

Polimer Matrisli Kompozitlerde Matris Türünün Sürtünme ve Aşınma
Özelliklerine Etkisi

Erhan Onat

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Şubat 2016

The Affect of Matrix Type on the Friction and Wear Properties of
Polymer Matrix Composites

Erhan Onat

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Metallurgical and Material Engineering

February 2016

Polimer Matrisli Kompozitlerde Matris Türünün Sürtünme ve Aşınma
Özelliklerine Etkisi

Erhan Onat

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Yrd. Doç. Dr. İbrahim Çelikyürek

Şubat 2016

ONAY

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Erhan ONAT'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “Polimer Matrisli Kompozitlerde Matris Türünün Sürtünme ve Aşınma Özelliklerine Etkisi” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oy birliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Yrd. Doç. Dr. İbrahim ÇELİKÜREK

İkinci Danışman : -----

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye : Yrd. Doç. Dr. İbrahim ÇELİKÜREK

Üye : Yrd. Doç. Dr. Bedri BAKSAN

Üye : Doç. Dr. Osman TORUN

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hürriyet ERŐAHAN
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Yrd. Doç. Dr. İbrahim ÇELİKÜREK danışmanlığında hazırlamış olduğum “Polimer Matrisli Kompozitlerde Matris Türünün Sürtünme ve Aşınma Özelliklerine Etkisi” başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim.
05/02/2016

Erhan Onat

İmza

ÖZET

Bu çalışmada kullanılan poliamid-6 ve polioksümetilen (POM) polimer matrisleri granül halinde ve pekiştirici olarak kullanılan 1040 çeliği, bronz ve pirinç ise 200mm uzunluğunda, 30mm çapında çubuklar halinde Eskişehir Organize Sanayi Bölgesi'nden temin edilmiştir. Torna tezgâhında 0,1mm paso verilerek çubukların talaşı alınmıştır. Bileşik gezegensel hareketli bilyeli değirmende talaşlar ve granüller öğütülerek toz haline getirilmiştir. Üretilen tozlar 300 ve 150 μ boyutundaki eleklerden geçirilmiş ve 150 μ üzerinde kalan tozlar kullanılmıştır. Bu elde edilen tozlardan, 20g polimer matrisinden 80g ise metal tozlarından olmak üzere matris-pekiştirici karışımı kullanılarak polimer matrisli kompozitler, ayrıca poliamid ve polioksümetilen (POM)'in granüllerinden, bileşimi %100 oranında polimer ihtiva eden matrisler de ekstrüzyon cihazında üretilmiştir. Kompozitlere ve matrislere pin-on-disk geometrisinde sürtünme ve aşınma testleri uygulanmıştır. Sürtünme basıncının ve sürtünme hızının kompozitlerin ve matrislerin sürtünme ve aşınma davranışlarına etkisi araştırılmıştır. Numunelerden aşınma ve sürtünme deneyleri sonrasında, aşınan yüzeylerden SEM görüntüleri ve EDS analizleri de alınmıştır.

Anahtar Kelimeler: Polimer matrisli kompozitler, poliamid-6, polioksümetilen (POM), mikroyapı, sürtünme ve aşınma.

SUMMARY

The polymer matrix of the polyamide-6 and polyoxymethylene (POM) used in this study, 1040 steel as granules and intensifier, bronze and brass as bars with 200mm length and 30mm radius are provided from Eskişehir Organized Industrial Zone. In turning lathe, the turnings of the bars are obtained with 0,1mm cutting depth. The turnings and granules are grinded to powder by using planetary ball mill. Produced powder is separated out by using 150 and 300 μ sieve and powder which is bigger than 150 μ is used. From obtained powder, by using matrix-intensifier mixture with 20g of polymer matrix and 80g of metal powder, polymer-matrix composites and also from granules of polyamide and polyoxymethylene (POM) matrix including %100 polymer are produced in extrusion press. Friction and wear tests are applied to the composites and matrix with pin-on-disk geometry. The effect of friction pressure and the velocity of friction on friction and wear behavior of composites and matrix is studied. After friction and wear tests, from the wearing surfaces of samples SEM images and EDS analysis are taken.

Keywords: Polymer Matrix Composites, polyamide-6, polyoxymethylene (POM), microstructure, friction and wear.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmam boyunca, gerek derslerimde ve gerekse tez çalışmalarında, bana danışmanlık ederek, beni yönlendiren ve her türlü olanağı sağlayan değerli hocam sayın Yrd. Doç. Dr. İbrahim ÇELİKÜREK' e en içten saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Çok büyük yardımları ve desteği olan, yolun sonuna kadar yanımda olan babam, annem ve kardeşim: Adnan ONAT, Suna ONAT, ve Altan ONAT'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca desteklerini ve yardımlarını esirgemeyen, değerli hocam sayın Yrd. Doç. Dr. Neşe ÖZTÜRK KÖRPE'ye, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği teknisyeni Akif TUTGUN'a, Fen Bilimleri Enstitüsü çalışanları Bülent SÜLÜK ve Sedat ÇOLPAN'a ve arkadaşlarım: Mustafa SARAR, Akın ÖZCAN ve Aytaç BİÇER'e de sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak her daim tezimi yazıp yazmadığımı soran, yazıp bitirmem için bana moral ve destek veren İnanç GÜNER ve eşi Hakan GÜNER'e de sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Niçin Polimer Matris?.....	2
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	4
3. MÜHENDİSLİK POLİMERLERİ	7
3.1. Polioksümetilen (POM).....	7
3.2. Poliamidler (PA).....	7
3.3. Polikarbonat (PC).....	8
3.4. Polietilenler (PE).....	9
3.5. Polipropilen (PP).....	10
3.6. Politetrafloroetilen (PTFE).....	10
3.7. Polivinilklorür (PVC).....	11
3.8. Polietilentereftalat (PET).....	12
3.9. Akrilonitrilbütadienstiren (ABS).....	13
3.10. Polimetilmetakrilat (PMMA).....	13
4. TRİBOLOJİ	15
4.1. Sürtünme.....	16
4.2. Aşınma.....	19
4.3. Aşınma Zaman İlişkisi.....	21
4.4. Aşınma Türleri.....	22
4.4.1. Adhesif aşınma.....	23
4.4.2. Abrasif aşınma.....	23
4.4.3. Yorulma aşınması.....	25

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4.4.4. Korozif aşınma.....	25
4.4.5. Erozyon aşınması.....	26
4.4.6. Tabaka aşınması.....	27
4.5. Aşınmaya Etki Eden Faktörler.....	28
4.5.1. Esas sürtünme elemanına bağlı olanlar.....	28
4.5.2. Karşı elemana bağlı olanlar.....	29
4.5.3. Ortama bağlı olanlar.....	29
4.6. Aşınma Deneyleri Ve Ölçüm Yöntemleri.....	29
4.6.1. Ağırlık farkı metodu.....	31
4.6.2. Kalınlık ölçme metodu.....	31
4.6.3. İz değişiminin izlenmesi metodu.....	31
4.6.4. Radyo izotoplarla ölçme metodu.....	31
5. MATERYAL VE YÖNTEM.....	32
5.1. Deney Numunelerinin Hazırlanması Ve Yapılan Deneysel Çalışmalar.....	32
5.1.1. Mikroyapı çalışmaları.....	35
5.1.2. Sürtünme ve aşınma testleri.....	36
5.1.3. Basma testleri.....	38
6. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	40
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	54
8. KAYNAKLAR DİZİNİ.....	55

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.1. Tribolojik sisteme giren enerji dağılımı.....	15
4.2. Bir tribolojik sistemin şematik gösterimi.....	16
4.3. Statik sürtünme ölçümü için bir tasarım.....	18
4.4. Şematik kayma sürtünmesi ve aşınma test modelleri.....	21
4.5. Aşınmanın zamana bağlı değişimi.....	22
4.6. Abrasif aşınma şeması.....	24
4.7. Korozif aşınma şeması.....	26
5.1. Deneysel çalışmaya ait akım şeması.....	32
5.2. FRITSCH Pulverisette 5 markalı gezegensel hareketli bilyeli değirmen.....	33
5.3. Tozların 300 ve 150µ'luk eleklerden geçirilmesi.....	33
5.4. MSE Extruder 100 markalı vidalı ekstrüzyon cihazı.....	34
5.5. Olympus GX51 markalı optik mikroskop cihazı.....	35
5.6. JEOL JSM 5600LV markalı taramalı elektron mikroskobu cihazı.....	36
5.7. CSM Tribometer markalı aşınma ve sürtünme cihazı.....	37
5.8. CSM Tribometer markalı aşınma ve sürtünme cihazının çalışma prensibi.....	37
5.9. AG-IS 250kN markalı basma testi cihazı.....	38
6.1. Karşı cismin yüzey pürüzlülüğünün ölçümünde kullanılan Mitutoyo yüzey profilometresi.....	40
6.2. Poliamid-6 kompozitinin a)50 büyütmedeki b)100 büyütmedeki c)200 büyütmedeki d)500 büyütmedeki sürtünme ve aşınma deneyleri yapılmadan önceki optik mikroskop görüntüsü.....	41
6.3. POM kompozitinin a)50 büyütmedeki b)100 büyütmedeki c)200 büyütmedeki d)500 büyütmedeki sürtünme ve aşınma deneyleri yapılmadan önceki optik mikroskop görüntüsü.....	42
6.4. Poliamid-6 kompozitinin 10N yük 0,5m/sn hızında gerçekleştirilen deney numunesinin SEM görüntüsü.....	43
6.5. Poliamid-6 kompozitinin 10N yük 1m/sn hızında gerçekleştirilen deney numunesinin EDS analizi.....	44
6.6. Poliamid-6 kompozitinin 10N yük 1m/sn hızında gerçekleştirilen deney numunesinin EDS alan analizi.....	44
6.7. Poliamid-6 kompozitinin 15N yük 0,5m/sn hızında gerçekleştirilen deney numunesinin SEM görüntüsü.....	45

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.8. Poliamid-6 kompozitinin 15N yük 1m/sn hızında gerçekleştirilen deney numunesinin SEM görüntüsü.....	45
6.9. POM kompozitinin 10N yük 0,5m/sn hızında gerçekleştirilen deney numunesinin SEM görüntüsü.....	46
6.10. POM kompozitinin 10N yük 1m/sn hızında gerçekleştirilen deney numunesinin SEM görüntüsü.....	46
6.11. POM kompozitinin 15N yük 0,5m/sn hızında gerçekleştirilen deney numunesinin EDS analizi.....	47
6.12. POM kompozitinin 15N yük 0,5m/sn hızında gerçekleştirilen deney numunesinin EDS alan analizi.....	47
6.13. POM kompozitinin 15N yük 0,5m/sn hızında gerçekleştirilen deney numunesinin SEM görüntüsü.....	48
6.14. POM kompozitinin 15N yük 1m/sn hızında gerçekleştirilen deney numunesinin SEM görüntüsü.....	48
6.15. Basma testleri sonucunda, numunelere ait gerilme-%birim şekil değiştirme diyagramı.....	49
6.16. Poliamid-6 kompozite ait kümülatif ağırlık kaybı ve sürtüme mesafesi grafiği.....	50
6.17. Poliamid-6 matrise ait kümülatif ağırlık kaybı ve sürtüme mesafesi grafiği.....	50
6.18. POM kompozite ait kümülatif ağırlık kaybı ve sürtüme mesafesi grafiği.....	51
6.19. POM matrise ait kümülatif ağırlık kaybı ve sürtüme mesafesi grafiği.....	51
6.20. Numunelerin 10000m aşındırılması sonucunda oluşan toplam kümülatif ağırlık kayıpları.....	52
6.21. İki farklı yük ve iki farklı hızda gerçekleştirilen deneylere ait sürtünme katsayısı değerleri.....	53

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. Polioksimetilenin bazı özellikleri.....	7
3.2. Poliamidin bazı özellikleri.....	8
3.3. Polikarbonatın bazı özellikleri.....	9
3.4. Polietilenlerin bazı özellikleri.....	9
3.5. Polipropilenin bazı özellikleri.....	10
3.6. Politetrafloroetilenin bazı özellikleri.....	11
3.7. Polivinilklorürün bazı özellikleri.....	12
3.8. Polietilentereftalatın bazı özellikleri.....	12
3.9. Akrilonitrilbütadienstirenin bazı özellikleri.....	13
3.10. Polimetilmetakrilatın bazı özellikleri.....	14
5.1. Kompozit malzemedeki kullanılan metal tozlarının oranları.....	34
5.2. Numunelere ait %0,2 akma mukavemeti ve %0,2 akma uzaması değerleri.....	38

1. GİRİŞ

Polimer matrisli kompozitlerde matrisin sürtünme ve aşınma özelliklerine etkisi konulu tezimde, polimer matris olarak polioksümetilen ve poliamid-6 polimerleri kullanılmıştır. Pekiştirici olarakta 1040 çeliği tozu, bronz tozu ve pirinç tozu karışımı ilave edilmiştir. Aynı oranda aynı pekiştiriciler ilave edilen bu kompozitlerin aşınma testlerini de yaparak, katkısız polimerlerine göre spesifik ağırlık kaybı ve sürtünme katsayısı değerlerinde ki değişimleri araştırılmıştır. Bu çalışmanın yapılmasındaki esas ise mühendislik polimerlerinden polioksümetilen ve poliamid-6'nın, çeşitli metal tozu katkılarıyla pekiştirildiğinde, sürtünme ve aşınma özelliklerinde ne gibi değişimler olduğunu görebilmektir.

Bir fren sisteminin esas görevi araç hızını yavaşlatmak, yokuş aşağı yollarda hızı sabit tutabilmek veya aracı istenilen yerde durdurmaktır. Bunun için kinetik enerji, disk ve balata arasındaki sürtünme tarafından ısıya dönüştürülür. (Uygur, 1996)

Fren balataları gereken sürtünme kararlılığı, çalışma ömrü, minimum gürültü ve vibrasyonu karşılamak için üretilmelidir. Sürtünme kararlılığı, fren balatasında sıcak, soğuk, ıslak ve kuru çevre şartlarında ve farklı frenleme hızlarında performansını ifade eder. Bu bakımdan güvenliği etkileyen unsurlardandır. (Boz, 2003)

Frenlemenin verimli bir şekilde yapılabilmesi için, önemli kriterlerden birisi de disk-balata ara yüzeyinde minimum aşınmayı sağlayacak, yüksek ve kararlı sürtünme katsayısıdır. Bunu sağlarsa balata malzemesinin kompozisyonu ve mikroyapısıdır.

Balata malzemeleri üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde, kompozisyonun değiştirilerek, beklenen özelliklerin sağlanması üzerine yoğunlaştığı görülmektedir. Fren balata malzeme özelliklerinin ise, üretim yöntemlerine ve tane boyutlarına bağlı olarak değiştiği yapılan deneyler ile görülmüştür. Kompozisyonlar benzer bile olsa, farklı üretim yöntemleri ile üretilen balatalar çok farklı özellikler gösterebilmektedir. Dolayısıyla bir balata malzemesi tasarımında kompozisyon, üretim ile birlikte bir bütün olarak ele alınıp araştırılmalıdır.

Özellikle gelişen teknoloji ile birlikte taşıtların hızı, büyüklüğü ve ağırlığı artış gösterirken, bu taşıtlarda kullanılan fren sistemlerinin boyutları tam tersine küçülmektedir. Dolayısıyla birim alana düşen enerji miktarı artmıştır. Ayrıca çalışma sıcaklıkları, kullanılan balata malzemesindeki komponentlerin sınırlarını aşmış ve oluşan ısının transferinin sağlanabilmesi için de gerekli yüzey alanı küçülmüştür. Bu şartlar altında fren sisteminin güvenlik sınırlarını geçmeden ve istenilen konforu sağlayacak şekilde çalışabilmesi için araç tipini, yükleme durumunu, kullanım şartlarını da dikkate alarak en uygun balata kompozisyonunun seçilmesi gerekir. (Day, 2000)

1.1. Niçin Polimer Matris?

Metalik balataların gürültü ve vibrasyona meğilli olması diske zarar vermesi gibi dezavantajları vardır. Binek tipi otomobillerde ise genellikle daha az vibrasyon ve gürültü oluşturduğundan düşük metalik veya organik balatalar tercih edilmektedir. Ancak organik balataların da çalışma ömürleri kısadır ve yüksek sıcaklıklardan etkilenirler. Her iki tip balatanın avantajlarından yararlanıp, dezavantajlarını en düşük seviyede tutabilmek için polimer matrisli (yarı-metalik) balatalar geliştirilmektedir. Polimer matrisli balatalar metalik ve organik balataların olumlu özelliklerini taşınmasıyla birlikte, seramik balatalarla mukayese edildiğinde, daha ucuz ve kolay üretilmektedir. (Boz, 2003)

Yaklaşık 25 yıl öncesinde, frenlerde balata malzemesi olarak kullanılan asbestin frenleme için istenen optimum şartları sağlamasına rağmen, frenleme sırasında oluşturduğu tozların, havaya karışarak canlıların akciğerlerinde kansere neden olması sebebiyle Avrupa'da yasaklanmıştır. (Paustenbach vd., 2003)

Asbestin yerine kullanılması için geliştirilen ve sağlık açısından bir sorun teşkil etmeyen polimer esaslı fren balataları farklı çalışma şartları altında, güvenlik sınırlarını geçmeden çalışabilmelerinin yanında, kararlı bir sürtünme katsayısına ve düşük aşınma miktarlarına sahip olmaları nedeniyle günümüzde en çok tercih edilen malzemelerden birisi haline gelmiştir. (Blau, 2001)

Asbestli balatalar ile karşılaştırıldıklarında ise, uygun bir kompozisyon tasarımı ile daha yüksek performans gösterebilmektedir. (Osterle vd., 2001)

Bazı polimer ve polimer esaslı kompozitler iyi aşınma ve sürtünme özelliklerine sahiptirler. Poliamid (PA), polioksimetilen (POM) üstün aşınma ve sürtünme özellikleri ile en çok tercih edilen mühendislik polimerlerindendir. (Ünlü vd., 2009)

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Yapılan benzer çalışmalar da incelendiğinde; Ünal vd., 2010 yılında çok yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (ÇYMAPE) ve poliamid-6 (PA-6) mühendislik polimerlerinin aşınma ve sürtünme davranışlarını incelemiştir. Yapmış oldukları deneylerde, kullanılan polimerlerin sürtünme ve aşınma davranışlarına kayma hızı ve uygulanan yükün etkisini çalışmışlardır. Yapmış oldukları çalışmada, deneylerini üç farklı yük (50N, 100N ve 150N) ve dört farklı hızda (0,5m/sn, 1m/sn, 1,5m/sn ve 2m/sn) gerçekleştirmişlerdir. ÇYMAPE ve PA-6 polimerlerinin sürtünme katsayısı ve spesifik aşınma oranı uygulanan yükün artması ve kayma hızının artmasıyla azaldığını gözlemlemişlerdir. (Ünal vd.,2010)

Yine Ünal vd., 2014 yılında bronz katkılı politetrafloroetilen (PTFE) kompozitlerin paslanmaz çelik malzemeye karşı aşınma ve sürtünme davranışlarını incelemiştir. Yapmış oldukları çalışmada üç tip (katkısız politetrafloroetilen polimeri, %25 bronz katkılı PTFE ve %40 bronz katkılı PTFE) matris kullanmışlar ve deneylerini kuru kayma şartları altında paslanmaz çelik malzemeye karşı yapmışlardır. Aşınma ve sürtünme testlerini ise üç farklı yükte (50N, 100N ve 150N) (Ünal vd., 2014) ve üç farklı kayma hızında (1m/sn, 1,5 m/sn ve 2m/sn) gerçekleştirmişlerdir. Deneyin sonucunda ise %40 bronz katkılı PTFE kompozitinin sürtünme katsayısı değerleriyle spesifik aşınma oranı değerlerinin, diğer matrislere göre daha düşük olduğunu tespit etmişlerdir. (Ünal vd.,2010)

