

POLİMER KOMPOZİT VE ÇELİK DİSKE KARŞI CAM ELYAF TAKVİYELİ POLİ-ETER-ETER-KETON (PEEK) KOMPOZİTİN AŞINMA ÖZELLİKLERİ

Hüseyin ÜNAL^{1*}, Salih Hakan YETGİN², Veysel Furkan ÜNAL³

¹ Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, SAKARYA, ORCID No : <http://orcid.org/0000-0003-0521-6647>

² Tarsus Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Tarsus/MERSİN. ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-6068-9204>

³ Johannes Kepler University, Faculty of Engineering, Dept. of Polymer Engineering, Linz, AUSTRIA. ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-6639-0393>

Anahtar Kelimeler	Öz
PEEK Cam Elyaf Aşınma Sürtünme Termoset poliester	<i>Bu çalışmada, ağırlıkça %30 cam elyaf (CE) katkılı poli-eter-eter-keton (PEEK) polimerinin termoset poliester kompozit ve AISI 316L paslanmaz çelik diske karşı kuru ortam şartları altında sürtünme ve aşınma özellikleri incelenmiştir. Sürtünme ve aşınma çalışmaları pim-disk aşınma test cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Aşınma ve sürtünme testleri 1000 m kayma mesafesinde, 0.5 m/s kayma hızında ve 20, 40 ve 60 N yük altında yapılmıştır. Çalışma sonucunda, her iki disk için uygulanan yükün artması ile PEEK/30CE kompozitin sürtünme katsayısı ve aşınma oranı artmıştır. En düşük sürtünme katsayısı ve aşınma oranı, sırasıyla 0.24 ve $3.31 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{N}$ değerleri ile 20 N yük altında AISI 316L paslanmaz çelik disk kullanıldığında elde edilmiştir.</i>

WEAR BEHAVIOURS OF GLASS FIBER REINFORCED POLY-ETHER-ETHER-KETONE COMPOSITE (PEEK) VERSUS POLYMER COMPOSITE AND STEEL COUNTERPARTS

Keywords	Abstract
PEEK Glass fiber Wear Friction Thermoset polyester.	<i>In this study, the friction and wear behaviors of 30wt.% glass fiber reinforced poly-ether-ether-ketone (PEEK) have been studied versus thermoset polyester composite and AISI 316L steel counterparts under dry sliding conditions. Friction and wear studies were carried out using a pin-on-disc wear test rig. Friction and wear tests were run at 1000 m sliding distance, 0.5 m/s sliding speed and under the applied load of 20, 40 and 60 N. The results show that the coefficient of friction and specific wear rate of glass fiber reinforced PEEK composites increased with increasing applied load for both of discs. The lowest coefficient of friction and specific wear rate were obtained when using AISI 316L steel disc under 20 N load with a value of 0.24 and $3.31 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{N}$, respectively.</i>

Araştırma Makalesi	Research Article
Başvuru Tarihi : 10.03.2022	Submission Date : 10.03.2022
Kabul Tarihi : 04.10.2022	Accepted Date : 04.10.2022

1. Giriş

Geleneksel malzemelerin yerini alan polimer malzemelerin uygulama alanları sürekli artmaktadır. Poli-eter-eter-keton (PEEK) polimeri yarı-kristalli yüksek performanslı termoplastik polimerlerinden birisidir. Oldukça yüksek termal direnç (camsı geçiş sıcaklığı, $T_g \sim 150 \text{ }^\circ\text{C}$, ergime sıcaklığı $T_m \sim 350 \text{ }^\circ\text{C}$,

kullanım sıcaklığı $T_k \sim 250 \text{ }^\circ\text{C}$ ve bozunma sıcaklığı $T_b \sim 580 \text{ }^\circ\text{C}$) (Kemmiş, 2010; Zhang, Wetzel ve Wang, 2015), kimyasal direnç ve olağanüstü mekanik özelliklere sahip PEEK polimeri bilimsel çalışmaların merkezi haline gelmiş ve mühendislik, havacılık, uzay ve özellikle sağlık/biomedikal uygulamalarında kullanım alanı bulmuştur. Yüksek sıcaklıklarda termal kararlılık

* Sorumlu yazar; e-posta : unal@sakarya.edu.tr



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

gerektiren bu uygulamalar nedeniyle PEEK polimeri, poli-fenilen-sülfür (PPS), poli-benzimidazol (PBI) ve poli-imid (PI) gibi metaller ile karşılaştırılabilen birkaç polimerden birisidir. Buna ek olarak, PEEK polimeri yüksek dayanım ve modül, mükemmel tokluk ve yüksek aşınma direnci gibi özellikleri nedeniyle tribolojik ve mekanik uygulamalar için bu gruptaki en uygun polimer türüdür. PEEK polimerinin gerek mekanik gerekse tribolojik özelliklerini geliştirmek için en başarılı yöntemlerden bir tanesi cam elyaf ve karbon elyaf gibi fiberlerin üretim esnasında ilave edilmesidir (En-Zhong, Bin-Shi, Hai-Dou ve Wei-Ling, 2013; Ganesh ve Dhamejani, 2016; Haofei, Xujing, Kai, Yazhuo ve Wenjun, 2019; Hüseyin, Abdullah ve Ahmet, 2017; Kumar ve Rajmohan, 2019; Laux, Jean, Sue, Bremner ve Wong, 2016; Mir ve Charoo, 2019; Nevin, Sadi ve Taner, 2016; Song, Liu, Wang, Liao ve Liu, 2015; Zhang ve diğ., 2015).

2. Bilimsel Yazın Taraması

PEEK polimerinin sürtünme katsayısının ve aşınma oranının belirlenmesi için birçok çalışma yapılmıştır. PEEK polimeri ile ilgili yapılan çalışmalarda elyaf miktarının, ortam şartlarının (kuru/sulu), uygulanan yükün, kayma hızının, sıcaklığın ve disk yüzey pürüzlülüğünün etkisi incelenmiştir. Kumar ve Rajmohan (2019) çok duvarlı karbon nanotüp (ÇDKNT) katkılı PEEK kompozitlerin tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada, kuru ortam şartları altında, pim-disk sistemi kullanılarak uygulanan yükün (10-50 N), kayma hızının (0.63-3.0 m/s) ve ortam sıcaklığının (75-120 °C) sürtünme katsayısına etkisi incelenmiştir. Artan yük ve ortam sıcaklığının sürtünme katsayısını artırdığı belirtilmiştir. PEEK polimerine ilave edilen ÇDKNT katkının aşınma direncini geliştirdiği belirtilmiştir. Düşük sürtünme katsayısı ve yüksek aşınma direnci 1.6 m/s kayma hızında, 42 N yük altında, 80 °C ortam sıcaklığında ve %0.8ÇDKNT içeriğinde elde edildiği belirtilmiştir. Ganesh ve Dhamejani (2016) uygulanan kuvvet (2-8kg) ve ortam sıcaklığının (50-100-150 °C) PEEK ve ağırlıkça %30 cam elyaf katkılı PEEK kompozitin kuru ortam şartları altındaki tribolojik özelliklere etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, ağırlıkça %30 cam elyaf katkılı PEEK kompozitin 150 °C sıcaklık altında PEEK polimerine göre aşınma direncini %75 oranında geliştirdiği belirtilmiştir. Ayrıca, 80 N yükte ve kuru kayma şartlarında PEEK kompozitin aşınma direncinin geliştiği belirtilmiştir. Uygulanan yükün artması ise aşınma oranını azaltmıştır. Özel, Abdullah ve Hüseyin (2015) farklı oranlarda (%20-30) cam elyaf ve karbon elyaf katkılı PEEK, PTFE, PA66 ve PA46 kompozitlerinin 20-60 N yük aralıklarında, kuru ortam şartları altında ve pim-disk sistemini kullanarak tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda artan yüke bağlı olarak sürtünme katsayısının ve aşınma oranının arttığı belirlenmiştir. En düşük aşınma oranının ağırlıkça %20 cam elyaf katkılı PTFE kompozitinde elde edildiği

