

Araştırma Makalesi - Research Article

Kaya Yünü Mineral Elyaf ve Mika Takviyeli Poliamid-6 Kompozitinin Termoset Polyester Kompozit Diske Karşı Aşınma Davranışları

Hüseyin Ünal^{1*}, Salih Hakan Yetgin²

Geliş / Received: 21/02/2020

Revize / Revised: 04/07/2020

Kabul / Accepted: 04/07/2020

ÖZ

Elektrik sektöründe kullanma amaçlı gerçekleştirilen bu çalışmada ağırlık olarak % 20 oranında kaya yünü mineral elyaf (KYME) ve mika takviyeli poliamid-6 (PA-6) termoplastik esaslı polimer kompozitler, termoset esaslı kompozit disk yüzeyine karşı aşınma ve sürtünme davranışları incelenmiştir. Çalışmanın amacı elektrik sektörü için aşınma direnci daha iyi olan polimer kompozit malzeme ile termoset doymamış polyester kompozit çiftini belirlemektir. Tribolojik deneyler disk üzerinde pim düzeneği bulunan bir aşınma cihazında gerçekleştirilmiştir. Karşı disk malzeme olarak ağırlık olarak % 40 kalsiyum karbonat ve % 25 oranında uzun cam elyaf takviyeli doymamış polyester kompozit malzemesi kullanılmıştır. Tribolojik testler, 0,5 m/s kayma hızında 0,707, 1,415, 2,123 ve 3,538 MPa basınç altında gerçekleştirilmiştir. Yapılan tribolojik çalışmalar sonucunda en düşük aşınma oranı 1.98×10^{-14} m²/N değeri ile %20 oranında mika takviyeli PA-6 kompozitinde elde edilmiştir. Mika takviyeli PA-6 kompoziti kaya yünü mineral elyaf takviyeli kompozite göre yaklaşık olarak % 42 oranında daha az aşındığı belirlenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda elektriksel uygulamalarda kullanım amaçlı üretilen kompozit malzemelerden % 20 mika takviyeli PA-6 kompoziti ile %40 kalsiyum karbonat ve % 25 oranında uzun cam elyaf takviyeli doymamış polyester kompozit malzeme çifti elektrik kontak kesicilerde kullanılabilecek en uygun malzeme olarak tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler- *Kaya Yünü Mineral Elyaf, Mika, PA-6, Triboloji, Uygulanan Basınç*

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

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Sakarya, Türkiye

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

Makine Mühendisliği Bölümü, Tarsus Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Mersin, Türkiye

Wear Behavior of Rockforce Mineral Fiber and Mica Reinforced Polyamide-6 Composite against Thermoset Polyester Composite Disc

ABSTRACT

In this study carried out for use in the electricity industry, 20 % by weight of rock wool mineral fiber and mica reinforced polyamide-6 (PA-6) thermoplastic based polymer composites were investigated against the thermoset-based composite disc surface. The aim of the study is to determine the polymer composite with better wear resistance and thermoset unsaturated polyester composite pair for the electricity sector. Tribological experiments were carried out on a pin-on-disc wear test apparatus. 40 wt.% calcium carbonate and 25wt.% long glass fiber reinforced unsaturated polyester composite material were used as a counter disc material. Tribological tests were carried out at sliding speed of 0.5 m/s and under the pressure of 0.707, 1.415, 2.123 and 3.538 MPa. As a result of the tribological studies, the lowest wear rate was obtained in PA-6 composite with 20 wt.% mica with the value of $1.98 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{N}$. Mica reinforced PA-6 composite was found to be approximately 42 % less wear than rock force mineral fiber reinforced composite. As a result of the study, 20 wt.% mica reinforced PA-6 composite, which is produced for use in electrical applications, has been determined as the most suitable material to be used in electrical contact breakers with 40 wt.% calcium carbonate and 25 wt.% long glass fiber reinforced unsaturated polyester composite material.

Keywords- *Rockforce Mineral Fiber, Mica, PA-6, Tribology, Pressure*

I. GİRİŞ

Poliamid 6 (PA-6), yüksek dayanım/ağırlık oranı, yüksek korozyon direnci, UV ve gama ışınlarına direnç, geleneksel malzemeler ile karşılaştırıldığında basit ve ekonomik üretim prosesleri nedeniyle başta fiber olmak üzere ambalaj, otomotiv, elektrik/elektronik, tekstil ve makine sektörlerinde geniş bir şekilde kullanım alanı bulan yarı-kristal bir polimer türüdür. Ancak, poliamidlerin mekanik özelliklerin sınırlı olması, yüksek nem alma özelliği, düşük sıcaklıklarda düşük darbe dayanımına sahip olması ve kolay yanabilmesi gibi özellikleri kullanım alanlarını sınırlamaktadır [1-9]. Bu nedenle, katkısız poliamidin özellikleri farklı katkıları kullanılarak geliştirilebilmektedir. Genel olarak, poliamid esaslı termoplastik polimerlerde partikül formunda olan talk, kaolin, mika, wollastonit, grafit gibi katkıları kullanılırken elyaf formunda ise cam elyaf, karbon elyaf ve aramid elyaf gibi mukavemet artırıcılar geniş bir şekilde kullanılmaktadır. Bu katkıların içerisinde cam elyaf, düşük maliyet, yüksek kimyasal direnç, üstün yalıtım özellikleri, kolay üretilebilmesi ve temin edilebilmesi nedenleriyle en çok tercih edilen elyaf türüdür. Literatür incelendiğinde katkısız poliamid polimerinin mekanik ve tribolojik özellikleri üzerine elyafın etkisinin incelendiği birçok çalışma olup, bu çalışmalarda mekanik ve tribolojik özellikleri geliştirdiği belirtilmiştir [1,10-14]. Jawali ve arkadaşları [15] ergiyik karıştırma yöntemi ile ürettikleri % 15, 30, 40 ve 50 oranlarında kısa cam elyaf takviyeli PA-6 polimer kompozitlerin çekme ve aşınma özelliklerini incelemişlerdir. Yüksek elastiklik modülü değerine sahip elyafın artması ile çekme dayanımı ve çekmedeki elastiklik modülünün önemli oranda arttığı belirtilmiştir. Artan yük ve kayma hızı ile birlikte aşınma oranı artarken PA-6 polimerine ilave edilen cam elyaf oranının artırılması ile birlikte aşınma miktarının önemli oranda azaldığı belirtilmiştir. Nuruzzaman ve arkadaşları [16] farklı oranlarda cam elyaf takviyesi ile ürettikleri PA-6 esaslı kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda poliamid bünyesindeki cam elyaf oranının artmasına bağlı olarak kompozit malzemelerin elastiklik modülü, akma dayanımı, çekme dayanımı ve kırılma dayanımının arttığını ancak gerininin ise azaldığını belirtmişlerdir. Yi-Lan ve arkadaşları [17] ise PA-6 polimerine ilave ettikleri grafit, yüksek yoğunluklu polietilen, talk ve cam elyaf gibi katkıların tribolojik özelliklere etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, cam elyaf katkının, PA-6 polimerinin sürtünme katsayısını ve aşınma oranını azalttığını belirtmişlerdir.