2015 yılında da Ünal vd., katı yağlayıcı katkılı poliamid mühendislik polimerinin mekanik ve tribolojik performanslarını incelemiştir. Yapmış oldukları çalışmada, katkısız poliamid-6, %15 grafit katkılı poliamid-6 kompozit ve %15 grafit ve %6 vaks katkılı poliamid-6 kompozit kullanmışlardır. Aşınma testlerini ise 0,5m/sn kayma hızında, üç farklı yük uygulayarak (10N, 20N ve 30N), oda sıcaklığında deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Yapmış oldukları deney sonucunda da %15 grafit ve %6 vaks katkılı poliamid-6 kompozitinin tribolojik özelliklerinin katkısız poliamid-6 ve %15 grafit katkılı poliamid-6 kompozitine göre daha iyi olduğunu ek olarak vaks ilave edilmesiyle, kompozitin sürtünme katsayısı ve spesifik aşınma oranının azaldığını tespit etmişlerdir. (Ünal vd., 2015)

Ulçay vd., ise 2004 yılında üç boyutlu tesadüfi dağılımlı aramid novoloid ve cam lif takviyeli polimerik kompozit malzemelerin aşınma direncini incelemişlerdir. Yapmış oldukları çalışmada üç farklı hacimsel orana sahip (%1, %3 ve %5) kevlar-49, novoloid (kynol), e-cam lifi takviyesi ve grafit tozu, alüminyum tozu dolgu malzemesi karışımı numuneleri aşınma testlerine tabi tutmuşlardır. Sonuçlarını da deney numunelerinin ölçülen ağırlık kaybı ile değerlendirmişlerdir. Yapmış oldukları çalışma sonucunda kevlar-49 ve e-cam lifleriyle takviyelendirilen kompozit malzemedeki aşınma direncinin yüksek olduğu hatta hacimsel oranının artırılmasıyla aşınma direncinin daha da yükseldiğini, dolgu malzemelerinden grafit tozunun ise aşınma direncini düşürdüğünü ve son olarak alüminyum tozunun aşınma direncinin yükselmesine katkısının olmadığı, alüminyum tozu oranının artmasının, aşınma direncini düşürdüğünü tespit etmişlerdir. (Ulçay vd., 2004)

Hatipoğlu ise 2014 yılında politetrafloroetilen (PTFE) katkılı polifitalamid (PPA) polimer karışımlarının mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemiştir. Yapmış olduğu çalışmada, katkısız polifitalamid (PPA) polimeri ile ağırlıkça %5 politetrafloroetilen (PTFE) katkılı polifitalamid (PPA) kompozitini kullanmıştır. AISI 440C paslanmaz çelik yüzeyine karşı çalıştırarak aşınma ve sürtünme davranışlarını incelemiştir. Aynı zamanda aşınma ve sürtünme davranışlarına uygulanan yükün etkisini de araştırmıştır. Tribolojik deneyler için üç farklı yük (20N, 30N ve 40N) ile 0,5m/sn kayma hızını seçmiştir. Yapmış olduğu deneyler sonucunda da, katkısız PPA polimeri ile PTFE katkılı PPA kompozitinin sürtünme katsayılarının ve spesifik aşınma oranlarının uygulanan yükün artmasıyla arttığını gözlemlemiştir. (Hatipoğlu, 2014)

Kuş vd., 2014 yılında uçucu kül cenosphere-kolemanit takviyeli polimer matrisli fren balata malzemesinin sürtünme ve aşınma özelliklerini incelemişlerdir. Yapmış oldukları çalışmada uçucu kül cenosphere temelli fiber ile güçlendirilmiş ve ağırlıkça farklı oranlarda (%0-20) kolemanit içeren hibrit polimer matrisli fren balataları üretmişlerdir. Üretilen fren balata numunelerinin sertlik, yoğunluk gibi bazı mekanik özelliklerini de belirlemişlerdir. Deneyler sonucunda kolemanit miktarının artması ile numunelerin sertlik değerinin düştüğü, yoğunluk değerinin ise arttığını ayrıca numuneler içerisinde en düşük aşınma miktarını kolemanit içermeyen numune gösterirken, sıcaklığa bağlı en yüksek ortalama sürtünme katsayısı değerini de %15 kolemanit içeren numunenin gösterdiğini tespit etmişlerdir. (Kuş vd., 2014)

Yaşar vd., 1998 yılında sürekli cam elyaf takviyeli polyester matrisli kompozitlerde elyaf hacim oranı ve elyaf doğrultusunun tribolojik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Yapmış oldukları çalışmada elyaf olarak silan kaplanmış sürekli cam elyaf (e-camı), matris olarakta polyester kullanılmak suretiyle, sıcak presleme yöntemiyle kompozit üretimini gerçekleştirmişlerdir. En iyi aşınma dayanımını, elyaflara paralel doğrultuda ve %15 elyaf içeren kompozitte elde etmişlerdir. (Yaşar vd., 1998)

Solmaz vd., 2011 yılında Al_2O_3 partikülleriyle takviyelendirilmiş polyester matrisli kompozitin abrasiv aşınma davranışını incelemişlerdir. Yapmış oldukları çalışmada matris malzemesi olarak Erco Polyester E-6 döküm tipi polyester reçine, sertleştirici olarak Erco Mek Peroksit-Ece Perox ve hızlandırıcı olarakta Erco Kobalt Oktaat (%6)-Ece Dryer kullanmışlardır. Karışım oranı olarak 50g reçineye 4g sertleştirici ve 4g hızlandırıcı seçmişlerdir. Matris malzemesine ağırlıkça yedi farklı oranda (%1, %2, %5, %10, %15, %20 ve %25) ve üç farklı boyutta (30 μ m, 45 μ m ve 60 μ m) Al_2O_3 partikül takviyesi yapmışlardır. Al_2O_3 partikül takviye oranı arttıkça uzamanın azaldığını, çekme gerilmesinde ise net bir değişimin gözlenmediğini, ayrıca Al_2O_3 partiküllerinin tane boyutunda mekanik özellikler üzerinde belirgin bir değişim yapmadığını tespit etmişlerdir. Aşınma verileriyle mekanik özellikler arasında tam bir ilişkinin kurulamayacağını belirlemişlerdir. Al_2O_3 takviye oranı ve tane boyutu arttıkça ağırlık kaybında elde edilen düşüşün aşınma hızını azalttığını, aşınma sırasında ise uygulanan yük arttıkça ağırlık kaybindan elde edilen artışında, aşınma hızını arttırdığını tespit etmişlerdir. (Solmaz vd., 2011)

3. MÜHENDİSLİK POLİMERLERİ

Mühendislik polimerleri yüksek mukavemet, sertlik, kimyasallara karşı direnç vb. özellikler içeren polimerlerdir. Bu gruba poliamidler, polioksimetilenler, polikarbonatlar, poliesterler örnek olarak verilebilir. (Uygur, 1996)

3.1. Polioksimetilen (POM)

Asetal formaldehitten hazırlanmış mühendislik polimeri olup, polioksimetilen (POM) olarak ta isimlendirilmektedir. Yüksek rijitlik, mukavemet ve sertlik özelliklerini barındırır. Bununla birlikte yüksek ergime sıcaklığı, düşük nem alma özellikleri ve çözücülere karşı dayanıklı olmalarıyla da bilinirler. Bu özellikleri sayesinde polioksimetilen, başta otomotiv sektörü olmak üzere birçok alanda tercih edilen malzeme konumundadır. Polioksimetilen ayrıca termoplastikler arasında en sert ve mukavemetli olma özelliğine de sahiptir. Çizelge 3.1.'de polioksimetilenin bazı özellikleri verilmiştir. (Grover, 1996)

Çizelge 3.1. Polioksimetilenin bazı özellikleri. (Şafak, 2001)

Polimer	Polioksimetilen (OCH ₂) _n
Sembol	POM
Elastisite Modülü	3500 MPa
Çekme Mukavemeti	70 MPa
Uzama	%25-%75
Ergime Sıcaklığı	180 °C
Özgül Ağırlığı	1,42 g/cm ³
Kristalinite Derecesi	%75

3.2. Poliamidler (PA)

Poliamidler günümüzde en çok talep gören mühendislik polimerlerindedir. Poliamidlerin en çok tercih edileni ise nylonlardır. Sanayide en çok kullanılan tipleri nylon 6 ve nylon 6,6'dır (Sayıların değeri, monomerinde bulunan karbon atomu sayısıdır). Poliamidler kuvvetli ve oldukça elastiktir. (Grover, 1996)

Poliamidler birçok farklı sanayide kullanılmaktadır. Bunlar arasında makine konstrüksiyonu, inşaat makineleri, paketleme ve doldurma üniteleri, tekstil makineleri, gemi imalatı, otomotiv sanayi, madencilik, gıda sanayi, tıbbi cihazlar sayılabilir. Bu sanayi kollarında ise çeşitli silindirler, ip gericiler, ip olukları, kılavuz ve burçlu kaymalı yataklar, yatak segmanları, sevk yatakları, kayar bloklar ve plakalar, aşınma şeritleri, koruma şeritleri, boru dirsekleri, konik ve normal dişli çarklar, helezon dişlisi, vana yatakları, kesme ve basma plakaları, seramik ve beton kalıplar vb. birçok uygulamasında kullanılırlar. Çizelge 3.2.'de poliamidin bazı özellikleri verilmiştir. (Temiz, 2004)

Çizelge 3.2. Poliamidin bazı özellikleri. (Şafak, 2001)

Polimer	Nylon $[(CH_2)_6(CONH)_2(CH_2)_4]_n$
Sembol	PA
Elastisite Modülü	700 MPa
Çekme Mukavemeti	70 MPa
Uzama	%300
Ergime Sıcaklığı	150 °C
Özgül Ağırlığı	1,14 g/cm ³
Kristalinite Derecesi	Yüksek Kristalinite

3.3. Polikarbonat (PC)

Polikarbonat, gösterdiği iyi mekanik özellikleriyle beraber, mükemmel sürtünme direncine de sahiptir. Ayrıca sertliği yüksek bir malzemedir. Isıl direnci en iyi olan termoplastiktir ve 125 °C'ye kadar olan yerlerde kullanılabilir. Şeffaftır ve aleve karşı da oldukça dayanıklıdır. Çizelge 3.3.'te polikarbonatın bazı özellikleri verilmiştir. (Grover, 1996)

Çizelge 3.3. Polikarbonatın bazı özellikleri. (Şafak, 2001)

Polimer	Polikarbonat
Sembol	PC
Elastisite Modülü	2500 MPa
Çekme Mukavemeti	65 MPa
Uzama	%110
Ergime Sıcaklığı	230 °C
Özgül Ağırlığı	1,2 g/cm ³
Kristalinite Derecesi	Amorf

3.4. Polietilenler (PE)

Kolay işlenebilirliği ve düşük maliyetli olması sebebiyle polietilenler, tüm polimerler içinde ki en çok kullanılan türdür. Düşük yoğunluklu (LDPE) ve yüksek yoğunluklu (HDPE) olmak üzere iki farklı çeşidi bulunmaktadır. LDPE, düşük kristalinite derecesine ve düşük yoğunluğa sahiptir. HDPE ise daha lineer bir yapıda olup, yüksek kristalinite derecesi ve yüksek yoğunluğa sahiptir. Bu özellikleri sebebiyle HDPE, LDPE'ye göre yüksek ergime sıcaklığına ve daha kuvvetli bir yapıya sahiptir. Her iki tip için de bazı özellikler Çizelge 3.4.'te verilmiştir. (Grover, 1996)

Çizelge 3.4. Polietilenlerin bazı özellikleri. (Şafak, 2001)

Polimer	Polietilen	Polietilen
Sembol	LDPE	HDPE
Elastisite Modülü	150 MPa	700 MPa
Çekme Mukavemeti	15 MPa	30 MPa
Uzama	%100-%500	%20-%100
Ergime Sıcaklığı	115 °C	135 °C
Özgül Ağırlığı	0,92 g/cm ³	0,96 g/cm ³
Kristalinite Derecesi	%55	%92

3.5. Polipropilen (PP)

Polipropilen, enjeksiyon kalıplamada en çok kullanılan polimerlerden birisidir. Polimerler içinde en hafifidir. Mukavemet-ağırlık oranı oldukça yüksektir. PP, yüksek ergime noktasıyla sterilize edilecek ürünlerin kullanılmasında, yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Ayrıca özel olarak, bozunmadan uzun çevrimler çalışabilen, tek parça menteşelerde de kullanılmaktadır. Propilenin bazı özellikleri Çizelge 3.5.'te verilmiştir. (Grover, 1996)

Polipropilenin diğer bir avantajı ise, geri dönüşümde mekanik özelliklerini büyük ölçüde kaybetmemesidir. Özellikleri bir miktar azalsa da diğer malzemelerle kıyaslandığında, ilk özelliklerine benzer sonuçlar vermektedir. Ayrıca polimerlerden beklenen renk uyumu gibi özelliklerde de polipropilen, geri dönüşümden sonra diğer malzemelere göre daha iyidir. Enjeksiyon prosesi sırasında meydana gelen temiz artıkların tekrar kullanılmasını sağladığından, polipropileni geri dönüşümde en çok tercih edilen termoplastik yapmaktadır. (Garret vd., 1998)

Çizelge 3.5. Polipropilenin bazı özellikleri. (Şafak, 2001)

Polimer	Polipropilen (C ₃ H ₆) _n
Sembol	PP
Elastisite Modülü	1400 MPa
Çekme Mukavemeti	35 MPa
Uzama	% 10-%500, katkılara bağlı
Ergime Sıcaklığı	176 °C
Özgül Ağırlığı	0,9 g/cm ³
Kristalinite Derecesi	Yüksek

3.6. Politetrafloroetilen (PTFE)

Başka hiçbir polimer malzemenin bir arada sahip olamadığı kimyasallara karşı direnç, nem ve ortam koşullarından etkilenmeme, esneklik, geniş çalışma sıcaklığı aralığı, düşük sürtünme katsayısı, yapışmayan yüzey ve üstün elektriksel direnç özelliğine sahip olan politetrafloroetilen, insan vücudundan tutunda uzaya kadar neredeyse tüm sektörlerde

kullanılmaktadır. Polimer kimyasındaki gelişmeler nedeni ile sayıları yediye ulaşmıştır. Ayrıca ticari açıdan çok büyük öneme sahiptir. Polimer ailesiyle ortak noktası ise yapılarındaki karbon flor bağının özelliği ile kimyasallara karşı yüksek direnç ve geniş çalışma sıcaklığı aralığına sahip olmasıdır. PTFE sembolü ile isimlendirilen politetrafloroetilenin diğer adı ise teflondur. Çizelge 3.6.'da teflonun bazı özellikleri verilmiştir. (Grover, 1996)

Çizelge 3.6. Politetrafloroetilenin bazı özellikleri. (Şafak, 2001)

Polimer	Politetrafloroetilen (C_2F_4) _n
Sembol	PTFE
Elastisite Modülü	425 MPa
Çekme Mukavemeti	20 MPa
Uzama	%100-%300
Ergime Sıcaklığı	327 °C
Özgül Ağırlığı	2,2 g/cm ³
Kristalinite Derecesi	Yüksek, %95

3.7. Polivinilklorür (PVC)

Polivinilklorür PVC adıyla, ticari manada en çok kullanılan polimerlerdir. PVC ısıya ve ışığa dayanıksız bir polimer olmasına rağmen, çeşitli katkı maddeleri ilavesiyle ortam şartlarına dayanıklı hale getirilir. Genellikle boru yapımında ve yiyecek sektöründe kullanılmaktadır. Çizelge 3.7.'de polivinilklorür için bazı özellikler verilmiştir. (Grover, 1996)

Çizelge 3.7. Polivinilklorürün bazı özellikleri. (Şafak, 2001)

Polimer	Polivinilklorür
Sembol	PVC
Elastisite Modülü	2800 MPa
Çekme Mukavemeti	40 MPa
Uzama	%2
Ergime Sıcaklığı	212 °C
Özgül Ağırlığı	1,4 g/cm ³
Kristalinite Derecesi	Amorf

3.8. Polietilentereftalat (PET)

Poliesterler, karakteristik ester bağları (CO-O) ile oluşturulmuş polimerlerdir. Çarpaz bağların oluşup oluşmamasına göre, termoplastik veya termoset olabilmektedirler. En sık kullanılan poliester ise polietilentereftalattır (PET). PET için Çizelge 3.8.'de bazı özellikleri verilmiştir. Soğutma şekline göre de amorf ya da yarı-kristalin olabilmektedirler. Hızlı soğutulurlarsa amorf bir yapı kazanırlar ve oldukça şeffaf bir görünüm alırlar. Poliester lifleri düşük nem alma özelliğine sahiptir. (Grover, 1996)

Çizelge 3.8. Polietilentereftalatın bazı özellikleri. (Şafak, 2001)

Polimer	Polietilentereftalat
Sembol	PET
Elastisite Modülü	2300 MPa
Çekme Mukavemeti	55 MPa
Uzama	%200
Ergime Sıcaklığı	265 °C
Özgül Ağırlığı	1,3 g/cm ³
Kristalinite Derecesi	Amorf veya kristalin

3.9. Akrilonitrilbütadienstiren (ABS)

Göstermiş olduğu üstün mekanik özelliklerinden dolayı, mühendislik alanında sıkça kullanılmaktadırlar. ABS iki fazlı termoplastik olup, bir fazı sert polimer stirenakrilonitril, diğer ise stirenbütadien kopolimeridir. Polimerin ismi de, bu üç monomerin adından verilmiştir ve içerisinde değişik oranlarda bulunmaktadır. Çizelge 3.9.'da ABS'nin bazı özellikleri verilmiştir. (Grover, 1996)

Çizelge 3.9. Akrilonitrilbütadienstirenin bazı özellikleri. (Şafak, 2001)

Polimer	Akrilonitril (C ₃ H ₃ N), Bütadien (C ₄ H ₆) ve Sitiren (C ₈ H ₈) terpolimeri
Sembol	ABS
Elastisite Modülü	2100 MPa
Çekme Mukavemeti	50 MPa
Uzama	%10-%30
Ergime Sıcaklığı	265 °C
Özgül Ağırlığı	1,06 g/cm ³
Kristalinite Derecesi	Amorf

3.10. Polimetilmetakrilat (PMMA)

Akrilikler, akrilik asitten (C₃H₄O₂) türetilmiş polimerlerdir. Akrilikler içindeki en önemli termoplastik, polimetilmetakrilat (PMMA)'dır ve plexiglas olarak bilinmektedir. Polimetilmetakrilat ile ilgili bazı özellikler Çizelge 3.10.'da verilmiştir. PMMA, lineer bir polimer olup sindiyotiktir. Bu sebepten dolayı amorf yapıdadır. En önemli özelliklerinden birisi de optik uygulamalarda cama rakip olmasını sağlayan saydamlık özelliğidir. Ancak cama nazaran daha kötü bir çizilme direncine sahiptir. Diğer bir akrilik tipi ise, tekstil sanayinde kullanılan poliakrilonitril (PAN)'dır ve orlon adıyla da bilinmektedir. (Grover, 1996)

