

Polietereterketon ve Kompozitlerinin Polyester Matrisli Termoset Kompozit Malzemesine Karşı Aşınma ve Sürtünme Performanslarının İncelenmesi

Hüseyin ÜNAL¹, Kemal ERMİŞ^{2*}

ÖZET: Bu çalışma, elektriksel kontak kesici uygulamalarında kullanılabilecek aşınmaya dayanıklı en iyi polimer veya polimer kompozit çiftini bulmayı hedeflemiştir. Bunun için disk üzerinde pim aşınma düzeneği kullanılmıştır. Pim malzemesi olarak katkısız poli-eter-eter-keton (PEEK) polimeri ile ağırlıkça %20 ve %30 oranında cam elyaf (CE) takviyeli PEEK kompozitleri kullanılmıştır. Karşı disk malzeme olarak ise uzun cam elyaf takviyeli ve kalsiyum karbonat mineral dolgulu doymamış polyester kompozit malzeme kullanılmıştır. Tribolojik deneylerde cam elyaf katkı oranının aşınmaya etkisi incelenmiş aynı zamanda uygulanan basıncın etkisi de araştırılmıştır. Tribolojik testler, oda sıcaklığında 1.77, 3.53 ve 5.30 MPa basınçlar altında ve 30 m/dak kayma hızında oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlardan, en yüksek aşınma oranı 5.30 MPa basınç altında $4.42 \times 10^{-14} \text{ m}^2 \text{ N}^{-1}$ değerine sahip PEEK+%30CE polimer kompozitinde elde edilmiştir. En düşük aşınma oranı ise 1.77 MPa basınç altında $1.13 \times 10^{-14} \text{ m}^2 \text{ N}^{-1}$ değeri ile katkısız PEEK polimerinde elde edilmiştir. Çalışma sonucunda teste tabi tutulan malzemeler arasında, uzun cam elyaf takviyeli ve kalsiyum karbonat dolgulu katkısız polyester kompozit malzemesi ile katkısız PEEK polimer çifti, elektrik kontak kesici uygulamaları için en uygun çift olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Triboloji, termoplastikler, kompozitler, PEEK, cam elyaf

Investigation of Wear and Friction Performance of Polyetheretherketone and its Composites against Polyester Matrix Thermoset Composite Material

ABSTRACT: This study aims to find the best wear resistant polymer or polymer composite pair that can be used in electrical contact breaker applications. For this, the pin-on-disc (PoD) wear test machine was used. Poly-ether-ether-ketone (PEEK) polymer and 20% and 30% by weight glass fiber (GF) reinforced PEEK composites were used as pin material. Long glass fiber reinforced and calcium carbonate mineral-filled unsaturated polyester composite material was used as the counterpart material. In the tribological experiments, while the effect of glass fiber reinforcement on wear was examined, the effect of the applied pressure was also investigated. The highest wear rate was obtained in PEEK+30% GF polymer composite with $4.42 \times 10^{-14} \text{ m}^2 \text{ N}^{-1}$ under 5.30 MPa pressure, while the lowest wear rate was obtained with $1.13 \times 10^{-14} \text{ m}^2 \text{ N}^{-1}$ under 1.77 MPa pressure. As a result of the study, it was determined that among the materials subjected to the wear test, the long glass fiber reinforced and calcium carbonate filled pure polyester composite material and the pure PEEK polymer pair were the most suitable pairs for electrical contact breaker applications.

Keywords: Tribology, thermoplastics, composites, PEEK, glass fiber

¹ Hüseyin ÜNAL (Orcid ID: 0000-0003-0521-6647), Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

² Kemal ERMİŞ (Orcid ID: 0000-0003-3110-2731), Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Kemal ERMİŞ, e-mail: ermis@subu.edu.tr

GİRİŞ

Polimer ve polimer esaslı kompozit malzemeler endüstrinin değişik alanlarında her geçen gün kullanımı yaygınlaşan polimer malzemelerdir. Endüstriyel uygulamalarda hafiflik, yüksek kimyasal direnç, ısı, elektrik ve ses yalıtkanlık özelliği, yüksek tokluk, korozyon direnci, kolay işlenebilirlik, iyi görünüş, renklendirilebilirlik ve düşük maliyet gibi birçok avantajlı yönleri olmasına rağmen düşük sıcaklık direnci, düşük mukavemet, düşük çevre koşullarına direnç, düşük sertlik ve çizilme gibi dezavantajlara da sahiptir. Saf haldeki polimer malzemelerin düşük mekanik özellikleri, kötü ısı iletkenliği ve düşük aşınma direnci gibi özellikleri endüstriyel uygulamalardaki kullanımlarını sınırlandırmaktadır. Bu nedenle, polimer malzemelerin tribolojik, mekanik ve ısı özelliklerini geliştirmek için katkısız polimerlerin bünyesine değişik özellikli dolgu ve takviye malzemeleri ilave edilmiştir (Kohan, 1995; Zweifel ve ark., 2009; Meddad ve Fisa, 1997; Washabourg, 1987; Kyu ve ark., 1996; Tanaka ve Kawakami, 1982; Bijwe ve ark., 1990; Bahadur ve Tabor, 1984; Gachter ve Müller, 1993; Nielsen, 1974; Xing, 1996; Tanaka, 1999; Wiebeck ve ark., 1998; Horák ve ark., 2005; Tjong ve Meng, 1999; Taesler ve ark., 1996; Pukanszky, 1990; Choon Kang ve Won Chung, 2003; Samyn ve ark., 2003). Dolayısıyla farklı katkı ve mukavemet artırıcı ilaveli polimerler malzemeler, uçak, otomotiv, elektrik/elektronik, makine, kimya ve elektrikli ev aletleri gibi birçok endüstriyel sektörde tercih edilmektedir (Anonymous, 2019; Anonymous, 2015; Anonymous-Electrically, 2020; Anonymous-Carbon, 2020; Anonymous-PP, 2020; Anonymous-Aircraft, 2020; Anonymous, 2012). Endüstride yaygın kullanılan termoplastik polimerler, poliamid 6 (PA 6), poliamid 66 (PA 66), poliamid 46 (PA 46), polikarbonat (PC), polioksimetilen (POM), polibütilen tereftalat (PBT), polibütilentereftalat (PET), polifenilensülfid (PPS), polietereterketon (PEEK), politetrafloretillen (PTFE), polipropilen (PP) gibi malzemelerdir (Anonymous, 2005; Anonymous, 2018; Anonymous, 2017; Anonymous-Components, 2020; Anonim, 2020). Doymamış polyester, epoksi, poliüretan, fenolik reçineler de endüstride yaygın kullanılan termoset çeşidi polimerlerdir (Anonim, 2015; Anonim-Fenolik, 2015; Anonim, 2018; Anonim, 2008). Hem termoplastik hem de termoset polimerlere cam elyaf, karbon elyaf, aramid elyaf gibi mukavemet artırıcı katkıları ilave edilerek polimer kompozit malzemelerin mekanik, termal ve tribolojik özellikleri iyileştirilebilmektedir (Pecorini ve Hertzberg, 1994; Shiao ve ark., 1994; Plamen ve ark., 2005; Li ve ark., 2010; Yuanjian ve Isaac, 2008; Unal ve ark., 2004).

