

Poliamit 6/Mika kompozitlerin mekanik ve tribolojik performansına mika katkı oranının etkisi

The effect of mica filler content on the mechanical and tribological performance of Polyamide-6/Mica composites

Hüseyin ÜNAL^{*1} , Salih Hakan YETGİN² , Veysel Furkan ÜNAL³ 

¹Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya

²Tarsus Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Tarsus/Mersin

³Johannes Kepler University, Faculty of Engineering, Department of Polymer Engineering, Linz, AUSTRIA

• Geliş tarihi / Received: 14.03.2023

• Kabul tarihi / Accepted: 05.07.2024

Öz

Elektrik endüstrisinde çalışan bazı parçalardan elektriksel yalıtkanlık, mekanik performans ve aşınma direnci özellikleri beklenildiği için gerekli performansı sağlayabilecek, ağırlıkça %10, 20 ve 30 oranlarında mika katkılı PA6 (PA6-M) kompozitleri üretilmiştir. PA6-M kompozitleri önce çift vidalı olarak tasarlanan bir compound makinesinde granül formda üretilmiştir. Sonrasında ise enjeksiyonla kalıplama yöntemi kullanılarak mekanik ve tribolojik test numuneleri basılmıştır. Üretilen kompozit test numunelerinin mekanik ve tribolojik performansları incelenmiştir. Mekanik özelliklerin belirlenmesi için çekme, çentikli izod darbe ve sertlik testleri yapılmıştır. Triboloji deneyleri pim-disk aşınma test cihazında, kuru şartlar altında ve ortam sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Triboloji deneyleri 0,6 m/s hızda ve üç farklı yükte (60N, 120N ve 180N) gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda, PA6 polimer ana matrisine mika ilavesi ile üretilen kompozit malzemelerin çekme dayanımı, elastiklik modülü ve sertlikte artış göstermiştir. Buna ilaveten darbe mukavemeti, aşınma oranı ve sürtünme katsayısı değerleri ise azalmıştır. Ayrıca, triboloji deneylerinde çalışılan tüm malzemelerin sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerleri yükün artırılması ile birlikte azalmıştır.

Anahtar kelimeler: Aşınma, Mekanik özellikler, Mika, PA6, Sürtünme

Abstract

Since electrical insulation, mechanical performance and wear resistance properties are expected from some parts working in the electrical industry, PA6 (PA6-M) composites filled with 10, 20 and 30 wt% mica have been produced to provide the required performances. PA6-M composites were first produced in granule form in a compounding machine designed as twin screw. Afterwards, mechanical and tribological test specimens were molded using injection moulding method. The mechanical and tribological performances of the composite test specimens were investigated. Tensile, notched Izod impact and hardness tests were performed to determine mechanical properties. Tribological tests were carried out in a pin-disc wear test rig under dry conditions and at ambient temperature. Tribological tests were carried out at a speed of 0.6 m/s and three different loads (60 N, 120 N and 180 N). As a result of the experiments, the tensile strength, modulus of elasticity and hardness of the composite materials produced with the addition of mica filler to the PA6 polymer base matrix increased. In addition, impact strength, wear rate and coefficient of friction values decreased. Moreover, friction coefficient and wear rate values of all materials studied in tribological experiments decreased with increasing load.

Keywords: Friction, Mechanical properties, Mica, PA6, Wear

*Hüseyin ÜNAL; unal@sakarya.edu.tr

1. Giriş

1. Introduction

Son yıllarda endüstrinin birçok alanında geleneksel malzemelerin yerini polimer malzemeler tercih edilmektedir. Özellikle mühendislik plastikleri sınıfında yer alan PA polimeri, mükemmel mekanik özellik, yüksek aşınma direnci, kendinden yağlamalı özelliğe sahip olması ve sessiz çalışması gibi özellikleri nedeniyle otomotiv, elektrik, elektronik, paketleme, tekstil ve makine sektörü uygulamaları gibi farklı sektörlerde yaygın kullanım alanı bulmaktadır. Ancak, çatlak hassasiyeti, düşük ısıl sapma sıcaklığı, yüksek nem alma özelliği, ölçüsel kararsızlık ve pahalı olması kullanım alanını sınırlamaktadır. Bazı araştırmacılar, cam elyaf, karbon elyaf, aramit elyaf gibi mukavemet artırıcı katkılarla ya da cam bilya, kaolin, vollastonit, mika, talk gibi inorganik dolgu/katkı maddeleri kullanarak elde ettikleri PA6 esaslı kompozitler ile bu zayıf özellikleri geliştirmeye çalışmışlardır (Bose vd., 2006; Subburamamurthy vd., 2020; Kodal vd., 2015; Ünal vd., 2023).

Mika, farklı kimyasal ve fiziksel özelliklerde tabakalı yapıya sahip alüminasilikat mineralidir. Muskovit ve flogopit, en yaygın ve ticari olarak temin edilebilen mika türleridir. Tabakalar arasındaki bağlar talk mineralinden daha güçlüdür. Yapısında, alüminyum, potasyum, magnezyum, demir, sodyum, flor ve lityum gibi elementler de mevcuttur. Su, asitler (hidroflorik ve konsantre sülfürik asit hariç), alkaliler, geleneksel çözücüler, yağlar ile reaksiyona girmek için tamamen inert ve kararlıdır, ayrıca atmosfer şartlarından neredeyse etkilenmez. Mika, yüksek dielektrik mukavemeti, uniform dielektrik sabiti ve kapasite mukavemeti kombinasyonunun tek örneğidir. Yüksek elektrik direncine, düşük sıcaklık katsayısına ve kapasitansa sahiptir. Mika cinsine göre 600 °C ile 900 °C arasında sıcaklık direncine sahiptir. Düşük ısı iletkenliğine ve süper termal kararlılığa sahiptir (Bose vd., 2006; Alghamdi, 2019; Deshmukh vd., 2011; Merve vd., 2021; Sahai & Pawar, 2017; Asyadi vd., 2013; Verbeek & Christopher, 2012; Altay vd., 2021). Mika, 172 GN/m² gibi yüksek elastiklik modülüne sahiptir (Deshmukh vd., 2011). Ayrıca mika, cam ve karbon elyaflara göre polimer ana matrisine ilave edildiğinde daha düşük maliyetli kompozitler elde edilmektedir. Geçmişten günümüze kadar mika katkılı polimer kompozitlerin gerek mekanik özellikleri gerekse termal ve tribolojik özellikleri üzerine literatürde bazı çalışmaların yapıldığı gözlenmiştir (Lichao vd., 2016; Asyadi vd., 2013; Sahai & Pawar, 2017; Altay vd., 2021). Asyadi vd. (2013) %70 polikarbonat (PC)/%30 Akrilo-nitril-bütadien-stiren (ABS) karışımına ilave ettikleri %10, 20 ve 30 oranlarında işlem görmüş (silan'lı) ve işlem görmemiş mika katkısının mekanik özelliklere etkilerini incelemişlerdir. PC/ABS karışımına ilave edilen mika ile birlikte kompozitlerin çekme dayanımı, kopma uzaması ve darbe dayanımı azalmıştır. İşlem görmüş mika ile PC/ABS kompozitlerin çekme dayanımı, kopma uzaması, eğilme dayanımı ve darbe özellikleri artmıştır. Tomar ve Maiti (2010) hacimsel olarak 0.14'e kadar mika katkılı poli-bütillen-tereftalat (PBT)/poli-akrilonitril-bütillen-akrilat-stiren (ABAS) kompozitlerinin çekme ve darbe özelliklerini incelemişlerdir. Mika katkısı ile birlikte kompozitlerin çekmedeki elastiklik modülü ve çekme dayanımının arttığı kopma uzamasının ise azaldığı belirtilmiştir. Matrisin plastik deformasyonunun engellenmesi ve matrisin rijitliğinin artması sebebi ile mika miktarına bağlı olarak darbe dayanımının azaldığı belirtilmiştir. Sahai ve Pawar (2017) ağırlıkça % 5, 10, 15, 20, 25 oranlarında işlem görmüş ve işlem görmemiş mika katkılı poli-fenilen-oksit (PPO) polimer kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda, polimer kompozitlerin ergime akış indeksi, darbe dayanımı, çekme dayanımı ve kopma uzaması değerlerinde azalma görülürken eğilme dayanımı ve eğmedeki elastiklik modülünün arttığı belirtilmiştir. İşlem görmüş mika katkılı kompozitlerde mikanın dağılımının homojen olduğu, matris-katkı yapışmasının daha iyi olduğu ve sonuçta mekanik özelliklerin iyileştiği belirtilmiştir. Deshmukh vd. (2011) farklı partikül boyutu, yüzey alanı ve oranlarındaki mika katkılı poli-vinil-klorür (PVC) esaslı kompozit malzemelerin elektriksel ve mekanik performanslarını araştırmışlardır. Artan mika katkı oranı ile kompozit malzemelerin elastiklik modülü ve sertliği artarken çekme dayanımı ve kopmadaki % uzama değeri azalmıştır. Dielektrik özellikleri de artan mika katkı oranı ile artmıştır. Mekanik ve dielektrik özellikler, silan ile işlem görmüş mika katkılı PVC kompozitlerinde daha yüksek elde edilmiştir. Altay vd. (2021) %40 talk, mika, kalsit ve feldspar katkılı polipropilen (PP) kompozitlerin reolojik ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Talk ve mika katkılı PP kompozitlerin eğilme dayanımı artarken talk katkılı kompozitlerin reolojik özellikleri kalsiyum karbonat katkılı kompozitlerden daha fazla etkilenmiştir. Mineral katkılı PP kompozitlerin vicat yumuşama sıcaklığının arttığı belirtilmiştir. Talk katkılı PP kompoziti hariç diğer kompozitlerde termal genleşme katsayısının azaldığı belirtilmiştir. Kalsit, mika veya feldspar katkılı PP kompozitlerin daha yüksek darbe dayanımı göstermesi sebebiyle otomotiv sektöründe talk katkılı PP kompozitlere alternatif olabileceği belirtilmiştir. Alghamdi (2019) %5, 10, 20 ve 30 oranında mika ilaveli ABS kompozitlerin termal ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. %30 mika katkılı kompozitlerin eğmedeki elastiklik modülü, çekmedeki elastiklik modülü ve eğilme dayanımı sırasıyla %130, %55 ve %28 oranlarında artmıştır. Kopma uzaması %77 oranında, darbe dayanımı ise %75 oranında azalmıştır. Artan mika katkı oranı