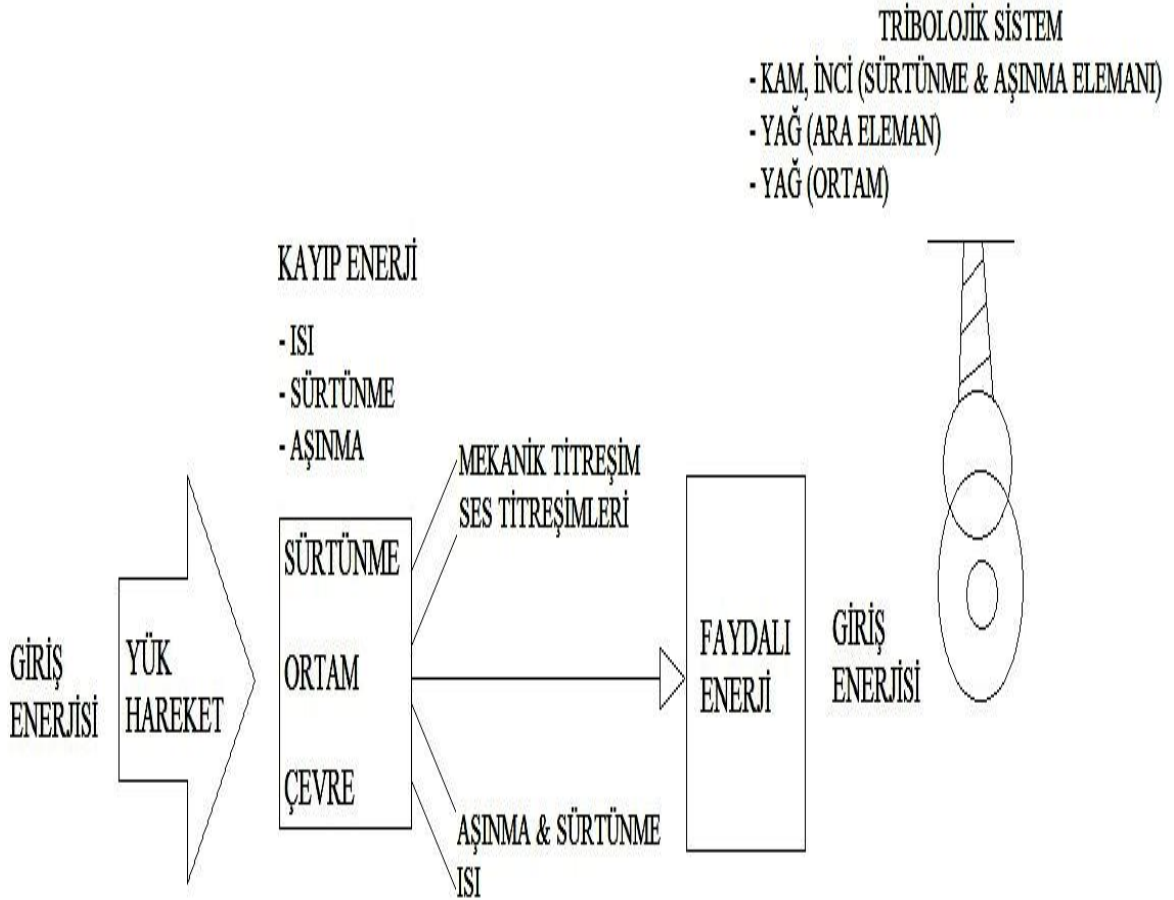
Çizelge 3.10. Polimetilmetakrilatın bazı özellikleri. (Şafak, 2001)

Polimer	Polimetilmetakrilat
Sembol	PMMA
Elastisite Modülü	2800 MPa
Çekme Mukavemeti	55 MPa
Uzama	%5
Ergime Sıcaklığı	200 °C
Özgül Ağırlığı	1,2 g/cm ³
Kristalinite Derecesi	Amorf

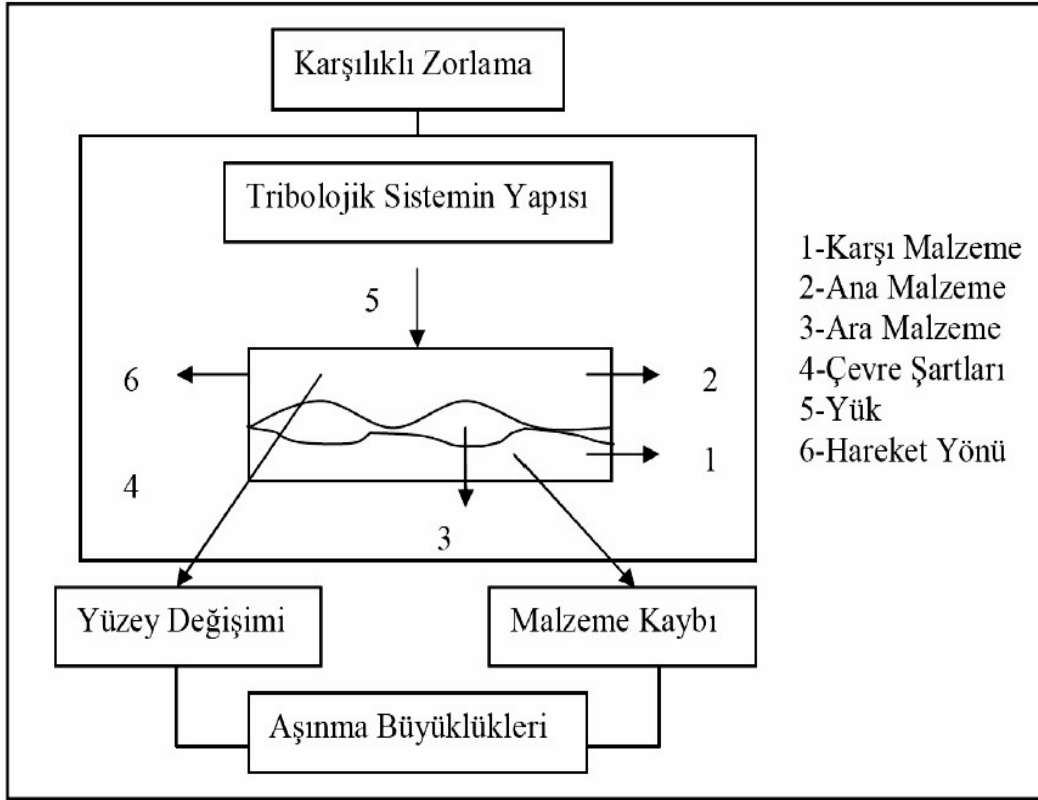
4. TRİBOLOJİ

Triboloji, “bağıl hareket içindeki birbirlerine temas eden yüzeylerin ve bunlarla ilgilenen olayların bilimi ve tekniği” olarak adlandırılmaktadır. Yunanca’da sürtünme anlamına gelen “tribos” sözcüğünden esinlenen triboloji; sürtünme, aşınma ve yağlamanın bilimsel incelenmesini ve tribolojik bilgilerin teknik olarak uygulanmasını içermektedir. (Zumgahr, 1987)

İçerisinde aşınma ve sürtünme olaylarının gerçekleştiği teknik sistemlere tribolojik sistem denilir. Mühendislik malzemelerinin, sürtünme ve aşınma davranışlarının araştırılmasında mekanik sistemleri de bir tribolojik sistem olarak dikkate almak gerekmektedir. Çünkü aşınma olayı, bir bütünlük içinde ele alınmalıdır. (Odabaş vd., 1995)



Şekil 4.1. Tribolojik sisteme giren enerji dağılımı. (Odabaş vd., 1995)



Şekil 4.2. Bir tribolojik sistemin şematik gösterimi. (Odabaş vd., 1995)

4.1. Sürtünme

Katı objenin, kendisiyle temas halinde olan başka bir katı objeyle bağlı hareketine veya hareket ihtimaline karşı gösterdiği dirence sürtünme denmektedir. Birbiri ile temas halinde olan yüzeyler arasındaki sürtünme hareketi kayma, yuvarlanma veya bu iki hareketin bileşimi biçimindedir. (Karamış vd., 1988)

Mekanik sürtünme teorisinde temel sürtünmeler şunlardır:

- Katı cisimler arasındaki sürtünme, görünen temas alanından, yani sürtünme kuvveti, sürtünen yüzeyler arasındaki temas alanından bağımsızdır.
- Sürtünme kuvveti, cisimlere gelen normal kuvvet ile doğru orantılıdır ve aralarında da sürtünme katsayısı olarak bilinen sabit bir oran bulunmaktadır. (Akkurt, 1992)

Sürtünme katsayısının, kayma mesafesi ve süresine, sertliğe, temas yüzeyinin ortalama tane boyutuna ve yüzey pürüzlülüğüne bağlı olduğu çeşitli deneylerle ispatlanmıştır. Bu katsayı, artan kayma mesafesi ve süresi, yüzey tabakasının artan tane boyutu büyüklüğü ile belirli bir değere kadar artar ve daha sonra sabit bir değerde yaklaşık olarak devam eder. (Odabaş, 1991)

Sürtünme, temas halinde olan yüzeylerin durumuyla da ilgilidir. Gerçekte, temas eden yüzeyler görünen geometrik yüzeyden daha küçüktür. Bu nedenle de sürtünme görünen yüzeyden bağımsız, fakat gerçek temas alanını oluşturan pürüzlere bağlıdır. Temas eden parçalarda oluşan basınç, birbirine değen pürüz noktalarında malzemenin akma sınırını aşabilmekte ve böylece de birbirine temas eden yüzeylerindeki pürüzler normal kuvvetin etkisi ile sıkışarak deforme olurlar ve bunun sonucunda temas yüzeyleri de büyümektedir. Temas eden yüzeylerin büyümesi sonucunda birbirlerine yaptıkları basınç da o oranda büyümektedir. (Selçuk, 1991)

Birbiriyle temas halindeki iki cismin arasında meydana gelen bağıl hareket ile cisimlerin yüzeylerinin birbirlerini etkilemesi sonucu aşınma meydana gelmektedir. (Akkurt, 1992)

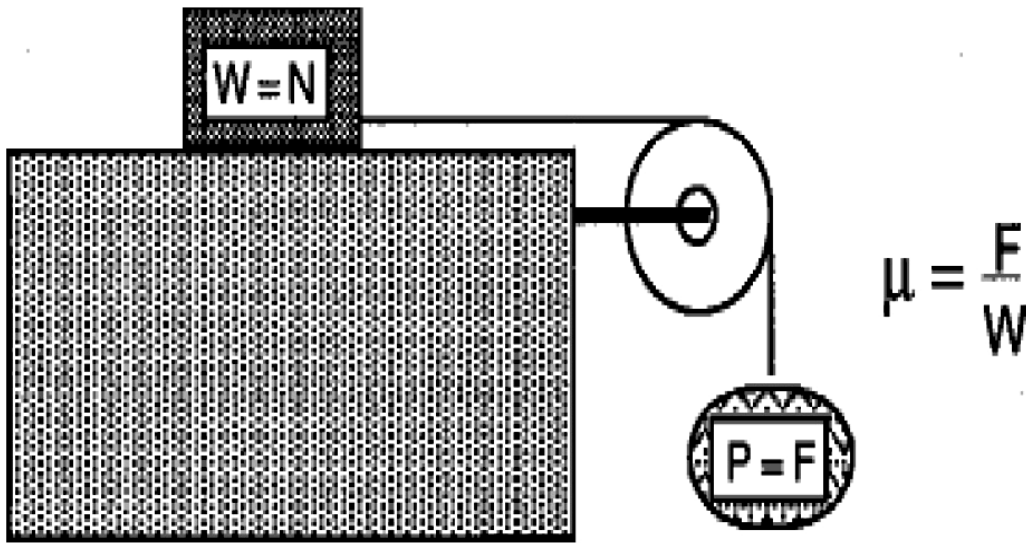
Metaller arasındaki sürtünme basit bir yapıda görünür, aslında çok karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu olayları, açıklayabilmek ve formüle edebilmek için tarihsel gelişim içerisinde, birçok teori ileri sürülmüştür. (Moore, 1975)

Amantons (1699), cisimleri rijit kabul ederek, sürtünmenin izahını, “Kayma esnasında parçaları, yüzey pürüzleri yüksekliğince kaldırmak için gerekli enerji” şeklinde yapmış ve bütün cisimler için sürtünme katsayısını $1/3$ olarak vermiştir. (Ulukan, 1993)

Coulomb (1875), Amantons’un bulduğu sonuçları doğrulamış ve ayrıca sürtünme katsayısının hızdan bağımsız olduğunu da gözlemlemiştir. Bunlara ilaveten Coulomb, statik sürtünme katsayısını kaymaya başlatma kuvveti ile kinetik sürtünme katsayısını da hareketi devam ettirme kuvveti ile açıklamıştır. “Coulomb Kanunu” adı verilen bu teoriye göre:

- Sürtünme kuvveti, normal yükü orantılıdır.
- Sürtünme kuvveti, geometrik temas alanına bağlı değildir.
- Sürtünme kuvveti, kayma hızına bağlı değildir.
- Statik sürtünme katsayısı, dinamik sürtünme katsayısından daha büyüktür.

Bu değerlendirmeler sonucunda şu matematiksel ifade çıkarılmıştır: Sürtünme katsayısının ölçümünde kaymayı başlatmak için F sürtünme kuvveti ve normal N normal kuvvet olarak iki büyüklük bulunur. Sürtünme katsayısının ilk ölçümlerinin bazıları Şekil 4.3.'te görülen ağırlıklar ve makaralı sistem düzenlenerek yapılmıştır. (Hutchings, 1992)



Şekil 4.3. Statik sürtünme ölçümü için bir tasarım. (Hutchings, 1992)

Kaymaya başlayıncaya kadar, yük (F) artırılır ve kayma başladığı andaki uygulanan yük sürtünme kuvveti (F_s) olarak belirlenir. Normal kuvvet ağırlığa eşit ($W=N$) olarak kabul edilir. Statik sürtünme katsayısı (μ_s);

$$\mu_s = F_s / N \quad (4.1)$$

Kinetik sürtünme katsayısı (μ_k) ölçümü için ise, makaralı ipe bir ağırlık ilave edilir ve salıverilir. Eğer kayma durursa, sabit kayma hızı elde edilinceye kadar yeni bir deneme için daha fazla ağırlık uygulanır. Bu durumda son yük kinetik sürtünme kuvvetidir (F_k). Kinetik sürtünme katsayısı (μ_k);

$$\mu_k = F_k / N \quad (4.2)$$

4.2. Aşınma

Aşınma, dış etkenler sonucunda temas yüzeylerinde meydana gelen fiziki değişimlerdir. Mühendislik malzemesinde görülen yıpranmaların aşınma olarak kabul edilebilmesi için aşağıdaki şartların oluşması gerekmektedir.

- Mekanik bir etkenin olması,
- Sürtünmenin (bağlı hareketin) olması,
- Yavaş ve devamlı olması,
- Malzeme yüzeyinde değişiklik meydana getirmesi,
- İsteğimiz dışında meydana gelmesidir.

Aşınma, sürtünme durumunda bulunan yüzeylerde mekanik etkenler ile istenilmediği halde malzemedan kopan kayıptır. Bu şekilde, yüzeylerin ilk şekilleri bozulmaktadır, parçalar arasındaki boşluklar büyümektedir. (Akkurt, 1992)

Sürtünerek çalışan bütün makine parçalarında kaçınılmaz olan ve karmaşık bir sistem özelliği gösteren aşınma, sanayide birçok tribolojik sistemlerde görülen korozyonun ve yorulmanın yanı sıra üçüncü büyük sorundur. Bundan dolayı günümüz teknik sistemlerindeki araştırmalar, sürtünmeyi ve aşınmayı azaltma ve kontrol etme çalışmaları

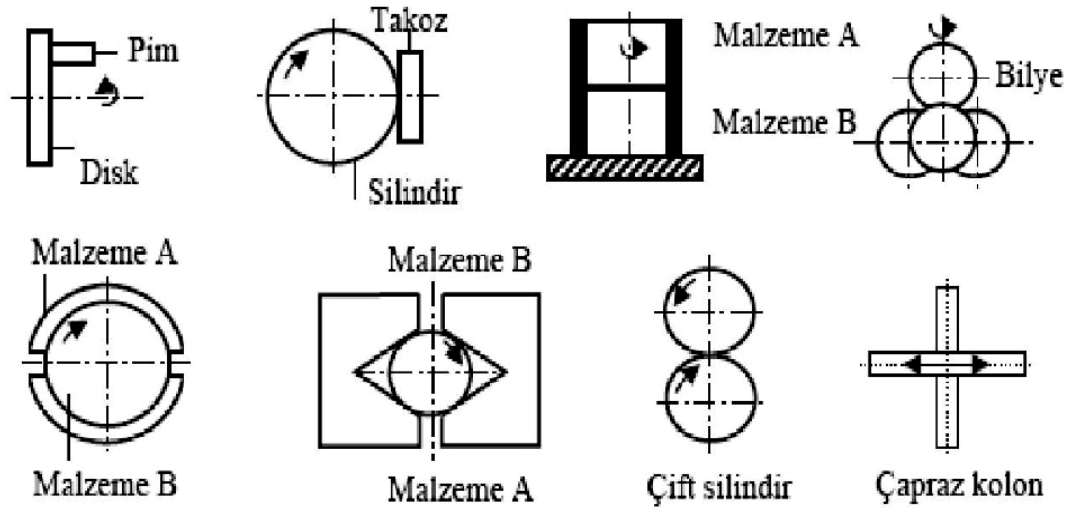
şeklindedir. Sürtünmenin ve aşınmanın azaltılmasıyla malzeme kaybı önlenince, boyut hassasiyeti saklanırken enerjiden doğan israfa önlenmiş olur. (Hutchings, 1992)

Aşınma, ne bir malzeme ne de bir malzemenin yüzey özelliğidir. Bilakis bir sistem özelliğidir. Bu nedenle çok değişkenli bir fonksiyon olan aşınmanın sürekli incelenmesi lazımdır. Aşınmanın başlayabilmesi ve devam edebilmesi için sürtünme muhakkak olmalıdır. Sürtünen iki cismin temas alanı, görülen temas alanından küçüktür. (Cöcen vd., 1997)

İmalat tekniğinde tam olarak pürüzsüz, düz bir yüzey elde edilmesi imkansızdır. Yüzeyi elde etmek için kullanılan kesici malzemeler ne kadar itinayla kullanılırsa kullanılsın, işlem sonucu elde edilen yüzey üzerinde mutlaka belirli büyüklükte pürüzlülük, yani yüzeyde birkaç mikron yüksekliğinde mikroskobik pürüzler kalmaktadır. (Portakal, 1974)

Yüzeylerin birbirlerine temas etmesi halinde ise yüzeylerdeki karşılıklı pürüzler birbirinden etkilenir. İlk temas birkaç pürüz tepeleri arasında meydana gelmektedir. Pürüz tepeleri arasındaki girintiler temas etmemektedir. Gerçek temas alanı, temasta olan pürüzlerin toplam alanıdır. Yük arttıkça ilk temas eden pürüzler şekil değişimine uğrar ve bunun sonucunda da kısa boyutlu yeni pürüzler, birbiri ile temasa başlar. Yüklemenin temas etmesi ile de pürüz sayısı azalmaktadır ve gerçek temas alanı, görülen temas alanına yaklaşır. Temasta olan cisimlere bağlı hareket yaptırabilmek için sistemde bir enerji oluşur. Bu enerji yük ve hareket şeklindedir. Giriş ile çıkış arasındaki fark mekanik titreşime, ısı, ses ve sürtünme enerjisine ve aşınmaya dönüşmektedir. (İpek, 1987)

Aşınmanın gerçek sistemlerde ise belirlenebilmesinin zorluğu, bir kısmı standartlaştıran model cihazların geliştirilmesine yol açmıştır. Model cihazlarda triboloji sistemi oluşturan unsurların, gerçek sisteme uygun şekilde oluşturulması, sonuçların tekrarlanabilir olması bu cihazlardan istenen özelliklerdir. Kayma, sürtünme ve aşınma test cihazı modelleri tribolojik prensiplere göre Şekil 4.4.'te şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Şematik kayma sürtünmesi ve aşınma test modelleri. (Yılmaz, 1997)

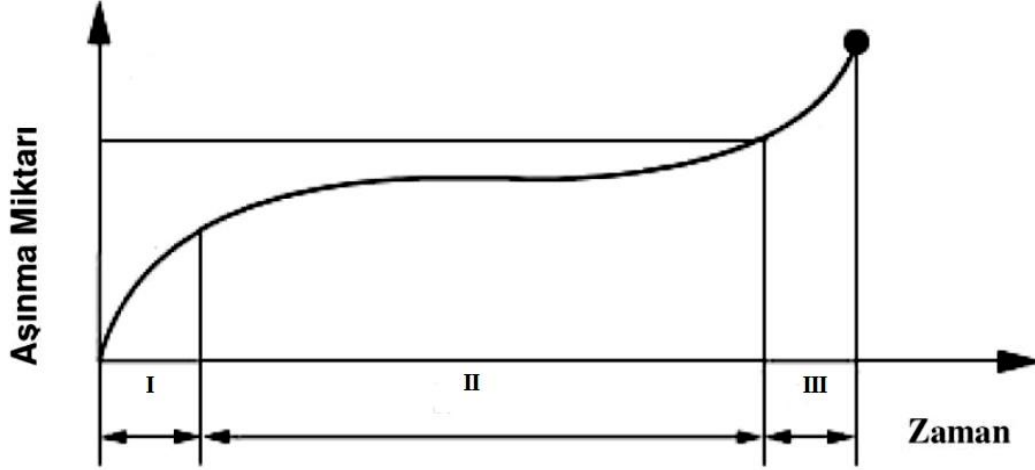
Model aşınma test cihazlarıyla yapılan testlerin amaçları genelde şöyle sıralanabilir;

- Sistem elemanlarının verimini, ömrünü, güvenilirliğini, fonksiyonunu, bakım yapılıp yapılmaması gerektiğini belirlemek, kalite kontrolünü yapmak,
 - Malzemelerin ve yağlayıcıların tribolojik davranışlarını belirlemek,
 - Malzeme kayıplarını araştırmak,
 - Yeni bir malzeme, veya sürtünme ve aşınma azaltıcı yöntemleri geliştirebilmektir.
- (Yılmaz, 1997)

4.3. Aşınma Zaman İlişkisi

Aşınma zaman bağlantısı Şekil 4.5.'te görüldüğü gibi üç safhadan ibarettir; I. safhada makinelerin ilk çalıştırılmaları esnasında parçaların birbiri üzerinde ki hareketiyle şiddetli bir aşınma meydana gelir. Rodaj adı verilen bu safhada parçalar birbirine alıştırlır. Burada meydana gelen aşınma parçaların sonraki aşınma safhalarını da etkilemesi nedeniyle rodaj işleminin iyi yapılması ve kısa sürede gerçekleşmesi önemlidir.

