



KARBON FİBER TAKVİYELİ GRAFİT ve PTFE KATKILI POLİ-ETER-ETER-KETON (PEEK) POLİMER KOMPOZİTİN TRİBOLOJİK PERFORMANSLARINA KAYMA HIZININ ETKİSİNİN BELİRLENMESİ

¹Ahmet MASLAVİ , ²Hüseyin ÜNAL , ³Salih Hakan YETGİN 

¹ Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya, TÜRKİYE

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

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

¹ahmad.abdulkarim@ogr.sakarya.edu.tr, ²unal@subu.edu.tr, ³shakanyetgin@tarsus.edu.tr

(Geliş/Received: 09.02.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 29.04.2022)

ÖZ: Farklı endüstriyel sektörlerde kullanılan makinalarda plastik esaslı rulman, makara ve burç gibi makine elemanları kullanılmaktadır. Bu uygulamalardaki makine elemanlarının çalışma esnasındaki hızları ve taşıma yükleri malzemenin ömrünü belirlemektedir. Bu deneysel çalışmada, rulman, makara ve burç yapımında kullanılan yüksek performanslı mühendislik plastikleri arasında yer alan karbon fiber takviyeli grafit ve poli-tetra-flor-etilen (PTFE) katkılı poli-eter-eter-keton (HV-PEEK) polimeri kullanılarak tribolojik performansları incelenmiştir. Testlerde AISI304 paslanmaz çelik karşı disk kullanılmış, deneyler kuru kayma şartları altında ve oda sıcaklığında yapılmıştır. Aşınma deneyleri, 3.53 MPa basınç altında, düşük (1.0 m/s) ve yüksek (4.0 m/s) kayma hız aralıklarında pim-disk aşınma test cihazında gerçekleştirilmiştir. Aşınma test sonuçlarına göre, kayma hızına bağlı olarak HPV-PEEK polimerinin sürtünme katsayısı ve spesifik aşınma oranı değişimi incelenmiştir. Elde edilen deney sonuçlarına göre artan kayma hızı ile birlikte polimerin sürtünme katsayısı azalırken spesifik aşınma oranı değerleri artmıştır. Genel olarak sürtünme katsayısı 0.14 ile 0.19 aralığında elde edilmiş, aşınma oranı ise 1.66×10^{-6} ile 0.48×10^{-6} mm³/Nm aralığında değişim göstermiştir. Deneylerde kullanılan HV-PEEK polimer kompozitinde düşük kayma hızlarında abrazyon aşınma mekanizması gözlenirken yüksek kayma hızlarında adhezif aşınma mekanizması gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: PEEK, Triboloji, PTFE, Karbon fiber, Grafit, Kayma hızı

Determination of the Effect of Sliding Speed on Tribological Performances of Carbon Fiber Reinforced, Graphite and PTFE Filled Poly-ether-ether-ketone (PEEK) Polymer Composite

ABSTRACT: Machine elements such as plastic-based bearings, rollers and bushings are used in machines used in different industrial sectors. The sliding speed and carrying loads of the machine elements in these applications determine the life of the material. In this experimental study carbon fiber reinforced and graphite and poly-tetra-flour-ethylene (PTFE) filled poly-ether-ether-ketone (HPV-PEEK) polymer, which is among the high performance engineering plastics used in bearings, rollers and bushings were used to determine tribological performances. AISI 304 stainless steel counter disc was used in the tests, the experiments were carried out under dry sliding conditions and at room temperature. Tribological tests were carried out on a pin-on-disc wear test machine under 3.53 MPa and at low (1.0 m/s) and high (4.0 m/s) sliding speeds. According to the wear test results, the friction coefficient decreased while wear rate values increased with the increase in sliding speed values. In general, the friction coefficient was obtained between 0.14 and 0.19, while the specific wear rate varied between 1.66×10^{-6} and 0.48×10^{-6} mm³/Nm. While

abrasive wear mechanism was observed in HV-PEEK polymer at low sliding speed values, adhesive wear mechanism was observed at high sliding speed values.