camsı geçiş sıcaklığını pek etkilememiştir. [Merve vd. \(2021\)](#) %2, 4, 6, 8, 15, 30 oranlarında mika katkılı alev geciktiricili polipropilen (PP) kompozitlerin mekanik ve termal özelliklerini incelemişlerdir. Mika ilavesi ile çekmedeki elastiklik modülü artarken çekme dayanımı azalmıştır. Mika miktarına bağlı olarak termal kararlılığın arttığı alev geciktirici katkı olmadan ise mikanın termal özellikler üzerine pek etkisi olmadığı belirtilmiştir. [Farzaneh ve Tcharkhtchi \(2011\)](#) ekstrüzyon ve enjeksiyon kalıplama yöntemleri ile ürettikleri %40 oranında mika katkılı PP polimer kompozitlerin viskoelastik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, mika katkılı PP kompozitlerin depolama ve kayıp modüllerinin arttığı ancak camsı geçiş sıcaklığının değişmediği belirtilmiştir. [Subburamamurthy vd. \(2020\)](#) %5-10-15-20 oranlarında talk, kaolin, mika ve kalsiyum karbonat (CaCO₃) katkılı PA6 kompozitlerin özelliklerini inceledikleri çalışmada, mineral esaslı katkıları ile birlikte çekme dayanımının ve rijitliğin arttığı belirtilmiştir. %15 oranında talk katkı içeriğinde ve bu malzemeyi takiben %15 kaolin ve %20 mika içeriklerinde mekanik özelliklerin önemli oranda iyileştiği belirtilmiştir. [Akçakale ve Bülbül \(2017\)](#) hacimsel olarak %11, 22 ve 33 oranlarında vollastonit ve mika katkılı doğal kauçuk (NR)/stiren-bütadien-kauçuğu (SBR) karışımının mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, vollastonit ve mika katkıları ile birlikte kopma uzaması, çekme dayanımı, yorulma direnci ve birim maliyet azalırken sertlik, yoğunluk ve abrasif kayıplar artmıştır. [Bose ve Mahanwar \(2004\)](#) farklı oranlarda (ağırlıkça % 5-40) ve farklı partikül boyutlarında mika mineral katkısı kullanarak kompozit üretmişlerdir. Ürettikleri kompozitlerin termal, elektriksel ve mekanik, özelliklerini incelemişlerdir. Kompozit bünyesindeki mika katkı oranının artmasına bağlı olarak kompozitlerin çekme mukavemeti, çekme modülü, eğme mukavemeti, eğme modülü değerlerinin arttığı gözlenmiştir. Ancak kompozitlerin % uzama ve darbe mukavemetinin ise düştüğü belirlenmiştir. Ayrıca, mika partikül boyutuna bağlı olarak kompozitin mekanik, termal ve elektriksel özelliklerinin arttığını belirtmişlerdir. [Bose vd. \(2006\)](#) yaptıkları diğer bir çalışmada modifiyesiz (%5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40), titanate (anyonun hem titanyum hem de oksijen içerdiği bir tuz) ve silan modifiyeli (%25) mika katkılı PA6 kompozitlerin mekanik, termal ve dielektrik performanslarını araştırmışlardır. Çalışmaları neticesinde, %25 mika katkısı ile kompozitin eğilme dayanımı ve eğmedeki elastiklik modülü değerleri artarken çekme ve darbe dayanımı değişmemiştir. Titanate modifiyeli kompozitlerin çekme dayanımı ve elastiklik modülü değerleri artarken silan modifiyeli kompozitlerin darbe özellikleri ve ısıl sapma sıcaklıkları (HDT) artmıştır. Bağlayıcı ajan miktarı ile kopma uzaması ve dielektrik dayanım değerleri azalmıştır. [Gan vd. \(2001\)](#) ağırlıkça katkılı poli-aril-eter-eton (PAEK) kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmalarında farklı oranlarda (% 0-40) mika inorganik katkı kullanmışlardır. PAEK/mika kompozitindeki mika katkı oranının artırılması ile PAEK/mika kompozitinin çekme mukavemetinin ve çekme modülünün arttığı ancak kopma uzamasının azaldığı belirlenmiştir. Yapılan çalışmada farklı proses şartları da incelenmiştir. Bu proses şartlarından birisi de uygulanan yük türüdür. Yükün değişimi aşınma deneylerinde farklı sonuçlara neden olmaktadır. Yapılan çalışmada PAEK/mika kompozitlerin sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerlerinin yükün artırılması ile arttığı gözlenmiştir. 50 N yükte sürtünme katsayısı ile aşınma oranının pek değişmediği gözlenmiştir. Ancak yükün 100N veya 200 N' a çıkarılması durumunda %20 mika katkılı PAEK kompozitine kadar sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerlerinin azaldığını gözlenmiştir. % 30 ve %40 oranında mika katkılı PAEK kompozitlerin hem sürtünme katsayısı hem de aşınma oranı değerleri artmıştır. PAEK/mika kompozitindeki mika katkı oranı kompozit malzemenin rijitliğini artırmıştır. Bunun sonucunda ise mika katkılı PAEK kompozitlerin sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerlerinin azaldığını belirlemişlerdir. [Unal vd. \(2014\)](#) %10, %20 ve %30 oranında mika ilaveli PA6 polimer kompozitlerin tribolojik performanslarını araştırmışlardır. Triboloji deneylerinde pim-disk aşınma cihazı kullanmışlardır. %30 mika ilaveli PA6 kompoziti ve %30 cam elyaf takviyeli PA6 polimer esaslı kompozit malzemeleri disk olarak kullanılmıştır. Yapılan çalışmada hem karşı disk malzemenin hem de mika katkı oranının etkisi incelenmiştir. Deneylerde aşınma yükleri 20N, 30N ve 40N olarak seçilmiştir. Hız 0.5 m/s kayma yolu ise 1500 m olarak belirlenmiştir. Çalışmaları sonucunda her iki kompozit karşı disk malzemelere karşı yapılan deneylerde PA6 polimeri bünyesindeki mika oranının artması ile sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Buna ilaveten aşınma deneylerinde yükün artırılması ile PA6/mika kompozitlerin sürtünme ve aşınma değerlerinin de arttığı belirlenmiştir. [Demir \(2013\)](#) ise mika ilaveli PA6 kompozit (PA6+%20Mika) ile cam elyaf ilaveli polisülfon (PSU+%20CE) kompozitlerin tribolojik özelliklerini araştırmışlardır. Deneylerde AISI 316L paslanmaz çelik ve % 30 cam elyaf takviyeli poli-fenilen-sülfid (PSU+%30CE) olmak üzere iki farklı karşı disk kullanılmıştır. Deneyler 10-30 N yüklerde ve 0.5 m/s kayma hızında gerçekleştirilmiştir. AISI 316L paslanmaz çelik karşı diske karşı PA6+%20Mika ve PSU+%20CE kompozitlerin sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerleri azalmıştır. Ancak PPS+30CE diske karşı çalışılması sonucunda sürtünme katsayısının pek değişmediği gözlenirken aşınma oranı değerlerinin ise hafif arttığı tespit edilmiştir. Yapılan literatür çalışmaları sonucunda elektrik sektöründe kullanılan bazı mühendislik plastiklerinin elektriksel olarak yalıtkan olması istenmektedir. Mika katkısı polimerlerde elektriksel yalıtkanlık özelliği istenen alanlarda kullanılmaktadır. Elektrik endüstrisinde

kullanılan plastiklerden elektriksel yalıtkanlık yanında çalışma ortamına bağlı olarak aşınma direnç özelliği de istenmektedir. Literatürde elde edilen araştırmalar ışığında bu iki özelliği buluşturan mika takviyeli bir polimer kompozit üretmek amaçlanmıştır. Bu sebeple mühendislik polimeri olmasından yani mekanik özelliklerinin yüksek olmasından dolayı Poliamit-6 polimeri seçilmiştir. Bunun için PA6/mika kompozitlerin üretilmesi için bu çalışmanın yapılmasına ve formülasyonun oluşturulmasına karar verilmiştir.

