



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Poli-Fital-Amid (PPA) Polimerinin Tribolojik Özelliklerine Karbon Fiber Ve Kayma Hızı'nın Etkisinin İncelenmesi

Hüseyin ÜNAL^{a,*}, Gizem HATİPOĞLU^a, Salih Hakan YETGİN^b

^a Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, TÜRKİYE
^b Makine Eğitimi Bölümü, Simav Teknik Eğitim Fakültesi, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: unal@sakarya.edu.tr

ÖZET

Bu deneysel çalışmada, katkısız poli-fital-amid (PPA) polimeri ile %30 karbon fiber takviyeli poli-fital-amid (PPA+30%CF) kompozitin, kuru kayma şartları altında paslanmaz çelik disk malzemeye karşı tribolojik performansları araştırılmıştır. Karbon fiber takviyeli kompozit malzeme üretimi endüstriyel tip çift vidalı ekstruder kullanılarak gerçekleştirilmiş olup, aşınma test numuneleri de geleneksel enjeksiyon makinesi kullanılarak kalıplanmıştır. Aşınma testleri 40N yük altında 1.0, 2.0, 3.0 ve 4.0 m/s gibi yüksek kayma hızlarında pim-disk aşınma cihazında, oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Aşınma test sonuçlarına göre, %30 karbon fiber takviyeli poli-fital-amid kompozitin spesifik aşınma oranı 10^{-13} m²/N iken katkısız poli-fital-amidin aşınma oranı ise 10^{-12} m²/N olarak elde edilmiştir. Karbon fiber takviyeli poli-fital-amid kompozitin sürtünme katsayısı katkısız poli-fital-amide göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Karbon fiber takviyeli poli-fital-amid kompozitin çekme deneyi sonrasında elde edilen kırılma yüzey incelemeleri taramalı elektron mikroskobu kullanılarak yapılmıştır. Deneylerde kullanılan PPA polimer ve PPA+30%CF kompozit malzemelerin aşınma yüzeylerinin mikroyapıları optik mikroskop kullanılarak incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Poli-fital-amid, Karbon fiber, Kompozit, Aşınma, Sürtünme

The Effect of Carbon Fiber and Sliding Speed on Tribological Properties of Poly-Phthalamide Polymer

ABSTRACT

In this experimental study, the tribological performance of unfilled polyphthalamide polymer and 30% carbon fiber reinforced polyphthalamide composite sliding against stainless steel under dry sliding environments were studied. Twin screw extruder was used to produce carbon fiber reinforced polyphthalamide composite granules and then injection molded to provide the wear test samples. A pin-on-disc wear test apparatus is used for evaluating the friction and wear behaviors of PPA polymer and PPA composite. The friction and wear tests were conducted at different sliding speeds of 1, 2, 3 and 4 m/s and at applied load 40N. It is found that the 30% carbon fiber reinforced polyphthalamide composite have superior tribological behavior than that of unfilled polyphthalamide polymer. As a result of study, the coefficient of friction and specific wear rate of polyphthalamide compounds with the addition of carbon fiber reinforcement were reduced. Finally, scanning electron microscope was used to examine fractured surface morphology of composite and optical microscope was also used to examine the wear mechanism of polyphthalamide polymer and its composite.

Keywords: Polyphthalamide, Tribology, Carbon fiber, Composite, Wear, Friction

I. GİRİŞ

POLİMER malzemeler endüstrinin ve günlük hayatın vazgeçilmez malzemeleri arasına girmiştir. Fakat, katkısız polimerlerin mekanik, termal ve tribolojik özelliklerinin düşük olması aynı zamanda uygulama alanlarını da sınırlamaktadır. Bu sebeple, polimer malzemelere cam, karbon ve aramid fiber gibi mukavemet artırıcılar ile PTFE, grafit, vaks gibi katkılar polimerlerin performanslarını artırmak için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [1]. Performans ve özellikleri iyileştirilen polimer kompozitler, demir, çelik, alüminyum, seramik ve cam gibi geleneksel malzemelerle kıyaslandığında yoğunluğuna göre düşük ağırlığa sahip olduklarından özellikle havacılık, uzay, otomotiv ve kimya endüstrisi gibi endüstriyel alanlarda geniş bir şekilde kullanılmaktadır [2]. Literatürde kompozit malzemelerle ilgili çok sayıda çalışma yapılmış olup bu çalışmaların bazılarında [3-6], polimer ve kompozitlerin tribolojik davranışlarını iyileştirmek için, poli-tetra-flor-etilen (PTFE) ve grafit gibi dış yağlayıcılar kullanmışlardır. Yaptıkları pim-disk aşınma deneylerinde, sürtünme katsayısının azalmasında karşı disk çelik malzeme yüzeyinde oluşan transfer film tabakasının önemli derecede etkiye sahip olduğunu ifade etmektedirler. Diğer bir çalışmada [7] ise, kısa aramid fiber, cam fiber veya karbon fiberlerin kullandıkları polimer kompozitin sürtünme direncini artırmak için etkili olduğu ifade edilmektedir. Benzer şekilde, Kim ve arkadaşları da [8], katkısız PA66 ve %30 kısa cam fiber takviyeli poliamid 66 (PA66) kompozitlerinde, Sung ve arkadaşları ise [9], %15 ve %30 kısa cam fiber katkılı poliamid 12 (PA12) polimer kompozitlerinde fiber katkının kompozitin aşınma direncinin artmasına sebep olduğunu ifade etmişlerdir. Buna ilaveten Cho ve arkadaşları [10] da farklı oranlarda karbon fiber katkılı poli-fenilen-sülfid (PPS) kompozitleri üzerine çalışmışlardır. Yaptıkları çalışmada en düşük sürtünme katsayısını %20 ile %30 oranında karbon fiber katkılı PPS kompozitlerinde tespit ederken en düşük aşınma oranını ise %10-20 karbon fiber katkı oranında tespit etmişlerdir.