Endüstride kullanılan polimerlerden bazıları, hafiflik, yüksek kimyasal direnç, elektriksel yalıtkanlık, yüksek tokluk, korozyon direnci, kolay şekillendirilebilme, güzel görünüş, renklendirilebilirlik ve düşük maliyet gibi üstün özellikleri sebebiyle elektrik endüstrisinin bazı uygulamalarında kullanımı için aday haline gelmişlerdir. Bu polimer ve polimer kompozitlerden bazıları, PEEK, PTFE, PA6, PA 66, PA 46, PPS, epoksi ve doymamış polyester ön plana çıkmaktadır. Bu malzemeler, elektrik endüstrisinde, özellikle yüksek voltaj uygulamalarında tercih edilen aday malzemeler arasına girmiştir. PTFE şu anda yüksek kimyasal direnç, düşük sürtünme katsayısı ve yüksek sıcaklık stabilitesi gibi benzersiz özellikleri nedeniyle yüksek performanslı mekanik contalarda artan kullanım alanı bulmaktadır (Lewis, 1986; Blanchet ve Kennedy, 1991). Bununla birlikte, PTFE'nin aşınma direnci düşüktür. PTFE polimerinin aşınma performansı, karbon elyaf, cam elyaf (Tanaka ve Kawakami, 1982), MoS₂ (Bahadur ve Tabor, 1984; Bijwe ve ark., 1990), bronz ve grafit (Tanaka ve Kawakami, 1982) gibi uygun dolgu maddelerinin ilave edilmesiyle önemli ölçüde geliştirilebilmektedir. Tanaka ve Kawakami (1982) cam elyaf ve MoS₂ katkıların PTFE polimerinin sürtünme ve aşınma özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Tribolojik incelemeleri sonucunda, cam elyaf katkıları PTFE polimerinin dayanımını artırmada etkisinin büyük olmasına rağmen, ağır yükleme koşullarında kırılmaya sebep olmakta ve temas yüzeylerinde aşınmaya neden olduklarını gözlemlemişlerdir.

Yüksek performanslı PEEK polimeri yüksek mukavemet, elastiklik modülü, yüksek camsı geçiş sıcaklık değeri, yüksek ergime sıcaklığı, mükemmel tokluk, termal kararlılık, kolay işlenebilme, kimyasal inertlik, iyi aşınma ve sürtünme direnci özellikleri nedeniyle son yıllarda endüstrinin uygulamalarda birçok alanda kullanılmıştır (Anonymous-PEEK, 2019; Anonymous-Polyetheretherketone, 2020; Anonymous- PEEK, 2020; Anonymous- Anonymous, 2020. Materials, 2020). Bazı araştırmacılar önceki yıllarda yaptığı araştırmalarda (Friedrich, 1986; Cogswell, 1992; Biron M, 2013) PEEK polimerinin ayrıca taşıyıcı ve kaydırıcı malzeme olarak giderek daha önemli bir rol oynadığını ifade etmişlerdir. PEEK polimerinin özellikle son yıllarda ümit verici sürtünme ve aşınma dirençli bir malzeme olduğu ifade edilmektedir. Bununla ilgili literatürde PEEK polimerinin sürtünme ve aşınması ile ilgili birçok çalışmaya rastlanmaktadır (Ji ve ark., 2015; Zsidai ve Katai, 2016; Yang ve ark., 2018; Xu ve ark., 2018; Hamilton ve Munoz-Escalona, 2019; Sun ve ark., 2019; Kinvi-Dossou ve ark., 2019; Ghazzawi ve ark., 2020). Bunlardan, Ji ve ark. (2015) cam elyaf takviyeli PEEK'in (GF) mikroskobik mekanik özellikleri (sürtünme, aşınma vb.) ve işlenebilirliğini incelemişlerdir. Zsidai ve Katai (2016) daha önceki çalışmalarda sunulan veriler arasında bir fark gözlemlemişler ve elde ettikleri veriler, PEEK (yüksek) ve PA6 (düşük) sürtünmesi arasında farklılıklar göstermiş fakat aşınma sonuçlarını benzer bulmuşlardır. Xu ve ark. (2018) tek yönlü CGF / PEEK kompozitlerin gerilme özellikleri üzerindeki etkisini dört farklı kalıplama sıcaklığı, altı farklı kalıplama süresi ve üç farklı soğutma oranı içeren farklı koşullar altında araştırmışlardır. Kinvi-Dossou ve ark. (2019) kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir.

Sürtünme ve aşınma, mühendislikteki malzeme bileşenlerinin ve montaj yöntemlerinin değiştirilmesine yol açan en yaygın üç endüstriyel sorundan biridir; diğer ikisi yorulma ve korozyondur. Bazı araştırmacılar (Hutchings, 1989; Tewari ve ark., 1989) polimer malzemeler arasındaki sürtünmenin iki ana mekanizma olan deformasyon ve yapışmadan kaynaklandığını ifade etmektedirler. Deformasyon mekanizması, birbirlerine temas eden malzemelerin temas bölgesindeki enerjinin tamamen dağılmasını içerir. Yapışma bileşeni polimerin sürtünmesinden sorumludur ve malzemenin kütlesindeki polimer zincirleri arasındaki zayıf bağlanma kuvvetlerinin kırılmasının bir sonucudur.

Birçok bilim adamı, polimer ve polimer kompozit malzemelerin aşınma ve sürtünme davranışı üzerindeki parametrelerin etkisini incelemişlerdir. Bu parametrelerden bazıları, aşınma test koşulları, malzeme çifti temas geometrisi ve ortam şartları gibi parametrelerdir. Birçok araştırmacı (Lawrence ve Stolarski, 1989; Yamaguchi, 1990; Hooke ve ark., 1996), polimer malzemelerin sürtünme katsayısının genel olarak azaltılabileceğini ve doğru malzeme kombinasyonları seçilerek aşınma direncinin iyileştirilebileceğini ifade etmektedirler. Araştırmacılardan bazıları (Santner ve Czichos, 1989; Unal ve Mimaroglu, 2003) metalik malzemelere sürtünen polimerler malzemelerin sürtünme katsayısının uygulanan yükün artmasıyla azaldığını gözlemlerken, diğer araştırmacılar da (Yamaguchi, 1990; Da Silva ve ark., 1999) uygulanan yükün artmasıyla sürtünme katsayısı değerinin arttığını tespit etmişlerdir. Bunun sebebi olarak, belirli bir kritik yük değerini aştıktan sonra polimer malzemeler yumuşayarak karşı disk malzeme üzerinde kalın tabakalar olarak yapışması ile sürtünme katsayısının arttığı olarak ifade edilmiştir. Ludema ve Tabor (1966) polimer esaslı malzemelerin sürtünme katsayısı ile sönümleme kaybı faktörü arasında test sıcaklığına bağlı olarak iyi bir korelasyon olduğunu göstermiştir. Bazı araştırmacılar ise aşınma direnci ve sürtünme katsayısının normal yük, kayma hızı ve sıcaklıktan büyük ölçüde etkilendiğini bildirmişlerdir (Watanabe, 1968; Bahadur ve Tabor, 1985). Unal ve Mimaroglu (2003) saf PTFE ile bronz, karbon ve cam elyaf takviyeli PTFE kompozitlerin kuru kayma şartlarındaki aşınma ve sürtünme davranışlarını incelemişlerdir. Çalışmalarında sürtünme katsayısının normal yükten

büyük ölçüde etkilendiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca Hu (2000) POM ve MC-POM polimerlerinin sürtünme katsayılarının uygulanan yükün artırılması ile azaldığını belirlemiştir.

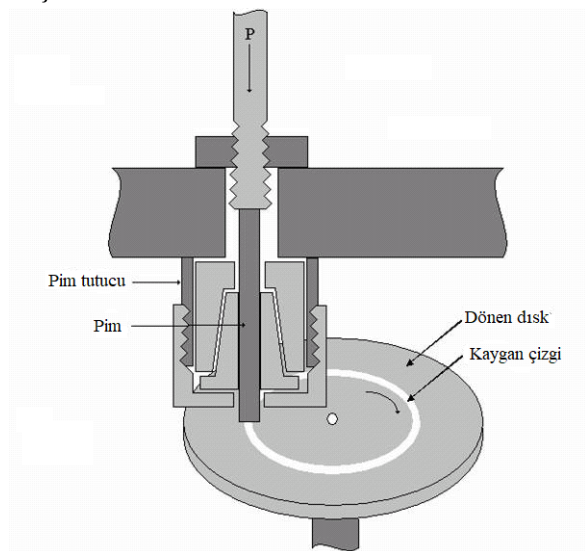
Gerçekleştirilen literatür araştırmaları sonucunda PEEK polimer ve PEEK kompozitlerin aşınma ve sürtünme davranışları üzerinde birçok çalışmaya rastlanmıştır. Ancak PEEK polimer-polimer üzerine pek çalışmaya rastlanmamıştır. Bu sebeple bu deneysel çalışmada elektriksel yalıtım uygulamalarında kullanılabilen amacıyla katkısız PEEK polimeri, %20 cam elyaf takviyeli PEEK (PEEK+%20CE) ve %30 cam elyaf takviyeli PEEK (PEEK+%30CE) termoplastik kompozitlerin doymamış polyester esaslı termoset polimerine karşı sürtünme ve aşınma davranışları incelenmiştir. Sürtünme ve aşınma testleri, disk üzerinde pim olacak şekilde düzenlenmiş bir test düzeneğinde ve kuru kayma koşullarında gerçekleştirilmiştir.

MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada aşağıda Şekil 1’de şematik resmi verilen pim-disk aşınma test cihazı kullanılmıştır. Gerçekleştirilen tribolojik testlerde, Ketron 1000 PEEK kodlu Quadrant firmasından temin edilen katkısız PEEK polimeri ile Victrex PEEK 450GL20 kodlu %20 cam elyaf takviyeli PEEK kompoziti (PEEK+20%CE) Victrex firmasından ve Ketron GF 30 PEEK kodlu %30 cam elyaf takviyeli PEEK kompoziti (PEEK+30%CE) Quadrant firmasından temin edilmiştir. Karşı disk malzeme olarak %25 cam elyaf takviyeli ve %40 kalsiyum karbonat katkılı doymamış polyester esaslı termoset kompozit malzemesi (UPET+%25CE+%40CaCO₃) kullanılmıştır. Aşınma ve sürtünme deneylerinde ağırlık olarak %40 oranında kalsiyum karbonat ve %25 oranında cam elyaf takviyeli termoset polyester esaslı kompozit malzeme, elektriksel yalıtkanlık ve nem direnç özelliklerinden dolayı karşı disk malzeme olarak kullanılmış olup mutlaka kullanılması gereken ve vazgeçilmez özelliği olan bir malzemedir. Karşı disk malzemeyi üretmek için termoset polyester reçine Poliya Polyester, İstanbul firmasından temin edilmiştir. 13 µm çapında ve 12 mm uzunluğunda cam elyaflar, Cam Elyaf Sanayi, İstanbul’dan, 10 µm partikül boyutlu kalsiyum karbonat dolgu maddesi ise Omya Madencilik firması, İstanbul’dan temin edilmiştir.

Deneysel çalışma ve düzeneği

Disk üzerindeki pim olacak şekilde özel olarak dizayn edilmiş bir aşınma test cihazının şematik diyagramı Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Triboloji deneylerinde kullanılan test cihazının şematik gösterimi

Tribolojik testler, bir kola sabitlenmiş bir polimer pimin bir elektrik motorundan aldığı hareketle dönen bir doymamış polyester esaslı termoset polimer diskin birbirine temas ettiği bir aşınma test cihazında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan polimer pim numunenin boyutları 6x50 mm uzunluğundadır. Burada 6 mm pim çapı ve 50 mm ise pimin uzunluğudur. Aşınma ve sürtünme deneylerinde, karşı disk malzeme olarak %25 (ağırlık olarak) cam elyaf takviyeli ve %40 kalsiyum karbonat katkılı doymamış polyester esaslı kompozit malzemesi kullanılmıştır. Disk malzemeler 10 mm kalınlığında ve 120 mm çapında olacak şekilde yine hacim kalıplama tekniği ile ticari bir firmada sıcak pres kullanılarak üretilmiştir. Doymamış polyester esaslı kompozit malzemeler, bir elektriksel parça imalatı gerçekleştiren bir firmanın desteği ile firma bünyesindeki makinalar (havuz, mikser ve sıcak pres) kullanılarak üretilmiştir. Termoset esaslı polyester esaslı kompozit malzemelerin üretimini gerçekleştirmek için ilk olarak ana matris malzeme olan doymamış polyester ile akışkanlığı sağlayıcı stiren 100:25 oranında karıştırılmıştır. İkinci aşamada çapraz bağlayıcı özelliğe sahip metil-etil-keton-peroksit (MEKP), geciktirici özelliğe sahip BC500, ısı stabilizatörü olarak çinko sterat ve yoğunlaştırıcı olarak ise magnezyum oksit, viskozite azaltıcı ve renklendiriciler birlikte 10 dakika boyunca bir karıştırıcıda karıştırılmıştır. Daha sonra hazırlanan hamur karışımı Z-tipi bir karıştırıcıya alınıp kalsiyum karbonat katkı ilave edilerek 1/2 saat, daha sonra da mukavemet artırıcı cam elyaflar ilave edilerek 15 dakika süre ile karıştırılmıştır. Hazırlanan hamur karışımı bir hafta süre ile şartlandırma işlemine tabii tutulmuştur. Disk malzemeler 120 mm çaplı ve 10 mm kalınlığında olacak şekilde kalıpta 1500 MPa basınç altında, 160°C sıcaklıkta 60 saniye boyunca vulkanize edilmiştir. Aşınma ve sürtünme deneylerinden önce, PEEK esaslı pim polimer malzemeler ve karşı disk malzeme yüzeyleri 1200 nolu zımpara ile zımparalanmıştır. Her test öncesi hem disk yüzeyleri hem de pim yüzeyleri asetonla temizlenip kurutulmuştur.

Tribolojik deneylerde Şekil 1’de şematik resmi verilen pim-disk aşınma test cihazı kullanılmıştır. Şekilde görüldüğü gibi disk malzeme tek yönlü hızı ayarlanabilir bir elektrik motoru ile döndürülmektedir. Şekilde görülen diskin üzerine deneyde kullanılan 10 mm kalınlıkta ve 120 mm çaplı polyester disk malzeme monte edilmektedir. Test edilecek malzeme olan PEEK esaslı polimer ve kompozit pim, pim tutucu bir mekanizmaya bağlanarak hareketli yükleme koluna monte edilmektedir. Bu yükleme kolu, numuneye yanal yüklerin uygulanmasına izin verebilecek şekilde yataklanmıştır. Deneyler sırasında, sürtünme kuvveti yükleme koluna monte edilmiş bir yük hücresi ile ölçülmektedir. 33 dakikalık deney süresi boyunca her 60 saniyede yaklaşık 1500 veri okunmuş ve bilgisayarda bir Excel programında kaydedilmiştir. Sürtünme kuvveti olarak ifade edilen yanal yükler uygulanan normal yüke bölünerek malzeme çiftinin sürtünme katsayısı belirlenmiştir. Sürtünme katsayısı (μ) Eşitlik 1. kullanılarak hesaplanmıştır.

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

Burada; μ malzemenin sürtünme katsayısı, F_f deneylerde ölçülen yanal yük ve F_N ise normal yüküdür.

Yine deneylerde kullanılan pim malzemelerin aşınma miktarı deney öncesi ve deney sonrası ağırlık farkı alınarak tespit edilmiştir. Pim malzeme ağırlık ölçümleri 0,1 mg hassasiyete Precia marka 220 g kapasiteli bir terazi ile gerçekleştirilmiştir. Malzemelerin spesifik aşınma oranı (W_s) [$m^2 N^{-1}$] Eşitlik 2. kullanılarak hesaplanmıştır.

$$W_s = \frac{(\Delta V)}{A \times L \times P} \text{ veya } W_s = \frac{(\Delta m)}{L \times \rho \times F_N} \quad (2)$$

Yukarıdaki formülde; ΔV pim numunelerinin aşınma hacmi, Δm deney sonrası ve öncesi kütle kaybı, A temas alanı, ρ yoğunluk, P uygulanan basınç, F_N normal yük ve L ise kayma yoludur. Bu çalışma için seçilen aşınma test parametreleri aşağıdaki Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. PEEK polimer ve kompozitlerinin triboloji testi deney şartları

Test parametreleri	Değerler
Uygulanan basınç (MPa)	1.77, 3.53, 5.30
Kayma hızı (m dak ⁻¹)	30
Ortam sıcaklığı (°C)	23±2
Çalışma ortamı nemi (%)	57±2
Kayma yolu (m)	1000
Disk yüzey pürüzlülüğü (Ra, µm)	0.31

Bu çalışmada kullanılan PEEK termoplastik polimeri ile cam elyaf takviyeli PEEK kompozitlerin fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 2'de gösterilmektedir. Tribolojik deneyler, 30 m dak⁻¹ kayma hızında ve 1.77, 3.53 ve 5.30 MPa basınç altında kuru kayma şartlarında ve oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Tribolojik deneylerde kullanılan farklı basınçlarda malzemelerin spesifik aşınma oranı (m² N⁻¹) hesaplanmış ve sürtünme katsayısı (µ) ölçülmüştür (Bakınız Çizelge 2).

