



Araştırma Makalesi - Research Article

Karbon Elyaf Takviyeli PoliEterEterKeton Kompozitin Farklı Malzemelere Karşı Sürtünme ve Aşınma Performanslarının Karşılaştırılması

Comparison of Friction and Wear Performance of Carbon Fiber Reinforced Poly-Ether-Ether-Ketone Composite against Different Materials

Hüseyin ÜNAL^{1*}, Salih Hakan YETGİN²

Geliş / Received: 08/05/2023

Revize / Revised: 13/07/2023

Kabul / Accepted: 18/12/2023

ÖZ

Elektrik/elektronik ve makine gibi farklı sektörlerde çalışan makine elemanları belli amaca uygun ve gerekli şartları sağlayacak şekilde seçilir. Makinaların bazı aksamalarında plastik ve/veya plastik esaslı kompozit malzemelerden üretilen dişliler, makara, burç ve rulman gibi yataklama elemanları kullanılmaktadır. Bu makine elemanlarına kullanılan şartlara bağlı olarak farklı yükler etki etmektedir. Bazen de farklı malzemelerden imal edilmiş makine elemanları ile teması olarak çalışmaktadır. Temaslı çalışma neticesinde malzeme çiftlerinde aşınma meydana gelmektedir. Bu ise makine elemanlarının ömrünün azalmasına sebep olmaktadır. Bu çalışmada, yüksek performanslı mühendislik plastiği sınıfında yer alan ağırlık olarak %30 oranında karbon elyaf (KE) takviyeli polietereterketon (PEEK/30KET) kompozitinin tribolojik performansları araştırılmıştır. Tribolojik deneyler disk üzerinde pim cihazı kullanılarak oda sıcaklığında ve kuru kayma şartlarında gerçekleştirilmiştir. Deneyler üç farklı yük (20 N, 40 N ve 60 N) altında ve 1,0 m/s kayma hızında gerçekleştirilmiştir. Karşı disk malzeme olarak paslanmaz çelik ile %20 kısa cam elyaf (CE) takviyeli polieterimid, %40 cam elyaf takviyeli polifenilen sülfid ve %20 uzun cam elyaf (UCE) takviyeli polyeester kompozit malzemeleri kullanılmıştır. Deneyler sonucunda %30 oranında KE takviyeli PEEK kompozitinin spesifik aşınma oranı ve sürtünme katsayısı tespit edilmiştir. Ayrıca aşınmış yüzeylerin mikroyapı incelemeleri optik mikroskop kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda uygulanan yüke bağlı olarak karbon elyaf takviyeli PEEK kompozitin farklı karşı disk malzemelerde genellikle sürtünme katsayısı değerleri azalmıştır. Ancak aşınma hızı farklılık göstermiştir. En düşük aşınma oranı PEEK/30KET kompozit/paslanmaz çelik disk çiftinin çalışmasında elde edilmiştir

Anahtar Kelimeler- Kompozit, PEEK, Karbon Elyaf, Aşınma Hızı, Sürtünme Katsayısı

ABSTRACT

Machine elements working in different sectors such as electricity/electronics and machinery are selected in a way that is suitable for a certain purpose and meets the necessary conditions. In some parts of the machines, bearing elements such as gears, rollers, bushings and bearings made of plastic and/or plastic-based composite materials

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: unal@sakarya.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0003-0521-6647>)

Metaller ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Sakarya

²İletişim: shyegtgin@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-6068-9204>)

Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Tarsus Üniversitesi, Mersin

are used. Different loads act on these machine elements depending on the conditions used. Sometimes they work in contact with machine elements made of different materials. As a result of contact operation, wear occurs in material pairs. This causes the life of the machine elements to decrease. In this study, tribological performances of polyetheretherketone (PEEK-30CF) composite reinforced with 30% carbon fiber (CF) by weight, which is classified as high-performance engineering plastic, were investigated. Tribological tests were carried out at room temperature and dry sliding conditions using a pin-on-disk device. The experiments were carried out under three different loads (20 N, 40 N and 60 N) and at a sliding speed of 1,0 m/s. Stainless steel and 20% short glass fiber (GF) reinforced polyetherimide, 40% glass fiber reinforced polyphenylene sulfide and 20% long glass fiber reinforced polyester composite materials were used as counter disc materials. As a result of the experiments, the coefficient of friction and specific wear rate of 30% GF reinforced PEEK composite were determined. In addition, wear surface microstructure examinations of the experimental materials were carried out using an optical microscope. As a result of the experiments, the coefficient of friction values of carbon fiber reinforced PEEK composite generally decreased in different counter disk materials depending on the applied load. However, the wear rate varied. The lowest wear rate of carbon fiber reinforced PEEK composite was obtained with stainless steel disc.