belirtilmiştir. Li, Guo, Wang, Xu ve Liu (2013) PEEK ve ağırlıkça %30 kısa cam elyaf katkılı PEEK kompozitin oda sıcaklığında bilye-disk sistemi kullanılarak aşınma özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada, uygulanan yük (100-400 N) ve kayma süresinin (30-120 dak.) sürtünme katsayısı ve ağırlık kaybı üzerine etkisi de araştırılmıştır. Çalışma sonucunda uygulanan yük ve kayma süresi ile sürtünme katsayısının ve ağırlık kaybının başlangıçta hızlı bir şekilde arttığı daha sonrasında ise sabit kaldığı belirtilmiştir. Cam elyaf katkılı PEEK kompozitin aşınma direncinin geliştiği belirtilmiştir. Lind, Lindholm, Qin ve Kassman (2015) karbon fiber, PTFE ve yağlayıcı katkılı PEEK kompozitlerin bilye-disk sistemi ile kuru ortamda aşınma davranışlarını izlemişlerdir. Çalışmada ayrıca uygulanan yük (5-15 N) ve ortam sıcaklığının (23-80-120-150 °C) etkileri de incelenmiştir. 120 °C sıcaklık altında sürtünme katsayısının 0.03 ile 0.3 arasında değiştiği belirtilmiştir. Karbon fiber ve PTFE ilave edilmesi ile hem sürtünme katsayısının hem de aşınma direncinin geliştiği belirtilmiştir. Artan ortam sıcaklığı ile PEEK kompozitlerin sürtünme katsayısı ve aşınma oranı azalmıştır. En düşük sürtünme katsayısı ve aşınma oranı 150 °C sıcaklık altında PTFE katkılı PEEK kompozitinde elde edilmiştir.

Bununla birlikte, sulu ortamlarda çalışan polimerlerin sürtünme ve aşınma davranışlarının kuru sürtünme durumundan çok farklı olduğu bilinmektedir. Suyun emilmesi ve polimer yüzeylerinin plastikleşmesi polimerin sürtünme ve aşınma özelliklerini etkilemektedir. Ünal ve Mimaroğlu (2006) karbon fiber katkılı PEEK kompozitlerin sulu ortam şartları altında tribolojik performanslarını incelemişlerdir ve sürtünme katsayısının sulu ortam şartları altında kuru ortama göre çok daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. Ancak, Zeng, He ve Yang (1987) takviyeli polimerlerin sürtünme ve aşınma özelliklerine suyun hem yararlı hem de zararlı etkisi olabileceğini belirtmiştir. Suyun, transfer film tabakasının oluşumunu engelleyeceği, elyaf-matris arayüzeyine penetre olup korozif etki yapabileceğini belirtmiştir. Diğer yandan, suyun temas noktasındaki sürtünme ısısını azaltıp temas sıcaklığını azaltacağı ve böylelikle polimerin sertlik ve yorulma ömrü gibi özelliklerinin korunacağı belirtilmiştir. Suyun diğer bir yararlı etkisinin ise sürtünme bölgesinde aşınma kaynaklı partiküllerin uzaklaştırılarak abrasif etkinin azaltılması olarak belirtilmiştir. En-Zhong ve diğ. (2013), uygulanan yük ve kayma hızı gibi parametrelerin kısa cam fiber katkılı PEEK kompozitlerinin kuru ve sulu ortam şartları altında tribolojik özelliklere etkilerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda sulu ortam şartları altında cam elyaf katkılı kompozitlerin yüksek aşınma özellikleri gösterdiğini belirtmişlerdir. Yüksek aşınma direnci ve düşük sürtünme katsayısının yüksek yüklerde ve sulu ortam şartları altında elde edildiği belirtilmiştir. Sulu ortamın temas noktasında yağlayıcılık etkisi nedeniyle cam elyaf takviyeli PEEK kompozitin ergimesinin engellendiği ve

tribolojik özelliklerin geliştiği belirtilmiştir. Zhong, Xie, Sui ve Yang (2011) kısa karbon elyaf (KE) ve nano-zirkonyum dioksit (ZrO₂) katkılı PEEK kompozitlerinin farklı yükler kullanarak (2-8 MPa), pim-disk sistemi ile sulu ortam şartları altında tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda özellikle yüksek yüklerde KE ve ZrO₂ katkılarının PEEK kompozitin aşınma direncini geliştirdiği belirtilmiştir. Karbon elyafın aşınma süreci süresince yükün büyük bir çoğunluğunu karşıladığı ve matrisin aşınmasını engellediği belirtilmiştir. Uygulanan yükün artması ile hem sürtünme katsayısının hem de aşınma oranının azaldığı belirtilmiştir. Zhang ve diğ. (2015) blok-halka aşınma sistemini kullanarak PEEK polimerinin tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Deneysel çalışmalar, hem kuru ortamda hem de dizel gibi yağlayıcı ortamlarda gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda, kuru ortam şartları altında 0.45 civarında sürtünme katsayısı elde edilirken dizel ortamında sürtünme katsayısı 0.1 civarında elde edilmiştir. Thiago, Helio ve Amilton (2019) pim-disk sistemi ile şanzıman yağı kullanarak PEEK polimerinin tribolojik özelliklerini incelemiştir.

