemmel sessiz çalışma ve en düşük su emme özelliği gösterdiğini belirtmişlerdir. Masaya ve arkadaşları [15] yaptıkları diğer bir çalışmada enjeksiyon kalıplama ile ürettikleri plastik dişliler arasında PEEK dişlisinin diğer polimer türlerine göre üstün dişli performansı gösterdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, %30 oranında karbon fiber takviyeli PEEK kompozitin katkısız PEEK polimerine göre daha yüksek dişli performansı gösterdiği de belirtilmiştir.

Endüstride kullanılan polimer ve polimer esaslı kompozit dişli çarkların problemsiz bir şekilde çalışabilmesi ve uzun ömürlü kullanılabilmesi için çalışma şartlarına uygun doğru malzeme seçimi oldukça önemlidir. Malzeme çiftleri oluşturulurken; düşük sürtünme katsayısı, düzgün kayma, minimum aşınma, sürtünmeden oluşacak ısıyı üzerinden çabuk atabilmek için yüksek ısıl iletkenlik amaçlanmaktadır [16]. Literatürde polimer/metal teması ile aşınma davranışlarının incelendiği çalışmalar [17-21] geniş bir şekilde bulunmakta iken polimer/polimer üzerinde birbiri ile temasta olan malzemelerin aşınma davranışları üzerinde sınırlı sayıda çalışmaya rastlanmıştır. Endüstrinin birçok alanında polimer/polimer aşınma çifti ve/veya polimer kompozit/polimer kompozit aşınma çiftinin çalıştığı makine elemanlarına rastlanılmaktadır. Şekil 1'de polimer ve polimer kompozitlerden imal edilmiş dişli ve dişli mekanizmaları verilmiştir [11, 22-24].

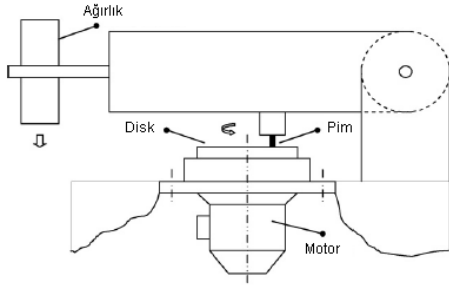


Şekil 1. PA6 ve CE takviyeli PA6 kompozitlerden imal edilen dişli sistemleri [11, 22-24].

Figure 1. Gear systems made of PA6 and GF reinforced PA6 composites.

Endüstride yaygın kullanılan ancak bilimsel açıdan sınırlı olan bu çalışmaları genişletmek ve bakış açısını artırmak için çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, katkısız PA6 polimeri ile ağırlıkça %10 oranında CE takviyeli PA6 (PA6+%10CE), %20 oranında CE takviyeli PA6 (PA6+%20CE) ve %30 oranında CE takviyeli PA6 (PA6+%30CE) kompozitlerin tribolojik özellikleri incelenmiştir. Tribolojik deneylerde, 0,5 m/s kayma hızı, 20, 30 ve 40N yükler ve 1500 m kayma mesafesi kullanılmıştır. Deneylerde pim-disk aşınma test cihazı kullanılmıştır. Karşı disk

malzeme olarak ise PA6+%30CE polimer kompoziti kullanılmıştır. Bu test şartları altında çalışan malzemelerin sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerleri tespit edilmiştir.



Şekil 2. Pim-disk aşınma cihazı şematik görüntüsü.

Figure 2. Schematic view of the pin-disc wear device.

2. Materyal ve Metod

Deneylerde Domopolimer firmasından temin edilen Domamid ticari isimli, 1,13 g/cm³ yoğunluğa, 225 °C ergime sıcaklığına sahip katkısız PA6 polimeri matris malzemesi olarak kullanılmıştır. Takviye malzemesi olarak Cam Elyaf San. ve Tic. A.Ş./İstanbul' dan temin edilen ve poliamit ile uyumlu PA2 tip kısa cam elyaf kullanılmıştır. Kısa cam elyaflar 10,5 µm çapında ve 4,5 mm uzunluğunda olup yüzeyi %0,9 oranında aminosilan bağlayıcı ile kaplı olarak temin edilmiştir. Kırılmış cam elyaf özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Aşınma ve sürtünme deneylerinde karşı disk malzeme olarak PA6+%30CE kompozit malzemesi kullanılmıştır.

Tablo 1. Kırılmış cam elyaf özellikleri.

Table 1. Properties of chopped glass fiber.