Keywords- Composite, PEEK, Carbon Fiber, Wear Rate, Friction Coefficient

I. GİRİŞ

Polietereterketon (PEEK) polimeri, aromatik yapıya ve yarı-kristal özelliklere sahip, yüksek performanslı polimerlerden birisidir. Yüksek sıcaklıklarda bile mekanik ve kimyasal direnç özelliklerini koruyan, hem organik hem de sulu ortam şartlarında termal bozunmaya ve korozyona karşı dirençli olan bir polimerdir [1-3]. PEEK polimeri, 143 °C gibi yüksek camsı geçiş sıcaklığına (Tg) [4] ve 250 °C gibi yüksek kullanım sıcaklığına [5-6] sahiptir. Bu özellikleri nedeniyle rondelalar, rulmanlar, piston parçaları, pompalar, kompresör plaka valfleri, uçak parçaları, çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen (ÇYMA-PE) polimeri yerine ortopedik uygulamalarda implant malzemesi olarak kullanılması gibi farklı endüstriyel uygulamalarda tercih edilmektedir [2-3, 7-8]. Ancak, zorlu koşullar altındaki endüstriyel uygulamalarda katkısız PEEK polimerinin mekanik özellikleri ve termal özellikleri karşılması zordur [8]. Özellikle, kuru sürtünme şartları altında PEEK polimerinin sürtünme katsayısı yüksek değerlere ulaşabilir ve daha yüksek aşınma ve dolayısıyla daha erken malzeme deformasyonuna sebep olabilir [9]. Plastiklerde uygun katkı ve dolgu malzemeleri kullanılarak mekanik ve tribolojik özelliklerin geliştirilmesi en çok tercih edilen yöntemlerden birisidir. Tribolojik uygulamalarda poli-tetra-flor-etilen (PTFE), molibden disülfid (MoS₂) veya grafit gibi katı yağlayıcılar, karşı disk yüzeyinde ince bir transfer filmi oluşturabilir. Metal-metal, polimer-metal ve polimer-polimer arasında kayma sırasında malzeme transferi olgusu hem bilimsel hem de pratik hususlar açısından önemlidir. Transfer film tabakasının (TFT) yumuşak polimer yüzeyini sert metal pürüzlülüklerinden koruduğu bilinmektedir. Bu transfer filmi yağlayıcı görevi görerek metal-metal teması yerine polimer-metal teması sağladığı için karşı disk yüzeyi arasında doğrudan teması önleyerek sürtünme katsayısının azalmasına neden olmaktadır [10-11]. Zalaznik ve arkadaşları [9] farklı bileşik, şekil ve mikro/nano boyuttaki molibden disülfid (MoS₂) ve tungsten disülfid (WS₂) katkılı PEEK kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Deneysel çalışma sonucunda, katkıların bileşim ve boyutları ne olursa olsun, sürtünmeyi %30'a kadar aşınma miktarını ise %51'e kadar azalttığı, nano ölçekli katkıların tribo-film oluşturmak için daha yüksek oranlarda katılması gerektiği belirtilmiştir. Bununla birlikte, karbon ve cam lifleri gibi takviye malzemeleri de kompozitlerin mekanik ve termal özelliklerini etkili bir şekilde geliştirebilir. Sürtünme direncinin ve basınç dayanımının artması, numunenin temas alanındaki deformasyonunu azaltarak özgül aşınmada da bir azalma sağlayabilmektedir [8, 12]. Garzon-Hernandez ve arkadaşları [13] kısa karbon fiber takviyeli PEEK kompozitin darbe özelliklerini incelemişlerdir. Deneysel çalışmalar sonucunda, karbon fiber takviyeli kompozitlerin gevrek bir kırılma gösterdiklerini belirtmişlerdir. Sümer ve arkadaşları [14] ayrıca ağırlıkça %30 cam elyaf (GF) içeren PEEK kompozitlerinin sürekli servis sıcaklığının 250 °C'den 300 °C'ye çıkabileceğini belirtmişlerdir. Karbon ve cam lifleri ile kompozitin çekme, darbe ve eğilme mukavemetleri artırılarak yüksek sürekli çalışma sıcaklığına sahip üstün performanslı PEEK kompozit ürünler, daha geniş bir pazarda daha kullanışlı hale gelecektir [2,7].

Havacılık, otomobil, inşaat vb. endüstriyel alanlarda yüksek performanslı kompozitlerin kullanılması gün geçtikçe giderek yaygınlaşmaktadır. Yüksek mekanik özelliklere, iyi aşınma direncine, düşük maliyete ve çevre dostu özelliklere sahip olan fiber takviyeli termoplastik kompozitler, mühendislik alanında giderek daha fazla ilgi görmektedir [15]. Son zamanlarda, cam fiber ve karbon fiber takviyeli PEEK kompozitlerinin çelik disklere karşı aşınma direnci alanındaki uygulamaları, PEEK polimerinin mükemmel kendi kendini yağlama özelliklerinden dolayı artan bir ilgi görmektedir. Davim ve Cardoso [16] kuru sürtünme koşulları altında katkısız PEEK, ağırlıkça %30 karbon elyaf (KE) ve ağırlıkça %30 cam elyaf (CE) takviyeli kompozitlerin sürtünme katsayısını ve aşınma direncini incelemiştir. Deneysel sonuçlarda, elyaf takviyeli kompozitlerin mükemmel aşınma direnci

gösterdiği ve %30KE/PEEK kompozitin daha iyi tribolojik davranış gösterdiği belirtilmiştir. Kosmachev ve arkadaşları [17] PEEK polimerine ilave edilen kısa karbon fiber katkının sürtünme katsayısını 1.3 kat, aşınma oranını ise 3 kat azalttığını belirtmişlerdir. Sümer ve arkadaşları [14], katkısız PEEK ve ağırlıkça %30 CE takviyeli PEEK kompozitlerin çeşitli koşullar altında sürtünme davranışlarını karşılaştırmıştır. Kayma hızı arttıkça sürtünme katsayısı azalırken özgül aşınma oranı artmıştır. Aynı test koşulları altında, ağırlıkça %30 CE takviyeli PEEK kompozitlerinde daha küçük sürtünme katsayısı ve özgül aşınma oranı elde edildiği belirtilmiştir. Fangfang ve arkadaşları [2] farklı viskozite değerlerine sahip PEEK polimerine ilave ettikleri kısa karbon elyaf (KKE) takviyesinin kompozitin termal, mekanik ve tribolojik özelliklere etkisini araştırmışlardır. %10 ve %20 oranındaki KKE, PEEK kompozitin sürtünme katsayısını ve aşınma oranını azaltmıştır. Deneysel sonuçlarda, düşük viskoziteye sahip PEEK polimerinin aşınma direncinin ve mekanik özelliklerin daha iyi olduğu, %10 KKE takviyeli PEEK kompozitlerin tribolojik davranışlar ve mekanik özellikler açısından optimum katkı miktarı olduğu belirtilmiştir. Ganesh ve Dhamejani [18] ise farklı kullanım sıcaklıkları altında katkısız PEEK ve PEEK/30CE kompozitlerin farklı ortam şartlarındaki (kuru/sulu) aşınma özelliklerini incelemişlerdir. Ağırlıkça %30 CE içeren PEEK kompozitin 150 °C gibi yüksek sıcaklıklarda iyi aşınma direncine sahip olduğu bulunmuştur. Ayrıca kuru kayma koşullarında, 80 N yükte ağırlıkça %30CE içeren PEEK'in aşınma performansını geliştirdiği belirtilmiştir. Theiler ve Gradt [19] ve Wang [20] ise PEEK gibi kimyasal inert polimer malzemelerin, artan sertlik ve elastiklik modülünden kaynaklanan azalan gerçek temas alanı nedeniyle düşük sıcaklıklarda düşük sürtünme katsayısı gösterdiğini belirtmişlerdir. Lin ve Schlarb [21] geri dönüştürülmüş karbon fiber (r-CF) ve orijinal karbon fiber (CF) katkılı PEEK kompozitlerin tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Orta ve şiddetli pv-şartlarında r-CF/PEEK kompoziti mükemmel sürtünme ve aşınma özellikleri göstermiştir. Çelik karşı disk üzerinde şekillenen tribo-film yapısının karbon fiber katkının türünden bağımsız olduğu belirtilmiştir.