Keywords: PEEK, Tribology, PTFE, Carbon fiber, Graphite, Sliding speed

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Poli-eter-eter-keton (PEEK) polimeri, yüksek performanslı polimerler grubunda yer alan yarı kristal yapıya sahip bir termoplastik polimer çeşididir. PEEK polimeri üstün mekanik özelliklere, kimyasal korozyon direncine, yüksek ergime sıcaklığına (343 °C), yüksek camı geçiş sıcaklığına (143 °C), termal kararlılığa, iyi derecede tribolojik özelliklere ve yüksek radyasyon direncine sahip yarı-kristal yapıya sahip termoplastik esaslı mühendislik plastiklerinden birisidir [Yutao ve diğ., 2020; Mir ve diğ., 2019; Shah ve diğ., 2021; Huayuan ve diğ., 2009; Karpe Ganesh ve Dhamejani, 2016]. PEEK polimeri uçak ve uzay sanayi, makine, otomotiv, elektrik/elektronik, tekstil, enerji, denizcilik, nükleer endüstrisi, kimya ve sağlık gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Çoğu durumda, PEEK polimer kompoziti, yüksek yük ve uzun çalışma saatlerine dayanması gereken uygulamalarda da kullanılabilir. Bununla birlikte, PEEK polimeri, kuru kayma temas koşulları altında çalışma gereksinimlerini karşılamayı zorlaştıran karşı disk malzemeye yapışması nedeniyle nispeten yüksek sürtünme katsayısı ve düşük aşınma direnci göstermektedir [Yutao ve diğ., 2020; Puertolas ve diğ., 2019; Kharat ve diğ., 2019; Zalaznik ve diğ., 2016]. PEEK polimerinin tribolojik performansını artırmak için polimer malzeme bünyesine inorganik katkı ve farklı fiber takviyeleri ilave edilmektedir. Literatürde bu konu ile ilgili bazı çalışmalara rastlanmaktadır. Petrica ve arkadaşları [2016] PEEK polimeri ile çok yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (ÇYMAPE) polimerinin tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada PEEK polimerinin sürtünme katsayısının ÇYMAPE polimerine göre üç kat daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Wang ve arkadaşları [2016] poliimmit (PI), poli-tetra-flor-etilen (PTFE) ve PEEK polimerlerinin farklı sıcaklık, kayma hızı ve yük altındaki aşınma ve sürtünme özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda artan kayma hızı ile polimer malzemelerin sürtünme katsayısı değerlerinin arttığı ve aşınma oranı değerlerinin ise azaldığı ifade edilmiştir. Uygulanan yükün artırılması ile polimer malzemelerin sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerlerinin azaldığı belirtilmiştir. Aşınma ve sürtünme özelliklerinin uygulanan sıcaklığın camı geçiş sıcaklığının üzerinde veya altında olmasına bağlı olarak değiştiği belirtilmiştir. Kharat ve arkadaşları [2019] %30 cam elyaf (CE) takviyeli PEEK kompozitlerin 50-100 ve 150 °C sıcaklıklar altındaki tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. 80 N yük ve 150 °C sıcaklık altında CE/PEEK kompozitinin üstün aşınma direnci özelliği gösterdiği belirtilmiştir. Li ve arkadaşları [2013] bilya-disk aşınma test düzeneği kullanarak katkısız PEEK polimeri ve %30 cam elyaf takviyeli PEEK kompozitlerin kuru kayma şartları ve oda sıcaklığındaki tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Deneyler sonucunda uygulanan yükün ve kayma zamanının artırılması ile PEEK ve PEEK kompozitin sürtünme katsayısı ve aşınma kaybı değerlerinin arttığı ve sonrasında kararlı hale geldiği belirtilmiştir. Shukur ve Dearn [2020] katkısız PEEK polimeri ile %30 karbon fiber takviyeli PEEK kompozitin kuru ve yağlı çalışma ortamlarındaki aşınma ve sürtünme özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda hem PEEK hem de karbon elyaf takviyeli PEEK kompozitin silikon ortamındaki sürtünme katsayısının yağlı ortamdaki sürtünme katsayısına göre %50 oranında daha düşük olduğu belirtilmiştir. PEEK/30KE kompozitin silikon ortamında en iyi aşınma direnci gösterdiği belirtilmiştir. Bijwe ve Nidhi [2007] cam elyaf, karbon elyaf takviyeli PTFE ve grafit katkılı PEEK kompozitlerin aşınma mekanizmalarını inceledikleri çalışma sonucunda %30 karbon fiber takviyesinin mekanik özellikleri geliştirdiği ancak tribolojik performansı pek etkilemediği belirtilmiştir. Katı yağlayıcıların ise PEEK polimer kompozitlerin sürtünme ve aşınma özelliklerini geliştirdiği belirtilmiştir. Davide ve arkadaşları [2021] %15 oranında karbon fiber takviyeli PEEK kompoziti ile %10 karbon fiber + %10 PTFE + grafit katkılı PEEK kompozitinin tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda PEEK kompozitlerin 1 N ve 5 N yük altındaki sürtünme katsayılarının sırasıyla 0.22 ve 0.16 civarında elde edildiği belirtilmiştir. Liao ve arkadaşları [2022] grafit/PTFE/PEEK kompozit kaplamaların tribolojik özelliklerini inceledikleri çalışma sonucunda aşınma oranının ve sürtünme

katsayısının grafit ve PTFE ilavesi ile önemli oranda azaldığı belirtilmiştir. Yutao ve arkadaşları [2020] grafen oksit (GO) ve molibden disülfid (MoS_2) katkı PEEK kompozitlerin tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada grafen oksit ve MoS_2 ilavesinin PEEK kompozitin sürtünme katsayısını ve aşınma oranını azalttığı belirtilmiştir. PEEK polimeri bünyesindeki optimum GO ve MoS_2 katkı oranının sırasıyla %0.7 ve %15 olduğu belirtilmiştir. Zalaznik ve arkadaşları [2016] PEEK polimerine %0.5, 1, 2 ve 5 oranlarında mikro ve nano boyutlu molibden disülfid (MoS_2) ve tungsten disülfid (WS_2) katkıları ilave etmişler ve elde ettikleri farklı katkı ve kompozisyonlu PEEK kompozitlerin tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda kompozitlerin sürtünme katsayısının %30 oranında azaldığı belirtilmiştir. Hem mikro- hem de nano- boyuttaki molibden disülfid ve tungsten disülfid katkıların ilavesi ile karşı disk yüzeyde oluşan transfer film tabakasının aşınma direncini %51 oranında artırdığı belirtilmiştir. Puertolas ve arkadaşları [2019] %1-10 oranlarında grafen-nano-plaka (GNP) katkı PEEK kompozitlerin termal, mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Kristalin faz miktarı, GNP miktarının artması ile %39'dan %34'e azalmıştır. Grafen miktarı ile kompozitin elastiklik modülü değeri artarken çekme dayanımı, kopma uzaması ve tokluk değerleri azalmıştır. PEEK polimerine ilave edilen GNP ile sürtünme katsayısı %38 civarında aşınma oranı ise %83 civarında azalmıştır. Düşük GNP katkı PEEK kompozitlerde abrasif aşınma mekanizmasının, yüksek GNP katkı PEEK kompozitlerde ise yorulma aşınması mekanizmasının etkili olduğu belirtilmiştir. Yapılan literatür araştırmalarında saf PEEK polimeri ile cam fiber takviyeli ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerin yaygın olarak değişik sektörlerde kullanıldığı tespit edilmiştir. Bu amaçla, yüksek yük ve hıza maruz kalınan tribolojik uygulamalarda kullanılacak grafit, PTFE ve karbon fiber takviyeli PEEK (HPV-PEEK) polimer kompozit malzeme üretilmiştir. Karbon fiber kompozitin mukavemet ve rijitliğini artırırken grafit ve PTFE katı yağlayıcı katkıları ise sürtünme katsayısının düşmesine ve aşınma direncinin artmasını sağlamaktadır. Yapılan literatür çalışmasında bu malzeme ile ilgili herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu sebeple yapılan deneysel çalışmada yüksek performanslı mühendislik plastikleri arasında yer alan %10 karbon fiber takviyeli %10 grafit ve %10 poli-tetra-flor-etilen katkı poli-eter-eter-eton (HPV-PEEK) polimerinin AISI304 paslanmaz çelik diske karşı kuru kayma şartları altındaki tribolojik performansları incelenmiştir. Bu çalışmada, rulman, makara, burç ve aşınma kılavuzları gibi uygulamalarda kullanılan bu malzemenin yüksek hızlardaki tribolojik davranışları belirlenmiştir. Çalışma, 1.0, 2.0, 3.0 ve 4.0 m/s kayma hızlarında 3.53 MPa basınç altında 2000 m kayma yolunda kuru kayma şartlarında oda sıcaklığında ve pim-disk aşınma test cihazında gerçekleştirilmiştir. Yukarıda belirtilen şartlar altındaki gerçekleştirilen HPV-PEEK kompozitin sürtünme katsayısı ve spesifik aşınma oranı değişimi incelenmiştir.