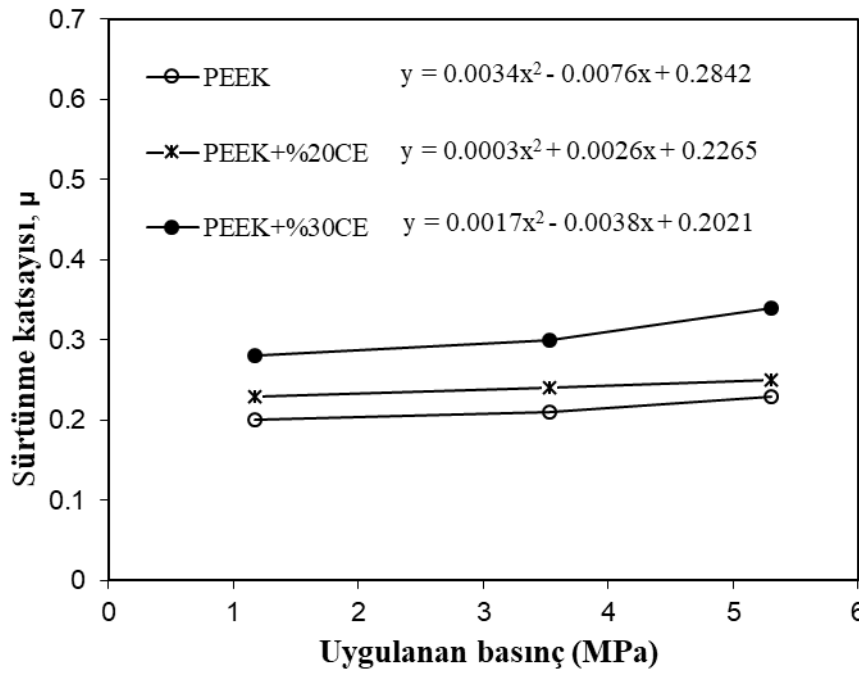
Çizelge 2. PEEK polimer ve kompozitlerinin içeriği, fiziksel ve tribolojik özellikleri

Deneylerde kullanılan Malzemeler	Katkı cinsi	Ana matristeki katkı oranı (%)	Yoğunluk (g m ⁻³)	Uygulanan basınç (MPa)	Kayma hızı (30m dak ⁻¹)	
					Spesifik aşınma oranı (10 ⁻¹⁴ m ² N ⁻¹)	Sürtünme katsayısı (µ)
Poli-eter-eter-keton (PEEK)	-	-	1.32	1.77	1.13	0.20
				3.53	1.33	0.21
				5.30	1.53	0.23
Poli-eter-eter-keton (PEEK+%20CE)	Kısa cam elyaf	20	1.42	1.77	1.33	0.23
				3.53	1.95	0.24
				5.30	3.52	0.25
Poli-eter-eter-keton (PEEK+%30CE)	Kısa cam elyaf	30	1.51	1.77	1.66	0.28
				3.53	3.31	0.30
				5.30	4.42	0.34

BULGULAR VE TARTIŞMA

Şekil 2. de deneylerde kullanılan katkısız PEEK polimeri ile PEEK+%20CE ve PEEK+%30CE termoplastik polimer kompozitlerin uygulanan basınca göre sürtünme katsayısındaki değişimi verilmiştir. Deneylerde kullanılan katkısız PEEK polimeri ile PEEK+%20CE ve PEEK+%30CE kompozitlerinin sürtünme katsayısı değerleri uygulanan basıncın artması ile hafif artış göstermiştir. Uygulanan basıncın %200 oranında artırılması ile PEEK polimeri, PEEK+%20CE ve PEEK+%30CE kompozitlerinin sürtünme katsayısındaki artış sırasıyla %15, %8.7 ve %21.4 oranında olmuştur. Katkısız PEEK polimeri uzun cam elyaf takviyeli karşı disk malzeme ile çalışması durumunda ince bir tabaka şeklinde aşınarak pim ve disk arasında ince bir film tabakası oluşturarak sürtünme katsayısını düşürmektedir. Ancak PEEK polimer ana matrisine ilave edilen %20 ve %30 oranındaki cam elyaf katkısı ile pim bünyesindeki cam elyaflar ile karşı disk malzemedeki elyaflar birbirleriyle sürtünerek sürtünme katsayısını artırmaktadır. Cam elyaf oranı arttıkça (PEEK+%30CE) sürtünme katsayısındaki artış daha da belirginleşmektedir. Yine Şekil 2' dikkatle incelendiğinde deneylerde kullanılan katkısız PEEK polimeri ile PEEK+%20CE ve PEEK+%30CE kompozitlerinin ortalama sürtünme katsayısı değerleri sırasıyla 0.21, 0.24 ve 0.30 civarında elde edilmiştir. En düşük sürtünme katsayısı katkısız PEEK polimerinde, en yüksek sürtünme katsayısı ise PEEK+%30CE kompozitinde elde edilmiştir. Katkısız PEEK polimerinin sürtünme katsayısının düşük olmasının sebebi karşı disk malzeme olan UPET+%25CE+%40CaCO₃ polyester kompozitin bünyesindeki cam elyaflar ile PEEK polimerinin katkısız olması ile ifade edilebilir. Yani UPET+%25CE+%40CaCO₃ kompoziti bünyesindeki cam elyaflar aşınma testindeki temas süresince katkısız PEEK polimerinin yüzeyinden polimer matris

aşınmakta ve karşı disk malzeme yüzeyine yapışmaktadır. Bu aşınma matris partikülleri disk üzerindeki cam elyafların arasına girmekte ve polimer/polimer temas yüzeyi oluşturmaktadır. Bu da cam elyaf içeren kompozit malzemelere göre aşınmanın azalmasına sebep olmasına atfedilebilir. En yüksek sürtünme katsayısı değerleri PEEK+%30CE kompozit/UPET+%25CE+%40CaCO₃ kompozit çiftinde elde edilmiştir. En yüksek sürtünme katsayısı değerleri ise %30 cam elyaf takviyeli PEEK kompozitinde elde edilmesinin sebebi olarak kompozit bünyesindeki %30 oranındaki cam elyaflar ile karşı disk olan doymamış polyester esaslı termoset kompozitteki %25 oranındaki uzun cam elyaflarla açıklanabilir. Her bir malzemedeki cam elyaflar aşınma testi süresinde birbirlerine sürekli olarak temas ettiklerinden kırılmakta ve matris aralarına girmektedir. Kırık cam elyaflar ile matristeki elyaflar yüzeyde çoğalarak sürtünme katsayısının artmasına sebep olmaktadır şeklinde açıklanabilir Bahadur (1985) ve Hu (2000).