Genel olarak, polimer esaslı tribo-malzemelerin optimizasyonu ve kalifikasyonu, laboratuvar şartları altında, testten önce belirlenen belirli test süresi veya test mesafesi için sabit yük ve kayma hızlarında gerçekleştirilmektedir. Bununla birlikte, polimer esaslı tribo-malzemelerin modern endüstriyel uygulamasında, tribolojik bileşenler, genellikle dinamik yük ve kayma hızı koşulları altında zarar görmektedir [22]. Değişen çalışma şartları altında sürtünme katsayısının azaltılıp aşınma direncinin artırılması uygun polimer-metal veya polimer-polimer malzeme kombinasyonu ile elde edilebilir. Aşınma ve sürtünme çalışmalarında, uygulanan yük, kayma hızı, temas sıcaklığı, ortam şartları gibi parametrelerin yanında disk malzemesinin de polimer ile uygun olması istenmektedir. Jain ve Bahadur [23] polietilen (PE) polimeri ile PTFE, PVC, PP ve PMMA disklerini ve ayrıca PET film ile PE ve PVC disklerinin tribolojik davranışlarını incelemişlerdir. Malzeme kaybının, düşük enerji yoğunluğundaki polimerden yüksek enerji yoğunluğundaki polimere doğru olduğunu belirtmişlerdir. Disk yüzeyindeki film tabakası kalınlığının önemli olmadığı belirtilmiştir. Hüseyin ve arkadaşları [24] PEEK/30CE kompozitlerin aşınma özelliklerini kuru ortamda incelemişlerdir. Disk malzemeleri %10 PTFE katkılı PEEK ve %40 cam elyaf katkılı PPS olarak belirlenmiştir. Yük arttığında, PEEK/30CE polimerinin sürtünme katsayısı ve aşınma miktarı artmıştır. Optimum tribolojik özellikler PEI/10%PTFE disk-PEEK/30CE pim numuneleri ile çalışıldığında elde edilmiştir. Demir [25] PA6/20Mika ve PSU/20CE kompozitlerin tribolojik özelliklerinin araştırmışlardır. Disk olarak AISI 316L paslanmaz çelik ve poli-fenilen-sülfid (PSU)/30CE polimer kompozit kullanılmıştır. PA6/20Mika ve PSU/20CE polimerleri çelik disk ile çalışıldığında tribolojik özellikler gelişirken PSU/30CE disk kullanıldığında sürtünme katsayısı değişmemiş ancak aşınma oranı artmıştır. Jia ve arkadaşları [26] poliamit 66 (PA66), Polifenilen-sülfid (PPS) ve PTFE polimerlerinin kuru ve yağlı ortamda kendi polimer disklerine karşı (PA66 pim/PA66 disk gibi) pim-disk sistemi ile tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada aynı zamanda kayma hızı ve uygulanan yükün etkileri de incelenmiştir. Deneysel çalışma sonucunda, yağlı ortamda tüm malzemeler için sürtünme özelliklerinin geliştiği, PTFE ve PPS polimerlerinin aşınma dirençlerinin arttığı, ancak PA66 polimerinin aşınma direncinin azaldığı belirtilmiştir. Kuru ortam şartları altında fiziksel özellikleri değiştiren sürtünme ısısı polimer-polimer temasında tribolojik özellikleri etkilemiştir. Kuru ortam şartları altında adhesif aşınma mekanizmasının baskın olduğu belirtilmiştir. Literatürde birbiri ile temas eden malzemelerin polimer-çelik kombinasyonlu olması oldukça yaygındır. Ancak polimer-polimer kombinasyonlu olması üzerine oldukça az sayıda çalışmaya rastlanmıştır. Literatürde görüldüğü gibi farklı polimer çiftlerinin birbirleri ile temasında tribolojik performanslar değişmektedir. Literatürde bu nedenle aşınma ve sürtünmenin ön plana çıktığı uygulamalarda doğru malzeme çiftinin seçilmesi malzeme ömrünün uzun olması açısından önem arz etmektedir. Bu çalışma, elektrik sektöründe endüstriyel olarak kullanılan bazı parçaların aşınma davranışlarını belirlemek ve uygun malzeme çiftini seçmek için gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada, %30 oranında KE takviyeli polietereterketon (PEEK/30KET) kompozitin dört farklı disk malzemesine karşı kuru ortam şartları altında aşınma ve sürtünme davranışları incelenmiştir. Karşı disk olarak, AISI 304 paslanmaz çelik, %20 CE takviyeli Polieterimit (20CET-PEI), %40 CE takviyeli Poli-fenilen-sülfid (40CET-PPS) ve %20 uzun CE takviyeli doymamış polyester (20UCET-BMC) kompozit kullanılmıştır. Deneysel pim-disk aşınma sistemi ile 1.0 m/s kayma hızında 20, 40 ve 60 N yükte yapılmıştır.

II. MATERYAL VE METOT

Karbon elyaf takviyeli PEEK kompozit, 8 mm çapında ve 1000 mm uzunluğunda çubuk formunda Ketron PEEK-CA30 ticari koduyla temin edilmiştir. Tablo 1'de PEEK/30KET kompozitin üretici firmadan temin edilen özellikleri verilmiştir. Kuru şartlar altında, ortam sıcaklığında, pim-disk cihazı ile gerçekleştirilen aşınma deneylerinde birisi metal esaslı diğer üçü ise polimer kompozit esaslı dört farklı disk malzemesi kullanılmıştır. AISI 316 L SS paslanmaz çelik disk, 90 mm çapında ve 5 mm kalınlığında ve yüzey pürüzlülüğü 0,30-0,40 µm Ra aralığında olacak şekilde hazırlanmıştır. %20 CE takviyeli polieterimid PEEK (20CET-PEI) kompozit granül formunda Ultem 2200 ticari koduyla General Electric Firmasından temin edilmiştir. %40 CE takviyeli Polifenilen-sülfid (40CET-PPS) kompozit granül formunda Ryton GF40 ticari koduyla Solvay Specialty Polymers Firmasından temin edilmiştir. Her iki kompozit granüller özel olarak imal edilmiş bir kalıp yardımıyla 90 mm çapında ve 5 mm kalınlığında olacak şekilde ERAT marka bir enjeksiyon makinasında basılarak disk malzemesi haline getirilmiştir. Termoset disk (20UCET-BMC) ise kalsit ve cam elyaf katkılı doymamış polyester kompozit malzeme kullanılarak döküm kalıplama bileşimi (BMC) yöntemiyle üretilmiştir. Polyester Poliya firmasından temin edilmiştir. 4:1 oranında sıvı polyester stirenle 50 lt kapasiteli bir haznede karıştırılmış ve akışkanlık/ya da viskozite ayarlanmıştır. Daha sonra metil etil keton peroksit çapraz bağlayıcı katalizör ile renklendirici, kıvamlaştırıcı, ısı stabilizatörü vb. diğer katkıları karışıma ilave edilmiştir. Karışım yaklaşık 10 dakika boyunca gerçekleştirilmiştir. Daha sonra karışım Z mikserine alınmıştır. Bu mikserde önce kalsiyum karbonat ilave edilmiş ve 30 dakika boyunca karıştırılmıştır. Ardından Cam elyaf Sanayi/Gebze den temin edilen 13 µm çapında ve 12 mm uzunluğundaki uzun elyaf %20 oranında ilave edilmiş ve 15 dakika boyunca karıştırılmıştır. Hazırlanan hamur daha sonra bir hafta boyunca dinlendirilmiş ve ardından hamur belirli ölçülerde dilimler halinde kesilmiştir. Dilimler, 160 °C sıcaklığındaki alt ve üst kalıp arasına yerleştirilerek 1500 MPa basınç altında ve 60 saniye süre ile preste basılmış ve vulkanize edilmiştir. 120 mm çapında ve 5 mm kalınlığında olacak şekilde termoset disk numuneleri üretilmiştir. Deneylerde kullanılan tüm disk malzemelerin yüzey pürüzlülüğü 0,30-0,40 µm Ra aralığında olacak şekilde hazırlanmıştır. Aşınma deneyleri, pim-disk aşınma test cihazı kullanılarak oda sıcaklığında yapılmıştır. 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), ρ ; malzemenin yoğunluğu (g/cm^3) ve F_n ; uygulanan yük (N)' tür.