Özellik	Birimi	Değeri/Cinsi
Cam tipi		E
Elyaf çapı	µm	10,5
Maksimum nem miktarı	%	0,07
Reçine uyumu	-	Poliamit
Bağlayıcı türü		Amino-silan
Bağlayıcı miktarı	%	0,90±0,20
Kırılma boyu	mm	3,0- 4,5

CE takviyeli poliamit 6 kompozitlerin granül formunda üretilmesi endüstriyel tip çift vidalı bir kompozit makinesinde gerçekleştirilmiştir. Ekstrüzyon prosesinde kovan ısıtıcı sıcaklıkları 220-245 °C arasında ayarlanmıştır. Ekstrude edilen CE takviyeli PA6 polimer granüller önce 80 °C'de 4 saat fırında kurutulmuş sonra da test numuneleri enjeksiyon makinasında kalıba basılmıştır. Aşınma testlerinde kullanılan pim numuneleri 6 mm çapında, 50 mm uzunluğunda disk malzemeleri ise 90 mm çapında ve 5 mm kalınlığında olacak şekilde özel olarak tasarlanmış enjeksiyon kalıbı kullanılarak enjeksiyon makinasında üretilmiştir. Enjeksiyon kalıplama ile pim malzeme üretimlerinde ısıtıcı sıcaklıkları 220-250 °C arasında ayarlanırken enjeksiyon basıncı 180 bar olarak seçilmiştir. Tablo 2'de deneylerde kullanılan malzemeler, kısaltmaları ve üretim şartları verilmiştir.

Aşınma testleri, ASTM G99 standardına uygun olarak Şekil 2'de şematik resmi verilen pim-disk cihazı kullanılarak kuru ortam şartlarında ve oda sıcaklığında yapılmıştır. Herbir deney en az 3 kez tekrarlanmış ve aritmetik ortalama değerler alınmıştır. Pim numunelerin deney öncesi ve sonrası ağırlık ölçümleri Precia 220 marka 0,0001 g hassasiyetli hassas terazi ile yapılmış ve Eşitlik 1 de verilen formül kullanılarak spesifik aşınma oranı (Ko) hesaplanmıştır [25]. Burada, Δ_m: ağırlık kaybı (g), L: kayma mesafesi (m), ρ: malzemelerin yoğunluğu (g/cm³) ve F: uygulanan yük (N)'dur.

$$Ko = \Delta_m / (L * \rho * F) \quad (1)$$

Tablo 2. PA6 polimer ve PA6 kompozitin kompozisyonları ve üretim şartları.

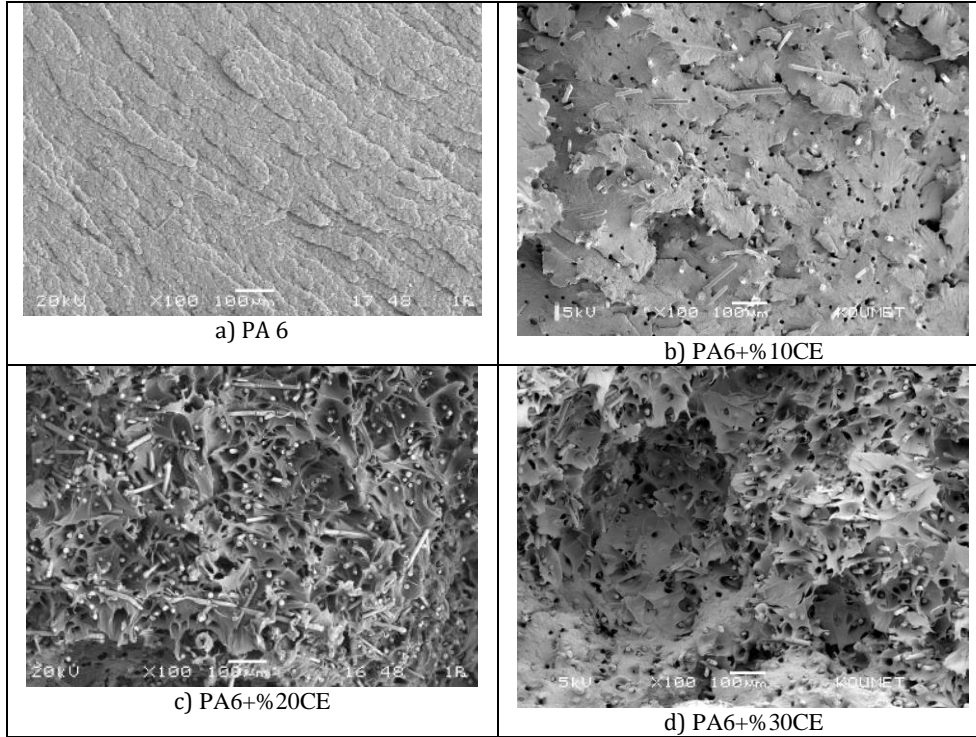
Table 2. Compositions and production conditions of PA6 polymer and PA6 composites.