Bu çalışmada ağırlıkça %10, 20 ve 30 oranlarında mika katkılı PA6 kompozitleri üretilmiştir. Bunun için önce ekstrüzyonla granül üretilmiş ardından ise enjeksiyonla kalıplama tekniği ile test numuneleri basılmıştır. Kompozit malzemelerin hem mekanik hem de tribolojik performansları incelenmiştir. Çekme, darbe ve sertlik deneyleri ile mekanik özellikler belirlenirken triboloji testleri ile PA6 kompozitlerin aşınma ve sürtünme performansları belirlenmiştir. Aşınma deneyleri kuru kayma şartları altında ortam sıcaklığında pim-disk aşınma cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneyler sabit 2000 m kayma yolu, 0.6 m/s kayma hızında 60, 120 ve 180 N gibi üç farklı yük kullanılarak gerçekleştirilmiş olup deneysel çalışmalar sonucunda hem proses şartlarının etkisi hem de mika katkı oranının mekanik ve aşınma performanslarına etkisi incelenmiştir.

2. Materyal ve metod

2.1. Material and method

Bu çalışmada, Domopolimer firmasından temin edilen Domomid ticari kodlu PA6 polimeri matris malzeme olarak kullanılmıştır. Knarrevik, Norveç firmasından temin edilen ortalama 10 µm partikül boyutunda ve yoğunluğu 2.84 g/cm³ olan mika katkı malzemesi olarak kullanılmıştır. PA6-M kompozitlerin granül üretimi bir ikiz vidalı ekstrüzyon makinasında (Vida çapı: 75, L/D:32) gerçekleştirilmiştir. Mekanik ve triboloji test numuneleri üretiminde, ekstrüzyonda üretilen mika ilaveli granüller kullanılmış ve enjeksiyonla kalıplama tekniği ile basılmıştır. Ekstrüzyon ısıtıcı sıcaklıkları 220 °C - 250 °C olacak şekilde ayarlanmıştır. Ekstruderde üretilen granüller test numuneleri basılmadan önce 80 °C 4 saat süre ile kurutulmuştur. Kurutulan PA6-M kompozitleri enjeksiyon kalıplama yöntemi ile basılmıştır. Standartlara uygun olarak hazırlanmış çelik kalıpta çekme, darbe ve triboloji test numuneleri basılmıştır. Enjeksiyon makinası ısıtıcı sıcaklıkları 220 °C - 250 °C arasında ayarlanmıştır. Enjeksiyon makinasında enjeksiyon basıncı 180 bar olarak seçilmiştir. Kompozit malzemelerin çekme testleri ASTM D638 standardına uygun olarak yapılmıştır. Testler, Zwick Roell Z020 marka ve model çekme test cihazında gerçekleştirilmiştir. Çekme deneyleri, oda sıcaklığında ve 10 mm/dakika çekme hızında yapılmıştır. Darbe deneyleri ASTM D256 Metot-A standardına uygun olarak yapılmıştır. Çentikli izod darbe numuneleri kullanılarak testler Zwick B5113 marka test cihazında yapılmıştır. Sertlik testleri ASTM D2240 standardına uygun olarak Shore D sertlik ölçme yöntemiyle yapılmıştır. Mekanik testler için en az üçer adet test numunesi kullanılmış ve elde edilen sonuçların aritmetik ortalamaları alınmıştır. Sertlik ölçümlerinde en az 10 ölçüm yapılmış ve aritmetik ortalaması alınmıştır. Çekme testi sonucu elde edilen kırık yüzeyler JSM 6060LV kodlu JEOL marka taramalı elektron mikroskop (SEM) cihazı kullanılarak analiz yapılmıştır. Kırık yüzey görüntüleri incelenmeden önce numune yüzeyleri 40A° kalınlığında altın ile kaplanmıştır. Tablo 1'de çalışmada kullanılan malzemeler ve kısaltmaları, Şekil 1'de ise PA6-M kompozitlerin şematik çalışma planı gösterimi verilmiştir. Tablodaki kompozisyonların hazırlanmasında elektrik sektöründe çalışan bazı parçalardan beklenen elektriksel yalıtkanlık, mekanik performans ve aşınma direnci özellikleri dikkate alınmıştır. Beklenen performansı sağlayabilecek muhtemel kompozisyon ağırlıkça %10, 20 ve 30 oranlarında mika katkılı olacak şekilde tasarlanmış ve (PA6-M) kompozitler üretilmiştir.

Tablo 1. PA6 ve PA6-M kompozitlerinin kompozisyonları ve proses şartları.

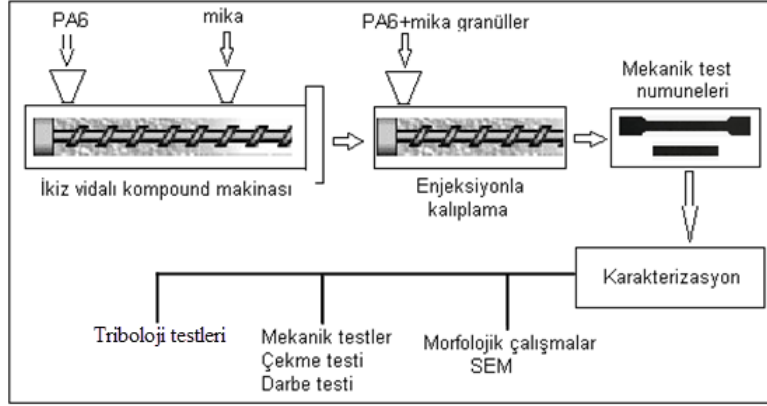
Table 1. Compositions and process conditions of PA6 and PA6-M composites.

Sıra No	PA 6	Mika	Kısaltma	Proses şartları
1	100	-	PA6	Çift vidalı compound makinası ısıtıcı sıcaklık aralığı: 220-250 °C
2	90	10	PA6-10M	Enjeksiyon makinası ısıtıcı sıcaklık aralığı: 220-250 °C
3	80	20	PA6-20M	Enjeksiyon basıncı:180 bar
4	70	30	PA6-30M	

Tribolojik deneyler, pim-disk aşınma cihazında gerçekleştirilmiştir. Aşınma cihazında, bir kola sabitlenmiş 5 mm çapında ve 50 mm uzunluğunda bir polimer pim mevcuttur. Aynı zamanda bir elektrik motorundan aldığı hareketle dönen bir disk vardır. Şekil 2'de pim-disk cihazının şematik resmi verilmiştir. AISI 316L paslanmaz çelik disk, karşı disk malzeme olarak kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülüğüne minimize etmek için hem pim polimer yüzeyleri hem de karşı çelik disk yüzeyleri zımparalanmıştır (1200 no). Her bir test öncesi yüzeyler

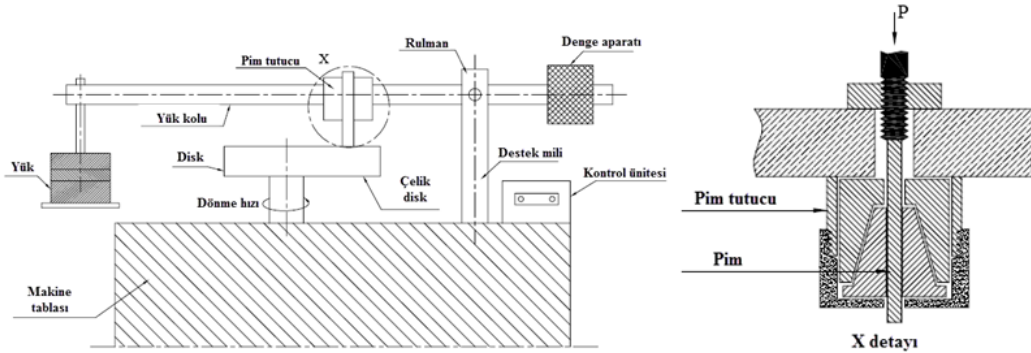
asetonla temizlenmiştir. Tablo 2’de tribolojik deney şartları verilmiştir. Aşınma oranının tespiti için pim numunelerin aşınma testi öncesi 0,0001 gr hassasiyetli Precia marka bir hassas terazide ağırlığı ölçülmüş (m_1), sonra deney sonrası aşınan pim numunesinin ağırlığı (m_2) ölçülmüştür. Deney öncesi ve sonrası ağırlık farkı ($m_1 - m_2$)= Δ_m alınarak pim numunenin yoğunluğuna, kayma yoluna ve normal yüke bölünmesiyle denklem 1’de verilen formülle hesaplanmıştır. Formülde AO: aşınma oranı, ρ : pim numunenin yoğunluğu, L: kayma yolu, F_n : normal yükü temsil etmektedir.

$$AO = \frac{\Delta_m}{\rho * L * F_n} \quad (1)$$



Şekil 1. PA6-M kompozit üretimi için şematik çalışma planı gösterimi.