II. safhada çalışma devam etmektedir ve temas bölgelerinde aşınma oluşmaktadır. Bu aşınma makine elemanlarının ömürlerinin tespitinde çok önemli bir etkidir. Rodajdan başlayarak III. safhaya kadar aşınma doğal olarak devam etmektedir. (Yılmaz, 1997)



Şekil 4.5. Aşınmanın zamana bağlı değişimi. (Yılmaz, 1997)

4.4. Aşınma Türleri

Birçok araştırmacı, malzemelerin aşınması üzerine yaptıkları araştırmalar sonucunda, aşınmayı çeşitli sınıflara ayırmışlardır. (İpek, 1992)

- Adhesif aşınma
- Abrasif aşınma
- Yorulma aşınması
- Korozif aşınma
- Erozyon aşınması
- Tabaka aşınması

4.4.1. Adhesif aşınma

Adhesif aşınma, moleküler kuvvetlerin etkisi altındaki temas yüzeylerinde oluşan bölgesel kaynaklı bağlarının kırılması sonucu meydana gelmektedir. Kayma sürtünmesi yapan, metalografik yapıları birbirine benzeyen iki metalin yüzeyleri arasında adhesif çekim kuvveti bulunmaktadır. Bu kuvvetin oluşması içinde moleküllerin yaklaştırılması gerekmektedir. Temas halindeki yüzeyler pürüzlerle etkileşmelerinden, metal ağırlığı veya etkileyen bir kuvvet, temasta olan çok küçük pürüz tepelerine çok yüksek basınç olarak etki etmektedir. Bu basınç, yani bu noktalarda oluşan gerilme, pürüzlerin akma sınırını aştığında plastik deformasyona, pürüzlerin birbirini çizmesine, yarmasına veya sıvanıp kaynaklanmalarına neden olmaktadır. Ayrıca pürüzlerin deformasyonu ile oluşan yapı adhesif temas yüzeyi boyunca yayılmaktadır. Çiftin karşılıklı hareket etmesi halinde de yüzeyde bulunan absorbe olmuş sıvı ve gaz molekülleri ve oksit tabakaları parçalanarak aşınma çiftinde soğuk kaynaklaşmayı oluşturmaktadır. Kayma hareketi sırasında bu noktalar koparak aşınmaya neden olmaktadır. Bu tip malzeme kaybı adhesif aşınmayı oluşturmaktadır. (Odabaş, 1991)

Adhesif aşınma sırasındaki oksitlenme olayını, korozif aşınma ile karıştırmamak gerekir. Yukarıda anlatılan, parçalanma ile malzeme moleküllerinin direk temasa geçmelerine imkan verir. Bunun neticesinde de bölgesel kaynak bağları oluşmaktadır (soğuk kaynama). Bu sırada eğer izafi hareket de varsa yüzeydeki sıcaklık yükselir ve ergime noktasına kadar ulaşabilir. Böylece kaynama yerinden veya metal yüzeyinden bir miktar parça kopmaktadır. Bu metalik parçacıklar, ara yüzeyde serbest parçacıklar halinde kalabilecekleri gibi metallerden birbirine bağlı şekilde de bulunabilirler. Her iki durumda da malzeme kaybı (aşınma) meydana gelmekle beraber, ikinci durumda malzemelerin birinden diğerine malzeme transferi söz konusudur. (Hurricks, 1973)

4.4.2. Abrasif aşınma

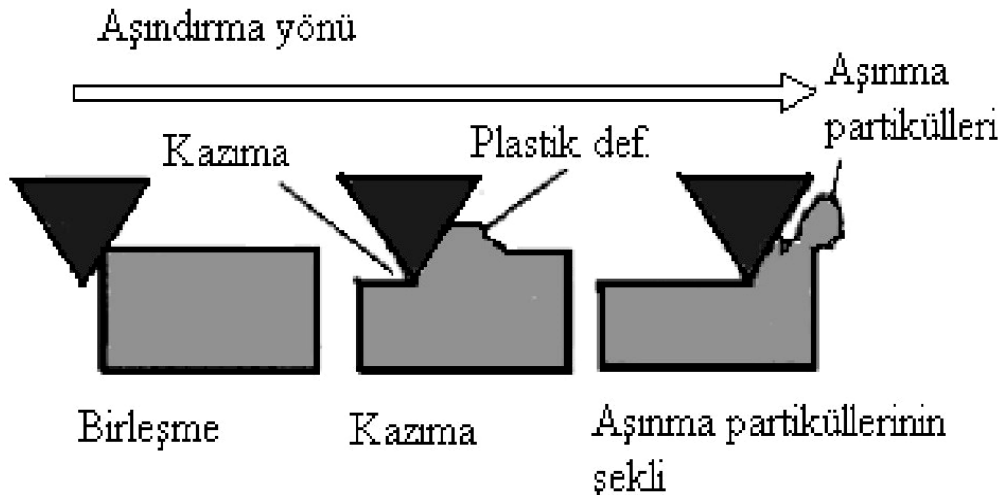
Abrasif aşınma, uygulanan yük ve hareketin etkisiyle, sürtünen iki cisimden daha sert olanının, pürüzleri veya taneleri vasıtasıyla diğerini çizerek üzerinden mikro talaş kaldırması olayıdır. Bu tarif, katı/katı, katı/mineral, katı/sıvı gibi birçok sürtünme elemanlarında meydana gelen abrasif aşınmayı içermektedir. (Karamış, 1986)

Sürtünen cisimlerin, direkt olarak karşılıklı etkileşimleri sonunda meydana gelen abrasif aşınma, “İki Cisimli Abrasif Aşınma”dır. Eğer ara yüzeyde sürtünme elemanlarını çizerek tahrip eden sert tanecikler de bulunuyorsa bu tür aşınmaya “Üç Cisimli Aşınma” denmektedir. Bu cisimler ara yüzeye dışarıdan girebilecekleri gibi aşınma sonucu oluşan parçacıklar da olabilmektedir. (Habig, 1980)

Khruschov ve Babichev, aşındırıcı tanelerle temas eden yüzeyde aşağıdaki proseslerin meydana geldiğini tespit etmişlerdir.

- Basıncın etkisiyle plastik şekil değiştirme sonucunda çiziklerin oluşması (metal kalkmadan).
- Mikro talaş şeklinde metal parçacıkların ayrılması (yüzeyden kopması).

Abrasif aşınma, kesilme, kazınma, tek veya tekrarlanan deformasyon gibi yüzeyi tahrip eden çeşitli mekanizmalar ile meydana gelmektedir. Abrasif aşınma şeması Şekil 4.6.’da görülmektedir. Abrasif aşınma için en önemli şart, sürtünme sırasında, aşındırıcı sertliğinin, aşınan malzeme sertliğinden daha fazla olması gerekmektedir. (Weissbach, 1977)



Şekil 4.6. Abrasif aşınma şeması. (Weissbach, 1977)

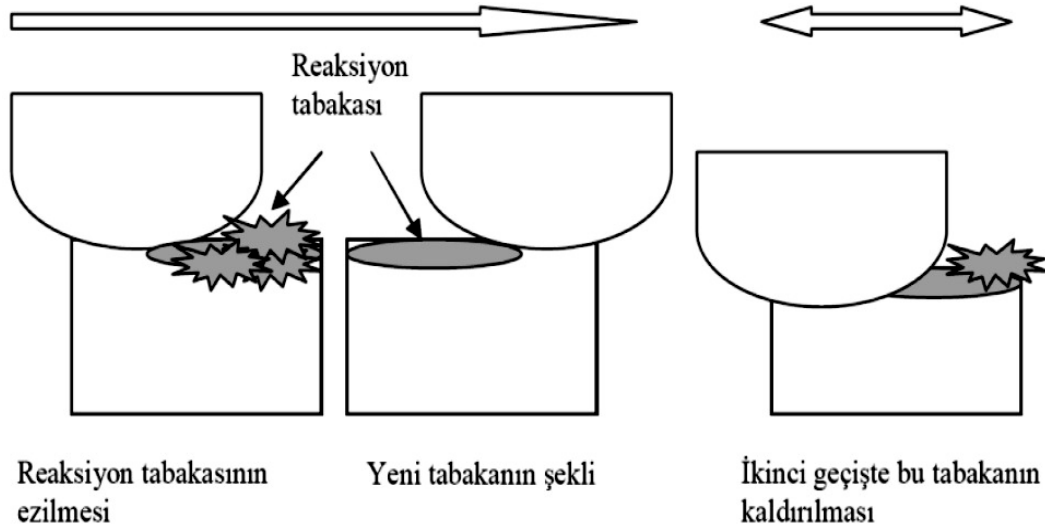
4.4.3. Yorulma aşınması

Mühendislik malzemelerinde yorulma olayı, tekrarlanan zorlanmalar altında ve zamanla meydana gelmektedir. Bu olay daima yüzeyden başlamaktadır. Yüzey bölgesi titreşimli bir zorlamaya maruz kalırsa veya sürtünme elemanları tekrarlanan gerilmelerle etkileştiklerinde bu gerilmelerin sebep oldukları mikro çatlaklar vasıtasıyla yorulma aşınması dediğimiz pulcuklar şeklinde malzeme ayrılmaları meydana gelmektedir. Bu olay esnasında iç yapıda parçalanmalar ve yırtılmalar meydana gelerek yüzeyden kısmi çözümler oluşmaktadır. (Gürleyik, 1980)

Maksimum kopma gerilmelerinin bulunduğu yerde ise plastik deformasyon ve dislokasyon olaylarına bağlı olarak çok küçük boşluklar meydana gelmektedir. Bu boşluklar zamanla yüzeye doğru ilerlemekte, dahada büyümekte ve nihayet yüzeyde küçük çukurlar meydana getirmektedir. Pitting adı verilen bu aşınma tipi, genellikle dişli çarklarda, rulmanlı yataklarda ve kam mekanizmaları gibi yuvarlanma hareketi yapan elemanların yüzeylerinde meydana gelmektedir. (Karamış, 1986)

4.4.4. Koroziyon aşınma

Temas yapısı farklı tabakaların oluşması ve sürtünme hareketi ile bu tabakaların parçalanıp yüzeylerinde oluşan mekanik yıpranmaların yanı sıra kimyasal ve elektrokimyasal tahribatların oluşmasına korozyon denir. Metal veya metal alaşımlarının çevreleri ile (katı, sıvı ve gaz ortamlar) kimyasal veya metalurjik ilişkiden dolayı yüzeylerinde aşınma sonucu meydana gelen hasara koroziyon aşınma denir. Bu aşınmanın gerçekleşebilmesi için, korozyonun ve sürtünme hareketinin olması gerekmektedir. Koroziyon aşınma, abrasif ve adhesif aşınmalar ile birlikte oluşabilir. Sürtünen yüzeylerde oluşan korozyon ürünü, sert parçacıklar halinde koparsa aşınma daha da şiddetlenmektedir. (Tekin, 1986)



Şekil 4.7. Koroziif aşınma şeması. (Tekin, 1986)

Korozyonlu aşınmayı önleyebilmek için;

- Malzeme seçimine dikkat etmek,
- Yüksek sertliğe ve korozyon direncine sahip kaplama malzemeleriyle yüzeyi kaplamak,
- Ortamın hava ile temasını kesmek,
- Kromat ve nitratlar gibi önleyici kullanmak, katodik koruma gibi yöntemler uygulamak gerekmektedir. (Koç, 2004)

4.4.5. Erozyon aşınması

Malzeme yüzeyi ile temas ortamı arasındaki bağıl hızın yüksek değerlere ulaştığı sistemlerde malzeme yüzeylerinde görülen bozulma şekline erozyon denir. Erozyon, içinde katı tanecikler ihtiva eden bir sıvının, katı cismin yüzeyine çarpması ile meydana gelir. Erozyon, (yıkama veya hidro abrasif aşınma) akıcı maddelerin oluşturduğu aşınmadır. Sıvılar ve gazlar akış sırasında yüzeyden parçacıklar kopmasına ve girdaplar etkisiyle dalgalı bir yüzeyin meydana gelmesine neden olmaktadır. Özellikle doğrusal akımın saptırıldığı ve bozulduğu yerlerde aşınma yüksek olmaktadır. Akışkanın birlikte

sürüklediği maddeler, mesela hava içerisindeki tozlar, su içerisindeki kumlar ve bunlar içindeki oksitler özellikle aşındırmayı artırıcı yönde etki yaparak malzemenin iç yapısına etki edip, yüzeyden parçacıkların ayrılmasına neden olmaktadır. (Lülsdorf, 1978)

4.4.6. Tabaka aşınması

Temas eden iki cismin izafi hareketi sırasında, hareketin başlatılması ve devamı için gerekli kuvvetler farklıdır. Bu iki sürtünme hali arasındaki direnç farkı özellikle küçük kayma hızlarında sürtünme titreşimlerinin doğmasına sebep olmaktadır. Bu titreşimler, tribolojik zorlanmaların işaretidir. Tribolojik zorlanmalar sırasında bir takım olaylar meydana gelmektedir. Temas yüzeyleri arasında küçük genlikteki titreşimlerin sebep olduğu bir oksit filmi oluşmaktadır. Bu oluşum sürtünme ile hızlanmaktadır. Yüzeyde absorbe edilmiş bazı maddelerin reaksiyonu sonucunda meydana gelen oksit tabakası da tribo oksidasyon olarak ifade edilmektedir. Gaz veya sıvı bir atmosferdeki oksijenin kısmi basıncı oksit oluşum hızına, mukavemetine ve oksit şekline etki etmektedir. (Tekin, 1986)

Malzeme yüzeyinde mevcut olan ve sürtünme olayı esnasında meydana gelen tabaka, ana malzemenin aşınmaya karşı olan direncini önemli ölçüde etkilemektedir. Birçok hallerde çok zararlı olabilen adhesif aşınmaya, reaksiyon tabakası oluşturmak amacıyla, engel olma yoluna gidilmektedir. Fakat, genel olarak yüzeyde bu şekilde oluşan tribo oksidasyon tabakası, sürtünme ile parçalanarak aşındırıcı etkisi göstermektedir. Dolayısıyla aşınmayı hızlandırıcı rol oynamaktadır. Parçalanarak serbest hale geçen oksit parçacıklarının kalktığı bölgede, tekrar oksitleme görülmekte ve olay devamlılık kazanmaktadır. (Akkurt, 1990)

Tabaka aşınması, malzemenin bölgesel olarak aşırı zorlanan yerlerinde, fiziksel veya kimyasal değişimler sonucunda meydana gelen bir aşınma türüdür. Genellikle uzay araçlarının sıcaklığa dayanıklı kabuğunda ve fren balatalarında görülmektedir. (Lülsdorf, 1978)

4.5. Aşınmaya Etki Eden Faktörler

Yapılan çeşitli çalışmalar neticesinde aşınmaya etki eden faktörler belirlenmiştir. Ancak aralarındaki ilişki tam olarak tespit edilememiştir. Aşınmaya etki eden değişkenler ise şunlardır; (Karamış, 1986)

4.5.1. Esas sürtünme elemanına bağlı olanlar

- Malzeme Cinsi
- Kimyasal Bileşimi
- Mikro Yapısı
- Hacimsel ve Yüzeysel Sertliği
- Elastiklik Modülü
- Akma ve Kırılma Özellikleri
- Yüzeyin Pürüzlülük Durumu
- Şekli ve Boyutları
- Soğuk Şekillendirme Durumu
- Gördüğü Isıl İşlem

4.5.2. Karşı elemana bağlı olanlar

- Aşındırıcı Tane Büyüklüğü
- Tane Şekli
- Tane Dağılımı

4.5.3. Ortama bağlı olanlar

- Nem
- Sıcaklık

Farklı yüksek basınç ve çalışma hızlarında yapılan deneyler neticesinde sürtünen yüzeyin artması ile aşınmanın hızlandığı, aynı yükte çalışma hızının yükseltilmesi ile aşınmanın da arttığı tespit edilmiştir. Basınç artışına paralel olarak, çalışma hızının da yükselmesi aşınmayı hızlandırmaktadır. Ayrıca sürtünmeyi artıran yük, aşınmanın artmasına da neden olmaktadır. (Karamış, 1986)

Metal-metal sürtünme aşınmasında aşınma miktarı, zamana ve kayma yoluna bağlı olarak belirtilir. Aşınma miktarları aşınan parçanın şekil ve ağırlık değişimine ait sayısal bir büyüklük olup aşınma (olay) ve aşınma miktarı (sonuç) olarak birbirinden ayırt edilmesi gerekmektedir. Buna göre aşınma miktarı parçanın ağırlık kaybı (gravimetrik aşınma) ve hacimsel (volumetrik) aşınma veya sürtünme yüzeyinin yükseklik kaybı olarak ifade edilmektedir. (Arıkan, 1988)

4.6. Aşınma Deneyleri Ve Ölçüm Yöntemleri

Gelişen ve değişen endüstri ve sanayi alanlarında kullanılan alet ve makinelerde istenilen en önemli özellik kullanım ömürleridir. Makine parçalarının çabuk aşınması makinenin ömrünü kısaltarak maliyetini arttırdığı gibi, onarım için geçen sürede üretimin önemli ölçüde aksamasına neden olmaktadır. Bu nedenle makine imalatında aşınmaya

maruz kalabilecek yerlerde aşınma direnci yüksek malzemeler kullanılmalıdır. Bu malzemelerin tespiti içinde birçok laboratuvar testlerinin yapılıp daha sonra kullanılması gerekmektedir.

Bu malzemelerin tespiti için de birçok laboratuvar deneylerinin yapılması gerekmektedir. Laboratuvar şartlarında yapılan deneylerde, ana malzemenin bir modeli ile çalışır. Bu model, basit geometrik şekle sahip olup, fazla bir masrafa gerek kalmadan üretilebilir ve daha sonra bir deney cihazına takılarak her türlü aşınma ölçme işlemleri bunun üzerinde yapılabilir.