DENEYSEL YÖNTEM (EXPERIMENTAL METHOD)

Aşınma deneylerinde kullanılan rulman çeşidi PEEK polimer kompoziti, Ketron HPV PEEK ticari koduyla Mitsubishi Chemical Advanced Materials firmasından temin edilmiştir. Şekil 1'de gösterildiği gibi ekstrüzyonla çubuk formunda üretilmiş olup 10 mm çapında ve 1000 mm uzunluğunda elde edilmiştir. Şekil 2'de HPV-PEEK polimer kompozitin tipik kullanım alanlarına örnekler ve Çizelge 1'de HPV-PEEK polimer kompozitin fiziksel, mekanik, termal ve tribolojik özellikleri verilmiştir.



Şekil 1. HPV PEEK polimer kompozitin ekstrüde edilmiş çubuk görüntüsü

Figure 1. Extruded rod image of HPV PEEK polymer composite



Şekil 2. HPV-PEEK polimer kompozitin tipik kullanım alanı [<https://polyfluorold.com>].

Figure 2. Typical use of HPV-PEEK polymer composite

Çizelge 1. HPV-PEEK polimer kompozitin fiziksel, mekanik, termal ve tribolojik özellikleri [<http://qcpp.matweb.com>]

Table 1. Physical, mechanical, thermal and tribological properties of HPV-PEEK polymer composite

Özellik	Değeri	Birimi	Test standardı
Yoğunluk	1.44	g/cm ³	ASTM D792
Su emme, 24 saat	0.050	%	ASTM D570(2)
Çekme mukavemeti	75.8	MPa	ASTM D638
Elastiklik modülü (çekmede)	5860	MPa	ASTM D638
Eğme mukavemeti	190	MPa	ASTM D790
Elastiklik modülü (Eğmede)	7580	MPa	ASTM D790
Sertlik	85	Rockwell M	ASTM D785
Ergime sıcaklığı	340	°C	ASTM D3418
Maksimum çalışma sıcaklığı	250	°C	
Sürtünme katsayısı (dinamik), kuru ortam, çelik disk	0.21	-	QTM 55007
Aşınma oranı	201x10 ⁻⁸	mm ³ /Nm	QTM 55010

Aşınma deneyleri, pim-disk aşınma test cihazı yardımıyla oda sıcaklığında kuru kayma şartları altında yapılmıştır. 10x1000 mm ebatlarında çubuk formunda temin edilen HPV-PEEK kompozit aşınma ve sürtünme testlerinde pim numunesi olarak kullanılmıştır. Aşınma deney numuneleri geleneksel torna tezgahında 6 mm çapa ve 50 mm uzunluğunda olacak şekilde hassas olarak tornalanmıştır (Şekil 3). Çizelge 2’de çalışmada kullanılan malzemeler için aşınma test parametreleri verilmiştir.



Şekil 3. HPV-PEEK polimer kompoziti pim numunesi

Figure 3. HPV-PEEK polymer composite pin specimen

Çizelge 2. Aşınma testi parametreleri

Table 2. Wear test parameters

Malzeme	Test Sıcaklığı (°C)	Kayma mesafesi (m)	Uygulanan basınç (MPa)	Kayma hızı (m/s)
HPV-PEEK	23±1	2000	3.53	0.5
				1.0
				2.0
				4.0

Karşı disk malzeme olarak ise AISI 304 paslanmaz çelik kullanılmıştır. Disk malzemesi önce 90 mm çapında ve 5 mm kalınlığında olacak şekilde tornalanmış ve daha sonrasında ise düzlem yüzey taşlama cihazında taşlanmıştır. Taşlama yapılan diskin yüzey pürüzlülüğü ölçülmüş ve yüzey pürüzlülüğü 0,32 Ra olarak belirlenmiştir. Her aşınma deneyinden önce çelik disk ve polimer kompozit pim yüzeyleri asetonla temizlenmiş ve kurutulmuştur. Her aşınma testi öncesi numune pim ağırlığı (m_1) ve aşınma testi

sonrası pim ağırlığı (m_2) ölçülmüş ve ağırlık kaybı Δm yani ($m_1 - m_2$) tespit edilmiştir. Spesifik aşınma oranı (K_o) ise Eşitlik (1)'de verilen formül ile hesaplanmıştır. Formülde, L ; kayma mesafesi (m), q ; malzemenin yoğunluğu (g/cm^3) ve F ; uygulanan yük (N)' tür.