Figure 1. Schematic plan for the production of PA6-M composites.



Şekil 2. Deneylerde kullanılan pim-disk aşınma test cihazı ve pim tutucu aparatı.

Figure 2. Pin-disk wear test device and pin holder apparatus used in the experiments.

Tablo 2. Triboloji deney şartları.

Table 2. Conditions of tribology tests.

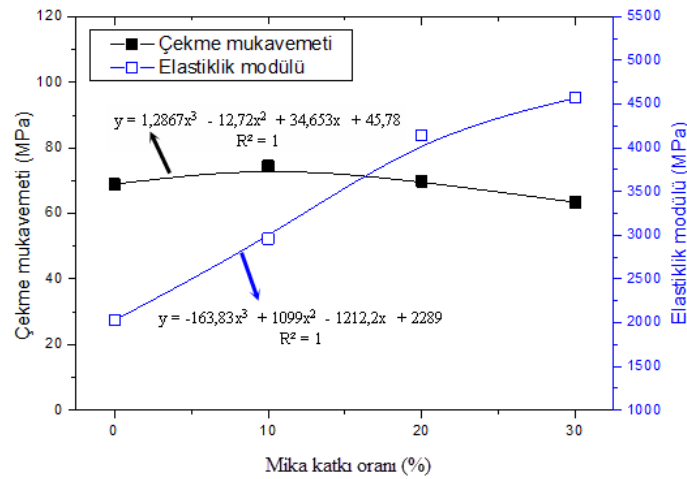
Test parametreleri	Birimi	Test şartları
Kayma yolu	(m)	2000
Çalışma sıcaklığı	(°C)	22±
Kayma hızı	(m/s)	0.6
Uygulanan yük	(N)	60, 120, 180

3. Bulgular ve tartışma

3. Results and discussion

Şekil 3’te katkısız PA6 polimeri ile PA6-M kompozitlerin çekme mukavemeti ve elastiklik modülü değerlerinin mika katkı oranına bağlı olarak değişimini göstermektedir. Katkısız PA6 polimerinin çekme mukavemeti 68.92 MPa iken PA6-10M ve PA6-20M kompozitlerin çekme mukavemeti sırasıyla 74.4 MPa ve 69.77 MPa elde edilmiştir. PA6-30M kompozitin ise çekme mukavemeti 63.34 MPa elde edilmiştir. Katkısız PA6 polimeri ile karşılaştırıldığında PA6-10M ve PA6-20M kompozitlerin çekme dayanımı sırasıyla %8.02 ve %1.23 oranlarında artarken PA6-30M kompozitin çekme dayanımı %8.80 oranında azalmıştır. Elastiklik modülü değerleri incelendiğinde ise artan mika miktarına bağlı olarak elastiklik modülünün lineer olarak arttığı

belirlenmiştir. Katkısız PA6 polimerinin 2030MPa olan elastiklik modülü değeri %10 mika ilavesi ile %45.8 oranında artarak 2960 MPa değerine ulaşmıştır. Benzer şekilde PA6-10M ve PA6-20M kompozitlerin elastiklik modülleri sırasıyla %103.9 ve %125.0 oranlarında artarak 4140MPa ve 4568MPa değerlerine ulaşmıştır. Benzer sonuçlar Tomar ve Maiti (2010), Akçakale ve Bülbül (2017) tarafından da elde edilmiştir. Yapılan çalışmalarda, polimer ile katkı arasındaki arayüzey bağının kuvvetli olması ile matristen katkıya verimli bir gerilim transferi oluşacağından dolayı çekme dayanımının artacağı aksi durumda ise azalacağı belirtilmiştir (Sahai & Pawar, 2017; Asyadi vd., 2013; Altay vd., 2021; Tomar & Maiti, 2010). Ayrıca, artan katkı miktarlarında topaklanmanın meydana gelmesi ile mekanik özelliklerin azalacağı belirtilmiştir (Asyadi vd., 2013). Sahai & Pawar (2017) artan katkı miktarı ile çekme dayanımının azalmasının sebebi olarak kullanılan mikanın işlem görmemiş olmasından kaynaklandığını ve arayüzey bağının oluşmadığını belirtmişlerdir. Asyadi vd. (2013) ise yüksek katkı miktarlarında kuvvet uygulandığında deformasyon esnasında katkıların polimer matristen ayrılacağı ve oluşan boşlukların boyutlarının büyümesi ile çatlak başlatıcı gibi davranabileceği ve dolayısıyla mekanik özellikleri azaltabileceği belirtilmiştir. Bose vd. (2006) başlangıçta katkı miktarının artmasıyla çekme dayanımının azaldığını yüksek katkı miktarlarında ise çekme dayanımının arttığını belirtmişlerdir. Benzer şekilde artan katkı miktarı ile elastiklik modülünün arttığını belirtmişlerdir. Rijit ve kuvvetli katkıların varlığı gerilimin transferinde polimer matrise yardımcı olur ve artan katkı miktarına bağlı olarak modül önemli oranda artar (Alghamdi, 2019; Tomar & Maiti, 2010). Çekme modülündeki artışın diğer bir nedeni ise katkı ilavesi ile birlikte polimer matrisin deforme kabiliyetinin sınırlanması ve zincir hareketliliğinin azalması olarak açıklanmıştır. Polimer zincir hareketliliğinin azalması, kompozitteki gerilim transferini azaltacak ve sonuçta polimerin sertliğini dolayısıyla rijitliğini yani elastiklik modülünü artacaktır (Deshmukh vd., 2011; Altay vd., 2021).



Şekil 3. PA6 polimerinin mika katkı oranına bağlı olarak çekme mukavemeti/elastiklik modülü ilişkisi

Figure 3. Tensile strength/elasticity modulus relationship depending on the mica filler content of PA6 polymer

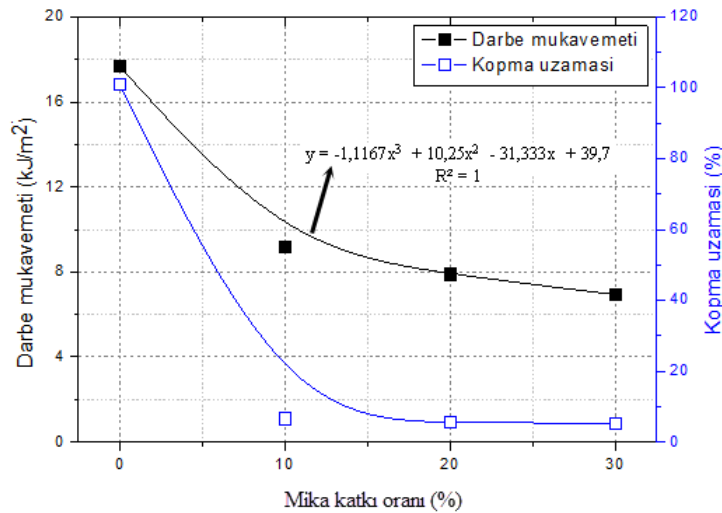
Tablo 3. Deneylerde kullanılan malzemeler ve sertlikleri

Table 3. Materials used in the experiments and their hardness

Sıra No	Malzeme	Sertlik (Shore D)
1	PA6	75±1
2	PA6-10M	76±1
3	PA6-20M	77±1
4	PA6-30M	79±1

Tablo 3’de deneylerde kullanılan saf PA6 polimeri ile değişik oranlarda mika katkılı PA6 kompozitlerin sertliklerinin değişimi verilmiştir. Tabloda görüldüğü gibi mika katkı oranının artması ile sertlik değerlerinde artış gözlenmiş ancak artışın kayda değer bir oranda olmadığı ifade edilebilir. Elastiklik modülü ve sertlikte artış gözlenmiş olup (Deshmukh vd., 2011; Altay vd., 2021) açıklamalarını desteklemektedir. Deshmukh vd. (2011) ise plakalı yapısı ile mikanın partikül boyutu ve polimer matris içerisinde dağılımının elastiklik modülün artmasında önemli bir etken olduğunu belirtmişlerdir.