Aşınma direncinin artırılıp sürtünme katsayısının azaltılmasının en önemli yöntemlerinden birisi de uygun polimer-metal veya polimer-polimer malzeme kombinasyonunun seçilmesidir. Dolayısıyla tribolojik testlerde, ortam şartlarının, yükün, hızın ve sıcaklığın yanında karşı disk malzemesinin de polimer malzeme ile uyumlu olması gerekmektedir. Song ve diğ. (2015) cam elyaf katkılı PEEK polimerinin bilye-disk sistemi kullanarak hem kuru hem de yenidoğan buzağı serumu (newborn calf serum) (NCS) ortamında çok yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (ÇYMAPE) ve poli-tetra-flor-etilen (PTFE) polimer disklere karşı tribolojik özelliklerini çalışmışlardır. Hüseyin ve diğ. (2017) ağırlıkça %30 cam elyaf katkılı PEEK kompozitlerin kuru ortam şartları altında pim-disk sistemi kullanarak tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Karşı disk malzemesi olarak ağırlıkça %10 PTFE katkılı PEEK polimeri ile ağırlıkça %40 cam elyaf katkılı PPS polimeri kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, artan yük ile birlikte PEEK/30CE kompozitin sürtünme katsayısının ve aşınma oranının arttığı belirlenmiştir. PEEK/30CE kompozitin, PEI/10%PTFE disk ile çalıştığı en iyi tribolojik performansı gösterdiği belirlenmiştir. Brockett ve diğ. (2012) kalça protezi için karbon fiber katkılı PEEK kompozitin seramik üzerindeki aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, PEEK polimerinin biotribolojik performansının elyaf takviyesi ile geliştirilebileceği belirtilmiş ve kullanılan polimer-seramik sürtünme yatağının klinik ihtiyaçları karşılayabileceği belirtilmiştir. Elektriksel uygulamalarda kullanılan bazı parçalarda hem elektriksel yalıtıcılık, hem mekanik performans hem de yüksek aşınma direnci istenmektedir. Bu sebeple bu çalışmada ağırlıkça %30 oranında cam elyaf takviyeli poli-eter-eter-keton (%30CE/PEEK) polimer kompoziti seçilmiştir. Aynı

zamanda aşınmanın meydana geldiği çalışma ortamında karşı temas malzemesinden de hem yalıtıcılık hem de belirli bir mukavemet değeri beklenmektedir. Bu sebeple karşı disk malzeme olarak termoset esaslı kompozit malzeme seçilmiştir. Geleneksel olarak triboloji deneylerinde yaygın olarak kullanılan çelik malzeme de kullanılarak karşılaştırma yapılmıştır. Yani, ağırlıkça %30 oranında cam elyaf takviyeli poli-eter-eter-keton (%30CE/PEEK) polimer kompozitin, AISI 316L paslanmaz çelik ile termoset poliester kompozit disklere karşı kuru kayma çalışma ortamındaki aşınma ve sürtünme davranışları incelenmiştir. Elektriksel uygulamalarda kullanılabilirliği hakkında fikir oluşturulmuştur. Deneyler disk üzerinde pim düzeneği bulunan bir aşınma cihazında gerçekleştirilmiştir. Tribolojik testler, 0.5 m/s kayma hızında 20, 40 ve 60 N yük altında gerçekleştirilmiştir.

3. Yöntem

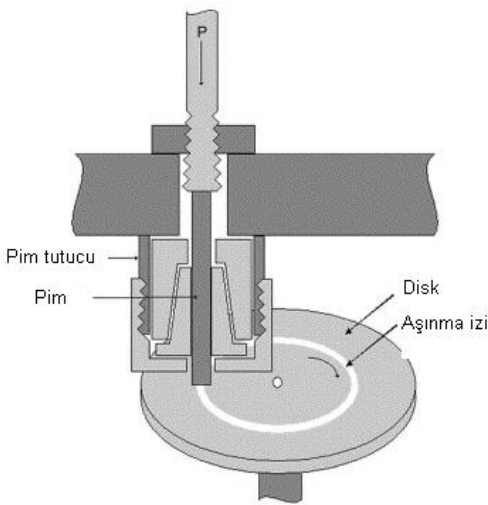
Ağırlıkça %30 cam elyaf takviyeli PEEK polimer kompozit çubuk formunda ekstrüzyonla üretilmiş olup Ketron GF30 PEEK ticari adı ile Quadrant Plastics firmasından temin edilmiştir. Ağırlıkça %30 cam elyaf takviyeli PEEK polimer kompozitin mekanik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Aşınma deneyleri, ASTM G99 standardına uygun olarak pim-disk aşınma cihazında ve kuru ortam şartlarında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan termoplastik pim malzemeler (PEEK+%30CE), özel olarak imal edilmiş enjeksiyon kalıpları kullanarak ERAT marka bir enjeksiyon makinasında 250-280 °C ısıtıcı sıcaklık aralığında ve 100 bar enjeksiyon basıncında 6 mm çapında ve 50 mm uzunluğunda olacak şekilde kalıplanmıştır. Enjeksiyonla kalıplama işleminden önce matris malzemesi 80 °C fırın ortamında 4 saat süresince kurutulmuştur. Tribolojik testlerde, karşı disk malzeme olarak ağırlıkça %25 oranında uzun cam elyaf takviyeli ve %40 oranında kalsiyum karbonat katkılı doymamış polyester termoset kompozit malzemesi ve AISI 316L paslanmaz çelik kullanılmıştır. Deneylerden önce, pim ve disk yüzeyleri 1200 nolu zımpara ile zımparalanmıştır. Her test öncesinde hem disk yüzeyleri hem de pim yüzeyleri asetonla temizlenip kurutulmuştur. Şekil 1'de tribolojik testlerin gerçekleştirildiği pim-disk aşınma cihazının şematik resmi verilmiştir. Pim-disk test makinası, makinanın ana gövdesi üzerine monte edilmiş bir elektrik motoru, bir yük kolu, bir elektronik yük hücresi ve verilerin gönderildiği bir bilgisayardan meydana gelmektedir. Aşınma cihazının ana gövdesinde dönen bir disk vardır. Bu disk aşınma cihazına bağlı olan 2 kW gücünde bir elektrik motoru sayesinde dönmektedir. Diskin üzerine deneylerde kullanılan çelik ve termoset poliester kompozit disk malzemeleri bir vida yardımıyla bağlanır. Kol üzerinde bulunan bir mekanizma ile 6 mm çapındaki polimer pim kola bağlanmıştır. Makine çalıştırıldığında, pim numunesinin diske sürtünmesiyle pim numunesinin bağlı olduğu kol aparatı da disk

dönme yönüne hareket etmek istemektedir. Bu ileriye doğru olan hareket yanal kuvveti vermektedir. Bu yanal kuvvet ise bir yük hücresi (Load-cell) ile ölçülmüştür. Alınan veriler aynı zamanda direk bilgisayarda Excel programında depolanmıştır. Deneylerde dakikada 1000 yanal yük verisi alınmış aynı zamanda deneylerde kullanılan yüke bölünerek Excel programında grafik haline getirilmiştir. Deneylerde kullanılan termoplastik esaslı polimerlerinin tribolojik deneyleri proses şartları Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 1

Deneylerde Kullanılan PEEK/30CE Polimer Kompozitin Fiziksel, Mekanik ve Termal Özellikleri.