Kaya yünü mineral elyaf, Lapinus tarafından üretilen taş yünü ürünlerinden birisidir ve sertliği, çekme dayanımı, kırılma ve kopma uzaması gibi özellikleri cam elyaf katkısı ile karşılaştırılabilir düzeydedir. Kaya yünü mineral elyafın PA-6 polimerine ilave edilmesi ile daha az aşınma, daha az viskozite artışı, daha az yanma oranı, yüksek yüzey kalitesi, yüksek ölçü kararlılığı ve bileşimin daha esnek olması gibi özellikler elde edilebilmektedir[18]. Ünal ve arkadaşları [18] kaya yünü mineral elyaf ve cam elyaf katkılı PA-6 kompozitlerin mekanik ve morfolojik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada, kaya yünü mineral elyaf ve cam elyaf, % 10 ile 30 arasında değişen oranlarda tekli ve karışım halinde PA-6 polimerine ilave edilmiştir. Artan cam elyaf oranı ile çekme dayanımı, elastiklik modülü, eğme dayanımı ve eğmedeki elastiklik modülü artarken kaya yünü mineral elyaf katkısının mekanik özellikler üzerinde fazla etkili olmadığı belirtilmiştir. Ayrıca darbe dayanımının katkı miktarı ile değiştiği % gerininin ise azaldığı belirtilmiştir.

Plaka benzeri kristal yapıya sahip mika minerali ise mükemmel mekanik, termal, elektrik yalıtımı, tribolojik özellikler ve polimer malzemelerden daha ucuz olması nedeniyle polimer kompozit malzeme üretiminde dolgu elemanı olarak en çok tercih edilen minerallerden birisidir [4, 19-20]. Lubomir ve arkadaşları [20] farklı oranlarda mika ve wollastonit katkılı yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) polimerinin mekanik ve termal özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmalarında mika katkısı ile üretilen YYPE esaslı kompozit malzemenin elastiklik modülü ve üst akma dayanımı değerleri artarken kopmadaki % gerinim ve kırılma tokluğunun azaldığını belirtmişlerdir. Mika katkılı YYPE polimerinin ergime sıcaklığı yaklaşık 3 °C azalırken kristallenme oranının ise yaklaşık % 30.2 oranında arttığı belirtilmiştir. Bose ve arkadaşları [5] çift vidalı ekstrüzyon kullanarak ürettikleri farklı partikül boyutlarına sahip ve farklı oranlarda (% 5-40) mika katkılı PA-6 esaslı kompozitlerin mekanik, termal ve elektriksel özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda artan mika oranına bağlı olarak kompozitlerin çekme dayanımının, eğme dayanımının, çekmedeki ve eğmedeki elastiklik modülünün arttığı, % gerinim ve darbe dayanımlarının ise azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca, mika partikül boyutunun azalması ile kompozit malzemelerin mekanik, termal ve elektriksel özelliklerinin arttığını belirtmişlerdir. Ünal ve Mimaroglu [21] yaptıkları çalışmada kısa cam elyaf ve lamel partikül şekilli mika katkıları PA-6 polimerine değişik oranlarda katarak kompozit malzemeler üretmişler ve kompozitlerin mekanik özelliklerine mika ve cam elyaf katkıların etkisini incelemişlerdir. Mika ve cam elyaf katkıları poliamid-6 polimer matrisine ağırlıkça %10, %20 ve %30 oranlarında ilave edilmiştir. Çalışma sonucunda cam elyaf ve

mika katkılarının kompozitin çekmedeki ve eğmedeki elastiklik modülleri önemli derecede arttığını gözlemişlerdir. Ancak kompozitlerin çekme dayanımı ve eğme dayanımı değerleri mika oranının artmasından fazla etkilenmediğini belirtmişlerdir. Ayrıca, artan mika oranı ile kompozit malzemelerin darbe dayanımının ve % gerinim değerlerinin azaldığını belirtmişlerdir. Gan ve arkadaşları [22] ağırlıkça farklı oranlarda (% 0-40) mika katkılı poli-aril-eter-keton (PAEK) kompozitlerin mekanik özelliklerini ve aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Mika oranının artması ile kompozit malzemelerin çekme dayanımı ve çekmedeki elastiklik modülünün arttığını ancak % gerinimin azaldığını belirlemişlerdir. Aşınma testleri sonucunda ise yükün artmasına bağlı olarak kompozitlerin sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerlerinin arttığını tespit etmişlerdir. 50 N yük altında yapılan triboloji deneylerinde kompozit malzemedeki mika oranına bağlı olarak sürtünme katsayısı ile aşınma miktarının değişmediği ancak kompozit malzemeye uygulanan yükün 100 N veya 200 N' a çıkarıldığı durumlarda %20 mika katkı oranına kadar sürtünme katsayısının ve aşınma oranının azaldığını tespit etmişlerdir. % 20 mika oranından daha fazla mika ilavesi durumunda ise kompozit malzemelerin sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerlerinin arttığı belirtilmiştir. Çalışma sonucunda Gan ve arkadaşları, kompozit bünyesindeki mika katkı oranının artması ile malzemenin rijitliğinin arttığını belirlemişlerdir. Bunun sonucu olarak ta kompozit malzemelerin sürtünme katsayısının ve aşınma oranının azaldığını belirlemişlerdir. Tribolojik uygulamalarda genellikle bir polimer veya kompozit malzeme ile bir çelik malzeme kullanılır. Literatürde bu duruma oldukça fazla rastlanmaktadır [23-26]. Ancak, endüstriyel uygulamaların birçoğunda birbiri ile temaslı çalışan polimerlere veya polimer kompozitlere oldukça fazla rastlanmasına rağmen literatürde bu konuda oldukça az çalışmaya rastlanmaktadır [4, 27]. Unal ve arkadaşları [4] pim-disk aşınma cihazı kullanarak farklı oranlarda (% 0-30) mika katkılı PA-6 kompozitlerin aşınma ve sürtünme davranışlarını incelemişlerdir. Çalışmalarında karşı disk malzeme olarak iki farklı poliamid-6 esaslı kompozit malzeme kullanmışlardır. Bu disk malzemelerden birisi ağırlık olarak %30 oranında mika katkılı PA-6 polimer kompoziti, diğeri ise yine ağırlık olarak %30 oranında cam elyaf takviye edilmiş PA-6 kompozit malzemesidir. Çalışma sonucunda Unal ve arkadaşları her iki polimer kompozit disklere karşı yapılan aşınma ve sürtünme deneylerinde artan mika oranına bağlı olarak kompozitlerin sürtünme katsayısının ve aşınma oranının arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca uygulanan yük artışına bağlı olarak da mika katkılı poliamid-6 esaslı kompozitlerin sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerlerinin arttığını belirtmişlerdir. Demir [27] ise ağırlık olarak % 20 oranında mika katkılı PA-6 polimer kompoziti (PA-6+%20Mika) ile %20 oranında kısa cam elyaf takviyeli polisülfon (PSU+%20CE) polimer kompozitlerin aşınma ve sürtünme davranışlarını incelemiştir. Çalışmasında karşı disk malzeme olarak iki farklı malzeme kullanmıştır. Bunlardan birisi AISI 316L paslanmaz çelik disklerdir. Diğeri ise % 30 cam elyaf takviyeli poli-fenilen-sülfite (PSU+%30CE) polimer kompozitidir. Tribolojik test çalışmalarını 0.5 m/s kayma hızında ve 10 N, 20 N ve 30 N yükler altında yapmıştır. Karşı disk olarak paslanmaz çelik kullanılması durumunda, PA-6+%20Mika ve PSU+%20CE kompozitlerin sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerleri azalırken PPS+30CE diske karşı çalışması durumunda ise sürtünme katsayısının pek değişmediği ancak aşınma oranı değerlerinin ise arttığı belirtilmiştir. Bu çalışma literatürde oldukça az karşılaşılan kaya yünü mineral elyafın PA-6 esaslı kompozit malzemenin özelliklerine etkisini belirlemek, geleneksel olarak kullanılan mika katkısı ile kıyaslamak ve endüstriyel uygulamalarda elektrik sektöründe kullanma amaçlı elektrik kontak kesicilerde kullanılabilirliğini belirlemektir. Ayrıca elektrik sektöründe birbiri üzerinde çalışan malzemelerden birisi yüksek sıcaklıklara dirençli, nem alma özelliği oldukça düşük, elektriksel yalıtkan ve kimyasallara direnç özellikleri ön plana çıkan kalsiyum karbonat katkılı ve cam elyaf takviyeli termoset esaslı poliyester kompozit malzemesidir. Bu malzeme bu tarz çalışmalarda vazgeçilmezdir. Bu amacı gerçekleştirmek için yapılan çalışmada aşınma ve sürtünme deneylerinde karşı disk malzeme olarak kalsiyum karbonat katkılı ve cam elyaf takviyeli termoset esaslı poliyester kompozit malzeme kullanılmıştır. Bu çalışma alanı oldukça spesifik olduğu için literatürde buna benzer bir çalışmaya rastlanılmamıştır.