Aşınma deney yöntemlerini genel olarak iki grupta toplamak mümkündür;

- Yağlamalı ve yağlamasız bir ortamda ana ve karşı malzemelerinin adhesif aşınma değerlerinin ölçüldüğü deneyler,
- Katı, sıvı ve gaz halindeki maddelerin etkisi altında yalnız karşı malzemenin aşınma değerinin ölçüldüğü deneylerdir. (Aytaç, 2007)

ASLE (American Society of Lubrication Engineers, 1978) tarafından yüz kadar test sistemi belirlenmiştir. Bu aşınma testlerinde, aşınma ölçüm yöntemleri olarak bilinen ağırlık farkı, kalınlık farkı, iz değişimi ve radyo izotop gibi metotlar kullanılmaktadır. Bu metotlar aşağıdaki sırayla açıklanmaktadır. Bir sürtünme sisteminde, aşınma miktarlarını ölçmek için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Sürtünme elemanlarının malzeme özelliklerine ve sistemin yapısına bağlı olarak yöntem seçimi yapılmalı veya beklenenleri yerine getirecek şekilde yöntem kombinasyonu geliştirilmesi yoluna gidilmelidir. Bir ölçme yönteminde öncelikle yüksek hassasiyet, kolay ve seri uygulama ve son olarak ekonomik olması beklenen özelliklerdendir. (İzciler vd., 2001)

4.6.1. Ağırlık farkı metodu

Ekonomik olması ve ölçülen büyüklüğün alet duyarlılık kapasitesi dahilinde bulunması sebebiyle en çok kullanılan yöntemdir. Ağırlık kaybının ölçülmesi için 10^{-4} veya 10^{-5} hassasiyetindeki teraziler kullanılmaktadır. Aşınma miktarı gram veya miligram olarak bulunur. Deney numunelerinin her ölçümü için numunenin çıkartılıp ölçüm yapılması gerekmektedir. Yani numune yerindeyken üzerinden ölçüm alınamaması, bu yöntemin dezavantajıdır. (Keleştimur, 1989)

4.6.2. Kalınlık ölçme metodu

Aşınma esnasında oluşacak boyut değişikliğinin ölçülmesi, başlangıç değerinin karşılaştırılması ile elde edilmektedir. Kalınlık olarak tespit edilen değer, hacimsel olarak tespit edilip birim hacimdeki aşınma miktarı elde edilmektedir. Kalınlık, hassas ölçme aletleri ile $\pm 1\mu\text{m}$ duyarlılıkta ölçülebilmektedir. (Keleştimur, 1989)

4.6.3. İz değişiminin izlenmesi metodu

Sürtünme yüzeyinde plastik deformasyon metodu ile, geometrisi belirli bir iz oluşturmaktadır. Deney boyunca bu izin karakteristik bir boyutunun (çapının) değişimi ölçülür. Uygulamalarda iz bırakıcı olarak en çok kullanılan alet Vickers veya Brinell sertlik ölçme ucudur. Elmas piramit veya bilyanın bıraktığı iz boyutlarındaki değişme mikroskop vasıtasıyla ölçülerek belirlenmektedir. (Keleştimur, 1989)

4.6.4. Radyo izotoplarla ölçme metodu

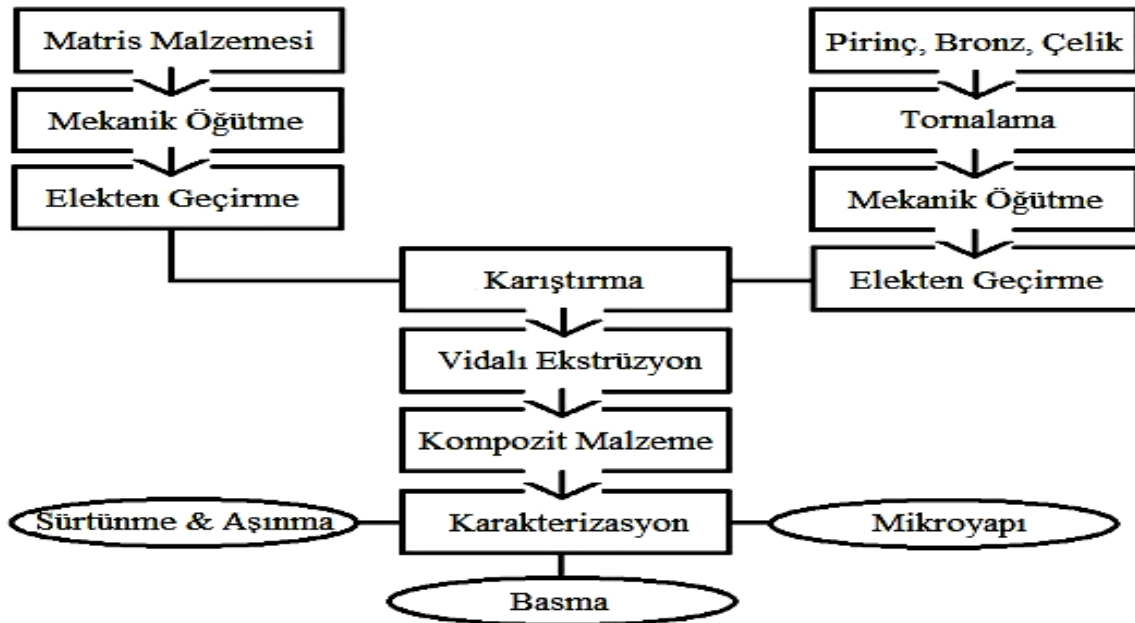
Sürtünmenin yüzey bölgesinin proton, nötron veya α - parçacıkları ile bombardıman edilerek radyoaktif hale getirilmesi esasına dayanmaktadır. Aşınma miktarının yüksek derece hassasiyetle ölçülmesi ve sistem içerisinde çalışma şartlarını değiştirmeden ölçü alınabilmesi, en büyük avantajıdır. (Keleştimur, 1989)

5. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada ekstrüzyon yöntemi ile metal partiküller ile pekiştirilmiş polimer matrisli kompozitler üretilmiş ve üretilen kompozitlerin sürtünme-aşınma performansları test edilmiştir. Matris malzemesi olarak poliamid-6 ve polioksimetilen kullanılmıştır. Poliamid-6 ve polioksimetilenin matrisler olarak tercih edilmelerinin nedeni, üstün aşınma ve sürtünme özellikleri ile en çok tercih edilen mühendislik polimerlerinden olmalarıdır. Her bir matrise ağırlıkça %80 oranında metal partikülleri ilave edilmiştir. Üretilen bu kompozitlerin sürtünme ve aşınma davranışları belirlenerek, pekiştirilmemiş polimer matris numuneleri ile de ayrıca mukayesesi yapılmıştır. Numunelerden aşınma ve sürtünme deneyleri sonrasında, aşınan yüzeylerden SEM görüntüleri alınmıştır ve EDS çalışmaları yapılmıştır.

5.1. Deneysel Numunelerinin Hazırlanması Ve Yapılan Deneysel Çalışmalar

Ekstrüzyon yöntemiyle, metal tozları ile pekiştirilmiş polimer matrisli kompozitleri ve pekiştirilmemiş polimer ihtiva eden matris numunelerini üretmek için Şekil 5.1.'deki akım şemasında anlatılan yol izlenmiştir;



Şekil 5.1. Deneysel çalışmaya ait akım şeması.

Torna tezgâhından alınan metal talaşları ve granül halindeki polimerler, Şekil 5.2.'de gösterilen FRITSCH Pulverisette 5 markalı gezegensel hareketli bilyeli değirmende ayrı ayrı öğütülerek toz haline getirilmiştir.



Şekil 5.2. FRITSCH Pulverisette 5 markalı gezegensel hareketli bilyeli değirmen.

Öğütülen metal talaşları, Şekil 5.3.'te gösterilen 300 ve 150 μ 'luk eleklerde elenmiş, 150 μ 'dan büyük ve 300 μ 'dan küçük boyutlarındaki metal tozları alınmış ve bu tozlar pekiştirici olarak kullanılmıştır. Ayrıca, kompozit üretiminde homojen karışımı sağlayabilmek için iri parçacıklar şeklindeki polimer hammaddeleri de öğütülerek ince partiküller haline getirilmiştir.



Şekil 5.3. Tozların 300 ve 150 μ 'luk eleklerden geçirilmesi.

Kompozit malzemesinin hazırlanmasında kullanılan metal tozlarının oranları Çizelge 5.1.'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Kompozit malzemede kullanılan metal tozlarının oranları.

1040 Çeliği Tozu	Pirinç Tozu	Bronz Tozu
%40	%30	%30

Hazırlanan polimer tozları ve %80 metal tozu karşımı içeren metal-polimer karşımı tozları Şekil 5.4.'te görülen MSE Extruder 100 markalı vidalı ekstrüzyon cihazından geçirilerek kompozit numuneleri üretilmiştir. Pekiştirici içermeyen polimer numuneleri de aynı şekilde üretilmiştir.



Şekil 5.4. MSE Extruder 100 markalı vidalı ekstrüzyon cihazı.

Üretilen kompozit ve matris numunelerinin homojen olmasını sağlamak için iki kez ekstrüzyon cihazından geçirilmiş, düzgün bir yüzey ve çapta çubuklar elde edebilmek için de, 8mm çapındaki kalıp içinden çıkarılanlar numune olarak kullanılmıştır. 8mm

apındaki numuneler tornada iřlenerek 5mm çapına dūřurūlmūřtur. Sebebi ise numunelerin, ařınma ve sūrtūnme cihazındaki basıncını arttırarak, yūzeyinin tam temas etmesini saęlamaktır. Kullanılan ekstrūzyon cihazında 3 farklı sıcaklık bōlgesi bulunmaktadır. Bunlar; besleme bōlgesi, karıřtırma bōlgesi ve kalıp sıcaklıęı bōlgesidir. Ekstrūzyon cihazında ūretilen tūm numunler için tercih edilen optimum besleme bōlgesi, karıřtırma bōlgesi ve kalıp sıcaklıęı bōlgesi sıcaklıkları sırasıyla 130, 200 ve 90  C olarak ayarlanmıřtır. Vida devir hızı ise 30 devir/dakika olarak seçilmiřtir.

5.1.1. Mikroyapı alışmaları

Numunelerin optik mikroyapı gōrūntūleri Őekil 5.5.'te gōrūlen Olympus GX51 marka optik mikroskop ile tespit edilmiřtir.



Şekil 5.5. Olympus GX51 markalı optik mikroskop cihazı.

Numunelere ait taramalı elektron mikroskop gōrūntūleri ve sūrtūnme testinden sonraki ařınma yūzeyi gōrūntūleri de Őekil 5.6.'da gōrūlen JEOL JSM-5600LV marka cihazdan alınmıřtır.



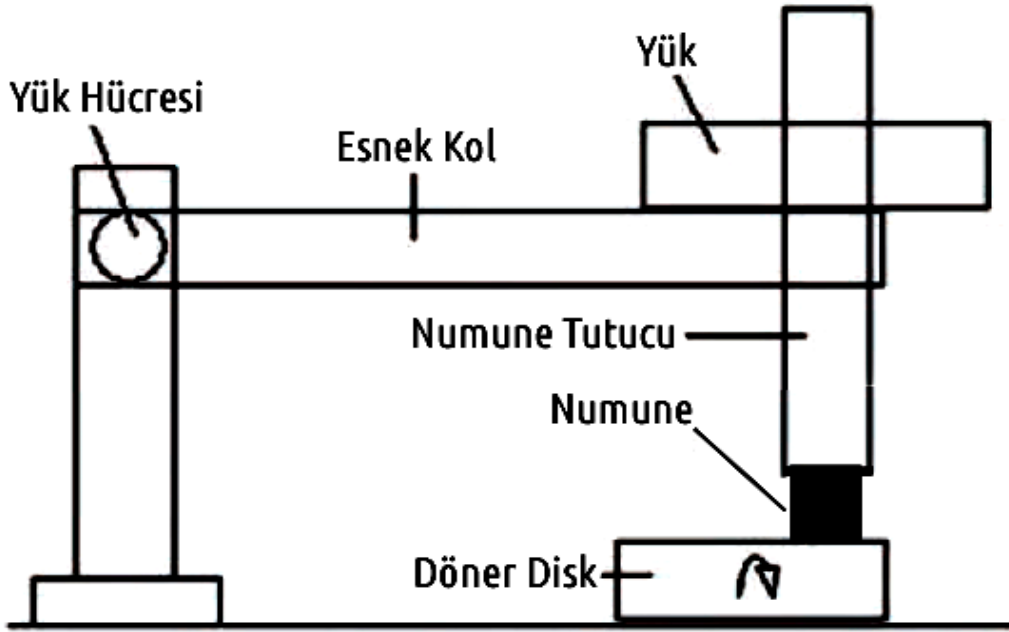
Şekil 5.6. JEOL JSM-5600LV markalı taramalı elektron mikroskobu cihazı.

5.1.2. Sürtünme ve aşınma testleri

Sürtünme ve aşınma testlerinde Şekil 5.7.'de görülen CSM Tribometer markalı cihaz kullanılmış ve testleri Şekil 5.8.'de görülen pin-on-disk geometrisinde yapılmıştır. Üretilen polimer matrisli kompozit malzemelerin sürtünme ve aşınma performansını tespit etmek için kuru sürtünme testleri yapılmış, sürtünme katsayısı ve aşınma miktarları belirlenmiştir. İki farklı yük (10N ve 15N) ve iki farklı sürtünme hızında (0,5m/sn ve 1m/sn) deneysel çalışmalar yapılmıştır. Yapılan testlerde 10000 metre sonucunda, test numunelerinde meydana gelen toplam ağırlık kaybı miligram olarak ölçülmüştür. Kuru sürtünme testlerinde 50mm çapında GG25 gri dökme demirden üretilmiş karşı malzeme kullanılmıştır. Her bir deney öncesinde diskin yüzeyi parlatılarak yüzey pürüzlülüğü $R_a=1,8\mu\text{m}$ seviyesine getirilmiştir.



Şekil 5.7. CSM Tribometer markalı aşınma ve sürtünme cihazı.



Şekil 5.8. CSM Tribometer markalı aşınma ve sürtünme cihazının çalışma prensibi.

5.1.3. Basma testleri

Bütün numunelere Şekil 5.9.'da görülen Shimadzu AG-IS 250kN markalı cihazda, eksenel kuvvet uygulanarak 2mm/dak basma hızında ve oda sıcaklığında basma testleri yapılmıştır.



Şekil 5.9. Shimadzu AG-IS 250kN markalı basma testi cihazı.

Çizelge 5.2.'de numelere ait %0,2 akma mukavemeti ve %0,2 akma uzaması değerleri verilmiştir.

Çizelge 5.2. Numunelere ait %0,2 akma mukavemeti ve %0,2 akma uzaması değerleri.

	%0,2 Akma Mukavemeti	%0,2 Akma Uzaması
Poliamid Kompozit	39	17,1
Poliamid Matris	35	21
POM Kompozit	34	13,8
POM Matris	48	21,6

Çizelge 5.2.'den elde edilen verilere göre; poliamid-6 matrisine katılan pekiştiriciler sayesinde malzemedeki %0,2 akma mukavemeti değeri artış gösterirken,

%0,2 akma uzaması değeri azalış göstermiştir. POM matrisine katılan pekiştiriciler ise malzemedeki hem %0,2 akma mukavemeti değerini hem de %0,2 akma uzaması değerini düşürmüştür. Şekil 6.15.'ten en yüksek mukavemet değerine POM polimerin sahip olduğu görülmektedir. Polimer malzemeye pekiştirici olarak metal tozlarının ilave edilmesi poliamid-6 polimerde deformasyon davranışında bir farklılık oluşturmazken, POM polimerde fazla deformasyona uğrayamadan kırılmaya yol açmıştır. Bu durum POM ile metal partikülleri arasında iyi bir arayüzey bağının oluşmadığını gösterir. Pekiştirici oranının çok yüksek olması matrisin mukavemetini de düşürmüştür. Poliamid-6 polimerde ise ilave edilen pekiştirici metal tozları ile matris malzemesi arasında iyi bir arayüzey bağı oluşmuş ve ilave edilen pekiştirici mukavemette az bir miktar artışa neden olmuştur. Bu bulgular aşınma testindeki sonuçlar ile de uyuşmaktadır.

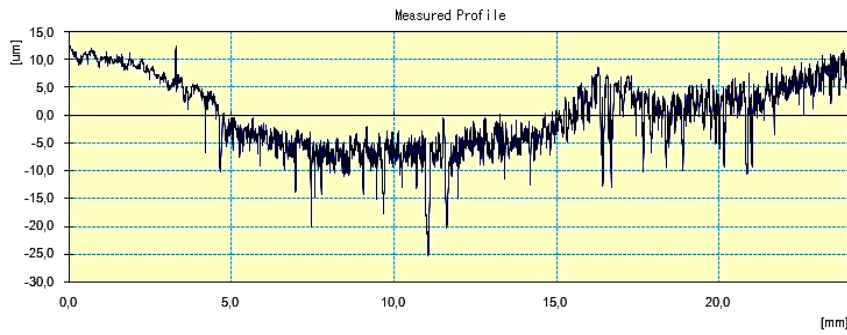
6. BULGULAR VE TARTIŞMA

Karşı cismin yüzey pürüzlülüğünün ölçümünde Şekil 6.1.'de görülen Mitutoyo yüzey profilometresi kullanılmıştır.

Mitutoyo

11-Dec-2014

CERTIFICATE OF INSPECTION

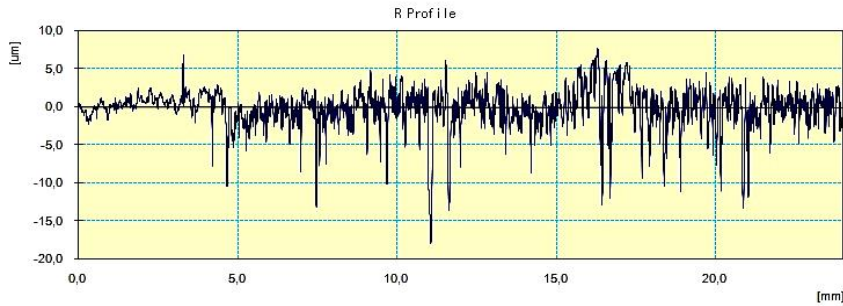


Measure

Make
Certificate

Export

Language

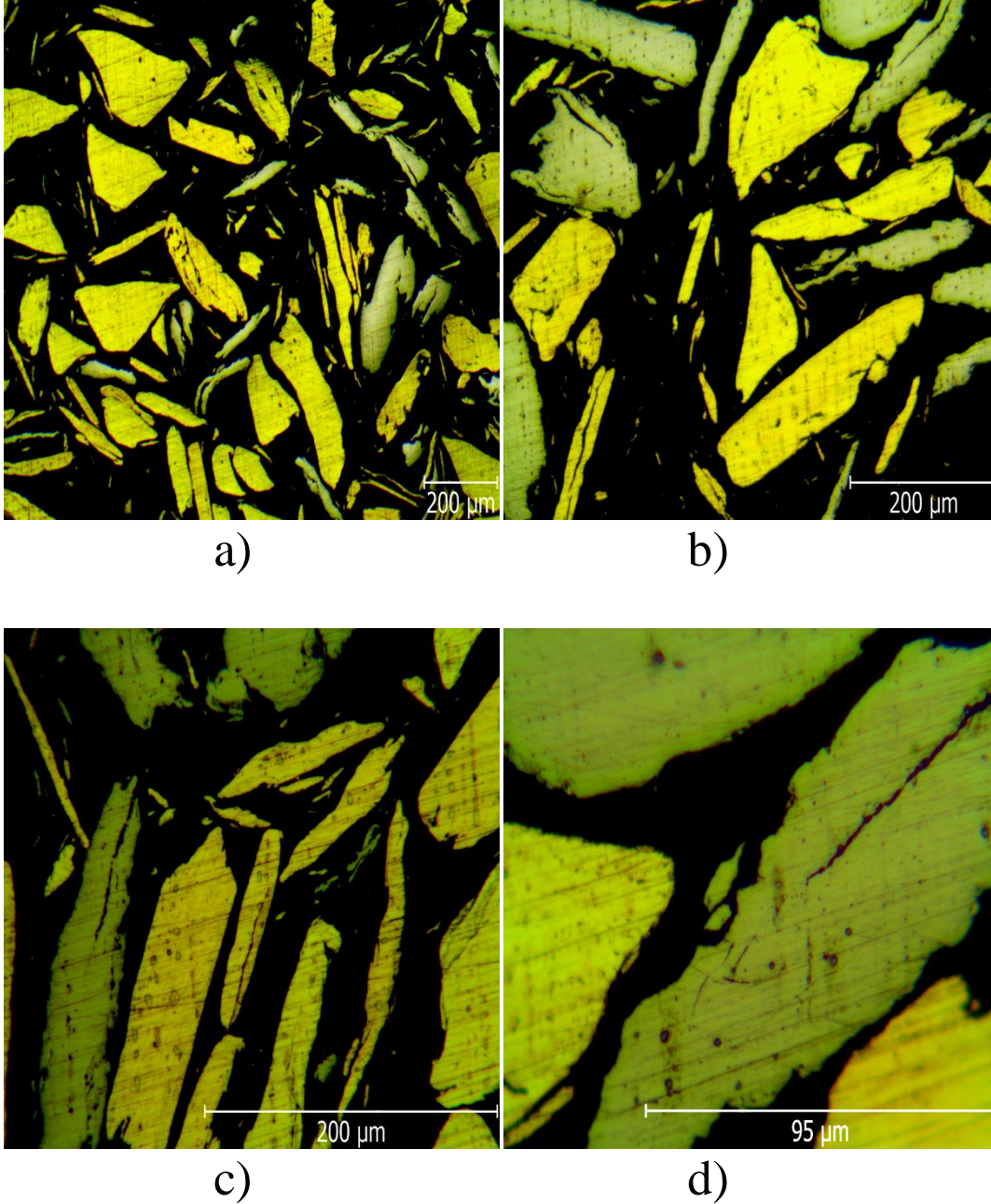


Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest SJ-401	Comment	Ver2.1
Standard	ISO 97	N	3
Profile	R	Cut-Off	8mm
Range	800µm	Filter	GAUSS
Ra	1.83µm		
Rz	21.6µm		
Rq	2.68µm		