Özellikler	Birimi	Standart	PEEK+%30CE
Yoğunluk	(g/cm ³)	ISO1183/-1	1.51
Çekme mukavemeti	(MPa)	ISO527-1/-2	80
Kopmadaki uzama	%	ISO527-1/-2	3.5
Elastiklik modülü	(MPa)	ISO527-1/-2	7000
Charpy çentik darbe mukavemeti	(kJ/m ²)	ISI179-1/1eA	3
Ergime sıcaklığı	(°C)	ISO11357-1/3	340
Isıl deformasyon sıcaklığı, 1.8MPa	(°C)	ISO575-1/-2	230
24 saatte su emme (23 °C)	(%)	ISO62	0.05
Doymada su emme (23 °C)	%	-	0,35
Sertlik	Shore D	ISO868	87
Sürekli çalışma sıcaklığı	(°C)	-	250
Minimum çalışma sıcaklığı	(°C)	-	-20
Yanmazlık sınıfı, 3 mm		UL94	V-0
Pim PEEK polimer kompozit			



Şekil 1. Pim-Disk Aşınma Test Cihazı Şematik Gösterimi

Tablo 2

Pim-Disk Aşınma Testi İçin Deney Şartları

Parametreler	Deney şartları
Yük (N)	20, 40, 60
Kayma hızı (m/s)	0.50
Sıcaklık (°C)	22±2
Nem (%)	57±2
Kayma mesafesi (m)	1000
Yüzey pürüzlülüğü (Ra, µm)	0.35-0.40

Sürtünme katsayısı yanal kuvvetin, normal uygulanan kuvvete oranı olarak ifade edilir ve Eşitlik 1 ile hesaplanır. Burada, μ : Sürtünme katsayısını, F_S : Yanal sürtünme kuvveti (N) ve F_N ise Normal kuvveti (N) ifade eder.

$$\mu = \frac{F_S}{F_N} \quad (1)$$

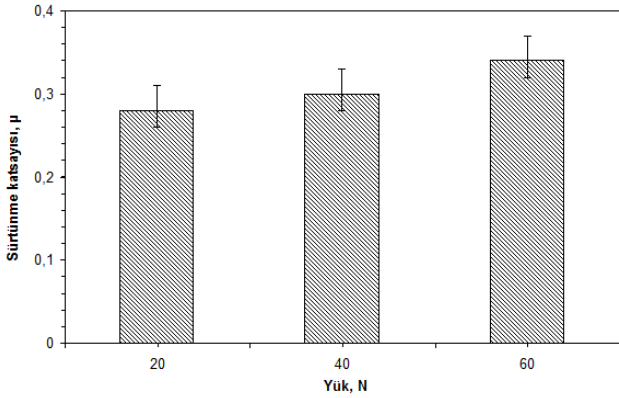
Her bir aşınma testinden önce ve sonra PEEK esaslı kompozit pimlerin ağırlıkları ölçülmüş ve ağırlık kaybı (Δm) tespit edilmiştir. Eşitlik 2’de verilen formül kullanılarak, aşınma test numunelerinin spesifik aşınma hızları (K_o) hesaplanmıştır. Burada; Δm : ağırlık kaybı (g), L : kayma mesafesi (m), ρ : malzemenin yoğunluğu (g/cm³), F : uygulanan yük (N). Her bir aşınma testi en az üç kez tekrarlanmış olup ortalama değerler verilmiştir.

$$K_o = \frac{\Delta m}{L * \rho * F} \quad (2)$$

Bu makalede araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

4. Bulgular

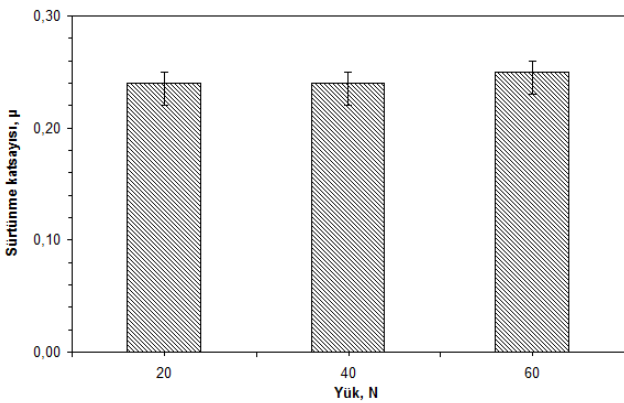
Şekil 2’de ağırlıkça %30 cam elyaf katkılı PEEK polimerinin 0.5 m/s kayma hızında 20-40-60 N yük aralıklarında termoset poliester kompozit diske karşı sürtünme katsayısı sonuçları verilmiştir. 20 N yük altında PEEK/30CE kompozitin sürtünme katsayısı 0.28 iken, 40 N yük altında 0.30 ve 60 N yük altında ise 0.34 olarak elde edilmiştir. Uygulanan yükün 20 N’den 60 N’a artırılması ile PEEK/30CE kompozitin sürtünme katsayısı %21.4 oranında artmıştır. En-Zhong ve diğ. (2013) uygulanan yükün %200 oranında artırılması ile sürtünme katsayısının %14 oranında artarak 0.28’den 0.32’ye arttığını, uygulanan yükün daha da artırılması ile sürtünme katsayısı değerinin 0.36’ya ulaştığını belirtmişlerdir.



Şekil 2. PEEK/30CE Polimer Kompozitin Termoset Poliester Kompozit Diske Karşı Sürtünme Katsayısı-Yük Grafiği

Şekil 3'te ise ağırlıkça %30 cam elyaf katkılı PEEK polimerin AISI 316L paslanmaz çelik diske karşı sürtünme katsayısı sonuçları verilmiştir. Uygulanan yüke bağlı olarak PEEK/30CE kompozitin sürtünme katsayısının değişmediği belirlenmiştir. 20-60 N yük aralıklarında PEEK/30CE kompozitin sürtünme katsayısı 0.24-0.25 elde edilmiştir. Bilindiği gibi PEEK polimeri viskoelastik bir malzemedir ve uygulanan yüke bağlı olarak sürtünme katsayısındaki değişim Eşitlik 3 ile açıklanmaktadır. Bu denkleme göre artan yük ile birlikte sürtünme katsayısı azalmaktadır. Ancak uygulanan yük, PEEK/30CE kompozitlerin limit değerlerine ulaştığında, hem sürtünme katsayısı hem de aşınma oranı artmaktadır. Bunun sebebi ise sürtünme ısısının temas noktasındaki sıcaklığı artırarak polimer zincirlerinin yumuşamasına sebep olmasıdır (En-Zhong ve diğ., 2013). Burada, μ : sürtünme katsayısı, N: uygulanan yük, K ve n ise malzeme ile ilgili sabitlerdir ve "n" değeri $2/3 < n < 1$ arasındadır.

$$\mu: KN^{(n-1)} \quad (3)$$



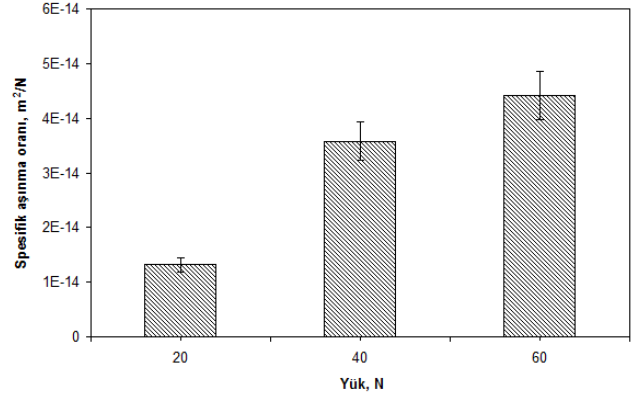
Şekil 3. PEEK/30CE Kompozitin AISI 316L Paslanmaz Çelik Diske Karşı Sürtünme Katsayısı-Yük Grafiği