Sıra No	Ağırlıkça PA6 (matris)	Ağırlıkça Cam elyaf (takviye)	Disk Malzemesi	Üretim şartları
1	100	-	Ağırlıkça %30 cam elyaf katkılı PA6 (PA6+%30CE)	NR-II-75 tip çift vidalı kompozit makinası ısıtıcı sıcaklık aralığı: 220-245 °C. Enjeksiyon ısıtıcı sıcaklık aralığı: 220-250 °C, Enjeksiyon basıncı:180 bar
2	90	10		
3	80	20		
4	70	30		

3. Bulgular ve Tartışma

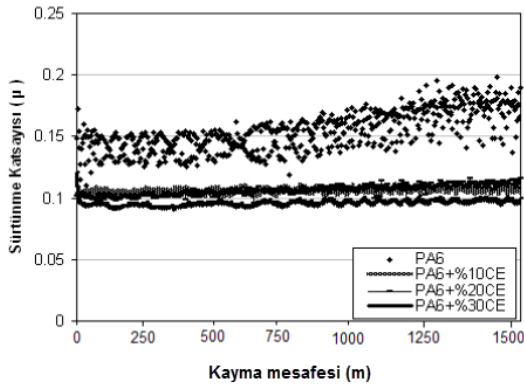
Şekil 3 a-d'de katkısız PA6 ve CE katkılı PA6 kompozitlerin çekme testi sonucunda alınan kırık yüzeyleri taramalı elektron mikroskopta (SEM) ikincil elektronlar modu yardımıyla incelenmiştir. Şekil 3 a'da katkısız PA6 polimer ana matrisinin kırık yüzey görüntüsü verilmiştir. Şekil incelendiğinde dalgalı bir yüzey görüntüsü gözlenmiştir. Yani kırılma esnasında plastik deformasyon olduğu tespit edilmiştir. Şekil 3 b-d'de görüldüğü gibi PA6+%10CE, PA6+%20CE ve PA6+%30CE kompozit malzemelerde, cam elyafların matris malzeme içerisinde homojen olarak dağıldığı ve silan kaplı cam elyafların tamamen PA6 polimer tarafından ıslatıldığı görülmektedir. Cam elyafın bazı bölgelerde sıyrılma sonucu yapıdan çıkarak boşluklar oluşturduğu da gözlenmiştir (Bakınız Şekil 3b-d).

Şekil 4'te 40 N yük ve 0,5 m/s kayma hızında PA6 polimeri ile farklı oranlarda CE takviyeli PA6 kompozit malzemelerin PA6+%30CE kompozitine karşı çalıştığında kayma mesafesine bağlı olarak sürtünme katsayısı değişimi verilmiştir. Katkısız PA6 polimerinde 0,12 ile 0,167 aralığında sürtünme katsayısı değerleri elde edilmiştir. PA6+%10CE kompozitinin sürtünme katsayısı yaklaşık olarak 0,10 ile 0,11 aralığında, PA6+%20CE kompozitinin ise 0,09 ile 0,11 aralığında elde edilmiştir. PA6+%30CE kompozitinin sürtünme katsayısı ise ortalama 0,096 civarında tespit edilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi katkısız PA6 polimerinin PA6+%30CE polimer kompoziti ile temaslı çalışmasında sürtünme katsayısı daha geniş bir aralıkta davranış gösterirken PA6 ana matrise CE takviyesi yapıldığında sürtünme katsayısı pik şiddetinde daha dar bir alanda değişim gözlenmiştir. Autay ve arkadaşları [26] tarafından yapılan çalışmada katkısız PA polimerinin sürtünme katsayısı 0,6-0,7 arasında iken elyaf katkılı PA kompozitlerin sürtünme katsayısı 0,5-0,6 arasında elde edilmiştir. Daha önce yapılan çalışmalarda, kompozit yapı içerisindeki fiberlerin kısmi basıncı paylaştığı, sonrasında gerçek temas alanını azalttığı ve dolayısıyla fiber miktarının artması ile kompozit sürtünme katsayısının azaldığı belirtilmiştir [27]. Li ve Xia [28] ise PA6/KE kompozitinin sürtünme katsayısının azalmasını sebebi olarak karbon fiber ilavesi ile fiber ve PA6 matris arasındaki arayüzeyin gelişmesi ve elastiklik modülünün artması olarak açıklanmıştır. Yumuşak polimer matrise sert bir faz olan karbon fiber ilave edildiğinde, belirli yükler altında karşı disk yüzeyi ile gerçek temas alanı azalacaktır. Sonuç olarak, temas eden parçalar arasındaki adhezyon ve pulluğun azaltılmasında önemli bir rol oynamaktadır.



Şekil 3. PA6 polimeri ile PA6+%10CE, PA6+%20CE ve PA6+%30CE kompozitin kırık yüzey SEM görüntüleri.

Figure 3. Fractured surface SEM images of PA6 polymer and PA6+10%GF, PA6+20%GF and PA6+30%GF composites.