$$K_o = \frac{\Delta m}{L \cdot \rho \cdot F_n} \quad (1)$$

Aşınma test numunelerinin sürtünme katsayısı ölçümleri pim-disk aşınma deney cihazında ölçülmüştür. Pim-disk aşınma test makinası dört ana kısımdan oluşmuştur. Makinanın ana gövdesi üzerine monte edilmiş bir elektrik motoru, bir yük kolu, bir elektronik yük hücresi ve verilerin gönderildiği bir bilgisayardan meydana gelmiştir. Aşınma cihazının ana gövdesinde dönen bir disk vardır. Bu disk, 2kW gücünde bir elektrik motoru sayesinde dönmektedir. Diskin üzerine deneyde kullanılan karşı disk malzemeler bir vida yardımıyla bağlanır. Deneylerde kullanılacak pim numunesi aşınma düzeneğinde olan kola bağlanır. Aşınma cihazı çalıştırdıktan sonra kola bağlanan polimer kompozit pim numunesi diskin üzerine yavaşça bırakılır. Pim numunesinin dönen diske temas etmesi ile birlikte numune bağlı olan kol aparatı dönüş yönüne göre hareket eder. Bu hareket yanal kuvvet (F_s) 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 alınabilecek şekilde ayarlanmıştır. Deney süresi boyunca yanal yükü ölçen yaklaşık 65.000 veri elde edilmiştir. Bu yanal yük verileri Excell programında bir sütuna kaydedilmiş olup sonrasında uygulanan yüke bölünerek sürtünme katsayısı hesaplanmıştır. Deneylerde kullanılan polimer kompozit pim malzemesi ile farklı diskler 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. Deneylerde kullanılan aşınma testi parametreleri ve karşı disk malzemeleri ise Tablo 2'de verilmiştir.

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

Tablo 1. PEEK/30KET kompozitin üretici firmadan temin edilen özellikleri [27].

Özellik	PEEK/30KET	Birimi	Test standardı
Yoğunluk	1,40	g/cm^3	ASTM D792
Su emme, (24 saat)	0,05	%	ASTM D570(2)
Çekme mukavemeti	144	MPa	ASTM D638
Elastiklik modülü (çekmede)	9200	MPa	ASTM D638
Kopmadaki % uzama	3,5	%	ASTM D638
Termal iletkenlik	0,92	W/ m. $^{\circ}$ K	-
Sertlik	102	Rockwell M	ASTM D785
Ergime sıcaklığı	340	$^{\circ}$ C	ASTM D3418
Maksimum/Minimum sürekli çalışma sıcaklığı	250/-20	$^{\circ}$ C	

Tablo 2. Aşınma test parametreleri ve kullanılan karşı disk malzemeler

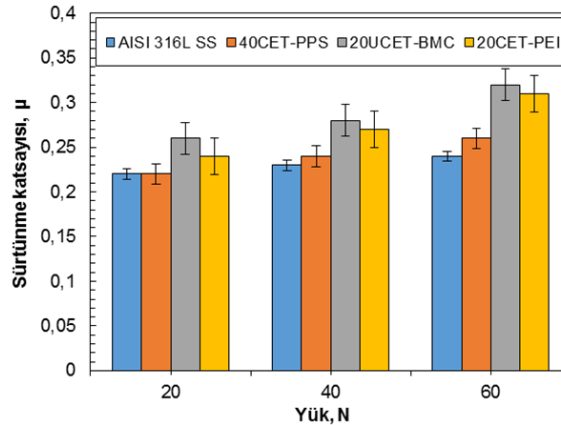
Pim	Karşı disk	Yük, N	Kayma hızı, m/s	Kayma mesafesi, m
PEEK/30KET	AISI 316 SS	20	1,0	1000
	20CET-PEI	40		
	40CET-PPS	60		
	20UCET-BMC			