Kuru sürtünme durumunda, sürtünme kaynaklı sıcaklığın, sürtünme katsayısı üzerinde güçlü bir etkisi olduğu Song ve diğ. (2015) tarafından da bildirilmiştir. Uygulanan sıcaklığın camsı geçiş sıcaklığı (143 °C) altında olduğu durumlarda, PEEK polimerinin sürtünme katsayısının düşük olduğu, camsı geçiş sıcaklığında (143 °C-152 °C) sürtünme katsayısının aniden arttığı ve 180 °C üzerindeki sıcaklıklarda sürtünme katsayısının çok yüksek değerlerde elde edildiği belirtilmiştir. Sabit 60 N yük altında, termoset poliester kompozit disk ve paslanmaz çelik diskin PEEK/30CE kompozitin sürtünme katsayısı üzerine etkisi incelendiğinde, termoset poliester kompozit diskin paslanmaz çelik diske göre sürtünme katsayısının %36 oranında daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bunun sebebi ise paslanmaz disk yüzeyinden oluşan ve disk ile polimer arasındaki teması azaltan ince bir transfer film tabakasının oluşumudur. Oluşan bu transfer film tabakası, aşınma prosesi devam ettiğinde kararlı hal aşamasında daha düşük sürtünme katsayısı elde edilmesine sebep olmuştur. Bilindiği gibi, aşınma prosesi süresince, metal-metal, polimer-metal ve polimer-polimer arasında meydana gelen malzeme transferi aşınma ve sürtünme özelliklerinin belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Birçok pratik sistemde, iki malzemenin uyumsuzluğu ve metalik malzemenin ısı transfer özellikleri nedeniyle metal-polimer teması tercih edilmektedir. Bazı durumlarda, iki farklı polimer arasında da temas durumu mevcuttur. Polimer-metal temasında transfer polimerden metale doğru gerçekleşirken polimer-polimer sistemlerinde bu durum çok net değildir. Kayma hızı, yük, atmosfer, sıcaklık, polimer türü, kristallik, mekanik özellikler, yüzey pürüzlülüğü ve karşı diskin kimyasal bileşimi gibi birçok parametre transfer film tabakasının oluşumunu etkilemektedir (Bahadur, 2000). Jain ve Bahadur (1978) polietilen (PE) film ile politetrafloretillen (PTFE), polivinilklorür (PVC), polipropilen (PP) ve polimetilmetakrilat (PMMA) diskler ile polietilenteraftalat (PET) film ile PE ve PVC disklerin aşınma ve sürtünme özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, malzeme transferinin her zaman düşük enerji yoğunluğuna sahip polimerden yüksek enerji yoğunluğuna sahip polimere gerçekleştiğini belirtmiştir. Ayrıca, transfer film tabakası kalınlığının tribolojik özellikler üzerine etkisinin olmadığı belirtilmiştir. Ancak, Abdulaziz, Wen ve Li (2019) ise TiO₂ katkılı PEEK polimerlerinin çelik diske karşı aşınma özelliklerini inceledikleri çalışmada, PEEK polimerinin karşı disk yüzeyinde düzensiz ve ince bir film tabakası oluşturduğunu, TiO₂ katkılı PEEK kompozitlerin ise daha düzenli ve daha kalın bir transfer tabakası oluşturduğunu belirtmiştir. Yapılan bu çalışmada da, artan yük ile birlikte, PEEK/30CE kompozitin çelik disk ile çalıştığı durumda, PEEK polimerinden kırılarak ayrılan cam elyafların aşınma yüzeyinde homojen olarak şekillendiği ve oluşan transfer film tabakası ile düşük sürtünme katsayısı ve

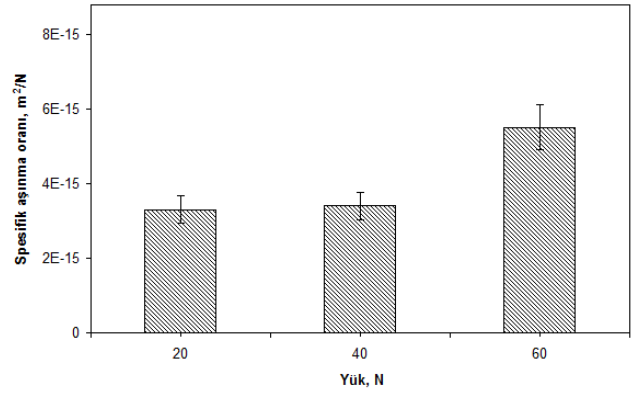
aşınma oranının elde edildiği belirlenmiştir. Benzer bir sonuç You, Du-Xin, Gao, Ruo ve Xin (2016) tarafından yapılan çalışmada da elde edilmiştir. Uygulanan yük aralıkları içinde düşük sürtünme katsayısı 20 N yük altında 0.24 değeri ile paslanmaz çelik disk kullanıldığında elde edilmiştir.

Şekil 4 ve 5'te uygulanan yüke bağlı olarak sırasıyla termoset poliester kompozit disk ve AISI 316L paslanmaz çelik diske karşı ağırlıkça %30 cam elyaf takviyeli PEEK polimerinin kuru kayma şartları altındaki spesifik aşınma oranı verilmiştir. Şekillerde görüldüğü gibi termoset poliester kompozit diskteki aşınma oranı 10^{-14} m²/N civarında iken AISI 316L paslanmaz çelikteki aşınma oranı 10^{-15} m²/N civarında elde edilmiştir. PEEK/30CE polimerinin aşınma oranı hem uygulanan yükten hem de karşı disk malzemesinden etkilenmiştir. Artan temas basıncı ile aşınma oranı artmıştır. Yükün %200 oranında artmasıyla termoset poliester kompozit diske karşı çalışan PEEK/30CE polimerinin aşınma oranı 1.32×10^{-14} m²/N'dan 4.41×10^{-14} m²/N'a artmıştır. Benzer şekilde uygulanan yükün 20 N'dan 60 N'a artırılması ile AISI 316L paslanmaz çelik diske karşı çalışan PEEK/30CE polimerinin aşınma oranı 3.31×10^{-15} m²/N'dan 5.51×10^{-15} m²/N'a artmıştır. Şayet kompozitteki fiber ve matris arasında zayıf bir bağlanma mevcut ise fiberler, aşınma süresince kolaylıkla kırılacaktır. Kırılan fiberler, matris tarafından desteklenemediği için (fiber ve matris arasındaki zayıf bağlanma nedeni ile) uygulanan yükü taşıyamazlar ve aşınmayı önlemek yerine matristen kolaylıkla sıyrılırlar. Buna bağlı olarak, bu durum aşınma oranının artması ile sonuçlanmaktadır. Diğer yandan eğer fiber-matris arasında kuvvetli bir bağlanma mevcut ise fiberler matris tarafından desteklenecektir ve uygulanan yükü karşılayacaktır. Sonuç olarak, fiberlerin matristen sıyrılması yerine fiber aşınması, incilmesi ve kırılması meydana gelecektir. Bu durumda ise aşınma miktarı azalır aşınma direnci artacaktır (En-Zhong ve diğ., 2013; Nevin ve diğ., 2016). Zhong ve diğ. (2011) ise uygulanan yükün aşınma özelliklerini farklı yollar ile etkilediğini belirtmiştir. Malzemeler arasındaki sürtünme nedeniyle ısı oluşumunun meydana geleceğini ve temas yüzeylerinde sıcaklığın artacağını belirtmiştir. Artan yük ile birlikte kuru kayma şartları altında temas yüzeylerindeki sıcaklığın daha da artacağı, böylelikle, polimer yüzeyinin yumuşayacağı ve yük taşıma kapasitesinin azalarak şiddetli aşınmaya sebep olacağı belirtilmiştir.