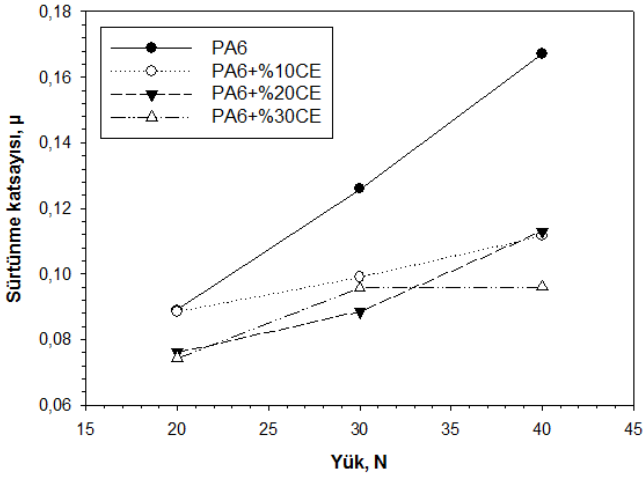
Şekil 4. PA6+%30CE kompozite karşı PA6 polimer ile CE takviyeli PA6 kompozitlerin kayma mesafesine bağlı olarak sürtünme katsayısı değişimi (Yük: 40 N, Hız 0,5 m/s)

Figure 4. Friction coefficient variation of PA6 polymer and GF reinforced composites against PA6+30%GF composite depending on sliding distance (Load: 40 N, Speed 0,5 m/s)

Şekil 5'te katkısız PA6 polimeri ile CE takviyeli PA6 kompozitlerin PA6+%30CE kompozit malzemesi ile çalıştığındaki sürtünme katsayısı-yük ilişkisi gösterilmiştir. Şekilde her bir nokta için en az üç deney yapılmış ve aritmetik ortalaması alınmıştır. Şekilde her bir noktadaki hata payı yaklaşık incelenmiş ve hata payının her nokta için yaklaşık %2-4 aralığında değişiklik gösterdiği tespit edilmiştir. Şekilde gösterildiği gibi uygulanan yükün artırılması ile hem katkısız PA6 polimerinin sürtünme katsayısı hem de farklı oranlarda CE katkılı PA6 esaslı kompozitin sürtünme katsayıları artmıştır. PA6'ya katılan CE oranının artması ile yük aralıklarında sürtünme katsayısının azaldığı gözlenmiştir. Li ve Xia [28] PA6 polimerine katılan karbon lifleri nedeniyle yapışma kuvvetini ve pulluğu etkili bir şekilde azalttığından kompozitin daha iyi sürtünme davranışı

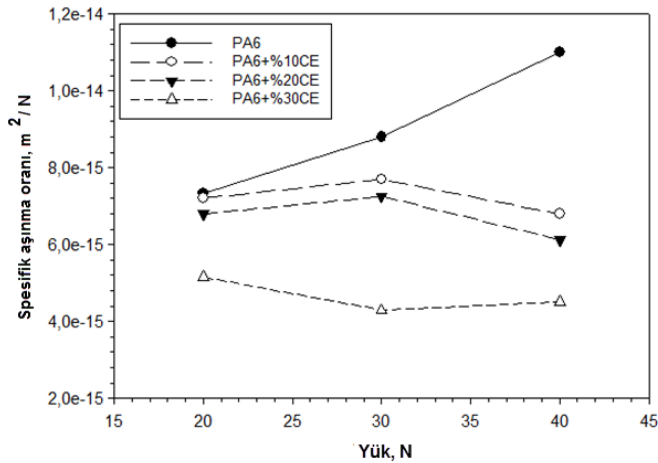
gösterdiğini belirtmişlerdir. Yük %100 oranında artırıldığında PA6 polimeri ile PA6/KE kompozitlerin sürtünme katsayılarındaki artış sırasıyla %87, %26, %49 ve %29 olarak elde edilmiştir. Yi-Lan ve arkadaşları [29] tarafından yapılan çalışmada da benzer sonuçlar elde edilmiştir. Artan yüke bağlı olarak artan sürtünme katsayısının sebebi olarak yüksek yüklerde çok daha fazla fiberin kırılması, abrasif aşınmanın daha şiddetli hale gelirken gerçek temas alanının artması olarak açıklamışlardır.

Şekil 6' da uygulanan yükün artırılması ile katkısız PA6 polimeri ile CE katkılı PA6 kompozitlerin PA6+%30CE kompozit malzemesi ile çalıştığındaki spesifik aşınma oranı-yük grafiği gösterilmiştir. Şekildeki her bir nokta için en az üç deney yapılmış ve aritmetik ortalaması alınmıştır. Şekildeki her bir noktadaki hata payının yaklaşık %2-3 aralığında değişiklik gösterdiği belirlenmiştir. Yük aralıklarında spesifik aşınma oranı, ana matrise ilave edilen cam elyaf oranının artması ile azalırken katkısız PA6 polimerinde artış gözlenmiştir. Şekil incelendiğinde yükün artırılması ile katkısız PA6'nın spesifik aşınma oranı yaklaşık %47 oranında artmıştır. Farklı oranlarda CE katkılı PA6 kompozitlerin spesifik aşınma oranları sırasıyla %28, %28 ve %20 oranlarında azalmıştır. PA6+%30CE kompozitine karşı katkısız PA6 polimeri uygulanan yük artışı ile daha fazla aşınmakta ve spesifik aşınma oranı artmaktadır. Ancak PA6 ana matrisindeki CE oranı arttıkça spesifik aşınma oranı azalmaktadır. CE oranının artması ile matristen cam elyaflar nedeniyle kolaylıkla aşınan partiküller hem disk hem de pim yüzeyler arasına girmektedir. Bu durum ise CE takviyeli PA6 pim kompozitler ve CE takviyeli PA6 kompozit disk arasındaki teması azaltmakta ve spesifik aşınma oranının azalmasına sebep olmaktadır (Bakınız Şekil 7).