Bu çalışmada, ağırlık olarak ayrı ayrı % 20 oranında kaya yünü mineral elyaf takviyeli poliamid-6 kompoziti ve mika katkılı poliamid-6 (PA-6) polimer kompozitlerinin üretimi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra üretilen kompozit malzemelerin kalsiyum karbonat katkılı ve cam elyaf takviyeli termoset esaslı poliyester kompozit disk yüzeyine karşı aşınma ve sürtünme davranışları incelenmiştir. Tribolojik deneyler kuru kayma şartlarında ve oda sıcaklığında disk üzerinde pim düzeneği bulunan bir aşınma cihazında gerçekleştirilmiştir. Tribolojik testler, 0.5 m/s kayma hızında 0.707, 1.415, 2.123 ve 3.538 MPa basınç altında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan deney şartlarında, % 20 kaya yünü mineral elyaf katkılı PA-6 kompoziti ile % 20 mika katkılı PA-6 kompozit malzemeleri elektrik kontak kesicilerde kullanabilmek için, vazgeçilmez özelliği olan termoset esaslı doymamış poliyester kompozit malzemesine karşı çalışacak en uygun poliamid-6 esaslı kompozit malzeme araştırılmıştır.

II. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada tribolojik deneylerde vazgeçilmez özelliği olan ağırlık olarak % 40 oranında kalsiyum karbonat ve % 25 oranında uzun cam elyaf takviyeli termoset polyester esaslı kompozit malzeme, karşı disk malzeme olarak kullanılmıştır. Karşı disk malzemeyi üretmek için Poliya Polyester, İstanbul firmasından doymamış polyester satın alınmıştır. 13 µm çaplı ve 12 mm boyundaki uzun cam elyaflar, Cam Elyaf Sanayi, İstanbul'dan, 10 µm partikül boyutlu kalsiyum karbonat dolgu maddesi ise Omya Madencilik firması, İstanbul'dan temin edilmiştir. Termoplastik esaslı ana matris polimer malzeme olarak Domamid H27 ticari kodlu orta akışkanlıkta poliamid-6 kullanılmış olup Domopolimer firmasından temin edilmiştir. Poliamid-6 polimerinin çekme mukavemeti 69 MPa, elastiklik modülü 2012 MPa ve darbe mukavemeti ise 17,5 kJ/m² dir. Elektriksel uygulamada kullanılacak olan kompozit malzemenin elektriksel yalıtkanlığını ve mukavemetini artırmak için ise mika katkı malzemesi kullanılmıştır. Mika katkı malzemesi, 2,84 g/cm³ yoğunluğunda ve 10 µm ortalama partikül boyutundadır. Micro Mica W ticari kodu ile Knarrevik firması Norveç'ten temin edilmiştir. Mika katkılı ve kaya yünü elyaf takviyeli PA-6 esaslı kompozit malzemeler ayrı ayrı NR-II tip ikiz vidalı bir ekstruderde homojen olarak karıştırılarak granül formunda üretilmiştir. Granül üretilirken ekstruder ısıtıcı sıcaklıkları besleme tarafından kalıba doğru 200-245 °C aralığında ayarlanmıştır. Ekstruderde üretilen granüller kullanılarak enjeksiyon makinasında çekme, darbe ve aşınma test numuneleri basılmıştır (Bakınız Şekil 1). Çekme test numuneleri ASTM D 637 standardına uygun olarak üretilmiş ve deneylerde Zwick Z020 model çekme test cihazı kullanılmıştır. Çekme deneyleri, 23±2 °C oda sıcaklığında, % 50±2 nem şartlarında 5 mm/dakika çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde numunelerin çekme mukavemeti, elastiklik modülü ve % gerinim değerleri tespit edilmiştir. Çekme deneylerinde elde edilen veriler kullanılarak kompozit malzemenin çekme mukavemet değerleri Eşitlik 1'de verilen formül kullanılarak hesaplanmıştır. Formülde F; uygulanan kuvvet (N), A ise numunenin ilk kesit alanı (mm²)'dir.

$$\sigma_{\max} = \frac{F}{A} \quad (1)$$

% gerinim ise Eşitlik 2'de verilen formülle hesaplanmış ve kısaca %e simgesi ile gösterilmektedir. Formüldeki L_k; numunenin koptuğu andaki son boyu (mm), L_o ise numunenin başlangıçtaki ölçü boyudur. (mm)

$$\%e = \left(\frac{L_k - L_o}{L_o} \right) \times 100 \quad (2)$$

Test numunelerin rijitliklerini belirlemek için elastiklik modülü değerleri tespit edilmiş ve Eşitlik 3'de verilen formül ile hesaplanmıştır. Bu formülde E; elastiklik modülü (N/mm²), σ; test numunesinin elastik bölgedeki herhangi bir andaki mukavemeti (N/mm²) ve e; elastik bölgede gerilmeye karşılık gelen birim şekil değiştirmedir.