60 N yük altında PEEK/30CE polimerinin kullanılan diske göre aşınma oranları değerlendirildiğinde AISI 316L paslanmaz çelik disk, termoset poliester kompozit diske göre aşınma oranını %700 oranında azaltmıştır. Daha öncede belirtildiği gibi zayıf bağlanma nedeni ile kırılan fiberler karşı diske transfer olacaktır. Bu proses nedeniyle metal karşı disk ile çalışan polimer malzeme, transfer film tabakası oluşturacaktır. Kuru aşınma şartlarında, polimerin aşınma davranışı karşı disk



Şekil 4. PEEK/30CE Kompozitin Termoset Polyester Kompozit Diske Karşı Aşınma Oranı-Yük Grafiği

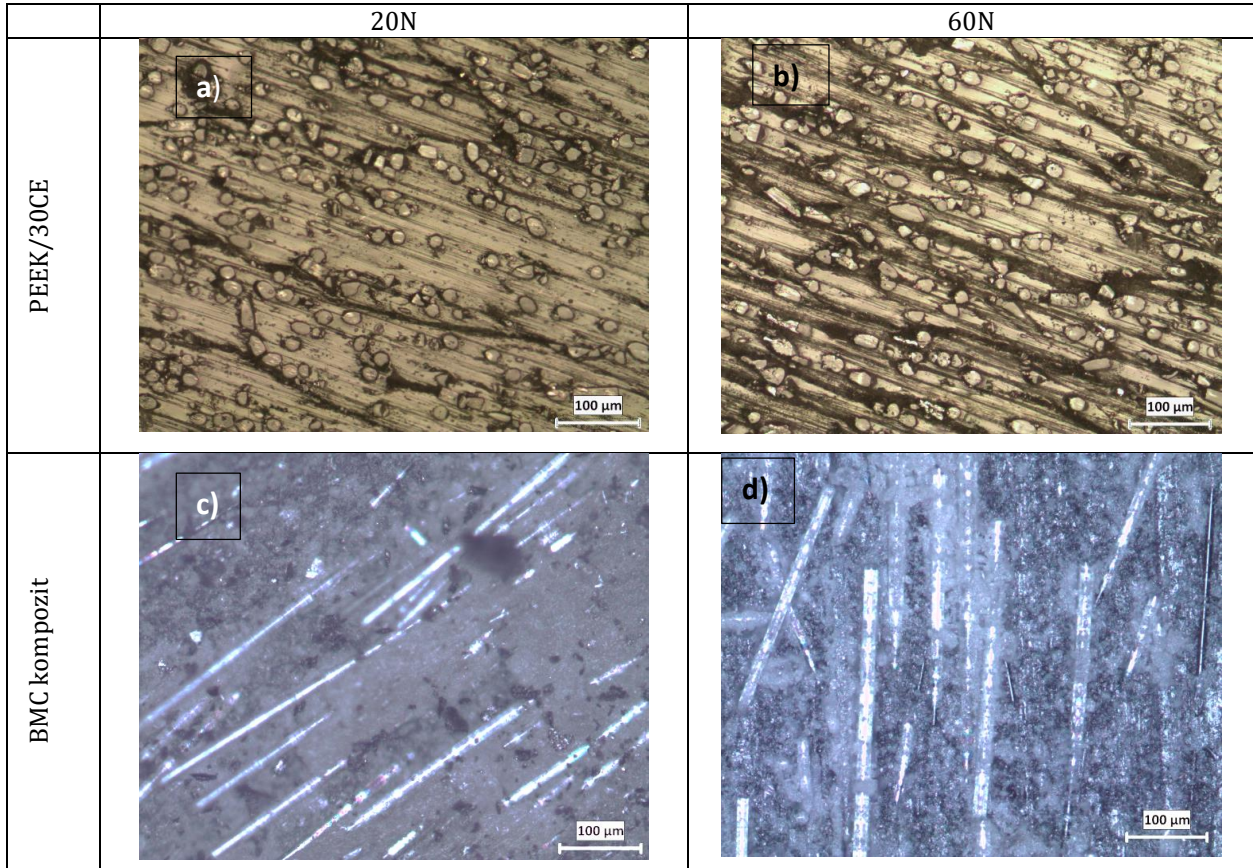


Şekil 5. PEEK/30CE Kompozitin AISI 316L Paslanmaz Diske Karşı Aşınma Oranı-Yük Grafiği

yüzeyinde şekillenen transfer film tabakasının şekline bağlıdır. Dolayısıyla temas halindeki yüzeyler arasındaki arayüzeyin kimyasal ve mekanik özellikleri aşınma direncinin kontrolünde önemli rol oynamaktadır (Nevin ve diğ., 2016). Benzer bir açıklama Kumar ve Rajmohan (2019) tarafından yapılan çalışmada da belirtilmiştir. Azalan spesifik aşınma oranının sebebinin karşı çelik disk yüzeyinde oluşan transfer film tabakası olduğu belirtilmiştir. Uygulanan 20-60 N yük aralıklarında en yüksek aşınma oranı 60 N yük altında 4.41×10^{-14} m²/N değeri ile termoset polyester kompozit disk kullanıldığında elde edilirken en düşük aşınma oranı 20 N yük altında 3.31×10^{-15} m²/N değeri ile AISI 316L paslanmaz çelik disk kullanıldığında elde edilmiştir. Sonuç olarak, ağırlıkça %30 cam elyaf takviyeli PEEK polimeri ile AISI 316L paslanmaz çelik disk malzemesi en iyi tribolojik özellikleri göstermiştir. 20 N ve 60 N yüklere maruz kalan PEEK/30CE kompozit pim ve BMC termoset polyester kompozit disk aşınma yüzeyi mikroyapı görüntüleri Şekil 6 (a-d)'de verilmiştir. Bilindiği gibi karşı disk malzeme bünyesinde ağırlık olarak %25 oranında uzun cam elyaf ve %40 oranında kalsiyum karbonat katkı bulunmaktadır. PEEK

polimeri bünyesinde de %30 oranında kısa elyaf bulunmaktadır. 20N yük altında gerçekleştirilen aşınma testi sonucunda hem PEEK kompoziti hem de BMC kompozit yüzeylerinde az sayıda derin ve geniş olmayan aşınma izleri gözlenmiştir (Şekil 6 a ve c). 60 N yük altında gerçekleştirilen deneyler sonucunda Şekil 6b'de görülen PEEK kompoziti aşınma yüzeyi mikroyapı incelemelerinde aşınma yüzeylerinde daha derin ve geniş aşınma izleri görülmüştür. BMC kompozit disk