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tribolojik sistemlerde, kompozit malzemenin aşınma direnci esas olarak sürtünme katsayıları ve aşınma oranları ile ölçülür. Aşınmaya dayanıklı malzemenin temel özelliği, daha düşük sürtünme katsayısı ve aşınma oranına sahip olmasıdır [2, 28]. Şekil 1’de %30 karbon fiber takviyeli PEEK kompozitin uygulanan yüke bağlı olarak farklı karşı disklerle karşı çalışması durumunda elde edilen sürtünme katsayısı sonuçları verilmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde uygulanan yükün artması ile sürtünme katsayısı artmıştır. PEEK/30KET kompozitin AISI 316 SS paslanmaz çelik ile çalışması durumunda sürtünme katsayısı 0,22-0,24 aralığında olduğu belirlenmiştir. Sürtünme katsayısı yük artırıldığında %9,25 oranında artmıştır. PEEK/30KET kompozitin 40CET-PPS kompozit diske karşı çalışması durumunda ise sürtünme katsayısı yüke bağlı olarak %18,45 oranında artmıştır. 20UCET-BMC kompozit diski kullanıldığında en yüksek sürtünme katsayısı değerleri elde edilmiş ve sürtünme katsayısı 60 N yük altında 0.32 değerine kadar ulaşmıştır. Yüke bağlı olarak sürtünme katsayısı %22,8 oranında artmıştır. PEEK/30KET kompozitin 20CET-PEI kompozit diske karşı çalışması durumunda sürtünme katsayısı 0,24-0,31 aralığında elde edilmiştir. Sürtünme katsayısındaki değişim ise %29,1 oranında elde edilmiştir. Viskoelastik özelliğe sahip olan PEEK polimerinin yük-sürtünme katsayısı arasındaki ilişki Eşitlik (3)’de gösterilmiştir. Bu eşitliğe göre sürtünme katsayısı yük artışı ile birlikte azalmaktadır. Ancak hem sürtünme katsayısı hem de aşınma oranı, uygulanan yük PEEK/30KET kompozitin limit değerlerine ulaştığında artmaktadır. Bunun nedeni ise temas noktasındaki sürtünme kaynaklı oluşan ısı sıcaklığı artırmış ve polimerin yumuşamasına neden olmuştur [29]. μ : sürtünme katsayısı, N: uygulanan yük, K ve n ise malzeme ile ilgili sabitlerdir ve “n” değeri $2/3 < n < 1$ arasındadır.

$$\mu = K * N^{(n-1)} \quad (3)$$

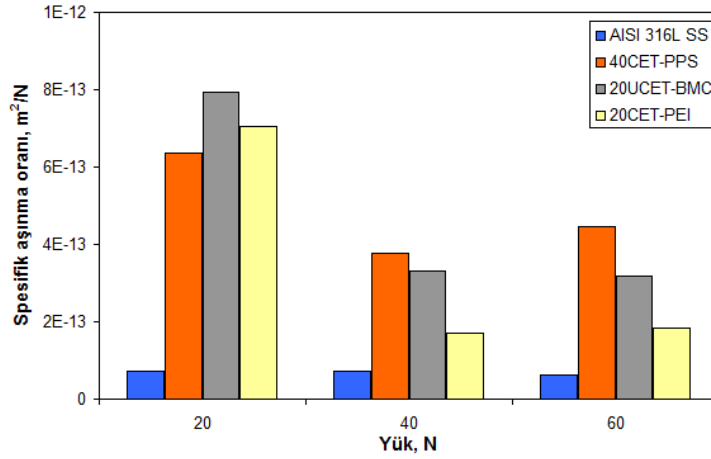
Kullanılan karşı disklerin sürtünme katsayısı üzerine etkisi incelendiğinde ise en düşük sürtünme katsayısı AISI 316 SS paslanmaz çelik disk kullanıldığında elde edilmiştir. Polimer/çelik disk sisteminde çelik disk yüzeyinde tribofilm oluşum süreci sürtünme katsayısını etkilemiştir. Düşük yük şartları altında sürtünmenin adhezyon bileşeni sürtünme sürecinde baskın iken tribo-filmelerin oluşumu, artan gerçek temas alanı ile birlikte sürtünme katsayısının artışına sebep olan polimer/polimer temasının oluşmasına sebep olmuştur [21]. Cam elyaf takviyeli disklerin sürtünme katsayısı üzerine etkisi değerlendirildiğinde ise en düşük sürtünme katsayısı 40CET-PPS kompozit diskinde elde edilmiştir. 40 N yük altında, 40CET-PPS kompozit diski, 20UCET-BMC ve 20CET-PEI kompozit diskleri ile karşılaştırıldığında, sürtünme katsayısını %16.6 ve %12.5 oranlarında azalttığı belirlenmiştir. Bilindiği gibi karbon elyaflar, kompozit malzemelerin tribolojik performansını iyileştirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Karbon elyaflar, polimer kompozite uygulanan yükü desteklemekte ve polimer ana matrisin sürünme direncini artırmaktadır [2, 30]. Yingshuang ve arkadaşları [28] kuru kayma prosesi süresince kırılan parçaların disk yüzeyinde ince ve daha rijit bir transfer film tabakası oluşumuna katkı sağlayacağını ve bu durumun numune ve disk yüzeyi ile arasındaki direkt teması azaltacağı ve sürtünme katsayısının azalacağını belirtmişlerdir.



Şekil 1. Karbon elyaf takviyeli PEEK polimer kompozitin değişik karşı disk malzemelere karşı sürtünme katsayısının yüke göre değişimi

Şekil 2’de ise PEEK/30KET kompozitin, AISI 316L SS, 40CET-PPS kompozit, 20UCET-BMC kompozit ve 20CET-PEI kompozit disklerle karşı 20 N, 40 N ve 60 N yük altındaki spesifik aşınma oranı sonuçları