Şekil 2. Katkısız PEEK, PEEK+%20CE ve PEEK+%30CE kompozitlerin sürtünme katsayısı-uygulanan basınç ilişkisi

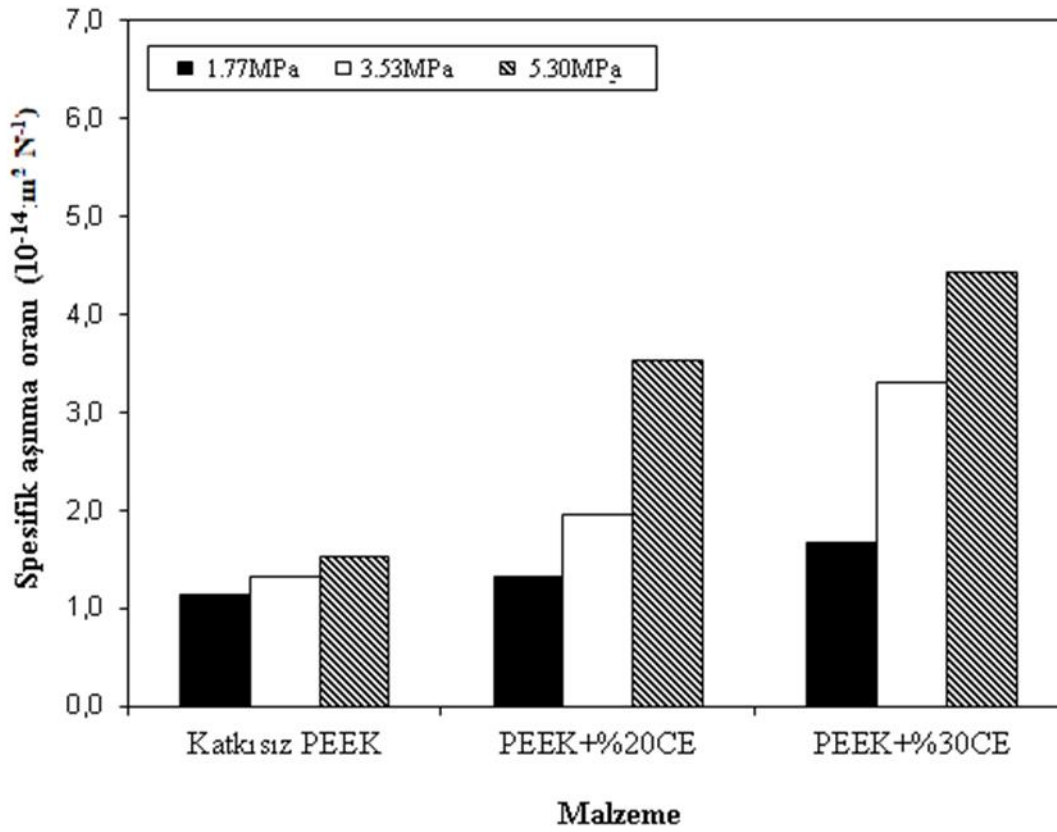
Şekil 2’de görüldüğü gibi katkısız PEEK polimeri ile PEEK+%20CE ve PEEK+%30CE kompozitlerinin sürtünme katsayısı değerleri uygulanan basıncın artması ile artmaktadır. Bu elde edilen deneysel çalışmaların sürtünme katsayısı eğrilerinin numerik analiz yöntemi kullanılarak polinom denklemleri çıkartılmıştır. Bu denklemlerin geçerliliğini ortaya koymak için yapılan yaygın kullanılan yöntem regresyon analizidir. Regresyon analizinde (R kare regresyon analizi, R²) bulunan sonuç en yüksek doğruluk olan 1 değeri, tüm test numunelerinde elde edilmiştir. Dolayısıyla denklemlerin doğruluğu kanıtlanmış olmaktadır. Buna göre PEEK polimeri için denklem Eşitlik 3’de, PEEK+%20CE kompoziti için denklem Eşitlik 4’de ve PEEK+%30CE kompoziti için denklem Eşitlik 5’de verilmektedir.

$$y = 0.0034x^2 - 0.0076x + 0.2842 \quad (3)$$

$$y = 0.0003x^2 + 0.0026x + 0.2265 \quad (4)$$

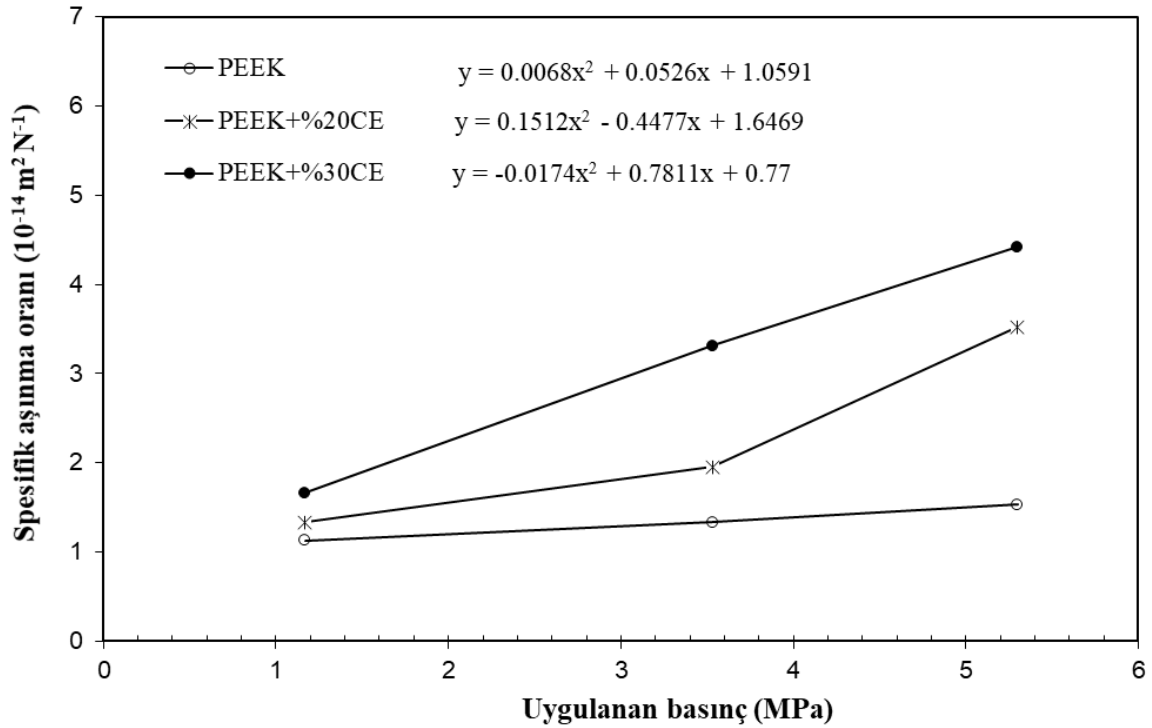
$$y = 0.0017x^2 - 0.0038x + 0.2021 \quad (5)$$

Deneylerde kullanılan PEEK polimeri ile PEEK+%20CE ve PEEK+%30CE termoplastik polimer kompozitlerin 30 m dak⁻¹ kayma hızındaki ve 1.77, 3.53 ve 5.30 MPa basınç altındaki spesifik aşınma oranı değişimleri Şekil 3’de gösterilmektedir.



Şekil 3. Katkısız PEEK polimeri ile PEEK+%20CE ve PEEK+%30CE kompozitlerin spesifik aşınma oranları

Şekilde görüldüğü gibi deneylerde kullanılan malzemelerin spesifik aşınma oranı değerleri yaklaşık olarak $10^{-14} \text{ m}^2 \text{ N}^{-1}$ civarında bulunmuştur. En yüksek aşınma oranı, PEEK+%30CE kompozitinde $4.42 \times 10^{-14} \text{ m}^2 \text{ N}^{-1}$ değerinde elde edilirken hemen ardından $3.52 \times 10^{-14} \text{ m}^2 \text{ N}^{-1}$ değeri ile PEEK+%20CE kompoziti için elde edilmiştir. En düşük aşınma oranı ise $1.13 \times 10^{-14} \text{ m}^2 \text{ N}^{-1}$ değerine sahip katkısız PEEK polimer için tespit edilmiştir. Katkısız PEEK polimeri ile PEEK+%20CE ve PEEK+%30CE polimer kompozitleri için ortalama spesifik aşınma oranları değerleri sırasıyla $1.33 \times 10^{-14} \text{ m}^2 \text{ N}^{-1}$, $2.27 \times 10^{-14} \text{ m}^2 \text{ N}^{-1}$ ve $3.07 \times 10^{-14} \text{ m}^2 \text{ N}^{-1}$ olarak belirlenmiştir. Katkısız PEEK polimerine göre kıyaslama yapıldığında PEEK+%20CE ve PEEK+%30CE polimer kompozitlerinin spesifik aşınma oranlarının sırasıyla %171 ve %231 oranında daha yüksek olduğu belirlenmiştir. PEEK+%30CE kompoziti en yüksek spesifik aşınma oranı değerleri göstermektedir. PEEK+%30CE kompozitinin en yüksek spesifik aşınma oranı değeri göstermesinin sebebi PEEK+%30CE kompoziti bünyesindeki cam elyafların karşı disk bünyesindeki uzun cam elyaflar tarafından kırılması ile açıklanabilir. Yüksek aşınma oranına ulaşmanın diğer bir sebebi de, polimer bünyesindeki cam elyaflar ile polimer ana matris arasındaki zayıf bağlanma ile de ilişkili olabilir. Şekil 4 katkısız PEEK polimeri ile PEEK+%20CE ve PEEK+%30CE polimer kompozitlerinin spesifik aşınma oranının uygulanan basınçla değişimini göstermektedir. Tribolojik deneylerde numunelere uygulanan basınç artırıldıkça deneylerde kullanılan tüm malzemelerin spesifik aşınma oranı değerleri artış göstermiştir. En yüksek değişim sırasıyla önce PEEK+%30CE kompozitinde sonra PEEK+%20CE kompozitinde elde edilirken en az değişim ise katkısız PEEK polimerinde elde edilmiştir.



