

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BAZI TERMOPLASTİK KOMPOZİT
MALZEMELERİN MEKANİK VE TRİBOLOJİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tek. Öğr. Emre KURTULUŞ

Enstitü Anabilim Dalı : METAL EĞİTİMİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Hüseyin ÜNAL

Ağustos 2010

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ


BAZI TERMOPLASTİK KOMPOZİT
MALZEMELERİN MEKANİK VE TRİBOLOJİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

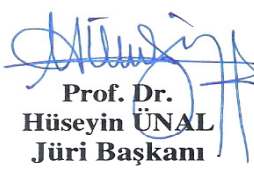
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tek. Öğr. Emre KURTULUŞ

Enstitü Anabilim Dalı : METAL EĞİTİMİ

Bu tez 08 /10 /2010 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.


Prof. Dr.
Fehim FINDIK
Üye


Prof. Dr.
Hüseyin ÜNAL
Jüri Başkanı


Prof. Dr.
Abdullah MİMAROĞLU
Üye

ÖNSÖZ

Son yıllarda polimer malzemeler büyük bir gelişme göstererek metallere eşit oranda hatta bazı yerlerde metallere göre daha çok kullanılmaktadır. Polimerlerin kolay işlenebilir, hafif, yüksek korozyon direncine ve yeterli mekanik özelliklere sahip olmaları nedeni ile son yıllarda birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Günümüzde teknoloji parçalarında oluşan hasarlar; aşınma, kırılma, yorulma şeklinde olmaktadır. Aşınma ile oluşan parça hasarları ilk sırayı almaktadır. Sürtünme bir enerji kaybı olarak bakılabildiği gibi aşınma ise tekrar geri kazanılamayan bir madde kaybı sebebidir. Bu sebepten dolayı kullanım yerlerinde çalışacak makine parçalarının aşınma özelliklerinin önceden tespit edilmesi çok önemlidir.

Polimer kompozitlerin üretilmesinde, aşınma davranışlarının ve mekanik özelliklerinin incelenmesi konularında yapmış olduğum bu tez çalışmasında hiçbir fedakârlığı esirgmeden bana destek olan Sayın hocam Prof. Dr. Hüseyin ÜNAL' a ve Arş. Gör. Sayın Hakan YETGİN' e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, kompozit malzemelerin ekstrüzyonla üretiminde bana yardımcı olan Aksoy Plastik Firması yetkililerine ve özellikle Sayın Tolga GÖKKURT'e, Enjeksiyonla test numunelerinin hazırlanmasında yardımcı olan Sintaş Plastik Firması sahibi Sayın Sinan PAMUKÇUOĞLU'na çok teşekkür ederim.

Bu çalışma; SAÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından desteklenmiştir (Proje No: 2009-50-01-034). Bu tez çalışmasındaki desteklerinden dolayı SAÜ Bilimsel Araştırma Projeleri komisyonuna da çok teşekkür ederim.

Ağustos 2010
Emre KURTULUŞ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
TABLolar LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xiv
SUMMARY.....	xv
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
1.1. Polimerlerde Aşınma ve Sürtünme Üzerine Yapılan Literatür Çalışmaları.....	2
BÖLÜM 2.	
AŞINMA VE SÜRTÜNME.....	11
2.1. Aşınma.....	11
2.2. Tribolojik Sistem.....	12
2.3. Aşınmanın Ekonomik Boyutu.....	14
2.4. Aşınmaya Etkileyen Faktörler.....	15
2.5. Aşınma Test Modelleri.....	16
2.6. Aşınma veya Yüzey Deformasyonu.....	17
2.7. Aşınma Mekanizmaları.....	19
2.7.1. Adhezyon aşınma (yapışma ve yenme aşınması).....	19
2.7.2. Abrasiv aşınma.....	20
2.7.3. Erozyon aşınma.....	22
2.7.4. Öğütmeli aşınma.....	23