Şekil 4'te katkısız PA6 polimeri ile PA6-10M, PA6-20M ve PA6-30M kompozitlerin darbe mukavemeti ve kopma uzaması değerlerinin değişimi gösterilmiştir. PA6 polimerine mika ilave edilmesi ile kompozitin hem darbe mukavemeti ve hem de kopma uzaması değerleri azalmıştır. Grafikte görüldüğü gibi katkısız PA6 polimerinin 17.66 kJ/m^2 olan darbe mukavemeti %10 mika ilave edilince %92.7 oranında azalarak 9.16 kJ/m^2 elde edilmiştir. Benzer şekilde PA6-20M ve PA6-30M kompozitlerin darbe mukavemetleri sırasıyla %124.1 ve %154.4 oranlarında azalmıştır. En düşük darbe mukavemeti %30 mika içeriğinde 6.94 kJ/m^2 değeri ile elde edilmiştir. %101.01 değeri ile sünek bir davranış gösteren PA6 polimeri mika ilavesi ile gevrek bir davranış göstermiş ve % kopma uzaması değerleri önemli oranda azalmıştır. Katkısız PA6 polimerine ilave edilen %10, %20 ve %30 oranlarında mika ilavesi ile % kopma uzaması değerleri sırasıyla %1449,2, %1713,4 ve %1838,7 oranlarında azalmıştır. Yapılan çalışmalarda, artan katkı miktarı ile matrisin deforme olabilirliğinin veya zincir hareketliliğinin katkı tarafından engellendiğinin bir göstergesi olan kopma uzamasının azaldığı belirtilmiştir (Bose vd., 2006; Sahai & Pawar, 2017; Akçakale & Bülbül, 2017). Yüksek katkı miktarlarında küçülen partikül boyutu nedeniyle mevcut hacmi kapladığından dolayı uzamayı sağlayan matrisin miktarı yetersiz kalmış ve kopma uzaması azalmıştır. Ayrıca, plakalı yapıya sahip olan mika katkı miktarının artması ile toplam yüzey alanı artmıştır ve deformasyon oranı azalmıştır (Bose vd., 2006). Alghamdi (2019) ve Asyadi vd. (2013) ilave edilen ve artan mika miktarı ile kompozitin daha rijit bir hale geldiğini belirtmişlerdir. Asyadi vd. (2013) ayrıca artan mika içeriğine bağlı olarak kopma uzamasındaki azalmayı, mika partikülleri etrafında çatlakların oluşumuna, partiküllerin topklanmasına ve partiküllerin matristen bölgesel olarak ayrılarak boşluklar oluşturmasına bağlamıştır. Deshmukh vd. (2011) ise mika ve matris arasındaki zayıf arayüzey bağı nedeniyle kopma uzamasının azaldığını belirtmişlerdir. Düşük katkı miktarlarında darbe dayanımının arttığı belirtilmiştir. Düşük miktarlarda dayanımın artmasının sebebi matrisin artan miktarı ile daha fazla enerjiyi absorplaması olarak açıklanmıştır. Artan katkı oranına bağlı olarak matrisin deforme kabiliyeti azalarak sünekliği azaltır ve kompozit yapısal olarak zayıflamaktadır (Bose vd., 2006). Sahai & Pawar (2017) yüksek miktardaki katkı oranına bağlı olarak darbe dayanımının azalmasının yetersiz arayüzey bağı nedeniyle olduğunu belirtmişlerdir. Zayıf arayüzey bağı, mika katkısının polimer matrise gerilim transferini destekleyemeyeceği ve dolayısıyla çatlak büyümesi için potansiyel alanlar meydana getireceği belirtilmiştir. Polimer matriste oluşan boşlukların çatlak başlama yerleri haline geleceği ve dolayısıyla darbe dayanımının azalacağı belirtilmiştir (Sahai & Pawar, 2017; Asyadi vd., 2013). Tomar ve Maiti (2010) ise rijit katkı nedeniyle matrisin hareketinin sınırlanması ve polimer matrisin kristalliliğinin darbe dayanımı üzerinde etkili olduğunu belirtmişlerdir.

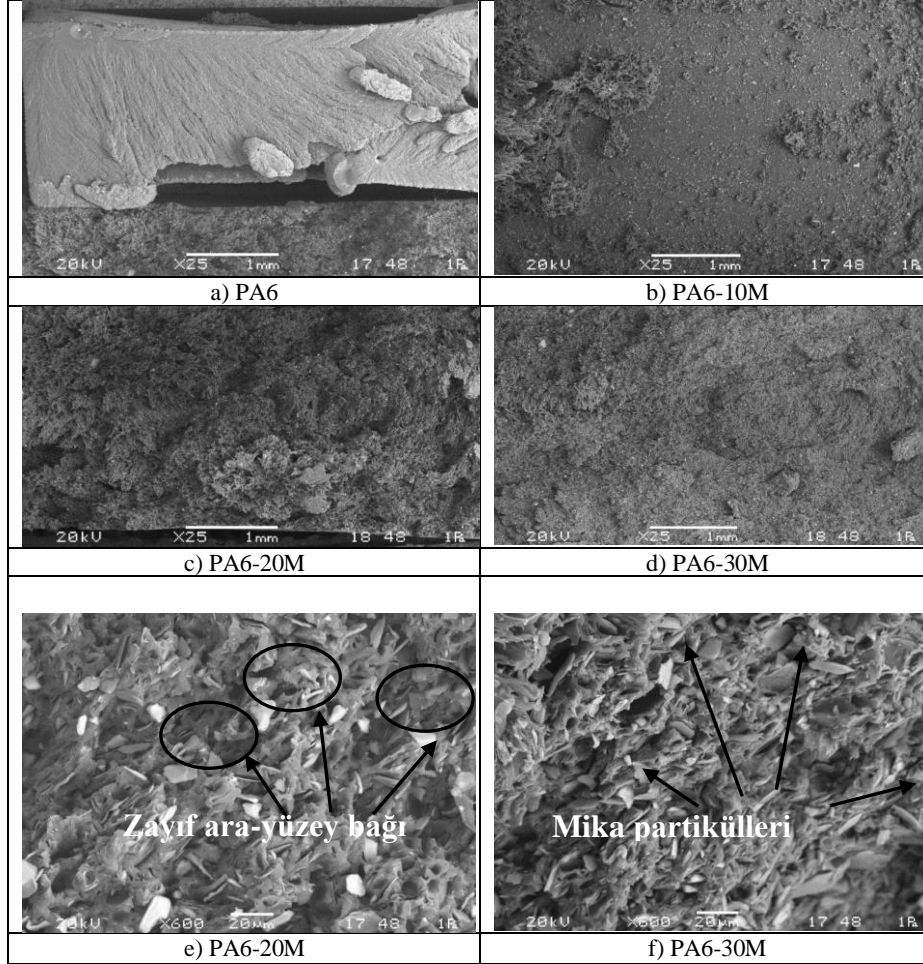


Şekil 4. PA6 polimerinin mika oranına bağlı olarak kopmadaki % uzama ve darbe mukavemeti değerlerinin değişimi.

Figure 4. Variation of % elongation at break and impact strength values depending on the mica filler content of PA6 polymer.

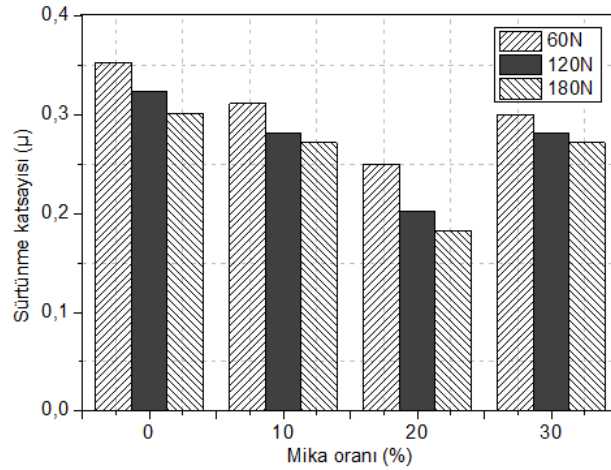
Şekil 5'te PA6 polimeri ve PA6-M kompozitlerin kırık yüzeylerden alınan taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri verilmiştir. Şekil 5-a'da katkısız PA6 polimerinin kırılma yüzeyinde sünek kırılmanın olduğu görülmektedir. Şekil 5 b-c ve d'de ise PA6-M kompozitlerin kırılma yüzey SEM resimleri verilmiştir. Şekillerde görüldüğü gibi mika katkısının matris içerisinde hemen hemen homojen olarak dağıldığı ve

herhangi bir topaklanma olmadığı görülmektedir. Ayrıca mika katkısının PA6 polimerini gevrek hale getirdiği ve kırık yüzeylerin düzgün olarak kırıldığı da görülmektedir. Şekil 5-e ve 5-f incelendiğinde ise mika ve PA6 polimer matris arasında zayıf bağlanma nedeni ile mika katkıların bağımsız halde matris yüzeyinde dağıldığı gözlenmiştir. Ancak PA6 ana matrisi ile mika katkıların ara-yüzey bağının iyi olmadığı da gözlenmiştir. (bakınız Şekil 5e) Şekil 5f de ise matris bünyesindeki mika katkıları gösterilmiştir. Bu durum Şekil 3'teki artan mika oranına bağlı olarak azalan çekme dayanımını açıklamaktadır.