Şekil 5. PA6+%30CE kompozite karşı PA6 polimer ile CE takviyeli kompozitlerin sürtünme katsayısının uygulanan yüke göre değişimi (Hız 0,5m/s)

Figure 5. Variation of friction coefficient of PA6 polymer and GF reinforced composites against PA6+30%GF composite with applied load (Speed 0,5m/s)



Şekil 6. PA6+%30CE kompozite karşı PA6 polimer ile CE katkılı kompozitlerin spesifik aşınma oranının yük ile değişimi (Yük: 40 N, Hız 0,5 m/s)

Figure 6. Variation of specific wear rate of PA6 polymer and GF reinforced composites with PA6 polymer against PA6+30%GF composite with applied load (Load: 40 N, Speed 0,5 m/s)

Şekil 7 a-d'de 0,5 m/s kayma hızında ve 40 N yükte katkısız PA6 polimeri ile farklı oranlarda CE takviyeli PA6 kompozit pimlerin ve karşı disk olan PA6+%30CE karşı disklerin spesifik aşınma yüzeyi optik mikroskop resimleri gösterilmiştir. Şekil 7 a'da görüldüğü gibi karşı disk %30 CE katkılı olduğu için cam elyaflar katkısız PA6 polimerinin yüzeyini kolaylıkla kazıyarak (Şekil 7a-pim) spesifik aşınma oranının artmasına sebep olmaktadır. Şekil 7 a pim ve disk yüzeyleri arasında çok ince bir film tabakası olduğu görülmüştür. PA6/PA6+%30CE aşınma çifti için aşınma mekanizması abrazif aşınma olarak nitelendirilebilir. Farklı oranlarda cam elyaflı PA6 kompozit pimlerin (Şekil 7 b, c ve d) karşı disk olan PA6+%30CE kompozit malzemesine karşı çalışması durumundaki disklerin aşınma yüzeyi optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde CE miktarına bağlı olarak spesifik aşınma oranının azaldığı tespit edilmiştir (Bakınız Şekil 6). PA6+%10CE kompozit pim yüzeyinde ve karşı disk yüzeyi arasında partikül oranı az olup film oluşumu az iken CE oranı

artıkça yani PA6+%20CE (Şekil 7c-pim) ve PA6+%30CE kompozit yüzeylerde (Şekil 7 d-pim) ve karşı disk yüzeylerinde (Şekil 7 c-disk ve Şekil 7 d-disk) film tabakasının arttığı gözlenmiştir. Polimer bünyesine ilave edilen kısa cam elyaflar aşınma esasındaki temas neticesinde kompozitin aşınma direncinin artmasına sebep olmaktadır. Aynı zamanda cam elyafların aşındırdığı PA6 matris partikülleri disk ve pim arasına girerek film tabakası oluşturmakta ve aşınmayı azaltıcı rol oynamaktadır. Carmona-Cervantes ve arkadaşları [30] yaptıkları çalışmada da fiber katkıların polimer matrise ilave edilmesi ile tribo-çift arasında bir transfer filmi oluşturan katı yağlayıcılar olarak hareket ettiğini ve sürtünme katsayısını azalttığını belirtmişlerdir. Chen ve arkadaşları da [31] benzer bir açıklamaya yaparak temas süresince metalik karşı disk türünün cam elyaf takviyeli PA66 kompozitin aşınma direnci ve sürtünme katsayısı üzerinde önemli oranda etkiye sahip olduklarını belirtmişlerdir. Metal yüzeyin kararlı bir polimer transfer filmi oluşturma kabiliyetinin tribolojik özelliklerde önemli derecede iyileşme sağladığı belirtilmiştir. Unal ve arkadaşları [32] saf PTFE polimeri ile cam elyaf takviyeli, karbon ve bronz katkılı PTFE polimerlerinin çelik üzerindeki aşınma deneylerinde disk yüzeyinde ince bir film tabakası oluştuğunu ifade etmişlerdir. Benzer şekilde yine Unal ve arkadaşları elektrik sektöründe kullanma amaçlı yaptıkları bir çalışmada [33] saf poliamid 6 polimeri, %15 grafit katkılı Poliamid kompoziti (PA6+%15G) ve %15 grafit, %2,%4 ve %6 wax katkılı Poliamid kompozitlerinin %15 cam elyaf takviyeli doymamış polyester termoset kompozit diskine karşı aşınma ve sürtünme davranışlarını incelemişlerdir. Yine polimerlerde karşı polyester disk malzemesinde bulunan cam elyaflar polimer pim malzemeler üzerinde aşınmalar oluşturmuştur. Toz formundaki aşınan partiküller her iki yüzey arasında sıkışarak film tabakası oluşturduğunu ifade etmişlerdir. PA6/PA6+%30CE aşınma çiftinde olduğu gibi PA6+%10CE/PA6+%30CE, PA6+%20CE/PA6+%30CE ve PA6+%30CE/PA6+%30CE aşınma çiftlerinde de aşınma mekanizması abrazif aşınma olarak ifade edilebilir.