$$K_o = \frac{\Delta m}{L * \rho * F} \quad (1)$$

Deney numunelerinin sürtünme katsayısı ölçümleri disk üzerinde pim olacak şekilde tasarlanmış ve Şekil 4'te resmi verilen aşınma deney düzeneğinde ölçülmüştür. 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 deneyde kullanılan paslanmaz çelik disk malzeme bir vida yardımıyla bağlanır. Deneylerde kullanılan HPV-PEEK pim numunesi 6 mm çapında hazırlanmış olup aşınma düzeneğinde olan kola bağlanır. Aşınma cihazı çalıştırdıktan sonra kola bağlanan HPV-PEEK polimer kompozit pim numunesi diskin üzerine yavaş bir şekilde bırakılır. Pim numunesinin hareket halindeki diske temas etmesi sonucu oluşan sürtünmeyle birlikte numune bağlı olan kol aparatı dönüş yönüne göre hareket eder. Bu hareket yanal kuvvet olarak adlandırılır. Bu yanal kuvvet aşınma cihazına bağlı olan bir yük hücresi ile ölçülüp bilgisayara aktarılacak excell programında kaydedilir. Aşınma cihazı, aşınma yapılacak olan deneyler için dakikada 1000 veri ölçebilecek şekilde ayarlanmıştır. Deney süresi boyunca yanal yükü ölçen yaklaşık 65.000 veri elde edilmiştir. Bu yanal yük verileri Excell programında bir sütuna kaydedilmiş sonrasında uygulanan yüke bölünerek sürtünme katsayısı hesaplanmıştır. Deneylerde kullanılan HPV-PEEK polimer pim malzemesi ile paslanmaz çelik disk arasındaki sürtünme katsayısı (μ), yanal kuvvetin normal kuvvete oranıdır ve Eşitlik (2)'de verilen formül ile hesaplanmaktadır. Formülde μ : sürtünme katsayısını, F_s : sürtünme kuvvetini (N) ve F_n ise normal kuvveti (N) göstermektedir. Her bir aşınma testi en az üç kez tekrarlanmış olup ortalama değerler verilmiştir.

$$\mu = \frac{F_s}{F_n} \quad (2)$$



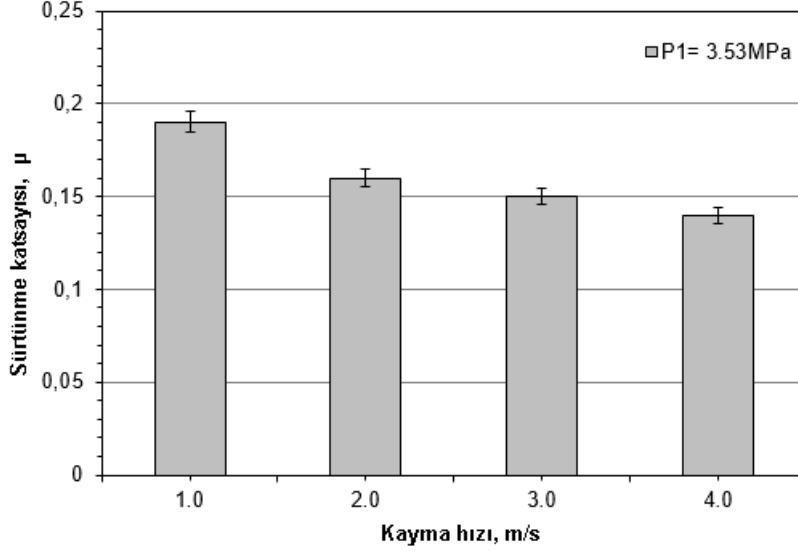
Şekil 4. Aşınma test cihazının gösterimi

Figure 4. Figure of the wear machine

DENEY SONUÇLARI (EXPERIMENTAL RESULTS)

Şekil 5'te HPV-PEEK yüksek performanslı polimer kompozitin 3.53 MPa basınç altındaki kayma hızına bağlı olarak sürtünme katsayısındaki değişim verilmiştir. HPV-PEEK kompozitin sürtünme katsayısı şekilde görüldüğü gibi artan kayma hızına bağlı olarak azalmaktadır. Kayma hızının %300 oranında artırılması ile HPV-PEEK kompozitin sürtünme katsayısı yaklaşık olarak %35.7 oranında azalmıştır. 1.0 m/s kayma hızında 0.19 olan sürtünme katsayısı değeri 4.0 m/s kayma hızında 0.14 olarak elde edilmiştir. Bu düşüşün sebebi ise paslanmaz disk yüzeyinde oluşan ve disk ile polimer arasındaki

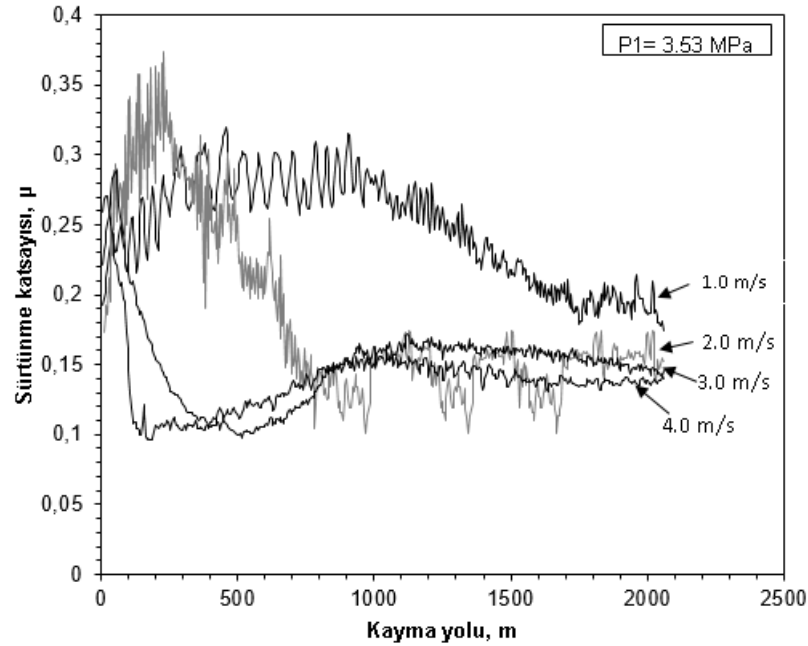
teması azaltan ince bir transfer film tabakasının oluşumudur. Oluşan bu transfer film tabakası, aşınma prosesi devam ettiğinde kararlı hal aşamasında daha düşük sürtünme katsayısı elde edilmesine sebep olmuştur.