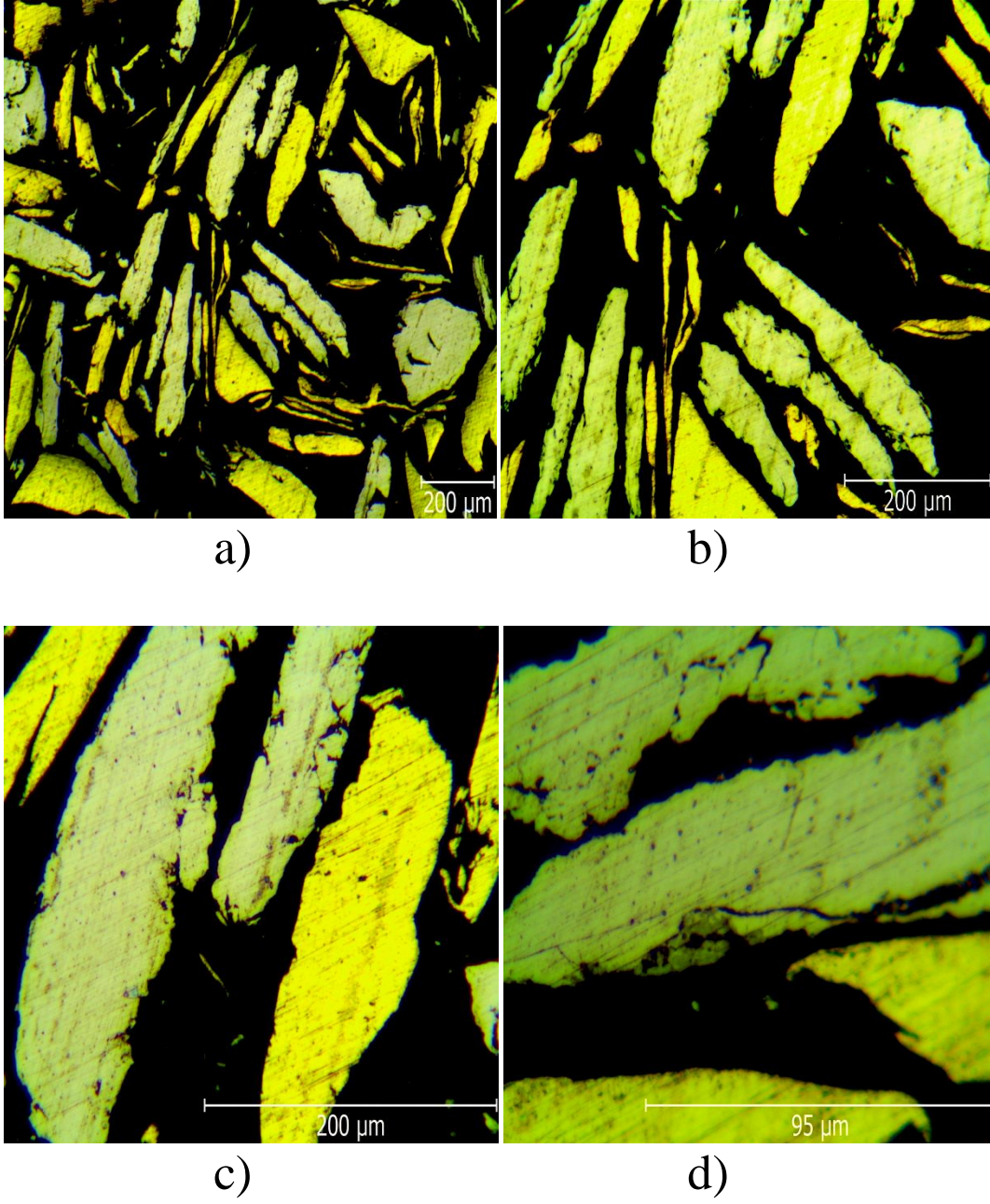
Copyright (C) 2001 Mitutoyo Corporation

Şekil 6.1. Karşı cismin yüzey pürüzlülüğünün ölçümünde kullanılan Mitutoyo yüzey profilometresi.

Şekil 6.2. ve Şekil 6.3.'te üretilen kompozitlerin optik mikroyapıları görülmektedir. Şekillerden görüldüğü gibi pekiştirici partikülleri matris içinde homojen bir biçimde dağılmıştır. Öğütülerek üretilen metal tozlarının bazıları eşeksenli iken bazıları ise ince uzun çubuksu yapıdadır. Mikroyapılardan matrisin pekiştiricileri tamamen sardığı ve matriste porozitenin oluşmadığı görülmektedir.

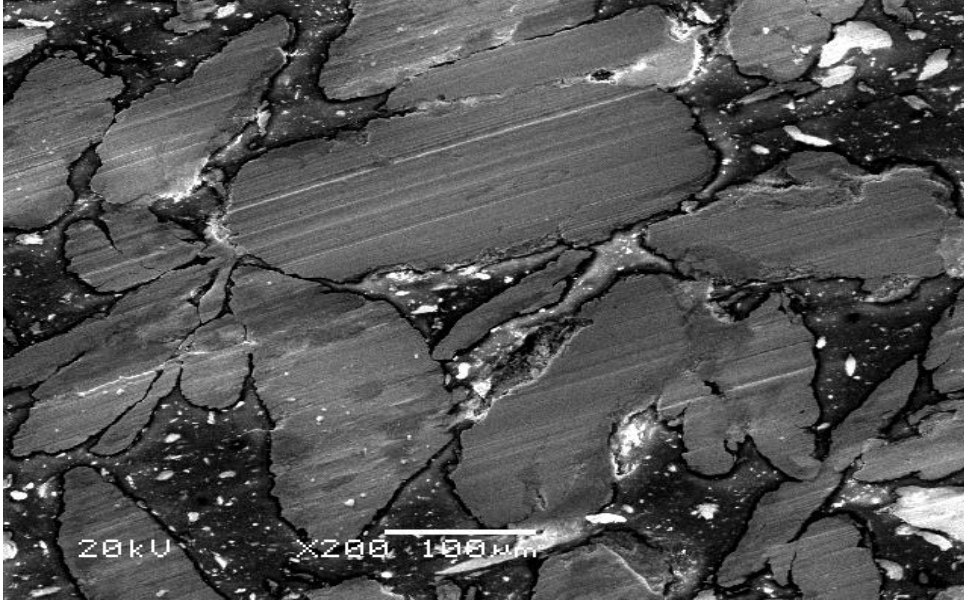


Şekil 6.2. Poliamid-6 kompozitinin a)50 büyütmedeki b)100 büyütmedeki c)200 büyütmedeki d)500 büyütmedeki sürtünme ve aşınma deneyleri yapılmadan önceki optik mikroskop görüntüsü.



Şekil 6.3. POM kompozitinin a)50 büyütmedeki b)100 büyütmedeki c)200 büyütmedeki d)500 büyütmedeki sürtünme ve aşınma deneyleri yapılmadan önceki optik mikroskop görüntüsü.

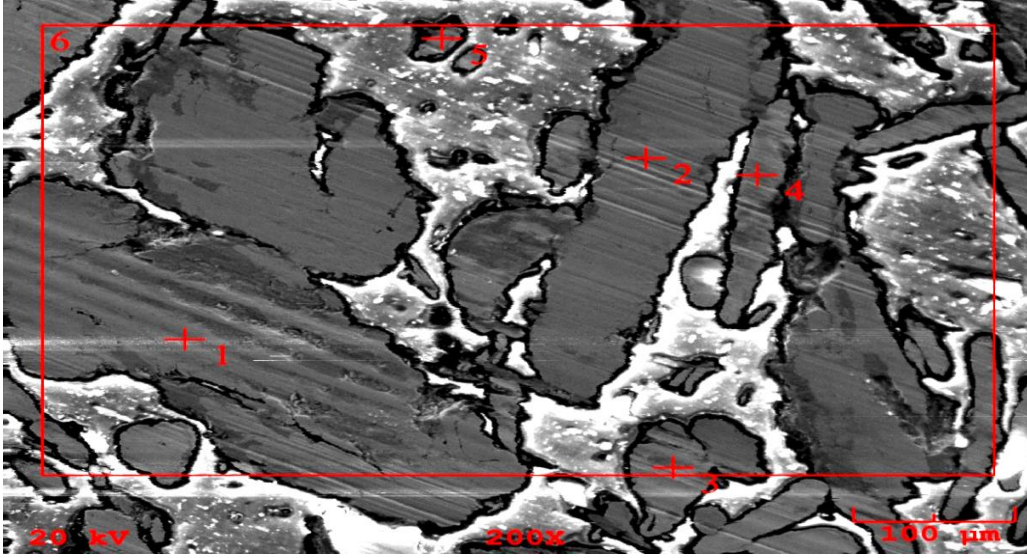
İki farklı yük (10N ve 15N) ve iki farklı sürtünme hızında (0,5m/sn ve 1m/sn) yapılan deneyler sonucunda kompozitler ve matrislerin aşınmış yüzey görüntüleri SEM’de incelenmiş ve partiküllerin kimyasal bileşimleri EDS ile tespit edilmiştir. Şekil 6.4.’te poliamid-6 matrisli kompozitin 10N yük ve 0,5m/sn sürtünme hızında 10000m kuru sürtünme deneyinden sonraki aşınmış yüzey görüntüsü verilmiştir.



Şekil 6.4. Poliamid-6 kompozitinin 10N yük, 0,5m/sn hızında gerçekleştirilen deney numunesinin SEM görüntüsü.

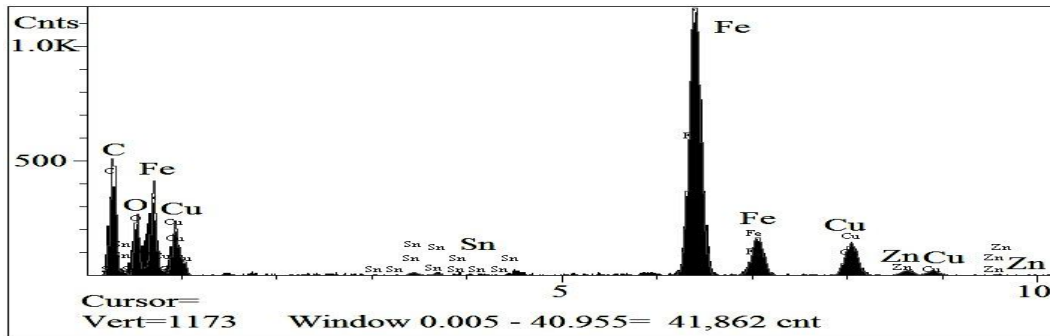
Poliamid-6 kompozitinin 10N yük ve 0,5m/sn hızında gerçekleştirilen deney numunesinin SEM görüntüsünde de görüldüğü üzere sürtünmeye bağlı olarak pekiştiricilerin matristen ayrılmadığı, böylelikle matrisin aşınma direncine katkı sağladığı söylenebilir. Pekiştirici partiküller üzerindeki sürtünme yönündeki çizikler kompozitteki hakim aşınma mekanizmasının abrasif aşınma olduğunu göstermektedir.

Şekil 6.5.'te 10N yük ve 1m/sn hız ile yapılmış sürtünme deneyinden sonra poliamid-6 matrisli kompozitin aşınma yüzeyinden alınan EDS analizleri görülmektedir. Şekil 6.6.'da alan analizi sonuçları verilmiştir. Analiz sonuçlarından da görüldüğü gibi kompozit malzeme Fe, Cu, Sn ve Zn gibi çelik, pirinç ve bronz a ait elementler içermektedir.



Şekil 6.5. Poliamid-6 kompozitinin 10N yük, 1m/sn hızında gerçekleştirilen deney numunesinin EDS analizi.

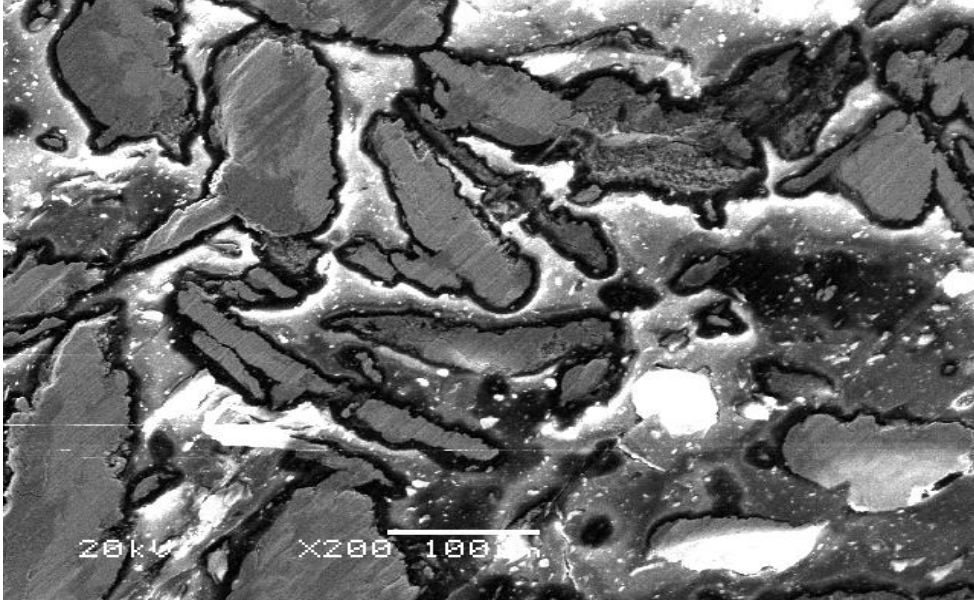
Poliamid-6 kompozitinin 10N yük ve 1m/sn hızında gerçekleştirilen deney numunesinin EDS analizinde işaretlenmiş 1 numaralı ve 2 numaralı bölge çelik, 3 numaralı bölge pirinç, 4 numaralı ve 5 numaralı bölge de bronz pekiştiricilerine aittir. Ayrıca SEM görüntüsü incelendiğinde hız arttırıldığında çiziklerin pekiştiricilerde daha çok derinleştiği ve pekiştirici partiküllerde delemantasyonun da (plastik deformasyon) başladığı görülmektedir.



Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	Units	
C	Ka	375.58	12.255	29.389	wt.%	
O	Ka	171.40	8.279	9.728	wt.%	
Fe	Ka	1,779.36	26.674	46.996	wt.%	
Cu	Ka	230.94	9.610	11.083	wt.%	
Zn	Ka	38.22	3.909	2.204	wt.%	
Sn	La	16.39	2.560	0.599	wt.%	
				100.000	wt.%	Total

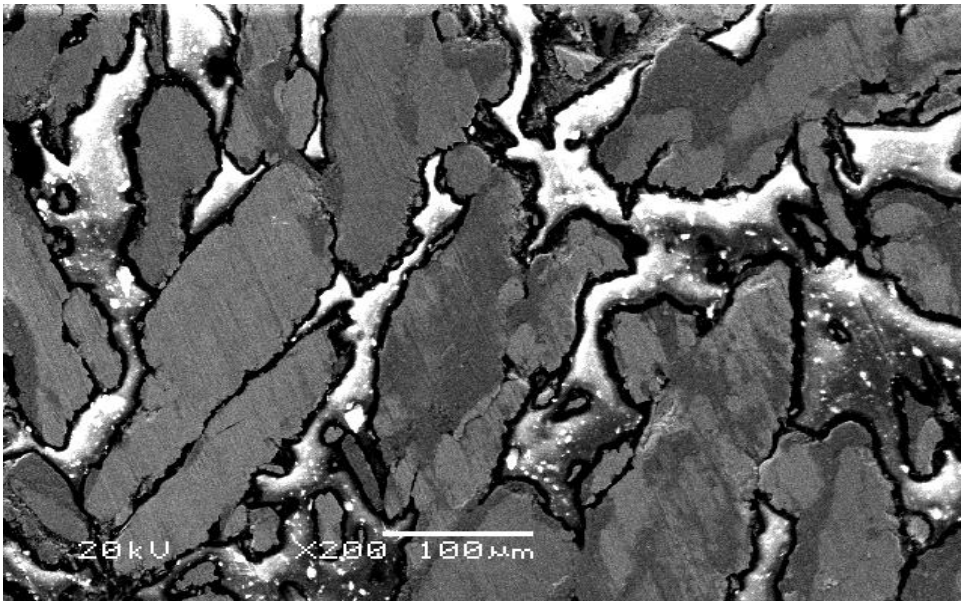
kV 20.0
Takeoff Angle 35.0°
Elapsed Livetime 10.0

Şekil 6.6. Poliamid-6 kompozitinin 10N yük, 1m/sn hızında gerçekleştirilen deney numunesinin EDS alan analizi.



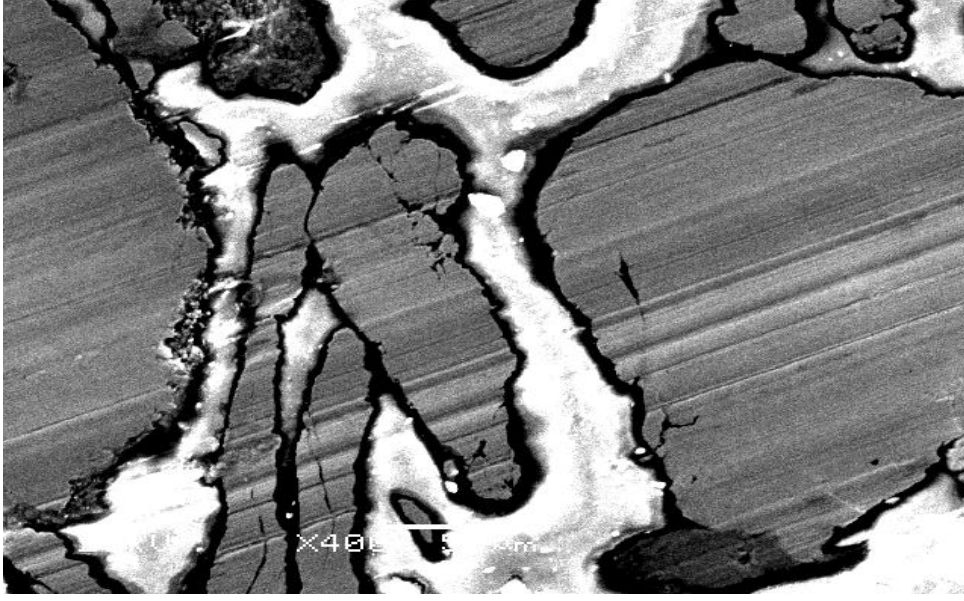
Şekil 6.7. Poliamid-6 kompozitinin 15N yük, 0,5m/sn hızında gerçekleştirilen deney numunesinin SEM görüntüsü.

Şekil 6.7.'de de görüldüğü üzere yükün artırılması pekiştiricideki delemantasyonu arttırmış, aşınmanın hakim modu adhesif aşınma olarak gerçekleşmiştir. Şekil 6.8.'de de aynı yükte hızın artırılmasıyla delemantasyon da azalmış ve abrasif aşınmaya ait çizikler çok incelmıştır. Sürtünme hızının artması malzemenin plastik deformasyon direncini arttırdığından bu durum ortaya çıkmıştır.