Şekil 5. PA6 polimeri ile PA6-M kompozitlerin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.
Figure 5. Scanning electron microscope images of PA6 polymer and PA6-M composites.

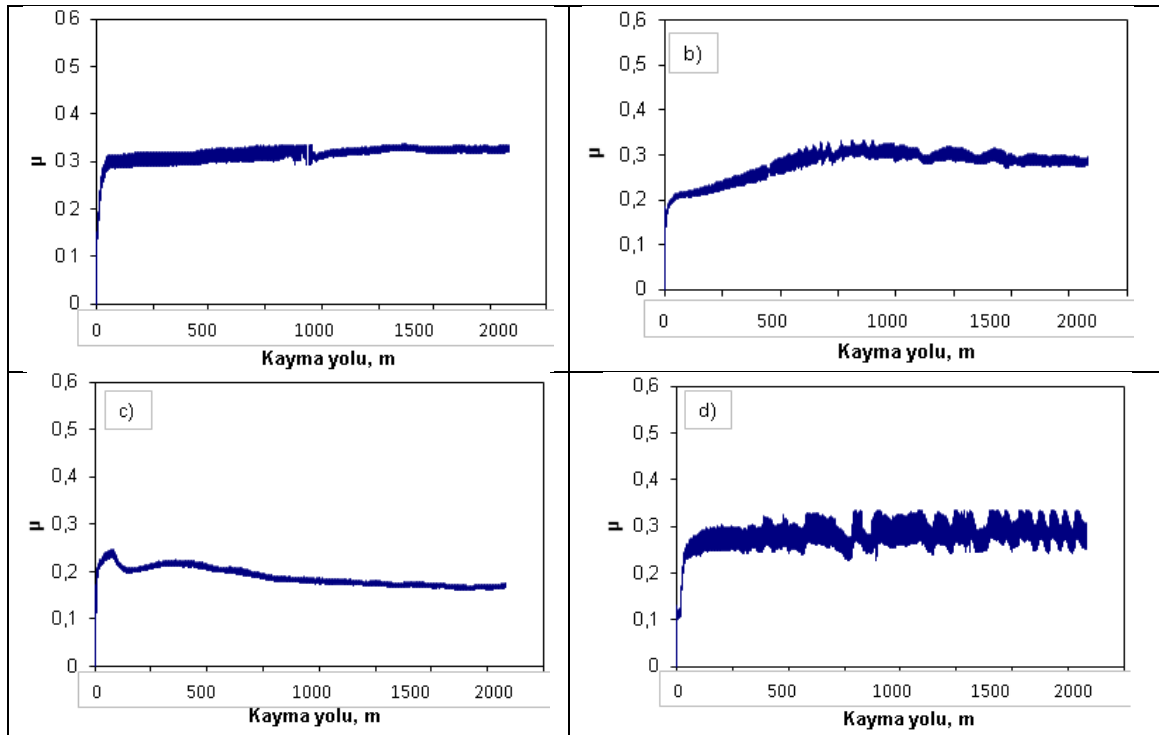
Şekil 6'da ise triboloji testleri sonucunda elde edilen mika katkı oranına ve uygulanan kuvvete bağlı olarak katkısız PA6 polimeri ile PA6-M kompozitlerin sürtünme katsayısının değişimi verilmiştir. Yapılan çalışmalarda her bir noktadaki hata payının yaklaşık olarak %4-5 aralığında olduğu gözlenmiştir. Şekilde açıkça görüldüğü gibi PA6 ve PA6-M kompozitlerin sürtünme katsayısı artan yük miktarı ile azalmıştır. Uygulanan yük 60 N'dan 180 N'a çıkarıldığında katkısız PA6'nın sürtünme katsayısı %17.0 oranında, PA6-10M kompozitinin sürtünme katsayısı %14.6, PA6-20M kompozitin sürtünme katsayısı %37.4 ve PA6-30M kompozitin sürtünme katsayısı ise %10.4 oranında azalmıştır. Aynı zamanda, PA6 polimerine ilave edilen farklı oranlardaki mika katkı oranı kompozitin sürtünme katsayısını önemli oranda azaltmıştır. Bu azalma, sabit 120 N yük dikkate alındığında, PA6-10M kompoziti için %14.6 oranında iken PA6-20M kompoziti için %59.8 ve PA6-30M kompoziti için %14.7 oranında elde edilmiştir. Grafik incelendiğinde PA6-30M kompozitin sürtünme katsayısı değerleri katkısız PA6 polimerinden düşük olmakla birlikte PA6-20M kompozitin sürtünme katsayısı değerlerinden ortalama %36.1 oranında daha yüksektir. [Oshita vd. \(2017\)](#) sentetik mikanın katman aralığının genişlemesiyle, dinamik sürtünme katsayısının yaklaşık 0.5'ten 0.10- 0.11 aralığına gerileyerek önemli ölçüde azaldığını ifade etmişlerdir. Mika katkı oranına ve uygulanan yüke bağlı olarak sürtünme katsayısının azalmasında mika katkı miktarının daha etkili olduğu belirlenmiştir. En yüksek sürtünme katsayısı 60 N yükte 0.35 değeri ile katkısız PA6 polimerinde elde edilmiştir. En düşük sürtünme katsayısı ise 180 N yük altında 0.18 değeri ile PA6-20M kompozitinde elde edilmiştir.



Şekil 6. PA6 polimeri ve PA6-M kompozitlerin mika oranına ve yüke bağlı olarak sürtünme katsayısının değişimi

Figure 6. Variation of friction coefficient of PA6 and PA6-M composites depending on mica filler content and load.

Şekil 7’de ise PA6 ve PA6-M kompozitlerin kayma yoluna bağlı olarak sürtünme katsayılarının değişimi verilmiştir. Şekil 7a saf PA6 polimerinin Şekil 7b,c ve d sırasıyla PA6-10M, PA6-20M ve PA6-30M kompozitlerin kayma yoluna bağlı olarak sürtünme katsayılarının değişimi verilmiştir. Şekil 7a’ da verilen grafikte saf PA6 polimerinin stabil olma durumu çok kısa zamanda gerçekleşirken sırasıyla %10 ve %20 mika katkılı kompozitlerde (Şekil 7b,c) stabil olma durumu yaklaşık 800 m kayma yolunda olmuştur. %30 mika katkılı kompozitte ise (Şekil 7d) yaklaşık 200 m kayma yolunda stabil olma durumu gerçekleşmiştir.

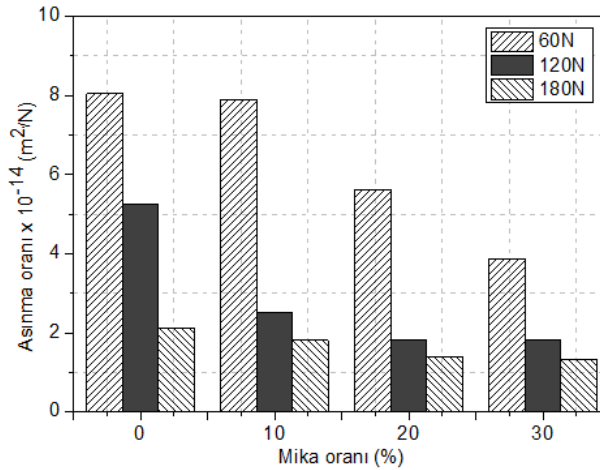


Şekil 7. PA6 polimeri ve PA6-M kompozitlerin sürtünme katsayısı/kayma yolu ilişkisi

Figure 7. The relationship between friction coefficient and sliding distance of PA6 and PA6-M composites

Şekil 8’de ise PA6 ve PA6-M kompozitlerin mika katkı oranına ve uygulanan yüke bağlı olarak aşınma oranının değişimi verilmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda her bir noktanın hata payı yaklaşık olarak %4 civarında olduğu belirlenmiştir. Şekilde görüldüğü gibi yükün 60 N’dan 180 N’a çıkarılması ile aşınma oranı önemli oranda azalmıştır. Bu azalma, PA6 polimeri ile PA6-10M, PA6-20M ve PA6-30M kompozitleri için sırasıyla %277.6, %335.3, %301.9 ve %190.5 oranlarında elde edilmiştir. Düşük yük ve düşük katkı miktarındaki aşınma oranının azalması sınırlı kalırken artan yük ve mika oranı ile birlikte aşınma oranındaki