2.7.5. Kazımalı aşınma.....	24
2.7.6. Oymalı aşınma.....	24
2.7.7. Korozif aşınma.....	24
2.8. Sürtünme.....	25
2.8.1. Sürtünme mekanizmaları.....	25
2.8.1.1. Kuru sürtünme.....	26
2.8.1.2. Sınır (yarı sıvı) sürtünme.....	26
2.8.1.3. Film (sıvı) sürtünme.....	27
BÖLÜM 3.	
POLİMERLERİN AŞINMA VE SÜRTÜNME DAVRANIŞLARI.....	28
3.1. Polimerlerde Aşınma.....	28
3.1.1. Adhesiv aşınma.....	28
3.1.2. Abrasiv aşınma.....	31
3.1.3. Yorulma aşınması.....	31
3.2. Polimerlerde Sürtünme.....	31
3.2.1. Polimerlerin temas yüzeylerinin sürtünme katsayısı üzerine etkisi.....	32
3.3. Aşınmaya Dirençli Polimer Kompozit Tasarımı.....	33
3.4. Aşınmaya Etki Eden Parametreler.....	34
3.4.1. Kayma hızı.....	34
3.4.2. Basınç ve yük.....	34
3.4.3. Sıcaklık.....	35
3.4.4. Yüzey pürüzlülüğü.....	35
3.5. Polimerlerin Karşı Yüzey Sürtünme Malzemeleri ve Sonuçları.....	36
3.5.1. Polimer-Polimer aşınması.....	36
3.5.2. Polimer-Metal aşınması.....	38
3.6. Polimer malzemelerin sürtünme ve aşınma sonuçlarının karşılaştırılması.....	38
3.7. Polimerlerde Kullanılan Aşınmayı Azaltıcı Katkı Malzemeleri.....	39
3.8. Alüminyum Oksit (Al ₂ O ₃ , Alumina).....	42

BÖLÜM 4.	
POLİ-BUTİLEN-TEREFTALAT (PBT).....	44
4.1. Kimyasal Dayanım.....	45
4.2. Mekanik Özellikler.....	46
4.3. Elektriksel Özellikler.....	46
4.4. Fiziksel Özellikler.....	47
4.5. Termal Özellikler.....	47
4.6. PBT Kullanımı, Sağladığı Avantajlar ve Kullanım Yerleri.....	50
BÖLÜM 5.	
POLİ-ETİLEN –TEREFTALAT (PET).....	51
5.1. İşleme Teknolojileri.....	52
5.2. Mekanik Özellikler.....	52
5.3. Kimyasal Özellikler.....	53
5.4. Fiziksel Özellikler.....	53
5.5. Elektriksel Özellikler.....	54
5.6. Kullanım Alanları.....	55
BÖLÜM 6.	
DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	56
6.1. Deneyde Kullanılan Numuneler.....	56
6.2. Test Numunelerinin Hazırlanması.....	56
6.3. Çekme Deneyi.....	62
6.4. Aşınma Deneyi.....	65
6.4.1. Aşınma deneyinin uygulanması.....	67
6.5. Charpy Darbe Deneyi.....	70
6.6. Sertlik Değerlerinin Tayini.....	72
6.7. Test Numunelerinin Yoğunluk Testi.....	74
6.8. Erozyon Aşınma Deneyi.....	75
BÖLÜM 7.	
DENEYSEL SONUÇLAR VE YORUMLAR.....	78
7.1. Yoğunluk Ölçüm Sonuçları.....	78