$$E = \left(\frac{\sigma}{e} \right) \quad (3)$$

Darbe test numuneleri ise ASTM D256 standardına uygun olacak şekilde 4x10x80 mm³ boyutlarında enjeksiyonda basılmıştır (bakınız Şekil 1). Daha sonra numunelerin 10 mm olan kısmının ortasına 2 mm derinliğinde 45° açılı çentik açılmıştır. Darbe testleri için izod darbe testi yöntemi kullanılmıştır. Deneylerde numunelerin darbe enerjisi joule cinsinden belirlenmiş olup elde edilen değer, numunenin çentikten sonra kalan alanına bölünerek izod darbe mukavemeti değeri cihaz tarafından otomatik olarak belirlenmiştir. Sertlik deneyleri için ASTM D2240 standardı kullanılmış ve Shore D sertlik ölçümü gerçekleştirilmiştir. Deneylere başlamadan önce test numuneleri 23 °C oda sıcaklığında ve % 50 nem şartlarında 24 saat süre ile kondüsyonlanmıştır. Deneyde kullanılan pim numuneleri 6 mm çapında ve 50 mm uzunluğunda olacak şekilde basılmıştır (bakınız Şekil 1). Enjeksiyon makinesinde numuneleri basabilmek için makinenin enjeksiyon basıncı 1000 MPa, ısıtıcı sıcaklıkları 220-255 °C aralığında ve kalıp sıcaklığı ise 50 °C olarak ayarlanmıştır. Doymamış polyester esaslı termoset kompozitler, Sakarya'da Federal Elektrik firmasının desteği ile firma bünyesinde

üretimiştir. Polyester esaslı termoset kompozitler üretmek için önce doymamış polyester akışkanlığı sağlayıcı stiren ile 100:25 oranında karıştırılmıştır. Sonra çapraz bağlama ajanı olarak metil-etil-keton-peroksit (MEKP), geciktirici olarak BC500, stabilizatör olarak çinko sterat ve yoğunlaştırıcı olarak ise magnezyum oksit, viskozite azaltıcı ve renklendiricilerin tamamı 10 dakika süre ile karıştırıcıda karıştırılmıştır. Sonrasında elde edilen hamur karışımı Z-tipi bir karıştırıcıya alınıp kalsiyum karbonat ilave edilerek 30 dakika boyunca karıştırılmıştır. Daha sonrasında ise uzun cam elyaflar ilave edilerek 15 dakika karıştırılmıştır. Hazırlanan hamur karışımı, disk malzeme üretmeden önce 7 gün boyunca şartlandırılmıştır. Disk malzemeler 120 mm çaplı ve 10 mm kalınlığında olacak şekilde kalıpta 1500 MPa basınç altında, 150 °C sıcaklıkta 60 saniye boyunca kürlenmiştir.

Kompozit malzemelerin aşınma deneyleri, kuru ortam şartlarında, oda sıcaklığında ve Şekil 2’de şematik resmi verilen pim-disk aşınma cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her tribolojik test öncesi disk ve pim yüzeyleri asetonla temizlenip kurutulmuştur. Tablo 1’de bu çalışmada kullanılan malzemeler için çalışma ortam sıcaklığı, uygulanan basınç, kayma hızı ve yüzey pürüzlülüğü gibi test şartları verilmiştir. Her testten önce (m_1) ve sonra (m_2) pim ağırlıkları ölçülmüş ve ağırlık kaybı (Δm) tespit edilmiştir ve Eşitlik 4’de verilen formül ile spesifik aşınma oranları (K_o) hesaplanmıştır. Formülde, Δm ; aşınma deneyi önceki ve sonraki ağırlıklar arasındaki fark ($m_1 - m_2$) yani ağırlık kaybı (g), L; kayma mesafesi (m), ρ ; malzemenin yoğunluğu (g/cm^3) ve F; uygulanan yük (N)’ tür.

$$K_o = \frac{\Delta m}{L * \rho * F} \quad (4)$$

Tablo 1. Tribolojik test parametreleri

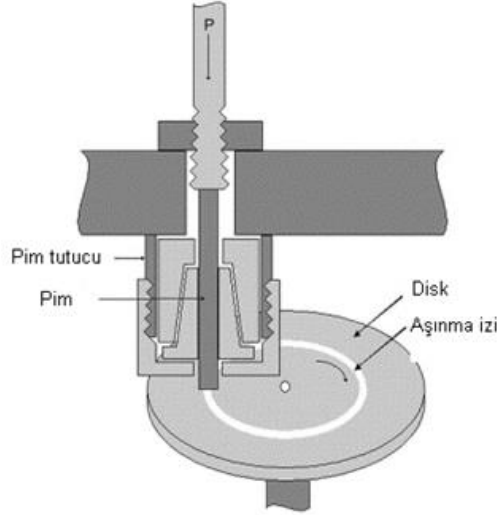
Parametreler	Değerler
Normal basınç (MPa)	0.707, 1.415, 2.123, 3.538
Hız (m/s)	0.50
Test sıcaklığı (°C)	22±2
Nem (%)	59±2
Kayma yolu (m)	1000
Yüzey pürüzlülüğü (Ra, μm)	0.75-0.90

Deneylerde kullanılan malzemelerin sürtünme katsayısı hesabı için bir elektrik motorunun tahriki ile dönen diskin üzerine deneylerde kullanılan disk malzemeler bir vida yardımıyla sabitlenmiştir. Kol üzerinde bulunan bir mekanizma ile 6 mm çapındaki polimer pim kola bağlanmıştır. Makine çalıştırıldığında, pim numunesinin diske sürtünmesiyle pim numunesinin bağlı olduğu kol aparatı da diskin dönme yönüne doğru hareket etmek istemektedir. Bu ileriye doğru olan hareket yanal kuvveti vermektedir. Bu yanal kuvvet ise bir yük hücresi ile ölçülmüştür. Alınan veriler aynı zamanda direk bilgisayarda Excel programında depolanmıştır. Deneylerde dakikada yaklaşık 1000 yanal yük verisi alınmış aynı zamanda deneylerde kullanılan yüke bölünerek Excel programında grafik haline getirilmiştir. Sürtünme katsayısı yanal kuvvetin, normal uygulanan kuvvete oranı olarak ifade edilir ve Eşitlik 5’deki formülle hesaplanır. Formülde, μ ; sürtünme katsayısını, F_s ; yanal sürtünme kuvvetini (N), F_n ise normal kuvveti (N) göstermektedir.