Literatürde polimer ve polimer kompozitlerin aşınma direncini artırmak ve sürtünme katsayısını düşürmek için birçok çalışmaya rastlanmaktadır. Bu çalışmalardan birisini gerçekleştiren Zhang [11] ve Chang [12] farklı oranlarda kısa karbon fiber ve katı yağlayıcı katkılı epoksi esaslı kompozit malzemelerin aşınma ve sürtünme özellikleri üzerine çalışmışlardır. Reinicke ve arkadaşları [13], değişik oranlarda cam fiber ve PTFE katkılı poliamid 46 (PA46), PPA, PPS ve poli-eter-imide (PEI) polimer kompozitlerin tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Ünal ve arkadaşları da [14], PA66, poli-oksi-metilen (POM), çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen (ÇYMAPE), %30 cam fiber takviyeli poli-fenilen sülfid (PPS+%30CE) ve alifatik poliketon (APK) polimer ve kompozitlerinin farklı kayma hızı ve basınç şartları altındaki tribolojik davranışlarını incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada kullanılan tüm malzemelerde, sürtünme katsayısının uygulanan basıncın artmasıyla birlikte lineer olarak azaldığını gözlemişlerdir. Kayma hızının artmasıyla birlikte ise sürtünme katsayısının arttığını belirtmişlerdir. Spesifik aşınma oranının ise uygulanan basınçtan fazla etkilenmediğini de tespit etmişlerdir. Dickens ve Sullivan [15] polifenilenoksit (PPO), polietereterketon (PEEK) ve PTFE polimerleri üzerinde yaptıkları çalışmada, artan kayma hızı ile aşınma oranının arttığını, PPO ve PTFE polimerlerinin sürtünme katsayısının değişmediğini ancak PTFE polimerinin sürtünme katsayısının arttığını da belirtmişlerdir. Seabra ve Baptista [16], PTFE, ÇYMAPE, yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE), poliamid 6 (PA6), poli-oksi-metilen kopolimer (POM-C) ve polietilen tereftalat (PET) polimerlerinin paslanmaz çelik disk karşı yüzeyine karşı tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Deneylerde kullandıkları polimer malzemeler arasında ÇYMAPE, en düşük sürtünme katsayısı ve aşınma oranı göstermiştir. PA6 polimeri ise artan yük ile birlikte sürtünme katsayısı artarken ÇYMAPE için ise azalmıştır. Kayma hızının artması ile PA6 ve ÇYMAPE polimerleri için sürtünme katsayısı azalırken her iki polimer malzemenin yükün artması ile aşınma oranlarının arttığını tespit

etmişlerdir. Benzer sonuçları, Sung ve arkadaşları [9] ile Charles ve arkadaşları [17] da yaptıkları çalışmalarda tespit etmişlerdir.

Polimer malzemeler arasında yüksek performanslı mühendislik polimerleri arasında yer alan poli-fitalamid polimerler, poliamid ailesinin bir çeşidi olup, aromatik yapılı olduğundan diğer poliamid çeşitlerine göre yüksek sıcaklık dirençli, daha rijit ve yüksek mekanik özelliklere sahiptir. Buna ilaveten yüksek abrazyon aşınma direnci, korozyon direnci ve boyutsal kararlılık özelliklerine de sahiptir. Aslında bu özellikleri ile PA6, PA66 gibi polimer malzemeler ile Poli-eter-eter-keton (PEEK) ve sıvı kristal polimer (LCP) gibi malzemeler arasında fiyat/performans açısından köprü vazifesi görürler. Bu özellikleri ile otomotiv sektörü, elektrik/elektronik endüstrisi, telekomünikasyon, spor malzemeleri yapımında ve kişisel bakım malzemeleri gibi ürünlerin imalatında kullanılmaktadır. Yüksek mukavemet, sürünme, aşınma gibi özellikleri nedeniyle de makine sektöründe de kendisine metallere yerinde kullanım alanı bulmaktadır. Pahalı malzemeler oldukları ve yüksek performanslı oldukları için ise endüstride kullanımları günümüze kadar çok yaygın olmamıştır. Diğer poliamid malzeme çeşitleri ile karşılaştırıldığında kullanımları oldukça az olduğu söylenebilir. Ancak önümüzdeki yıllarda teknolojinin gelişmesi ile birlikte kullanımlarının artacağı tahmin edilmektedir. Literatür incelendiğinde PPA polimer malzemelerin aşınma ve sürtünmesi üzerine yapılmış oldukça nadir yayın yapıldığı görülmektedir. Bu sebeple PPA malzemeler aşınma dirençli, yüksek sıcaklıklara dayanıklı ve diğer mekanik performanslarından dolayı bu çalışma için seçilmiş ve aşınma ile ilgili alanlara ışık tutabilmesi amacıyla araştırma konusu olarak tercih edilmiştir.

