

Araştırma Makalesi / Research Article

Rulmanlı Yatak Uygulamaları için Çok Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen ve Döküm Poliamit Termoplastik Esaslı Polimerlerinin Tribolojik Performanslarının Karşılaştırılması

Hüseyin ÜNAL¹, Kemal ERMIŞ^{2*}

¹ Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye,
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0521-6647> , unal@subu.edu.tr

² Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye,
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3110-2731> , ermis@subu.edu.tr

Geliş/ Recieved: 19.11.2020;

Kabul / Accepted: 27.11.2020

ÖZET: Bu deneysel çalışmada, rulmanlı yatak uygulamalarında kullanılacak aşınmaya dayanıklı en iyi özellik gösteren polimer malzemeyi tespit etmek için katkısız çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen (ÇYMA-PE) ve döküm poliamit (Döküm PA) polimerleri kullanılmıştır. Tribolojik testler için, disk üzerinde pimli bir aşınma test düzeneği ve karşı disk malzeme olarak AISI 316L paslanmaz çelik malzeme kullanılmıştır. Aşınma ve sürtünme deneyleri, 0.5, 1.0 ve 2.0 m/s gibi üç farklı kayma hızında ve 49N, 98N ve 147N üç farklı yük altında gerçekleştirilmiştir. Çalışmadan elde edilen veriler sonucunda, en yüksek spesifik aşınma oranı kayma hızı 2.0 m/s ve 49N yük altında $53 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ değerine sahip çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen polimerinde elde edilmiştir. En düşük spesifik aşınma oranı ise kayma hızı 1.0 m/s ve 147N yük altında $4.6 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ değeri ile katkısız döküm poliamit polimerinde elde edilmiştir. Elde edilen deney sonuçlarına göre, çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen polimeri, döküm poliamit polimere göre ortalama 3.5 kat daha yüksek aşınmaya karşı dirençlidir. Tribolojik performans açısından bakıldığında, çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen polimeri, rulmanlı yatak uygulamaları için en uygun malzeme olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Aşınma, Termoplastik, Poliamit, ÇYMA-PE, Polimer.

*Sorumlu yazar / Corresponding author: ermis@subu.edu.tr

Bu makaleye atıf yapmak için /To cite this article

Ünal, H., Ermiş, K (2020). Rulmanlı Yatak Uygulamaları için Çok Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen ve Döküm Poliamit Termoplastik Esaslı Polimerlerinin Tribolojik Performanslarının Karşılaştırılması. Journal of Materials and Mechatronics: A (JournalMM), 1(2), 85-96.

Comparison of Tribological Performance of Ultra-high Molecular Weight Polyethylene and Casting Polyamide Thermoplastic Based Polymers for Roller Bearing Applications

ABSTRACT: In this experimental study, pure ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) and casting polyamide (Casting PA) polymers were used to find the best wear resistant polymer material that can be used in rolling bearing applications. For tribological tests, a wear test device with a pin on the disc and AISI 316L stainless steel material as the counter disc material were used. The wear and friction tests were carried out under three different sliding speeds of 0.5, 1.0, and 2.0 m/s and under three different loads of 49N, 98N, and 147N. As a result of the data obtained from the study, the highest specific wear rate was obtained in ultra-high molecular weight polyethylene polymer with a sliding speed of 2 m/s and a value of $53 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ under 49N load. The lowest specific wear rate was obtained in the pure casting polyamide polymer with a sliding speed of 1.0 m/s and a value of $4.6 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ under 147N load. According to the test results obtained, the ultra-high molecular weight polyethylene polymer is 3.5 times higher in wear resistance than the casting polyamide polymer. In terms of tribological performance, ultra-high molecular weight polyethylene polymer has been determined as the most suitable material for rolling bearing applications.

Keywords: Wear, Thermoplastics, Polyamide, UHMWPE, Polymer.

1. GİRİŞ

Rulmanlı yataklar, bir makine sisteminin emniyetinde ve güvenilirliğinde en önemli rol oynayan makine elemanlarından birisidir. Rulmanlı yatak hataları, büyük ölçüde bir rulmanın titreşimlerini etkilediğinden, büyük rulman yatak titreşimleri aşınmaları ve sürtünmelerini artırarak sistem elemanlarında bozulmaya sebep olmaktadır. Rulman, çalışma bölgesinde makara arızasından dolayı dönerken hem dış bileziği hem de iç bileziği etkilemektedir. Bununla birlikte, silindir arızası, merkezkaç kuvvetleri nedeniyle yalnızca yüksüz bölgedeki dış halkayı etkilemektedir. Silindir kusurları olan bir silindirik makaralı rulmanın titreşim özelliklerinin deneysel gözlemler ve dinamik modelleme sonucunda, silindir hatası ile iç yatak arasındaki etkileşim süresinin silindir hatası ile dış yatak arasındaki süreden daha uzun olduğu gözlenmiştir (Niu et al., 2020). Son yıllarda birçok ticari firma tarafından farklı uygulama alanlarında kullanılmak üzere polimer esaslı rulmanlı yataklar imal edilmektedir. Bunlardan birisi örnek olarak Şekil 1’de verilmiştir (Anonymous, 2016).



Şekil 1. Polimer esaslı rulmanlı yatak görüntüleri

Poliamitler (PA), fiyat-performans özellikleri nedeniyle mühendislik termoplastiklerinin en önemli gruplarından birisidir. Bu polimerlere, cam elyaf, karbon elyaf ve aramid elyaf ilave edilmesi ile üretilen kompozit malzemeden yüksek mekanik özellikler elde edilir (Kim et al., 2019; Rajak et al., 2019; Kausar, 2019; Chen et al., 2016; Fredi et al., 2018). Kestamid olarak da adlandırılan döküm

poliamitler, bir çeşit poliamit türü olmakla beraber belli ölçüde çapraz bağlı moleküler yapısı nedeni ile daha üstün özellikler gösteren poliamit çeşitlerinden birisidir (Taşdelen, 2007). Yüksek mekanik dayanım, sertlik ve darbe emme özelliği, elektriksel yalıtkanlık, yüksek aşınma direnci ve kimyasallara direnç özelliklerinden dolayı poliamit rulmanlı yatak uygulamaları birçok mühendislik uygulamalarında tercih edilmektedir. Örneğin; yük altında uzun süre çalışabilme özelliği ve yüksek aşınma direnci nedeniyle konveyör rulolarının rulman yataklarında, kullanıldığı yerlerde yağlamaya ihtiyaç duyulmadığından rijit ve kaygan bir yüzeye sahip olduğundan yataklama burçlarında ve rulman yataklarında tercih edilmektedir.