4. Sonuçlar

PA6+%30CE kompozitine karşı temasta olan katkısız PA6 polimeri ile CE katkılı PA6 esaslı kompozitlerin aşınma deneylerinden aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır.

Hem katkısız PA6 polimeri hem de PA6+%10CE, PA6+%20CE ve PA6+%30CE kompozitlerin sürtünme katsayısı değerleri yükün artması ile artış göstermiştir.

Katkısız PA6 polimerinin sürtünme katsayısı 0,12 ile 0,167 aralığında elde edilirken PA6+%10CE kompozitin sürtünme katsayısı yaklaşık 0,10 ile 0,11 aralığında, PA6+%20CE kompozitin 0,09 ile 0,11 aralığında elde edilmiştir. PA6+%30CE kompozitin sürtünme katsayısı ise yaklaşık 0,096 civarında tespit edilmiştir.

Katkısız PA6 polimerinin spesifik aşınma oranı uygulanan yükün artması ile artarken PA6/CE kompozitlerinin spesifik aşınma oranları azalmıştır.

Uygulanan yük 20 N'dan 40 N'a artırıldığında PA6'nın spesifik aşınma oranı yaklaşık %47 oranında artarken, PA6/CE kompozitlerin spesifik aşınma oranları sırasıyla %28, %28 ve %20 oranlarında azalmıştır.

En yüksek spesifik aşınma oranı $11 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{N}$ değeri ile katkısız PA6 polimerinde elde edilirken en düşük spesifik aşınma oranı ise $4,29 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{N}$ değeri PA6+%30CE kompozitinde elde edilmiştir.

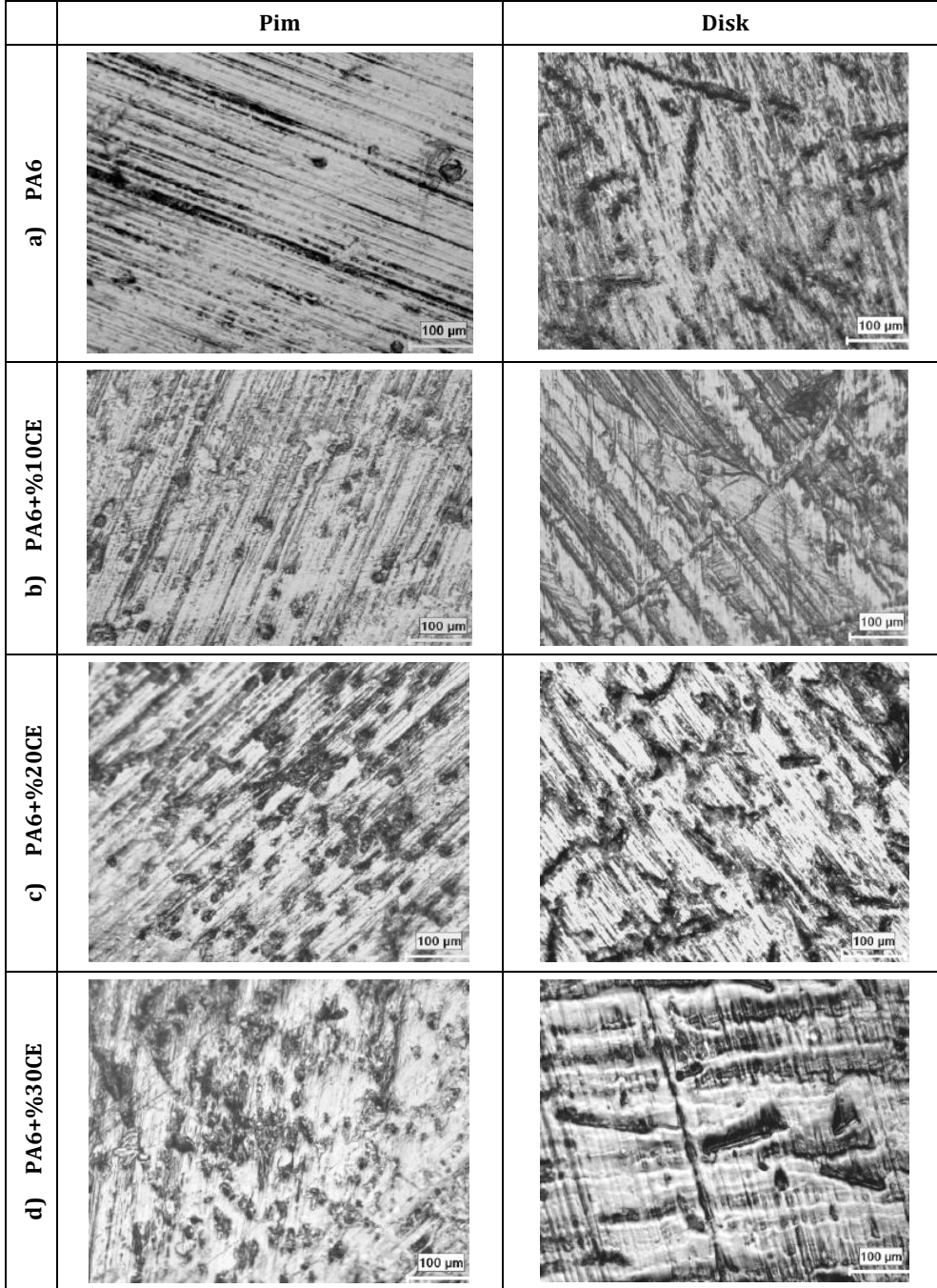
Poliamid polimerine %30 oranında CE takviyesi ile kompozitin spesifik aşınma oranı katkısız PA6 polimerine göre en az %48 oranında azalmıştır.