Bu deneysel çalışmada, katkısız PPA polimeri ile %30 karbon fiber takviyeli PPA polimer kompozit numunelerine pim-disk sistemi kullanılarak kuru kayma şartları altında, paslanmaz çelik diske karşı farklı kayma hızı aralıklarında (1.0-4.0m/s) ve 40N sabit yük altında aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. PPA polimerine ilave edilen karbon fiber katkının ve tribolojik proses şartlarından birisi olan kayma hızının aşınma ve sürtünme davranışları üzerine etkileri araştırılmıştır.

II. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneylerde kullanılan katkısız poli-fital-amid mühendislik plastik malzemesi (Tecomid HT), İstanbul Eurotec Mühendislik Plastikleri Firmasından temin edilmiştir. Karbon fiber mukavemet artırıcı ise poliamid ile uyumlu olup, Yalova'da DOW-AKSA firmasından temin edilmiştir. Endüstriyel tip bir kompozit makinesi kullanılarak ağırlık olarak %30 karbon fiberli granüller üretilmiştir. Daha sonra üretilen granüller kullanılarak enjeksiyonla kalıplama yöntemiyle özel olarak dizayn edilmiş ASTM G 99 standardına [18] uygun kalıp kullanılarak aşınma pim deney numuneleri basılmıştır. Aşınma testlerinde kullanılan pim malzemeler, enjeksiyonla kalıplama tekniği kullanılarak 6mm çapında ve 50mm uzunluğunda olacak şekilde üretilmişlerdir. Enjeksiyon makinesi ısıtıcı sıcaklıkları 320-340 °C arasında olacak şekilde ayarlanmıştır. Enjeksiyonla numune üretimi yapılmadan önce granüller 120 °C'de 4 saat fırında kurutulmuştur. Aşınma deneylerinde kullanılan katkısız PPA polimeri ile %30 oranında karbon fiber takviyeli PPA kompoziti, AISI 316L paslanmaz çelik disk malzemeye karşı test edilmiştir. Çelik disk malzeme 90 mm çapında ve 8 mm kalınlığında talaşlı imalat yöntemiyle işlenmiş, yüzeyleri ise düzlem yüzey taşlama cihazında taşlanmıştır. Hazırlanan paslanmaz çelik disk yüzeyi deneylerden önce yüzey profilometresi kullanılarak ölçülmüş ve yüzey pürüzlülüğü 0.30 µm Ra olarak ölçülmüştür. Her tribolojik test öncesinde disk ve pim yüzeyleri asetonla temizlenip kurutulmuştur. Aşınma deneyleri, kuru ortam şartlarında, 21±2 oda sıcaklığında ve pim-disk aşınma sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarının doğruluğu ve güvenilirliğini sağlamak

için her bir aşınma deneyi en az üç kez tekrarlanmış ve elde edilen değerlerin ortalaması alınmıştır. Tablo 1’de bu çalışmada kullanılan malzemeler için yoğunluk, çalışma ortam sıcaklığı, uygulanan yük ve kayma hızı gibi test şartları verilmiştir. Her testten önce (m_1) ve sonra (m_2) pim ağırlıkları ölçülmüş ve ağırlık kaybı (Δm) tespit edilmiştir. Pim ağırlıkları 0,0001 gr hassasiyetli Precia 220 marka hassas terazi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen ağırlık kaybı hesaplanarak aşağıdaki formül (Eşitlik 1) yardımıyla spesifik aşınma oranları (K_0) hesaplanmıştır.

$$K_0 = \Delta m / L \cdot \rho \cdot F \quad (m^2 / N) \quad (1)$$

Burada, Δm : ağırlık kaybı (g), L: kayma mesafesi (m), ρ : malzemelerin yoğunluğu (g/cm^3) ve F: uygulanan yük (N)'dur.