Katkısız çok yüksek molekül ağırlıklı polietilenler (ÇYMA-PE) polimerinin yoğunluğu ortalama 0.96 g/cm^3 civarında olup molekül ağırlığı ise milyonlar seviyesindedir. Yüksek molekül ağırlık kavramının anlamı, polimeri oluşturan polimer zincirlerinin kristal yapı içinde çok sıkı bir biçimde yerleştiğidir. ÇYMA-PE polimer sert, tok ve aşınmaya karşı oldukça dirençlidir. Termoplastik malzemeler arasında en yüksek darbe direncine sahip olan polimerlerden birisidir. Kimyasal maddelere karşı dirençli, nem emme oranı az ve sürtünme katsayısı da oldukça düşüktür (Anonymous, 2020). ÇYMA-PE biyo-polimer malzeme uygulamaları ve polimer yatak malzemesi olarak kullanılabilir en elverişli termoplastik polimerlerden birisidir. Buna ilaveten ÇYMA-PE polimeri, kimyasal stabilite ve yüksek darbe dayanımı yanında yüksek aşınma direnci ve düşük sürtünme katsayısı gibi mükemmel tribolojik özelliklere de sahiptir (Onate et al., 2001; Briscoe and Sinha, 2002). Rulmanlı yatakların performansını ve dayanıklılığını etkileyen en önemli faktörlerden birisi de metal ve plastik malzeme arasında temas gerçekleştiğinde ÇYMA-PE polimerinin aşınma hızıdır (Unal ve ark., 2014, Kahyaoglu and Unal, 2012). Literatür incelendiğinde ÇYMA-PE ve döküm poliamit polimerlerinin tribolojik özellikleri üzerine çok çalışma olmasına rağmen rulman yatak uygulamalarında kullanımı ile uygulanan kayma hızının ve yükün tribolojik özelliklere etkisi üzerine çalışmalara literatürde az rastlanmıştır. Sarı ve Nteziyaremy (2016) sadece sürtünme katsayısını belirleme çalışmasında, Kestamid, Kestamid/HS (ısı stabiliteli), Kestoil, Kestlub ve Ulpolen 1000 polimer yatak malzemelerinin 50, 75 ve 100 d/d dönme hızlarındaki ve 15, 25 ve 35 N yüklerdeki sürtünme katsayısı incelemiştir. Deney sonucunda Kestoil yatak malzemesinin sürtünme katsayısının diğer yatak malzemelerinki ile kıyaslandığında daha düşük olduğu gözlenmiştir. Demirci ve Düzcükoğlu (2014) kayma hızı, yatak basıncı ve sıcaklığın saf PA 66 (Poliamit 66), poliamit 66+%18 Politetrafloretillen (PA66+%18PTFE) ve poliamit 66+%20 cam elyaf ve %25 Politetrafloretillen (PA66+%20GFR+%25PTFE) polimerlerinin sürtünme ve aşınmasına etkisini, muylu rulmanların ortam koşullarında incelemiştir. Çalışma sonucunda cam elyaf takviyesi ve PTFE katkının poliamit 66 polimerinin tribolojik özellikleri, çekme mukavemeti, tokluk ve sertlik gibi mekanik özelliklerine etkisinin olduğunu tespit etmişlerdir. Buna ilaveten sürtünme katsayılarının, temas sıcaklıklarının ve aşınma hızının film oluşturma, artan sıcaklık, basınç ve hızlardan etkilendiğini tespit etmişlerdir. En iyi aşınma direnç özelliklerini, deneyde kullanılan PA66 + %20GFR + %25PTFE polimer malzemesinde tespit etmişlerdir. Poliamit polimerlerde, düşük kayma hızlarında düşük aşınma hızı değerleri gözlenmiştir (Srinath and Gnanamoorthy, 2007; Ravi Kumar et al., 2009; Shibata et al., 2014; Abdel-Jaber et al., 2014).

Geleneksel olarak kullanılan metal ve polimer kaymalı yatakların maliyeti düşüktür ve kuru kayma sürtünmesi koşulları altında çalışabilir ve bununla birlikte, bu tür yatakların spesifik aşınma hızları kabul edilemeyecek seviyede yüksek olabilir (Kurtz, 2009). ÇYMA-PE polimeri ile metal teması olan kaymalı yataklar, özellikle düşük yüklerde karşılaştırıldığında, sürtünme yüzeyi pürüzlülüğünde ve sürtünme katsayısında hafif azalma, malzemenin yorulma direnci ve tokluk gibi mekanik özelliklerinde ise hafif artış gözlenmiştir. (Dangshen, 2004; Karupiah et al., 2008; Chang

et al., 2013; Fu et al., 2011; Maksimkin et al., 2017; Wang et al., 2017). Biyomedikal uygulamalardan birisi olan diz operasyonlarında ÇYMA-PE polimerine alternatif rulman malzemeleri olarak saf PEEK polimeri ve karbon elyaf takviyeli polietereterketon (PEEK+GFR) polimer kompoziti kullanılmıştır. Çalışma sonucunda ÇYMA-PE polimerine göre iki kat daha kötü aşınma performansı elde edilmiştir (Brockett et al., 2017).