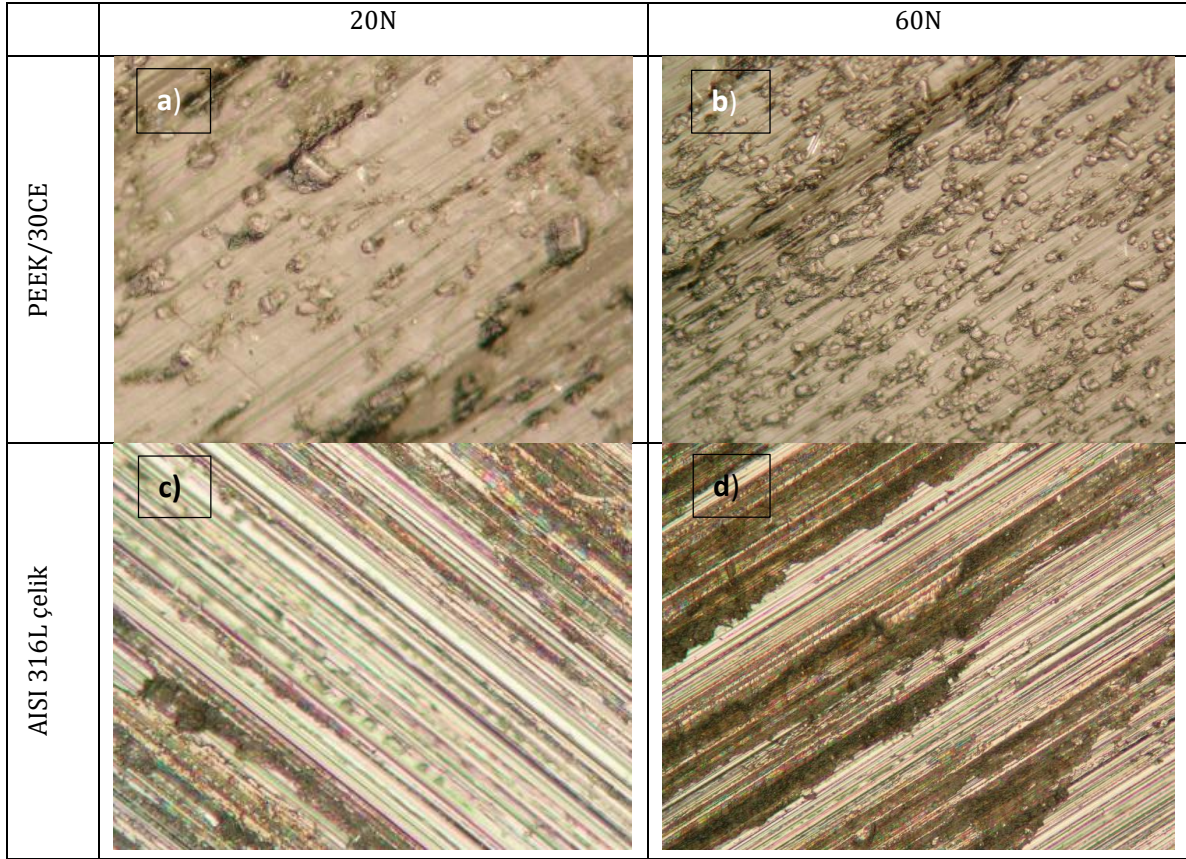
bünyesindeki cam elyaflar aşınmaya karşı direnç gösterirken kalsiyum karbonat katkı ise disk yüzeyinde daha fazla aşınmanın olmasına sebep olmuştur. Oluşan partiküller de disk yüzeyinde Şekil 6(d)'de görülmektedir. Yükün yüksek olması (60 N) PEEK kompozit/BMC kompozit diski çiftinde hem sürtünme katsayısı hem de aşınma oranının artmasına sebep olmuştur (Şekil 2 ve Şekil 4). Bu aşınma çiftinde genel olarak abrazif aşınma mekanizması gözlenmiştir.



Şekil 6. PEEK/30CE Kompozit Pim ve BMC Termoset Polyester Kompozit Disk Aşınma Yüzeyi Mikroyapı Görüntüleri

Şekil 7 (a-d) PEEK/30CE kompozit pim malzemenin 20 N ve 60 N yükler altındaki AISI 316L paslanmaz çelik diske karşı çalışması durumundaki aşınma yüzeyi mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Çelik diske karşı cam elyaf takviyeli PEEK kompozitin çalışmasında hem abrazif hem de adhezif aşınma mekanizması gözlenmiştir. PEEK bünyesindeki cam elyaflar çelik disk yüzeyinde zımparalama görevi yaparken aynı zamanda matrisin aşınarak çelik disk yüzeyine yapıştığı görülmektedir (Şekil 7c ve d). PEEK kompozitin aşınma

yüzey görüntüleri incelendiğinde ve BMC çelik disk görüntüleri ile karşılaştırıldığında PEEK kompozitin aşınma yüzeylerinin daha düzgün olduğu gözlenmiştir. Çelik disk yüzeyindeki pürüzlülüklerin PEEK bünyesindeki cam elyaflar ile zımparalamaya benzer aşınma yaparak azaltılması ve çelik disk yüzeyinde ince bir film tabakasının oluşması PEEK kompozit/çelik disk çiftinin hem sürtünme katsayısının hem de aşınma oranının azalmasına sebep olmuştur (Şekil 3 ve Şekil 5).



Şekil 7. PEEK/30CE Kompozit Pim ve AISI 316L Paslanmaz Çelik Disk Aşınma Yüzeyi Mikroyapı Görüntüleri

5. Sonuçlar

PEEK/30CE polimerinin kuru ortam şartları altında termoset poliester kompozit disk ve AISI 316L paslanmaz çelik diske karşı aşınma özelliklerinin incelendiği çalışma sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

Uygulanan yüke bağlı olarak PEEK/30CE polimerinin sürtünme katsayısı kullanılan diske göre farklılık göstermiştir. termoset poliester kompozit disk kullanıldığında sürtünme katsayısı artarken AISI 316L paslanmaz çelik disk kullanıldığında değişmemiştir. Yükün 20 N'dan 60 N'a artırılması ile aşınma oranı artmıştır. termoset poliester kompozit diskteki aşınma oranı 10^{-14} m²/N civarında iken AISI 316L paslanmaz çelikteki aşınma oranı 10^{-15} m²/N civarında elde edilmiştir. AISI 316L paslanmaz çelik disk, termoset poliester kompozit diske göre aşınma oranını %700 oranında azaltmıştır. Uygulanan 20-60 N yük aralıklarında ağırlıkça %30 cam elyaf takviyeli PEEK polimeri ile AISI 316L paslanmaz çelik malzemesi en iyi tribolojik özellikleri göstermiştir.