Şekil 1. Standartlara göre hazırlanan test numuneleri ve enjeksiyon kalıbı

$$\mu = \frac{F_s}{F_n} \quad (5)$$



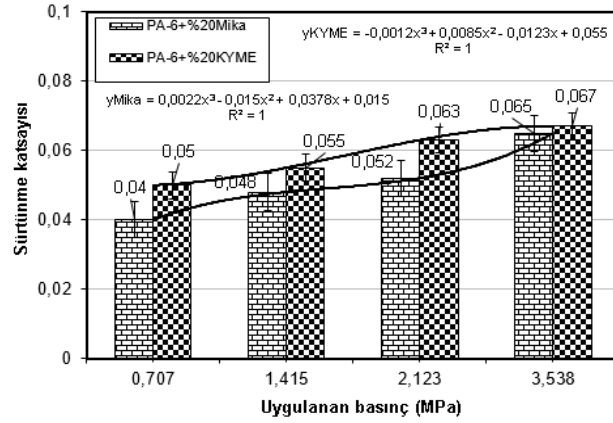
Şekil 2. Aşınma test cihazının şematik gösterimi

III. DENEYSEL SONUÇLAR

Tablo 2’de ağırlık olarak % 20 oranında mika ve kaya yünü mineral elyaf takviyeli PA-6 kompozitlerin fiziksel ve mekanik özellikleri verilmiştir. Tabloda görüldüğü gibi % 20 oranında mika ve % 20 oranında kaya yünü mineral elyaf takviyeli PA-6 kompozitlerin yoğunluk ve sertlik değerleri birbirlerine çok yakın olarak tespit edilmiştir. PA-6+%20Mika kompozitinin çekme mukavemeti yaklaşık 69,8 MPa olarak tespit edilirken PA-6+%20KYME polimer kompozitinin çekme mukavemeti ise 81,2 MPa olarak tespit edilmiştir. Katkısız poliamid-6 polimer matrisin çekme mukavemeti ile kıyaslandığında PA-6+%20Mika polimer kompozitinin çekme mukavemeti yaklaşık % 1,15, PA-6+%20KYME kompozitinin çekme mukavemeti ise % 17,68 oranında arttığı belirlenmiştir. PA-6+%20Mika kompozitinin elastiklik modülü 4113 MPa olarak tespit edilirken PA-6+%20KYME polimer kompozitinin elastiklik modülü ise 3540 MPa olarak tespit edilmiştir. Katkısız poliamid-6 polimer matrisin elastiklik modülü ile kıyaslandığında PA-6+%20Mika polimer kompozitinin elastiklik modülü yaklaşık % 104,4, PA-6+%20KYME kompozitinin elastiklik modülü ise % 75,96 oranında arttığı belirlenmiştir. PA-6 polimer ana matrisine ilave edilen her iki katkı çeşidi ile polimer kompozitlerin elastiklik modülü değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Elastiklik modülü değerlerindeki bu artışın sebebi poliamid-6 polimer ana matrisine ilave edilen mika ve kaya yünü mineral elyaf katkıların etkisi ile açıklanabilir. Bu iki katkı, polimer yapıyı oluşturan polimer zincirlerinin arasına girerek zincir hareketlerini sınırlamakta malzemenin esnekliğinin azaltılmasına ve kompozit yapının rijitliğinin artması sebep olmaktadır. Hatta elastiklik modülündeki artış He ve Jiang [28] tarafından ifade edilen bir teori ile açıklanabilir. Bu teori de partiküller arasındaki matris, gerilme konsantrasyonundan etkilenmektedir. Partiküller arasındaki mesafe ne kadar az ise polimer zincirlerinin hareketi azalacak ve bu bölgeler birleşerek rijitliği artmış bir ağ yapısı oluşturacaktır. Bu ise, kompozit malzemenin rijitliğinin artmasına sebep olmaktadır. Mika katkılı poliamid-6 kompozitinin darbe mukavemeti 8,1 kJ/m² olarak tespit edilirken kaya yünü mineral elyaf takviyeli poliamid-6 kompozitinin darbe mukavemeti ise 10,6 kJ/m² olarak tespit edilmiştir. Katkısız poliamid-6 polimerinin darbe mukavemeti ile kıyaslandığında PA-6+%20Mika polimer kompozitinin darbe mukavemeti yaklaşık % 53,7, PA-6+%20KYME kompozitinin elastiklik modülü ise % 39,4 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Her iki kompozitinin darbe mukavemetlerinin azalmasının sebebi, rijitliğinin artması dolayısıyla kompozit malzemelerin gevrekleşme eğiliminin olması ile açıklanabilir. Bu sonuçlar daha önce yapılan çalışmalarda [10-16, 19-21] da benzerlik göstermektedir. Elde edilen verilere göre PA-6+%20Mika kompozitinin darbe mukavemeti, kaya yünü elyaf takviyeli poliamid-6 kompozit malzemesinin darbe mukavemetine göre yaklaşık % 23,5 oranında daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 2. Mika ve kaya yünü mineral elyaf katkılı PA-6 kompozitlerin fiziksel ve mekanik özellikleri

Parametreler	Kompozit malzemeler	
	PA-6+ %20Mika	PA6+ %20KYME
Yoğunluk (g/cm ³)	1,26	1,27
Sertlik (Shore D)	77±1	76±1
Çekme mukavemeti (MPa)	69,8±0,45	81,2±0,5
Elastiklik modülü (MPa)	4113±108	3540±88
Gerinim (%)	6,54±0,28	19±0,37
Darbe mukavemeti (kJ/m ²)	8,1±0,3	10,6±0,5



Şekil 3. Uygulanan basınca bağlı olarak sürtünme katsayısındaki değişim

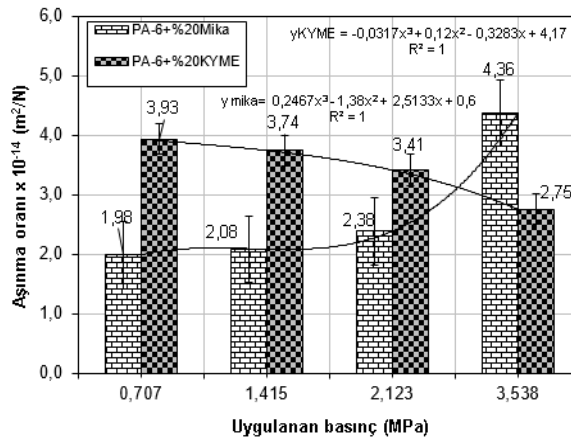
Şekil 3'te % 20 mika ve % 20 oranında kaya yünü mineral elyaf takviyeli PA-6 esaslı kompozitlerin termoset polyester kompozit disk malzeme yüzeyine karşı 0,5 m/s kayma hızında, uygulanan basınca bağlı olarak sürtünme katsayısı değerleri verilmiştir. Şekil 3 incelendiğinde, % 20 mika ve % 20 kaya yünü mineral elyaf takviyeli PA-6 esaslı kompozitlerin polyester esaslı termoset kompozit disk malzeme yüzeyine karşı çalışmaları durumundaki sürtünme katsayıları 0.04 ile 0.067 arasında değişmiştir. Bu değerlerin oldukça düşük olduğu gözlenmiştir. Bunun sebebinin ise pim ve disk malzemelerin karşılıklı olarak polimer esaslı olmasından kaynaklanmaktadır. Bu durum daha önce Unal ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada [4] da gözlenmiştir. Şekil 3 incelendiğinde, numunelere uygulanan basıncın artmasına bağlı olarak deneylerde kullanılan kompozitlerin sürtünme katsayısı değerlerinin arttığı belirlenmiştir. PA-6+%20Mika kompozit malzemesi için numuneye uygulanan basıncın 0,707 MPa'dan 3,538 MPa'a çıkarılması ile kompozitin sürtünme katsayısının yaklaşık olarak % 62,5 oranında arttığı belirlenmiştir. Şekil 3'de PA-6+%20Mika kompoziti için sürtünme katsayısı ile uygulanan basınç ilişkisini veren formül Eşitlik 6'daki gibidir.