Bu deneysel çalışmada, katkısız çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen ve döküm poliamit polimerleri kullanılmıştır. Tribolojik testlerde pim-disk aşınma test cihazı kullanılmıştır. Tribolojik testler 49N, 98N ve 147N yükler altında ve 0.5 m/s, 1.0 ve 2.0 m/s kayma hızlarında oda sıcaklığında ve kuru kayma şartlarında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, rulmanlı yatak uygulamalarında kullanılabilecek aşınmaya dayanıklı en iyi özellik gösteren polimer malzeme tespit edilmiştir.

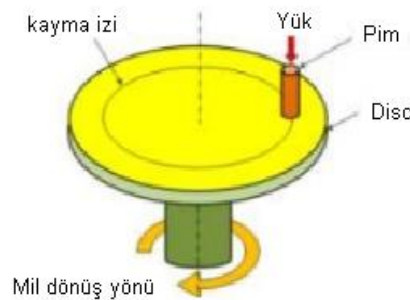
2. MATERYAL VE YÖNTEM

Tribolojik deneylerde iki farklı endüstriyel termoplastik polimer malzeme kullanılmıştır. Hem çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen hem de döküm poliamit polimeri çubuk formunda temin edilmiştir.

2.1 Sürtünme katsayısı ve spesifik aşınma hızı ölçümü

Tribolojik deneyler, ASTM G99 standardına göre yapılmıştır. Aşınma ve sürtünme testleri bir kola sabitlenmiş bir polimer pimin bir elektrik motorundan aldığı hareketle dönen bir AISI 316L paslanmaz çelik diskin birbirine temas ettiği bir aşınma test cihazında gerçekleştirilmiştir. Disk üzerindeki pim olacak şekilde özel olarak dizayn edilmiş bir aşınma test cihazının şematik diyagramı Şekil 2'de gösterilmiştir.

Deneylerde kullanılan polimer pim numunelerin boyutları 6x50 mm uzunluğundadır. Burada 6 mm pim çapı ve 50 mm ise pimin uzunluğudur. Polimer pim malzemeler revolver tornada hassas bir şekilde işlenerek aşınma test numune ölçülerine getirilmiştir. Aşınma ve sürtünme deneylerinde karşı disk malzeme olarak AISI 316L paslanmaz çelik disk malzemesi kullanılmıştır. Disk malzemeler, 5 mm kalınlığında ve 90 mm çapında olacak şekilde önce geleneksel bir tornada işlenmiş ardından ise düzlem yüzey taşlama işlemlerine maruz bırakılmıştır. Aşınma ve sürtünme deneylerinden önce, ÇYMA-PE ve döküm poliamit polimer pim malzemeler ve karşı çelik disk yüzeyleri 1200 nolu zımpara ile zımparalanmıştır. Her test öncesi hem disk yüzeyleri hem de pim yüzeyleri asetonla temizlenip kurutulmuştur.



Şekil 2. Deneylerde kullanılan pim-disk aşınma test cihazının şematik görünüşü

Tribolojik deneylerde Şekil 2'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 5 mm et kalınlıklı ve 90 mm

çaplı AISI 316L paslanmaz çelik disk monte edilmektedir. Test edilecek pim malzemeler olan ÇYMA-PE ve döküm PA polimerleri pim tutucu bir mekanizmaya bağlanarak hareketli yüklemeye koluna monte edilmektedir. Bu yüklemeye kolu, numuneye yanal yüklerin uygulanmasına izin verebilecek şekilde yataklanmıştır.

Deneyler sırasında, sürtünme kuvveti yüklemeye koluna monte edilmiş bir yük hücresi ile ölçülmektedir. 66 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 polimer malzemelerin 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 hızı (W_s) [m^2/N] Eşitlik 2. kullanılarak hesaplanmıştır.

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

Yukarıdaki Eşitlik 2'de; 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 Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Tribolojik test şartları

Deney parametreleri	Deney şartları
Uygulanan yük (N)	49, 98 ve 147
Kayma hızı (m/s)	0.5, 1.0 ve 2.0
Çalışma sıcaklığı (°C)	23±2
Ortam nem oranı (%)	55±2
Kayma yolu (m)	2000
Disk yüzey pürüzlülüğü (R_a , μm)	0.36

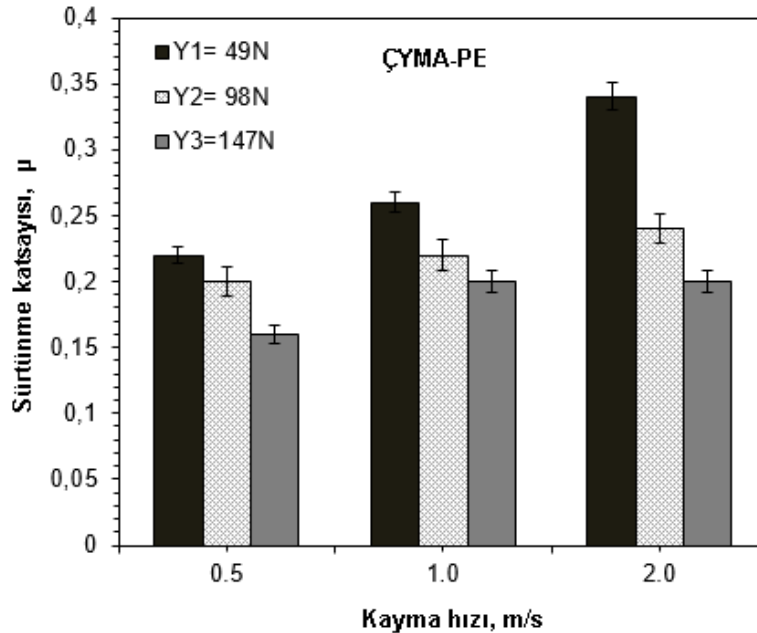
Bu çalışmada kullanılan ÇYMA-PE termoplastik polimeri ile döküm poliamit polimerlerinin tribolojik test sonuçları Çizelge 2'de gösterilmektedir. Tribolojik deneyler, 0.5, 1.0 ve 2.0 m/s kayma hızlarında ve 49N, 97N ve 147N yükler altında kuru kayma şartlarında ve oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Tribolojik deneylerde kullanılan malzemelerin farklı hız ve yüklerdeki spesifik aşınma hızı değerleri (mm^3/Nm) hesaplanmış ve sürtünme katsayısı (μ) değerleri de ölçülmüştür (Bakınız Çizelge 2).