PA6 polimer/PA6+%30CE kompozit aşınma çiftinde olduğu gibi PA6+%10CE/PA6+%30CE, PA6+%20CE/PA6+%30CE ve PA6+%30CE/PA6+%30CE kompozit aşınma çiftlerinde de aşınma mekanizması abrazif aşınma olarak ifade edilebilir.

Polimer/polimer malzeme çiftlerinin birbiri üzerinde çalışması üzerinde literatürde geniş bir yayın bilgisi bulunmamaktadır.

Polimer malzeme çeşidi de oldukça fazladır. Bunun için endüstride karşılaşılan aşınma problemleri dikkate alınarak amaca uygun değişik kombinasyonlar hazırlanarak bilim insanları da literatüre katkı sağlayabilir.

Son olarak, endüstrideki kullanıcılar aşınmaya maruz kalan malzemeleri seçerken veya satın alırken poliamid, POM, PTFE ve UHMWPE gibi standart plastik ürünleri değil, çalışma şartlarına uygun malzemeler ile karşı çalışma malzemesi/malzemelerini iyi seçmesi gerekir.



Şekil 7. Katkısız PA6 polimeri ile CE katkılı PA6 kompozitlerin aşınma yüzeyi optik mikroskop görüntüleri (Yük: 40 N, Hız 1,0 m/s)

Figure 7. Optical microscope images of wear surface of unfilled PA6 polymer and GF reinforced PA6 composites (Load: 40 N, Sliding speed: 1,0 m/s)