$$\mu_{\text{mika}} = 0,015 + 0,0378P - 0,015P^2 + 0,022P^3 \quad (6)$$

Formülde μ_{mika} mika katkılı kompozitin sürtünme katsayısını, P ise uygulanan basıncı ifade etmektedir. $R^2=1$ olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde, yine Şekil 3'de PA-6+%20KYME kompoziti için de sürtünme katsayısı ile uygulanan basınç arasındaki ilişki verilmiş olup Eşitlik 7'deki denklem ile $R^2=1$ olarak belirlenmiştir. Formülde μ_{KYME} kaya yünü mineral katkılı kompozitin sürtünme katsayısını, P ise uygulanan basıncı ifade etmektedir.

$$\mu_{KYME}=0,055-0,0123P+0,0085P^2-0,012P^3 \quad (7)$$

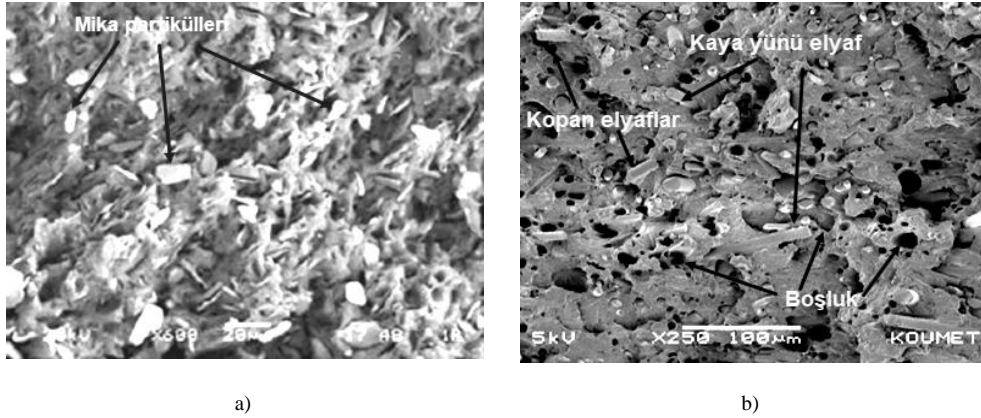
PA-6+%20KYME kompoziti için ise uygulanan basıncın 0,707 MPa'dan 3,538 MPa'a çıkarılması ile kompozit malzemenin sürtünme katsayısında yaklaşık olarak % 34 oranında artış tespit edilmiştir. Sürtünme katsayılarındaki artışın sebebi mika ve kaya yünü takviyeli poliamid-6 kompozitleri ile % 40 kalsiyum karbonat ve % 25 oranında uzun cam elyaf takviyeli doymamış polyester kompozit malzemelerin teması neticesidir. Literatürde yapılan triboloji çalışmalarının birisinde [9] düşük deney yükleri kullanıldığında disk ile pim malzeme yüzeylerinin temas noktaları arasındaki gerilimin daha düşük olduğu, bundan dolayı sürtünmenin sebep olduğu ısınsının da düşük olduğu ifade edilmiştir. Çalışmada uygulanan yükün ve kayma hızının artışına bağlı olarak temas eden malzemelerin sürtünme ısısının arttığı ve buna ilave olarak ta aşınma partiküllerinin karşı disk malzeme yüzeyine yapıştığı belirtilmiştir. You ve arkadaşları da [14] malzemeye uygulanan yükün artışına bağlı olarak malzemelerin sürtünme katsayısı değerlerinin arttığını tespit etmişlerdir. Bu artışın, malzemelerin temas noktalarındaki sürtünmeden kaynaklanan sıcaklık artışından olduğu belirtilmiştir. Buna ilaveten, uygulanan yüksek yükler, sürtünen yüzeylerin sıcaklığının artmasına, numune yüzeylerinin yoğunlaşmasına ve viskoz akışın meydana gelmesine sebep olmaktadır. Ayrıca, uygulanan yükün artırılması ile polimer kompozit malzeme ve karşı disk malzeme arasında gerçek temas alanının arttığı ve dolayısıyla adhezif yapışma ve karşı diske matris transferinin arttığı belirtilmiştir. Kaya yünü mineral elyafa göre mika katkılı PA-6 kompozitlerinin azalan sürtünme katsayısı, mikanın tabakalı yapıya sahip olması ile ilgili olabilir. Bu tabakalar, birbiri üzerinde kaymaya izin veren zayıf kuvvetler ile birbirine bağlıdır ve bir kesme kuvveti uygulandığında yağlayıcılık özelliği gösterirler. Ayrıca, PA-6 polimerine ilave edilen mika katkısı kompozitin dayanımını artırmıştır. Bu artış daha önce yapılan çalışmalarla [18,21] da benzerlik göstermektedir. PA-6 kompozitinde sert faz olarak görev yapan mika, PA-6 ve karşı disk arasındaki etkileşimi belirgin bir şekilde azaltmanın yanında yük transferini destekleyerek aşınma özelliklerinin gelişmesinde önemli rol oynamıştır. Elyaf katkılı kompozitlerin tribolojik özellikleri ise elyaf ve matris arasındaki kuvvetli adhezyona bağlıdır. Ancak, en büyük problem, elyaf ve matris arasında kırılmanın meydana gelmesidir ve bu durum aşınma mekanizmasını, malzemenin mekanik özelliklerine göre kırılmaya daha bağımlı hale getirmektedir [29]. Şekil 5'te PA-6 polimerinden kopan ve kırılan kaya yünü mineral elyaflar görülmektedir. Unal ve arkadaşları [30] kayma süresince temas alanında, polimer matristen daha sert olan kopmuş fiberlerin aşındırıcı malzeme gibi davranıp malzemenin aşınma direnç özelliklerini kötüleştirdiğini belirtmiştir. Kompozitlerin aşınma oranını etkileyen en önemli faktörlerden bir tanesi uygulanan yük veya basınçtır. Artan yük veya basınç ile adhezif aşınma mekanizması baskın hale gelmektedir [8].