Çizelge 2. Deneyde kullanılan malzemeler ve deneyler sonucunda elde edilen tribolojik özellikleri

Polimer malzemeler	Yük (N)	Kayma hızı (m/s)					
		0.50		1.0		2.0	
		Spesifik aşınma hızı (mm ³ /Nm)	Sürtünme katsayısı, (μ)	Spesifik aşınma hızı (mm ³ /Nm)	Sürtünme katsayısı, (μ)	Spesifik aşınma hızı (mm ³ /Nm)	Sürtünme katsayısı, μ
ÇYMA-PE	49	7.45E-6	0.22	9.6E-6	0.26	13.0E-6	0.34
	98	5.9E-6	0.20	6.4E-6	0.22	8.0E-6	0.24
	147	5.0E-6	0.16	4.6E-6	0.20	6.8E-6	0.20
Döküm PA	49	28E-6	0.22	36E-6	0.26	53E-6	0.27
	98	20E-6	0.19	24E-6	0.20	29E-6	0.21
	147	14E-6	0.17	17E-6	0.18	22E-6	0.18

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Şekil 3'te deneylerde kullanılan çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen termoplastik esaslı polimerin farklı yükler altında sürtünme katsayısının uygulanan hıza göre değişimi verilmiştir. Aşınma ve sürtünme deneylerinde kullanılan çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen polimerinin sürtünme katsayısı değerleri tüm kayma hızı şartlarında uygulanan yükün artması ile azalma göstermiştir. Uygulanan yükün %200 oranında artırılması ile çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen polimerinin sürtünme katsayısındaki azalma sırasıyla 0.5, 1.0 ve 2.0 m/s kayma hızları için ortalama %27, %23 ve %41 oranında olmuştur.

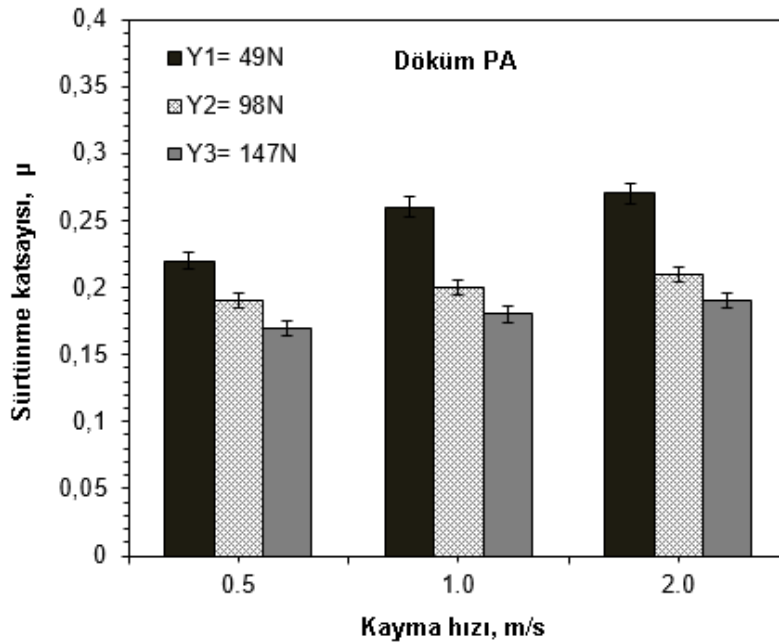


Şekil 3. Çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen polimerinin farklı yükler altındaki sürtünme katsayısı kayma hızı ilişkisi

Benzer şekilde, çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen polimerine aşınma ve sürtünme deneylerinde uygulanan hızın artırılması ile sürtünme katsayısı değerlerinin arttığı gözlenmiştir. Uygulanan hızın %200 oranında artırılması ile ÇYMA-PE polimerinin sürtünme katsayısında sırasıyla 49N, 98N ve 147N yükler için ortalama %54, %20 ve %30 oranında artış olmuştur. En düşük sürtünme katsayısı 0.16 değeri ile 0.5m/s kayma hızında ve 147N yük altında elde edilirken en yüksek

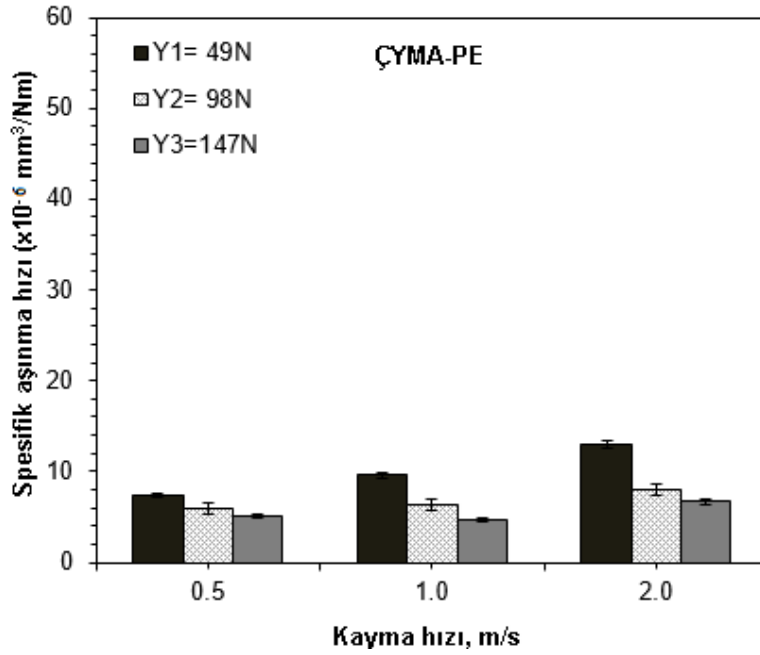
sürtünme katsayısı ise katsayısı 0.34 değeri ile 2.0m/s kayma hızında ve 49N yük altında elde edilmiştir. Deneylerde kullanılan döküm poliamit polimerinin farklı yükler altındaki sürtünme katsayısı değerlerinin uygulanan hıza göre değişimi Şekil 4’te verilmiştir.