Şekil 4. Katkısız PEEK polimeri ile PEEK+%20CE ve PEEK+%30CE kompozitlerin spesifik aşınma oranının uygulanan basınç ile değişimi

Elde edilen spesifik aşınma oranının uygulanan yüke göre değişim grafikleri üzerinde numerik analiz yöntemi kullanılarak polinom denklemleri çıkartılmıştır. Bu denklemlerin geçerliliğini ortaya koymak için yapılan en yaygın kullanılan regresyon analizi yöntemidir. Regresyon analizinde (R kare regresyon analizi, R^2) bulunan sonuç en yüksek doğruluk değeri olan 1 değeri deneylerde kullanılan tüm deney malzemelerinde 1 olarak elde edilmiştir. Dolayısıyla denklemlerin doğruluğu kanıtlanmış olmaktadır. Buna göre uygulanan basınçla ilişkili spesifik aşınma oranı denklemleri, katkısız PEEK için denklem Eşitlik 6'da, PEEK+%20CE kompoziti için denklem Eşitlik 7'de ve PEEK+%30CE için denklem Eşitlik 8'de verilmektedir.

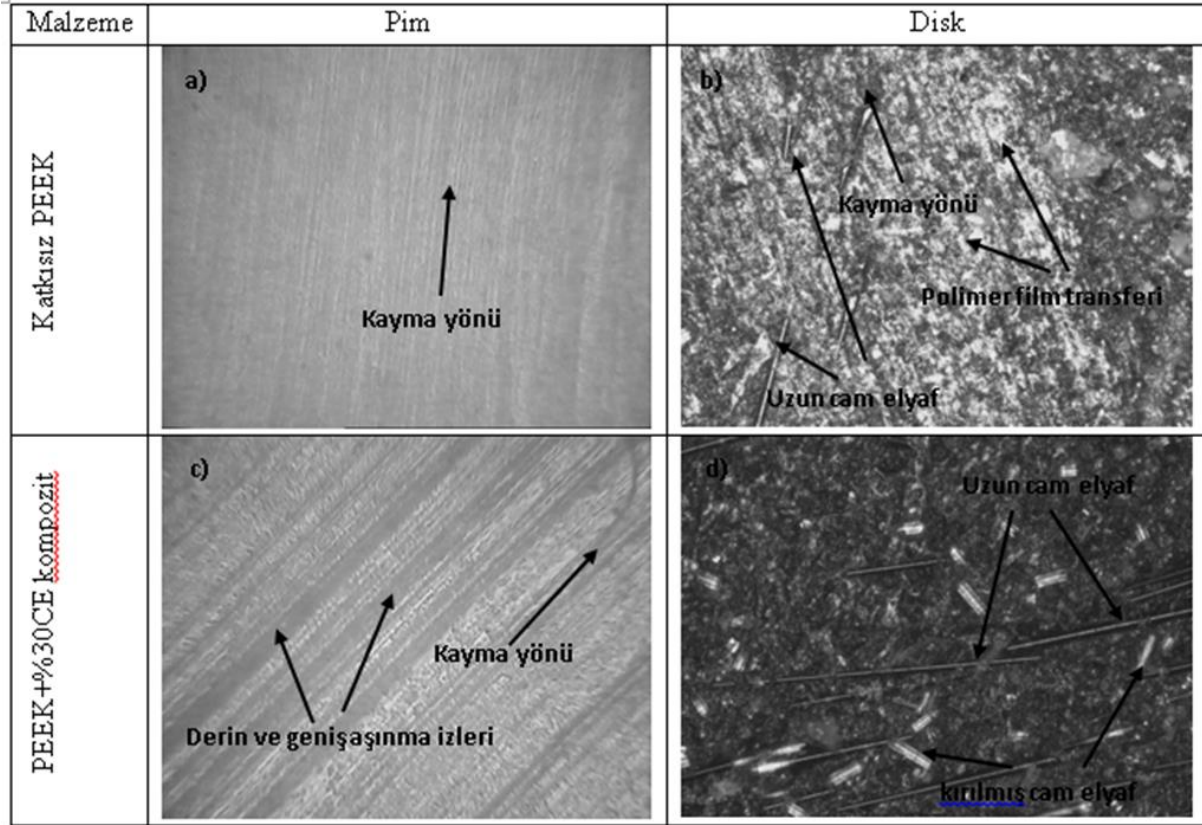
$$y = 0.0068x^2 + 0.00526x + 1.0591 \quad (6)$$

$$y = 0.1512x^2 - 0.4477x + 1.6469 \quad (7)$$

$$y = -0.00174x^2 + 0.7811x + 0.77 \quad (8)$$

Şekil 5 (a,b) sırasıyla katkısız PEEK polimeri ile PEEK+%30CE kompozitinin 3.53MPa basınç altında ve 30m/dak kayma hızında karşı disk malzeme ile çalışması durumunda elde edilen aşınma yüzeyinin optik mikroskopta alınan mikro yapı görüntüleri verilmiştir. Şekilde 5(a)'da verilen yüzey mikroyapısı incelendiğinde katkısız PEEK termoplastik polimerinin aşınma yüzeyi düz ve pürüzsüz bir yüzey görüntüsüne sahiptir. Ancak Şekil 5(b)'deki yüzey mikroyapısı incelendiğinde PEEK+%30CE kompozit aşınma yüzeyinde derin ve geniş aşınma izleri olduğu gözlenmiştir. Yani PEEK polimeri için abradif aşınma mekanizması şeklinde bir aşınma gözlenmiştir. Şekil 5(c,d) ise sırasıyla katkısız PEEK/%25CE+%40CaCO₃+UPET çifti ve PEEK+%30CE/UPET+%25CE+%40CaCO₃ çifti disk aşınma yüzeyi optik mikroskop yüzey görüntüleri verilmiştir. Şeki 5(c)'de verilen diskin aşınma yüzey mikroyapısı incelendiğinde disk yüzeyinde beyaz renkli polimer film tabakalarının oluştuğu görülmektedir. Oluşan bu film tabakası aşındırıcı özellikte olan cam elyafların yüzeyini kapatmakta ve abradif aşınma etkisini azaltıcı etki yaparak katkısız PEEK polimerinin daha az aşınmasına dolayısıyla aşınma oranının düşmesine sebep olduğu düşünülmektedir (bakınız Şekil 4). Şekil 5(d)'de verilen diskin

aşınma yüzey mikroyapısı incelendiğinde disk yüzeyinde uzun cam elyafların kırıldığı görülmektedir. PEEK+%30CE kompozit aşınma yüzeyinde de derin ve geniş aşınma izleri görülmektedir. Dolayısıyla pim ve disk yüzeylerin birbirleriyle temas etmeleri sonucunda hem pim hem de disk malzemelerde bulunan cam elyaflar kırılmakta ve kırılan küçük boyutlu cam elyaflar yumuşak olan polimer matris malzemenin daha fazla aşınmasına sebep olduğu dolayısıyla spesifik aşınma oranının yüksek olduğu sonucunu ortaya çıkarmaktadır (Bakınız Şekil 4).