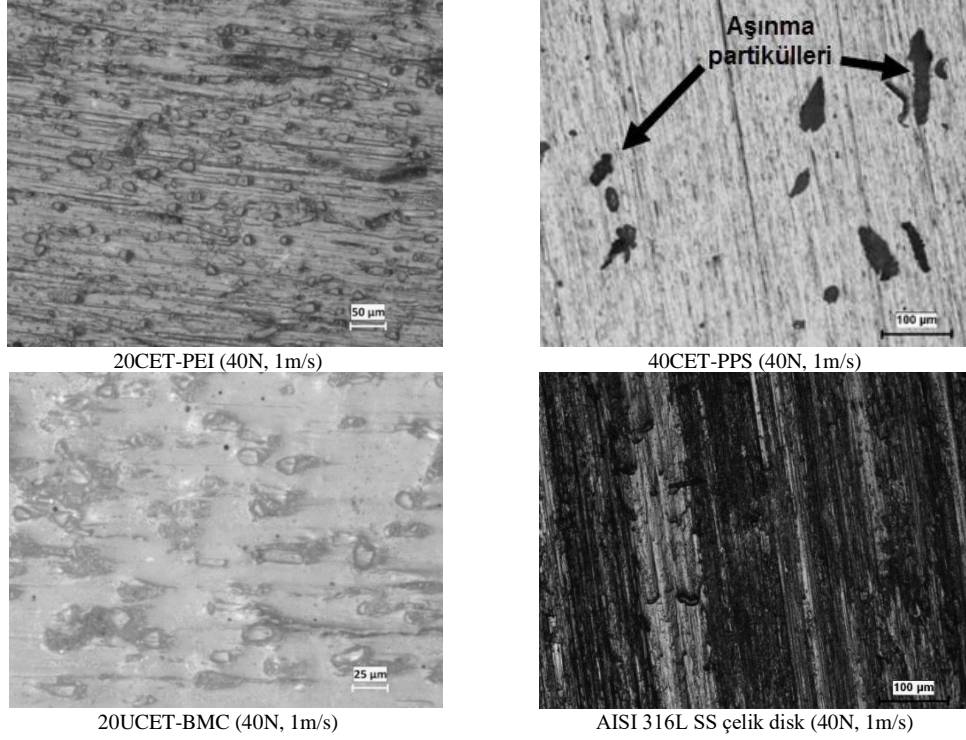
verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi düşük yükte (20 N) ve yüksek yükte (60 N) AISI 316L SS paslanmaz çelik disk kullanıldığında spesifik aşınma oranının değişmediği belirlenmiştir. Spesifik aşınma oranı yüke bağlı olarak $6,24-7,33 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{N}$ aralığında olduğu belirlenmiştir. Cam elyaf takviyeli polimer kompozit diskler kullanıldığında ise düşük yükte (20 N) yüksek spesifik aşınma oranı elde edilirken yükün artması ile birlikte aşınma oranının azaldığı belirlenmiştir. Bu azalma 40CET-PPS kompoziti için %42,6, 20UCET-BMC kompoziti için %148,9 ve 20CET-PEI kompoziti için ise %283,9 oranlarında elde edilmiştir. Yüke bağlı olarak, polimer disk kullanıldığında en düşük spesifik aşınma oranı 20CET-PEI polimer kompozit diskinde elde edilmiştir. Uygulanan yüke bağlı olarak spesifik aşınma oranının değişmesi disk yüzeyinde oluşan transfer film tabakası ve kompozitlerin yapısında bulunan cam elyaf ve miktarı ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Şekil 3'te gösterildiği gibi gerek AISI 316L SS paslanmaz çelik disk kullanıldığında gerekse polimer kompozit diskler kullanıldığında disk yüzeylerinde transfer film tabakalarının olduğu görülmektedir. Transfer film tabakasının yoğunluğu sürtünme katsayısının ve spesifik aşınma oranının değişmesine sebep olmuştur. Daha önce yapılan çalışmalarda da disk yüzeyinde oluşan transfer film tabakasının tribolojik özellikleri önemli oranda etkilediği belirtilmiştir [31]. Zhang ve arkadaşları [32] tarafından yapılan çalışmada ise PEEK polimerine ilave edilen kısa karbon elyaf kompozitin sertliğini ve sürtünme direncini artırarak aşınma direncini artırdığı belirtilmiştir. Yapılan diğer çalışmalarda ise karbon elyaf ilavesi ile kompozitin yük taşıma kapasitesinin arttığı ve polimer matrisin aşınma direncinin önemli oranda geliştiği belirtilmiştir [33-35]. Wang ve arkadaşları [8] tarafından yapılan çalışmada da basalt fiber ilavesi ile yüzey sertliğinin arttığı, bunun sonucunda ise numune yüzeyine etki eden normal yükün daha homojen bir şekilde dağıtılabilirdiği ve kompozitlerin aşınma dirençlerinin arttığı belirtilmiştir. Ayrıca, sürtünme prosesi süresince, PEEK polimerinin plastik akışı yapı içerisindeki elyaflar tarafından kısıtlanarak aşınma oranında azalmaya sebep olmuş ve aşınma direncini artırmıştır [36].



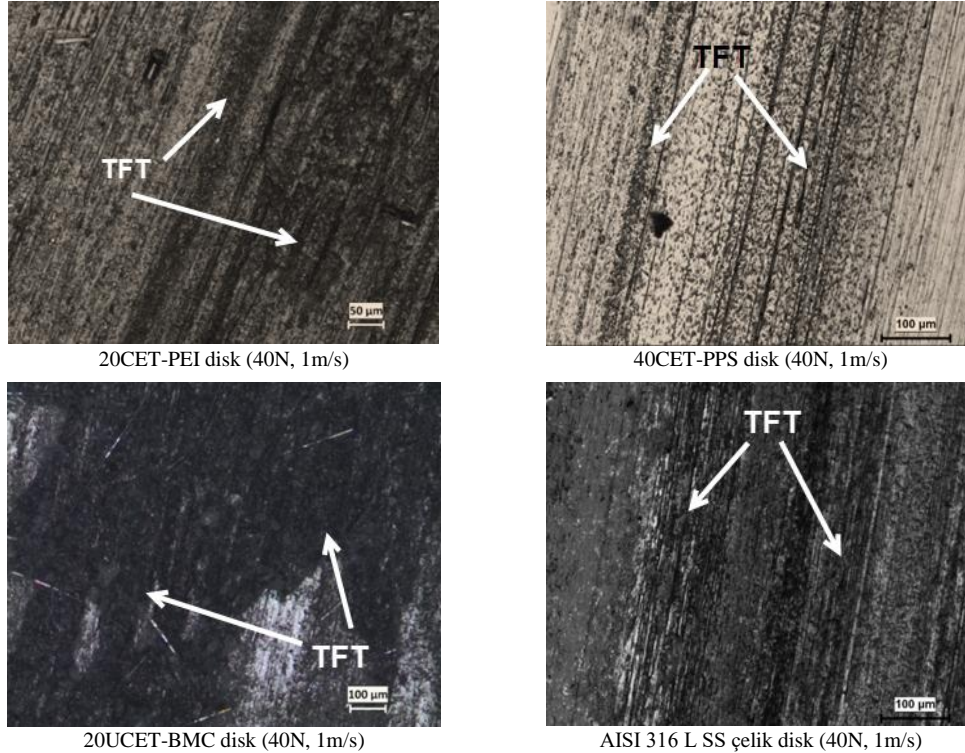
Şekil 2. %30 karbon elyaf takviyeli PEEK polimer kompozitinin değişik karşı disk malzemelere karşı farklı yükler altındaki aşınma hızı-kayma oranı ilişkisi