Deneylerde kullanılan döküm poliamit malzemenin sürtünme katsayısı değerleri de çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen polimerinde olduğu gibi tüm kullanılan kayma hızı şartlarında uygulanan yükün artması ile beraber azalma göstermiştir. Uygulanan yükün 49N’dan 147N değerine %200 oranında artırılması ile döküm poliamit polimerinin sürtünme katsayısındaki azalma sırasıyla 0.5, 1.0 ve 2.0 m/s kayma hızları için ortalama %8.9, %30.7 ve %29.6 oranında olmuştur. Benzer şekilde, tribolojik deneylerde uygulanan hızın artırılması ile döküm poliamit polimerinin sürtünme katsayısı değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Uygulanan hızın 0.5 m/s den 2.0 m/s’ye artırılması ile yani hızın %200 oranında artırılması ile döküm poliamit polimerinin sürtünme katsayısında sırasıyla 49N, 98N ve 147N yükler için ortalama %22.7, %10.5 ve %11.7 oranında artış gözlenmiştir. En düşük sürtünme katsayısı 0.17 değeri ile 0.5 m/s kayma hızında ve 147N yük altında elde edilirken, en yüksek sürtünme katsayısı 2.0 m/s kayma hızında ve 49N yük altında 0.27 değeri ile elde edilmiştir. Deneylerde hem çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen hem de döküm poliamit polimer malzemelerin sürtünme katsayısı değerlerinde artış gözlenmiştir. Bu artış daha önce yapılan çalışmalarla (Unal ve ark., 2004; Unal and Mimaroglu, 2012; Kahyaoglu and Unal, 2012; Mimaroglu et al., 2015) benzerlik göstermektedir.



Şekil 4. Döküm poliamit polimerinin farklı yükler altındaki sürtünme katsayısı-kayma hızı ilişkisi

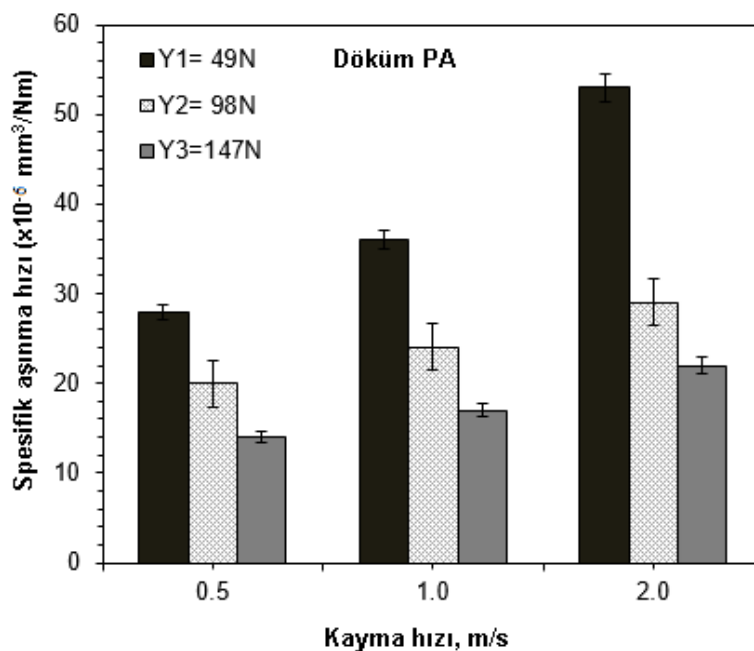
Bunun sebebi ise kayma hızının artması ile pim polimer ve paslanmaz çelik disk arasındaki temastan dolayı malzeme yüzeylerinde sıcaklık arttığı gözlenmiştir. Bu sıcaklık artışı değeri, muhtemelen deneylerde kullanılan polimerlerin camı geçiş sıcaklıklarına yaklaşmaktadır. Bu ise polimerin yumuşamasına sebep olmuş ve bunun sonucunda ise sürtünme katsayısının artmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Deneylerde kullanılan farklı yükler altında spesifik aşınma hızının uygulanan hıza göre değişimi verilmiştir. Çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen polimerinin 0.5, 1.0 ve 2.0 m/s kayma hızındaki ve 49N, 98N ve 147N yükler altındaki spesifik aşınma hızı değişimleri Şekil 5’te gösterilmektedir.



Şekil 5. Çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen polimerinin farklı yükler altındaki spesifik aşınma hızı-kayma hızı ilişkisi

Şekilde görüldüğü gibi deneyde kullanılan ÇYMA-PE polimerinin spesifik aşınma oranı değerleri yaklaşık olarak 10^{-6} mm³/Nm civarında bulunmuştur. En yüksek spesifik aşınma hızı 13×10^{-6} mm³/Nm değerinde 49N yük ve 2.0m/s kayma hızında elde edilirken en düşük spesifik aşınma hızı 4.6×10^{-6} mm³/Nm değeri ile 1.0m/s kayma hızında ve 147N yük altında elde edilmiştir. Çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen polimerinin 0.5, 1.0 ve 2.0 m/s kayma hızındaki ve 49N, 98N ve 147N yükler altındaki spesifik aşınma hızı değerleri ortalama olarak sırasıyla 6.13×10^{-6} mm³/Nm, 6.86×10^{-6} mm³/Nm ve 9.23×10^{-6} mm³/Nm olarak belirlenmiştir.