Şekil 5. a) Katkısız PEEK polimeri ile b) PEEK+%30CE kompozitin optik mikroskop aşınma yüzey görüntüleri c) Katkısız PEEK/%25CE+%40CaCO₃+UPET disk çifti disk aşınma yüzeyi d) PEEK+%30CE kompoziti/%25CE+%40CaCO₃+UPET disk çifti disk aşınma yüzeyi

SONUÇ

Bu çalışmada, tribolojik testler, oda sıcaklığında, 1.77, 3.53 ve 5.30 MPa basınçlar altında ve 30 m/dakika kayma hızında pin-disk aşınma test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada elektrik yalıtım uygulamalarında kullanma amaçlı olarak seçilen %20 ve %30 cam elyaf takviyeli PEEK kompozitleri ile katkısız PEEK termoplastik polimerinin aşınma ve sürtünme özellikleri incelenmiş ve elde edilen veriler ışığında aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır;

- Bu çalışmada kullanılan katkısız PEEK polimer ile PEEK+%20CE ve PEEK+%30CE kompozit malzemelerin sürtünme katsayısı uygulanan basıncın artması ile artış göstermiştir. En düşük sürtünme katsayısı 0.21 değeri ile katkısız PEEK polimerinde elde edilirken en yüksek sürtünme katsayısı ortalama 0.30 değeri ile PEEK+%30CE kompozitinde elde edilmiştir.
- Katkısız PEEK polimeri için spesifik aşınma oranı ortalama $1.33 \times 10^{-14} \text{ m}^2 \text{ N}^{-1}$ civarında iken PEEK+%20CE kompoziti için ortalama $2.42 \times 10^{-14} \text{ m}^2 \text{ N}^{-1}$ civarında ve PEEK+%30CE kompoziti için ise spesifik aşınma oranı ortalama $3.04 \times 10^{-14} \text{ m}^2 \text{ N}^{-1}$ civarındadır.

- Katkısız PEEK polimeri ile PEEK+% 20CE ve PEEK+%30CE kompozitleri için, uygulanan basınçtaki artışla birlikte spesifik aşınma oranı değerlerinde artış gözlemlenmiştir.
- En yüksek aşınma oranı $4.42 \times 10^{-14} \text{ m}^2 \text{ N}^{-1}$ değeri ile PEEK+%30CE kompozitinde elde edilirken bunu $3.52 \times 10^{-14} \text{ m}^2 \text{ N}^{-1}$ değeri ile PEEK+%20CE kompoziti takip etmektedir. En düşük aşınma oranı ise $1.13 \times 10^{-14} \text{ m}^2 \text{ N}^{-1}$ değeri ile katkısız PEEK polimerinde elde edildiği gözlemlenmiştir.
- Gerçekleştirilen tribolojik çalışmalar sonunda kullanılan malzeme çiftleri arasında katkısız PEEK polimerinin PEEK+%20CE ve PEEK+%30CE kompozitlerine göre sırasıyla ortalama %45 ve %56 oranında aşınmaya daha dirençli olduğu tespit edilmiştir.
- Deneylede kullanılan malzemeler arasında katkısız PEEK polimeri PEEK+%20CE ve PEEK+%30CE kompozitlerine göre sırasıyla ortalama %7 ve %12,5 oranında daha hafif olduğu tespit edilmiştir. Bunun sonucunda ise parça üretim sayısı artacak ve maliyetler azalacaktır.
- Yapılan deneyler sonucunda elde edilen verilere göre tribolojik performans açısından katkısız PEEK polimer/%25CE+%40CaCO₃+UPET kompozit çiftinin elektriksel yalıtım uygulamalarında kullanımı için en uygun çift olduğu tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

- Anonim, 2008. Poliüretan Döküm Reçineleri, <http://www.epoks.com.tr/urunlerimiz/poliuretan-dokum-recineleri/> (Erişim Tarihi: 10 November 2020).
- Anonim, 2015. Epoksi, <https://polikem.com/epoksi-c-5/> (Erişim Tarihi: 10 November 2020).
- Anonim, 2015. Fenolik, <https://polikem.com/fenolik-c-15> (Erişim Tarihi: 10 November 2020).
- Anonim, 2018. Doymamış Polyester Reçineler, <http://www.izelkimya.com.tr/urunler/273/doymamis-polyester-recineler/tr> (Erişim Tarihi: 10 November 2020).
- Anonim, 2020. Mühendislik plastikleri, <https://www.polikim.com.tr/> (Erişim Tarihi: 10 November 2020).
- Anonymous, 2005. 9 Examples of Industrial Polymers You Probably Use Every Day, <https://www.entrepreneur-resources.net/9-examples-of-industrial-polymers-you-probably-use-every-day> (Date of access: 11 November 2020).
- Anonymous, 2012. Peek (polyetheretherketone) – 30% glass filled, <http://sterlingplasticsinc.com/materials/peek-polyetheretherketone-30-glass-filled/> (Date of access: 11 November 2020).
- Anonymous, 2015. High performance, https://www.victrex.com/~media/datasheets/victrex_tds_450gl30_black.pdf (Date of access: 11 November 2020).
- Anonymous, 2017. Ultramid, https://plastics-rubber.basf.com/global/en/performance_polymers/products/ultramid.html (Date of access: 11 November 2020).
- Anonymous, 2018. Polymer Properties Guide, <https://www.dupont.com/knowledge/choosing-the-right-polymer.html> (Date of access: 11 November 2020).
- Anonymous, 2019. Automotive applications for PA66, <https://www.ascendmaterials.com/products/brochures/automotive-applications-for-pa66> (Date of access: 11 November 2020).
- Anonymous, 2019. PEEK, <https://nsb-polymers.de/tr/peek-polietereterketon/> (Date of access: 9 November 2020).
- Anonymous, 2020. Polyetheretherketone <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polyetheretherketon-e-peek-thermoplastic#> (Date of access: 9 November 2020).

- Anonymous, 2020. Aircraft-aerospace, <https://www.ensingerplastics.com/en/aircraft-aerospace> (Date of access: 11 November 2020).
- Anonymous, 2020. Carbon Fiber Compounds, <https://www.rtpcompany.com/products/structural/carbon-fiber/cf/> (Date of access: 11 November 2020).
- Anonymous, 2020. Components (E/E, motors), <https://www.celanese.com/en/industries/electrical-and-electronics/components> (Date of access: 11 November 2020).
- Anonymous, 2020. Electrically insulating plastics, <https://www.ensingerplastics.com/en/shapes/plastic-material-selection/electrically-insulative> (Date of access: 11 November 2020).
- Anonymous, 2020. Materials Properties Guide, https://www.victrex.com/~media/literature/en/material-properties-guide_us-4-20.pdf (Date of access: 9 November 2020).
- Anonymous, 2020. PEEK (Polyarylethe-retherketone), <https://www.bpf.co.uk/plastipedia/polymers/peek.aspx> (Date of access: 9 November 2020).
- Anonymous, 2020. PP - Polypropylene, <https://www.ensingerplastics.com/en/shapes/industrial-plastics/pp> (Date of access: 11 November 2020).
- Bahadur S, Tabor D, 1984. The wear of filled polytetrafluoroethylene. *Wear*, 98; 1-13.
- Bahadur S, Tabor D, 1985. Role of Fillers in the Friction and Wear Behaviour of High-Density Polyethylene in: LH. Lee (Ed), *Polymer Wear and its control*, ACS Symposium Series, Washington DC, 287; 253-268.
- Bijwe J, Logani CM, Tewari US, 1990. Influence of fillers and fibre reinforcement on abrasive wear resistance of some polymeric composites. *Wear*, 138: 77-92.
- Biron M, 2013. *Thermoplastics and Thermoplastic Composites*, William Andrew Publisher, Elsevier Ltd. Oxford.
- Blanchet TA, Kennedy FE, 1991. Effects of oscillatory speed and mutual overlap on the tribological behavior of PTFE and selected PTFE-based self-lubricating composites. *Tribol. Trans.* 34: 327-334.
- Choon Kang S., Won Chung D, 2003. Improvement of Frictional Properties and Abrasive, *Wear* 254; 103–110.
- Cogswell FN, 2013. *Thermoplastic Aromatic Polymer Composites*. Elsevier books, s.1-288, ISBN 9781483164762.
- Da Silva CH, Tanaka DK, Sinatora A, 1999. The Effect of Load and Relative Humidity on Friction Coefficient between HDPE on Galvanized Steel- Preliminary Results. *Wear* 225-229; 339-242.
- Friedrich K, (Ed.), 1986. *Friction and Wear of Polymer Composites*, Composite Materials Series, Elsevier, Amsterdam.
- Gachter R, Müller H, 1993. *Plastics Additives Handbook*, Cincinnati: Hanser/Gardner Publications Inc.
- Ghazzawi YM, Osorio, AF, Heitzmann MT, 2020. The Effect of Fibre Length and Fibre Type on the Fire Performance of Thermoplastic Composites: The Behaviour of Polycarbonate as an Example of a Charring Matrix. *Construction and Building Materials*, 234; Article Number: UNSP 117889.
- Hamilton S, Munoz-Escalona P, 2019. Enhancement of wear properties of a polyether ether ketone polymer by incorporation of carbon and glass fibers. *Journal of Applied Polymer Science*, 136(22): Article Number: 47587.
- Hooke CJ, Kukureka SN, Liao P, Rao M, Chen YK, 1996. The Friction and Wear Of Polymers İn Non-Conformal Contacts. *Wear* 200; 83-94.
- Horák Z, Fortelný I, Kolařík J, Hlavatá D, Sikora A, 2005. *Polymer Blends*, Encyclopaedia of Polymer Science and Technology, John Wiley & Sons, Inc. 12; 399–461.
- Hu X, 2000. Friction and Wear Behaviors of Toughened Polyoxymethylene Blend under Water Lubrication. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 39 (1); 137-150.