Tablo 1. Aşınma ve sürtünme deneylerinde kullanılan polimer malzemeler ve deney şartları

Malzeme	Yoğunluk (g/cm^3)	Ortam Sıcaklığı ($^{\circ}C$)	Kayma Mesafesi (m)	Yük (N)	Kayma hızı (m/ s)
PPA	1.18	21±2	2000	40	1.0
PPA+30%CF	1.30				2.0
					3.0
					4.0

Deney numunelerinin sürtünme katsayısını belirlemek için öncelikle pimin bağlı olduğu kola gelen yanal yük bir yük hücresi (load cell) ile ölçülmüştür. Sürtünme kuvvetini ölçmek için dakikada yaklaşık 1500 veri alınmakta ve 2000 m kayma yolu süresince bu yük ölçümleri devam etmektedir. Veriler çok olduğu için oldukça hassas bir şekilde sürtünme katsayısı elde edilebilmektedir. Elde edilen sürtünme kuvveti verileri aynı zamanda bir bilgisayarda excel programına aktarılmaktadır. Daha sonra excel programına atılan sürtünme kuvveti verileri yine excel programında uygulanan yüke bölünerek sürtünme katsayısı hesaplanmaktadır ve bilgisayarda sürtünme katsayısı-yük grafiği şeklinde deney başlangıcından sonuna kadar takip edilebilecek şekilde dizayn edilmiştir. Sürtünme katsayısı, uygulanan yükün 2000 m kayma yolu boyunca yük hücresi ile ölçülen sürtünme kuvvetine bölünmesi ile tespit edilmiş ve aşağıdaki formül kullanılmıştır.

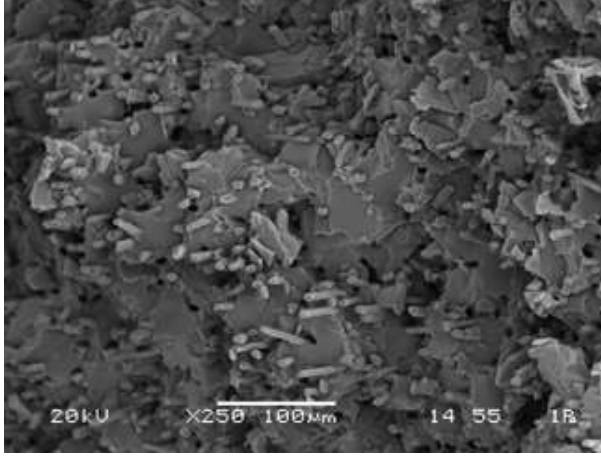
$$\mu = F_s / F_n \quad (2)$$

Formülde; μ sürtünme katsayısı, F_s sürtünme kuvveti, F_n ise uygulanan normal kuvvettir.

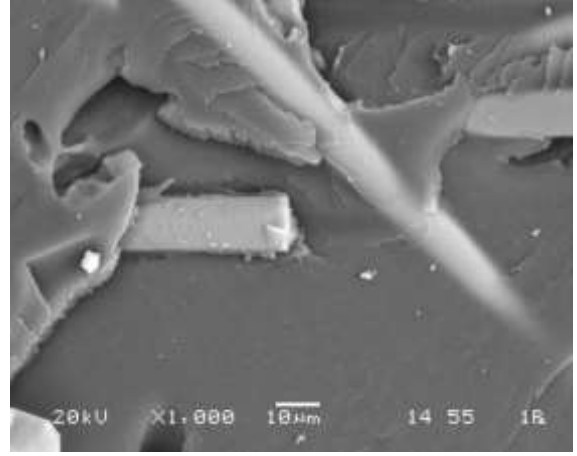
III. BULGULAR ve TARTIŞMA

Şekil 1 a-d de çekme deneyi sonrası elde edilen %30 karbon fiber takviyeli poli-fital-amid polimer kompozit ve katkısız polifitalamid polimer numunelere ait kırık yüzey görüntüleri verilmiştir. Şekil 1a’da PPA polimer matris malzeme içindeki karbon fiberlerin homojen bir şekilde dağıldığı gözlenmektedir. Ayrıca Şekil 1b’de ise poli-fital-amid polimer matrisi ile karbon fiber mukavemet artırıcının iyi bir şekilde bağlandığı gözlenmektedir. Bunun sebebinin ise karbon fiber yüzeylerinin matris malzemeye iyi bağlanabilmesi için üretici firma tarafından modifiye edilmiş olmasıyla

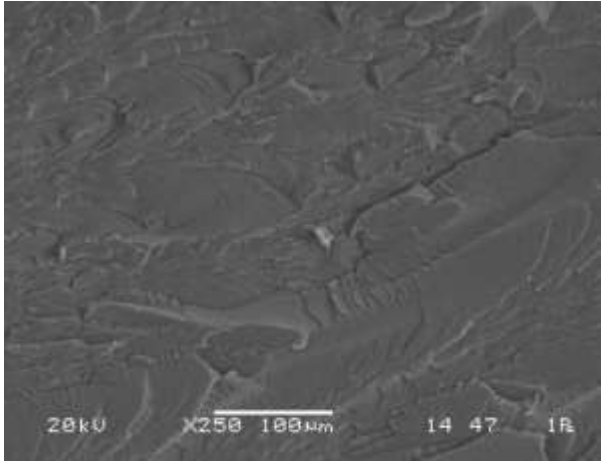
açıklanabilir. Polimer matrise ilave edilen karbon fiberlerin kompozitin gevrekliğini artırdığı bu sebeple de çok fazla plastik deformasyonun olmadığı ifade edilebilir. Bakınız Şekil 1b].Katkısız PPA polimerinin Şekil 1 c,d de verilen taramalı elektron mikroskop görüntüsünden katkısız polifitalamid polimerinin sünek davranış gösterdiği ifade edilebilir. Şekil 2’de ise saf PPA polimeri ile PPA+30%CF takviyeli polimer kompozitin 1.0m/s kayma hızında ve 40N yük altındaki kayma mesafesi-sürtünme katsayısı arasındaki ilişki verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi hem PPA polimeri hem de PPA+30%CF polimer kompoziti için sürtünme katsayısı değişimi başlangıç ve sürekli kayma şartları olarak iki aşamada gerçekleşmiştir. PPA polimeri için sürtünme katsayısı yaklaşık 400m kayma mesafesinden sonra kararlı hal aşamasına ulaşırken PPA+30%CF polimer kompoziti için ise sürtünme katsayısı yaklaşık 800m kayma mesafesinden sonra kararlı hal aşamasına ulaşmıştır.