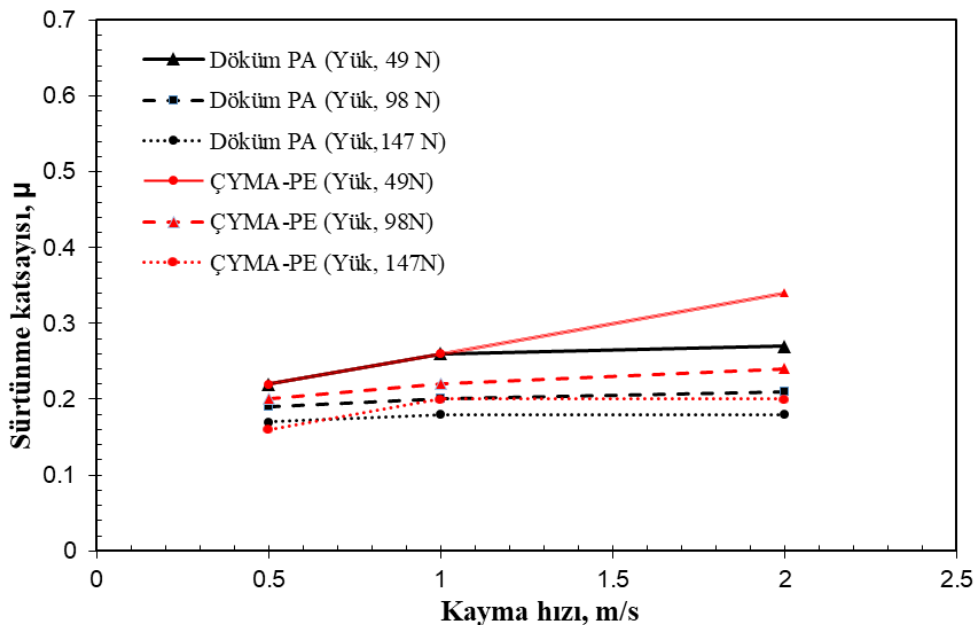
Şekil 6'da döküm poliamit polimerinin 0.5, 1.0 ve 2.0 m/s kayma hızındaki ve 49N, 98N ve 147N yükler altındaki spesifik aşınma hızının kayma hızı ile değişimi verilmiştir.



Şekil 6. Döküm poliamit polimerinin farklı yükler altındaki spesifik aşınma hızı-kayma hızı ilişkisi

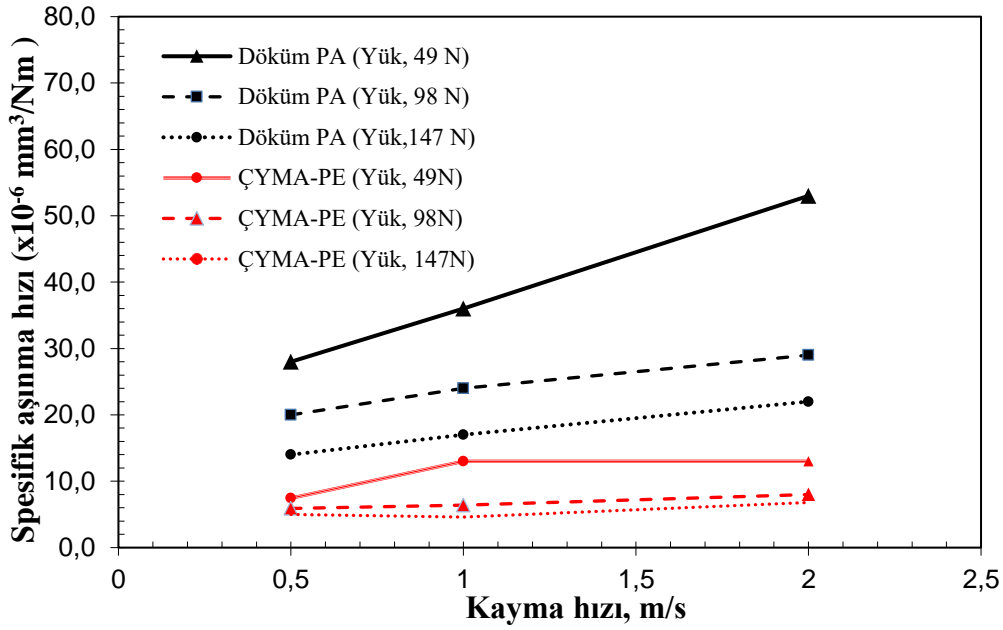
Şekilde 6’da görüldüğü gibi deneyde kullanılan döküm poliamit polimerinin spesifik aşınma hızı değerleri yaklaşık olarak 10^{-6} mm³/Nm civarında olup en yüksek spesifik aşınma hızı 53×10^{-6} mm³/Nm değerinde 49N yük ve 2.0 m/s kayma hızında elde edilirken en düşük spesifik aşınma hızı ise 14×10^{-6} mm³/Nm değeri ile 0.5 m/s kayma hızında ve 147N yük altında elde edilmiştir. Döküm poliamit polimerinin 0.5, 1.0 ve 2.0 m/s kayma hızındaki ve 49N, 98N ve 147N yükler altındaki spesifik aşınma hızı değerleri ortalama olarak sırasıyla 20.6×10^{-6} mm³/Nm, 25.6×10^{-6} mm³/Nm ve 34.6×10^{-6} mm³/Nm olarak belirlenmiştir. Şekilde açıkça görüldüğü gibi spesifik aşınma hızı uygulanan kayma hızının artması ile artış göstermektedir. Bu daha önce yapılan çalışmalarla (Unal ve ark., 2004; Unal and Mimaroglu, 2012; Kahyaoglu and Unal, 2012; Mimaroglu et al., 2015) uyum göstermektedir. Uygulanan kayma hızının artması ile spesifik aşınma hızının artması hem ÇYMA-PE polimeri hem de döküm poliamit polimerlerinin sürtünme yüzey sıcaklıklarının artarak camı geçiş sıcaklıklarına yaklaşması ile yumuşaması ile açıklanabilir.