- Hutchings IM, 1992. Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials. Edward Arnold, London, publisher pp.51.
- Ji SJ, Yu HJ, Zhao J, Liang FS, 2015. Mechanical Properties and Machinability of Glass Fiber-Reinforced Polyetheretherketone. *Strength of Materials*, 47(1); 198-204.
- Kauss HH, (Ed.), 1993. Advanced Thermoplastic Composites: Characterization and Processing, Hanser, Munich,
- Kinvi-Dossou G, Boumbimba RM, Bonfoh N, Garzon-Hernandez S, Garcia-Gonzalez D, Gerard P, Arias, A, 2019. Innovative Acrylic Thermoplastic Composites versus Conventional Composites: Improving The Impact Performances. *Composite Structures*, 217; 1-13.
- Kohan MI, 1995. Nylon Plastics Handbook. New York: Hanser Pub Inc.
- Kyu T, Zhou ZL, Zhu GC, Tajuddin Y, Qutubiddin S, 1996. Novel filled polymer composites prepared from in situ polymerization via a colloidal approach: I. Kaolin/Nylon-6 in situ composites. *Journal of Polymer Science. Part B: Polymer Physics*, 34; 1761-1768.
- Lawrence CC, Stolarski TA, 1989. Rolling Contact Wear of Polymers: A Preliminary Study. *Wear* 132; 83-91.
- Lewis MWJ, 1986. Friction and wear of PTFE-based reciprocating seals. *Lubric. Eng.*, 42: 152-158.
- Li DX, Deng X, Wang J, Yang J, Li X, 2010. *Wear*, 269(3-4); 262–268.
- Ludema KC, Tabor D, 1966. The Friction and Visco-Elastic Properties of Polymeric Solids. *Wear*, 9(5); 329-348.
- Meddad A, Fisa B, 1997. Stress-strain behavior and tensile dilatometry of glass bead-filled polypropylene and polyamide 6. *Journal of Applied Polymer Science*, 64(4); 663-665.
- Nielsen LE, 1974. Mechanical Properties of Polymers and Composites, New York: Marcel Dekker.
- Pecorini TJ, Hertzberg RW, 1994. The fracture behavior of rubber-toughened, short-fiber composites of nylon 6,6, *Polymer Composites*, 15; 174–183.
- Plamen GM, Ciprian TD, Stephen JP, Alexandros DG, 2005. Mechanical properties of short fiber reinforced thermoplastic blends, *Polymer*, 46; 3895-3905.
- Pukanszky B, 1990. Influence of interface interaction on the ultimate tensile properties of polymer composites. *Composites*, 21(3);255–262.
- Samyn P, De Baets P, Schoukens G, Hendrickx B, 2003. Tribological behavior of pure and graphite-filled polyimides under atmospheric conditions, *Polymer Engineering and Science* 43(8); 1477–1487.
- Santner E, Czichos H, 1989. Tribology of Polymers. *Tribology International*; 22(2); 103-109.
- Shiao, ML, Nair SV, Garrett PD, Pollard RE, 1994. *Polymer*, 35(2); 306–314.
- Sun HF, Yang XJ, Wei K, Wu YZ, Fang WJ, 2019. Non-isothermal crystallization kinetics of continuous glass fiber-reinforced poly (ether ether ketone) composites. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 138(1); 369-378.
- Taesler R, Wittich H, Schulte K, Kricheltorf HR, 1996. *J Appl Polym Sci* 61:783.
- Tanaka H, 1999. Shear viscosity of nylon 6 melts reinforced with microfibrinous calcium silicate hydrate, *Polymer. Engineering Science*, 39; 817 – 824.
- Tanaka K, Kawakami S, 1982. Effect of various fillers on the friction and wear of polytetrafluoroethylene-based composites. *Wear*, 79: 221-234.
- Tewari US, Sharma SK, Vasudevan P, 1989. *Rev. Macromolecules Chemical Phys.* 29(1); 1-38.
- Tjong SC, Meng YZ, 1999. Properties and morphology of polyamide 6 hybrid composites containing potassium titanate whisker and liquid crystalline copolyester, *Polymer* 40(5); 1109-1117.
- Unal H, Mimaroglu A, 2003. Friction and Wear Behavior of Unfilled Engineering Thermoplastics. *Materials&Design*, 24; 183-187.

- Unal H, Mimaroglu A, Alkan M, 2004. Mechanical properties and morphology of nylon-6 hybrid composites, *Polymer International*, 2004, 53(1); 56–60.
- Washabourg FJ, 1987. Surface treated kaolins for engineering thermoplastics, 42nd Annual Conference, February 2-6.
- Watanabe M, 1968. The Friction and Wear Properties of Nylon, *Wear* 110; 379-388.
- Wiebeck H, Borrelly DF, Xavier C, Santos PS, Ascitti SA, Correa MP, 1998. The effect of silane coupling agents on a composite polyamide-6/talc, *Brazilian Journal of Chemical Engineering* 15(4); 406–409.
- Xing Z, 1996. Fly ash as a filler for thermoplastics, *Energy Abstracts* 37(3); 185.
- Xu Z, Wang GB, Hu JZ, Zhang M, Zhang SL, Gai XZ, Li YG, Yu R, Luan JS, 2018. Influence of processing conditions on tensile property of continuous glass fiber-reinforced PEEK composites fabricated by the co-wrapped yarn method. *High Performance Polymers*, 30(4); 489-499.
- Yamaguchi Y, 1990. *Tribology of Plastic Materials: their characteristics and applications to sliding components*. Amsterdam: Elsevier.
- Yang X, Wu Y, Wei K, Fang WJ, Sun HF, 2018. Non-isothermal crystallization kinetics of short glass fiber reinforced poly (ether ether ketone) composites. *Materials*, 11(11): Article Number: 2094.
- Yuanjian T, Isaac DH, 2008. Combined impact and fatigue of glass fiber reinforced composites, *Composites Part B: Engineering*, 39(3); 505-512.
- Zsidai L, Katai L, 2016. Abrasive wear and abrasion testing of PA 6 and PEEK composites in small-scale model system. *Acta Polytechnica Hungarica*, 13(6); 197-214.
- Zweifel H, Maier R, Schiller M, 2009. *Plastics Additives Handbook*, 6th Edition. Cincinnati, OH: Hanser Gardner Publications.