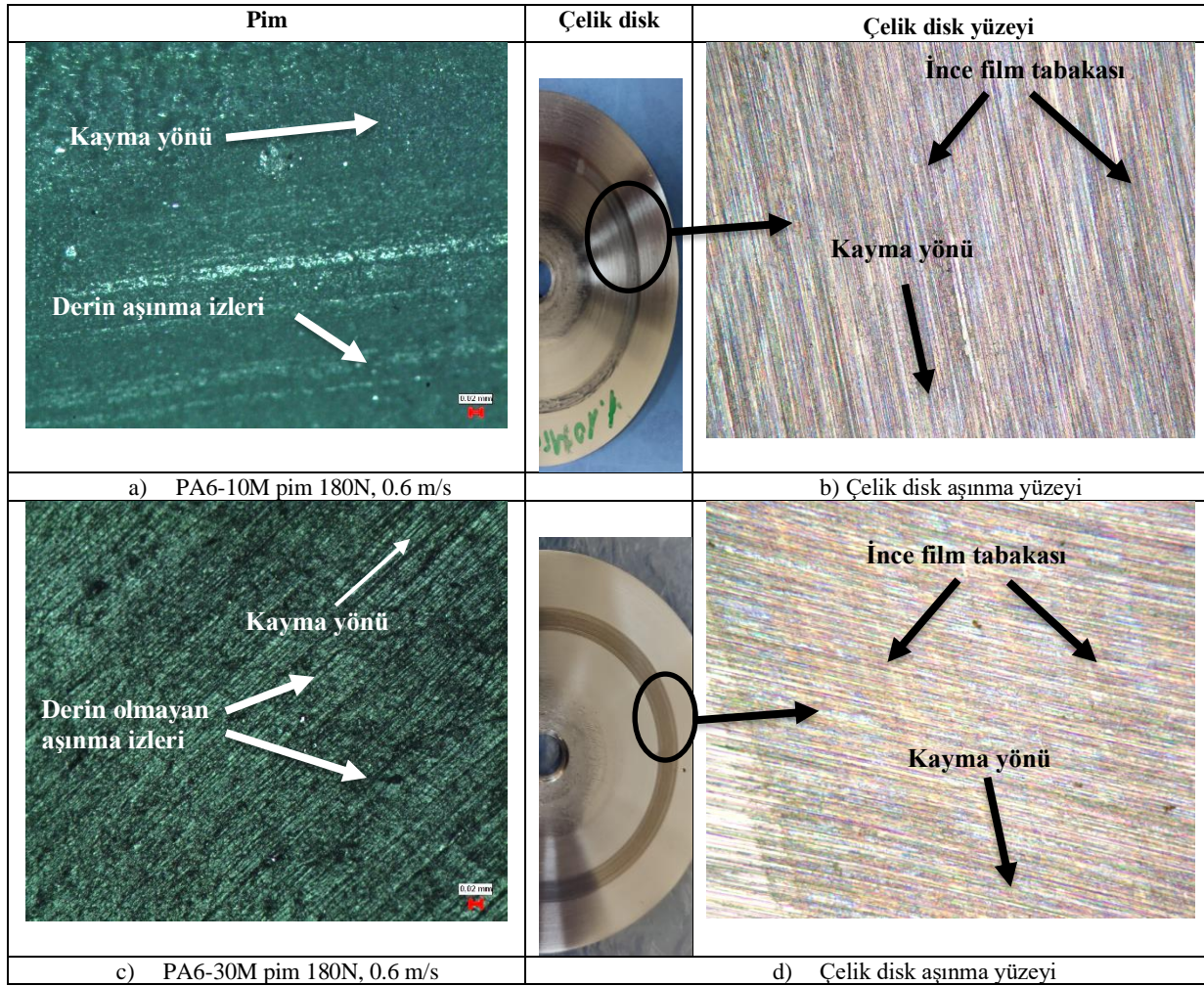
azalma miktarı artmıştır. 120 N yükte PA6 matrisine ilave edilen %10 oranındaki mika aşınma oranını %108.7 oranında azaltırken, %20 ve %30 mika oranlarında aşınma oranını %189.0 ve %189.5 oranlarında azaltmıştır. Genel olarak değerlendirildiğinde, aşınma oranının 10^{-14} m²/N civarında elde edildiği belirlenmiştir. Mika katkı oranına ve uygulanan yüke bağlı olarak aşınma oranında azalmaya uygulanan yükün belirgin derecede etkili olduğu belirlenmiştir. En yüksek aşınma oranı 60 N yükte PA6 polimerinde elde edilmiştir. Aşınma oranı değeri ise 8.051×10^{-14} m²/N olarak tespit edilmiştir. En düşük aşınma oranı PA6-30M kompozitinde 180 N yükte elde edilmiştir. Aşınma oranı değeri 1.336×10^{-14} m²/N olarak tespit edilmiştir. Kompozitlerinin sürtünme katsayısı ve aşınma oranının azalması, hem elastiklik modülü hem de sertlik artışı ile ilişkilendirilebilirken aynı zamanda mika katkının tabakalı yapıya sahip olması ile ilişkilendirilebilir. Yani PA6 ana matrisine ilave edilen mika katkı oranının artması ile kompozitlerin elastiklik modülü ve sertlik değerleri artarak rijitlik artmakta bu ise aşınma oranının azalmasına sebep olmaktadır. Buna ilaveten mikanın tabakalı yapısı, birbiri üzerinde kolaylıkla kayabilir. Çünkü tabakalar zayıf kuvvetler ile birbirine bağlı olup birbiri üzerinde kolaylıkla kayarken karşı yüzeyde yağlayıcılık özelliği gösterirler. PA6 ana matrisine ilave edilen mika sert fazı oluşturmaktadır. Mika, PA6 ve çelik disk arasındaki etkileşimi belirgin bir şekilde azaltmakta olup uygulanan yük transferini destekleyerek sürtünme ve aşınma özelliklerinin iyileşmesi yönünde önemli rol oynamıştır. Maslavi vd. (2022) tarafından yapılan çalışmada sentetik mika takviyeli Poli-tetra-flor-etilen (PTFE) kompozitlerinde disk yüzeyinde oluşan film tabakası ile sürtünme katsayısının ve aşınma oranının geliştiğini, sentetik mikanın ise spesifik aşınma oranı üzerinde olumlu bir etkisinin olduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 8. PA6 ve PA6-M kompozitlerin mika oranına ve yüke bağlı olarak aşınma oranı değişimi.

Figure 8. Wear rate variation of PA6 and PA6-M composites depending on mica filler content and load.

Şekil 9'da 0.6 m/s kayma hızı ve 180 N yük altındaki PA6-10M ve PA6-30M kompozitlerin çelik disk yüzeyine karşı çalıştığı durumda elde edilen pim ve çelik disk yüzey görüntüleri verilmiştir. Şekil 9 b ve d'de hem PA6-10M hem de PA6-30M kompozit numunelerde transfer film tabakasının oluştuğu gözlenmiştir. Aşınma testleri süresince şekillenen ve pim ile çelik disk arasındaki teması azaltan transfer film tabakasının, mika oranına bağlı olarak, kalınlığının ve dağılımının değiştiği ve tüm yüzeye yayıldığı gözlenmiştir. Transfer film tabakası, aşınma oranının önemli oranda azalmasına sebep olmuştur (Bakınız Şekil 8). Sukur vd. (2020) yaptıkları çalışmada grafen nano-plakaların ilave edilmesi ile kayma yüzeylerinde düşük kesme mukavemetine sahip bir transfer film tabakasının oluştuğunu ve bu durumun da sürtünme katsayısı ve dolayısıyla aşınma oranını azalttığını belirtmişlerdir. Grafen nano-plakaların katı yağlayıcı gibi davranarak kayma sırasında sürtünme yüzeyleri arasındaki teması azaltarak tribolojik performansı artırdığı belirtilmiştir. Meng vd. (2020) sentetik mikanın katman boyutunun büyük ve katmanlar arası kuvvetinin zayıf olduğunu, bu nedenle sentetik mika katmanlarının birbirinden ayrılmasının kolay olmasından dolayı çelik bilye üzerinde yoğun ve düzensiz koruyucu transfer film oluşumuna katkı sağladığını ifade etmişlerdir. Ayrıca, Deaconescu & Deaconescu (2020) koruyucu film tabakası kalınlığının artan hız ile büyüdüğünü belirtmişlerdir. Şekil 9 a ve c'de ise PA6-10M ve PA6-30M kompozit pim numunelerinin optik mikroskopta aşınma yüzey görüntüleri verilmiştir. Mikroyapı görüntüleri detaylı bir şekilde incelendiğinde pim numunelerin kayma yönünde derin aşınma izlerinin oluştuğu görülmektedir. Aşınmanın yüzeyden parça koparak oluştuğu söylenebilir. Burada abradif aşınma mekanizması daha etkin olmuştur. Kompozitteki mika oranının artmasına bağlı olarak aşınma izlerinin azaldığı belirlenmiştir.



Şekil 9. Disk ve pim optik aşınma yüzey görüntüleri.

Figure 9. Optical images of disc and pin wear surfaces.