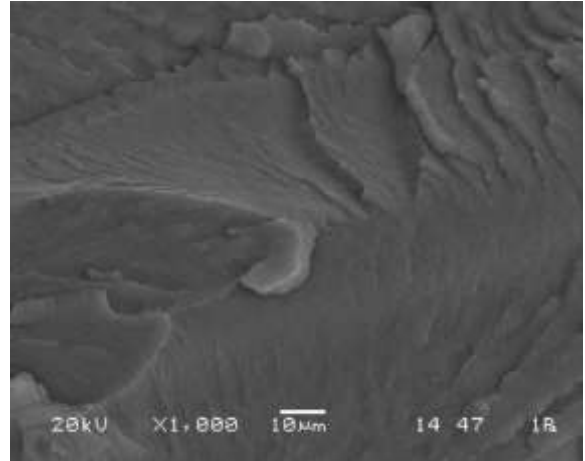
(a)



(b)

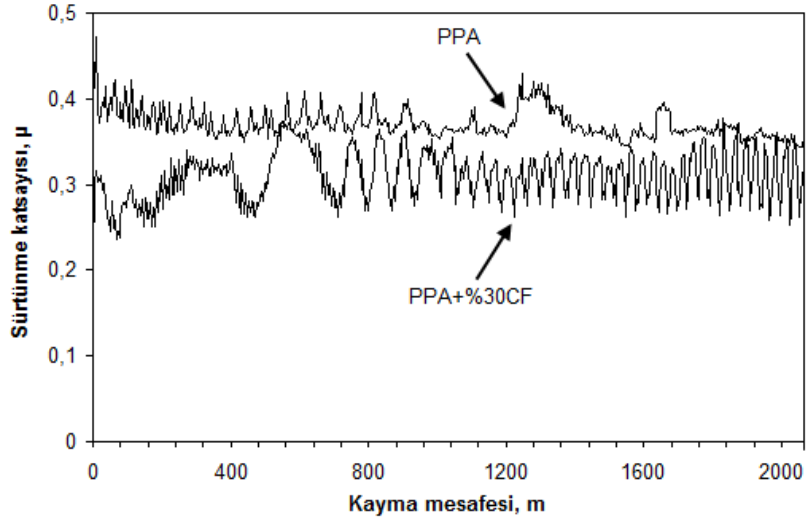


(c)



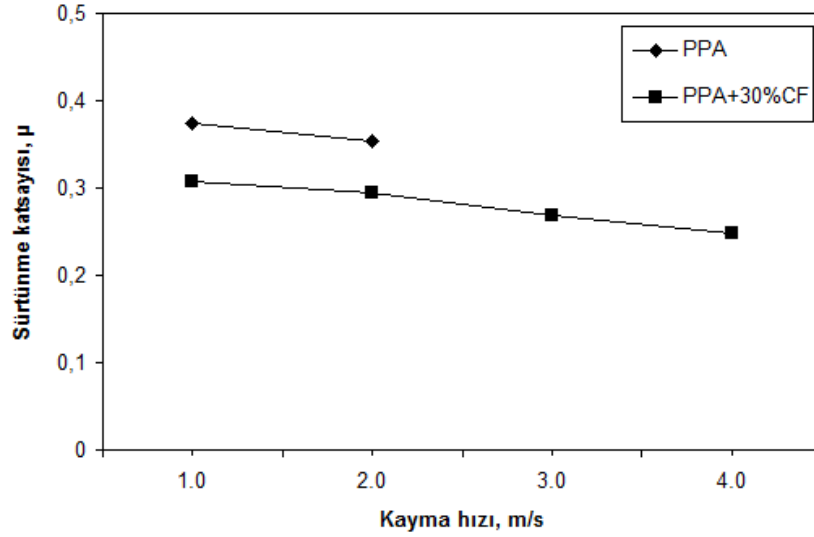
(d)

Şekil 1. (a,b) PPA+%30CF takviyeli PPA polimer kompozitin ve (c,d) katkısız PPA polimerinin çekme deneyi sonrası elde edilen kırık yüzey taramalı elektron mikroskop (SEM) mikroyapı görüntüleri