7.2. Mekanik Özelliklerin İncelenmesi.....	80
7.2.1. PBT kompozitlerin mekanik özellikleri.....	80
7.2.2. PET kompozitlerin mekanik özellikleri.....	85
7.3. Sürtünme Katsayısı-Yük İlişkisi.....	90
7.3.1. PET kompozitlerin sürtünme katsayısı-yük ilişkisi.....	90
7.3.2. PBT kompozitlerin sürtünme katsayısı-yük ilişkisi.....	93
7.3.3. PET/PBT kompozitlerin sürtünme katsayısı-yük ilişkisi.....	97
7.4. Aşınma Oranı-Yük ilişkisi.....	99
7.4.1. PET kompozitlerin aşınma oranı-yük ilişkisi.....	99
7.4.2. PBT kompozitlerin aşınma oranı-yük ilişkisi.....	103
7.4.3. PET/PBT kompozitlerin aşınma oranı -yük ilişkisi.....	107
7.5. PET Polimerinin Mikroyapı İncelemesi.....	109
7.6. PBT Polimerinin Mikroyapı İncelemesi.....	115
7.7. PET/PBT Kompozitlerin Mikro yapı İncelemesi.....	121
7.8. Erozyon Aşınma Oranı-Çarpma Açısı Sonuçları.....	122
7.8.1. PBT kompozitlerin erozyon aşınma oranı-çarpma açısı sonuçları.....	122
7.8.2. PET kompozitlerin erozyon aşınma oranı-çarpma açısı sonuçları.....	126
7.9. PBT ve PET polimerlerinin mikroyapı incelenmesi.....	131
BÖLÜM 8.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	137
8.1. Sonuçlar.....	137
8.2. Öneriler.....	139
KAYNAKLAR.....	140
EKLER.....	143
ÖZGEÇMİŞ.....	146

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Al ₂ O ₃	: Alümina Oksit
AFM	: Atomik Kuvvet Mikroskobu
APK	: Alifatik Keton
ASTM	: Amerikan Standardı
D	: Yoğunluk
EDS	: Elemental Analiz
F	: Kuvvet
Fs	: Sürtünme Kuvveti
G	: Ağırlık Kaybı
H	: Sertlik
ISO	: Uluslararası Standart Birliği
k	: Aşınma Katsayısı
M	: Yükleme Ağırlığı
MPa	: Megapaskal
PET	: Polietilen Tereftalat
PBT	: Polibutilen Tereftalat
POM	: Poli-Oksi-Metilen
PA 6	: Poliamid 6
Ra	: Yüzey Pürüzlülüğü
s	: Kayma Mesafesi
μ	: Sürtünme Katsayısı
ÇYMAPE	: Çok-Yüksek-Moleküler-Ağırlıklı-Poli-Etilen
W	: Aşınma Hızı

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Kompozit malzeme ara yüzey yapısının şematik gösterimi.....	8
Şekil 2.1.	Bir tribolojik sistemin şematik göstermesi.....	13
Şekil 2.2.	Şematik kayma sürtünmesi ve aşınma test modelleri.....	16
Şekil 2.3.	Şematik abrazyon aşınma test modelleri.....	17
Şekil 2.4.	Yüzey aşınma ve bozulmalarının sınıflandırılması.....	18
Şekil 2.5.	Abrasiv aşındırma şeması.....	21
Şekil 2.6.	Şematik abrazyon aşınma test modelleri.....	22
Şekil 2.7.	Aşındırıcı çarpma hızının erozyona etkisi.....	23
Şekil 2.8.	Tribolojik sistemlerin kinematikleri.....	26
Şekil 3.1.	Katkı maddelerinin aşınma oranı üzerine etkisi.....	34
Şekil 3.2.	%35 PbS takviyeli naylon polimerin yüzey pürüzlülüğünün aşınma oranı ile değişimi.....	35
Şekil 3.3.	Polietilen yüzeye PTFE transfer tabakasının kayma mesafesi ve yük ile değişimi. (a) kayma hızı (b) normal yük.....	37
Şekil 3.4.	Çeşitli polimer malzemelere ait koheziv enerji yoğunluğu.....	37
Şekil 4.1.	PBT zincirinde yinelenen birim (mer) şekli.....	44
Şekil 4.2.	Nemlendirmenin PBT, PA 6 ve PA 6.6 düz tiplerin mekanik özelliklerine etkisi.....	48
Şekil 4.3.	Çeşitli polimerlerin yalıtkanlık değerleri.....	48
Şekil 4.4.	Çeşitli polimerlerin %30 cam elyaf takviyeli tiplerinin kullanım sıcaklığı ve yük altında bozulma sıcaklığı değerleri.....	49
Şekil 5.1.	PET zincirinde yinelenen birim (mer) şekli.....	51
Şekil 5.2.	Trans-Trans konformasyon yapı şekli.....	51
Şekil 6.1.	Ekstüruder makinasında üretilen granül formundaki kompozit malzemenin görüntüsü.....	58