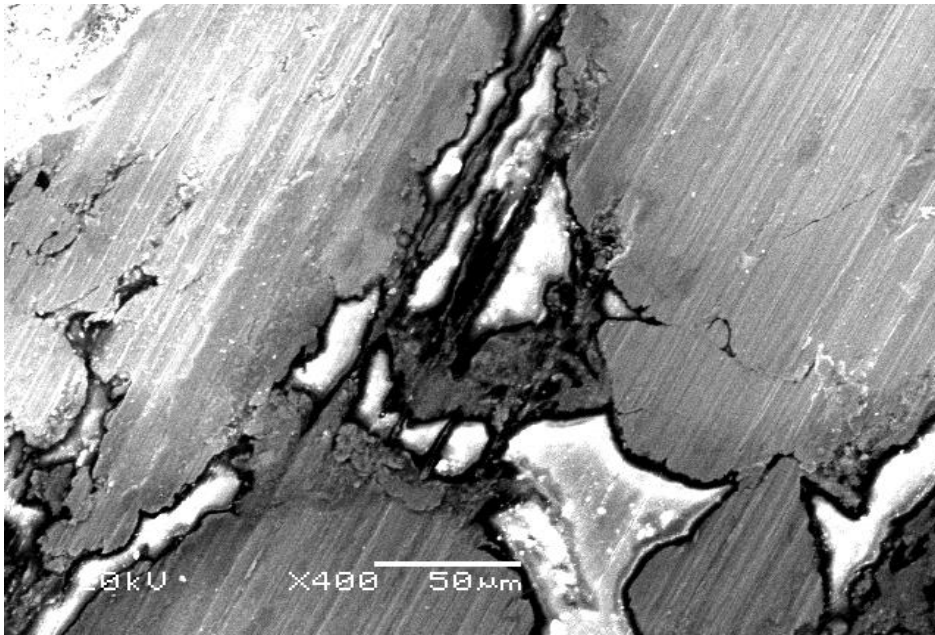


Şekil 6.8. Poliamid-6 kompozitinin 15N yük, 1m/sn hızında gerçekleştirilen deney numunesinin SEM görüntüsü.

Şekil 6.9. ve Şekil 6.10.'da 10N yük altında 0,5 ve 1m/sn hızında yapılan sürtünme deneylerinden sonra, POM kompozitlerin aşınma yüzey SEM mikrografları görülmektedir. Şekillerden POM kompozitlerin de poliamid-6 kompozitlere benzer davranışlar gösterdiği anlaşılmaktadır. Düşük yük ve hızlarda abrasif aşınma hakimken sürtünme hızının artmasıyla pekiştiricilerde delemantasyon oluşmaktadır.



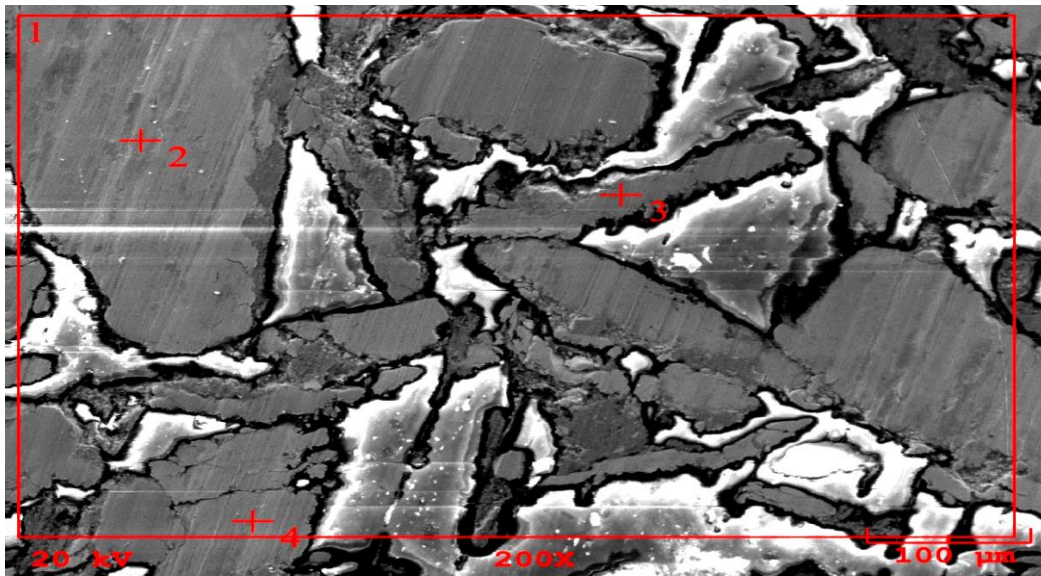
Şekil 6.9. POM kompozitinin 10N yük, 0,5m/sn hızında gerçekleştirilen deney numunesinin SEM görüntüsü.



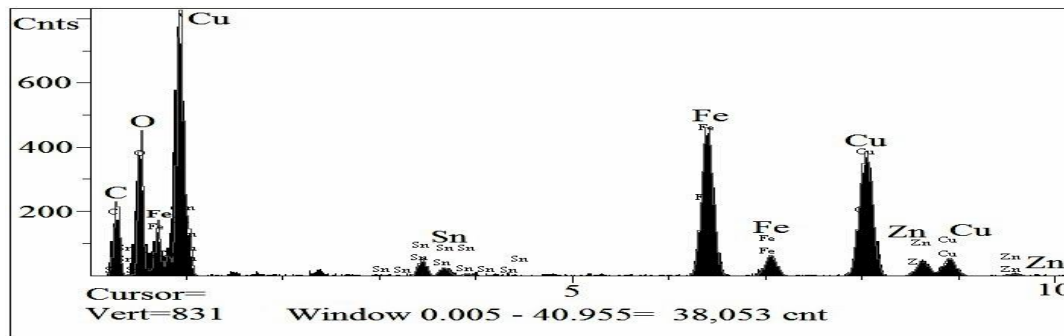
Şekil 6.10. POM kompozitinin 10N yük, 1m/sn hızında gerçekleştirilen deney numunesinin SEM görüntüsü.

Şekil 6.11.'de 15N yük ve 0,5m/sn hız ile yapılmış sürtünme deneyinden sonra POM matrisli kompozitin aşınma yüzeyinden alınan EDS analizleri görülmektedir.

POM kompozitinin 15N yük ve 0,5m/sn hızında gerçekleştirilen deney numunesinin EDS analizinde işaretlenmiş 2 numaralı bölge bronz, 3 numaralı bölge çelik, 4 numaralı bölge de pirinç pekiştiricisine aittir.



Şekil 6.11. POM kompozitinin 15N yük, 0,5m/sn hızında gerçekleştirilen deney numunesinin EDS analizi.

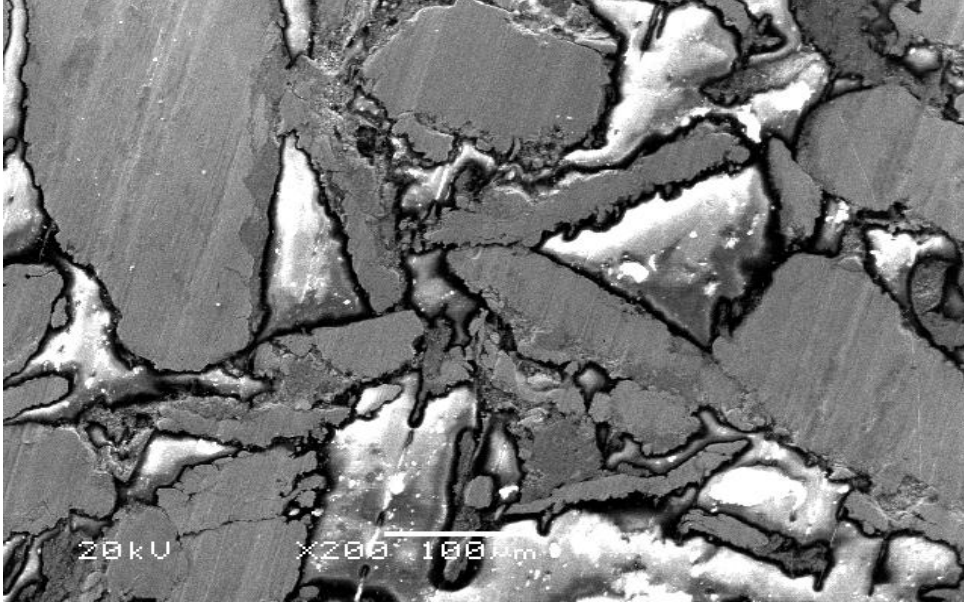


Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	Units	
C	Ka	169.80	8.241	18.546	wt.%	
O	Ka	290.04	10.770	18.078	wt.%	
Fe	Ka	682.37	16.520	19.892	wt.%	
Cu	Ka	638.71	15.982	35.110	wt.%	
Zn	Ka	73.83	5.434	4.908	wt.%	
Sn	La	60.33	4.912	3.467	wt.%	
				100.000	wt.%	Total

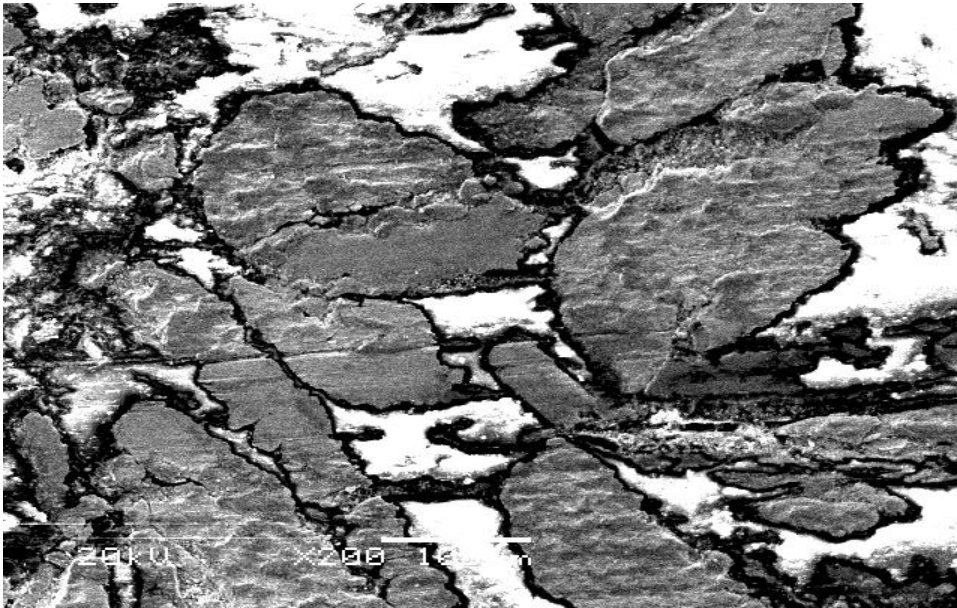
kV 20.0
Takeoff Angle 35.0°
Elapsed Livetime 10.0

Şekil 6.12. POM kompozitinin 15N yük, 0,5m/sn hızında gerçekleştirilen deney numunesinin EDS alan analizi.

Şekil 6.13. ve Şekil 6.14.'te 15N yük altında 0,5 ve 1m/sn hızında yapılan sürtünme deneylerinden sonra, POM kompozitlerin aşınma yüzey SEM mikrografları görülmektedir. Sürtünme yükünün artmasıyla kompozitlerdeki pekiştiricilerin abrasif aşınma çizgileri azalmış ve partiküllerde adhesif aşınma hakim olmuştur. Yüksek yüklerde sürtünme hızının artması partiküllerdeki plastik deformasyonu da arttırmıştır.

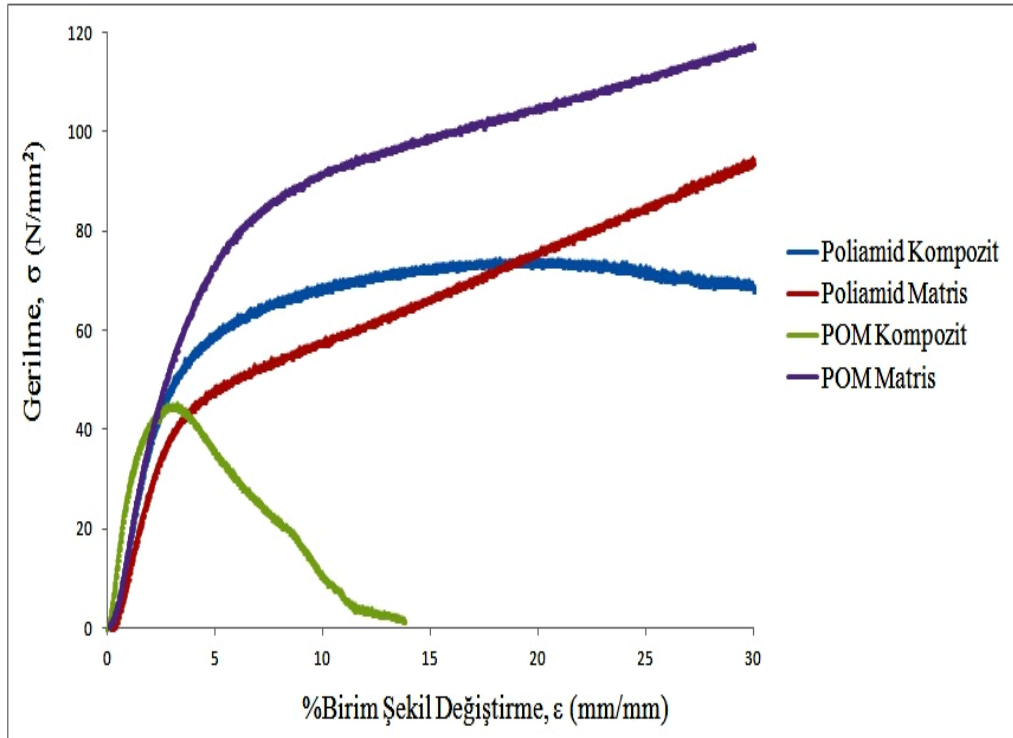


Şekil 6.13. POM kompozitinin 15N yük, 0,5m/sn hızında gerçekleştirilen deney numunesinin SEM görüntüsü.



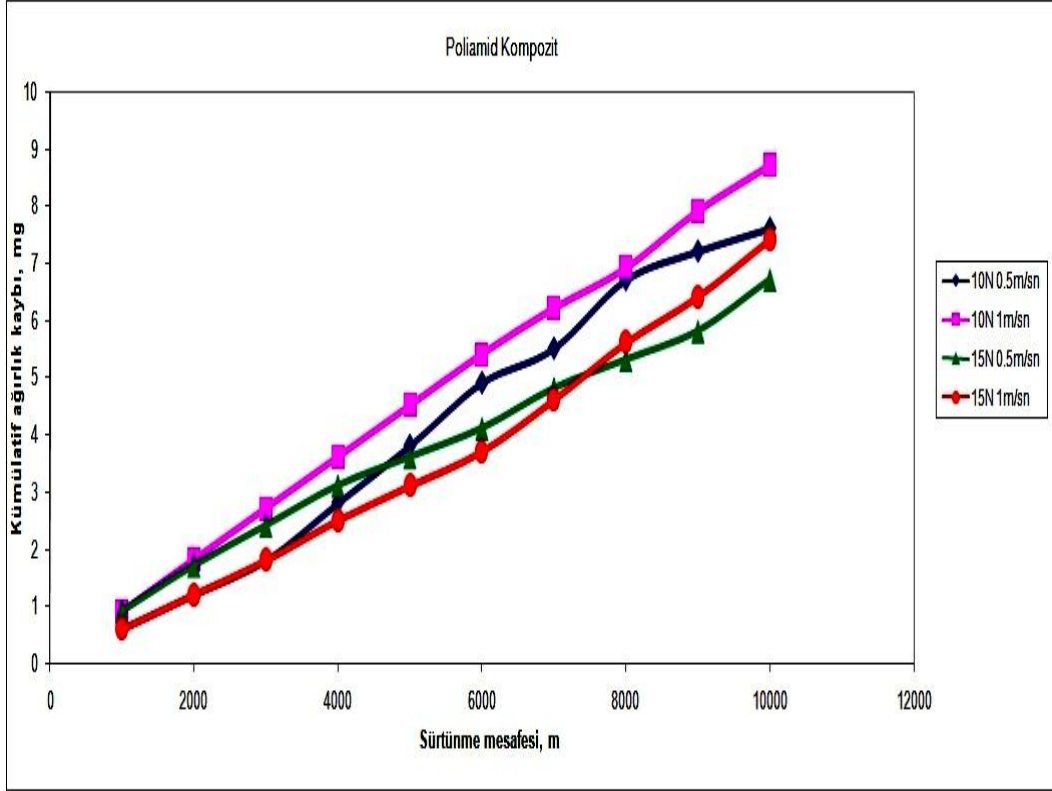
Şekil 6.14. POM kompozitinin 15N yük, 1m/sn hızında gerçekleştirilen deney numunesinin SEM görüntüsü.

Yapılan testler sonucunda, numelerdeki gerilme-%birim şekil değiştirme miktarları Şekil 6.15.'te gösterilmiştir.

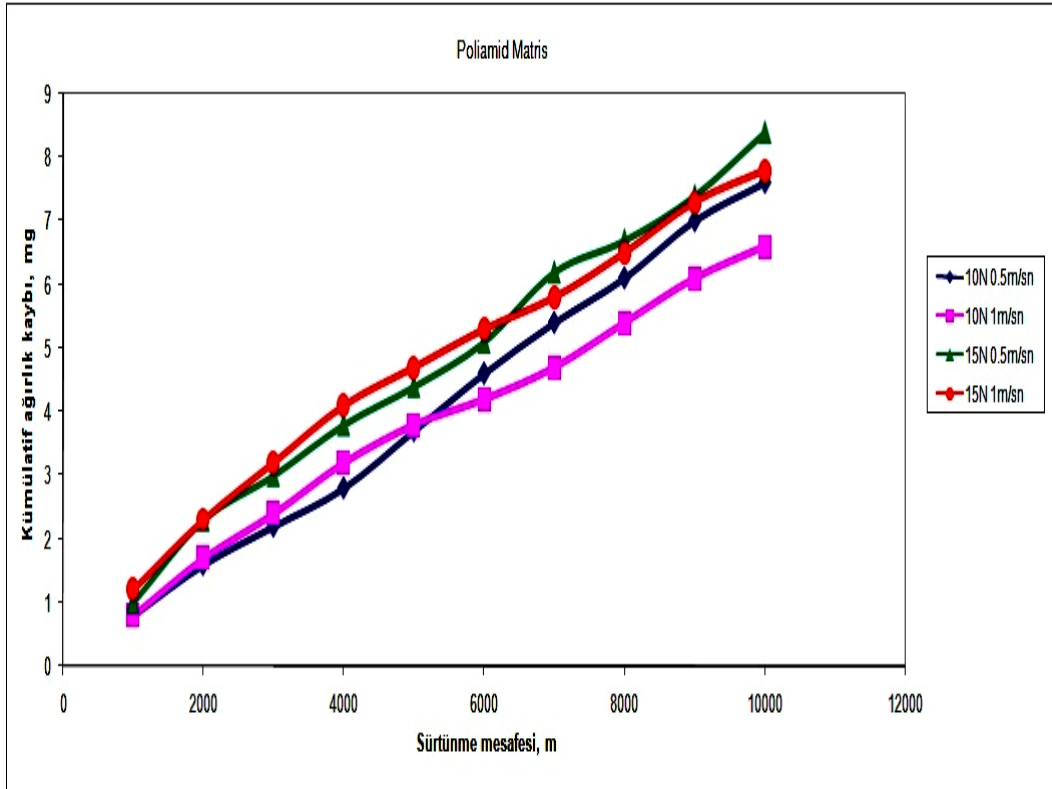


Şekil 6.15. Basma testleri sonucunda, numelere ait gerilme-%birim şekil değiştirme diyagramı.