Şekil 5. HPV-PEEK kompozitin sürtünme katsayısı-kayma hızı ilişkisi

Figure 5. Friction coefficient-sliding speed relationship of HPV-PEEK composite

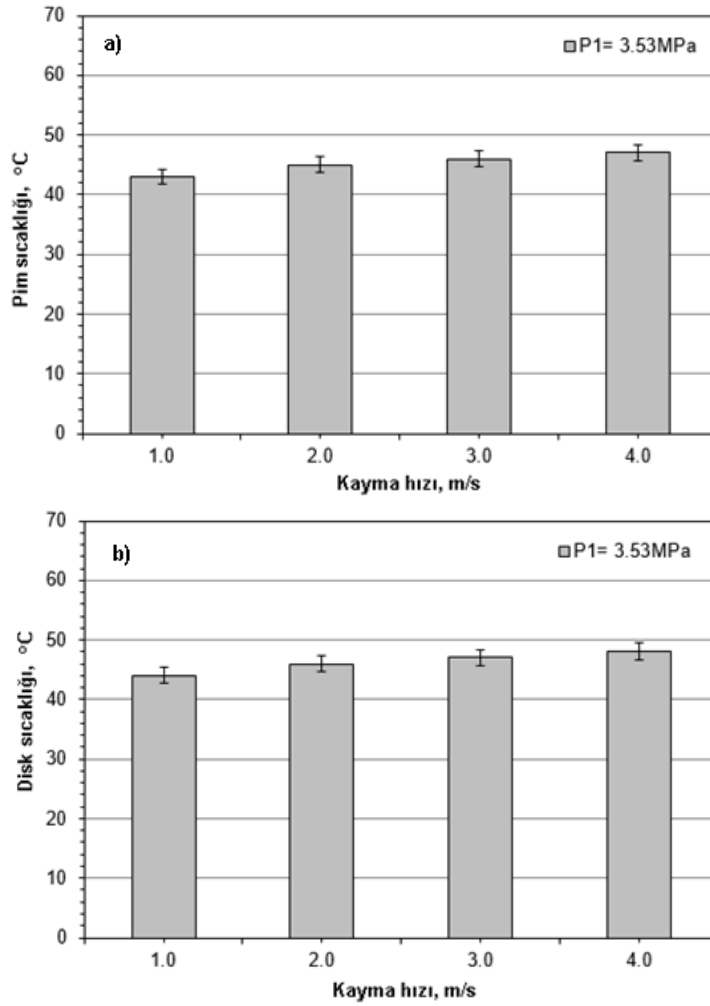
Şekil 6'da ise HPV-PEEK kompozitin farklı kayma hızlarına bağlı olarak sürtünme katsayısının kayma yoluna bağlı olarak değişimi verilmiştir. Bilindiği gibi polimer malzemelerin sürtünme davranışları başlangıç aşaması ve kararlı hal aşaması olmak üzere iki aşamada gerçekleşmektedir. Başlangıç aşamasında, polimer pim yüzeylerinde ve disk yüzeylerinde pürüzlülükler bulunmaktadır. Bu aşamada pim ve disk yüzeyleri temas ettiği için daha yüksek sürtünme katsayısı elde edilmektedir. Kararlı hal aşamasına ulaşıldığında ise bu pürüzlü yüzeyler oluşan polimer aşınması neticesinde ortadan kaybolmaktadır. Disk yüzeyi polimer aşınma partikülleri ile kaplanarak transfer film tabakasını oluşturmaktadır. Şekilde görüldüğü gibi düşük kayma hızında (1.0 m/s) kararlı hal aşaması yaklaşık 1800 m civarında elde edilirken yüksek kayma hızlarında (2.0-4.0 m/s) yaklaşık olarak 1000 m gibi mesafede kararlı hal aşaması elde edilmiştir. Yukarıda belirtildiği gibi yüksek kayma hızlarında, karşı disk yüzeyinde oluşan transfer film tabakası (Şekil 9-d) kararlı hal aşamasına geçiş mesafesini önemli oranda azaltmıştır. Yutao ve arkadaşları [2020] tarafından temas halindeki malzemelerin kararlı hal aşamasına daha kısa sürede ulaşmasının önemli olduğu, bu durumun enerji tüketimini azalttığı ve kompozitin performansını arttırdığı belirtilmiştir.



Şekil 6. HPV-PEEK kompozitin sürtünme katsayısı-kayma yolu ilişkisi

Figure 6. Friction coefficient-sliding distance relationship of HPV-PEEK composite