Şekil 7’de Döküm PA ve ÇYMA-PE polimerinin farklı kayma hızlarında ve yüklerindeki sürtünme katsayısı-kayma hızı ilişkisi görülmektedir. Şekilde açıkça görüldüğü gibi deneylerde kullanılan her iki polimerin sürtünme katsayıları uygulanan yük arttıkça beklenildiği gibi azalırken uygulanan kayma hızının artması ile artış gözlenmiştir. Özellikle 49 N yük altında ÇYMA-PE polimerinin sürtünme katsayısı eğrisinin eğimi, kayma hızının artması ile belirgin bir artış göstermiştir. Düşük kayma hızlarında, deneyde kullanılan her iki polimer için de sürtünme katsayısı değerleri birbirlerine yakın çıkmaktadır. Kayma hızı arttıkça, bu iki polimer malzemenin sürtünme katsayısı değerleri arasındaki fark açılmakta ve Döküm PA polimeri yüksek kayma hızlarında sürtünme katsayısında hafif azalma yönünde bir eğim göstermektedir.



Şekil 7. Döküm PA ve ÇYMA-PE polimerinin farklı kayma hızlarında ve yüklerinde sürtünme katsayıları-kayma hızı ilişkisi

Şekil 8’de deneylerde kullanılan her iki polimer için uygulanan yük azalınca spesifik aşınma hızı artmaktadır. Özellikle 49 N yük altında Döküm PA polimerinin spesifik aşınma hızının eğrisinin eğimi belirgin bir şekilde kayma hızının artması ile arttığı gözlenmiştir.



Şekil 8. Döküm PA ve ÇYMA-PE polimerinin farklı kayma hızlarında ve yüklerinde spesifik aşınma hızı -kayma hızı ilişkisi

Deneylerde kullanılan her iki polimerde, düşük kayma hızlarında birbirlerine daha yakın spesifik aşınma hızı değerleri göstermektedir. Kayma hızı arttıkça olarak ÇYMA-PE polimerleri ile Döküm PA polimerleri arasında fark artmakta ve Döküm PA polimeri ÇYMA-PE polimerine göre daha yüksek spesifik aşınma hızı değerleri göstermektedir. Şekil 8 incelendiğinde, ÇYMA-PE polimerinin, Döküm PA polimerine göre aşınmaya daha fazla dirençli olduğu tespit edilmiştir. 0,5 m/s kayma hızında, oransal olarak ÇYMA-PE polimerleri Döküm PA polimerine göre ortalama 3.31 kat, 1,0 m/s kayma hızında ortalama 3.4 kat ve 2 m/s kayma hızında ise ortalama 3.66 kat aşınmaya karşı çok daha dirençli olduğu tespit edilmiştir. Deneyde kullanılan kayma hızları arttıkça bu oran daha fazla artmaktadır.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen ve döküm poliamit endüstriyel polimerlerinin çelik disk karşı disk malzemesine karşı çalışmaları durumunda aşağıdaki, sonuçlar çıkarılmıştır:

- Tribolojik testlerde kullanılan ÇYMA-PE ve Döküm PA polimerlerinin sürtünme katsayıları uygulanan hızın artması ile artmıştır.
- Deneylerde kullanılan her bir hızda hem ÇYMA-PE hem de Döküm PA polimerlerinin sürtünme katsayısı değerleri uygulanan yükün artması ile azalmıştır.
- Çok yüksek molekül ağırlıklı polietilenin spesifik aşınma hızı ortalama $9.6 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ civarında iken döküm poliamit polimerinin spesifik aşınma hızı ortalama $36 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ olarak belirlenmiştir.
- En yüksek spesifik aşınma hızı 49N yük ve 2.0m/s kayma hızında $53 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ değeri ile döküm poliamit polimerinde elde edilirken en düşük spesifik aşınma hızı ise 98N yük ve 1,0m/s kayma hızında $4.6 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ değeri ile çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen polimerinde elde edilmiştir.

- Elde edilen deney sonuçlarına göre döküm poliamit polimeri, çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen polimerine göre ortalama 3.5 kez daha fazla aşınmaktadır.
- Testlerde elde edilen deney sonuçlarına ilaveten, ÇYMA-PE polimeri oldukça uzun zincir yapısına sahiptir. Bu sebeple yüksek tokluk, darbe dayanıklılığı ve aşınma direnci özellikleri gösterir. Bunlara ilaveten hafiflik, dış hava şartlarına direnç ve düşük nem alma gibi özellikleri ile döküm poliamit polimerine göre ön plana çıkarmaktadır.
- Bu sebeple, triboloji çalışmasında kullanılan yük ve hız aralıklarında çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen polimeri makine sektöründe rulmanlı yatak uygulamalarında kullanım için en uygun polimer olduğu tespit edilmiştir.