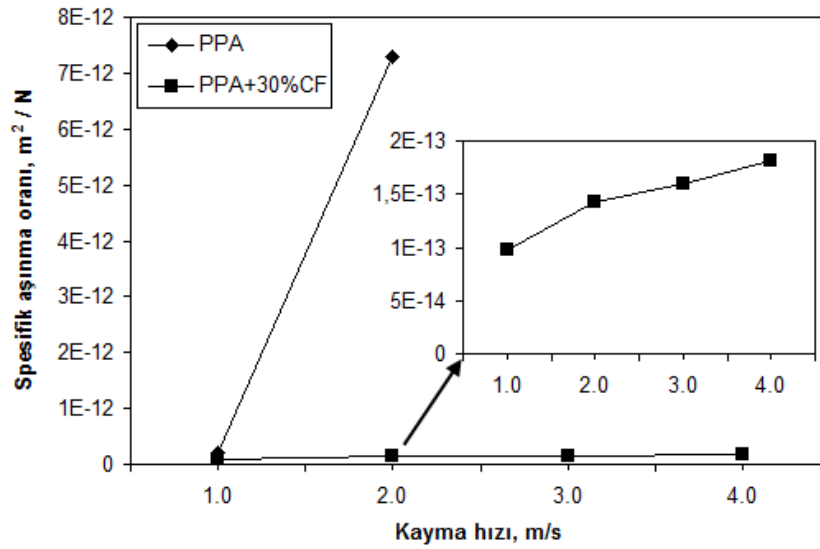


Şekil 2. Katkısız PPA polimeri ile PPA+30%CF kompozitinin sürtünme katsayısı-kayma mesafesi ilişkisi
(Kayma hızı: 1.0m/s, Uygulanan Yük:40N)

Şekil 3’de PPA polimeri ve PP+30%CF polimer kompoziti için sürtünme katsayılarının kayma hızı ile değişimi verilmiştir. Katkısız PPA polimerinde, yüksek kayma hızları (>2.0 m/s) altında aşırı derecede malzeme kaybı meydana geldiği için deneyler 4.0 m/s hıza kadar gerçekleştirilmemiştir. Ancak, karbon fiber takviyeli PPA polimer kompoziti için deneyler 4.0 m/s hıza kadar gerçekleştirilmiştir. Katkısız PPA polimeri ile karbon fiber takviyeli PPA kompoziti için sürtünme katsayısı, uygulanan kayma hızının artması ile azalmıştır. Sürtünme katsayısı değerleri 1.0 ve 2.0 m/s kayma hızları altında 0.37 ve 0.35 olarak tespit edilirken, 30% karbon fiber takviyeli PPA kompoziti için aynı hızlarda sırasıyla 0.31 ve 0.29 değerleri elde edilmiştir. Ağırlık olarak %30 oranında ana PPA matrise karbon fiber ilavesi, kompozitin sürtünme katsayısını yaklaşık olarak %20 oranında azalmasına sebep olmuştur. Aynı zamanda karbon fiber, kompozitin yüksek hızlarda (>2m/s) çalışabilmesini de sağlamıştır. Deneylerde çalışılan hız aralığında (1.0-4.0 m/s) en yüksek sürtünme katsayısı, 1.0m/s kayma hızında 0.37 değeri ile katkısız PPA polimerinde elde edilirken, en düşük sürtünme katsayısı ise PPA+30%CF polimer kompozit numunesinde 0,25 değeri ile 4.0m/s kayma hızında elde edilmiştir. Kısaca, hem katkısız PPA polimeri hem de %30karbon fiber takviyeli kompozitin sürtünme katsayısı değerleri kayma hızının artması ile azalma göstermektedir. Bu elde edilen sonuçlar literatürde daha önce yapılan çalışmalarla [3-6], [9,16,17] uyum göstermektedir. Sürtünme katsayısındaki azalmanın sebebi iki şekilde açıklanabilir. Bunlardan ilki, başlangıçta pürüzlü yüzeye sahip olan paslanmaz çelik disk yüzeyi, kompozit bünyesindeki karbon fiberler tarafından aşındırılarak daha parlak çelik yüzeyi oluşturması ile açıklanabilir. Bu durum kompozit/disk çifti için daha etkin olduğu ifade edilebilir. İkincisi ise yüksek hızlarda yapılan deneylerde çelik/pim sürtünme yüzeylerinde meydana gelen sıcaklık artışı ile açıklanabilir. Kayma hızının artması ile PPA+%30CF kompozitinin çelik disk yüzeyine karşı çalışırken, temas yüzeylerinde artan sürtünmeden dolayı sıcaklık artışı meydana gelmektedir. Polimer pim yüzeyi az da olsa yumuşayarak çelik disk yüzeyine yapışmasına sebep olmaktadır. (Bakınız Şekil 5d) Bu ifade aslında yüksek performanslı polimerler için söylenebilir. Bunun aksine düşük yumuşama sıcaklığına sahip olan polimer malzemeler için, disk yüzeyinde daha fazla transfer film tabakası meydana gelmekte ve sürtünme katsayısının azalmasına sebep olmaktadır. Benzer sonuçlar daha önce literatürde yapılan bazı çalışmalarda Qihua [7] ve Shangguan [19] tarafından da elde edilmiştir.