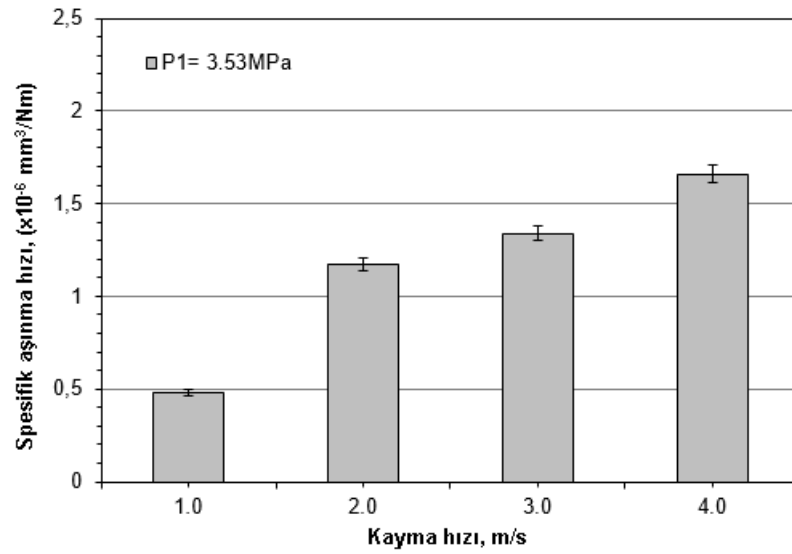
Viskoelastiklik ve sıcaklık değişimi polimer malzemelerin aşınma ve sürtünme özelliklerini etkileyen en önemli parametreler arasında yer almaktadır. Genellikle birbirine temas eden ve hareket eden iki malzeme arasında ısı oluşur ve oluşan bu ısı temas sıcaklığının artmasına sebep olmaktadır. Temas noktasındaki sıcaklık polimer malzemenin deformasyon sıcaklığından daha yüksek olması durumunda yumuşama meydana gelecektir ve bu durum polimer malzemelerin viskoelastik özelliklerini etkileyecektir. Şekil 7 a-b'de HPV-PEEK kompozitin kayma hızına bağlı olarak aşınma testleri sırasında ölçülen pim ve disk yüzeylerin sıcaklıkları verilmiştir. Şekiller de görüldüğü gibi artan kayma hızı ile hem pim yüzey sıcaklığı hem de disk yüzey sıcaklığı artmıştır. Polimer pim numunenin düşük kayma hızında (1.0 m/s) ölçülen sıcaklığı yaklaşık 43 °C civarında iken yüksek kayma hızında yaklaşık 47 °C olarak ölçülmüştür. Polimer pim numunenin kayma hızına bağlı olarak yüzey sıcaklığının yaklaşık %9.3 oranında arttığı belirlenmiştir. Disk yüzey sıcaklıkları ise artan kayma hızına bağlı olarak yaklaşık 44 °C'den 48 °C'ye çıkmış ve yaklaşık %9.0 oranında disk yüzey sıcaklığı artmıştır. Kararlı hal aşamasında temas noktasındaki lokal sıcaklık aşınma ve sürtünme özelliklerinin kontrol edilmesinde kritik parametredir. Özellikle ısıl iletkenliği düşük olan polimer malzemeler için sürtünme ısısının etkisiyle oluşan lokal sıcaklık değerleri aslında polimerin ölçülen sıcaklığından daha yüksektir. Yüksek sıcaklık, yüzeyde malzemelerin deforme olmasına ve kimyasal reaksiyonlara sebep olabilmektedir. Eğer lokal sıcaklık polimer malzemenin camsı geçiş sıcaklığına ulaşırsa polimer malzemedeki mukavemet azalımı sürtünme ve aşınma özelliklerini daha fazla etkileyecektir [Karpe Ganesh ve Dhamejani, 2016]. Kuru kayma şartları altında, temas sonucunda oluşan sıcaklığın sürtünme katsayısı üzerinde etkisi olduğu Song ve arkadaşları [2015] tarafından da bildirilmiştir. Birbirleriyle temas sonucu oluşan veya sisteme uygulanan sıcaklığın HPV-PEEK polimer malzemenin camsı geçiş sıcaklığı (143 °C) altında olduğu durumlarda, sürtünme katsayısının düşük olduğu, camsı geçiş sıcaklığında (143-152 °C) sürtünme katsayısının aniden arttığı ve 180 °C üzerindeki sıcaklıklarda sürtünme katsayısının çok yüksek değerlerde elde edildiği belirtilmiştir.



Şekil 7. HPV-PEEK polimer kompozitin kayma hızına bağlı olarak temas yüzey sıcaklığı değişimi a) pim, b) disk

Figure 7. Contact surface temperature change depending on sliding speed of HPV-PEEK polymer composite a) pin, b) disc

Şekil 8’de ise HPV-PEEK kompozitin farklı kayma hızlarına bağlı olarak spesifik aşınma oranı değerleri verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi artan kayma hızına bağlı olarak kompozitin spesifik aşınma oranında artış gözlenmiştir. Spesifik aşınma oranındaki bu artış kayma hızının 1.0 m/s’den 2.0 m/s’ye çıkarılmasıyla yaklaşık %143 oranında elde edilirken kayma hızının 4.0 m/s’ye artırılması ile daha da artarak yaklaşık %245.8 oranında elde edilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi HPV-PEEK polimerinin en düşük aşınma oranı $0.48 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ değeri ile 1.0 m/s kayma hızında elde edilirken en yüksek aşınma oranı ise $1.66 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ değeri ile 4.0 m/s kayma hızında elde edilmiştir. Juanjuan ve arkadaşları [2020] yaptıkları çalışmada, düşük yükler altında düşük aşınma oranı, yüksek yüklerde ise yüksek aşınma oranı değerleri elde etmişlerdir. Yaptıkları çalışmada uygulanan kayma hızı ve basınç değerleri arasında aşınma oranını etkileyen en önemli parametrenin kayma hızı olduğunu belirtmişlerdir. Yani yapılan tribolojik testler sonucunda uygulanan kayma hızına bağlı olarak HPV-PEEK kompozit malzemesi daha fazla aşınmakta ve bu da çalışma ömrünün azalmasına sebep olmaktadır. Rulman, makara, burç ve aşınma kılavuzları gibi uygulamalarda HPV PEEK polimer kompozitin kullanılmasında bu malzemenin yüksek hızlardaki tribolojik davranışları dikkate alınmalıdır.