Şekil 4. Uygulanan basınca bağlı olarak aşınma oranındaki değişim

Şekil 4'te ise uygulanan basınca bağlı olarak PA-6+%20Mika ve PA-6+%20KYME kompozitlerin aşınma oranı değerlerinin değişimi verilmiştir. Genel olarak, PA-6+%20Mika ve PA-6+%20KYME kompozitleri için aşınma oranı değerleri yaklaşık olarak 10⁻¹⁴ m²/N mertebesinde elde edilmiştir. En düşük aşınma oranı 0,707 MPa basınç altında, 1,98x10⁻¹⁴ m²/N değeri ile PA-6+%20Mika kompozit numunesinde elde edilirken en yüksek aşınma oranı ise 3,538 MPa basınç altında, 4,36x10⁻¹⁴ m²/N değeri ile yine aynı kompozit malzemede elde

edilmiştir. Grafik incelendiğinde, uygulanan basınç artışına bağlı olarak PA-6+%20Mika kompozitinin aşınma oranı artarken, PA-6+%20KYME kompozitinin aşınma oranı ise azalmıştır. PA-6+%20Mika kompoziti için basıncın 0,707 MPa'dan 3,538 MPa değerine artırılması ile yani basıncın % 400 oranında artırılması ile kompozitin aşınma oranının yaklaşık olarak % 120 oranında arttığı belirlenmiştir. Yani aşınma direncinin mika katkısı ile arttığı belirlenmiştir. Benzer bir sonuç Gan ve arkadaşları [22] tarafından daha önce yapılan bir çalışmada da elde edilmiştir. PA-6+%20KYME kompoziti için ise basıncın yaklaşık %400 oranında artırılması ile aşınma oranı % 43 oranında azalmıştır. Yani kaya yünü mineral elyaf ilavesi de kompozitin aşınma direncini artırmıştır. Aşınma direncindeki artış, elyafın ilave edilmesi ile kompozitin artan mekanik özelliklerine ve kompozitin deformasyonunun engellenmesine bağlıdır [31]. Jawali ve arkadaşları da [15] yüksek elastiklik modülüne sahip cam elyaf mukavemet artırıcı katkının, poliamid-6 polimerine ilave edilmesi ile aşınma direncinin arttığı aynı zamanda kompozitin ölçü kararlılığının da arttığını belirtmiştir. Kumar ve arkadaşları da [9] polimer malzemesine kuvvetli bir şekilde bağlanan yüzey modifiyeli katkının, polimer matrisinden katkı elemanına yük transferini sağladığı için karşı diskin kuvvetli deformasyonunu engellediğini belirtmişlerdir. Çalışmada kullanılan mika ve kaya yünü mineral elyaf katkıların kompozit malzemelerin aşınma oranına etkisi incelendiğinde ise 3,58 MPa basınca kadar mika katkılı PA-6 polimer kompozitin aşınma oranının, kaya yünü mineral elyaf takviyeli kompozitin aşınma oranına göre daha düşük olduğu belirlenmiştir. 1,145 MPa basınç altındaki çalışma şartlarında, aşınma oranındaki fark yaklaşık olarak % 45 oranında elde edilmiştir. Rijit partikül ve deforme olabilen polimer içeren polimer kompozit sistemlerinde her iki bileşende sürtünme süresince etkileşim halindedir. Belirli bir sitemde, sürtünme katsayısı ve aşınma oranının malzemenin artan elastiklik modülü ile azalan gerçek temas alanı ile ilişkili olduğu bilinmektedir [32]. Diğer bir ifade ile polimer kompozitlerin yüksek elastiklik modülüne sahip olması sürtünme katsayısı ve aşınma oranının azalmasına sebep olmaktadır. Bu yüzden, çekme deneyi sonucunda da görüldüğü gibi yüksek elastiklik modülüne sahip mika katkılı PA-6 kompozitlerin sürtünme katsayısı ve aşınma oranı daha düşük elde edilmiştir. Benzer bir açıklama, Gan ve arkadaşları [22] tarafından yapılan mika katkılı poli-akril-eter-keton (PAEK) kompozitleri için yapılmış ve çalışma sonucunda aşınma ve sürtünmenin gerçekleştiği endüstriyel uygulamalarda mika katkılı polimer esaslı kompozitlerin kullanılabilirliği belirtilmiştir.



Şekil 5. Deneylerde kullanılan kompozit malzemelerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) kırık yüzey görüntüleri a) Mika takviyeli PA-6 kompozit b) Kaya yünü elyaf takviyeli PA-6 kompozit

Şekil 5'te çekme testi sonrası kompozitlerin kırık yüzeylerinden alınmış taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri verilmiştir. Şekil 5-a'da görüldüğü gibi yüzey modifikasyonlu mika katkısının kaya yünü mineral elyafli kompozite göre PA-6 polimer ana matrisi ile iyi bir bağ yaptığı gözlenmiştir. PA-6 polimer ana matrisi ile mika arasındaki arayüzey etkileşimi nedeniyle oluşan kuvvetli bağlanma kompozit malzemenin gerek sürtünme katsayısı gerekse aşınma oranının gelişmesine katkı sağlamıştır. Şekil 5-b'de ise kaya yünü mineral elyaf katkılı PA-6 kompozitine ait kopma yüzeyi taramalı elektron mikroyapı görüntüsü verilmiştir. Kaya yünü mineral elyafın farklı yönlerde olacak şekilde matris bünyesinde dağıldığı görülmektedir. Bununla birlikte,

matristen elyafların sıyrıldığı ve kırıldığı da gözlenmiştir. Bunun sebebinin ise kaya yünü mineral elyafın yüzey modifikasyonunun olmayışdır. Bu durum, kompozitin tribolojik özelliklerinin kötüleşmesine de sebep olmuştur.

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada ağırlık olarak % 20 oranında kaya yünü mineral elyaf ve mika takviyeli poliamid 6 (PA-6) polimer kompozitlerinin termoset polyester kompozit disk yüzeyine karşı kuru kayma çalışma ortamındaki aşınma ve sürtünme davranışları incelenmiştir. Çalışma sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

1. Artan uygulama basıncına bağlı olarak sürtünme katsayısı artmıştır.
2. Mika katkısının sürtünme katsayısını kaya yünü mineral elyafa göre daha fazla düşürdüğü belirlenmiştir.
3. Artan basınca bağlı olarak PA-6+%20Mika kompoziti için aşınma oranı artarken, PA-6+%20KYME kompoziti için aşınma oranı azalmıştır.
4. En düşük aşınma oranı 0,7MPa basınç altında, 1.98×10^{-14} m²/Nm değeri ile PA-6+%20Mika kompozit numunesinde elde edilmiştir.
5. Gerçekleştirilen deney şartlarında elde edilen veriler ışığında uygulanan basıncın düşük olması (2,123 MPa' a kadar), mika katkılı poliamid-6 kompozit malzemesi, kaya yünü katkılı poliamid-6 kompozit malzemesine göre yaklaşık olarak % 42 oranında daha az aşındığı tespit edilmiştir.
6. Sonuç olarak, % 20 KYME katkılı PA-6 kompozitine göre daha yüksek mekanik özelliklere sahip olan, ortalama sürtünme katsayısı 0.05 ve ortalama aşınma oranı 2.7×10^{-14} m²/Nm olan % 20 Mika katkılı PA-6 kompoziti, elektriksel uygulamalarda % 40 kalsiyum karbonat ve % 25 oranında uzun cam elyaf takviyeli doymamış polyester kompozit malzemesi ile elektrik kontak kesicilerde kullanılabilir en uygun malzeme çifti olarak belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Ana, H., Susana, L., Davim, J. P. (2018). Influence of sliding velocity on the tribological behaviour of PA66GF30 and PA66 + MoS₂: an analysis of morphology of sliding surface by digital image processing. *Polymer Bulletin*, 75, 5113-5131.
- [2] Pooria, K., Akbar, S. (2017). Improvement of dry sliding tribological properties of polyamide 6 using diamond nanoparticles. *Tribology International*, 115, 370-377.
- [3] Raja, V. L., Kumaravel, A. (2014). Comparative Study on the Wear Properties of Fly Ash and Silica Fume Filled Nylon Composites. *Applied Mechanics and Materials*, 592-594, 1277-1284.
- [4] Unal, H., Saylan, T., Mimaroglu, A. (2014). Thermal, mechanical and tribological performance of polymer composites rubbed against polymer composites in application in electrical contact breakers. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 228(6), 608-615.
- [5] Suryasarathi, B., Mahanwar, P. A. (2004). Effect of Particle Size of Filler on Properties of Nylon-6. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, 3(1), 23-31.
- [6] Kumar, S. S., Kanagaraj, G. (2016). Investigation on mechanical performances of PA-6 and Al₂O₃ reinforced PA-6 polymer composites. *International Journal of Advanced Engineering Technology*, VII(I), 69-74.
- [7] Kulkarni, M. V., Elangovan, K., HemachandraReddy, K., Poojari, M., Harsha, S. (2015). Tribological Behaviours of CaSiO₃ Reinforced PA6 Polymer–Metal Sliding Combinations under Dry Friction Conditions. *Advanced Materials Manufacturing & Characterization*, 5(1), 18-23.