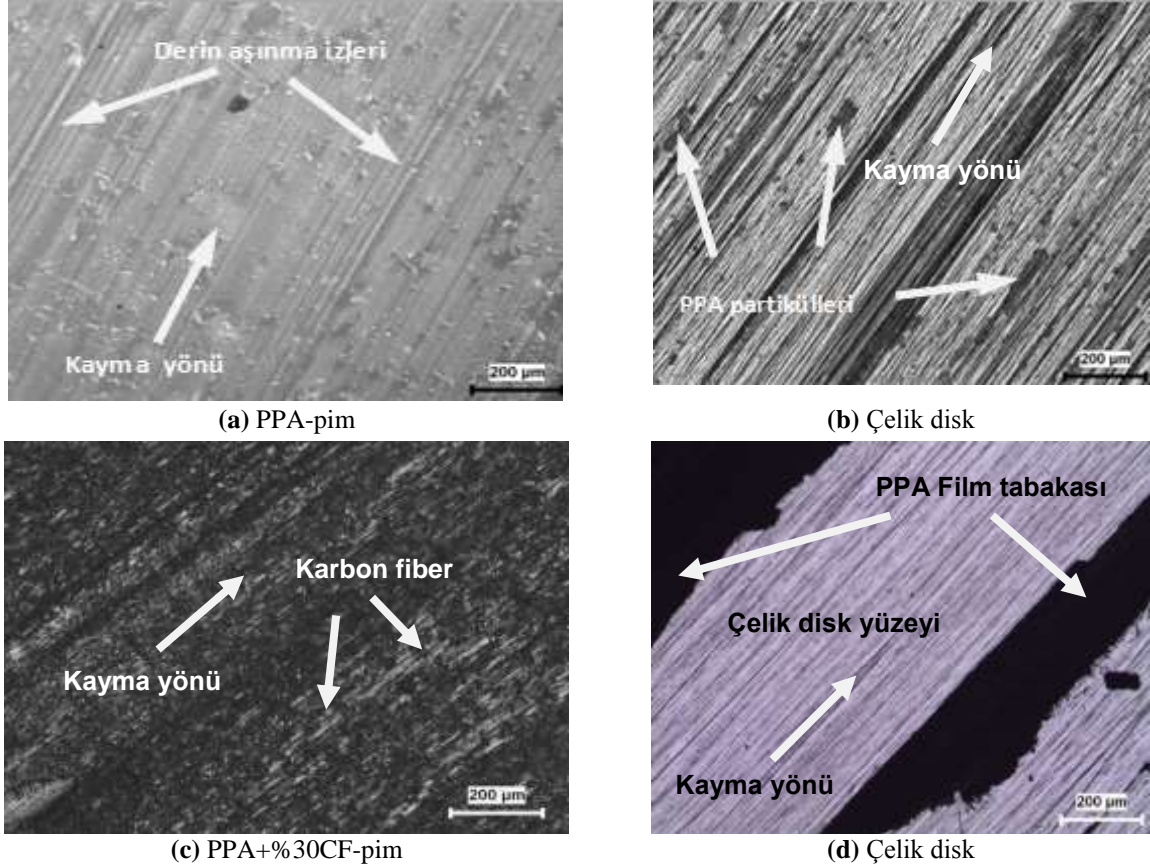
Şekil 3. PPA polimeri ile PPA+30%CF polimer kompozitinin sürtünme katsayısı-kayma hızı değişimi



Şekil 4. PPA polimeri ile PPA+30%CF polimer kompoziti için spesifik aşınma oranı-kayma hızı değişimi

Şekil 4 de uygulanan kayma hızına bağlı olarak katkısız PPA polimeri ile karbon fiber takviyeli PPA polimer kompoziti için elde edilen spesifik aşınma oranı sonuçları verilmiştir. Genel olarak, katkısız PPA polimerinin aşınma oranı 10^{-12} m²/N değerlerinde elde edilirken, karbon fiber katkılı PPA polimerlerinde aşınma oranı 10^{-13} m²/N değerlerinde elde edilmiştir. Her iki malzeme için de kayma hızının artması ile spesifik aşınma oranının arttığı görülmektedir. 1-4m/s kayma hızları aralığında PPA+30%CF polimer kompozitinin aşınma oranı, katkısız PPA polimerine göre oldukça düşük olacak şekilde elde edilmiştir. PPA polimerine ilave edilen karbon fiber mukavemet artırıcı, kompozitin aşınma oranını en az 15 kat azalmasına sebep olmuştur. Benzer sonuçlar daha önce literatürde yapılan bazı çalışmalarda da elde edilmiştir. Bunlardan birisi olan Chang [1] tarafından yapılan grafit+kısa karbon fiber katkılı PA66 polimerinde de elde edilmiştir. Unal ve Mimaroglu nun [6] yaptığı saf PA6, %5 ve %15 grafit katkılı PA6 kompozit ve %4 vaks katkılı PA6 polimer numunelerinde de artan kayma hızına bağlı olarak aşınma oranı artmıştır.