Şekil 8. HPV-PEEK kompozitin spesifik aşınma oranı- kayma hızı ilişkisi

Figure 8. The specific wear rate-sliding speed relationship of HPV-PEEK composite

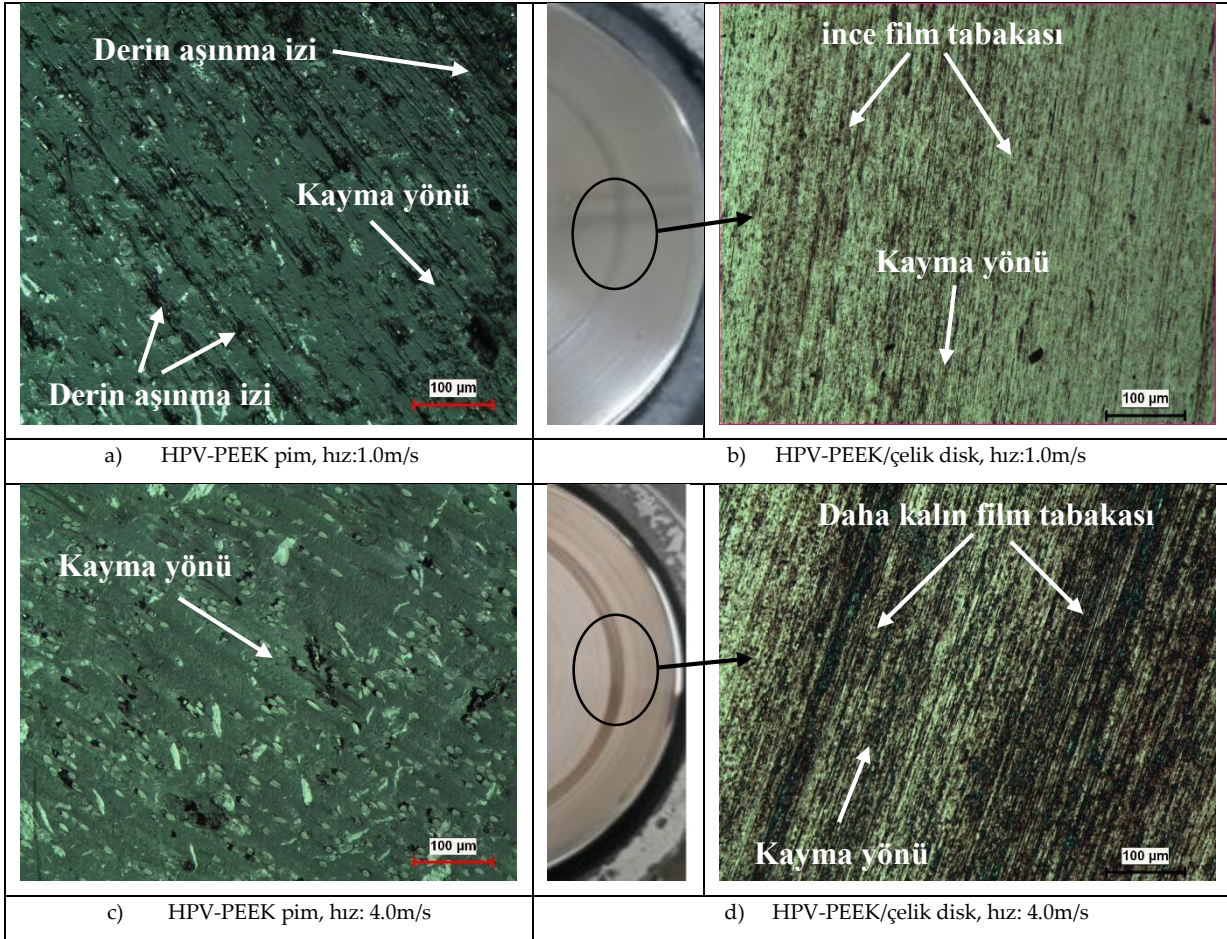
Şekil 9 a-d'de ise HPV PEEK polimer kompozitinin 3.53 MPa basınçta ve 1.0 m/s ve 4.0 m/s kayma hızlarında aşınma ve sürtünme testleri sonucunda elde edilen paslanmaz çelik disk ve polimer pim kompozitin optik mikroskopla alınan aşınma yüzey görüntüleri verilmiştir. Şekil 9 b ve d'de görüldüğü gibi hem düşük kayma hızında hem de yüksek kayma hızında çelik disk karşı yüzeylerinde transfer film tabakasının oluştuğu gözlenmiştir. Oluşan bu transfer film tabakasının kalınlığının ve dağılımının artan kayma hızı ile arttığı ve neredeyse tüm yüzeye yayıldığı görülmektedir. Transfer film tabakası, polimer pim numune ile çelik disk arasındaki teması azaltmış ve bu durum sürtünme katsayısının yüksek yüklerde (Bakınız Şekil 5 ve Şekil 6) azalmasının sebebinin açıklamaktadır. Şekil 9 a ve c'de ise HPV PEEK polimer kompoziti pim numunelerinin optik mikroskopta alınan aşınma yüzey görüntüleri verilmiştir. Mikroyapı görüntüleri incelendiğinde düşük kayma hızlarında kayma hızına paralel olarak şekillenen derin aşınma izlerinin oluştuğu gözlenirken artan kayma hızı ile aşınma izlerinin azaldığı belirlenmiştir. Bu durum, disk yüzeyinde oluşan transfer film tabakası ile açıklanabilir. Yutao ve arkadaşları [2020] aşınma yüzeylerinde oluşan izlerin PEEK polimerine göre çelik karşı diskin daha rijit ve sert olması ile ilgili olduğunu belirtmişlerdir. Sürtünme ve aşınma prosesi süresince çelik üzerindeki sert pürüzlerin nispeten daha yumuşak olan PEEK polimerine nüfuz ederek uygulanan yük ve kesme kuvveti etkisi ile PEEK polimerini koparttığı belirtilmiştir. Genellikle plastik deformasyon, delaminasyon ve kesme kuvvetinin oluşması ile PEEK polimeri bir film tabakası oluşturmak üzere karşı disk yüzeyine transfer olmaktadır.