5. KAYNAKLAR

- Abdel-Jaber G.T., Mohamed M.K., Ali W.Y., Effect of Magnetic Field on the Friction and Wear of Polyamide Sliding against Steel. *Materials Sciences and Applications* 5, 46-53, 2014.
- Anonymous, 2016. SKF Polymer Products and Components, <https://evolution.skf.com/en/skf-polymer-products-and-components/> (Erişim Tarihi: 24.11.2020).
- Anonymous, 2020. UHMWPE Pipe, https://www.diytrade.com/china/pd/2014088/UHMWPE_PIPE.html (Erişim Tarihi: 16.11.2020).
- Briscoe B.J., Sinha S.K., Wear of Polymers. *Journal Engineering Tribology, Proceedings Institution Mechanical Engineers Part J* 216(6), 401-413, 2002.
- Brockett C.L., Carbone S., Fisher J., Jennings L.M., PEEK and CFR-PEEK as Alternative Bearing Materials to UHMWPE in a Fixed Bearing Total Knee Replacement: An Experimental Wear Study. *Wear* 374, 86–91, 2017.
- Chang B-P., Akil H.M., Nasir R.B.M., Comparative Study of Micro- and Nano-ZnO Reinforced UHMWPE Composites Under Dry Sliding Wear. *Wear*, 297(1–2), 1120-1127, 2013.
- Chen, H., Lim, C.L.J. and Fong, L.C.: PolyOne Corp, Polyamide Compounds Containing Pitch Carbon Fiber. U.S. Patent 9,243,178 2016.
- Dangshen X., Friction and Wear Properties of UHMWPE Composites Reinforced with Carbon Fiber. *Materials Letters* 59, 175–179, 2005.
- Demirci M.T., Düzcükoğlu H., Wear Behaviors of Polytetrafluoroethylene and Glass Fiber Reinforced Polyamide 66 Journal Bearings. *Materials and Design* 57, 560-567, 2014.
- Fredi G., Dorigato A., Pegoretti A., Multifunctional Glass Fiber/Polyamide Composites with Thermal Energy Storage/Release Capability. *Express Polymer Letters* 12(4), 349–364, 2018.
- Fu J., Ghali B.W., Lozynsky A.J., Oral E., Muratoglu O.K., Wear Resistant UHMWPE with High Toughness by High Temperature Melting and Subsequent Radiation Cross-Linking. *Polymer* 52(4), 1155-1162, 2011.
- Kahyaoglu O.K., Unal H., Friction and Wear Behaviours of Medical Grade UHMWPE at Dry and Lubricated Conditions. *International Journal of Physical Sciences* 7(16), 2478-2485, 2012.
- Karuppiyah K.S.K., Bruck A.L., Sundararajan S., Wang J., Lin Z., Xu Z-H., Li X., Friction and Wear Behavior of Ultra-High Molecular Weight polyethylene as a Function of Polymer Crystallinity. *Acta Biomaterialia* 4, 1401–1410, 2008.
- Kauser A., Advances in Carbon Fiber Reinforced Polyamide-Based Composite Materials. *Advances in Materials Science* 19(4) 67-82, 2019.

- Kim Y.S., Kim J.K., Jeon E.S., Effect of the Compounding Conditions of Polyamide 6, Carbon Fiber and Al₂O₃ on the mechanical and Thermal Properties of the Composite Polymer. *Materials* 12 3047,1-14, 2019.
- Kurtz S.M., UHMWPE Biomaterials Handbook, Academic Press, Second Edition, USA, 2009.
- Maksimkina A.V., Danilovb V.D., Senatova F.S., Olifirova L.K., Kaloshkin S.D., Wear Performance of Bulk Oriented Nanocomposites UHMWPE/FMWCNT and Metal-Polymer Composite Sliding Bearings. *Wear* 392–393, 167-173, 2017.
- Mimaroglu A., Unal H., Sumer M., Ozel A., Friction and Wear of GUR 1020 Medical Grade Uhmwpe Polymer at Dry Environmental Condition. *Manufacturing Science and Technology* 3(4), 111-113, 2015.
- Niu L., Cao H., Hou H., Wu B., Lan Y., Xiong X., Experimental observations and dynamic modelling of vibration characteristics of a cylindrical roller bearing with roller defects. *Mechanical Systems and Signal Processing* 138, 106553, 2020.
- Onate J.I., Comin M., Braceras I., Garcia, A., Viviente, J.L., Brizuela, M., Garagorri N., Peris J.L. Alava J.I., Wear reduction effect on ultra-high-molecular-weight polyethylene by application of hard coatings and ion implantation on cobalt chromium alloy, as measured in a knee wear simulation machine. *Surface and Coating. Technology* 1056, 142-144, 2001.
- Rajak D.K., Pagar D.D., Menezes M.L., Linul E., Fiber-Reinforced Polymer Composites: Manufacturing, Properties, and Applications. *Polymers* 11(10), 1667, 2019.
- Ravi Kumar B.N., Suresha B., Venkataramareddy M., Effect of particulate fillers on mechanical and abrasive wear behavior of polyamide 66/polypropylene nanocomposites. *Materials and Design* 30, 3852–3858, 2009.
- Sarı A., Nteziyaremy Ö.S., Polimer Yatak Malzemelerin Tribolojik Özelliklerinin Deneysel İncelenmesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi 16, 446-453, 2016.
- Shibata K., Yamaguchi T., Hokkirigawa K., Tribological behavior of polyamide 66/rice bran ceramics and polyamide 66/glass bead composites. *Wear* 317, 1-7, 2014.
- Srinath G., Gnanamoorthy R., Sliding wear performance of polyamide 6–clay nanocomposites in water. *Composites Science and Technology* 67, 399-405, 2007.
- Taşdelen Y., Polimer malzemelerin sfero döküm karşısında aşınma davranışlarının incelenmesi. Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, (Basılmış), 2007.
- Unal H., Mimaroglu A., Friction and Wear Performance of Polyamide 6 and Graphite and Wax Polyamide 6 Composites Under Dry Sliding Conditions. *Wear* 289, 132-137, 2012.
- Unal H., Sen U., Mimaroglu A., Dry Sliding Wear Characteristics of Some Industrial Polymers Against Steel Counterface. *Tribology International* 37, 727-732, 2004.
- Unal H., Yetgin S.H., Findik F., The Effect of Applied Load and Sliding Speed on The Tribological Properties of Nylon 6 and Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene. *Industrial Lubrication and Tribology* 66(3), 498-504, 2014.
- Wang Y., Yin Z., Li H., Gao G., Zhang X., Friction and Wear Characteristics of Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) Composites Containing Glass Fibers and Carbon Fibers Under Dry and Water-Lubricated Conditions. *Wear* 380–381, 42-51, 2017.