Sonuç olarak, yüksek mukavemet ve modül, mükemmel tokluk, termal kararlılık ve kimyasal inertlik gibi özelliklere sahip PEEK/30CE polimeri yalıtkan özellikleri ile elektriksel uygulamalarda yüksek aşınma direnci istenen uygulamalarda ve termoset poliyester

kompozitin vazgeçilmez olduğu uygulamalarda ve kuru çalışma ortam şartları altında kullanılabilir.

Araştırmacıların Katkısı

Bu çalışmada; Hüseyin ÜNAL, deneysel tasarım, makalenin organizasyonu, deneysel sonuçların irdelenmesi; Salih Hakan YETGİN, deneylerin yapılması, deneysel sonuçların irdelenmesi; Veysel Furkan ÜNAL, deneylerin yapılması, deneysel sonuçların irdelenmesi konularında katkı sağlamışlardır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

Abdulaziz K., Wen H.K., Li C. (2019). Tribological behaviour of high performance polymers and polymer composites at elevated temperature, *Tribology International*, 130, 94-105. doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.09.010>

- Bahadur S., (2000). The development of transfer layers and their role in polymer tribology, *Wear*, 245, 92-99. doi: [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(00\)00469-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(00)00469-5)
- Brockett C.L., John G., Williams S., Jin Z., Isaac G.H., Fisher J. (2012). Wear of ceramic-on carbon fiber-reinforced poly-ether ether ketone hip replacements, *Journal of Biomedical Materials Research Part B*, 100B, 1459-1465. doi: <https://doi.org/10.1002/jbm.b.32664>
- En-Zhong L., Bin-Shi X., Hai-Dou W., Wei-Ling G. (2013). The tribological behavior of glass fiber-reinforced polyetheretherketone composite under dry sliding and water lubrication, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 32 (5), 318-329. doi: <https://doi.org/10.1177/0731684412469135>
- Ganesh K.G., Dr. Dhamejani C. L. (2016). Investigation of tribological behavior of PEEK composite with glass fiber filled under harsh operating condition, *International Journal of Advance Research and Innovative Ideas in Education*, 2 (1), 271-279.
- Haofei S., Xujing Y., Kai W., Yazhuo W., Wenjun F. (2019). Non-isothermal crystallization kinetics of continuous glass fiber reinforced poly(ether ether ketone) composites, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 138, 369-378. doi: <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08245-1>
- Hüseyin U., 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. doi: [10.15406/mojps.2017.01.00030](https://doi.org/10.15406/mojps.2017.01.00030)
- Jain V.K., Bahadur, S. (1978). Material transfer in polymer-polymer sliding, *Wear*, 46 (1), 177-188. doi: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(78\)90119-9](https://doi.org/10.1016/0043-1648(78)90119-9)
- Kemmish D. (2010). Update on the Technology and applications of Polyaryletherketones, ISmithers Rapra Technology.
- Kumar D., Rajmohan T. (2019). Experimental investigation of wear of multiwalled carbon nanotube particles filled poly-ether-ether-ketone matrix composites under dry sliding, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 32 (4), 521-543. doi: <https://doi.org/10.1177/0892705718772869>
- Laux K.A., Jean F.A., Sue H.J., Bremner T., Wong J.S.S. (2016). The influence of surface properties on sliding contact temperature and friction for polyetheretherketone (PEEK), *Polymer*, 103, 397-404. doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2016.09.064>
- Li E.Z., Guo W.L., Wang H.D., Xu B.S., Liu X.T. (2013). Research on tribological behavior of PEEK and glass fiber reinforced PEEK composite, *Physics Procedia*, 50, 453-460. doi: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2013.11.071>
- Lind J., Lindholm P., Qin J., Kassman R.A. (2015). Friction and wear studies of some PEEK materials. *TRIBOLOGIA - Finnish Journal of Tribology*, 2 (33), 20-28.
- Mir A.H., Charoo M.S. (2019). Friction and wear characteristics of polyetheretherketone (PEEK): A review, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 561, 012051. doi: [10.1088/1757-899X/561/1/012051](https://doi.org/10.1088/1757-899X/561/1/012051)
- Nevin G.K., Sadi D., Taner Y. (2016). Thermal aging and reinforcement type effects on the tribological, thermal, thermomechanical, physical and morphological properties of poly(ether ether ketone) composites, *Composites Part B*, 88, 253-263. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.11.013>
- Ozel A., Abdullah M., Hüseyin U. (2015). Tribological performance of polymer composites in use in electrical insulation Applications, *Journal of Industrial Engineering Research*, 1 (11), 20-24.
- Song J., Liu Y.H., Wang S., Liao Z.H., Liu W.Q. (2015). Study on the wettability and tribological behaviors of glass fiber reinforced poly(ether-ether-ketone) against different polymers as bearing materials for artificial cervical disc, *Biotribology*, 4, 18-29. doi: [10.1016/j.biotri.2015.10.001](https://doi.org/10.1016/j.biotri.2015.10.001)
- Thiago F. de A., Helio W., Amilton S. (2019). Tribology of natural Poly-Ether-Ether-Ketone (PEEK) under transmission oil lubrication, *Polímeros*, 29 (2), 1-9. doi: <https://doi.org/10.1590/0104-1428.14416>
- Ünal H., Mimaroglu A., (2006). Friction and wear characteristics of PEEK and its composites under water lubrication, *Journal of Reinforced Plastics*

Composites, 16, 1659-1667. doi:
<https://doi.org/10.1177/0731684406068406>

You Y.L., Du-Xin L., Gao J.S., Ruo Y.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. doi: <https://doi.org/10.1177/0892705713519120>

Zeng H., He G., Yang G. (1987). Friction and wear of poly(phenylene sulphide) and its carbon fibre composites: I unlubricated, *Wear*, 116 (1), 59-68. doi: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(87\)90268-7](https://doi.org/10.1016/0043-1648(87)90268-7)

Zhang G., Wetzal B., Wang Q. (2015). Tribological behavior of PEEK-based materials under mixed and boundary lubrication conditions, *Tribology International*, 88, 153-161. doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.03.021>

Zhong Y.J., Xie G.Y., Sui G.X., Yang R. (2011). Poly(ether ether ketone) composites reinforced by short carbon fibers and zirconium dioxide nanoparticles: Mechanical properties and sliding wear behavior with water lubrication, *Journal of Applied Polymer Science*, 119, 1711-1720. doi: <https://doi.org/10.1002/app.32847>