Bilindiği gibi, tribolojik olaylarda, aşınma ve sürtünme davranışlarının şekillenmesinde, temas noktalarında (metal/metal, polimer/metal, polimer/polimer) meydana gelen malzeme transferi önemli bir rol almaktadır. Malzemeler arasındaki uyumsuzluk ve malzemeye bağlı olarak ısı transfer özellikleri gibi nedenlerden dolayı birçok uygulamada polimer/metal teması tercih edilmektedir. Polimer/metal temasında malzeme transferi yumuşak olan polimerden sert olan metale doğru olurken polimer/polimer temasında bu durum çok net değildir. Daha önce belirtildiği gibi hız, yük, sıcaklık, polimer türü, mekanik ve termal özellikler gibi birçok parametre disk yüzeyindeki film tabakasının şekillenmesini etkilemektedir [37]. Şekil 3'te PEEK/30KET kompozitin AISI 316L SS, 40CET-PPS kompozit, 20UCET-BMC kompozit ve 20CET-PEI kompozit disklerle karşı 1,0 m/s kayma hızı ve 40 N yük altında çalışması durumunda elde edilen aşınmış pim yüzey optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi polimer kompozit disklerle karşı çalışan PEEK/30KET kompozitin pim yüzeylerinde polimer ana matrise göre daha gevrek yapıdaki karbon elyaflardan dolayı kayma yönünde aşınma izlerinin olduğu gözlenmiştir. Bu durum abrazyon mekanizmasının gerçekleştiğini göstermektedir. Şekil 4'te ise PEEK/30KET kompozitin farklı karşı disklerle karşı çalışması durumundaki aşınmış disk yüzey optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Şekillerde görüldüğü gibi 40CET-PPS kompozit disk yüzeyinde homojen olmayan bir transfer film tabakası dağılımı elde edilmiştir. Ayrıca pim yüzeylerinde küçük toplanmış aşınmış polimer partiküllerin belirtileri de görülmektedir. Bu durum, PEEK/30KET pim-40CET-PPS kompozit disk aşınma sisteminde spesifik aşınma oranının neden yüksek olduğunu açıklamaktadır. 20CET-PEI kompozit disk yüzeylerinde ise 40CET-PPS kompozit disk yüzeyine göre transfer film tabakasının daha homojen bir dağılım ile şekillendiği görülmektedir. AISI 316L SS çelik disk yüzeyi ise kısmen transfer film tabakası ile kaplanmış ve bu tabaka PEEK polimerinin daha sert olan disk yüzeyi ile temasını azaltarak sürtünme katsayısının azalmasına ve aşınma direncinin artmasına sebep olmuştur. PEEK polimerinin yüzeyinde adhezif aşınma mekanizmasının

meydana gelerek ince ve üniform olmayan bir transfer film tabakasının disk yüzeylerinde şekillendiği daha önce yapılan çalışmalarda da belirtilmiştir [28]. Bilindiği gibi polimer malzemelerin sürtünme ve aşınma davranışları sıcaklık değişiminden önemli oranda etkilenmektedir. Yüksek sıcaklıklarda polimerlerin aşınması abrazyonla doğru ilişkilidir. Polimer/metal temasında temas yüzeyinde oluşan ısının nasıl paylaşıldığı yönünde araştırmalar devam etmektedir. Yapılan çalışmalarda temas yüzeyinde biriken ısının iki parçaya bölündüğü ve bu süreçten sonra iki malzemenin ısı transfer süreçlerinin etkili olduğu belirtilmiştir. Polimer ile metal temasındaki sürtünme sırasında, oluşan ısının sadece küçük bir bölümü polimer malzemeye aktarılmaktadır. Dolayısıyla polimer malzeme son derece düşük bir ısı bölmesine maruz kalarak rijitliğini korumaktadır [38].



Şekil 3. PEEK/30CET kompozitin farklı karşı disklerle karşı çalışması durumundaki aşınmış pim yüzey optik görüntüleri



Şekil 4. PEEK/30CET kompozitin farklı karşı disklerle karşı çalışması durumundaki aşınmış disk yüzey optik mikroskop görüntüleri

IV. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

PEEK/30KET kompozitin AISI 316L çelik disk, 40CET-PPS kompozit, 20UCET-BMC kompozit ve 20CET-PEI kompozit disklere karşı tribolojik özelliklerin araştırıldığı bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir;

Yükün artması ile sürtünme katsayısı artmıştır. En düşük sürtünme katsayısı AISI 316L SS çelik disk kullanıldığında elde edilmiştir. 20 N ve 60 N yük aralığında AISI 316L paslanmaz çelik disk kullanıldığında spesifik aşınma oranının değişmediği belirlenmiş olup spesifik aşınma oranı yüke bağlı olarak $6,24-7,33 \times 10^{-14}$ m²/N aralığında elde edilmiştir. Transfer film tabakası, sürtünme katsayısının azalmasına ve aşınma direncinin artmasına sebep olmuştur. PEEK-30KET/AISI 316 L paslanmaz çelik disk çiftinde en düşük sürtünme katsayısı ve en düşük aşınma oranı değeri elde edilmiştir.