SONUÇLAR (RESULTS)

HPV-PEEK polimer kompozitinin düşük ve yüksek kayma hızlarında tribolojik özelliklerinin incelendiği çalışma sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

HPV-PEEK polimer kompozitin sürtünme katsayısı kayma hızının artmasına bağlı olarak azalmıştır. Hızın 1.0 m/s den 2.0, 3.0 ve 4.0 m/s 'ye artırılmasıyla sürtünme katsayısı sırasıyla %15.7, %21 ve %26.3 oranında azalmıştır. Kayma hızı arttıkça pim ve disk sıcaklıklarında artış gözlenmiştir. Kayma hızı 1.0 m/s'den 4.0 m/s artırıldığında pim ve disk yüzey sıcaklıkları sırasıyla yaklaşık %9 ve %8,3 civarında artmıştır. Polimer pim sıcaklığı çalışılan şartlarda maksimum 48 °C'ye ulaştığından dolayı HPV-PEEK polimerinin yaklaşık 143 °C olan camı geçiş sıcaklığının oldukça altında olduğundan yumuşama eğilimi oldukça uzaktır. Bunun anlamı HPV-PEEK yüksek performanslı polimer kompozitinin deney şartlarında kullanılan maksimum hızlardan daha yüksek hızlarda ve yüklerde rahatlıkla ve kolaylıkla çalışabilir özellikte olduğudur. HPV-PEEK kompozitin spesifik aşınma oranı deneylerde kullanılan kayma hızının

artırılmasına bağlı olarak artış göstermiştir. Kayma hızının 1.0 m/s den 2.0, 3.0 ve 4.0 m/s'ye çıkarılmasıyla spesifik aşınma oranı sırasıyla %143, %278 ve %344 oranında artmıştır. 3.53 MPa sabit deney basıncında yapılan deneyler sonucunda en düşük spesifik aşınma oranı 0.48×10^{-6} mm³/Nm değeri ile 1.0 m/s kayma hızında elde edilirken en yüksek spesifik aşınma hızı 1.66×10^{-6} mm³/Nm değeri ile 4.0 m/s kayma hızında elde edilmiştir. Karbon fiber takviyeli grafit ve poli-tetra-flor-etilen (PTFE) katkılı poli-eter-eter-eton polimerinde düşük kayma hızlarında abrazif aşınma mekanizması gözlenirken yüksek kayma hızlarında adhezif aşınma mekanizması gözlenmiştir.



Şekil 9. Aşınma testleri sonucunda elde edilen disk ve pim yüzeylerinin optik görüntüleri

Figure 9. Optical images of disc and pin surfaces obtained as a result of wear tests

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Yazarlar, desteklerinden dolayı Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne (Proje No: 008-2020) teşekkürü bir borç bilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Bijwe, N., 2007, "Potential of fibres and solid lubricants to enhance the triboutility of PEEK in adverse operating conditions", *Industrial Lubrication Tribology*, Cilt: 4, ss.156-165.
- Davide, M., Giacomo, R., Nora, L., Steven, C., Paolo, P., 2021, "Tribological Characterization of Polyether Ether Ketone (PEEK) Polymers Produced by Additive Manufacturing for Hydrodynamic Bearing Application", *Lubricants*, Cilt: 9, ss. 112.

- Huayuan, W., Feng, X., Shi, Y., Lu, X., 2009, "A Study on the Tribological Properties of Self-assembled Method Treated Nano-La₂O₃ Filled PTFE/PEEK Composites", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Cilt: 28, Sayı: 6, ss. 645-655.
- <https://polyfluoroltd.com/blog/peek-the-impact-of-carbon-fibre-fillers-on-hpv-bearing-grades/>, Ziyaret tarihi: 02 Şubat 2022.
- <http://qep.matweb.com/search/DataSheet.aspx?Bassnum=P1SM1A&ckck=1>, Ziyaret tarihi: 02 Şubat 2022.
- Juanjuan, Z., Le, M., Dwyer-Joyce, R., 2020, "Friction and wear behaviors of self-lubricating peek composites for articulating pin joints", *Tribology International*, Cilt: 149, 105741.
- Karpe Ganesh G., Dr. C.L. Dhamejani, 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*, Cilt: 2, Sayı:1, ss. 271-279.
- Kharat, A., Talekar, S., Jadhav, S., More, S., Shelke, R., 2019, "Investigation of Tribological Behavior of Peek Composite with Glass Fiber", *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR)*, Cilt: 6, Sayı: 2, ss.214-216.
- 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*, Cilt: 50, ss. 453-460.
- Liao, Y., Lin, C., Qiwei, W., Shuangjian, L., Zhidan, L., Wei, L., Peng, Z., Chuanyong, Y., 2022, "Enhanced tribological properties of PEEK-based composite coatings reinforced by PTFE and graphite", *Journal of Applied Polymer Science*, Cilt: 139, Sayı: 13, ss. 51878.
- Mir, A.H., Charoo, M. S., 2019, "Friction and wear characteristics of polyetheretherketone (PEEK): A review. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*", Cilt: 561, 012051IOP.
- Petrica, M., Bernadette, D., Thomas, K., Vasiliki Maria, A., 2016, "Studies on Tribological behavior of PEEK and PE-UHMW. *AIP Conference Proceedings*", Cilt: 1779, 070001.
- Puertolas, J. A., Castro, M., Morris, J.A., Rios, R., Anson-Casaos, A., 2019, "Tribological and Mechanical Properties of Graphene Nanoplatelet/PEEK Composites", *Carbon*, Cilt: 141, ss. 107-122.
- Shah, N., 2021, "A Review- Tribological performance of PEEK (Polyether-Ether-Ketone) Coating", *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, Cilt: 10, Sayı: 11, ss. 216-218.
- Shukur Z. M., Dearn, K. D., 2020, "The Tribological Behaviours of PEEK and Peek Based Composites PEEK Under Sliding Contact", *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, Cilt: 43, Sayı: 7, ss. 389-405.
- 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*, Cilt: 4, ss. 18-29.
- Wang, Q., Fei, Z., Tingmei, W., 2016, "Tribological properties of polymers PI, PTFE and PEEK at cryogenic temperature in vacuum", *Cryogenics*, Cilt: 75, ss. 19-25.
- Yutao, Y., Jiang, C., Huo, Y., Li, C., 2020, "Preparation and tribological behaviours of lubrication enhanced PEEK composites", *Applied Science*, Cilt: 10, Sayı: 21, ss. 7536.
- Zalaznik, M., Kalin, M., Novak, S., Jaksa, G., 2016, "Effect of the type, size and concentration of solid lubricants on the tribological properties of the polymer PEEK", *Wear*, Cilt: 364-365, ss. 31-39.