Şekil 5 de PPA polimer ve PPA+%30CF polimer kompozitlerin kuru ortam şartlarındaki pim ve disk aşınma yüzeyi optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Katkısız PPA polimer pim yüzeyi incelendiğinde abrazif aşınma izleri açıkça görülmektedir (Bkz. Şekil 5a). Karşı yüzey olan çelik disk yüzeyinde ise herhangi bir film tabakası gözlenmemiş ancak birkaç parça halinde PPA partiküllerine rastlanmıştır (Bkz. Şekil 5b). Karbon fiber takviyeli PPA kompozitinin aşınma yüzeyi daha düzgün bir şekilde gözlenmiş iken derin aşınma izlerine rastlanmamıştır (Bkz. Şekil 5c). Şekil 5d’de dikkatli bir şekilde incelendiğinde karbon fiber takviyeli PPA kompozitin çelik disk üzerinde kayması süresince kayma yönünde çok ince bir çizgi şeklinde transfer film tabakasının oluştuğu gözlenmektedir. Oluşan bu transfer film tabakası, polimer kompozitin aşınma direncinin artmasına ve sürtünme katsayısının azalmasına sebep olmaktadır.



Şekil 5. PPA polimeri ile PPA+%30CF kompozitinin kuru ortam şartlarındaki pim ve disk aşınma yüzeyi optik mikroskop görüntüleri, (uygulanan yük: 40N, kayma hızı: 1m/s)

IV. SONUÇ

Farklı kayma hızları kullanılarak PPA polimeri ve PPA+%30CF polimer kompozit numunelerinin aşınma davranışlarının incelendiği çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

1. Kayma hızının artması ile PPA polimeri ve PPA+%30CF kompozit malzemeleri için, sürtünme katsayısı azalmıştır.
2. PPA polimerine ilave edilen %30 oranındaki karbon fiber, kompozit malzemenin sürtünme katsayısının katkısız PPA polimerine göre %20 oranında azaltmasına sebep olmuştur.

3. Katkısız PPA polimerinin aşınma oranı 10^{-12} m²/N değerlerinde elde edilirken, ağırlıkça %30 oranında karbon fiber takviyeli PPA kompozitin aşınma oranı 10^{-13} m²/N değerlerinde elde edilmiştir.
4. Her iki numunenin ortak çalışabildiği maksimum 2m/s kayma hızındaki aşınma direnci karşılaştırıldığında; PPA polimerine ilave edilen karbon fiber katkı, aşınma oranını katkısız PPA polimerine göre ortalama 50 kat aşınma direncinin yüksek çıkmasına sebep olmuştur.
5. Karbon fiber ilavesi ile PPA kompozitin yük taşıma kapasitesi artmış ve yüksek hızlarda (>2m/s) çalışabileceği tespit edilmiştir.

TEŞEKKÜR: Bu çalışma Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından desteklenmiştir (Proje No: 2013-50-01-006).

V. KAYNAKLAR

- [1] K.Friedrich, Z.Zhang, A.K. Schlarb *Composite Science and Technology* **65** (2005) 2329–2343.
- [2] L. Chang, Z. Zhang, H. Zhang, A.K. Schlarb, *Composites Science and Technology* **66** (2006) 3188–3198.
- [3] S. Bahadur, V.K. Polineni, *Wear* **200** (1996) 95–104.
- [4] S. Bahadur *Wear* **245** (2000) 92–99.
- [5] A.A. Cenna, P. Dastoor, A. Beehag, N.W. Page *J. Mater. Sci.* **36** (2001) 891–900.
- [6] H. Unal, A. Mimaroglu *Wear* **289** (2012) 132–137.
- [7] W. Qihua, Z. Xinrui, P. Xianqiang *Materials and Design* **31** (2010) 3761–3768.
- [8] J.W. Kim, H. Jang, J.W. Kim *Wear* **309** (2014) 82–88.
- [9] S.K. Sung, W.S. Min, J. Ho *Wear* **274–275** (2012) 34–42.
- [10] M.H. Cho, S. Bahadur, A.K. Pogolian *Wear* **258** (2005) 1825–1835.
- [11] Z. Zhang, C. Breidt, L. Chang, F. Hauptert, K. Friedrich *Composites Part A* **35** (2004) 1385–1392.
- [12] L. Chang, Z. Zhang, C. Breidt, K. Friedrich *Wear* **258** (2005) 141–148.
- [13] R. Reinicke, F. Hauptert, K. Friedrich *Composites Part A* **29A** (1998) 763–771.
- [14] H. Unal, U. Sen, A. Mimaroglu *Tribology International* **37** (2004) 727–732.
- [15] P.M. Dickens, J.L. Sullivan *Wear* **112** (1986) 273–289.
- [16] L.C. Seabra, M.A. Baptista *Wear* **253** (2002) 394–402.
- [17] D.F. Charles, R. Gnanamoorthy, P. Ravindran *Wear* **269** (2010) 565–571.
- [18] ASTM G99-05, 2010, Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus, http://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?G99+05\2010
- [19] Q.Q. Shangguan, X.H. Cheng *Wear* **260** (2006) 1243–1247.