Aşınma deneylerinde birbiri ile temas eden malzeme çiftlerinin iyi seçilmiş olması gerekmektedir. Polimer pim malzeme, karşı disk malzeme, malzemeye ilave edilen katkı çeşidi ile aşınmada uygulanan yük ve kayma hızı gibi proses faktörleri bu çalışmanın sınırlayıcılarıdır. Birbirleriyle temas etmesi planlanan malzemelerin seçimi ve malzeme çiftine göre optimum çalışma şartlarının çalışma koşullarına göre seçilmesi oldukça önem arz etmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] 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)*, 6(2), 214-216.
- [2] Fangfang, L., Ying, H., Xiaochen, H., Xiyu, H., & Dong, J. (2018). Thermal, mechanical, and tribological properties of short carbon fibers/PEEK composites. *High Performance Polymers*, 30(6), 657–666
- [3] Shuai, Y., Shichao, M., Hongbo, Z., Haoji, W., Zhongjiang, Z., Chunshen, W., Tianyi, S., & Bin, L. (2023). Carbon fiber cannot always reduce the wear of PEEK for orthopedic implants under DPPC lubrication. *Friction*, 11(3), 395–409.
- [4] Nunez, E. E., Gheisari, R., & Polycarpou, A. A. (2019). Tribology review of blended bulk polymers and their coatings for high-load bearing applications. *Tribology International*, 129, 92–111.
- [5] Tharajak, J., Palathai, T., & Sombatsompop, N. (2017). Recommendations for h-BN loading and service temperature to achieve low friction coefficient and wear rate for thermal-sprayed PEEK coatings. *Surface and Coatings Technology*, 321, 477-483.
- [6] Zhang, G., Wetzel, B., & Wang, Q. (2015). Tribological behavior of PEEK-based materials under mixed and boundary lubrication conditions. *Tribology International*, 88, 153–161.
- [7] Kanad, V., Abhijeet, D., & Atul, K. (2020). A review on tribological behavior of polymer composite impregnated with carbon fillers. *AIP Conference Proceedings*, 2311, 070030.
- [8] Wang, B., Shundong, Y., Jian, M., Yaohui, W., Mengjia, L., & Xiping, Li. (2021). Effect of basalt fiber on tribological and mechanical properties of polyether-ether-ketone (PEEK) composites. *Composite Structures*, 266, 113847.
- [9] Zalaznik, M., Kalin, M., Novak, S., & Jakša, G. (2016). Effect of the type, size and concentration of solid lubricants on the tribological properties of the polymer PEEK. *Wear*, 364-365, 31-39.
- [10] Dong, W. T., Nie, S. L., & Zhang, A. Q. (2013). Tribological behavior of PEEK filled with CF/PTFE/graphite sliding against stainless steel surface under water lubrication. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J Journal of Engineering Tribology*, 227(10), 1129–1137.
- [11] Alois, K. S., Nicholas, E., Sebastian, K., Yuxiao, Z., & Leyu, L. (2023). Performance and mechanisms of different tribological thermoplasticcomposites in sliding contact with steel. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 36(2), 642–656.
- [12] Zhang, G. & Schlarb, A. K. (2009). Correlation of the tribological behaviors with the mechanical properties of poly-etherether-ketones (PEEKs) with different molecular weights and their fiber filled composites. *Wear*, 266, 337–344.
- [13] Garzon-Hernandez, S., Garcia-Gonzalez, D., & Arias, A. (2018). Multi-impact mechanical behaviour of short fibre reinforced composites. *Composite Structures*, 202, 241–52.
- [14] Sumer, M., Unal, H., & Mimaroglu, A. (2008). Evaluation of tribological behaviour of PEEK and glass fibre reinforced PEEK composite under dry sliding and water lubricated conditions. *Wear*, 265(7-8), 1061–1065.
- [15] Dong, K., Liu, L., Huang, X., & Xiao, X. (2020). 3D printing of continuous fiber reinforced diamond cellular structural composites and tensile properties. *Composite Structure*, 250, 112610.
- [16] Davim, J. P., & Cardoso, R. (2009). Effect of the reinforcement (carbon or glass fibres) on friction and wear behaviour of the PEEK against steel surface at long dry sliding. *Wear*, 266(7-8), 795–799.
- [17] Kosmachev, P. V., Alexenko, V. O., & Panin, S. V. (2020). The Effect of component combining method on mechanical and tribological properties of carbon-fiber reinforced PEEK-based composites. *AIP Conference Proceedings*, 2310, 020160.

- [18] Ganesh, K. G., & Dhamejani, Dr. C.L. (2016). Investigation of tribological behaviour of PEEK composite with glass fiber filled under harsh operating condition. *IJARIE*, 2(1), 271-279.
- [19] Theiler, G., & Gradt, T. (2018). Friction and wear behaviour of polymers in liquid hydrogen. *Cryogenics*, 93, 1-6.
- [20] Wang, Q., Zheng, F., & Wang, T. (2016). Tribological properties of polymers pi, PTFE and PEEK at cryogenic temperature in vacuum. *Cryogenics*, 75, 19-25.
- [21] Lin, L., & Schlarb, A. K. (2019). Recycled carbon fibers as reinforcements for hybrid PEEK composites with excellent friction and wear performance. *Wear*, 432-433, 202928.
- [22] Leyu, L., & Alois, K. S. (2016). Effect of the varied load conditions on the tribological performance and the thermal characteristics of PEEK-based hybrid composites. *Tribology International*, 101, 218–225.
- [23] Jain, V. K., & Bahadur, S. (1978). Material transfer in polymer-polymer sliding. *Wear*, 46 (1), 177-188.
- [24] Unal H., Mimaroglu A., Özel A., (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.
- [25] Demir, Z. (2013). Tribological performance of polymer composites used in electrical engineering applications. *Bulletin of Materials Science*, 36(2), 341-344.
- [26] Jia, B. B., Tong-Sheng, L., Xu-Jun, L., & Pei-Hong, C. (2007). Tribological behaviors of several polymer–polymer sliding combinations under dry friction and oil-lubricated conditions. *Wear*, 262, 1353–1359.
- [27] Nylaplas Engineering (2024). Mitsubishi Chemical Group Datasheets. https://www.nylaplas.com/plastics/pds/Ketron_CA30_PEEK_PDS_E_17102013.pdf
- [28] Yingshuang, S., Xian, W., Yifan, L., Zilong, J., Zhaoyang, W., Zhenhua, J., & Haibo, Z. (2019). Preparation of PEEK/MWCNTs composites with excellent mechanical and tribological properties. *High Performance Polymers*, 31(1), 43–50
- [29] 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.
- [30] Zhang, G., Rasheva, Z., & Schlarb, A. K. (2010). Friction and wear variations of short carbon fiber (SCF)/PTFE/graphite (10 vol%) filled PEEK: effects of fiber orientation and nominal contact pressure. *Wear*, 268, 893–899.
- [31] Laux, K., & Schwartz, C. (2013). Effects of contact pressure, molecular weight, and supplier on the wear behavior and transfer film of polyetheretherketone (PEEK). *Wear*, 297, 919-925.
- [32] Zhang, Z., Breidt, C., Chang, L., & Friedrich, K. (2004). Wear of PEEK composites related to their mechanical performances. *Tribology International*, 37(3), 271–277.
- [33] Lihe, G., Huimin, Q., Ga, Z., Tingmei, W., & Qihua, W. (2017). Distinct tribological mechanisms of various oxide nanoparticles added in PEEK composite reinforced with carbon fibers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 97, 19-30
- [34] Rasheva, Z., Zhang, G., & Burkhart, T. (2010). A correlation between the tribological and mechanical properties of short carbon fibers reinforced PEEK materials with different fiber orientations. *Tribology International*, 43, 1430-1437.
- [35] Molazemhosseini, A., Tourani, H., Khavandi, A., & Eftekhari Yekta, B. (2013). Tribological performance of PEEK based hybrid composites reinforced with short carbon fibers and nano-silica. *Wear*, 303, 397-404.
- [36] Chairman, C. A., & Kumaresh Babu, S. P. (2013). Mechanical and abrasive wear behavior of glass and basalt fabric-reinforced epoxy composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 130(1), 120–130.
- [37] Bahadur, S., (2000). The development of transfer layers and their role in polymer tribology. *Wear*, 245, 92-99.
- [38] Yichun, X., Akihiko, Y., Noriyuki, H., Norihisa, H., Guoxin, X., & Dan, (2022). G. Analysis of temperature and heat partitioning coefficient during friction between polymer and steel. *Tribology International*, 171, 107561.