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır

Kaynaklar

- [1] Kurokawa, M., Yoshitaka, U., Susumu, N. 2000. Tribological Properties and Gear Performance of Polyoxymethylene Composites, *Journal of Tribology*, Cilt. 122, 809-814.
- [2] Jun-ichi, N., Tadashi, K., Takahiko, K., Hiroyuki, K. 2009. Tribological Properties of Polymer-Sheet-Adhered Metal Hybrid Gear, *Wear*, Cilt. 266, 893-897.
- [3] Mohan Harsha, K., Seetharama Rao, Y., Jagannadha Rao, DVNJ. 2021. Comparison of Wear Behaviour of Polymer Spur Gears Using FDM Process, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1168, 012028.
- [4] Khalid Abdulkhalig, M.A. 2019. Wear and Mechanical Contact Behavior of Polymer Gears, *Journal of Tribology*, Cilt. 141, 1-10.
- [5] Prashant, K.S., Siddhartha, Akant, K.S. 2017. An Investigation on the Effects of the Various Techniques over the Performance and Durability of Polymer Gears, *Materials Today: Proceedings*, Cilt. 4, 1606-1614.
- [6] Masaya, K., Yoshitaka, U., Tomoaki, I., Susumu, N. 2003. Performance of Plastic Gear Made of Carbon Fiber Reinforced Polyamide 12, *Wear*, Cilt. 254, 468-473.
- [7] Mohit, J., Santosh, P., Ghosh, S.S. 2019. A Review on Failure Characteristics of Polymeric Gears, *AIP Conference Proceedings*, 2148, 030057.
- [8] Dighe, A.D., Mishra, A.K., Wakchaure, V.D. 2014. Investigation of Wear Resistance and Torque Transmission Capacity of Glass Filled Polyamide and PEEK Composite Spur Gears, *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, Cilt. 3(3), 299-303.
- [9] Mao, K. 2007. A New Approach for Polymer Composite Gear Design, *Wear*, Cilt. 262, 432-441.
- [10] Prashant, K.S., Siddhartha, Akant, K.S. 2018. An investigation on the Thermal and Wear Behavior of Polymer Based Spur Gears, *Tribology International*, Cilt. 118, 264-272.
- [11] Mao, K., Langlois, P., Hu, Z., Alharbi, K., Xu, X., Milson, M., Li, W., Hooke, C.J., Chetwynd, D. 2015. The Wear and Thermal Mechanical Contact Behaviour of Machine Cut Polymer Gears, *Wear*, Cilt. 332-333, 822-826.
- [12] Li, W., Wood, A., Weidig, R., Mao, K. 2011. An Investigation on the Wear Behaviour of Dissimilar Polymer Gear Engagements, *Wear*, Cilt. 271, 2176-2183.
- [13] Yelle, H., Poupard, M., 1975. Ultra-High Molecular Weight High-Density Polyethylene as a Gear Material, *Polymer Engineering & Science*, Cilt. 15, 90-96.
- [14] Akkurt, S., Erten, M. 1994. Plastik Dişli Çarkların Hesap ve Konstrüksiyon Bakımından İncelenmesi. 6. Uluslararası Makine Tasarım ve İmalat Kongresi, ODTÜ, 453-462.
- [15] Masaya, K., Yoshitaka, U., Susumu, N. 2000. Performance of Plastic Gear Made of Carbon Fiber Reinforced Polyether-Ether-Ketone: Part 2, *Tribology International*, Cilt. 33, 715-721.
- [16] Pek, M.A. 2002. Polimerik dişlilerde sonlu elemanlar metodu ile gerilme analizi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora tezi, Isparta.
- [17] Takeshi, K., Yasuharu, N., Takanori, K., Gaetan, B., Jean-Christophe, A., Vincent, F., Phillippe, K. 2020. Tribological Behavior of Glass Fiber Reinforced-PA66 in Contact with Carbon Steel under High Contact Pressure, Sliding and Grease Lubricated Conditions, *Wear*, Cilt. 456-457, 203383.
- [18] Mihai Tiberiu, L., Radu, V., Cornel Catalin, G. 2019. Temperature, Pressure, and Velocity Influence on the Tribological Properties of PA66 and PA46 Polyamides, *Materials*, Cilt. 12(20), 3452.
- [19] Lates, M.T. 2020. Friction induced heating properties of the polyamide/steel type contacts, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, Cilt. 898, 012004.
- [20] Myron, C., Antoni S., Anatoliy, K., Alina, Y. 2023. Evaluation of Wear Resistance of Functional Composite Polymeric Materials and Durability of Metal-Polymer Bearings, *Advances in Science and Technology Research Journal*, Cilt. 17(2), 258-267.
- [21] Kian, B., Pixiang, L., Andreas, A.P. 2019. Tribological Performance Improvement of Polyamide against Steel Using Polymer Coating, *Tribology Transactions*, Cilt. 62(3), 1-11.
- [22] <https://www.stagnoligears.com/en/motor-gears/glass-fibre-reinforced-polyamide-6-moulding/> (Erişim Tarihi: 11.05.2023)
- [23] <https://backyardbandit.com/products/aleko-fiberglass-reinforced-nylon-gear-rack-with-metal-insert-3-3-feet-1ngrack33-ap> (Erişim Tarihi: 11.05.2023)
- [24] <https://www.rct-online.de/en/fasteners/nuts/30424/knurlled-nut-with-knurl-made-of-pa-glass-fibre-reinforced> (Erişim Tarihi: 11.05.2023)
- [25] Friedrich, K. 1989. Sliding wear performance of different polyimide formulations, *Tribology International*, Cilt. 22(1), 25-31.
- [26] Autay, R., Missaoui, S., Mars, J., Dammak, F. 2019. Mechanical and Tribological Study of Short Glass Fiber-Reinforced PA 66, *Polymers and Polymer Composites*, cilt. 27(9), 587-596.
- [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*, Cilt. 2013, 320837.
- [28] Li, J., Xia Y.C. 2010. The Influence of Carbon Fiber Content on the Tribological Properties of PA6 Composites, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Cilt. 29(5), 771-778.
- [29] 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*, Cilt. 29(4), 494-507.
- [30] Carmona-Cervantes, I.A., Paredes-Mogica, E.A., Lopez-Cabrera, H.R., Figueroa-Lopez, U., Vieyra-Ruiz, H., Guevara-Morales, A. 2022. Tribological behavior of glass fiber reinforced polyamide (PA-GF) and recycled polyvinyl butyral (r-PVB) blends, *Materials Letters*, Cilt. 319, 132261.
- [31] Chen, Y.K., Modi, O.P., Mhay, A.S., Chrysanthou, A., O'Sullivan, J.M. 2003. 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*, Cilt. 255, 714-721.
- [32] Unal H., Mimaroglu A., Kadioglu U., Ekiz H. 2004. Sliding friction and wear behavior of Polytetrafluoroethylene and its composites under dry conditions, *Materials&Design*, Cilt. 25, 239-245.
- [33] Unal H., Kaya A.U., Esmer K., Mimaroglu A., Poyraz B. 2016. Influence of wax content on the electrical, thermal and tribological behavior of a polyamide 6/graphite composite, *J. of Polymer Engineering, Cilt. 36, Sayı 3, 279-286.*