4. Tartışma ve sonuçlar

4. Discussion and conclusions

%10-20-30 oranlarında mika katkılı PA-6 kompozitlerin tribolojik ve mekanik performanslarının değerlendirildiği deneysel çalışma sonucunda;

Katkısız PA6 polimeri ile karşılaştırıldığında PA6-10M ve PA6-20M kompozitlerin çekme dayanımı sırasıyla %8.02 ve %1.23 oranlarında artarken PA6-30M kompozitlerin çekme dayanımı %8.80 oranında azalmıştır. Polimer ana matristeki artan mika oranına bağlı olarak elastiklik modülü %45.8, %103,9 ve %125 oranlarında artmıştır. En düşük darbe mukavemeti %30 mika içeriğinde 6.94 kJ/m² değeri ile elde edilmiştir. Kopma uzaması değeri %101.01 ile sünek bir davranış gösteren PA6 polimeri mika ilavesi ile gevrek bir davranış göstermiş ve kopmadaki % uzama değerleri önemli oranda azalmıştır. PA6 polimerine ilave edilen mika, PA6 esaslı kompozit malzemelerin sürtünme katsayısının ve aşınma oranının azalmasına sebep olmuştur. Buna ilaveten, aşınma deneylerinde yükün artırılması ile tüm malzemelerin sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerleri azalmıştır. Kompozit bünyesinde sert faz olarak bulunan mika, PA6 ve karşı çelik disk arasındaki etkileşimi belirgin bir şekilde azaltmıştır. Buna ilaveten mika yük transferini destekleyerek kompozitin aşınma performanslarının iyileşmesinde önemli rol oynamıştır. Elektriksel uygulamalarda kullanılma potansiyeli olan bir plastik parçanın mekanik ve tribolojik performansları dikkate alındığında teknik açıdan en uygun kompozit malzemenin PA6-30M kompoziti olduğu tespit edilmiştir. Ancak fiyat/performans açısından ticari olarak değerlendirildiğinde PA6-20M kompozitinin kullanılması daha uygundur.

Yazar katkısı

Author contribution

Yazarların çalışmadaki katkı oranları eşittir.

Etik beyanı

Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı

Conflicts of interest

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

References

- Akçakale, N., & Bülbül, S. (2017). The effect of mica powder and wollastonite fillings on the mechanical properties of NR/SBR type elastomer compounds. *Journal of Rubber Research*, 20(3), 157-167. <https://doi.org/10.1007/BF03449149>
- Alghamdi, M. (2019). Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)/Mica composites: preparation and characterization. *Minia Journal of Engineering & Technology (MJET)*, 38(1), 244-255.
- Altay, L., Sarikanat, M., Saglam, M., Uysalman, T., & Seki, Y. (2021). The effect of various mineral fillers on thermal, mechanical, and rheological properties of polypropylene. *The journal of Research on Engineering Structures and Materials (RESM)*, 7(3), 361-373. <http://dx.doi.org/10.17515/resm2021.258ma0213>
- Asyadi, F., Jawaid, M., Hassan, A., & Wahit, M. U. (2013). Mechanical properties of mica-filled Polycarbonate/Poly(acrylonitrile-butadiene-styrene) composites. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 52(7), 727-736. <https://doi.org/10.1080/03602559.2012.762672>
- Bose, S., & 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. doi:10.4236/jmmce.2004.31003
- Bose, S., Raghu, H., & Mahanwar, P. A. (2006). Mica reinforced Nylon-6: effect of coupling agents on mechanical, thermal, and dielectric properties. *Journal of Applied Polymer Science*, 100(5), 4074-4081. <https://doi.org/10.1002/app.23253>
- Demir, Z. (2013). Tribological performance of polymer composites used in electrical engineering applications. *Bulletin of Materials Science*, 36(2), 341-344. <https://doi.org/10.1515/POLYENG.2009.29.8-9.549>
- Deaconescu, A., & Deaconescu, T. (2020). Tribological behavior of hydraulic cylinder coaxial sealing systems made from PTFE and PTFE compounds. *Polymers*, 12(1), 155, 2-14. <https://doi.org/10.3390/polym12010155>
- Deshmukh, S. P., Rao, A. C., & Gava, V. R. (2011). Mica-filled PVC composites: Effect of particle size, filler concentration, and surface treatment of the filler, on mechanical and electrical properties of the composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 24(5), 583-599. <https://doi.org/10.1177/0892705710393114>
- Farzaneh, S., & Tcharkhtchi, A. (2011). Viscoelastic properties of polypropylene reinforced with mica in T α and T α c transition zones. *International Journal of Polymer Science*. Volume 2011, Article ID 427095. <https://doi.org/10.1155/2011/427095>
- Gan, D., Lu, S., Caisheng, S., & Zhijian, W. (2001). Mechanical properties and frictional behavior of a mica-filled poly (aryl ether ketone) composites. *European Polymer Journal*, 37(7), 1359-1365. [https://doi.org/10.1016/S0014-3057\(01\)00010-6](https://doi.org/10.1016/S0014-3057(01)00010-6)
- Gaurav, A., Amar, P., & Rajesh, K. S. (2013). Parametric optimization and three-body abrasive wear behavior of SiC filled chopped glass fiber reinforced epoxy composites. *International Journal of Composite Material*, 3(2), 32-38. doi:10.5923/j.comaterials.20130302.02

- Jianping, G., Luedtke, W. D., Gourdon, D., Ruths, M., Israelachvili, J. N., & Landman, U. (2004). Frictional forces and Amontons' Law: From the molecular to the macroscopic scale. *The Journal of Physical Chemistry B*, 108(11), 3410-3425. <https://doi.org/10.1021/jp0363621>
- Kodal, M., Ertürk, S., Şanlı, S., & Özkoc, G. (2015). Properties of talc/wollastonite/Polyamide 6 hybrid composites. *Polymer Composites*, 36(4), 739-746. <https://doi.org/10.1002/pc.22993>
- Lichao, X., Hong, W., Shaoyun, G., Xiaojie, S., & Wenbin, L. (2016). Enhanced sound insulation and mechanical properties of LDPE/mica composites through multilayered distribution and orientation of the mica. *Composites: Part A*, 81, 225-233. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.11.023>
- Maslavi, A., Ünal, H., & Kaştan, A. (2022). Sentetik Mika Takviyeli Poli-tetra-flor-etilen Polimer Kompozitin Tribolojik Özelliklerine Uygulanan Yükün ve Kayma Hızının Etkisinin Belirlenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22, 899-910. DOI: 10.35414/akufemubid.1112777
- Merve, K., Nilgün, K., & Mehmet Ali, O. (2021). Influence of mica mineral on flame retardancy and mechanical properties of intumescent flame retardant polypropylene composites. *Open Chemistry*, 19(1), 904-915. <https://doi.org/10.1515/chem-2021-0072>
- Meng, Z. J., Wang, Y. X., Xin, X. C., Liu, H., Yan, Y. F., & Yan, F. Y. (2020). The influence of several silicates on the fretting behavior of UHMWPE composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 137(43), 49335. <https://doi.org/10.1002/app.49335>
- Oshita, K., Yanagi, M., Okada, Y., & Komiyama, S. (2017). Tribological properties of a synthetic mica-organic intercalation compound used as a solid lubricant. *Surface & Coatings Technology*, 325, 738-745. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.01.080>
- Sahai, R. S. N., & Pawar, N. (2017). Studies on mechanical properties of mica filled Polyphenylene oxide composite with coupling agent. *Asian Journal of Applied Science and Technology (AJAST)*, 1(7), 153-157.
- Subburamamurthy, H. B., Rathanasamy, R., Kumar, H. K. M., Chinnasamy, M., Kaliyannan, G. V., & Natarajan, S. (2020). Selection of appropriate reinforcement for Nylon material through mechanical and damping characteristics. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 30(4), 2020046. <https://doi.org/10.1590/0104-1428.05520>
- Sukur, E. F., Kocaman, S. & Onal, G. (2020). Mechanical, Tribological and Thermal Properties of Epoxy Based Phenolic Nanocomposites Reinforced with Graphene Nanoplatelet, *Special Issue: ICAMMEN 2018, Yıldırım Beyazıt University, CRPASE: Transactions of Mechanical Engineering*, 6, 21-27.
- Tomar, N., & Maiti, S. N. (2010). Mechanical properties of mica-filled PBT/ABAS composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 117(2), 672-681. <https://doi.org/10.1002/app.30171>
- 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. <https://doi.org/10.1177/1350650114521406>
- Ünal, H., Yetgin, S. H., & Köse, S. (2023). Tribological performance of polyamide 6/wax blend for rolling bearing, bushing and gear applications. *International Journal of Chemistry and Technology*, 7(1), 77-83. <https://doi.org/10.32571/ijct.1292871>
- Verbeek, J., & Christopher, M. (2012). *Mica-Reinforced polymer composites, in polymer composites*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.