- [8] Kumar, S. S., Kanagaraj, G. (2016). Investigation of Characterization and Mechanical Performances of Al₂O₃ and SiC Reinforced PA-6 Hybrid Composites. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 26, 788-798.
- [9] Kumar, S. S., Kanagaraj, G. (2016). Investigation on Mechanical and Tribological Behaviours of PA6 and Graphite-Reinforced PA6 Polymer Composites. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41, 4347-4357.
- [10] Kim, J., Jang, H., Kim, J. (2014). Friction and wear of monolithic and glass-fiber reinforced PA66 in humid conditions. *Wear*, 309, 82-88.
- [11] Shelke, S. D., Pawar, D. S. (2017). Tribological Behaviour of Polyamide 66 Blend with CF & PTFE. *International Journal for Scientific Research & Development*, 5(5), 237-242.
- [12] Orhan, S. A., Shaker, S. H., Ahmed, N. Al-K. (2020). Investigation of Wear Behaviour for Novel Polyamide 66 Composites under Dry Sliding Conditions. *International Journal of Nano-electronics and Materials*, 13(1), 9-18.
- [13] Ayesha, A., Islam, M. A. (2015). Wear Behaviours of Micron Size Graphite Particle Reinforced Nylon Composite. International Conference on Mechanical, Industrial and Materials Engineering 2015 (ICMIME2015), 11-13 December, 2015, RUET, Rajshahi, Bangladesh, 1-6.
- [14] Yi-Lan, Y., Du-Xin, L., Gao-Jie, S., Ruo-Yun, L., Xin, D. (2016). Improvement in the tribological properties of polyamide 6: Talc, glass fiber, graphite, and ultrahigh-molecular-weight polyethylene. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 29(4), 494-507.
- [15] Jawali, N. D., Siddeswarappa, B., Siddaramaiah. (2006). Physico-mechanical Properties, Machinability, and Morphological Behaviour of Short Glass Fiber-reinforced Nylon 6 Composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 25(13), 1409-1418.
- [16] Nuruzzaman, D. M., Asif Iqbal, A. K. M., Oumer, A. N., Ismail, N. M., Basri, S. (2016). Experimental investigation on the mechanical properties of glass fiber reinforced nylon. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 114, 1-7.
- [17] Yi-Lan, Y., Du-Xin, L., Gao-Jie, S., Ruo-Yun, L., Xin, D. (2016). Improvement in the tribological properties of polyamide 6: Talc, glass fiber, graphite, and ultrahigh-molecular-weight polyethylene. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 29(4), 494-507.
- [18] Unal, H., Mimaroglu, A. (2014). Evaluation of morphological characteristics and mechanical performance of Rock-force mineral fiber- and glass fiber-reinforced polyamide-6 composites. *Science and Engineering of Composite Materials*, 21(3), 323-328.
- [19] Fahmi, A., Jawaid, M., Hassan, A., Wahit, M. U. (2013). Mechanical Properties of Mica-Filled Polycarbonate/Poly(Acrylonitrile-Butadiene-Styrene) Composites, *Polymer-Plastics Technology and Engineering*. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 52, 727-736.
- [20] Lubomir, L., David, M., Barbora, L., Martin, V., Michal, S., Klara, C., Jakub, V., Kristian, E. W., Richard, W. G., Neil, A. R. (2018). Effect of filler particle shape on plastic-elastic mechanical behaviour of high density poly (ethylene)/mica and poly (ethylene)/wollastonite composites. *Composites Part B*, 141, 92-99.
- [21] Unal, H., Mimaroglu, A. (2012). Mechanical and Morphological Properties of Mica and Short Glass Fiber Reinforced Polyamide 6 Composites. *International Journal of Polymeric Materials*, 61, 834-846.

- [22] Gan, D., Lu, S., Caisheng, S., Zhijian, W. (2001). Mechanical properties and frictional behaviour of a mica-filled poly (aryl ether ketone) composites. *European Polymer Journal*, 37, 1359-1365.
- [23] Aljaž, P., Alja, K., Mitjan, K. (2017). Tribological properties of polyamide (PA6) in self-mated contacts and against steel as a stationary and moving body. *Wear*, 378–379, 17-26.
- [24] Said, D., S. Larbi, Ali, B. (2016). Study of the Tribological Behaviour of a Pin on Disc Type of Contact. World Academy of Science, Engineering and Technology International *Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, 10(7), 1626-1231.
- [25] Krol, A., Gocman, K. (2017). The Comparative Study of Polymers For Sliding Pairs With UNMT (Universal Nano/Micro Tester). *Tribologia-Finnish Journal of Tribology*, 1-2, 35, 31-39.
- [26] Abdessalem, K., Khaled, E. (2017). Tribological Behaviour of Wheel-Rail Contact under Different Contaminants Using Pin-On-Disk Methodology. *Journal of Tribology*, 139(1), 1-9.
- [27] Demir, Z. (2013). Tribological performance of polymer composites used in electrical engineering applications. *Bulletin of Materials Science*, 36(2), 341-344.
- [28] He, D., Jiang, B. (1993). The elastic modulus of filled composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 49(4), 617-621.
- [29] Kukureka, S.N., Hooke, C.J., Rao, M., Liao, P., Chen, Y.K. (1999). Effect of fibre reinforcement on the friction and wear of polyamide 66 under dry rolling-sliding contact. *Tribology International*, 32, 107–116.
- [30] Unal, H., Sen, U., Mimaroglu, A. (2005). Abrasive wear behaviour of polymeric materials. *Materials & Design*, 26, 705–710.
- [31] Li, D. X., Xie, Y., Li, W. J. (2013). Tribological and mechanical behaviors of polyamide 6/glass fiber composite filled with various solid lubricants. *The Scientific World Journal*, 2013(5), 1-9.
- [32] Bowden, F.P., Tabor, D.T. (1964). Friction and lubrication of solid: Part 2. *Oxford: Clarendon Pres*, 1.