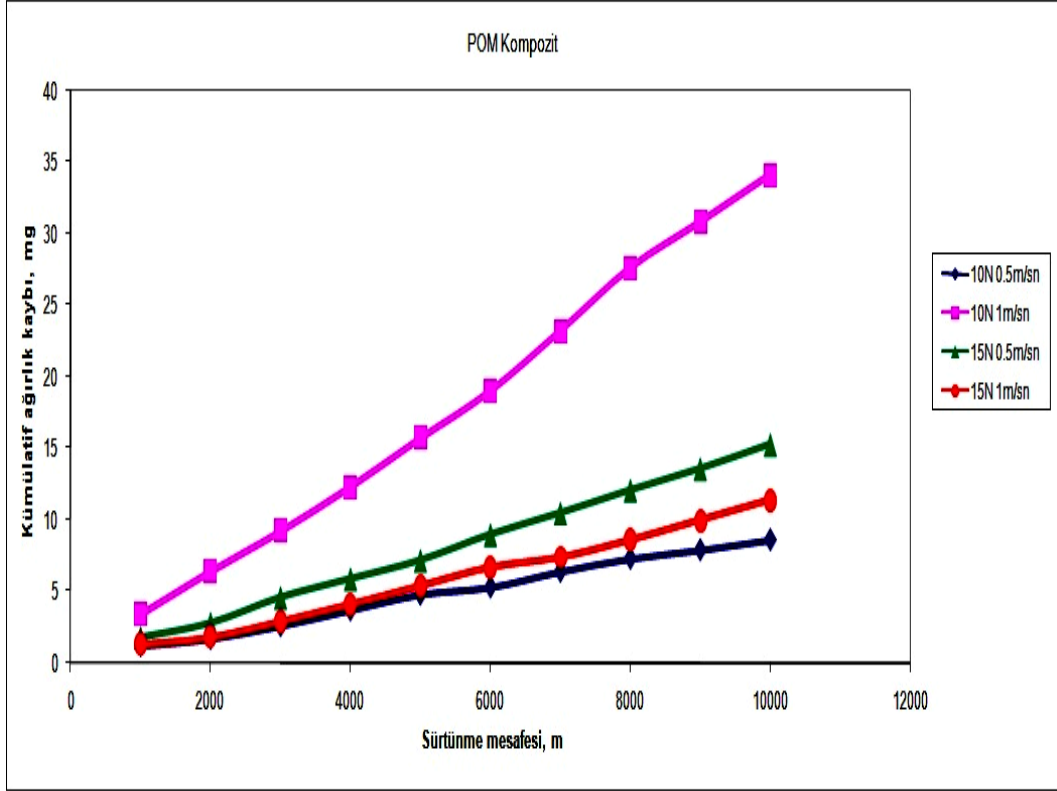
Şekil 6.16., Şekil 6.17., Şekil 6.18. ve Şekil 6.19.'da matris malzemelerinin ve kompozitlerinin sürtünme mesafesi ile kümülatif ağırlık kayıpları verilmiştir. Bu sürtünme şartlarında tüm malzemelerdeki ağırlık kayıpları sürtünme mesafesiyle yaklaşık lineer olarak değişmektedir. Polimer malzemeler genel olarak düşük sürtünme katsayısına fakat aynı zamanda düşük aşınma direncine sahiptirler.



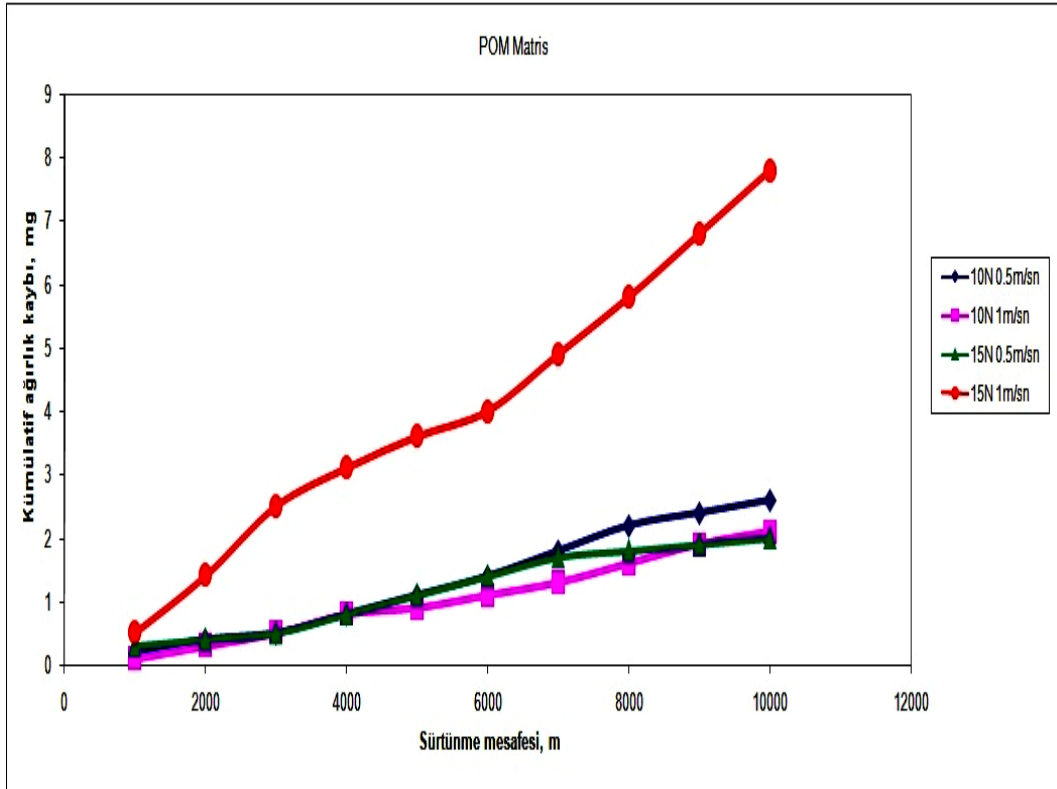
Şekil 6.16. Poliamid-6 kompozite ait kümülatif ağırlık kaybı ve sürtünme mesafesi grafiği.



Şekil 6.17. Poliamid-6 matrise ait kümülatif ağırlık kaybı ve sürtünme mesafesi grafiği.

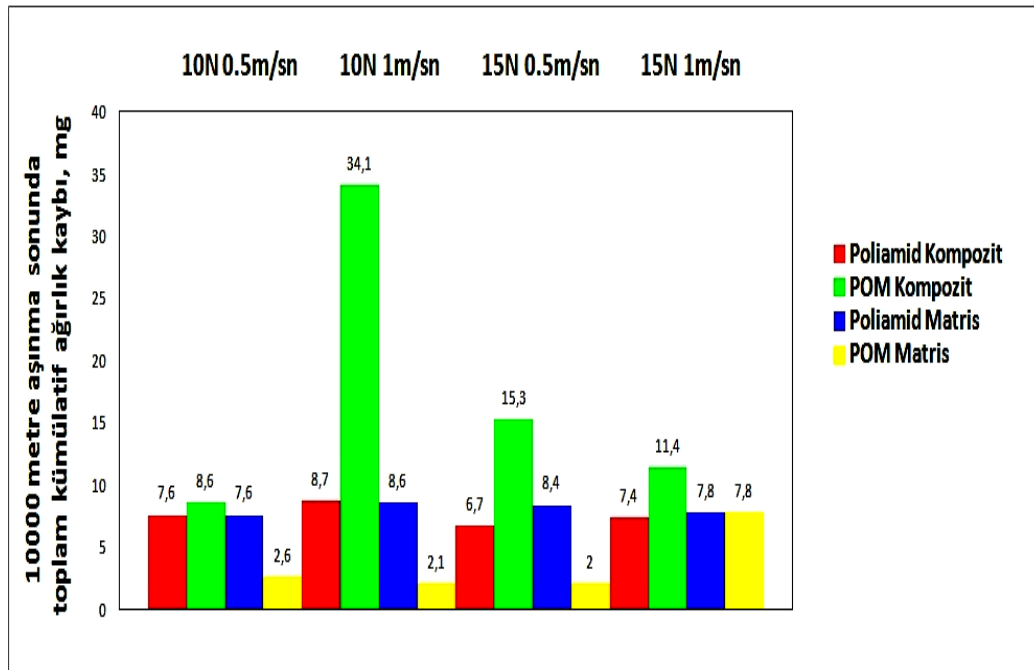


Şekil 6.18. POM kompozite ait kümülatif ağırlık kaybı ve sürtünme mesafesi grafiği.



Şekil 6.19. POM matrise ait kümülatif ağırlık kaybı ve sürtünme mesafesi grafiği.

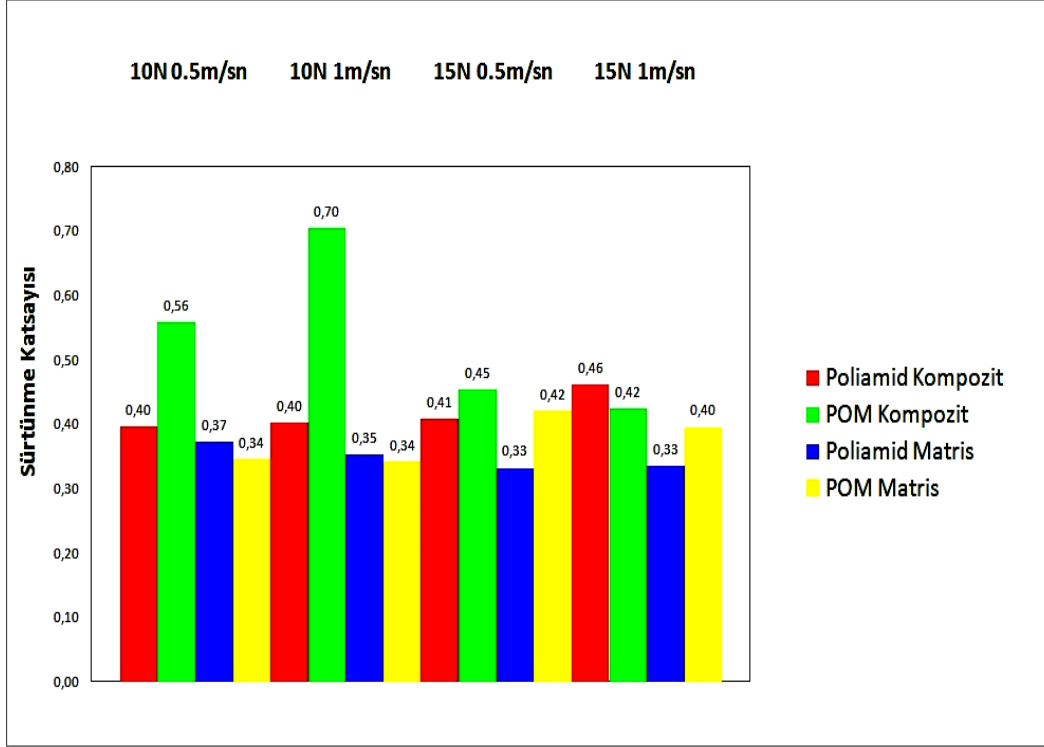
Şekil 6.20.'deki toplam aşınma miktarları incelendiğinde poliamid-6 polimere pekiştirici ilavesinin düşük yük ve sürtünme hızlarında aşınma direncini değiştirmedeği, fakat yüksek yük ve sürtünme hızlarında aşınma direncini arttırdığı söylenebilir. POM polimerin aşınma direnci diğer malzemelere göre yüksektir. Fakat, yüksek sürtünme yüklerinde sürtünme hızının artışıyla aşınma direncinde ciddi bir düşüş görülmektedir. Tüm işlem şartlarında POM polimere ilave edilen metal tozu pekiştiricileri aşınma direncinde düşüşe neden olmuştur.



Şekil 6.20. Numunelerin 10000m aşındırılması sonucunda oluşan toplam kümülatif ağırlık kayıpları.

Aynı bileşim ve oranlarda pekiştiriciye sahip, iki farklı polimer kompozit türünde, matrisin aşınma ve sürtünme özelliklerine etkisinin ne kadar önemli olduğu deneylerden anlaşılmıştır. İyi bir kompozit üretebilmek için matris ve pekiştirici uyumlu olmalı ve matris ile pekiştirici arasında iyi bir arayüzey bağı oluşturulabilmelidir. Yapılan deneyler bu şartların POM kompozitte sağlanamadığını göstermektedir.

Yapılan deneyler sonucunda poliamid-6 kompoziti için uygulanan yük artsa bile, hız sabitken kümülatif ağırlık kaybı azalma eğilimi göstermiştir. Ayrıca iki farklı yük ve iki farklı hızda gerçekleştirilen tüm deneyler incelendiğinde, matrisle kompozit kıyaslandığında kümülatif aşınma kayıplarında büyük değişimler olmamıştır.



Şekil 6.21. İki farklı yük ve iki farklı hızda gerçekleştirilen deneylere ait sürtünme katsayısı değerleri.

Şekil 6.21.'deki sürtünme katsayıları incelendiğinde polimere metal tozunun pekiştirici olarak ilave edilmesinin sürtünme katsayısını arttırdığı görülmektedir. Bu artış poliamid-6 matriste azken POM matriste daha belirgindir. Poliamid-6 matrisin sürtünme katsayısı yük ve hızdan çok etkilenmezken, kompozitin sürtünme katsayısının düşük yük ve hızlarda değişmediği, fakat yüksek yüklerde sürtünme hızının artmasıyla arttığı görülmüştür. Buradan yüksek yük ve hızlarda pekiştirici partiküller ile karşı cisim olan dökme demir arasında daha fazla adhesif bağlanma olduğu söylenebilir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan bu çalışmada aynı miktar ve bileşimdeki pekiştirici tozu ilave edilerek ekstrüzyon yöntemiyle iki farklı polimer matrise sahip kompozit malzemeler üretilmiş ve üretilen kompozitlerin sürtünme-aşınma özellikleri incelenerek aşağıdaki sonuçlar tespit edilmiştir:

Pekiştirici olarak kullanılan farklı oran ve bileşimdeki metal tozlarının, kompozit olarak üretilip aşınma ve sürtünme testleri uygulandıktan sonrada polimerden ayrılmadığı anlaşılmıştır.

Ekstrüzyon yönteminin avantajı kullanılarak kompozit içinde pekiştirici olarak kullanılan metal tozları homojen bir şekilde dağıtılabılır.

Poliamid-6 kompozitlerine ilave edilen pekiştirici metal partikülleri, poliamid-6 matrislerinin aşınma direncini arttırmıştır.

POM kompozitler yüksek sürtünme ve aşınma hızı sergilediklerinden bu şartlarda iyi bir kompozit değildir.

Polimer malzemelerin mekanik özellikleri sıcaklığa büyük oranda bağımlılık gösterdiğinden, poliamid-6 matrisi ile üretilen kompozitin artan sıcaklıklardaki sürtünme özellikleri ve aşınma direnci incelenmelidir.

8. KAYNAKLAR DİZİNİ

- Akkurt M., 1990, Poliasetalin Kuru ve Su ile Yağlama Koşullarında Sürtünme Katsayısı ve Aşınma Bakımından İncelenmesi, 4. Ulusal Makine Tasarım ve İmalat Kongresi, ODTÜ, Ankara, 585-594.
- Akkurt M., 1992, Makine Elemanları, İstanbul İTÜ Matbaası, Cilt 2, 76-79.
- Arıkan R., 1988, MOS2 İlaveli Çinko-Alüminyum Esaslı Kompozitlerin Yapısı ve Aşınma Özellikleri, 3. Ulusal Makine ve İmalat Kongresi, ODTÜ, Ankara, 537-547.
- Aytaç A., 2007, A356 Alüminyum Alaşımının Yarı Katı İşleme Üretimi ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Metal Eğitimi Bölümü, Döküm Eğitimi Anabilim Dalı, Karabük.
- Blau P.J., 2001, Compositions, Functions, and Testing of Friction Brake Mater. and Their Additives, U.S. Department of Energy, Office of Transportation Technologies, USA, 38.
- Boz M., 2003, Seramik Takviyeli Bronz Esaslı Toz Metal Fren Balata Üretimi ve Sürtünme-Aşınma Özelliklerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 3-47.
- Cöcen Ü., Belevi M., Önel K., 1997, Tane Silisyum Karbür Katkılı Alüminyum Bazlı Kompozitlerin Aşınma Davranışı, 7. Denizli Malzeme Sempozyumu, Denizli, 155-187.
- Day A.J., 2000, Friction, Friction Materials, and Brake Operational Characterstics, Short Course on the Braking of Road Vehicles, University of Bradford, 4-8 September, 13p.
- Gürleyik M.Y., 1980, Yıkama Aşındırması, Mühendis ve Makine, Cilt 311, Sayı 368, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, 25-34.
- Habig K.H., 1980, Verschleib Und Hörte Von Werkstoffen, Hanser Verlag, München Wien, Germany, 547-554.
- Hurricks P.L., 1973, Some Metallurgical Factor Controlling the Adhesive and Abrasive Wear Resistance of Steels a Review, Wear 26, 285-304.
- Hutchings I.M., 1992, Tribology Friction and Wear of Engineering Materials, London.
- İpek R., 1987, Tren Fren Papuçlarının Aşınmasının Deneysel İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 94-102.
- İpek R., 1992, AISI 1020 Çeliğinin Yüzey Sertleştirme İşlemleri Uygulanarak AISI 5155 Çeliğinin Yerine Kullanabilirliğinin Deneysel Araştırılması, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 40-52.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- İzciler M., Öcal İ., 2001, Yüzey Topoğrafyasına Bağlı Olarak Aşınmanın Ölçümü, I. Demir-Çelik Sempozyumu Bildirileri, TMMOB, Erdemir, Ereğli-Zonguldak.
- Karamış M.B, 1986, Traktör Hızı ve Pulluk Çalışma Derinliğinin Uç Demiri Aşınma Hızına Etkileri ve Optimizasyonu, 2. Ulusal Makine Teorisi Sempozyumu, ODTÜ, Ankara, 668-677.
- Karamış M.B, Odabaş D., İpek R., 1988, Tren Fren Pabuçlarında Aşınma Davranışının Etüdü, 3. Ulusal Makine Tasarım ve İmalat Kongresi, ODTÜ, Ankara, 175-183.
- Keleştimur M.H., 1989, Makine Yapı Çeliklerinde Abrasif Aşınma Direncinin Yüzey Sertliğine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Koç R., 2004, Vagon Boji Bagalarına Alternatif Polimer Malzemelerin Deneysel İncelenmesi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 121-142.
- Lülsdorf P., 1978, Verschleibprobleme Mit Zylinder Und Schnecke Beim Extrudieren, VDI-Bildungswerk, BW 3019, Traisdorf, 140-152.
- Moore D.F., 1975, Principles and Applications of Tribology, Oxford Pergamon Press.
- Odabaş D., 1991, Kuru Sürtünme Şartlarında Termomekanik Faktörlerin AISI 3315 Çeliğinin Aşınma Davranışına Olan Etkilerin Teorik ve Deneysel Araştırılması, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 58-76.
- Odabaş D., Topal E.S., 1995, 100Cr6 Çeliğinin İki Cisimli Abrasif Aşınma Davranışının Kuru veya Sıvı Sürtünme Şartlarında Deneysel Araştırılması, 6. Denizli Malzeme Sempozyumu, Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Denizli, 396-405.
- Osterle W., Griepentrog M., Gross T.H., Urban I., 2001, Chemical and Microstructural Changes Induced by Friction and Wear of Brakes, Wear 251-14691476.
- Paustenbach D.J., Richter R.O., Finley B.L., Sheehan P.J., 2003, An Evaluation of the Historical Exposures of Mechanics to Asbestos in Brake Dust, Applied Occupational and Environmental Hygiene, 18-786804.
- Portakal A., 1974, Kaymalı Düz Yataklarda Yüzey Pürüzlülüğü ve Aşınma Hızı, Mühendis ve Makine, Cilt 19, 400-408.
- Selçuk B., 1991, Civatalı Bağlantılarda Sürtünmenin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 55-84.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Şafak D., 2001, Plastik Enjeksiyon Kalıplarının Tasarım Bakımından İncelenmesi ve Uygulamalı Tasarım Örneği Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Tekin E., 1986, Madencilikte Kullanılan Aşınma Dayanımlı Demir Alaşımları, 2. Ulusal Makine Tasarım ve İmalat Kongresi, ODTÜ, Ankara, 493-500.
- Ulukan L., 1993, Makine Elemanları III, Ders Notu, İstanbul.
- Uygur M.E., 1996, Balata Üretim Teknolojisi, I. Ulusal Toz Metalurjisi Kongresi, Bildiriler Kitapçığı, Gazi Üniversitesi, Ankara, 6-17.
- Ünlü B.S, Atik E., Köksal S., 2009, Tribological Properties of Polymer-Based Journal Bearings, Materials and Design.
- Weissbach W., 1977, Malzeme Bilgisi ve Muayenesi (Çeviri: S. Anık), Kurtuluş Matbaası, İstanbul, 28-35.
- Yılmaz F., 1997, Sürtünme ve Aşınma, 9. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, İstanbul, 229-247.
- Zumgahr K. H., 1987, Microstructure and Wear of Materials, Tribology Series Vol 10.