Şekil 6.2.	Enjeksiyon kalıbının şematik olarak gösterimi.....	58
Şekil 6.3.	Enjeksiyon kalıbında üretilen çekme, darbe, aşınma ve renk plakalarının görüntüsü.....	59
Şekil 6.4.	Plastik Enjeksiyon kalıbında basılmış katkısız PET deney numuneleri.....	59
Şekil 6.5.	Test numunelerinin yapıldığı enkel plastik enjeksiyon makinasının resmi.....	60
Şekli 6.6.	Enjeksiyon makinasının şematik gösterimi.....	60
Şekil 6.7.	Deneyleerde kullanılan çekme test cihazı fotoğrafı.....	62
Şekil 6.8.	Çekme cihazı çenelerine deney numunelerinin bağlantısının gösterimi.....	63
Şekil 6.9.	Çekme deneyi numunesinin şematik gösterimi.....	63
Şekil 6.10.	Taşlanmış çelik diskin aşınmadan önceki yüzey pürüzlülüğü.....	66
Şekil 6.11.	Aşınma test düzeneği.....	67
Şekil 6.12.	Aşınma deneyin’de excel formatında elde edilen sürtünme katsayısı değerleri ve grafiği gösterimi.....	68
Şekil 6.13.	Denyeyde kullanılan çentik darbe deney numuneleri şekli ve boyutları.....	70
Şekil 6.14.	Çentik tipleri.....	71
Şekil 6.15.	Denyeylerde kullanılan Devotrans marka darbe cihazı.....	71
Şekil 6.16.	Test Parçaları için darbe ucu ve destek bloklarının durumunun şematik gösterimi.....	72
Şekil 6.17.	Shore D Tipi durometre için batıcı uç.....	73
Şekil 6.18.	Sertlik ölçme test cihazı.....	73
Şekil 6.19.	Yoğunluk ölçme test cihazı.....	74
Şekil 6.20.	Erozyon aşınma deneyi için hazırlanmış numune resmi.....	75
Şekil 6.21.	Erozyon aşınma deneyi cihazı ve aşınma deney haznesi.....	76
Şekil 6.22.	Erozyon aşındırıcı ve bağlantı aparat şekli.....	76
Şekil 7.1.	Farklı partikül boyutlu Al ₂ O ₃ katkılı (10µm, 45µm, 60µm) PBT kompozitlerin a) çekme mukavemeti- Al ₂ O ₃ katkı oranı ilişkisi, b)Elastiklik modülü- Al ₂ O ₃ katkı oranı ilişkisi.....	81

Şekil 7.2.	Farklı partikül boyutlu Al ₂ O ₃ katkılı (10 µm, 45µm, 60µm) PBT kompozitlerin a) Sertlik— Al ₂ O ₃ katkı oranı ilişkisi, b) % uzama – Al ₂ O ₃ katkı oranı ilişkisi.....	83
Şekil 7.3.	Farklı partikül boyutlu Al ₂ O ₃ katkılı (10 µm, 45 µm, 60µm) PBT kompozitlerin darbe mukavemeti – Al ₂ O ₃ katkı oranı ilişkisi.....	84
Şekil 7.4.	Farklı partikül boyutlu Al ₂ O ₃ katkılı (10µm, 45µm, 60µm) PET kompozitlerin; a) Çekme mukavemeti– Al ₂ O ₃ katkı oranı ilişkisi, b) Elastiklik modülü- Al ₂ O ₃ katkı oranı ilişkisi.....	86
Şekil 7.5.	Farklı partikül boyutlu Al ₂ O ₃ katkılı (10µm, 45µm, 60µm) PET kompozitlerin; a) sertlik– Al ₂ O ₃ katkı oranı ilişkisi, b) % uzama- Al ₂ O ₃ katkı oranı ilişkisi.....	88
Şekil 7.6.	Farklı partikül boyutlu Al ₂ O ₃ katkılı (10µm, 45µm, 60µm) PET kompozitlerin darbe mukavemeti – Al ₂ O ₃ katkı oranı ilişkisi.....	89
Şekil 7.7.	10 µm partikül boyutlu Al ₂ O ₃ katkılı PET kompozitlerin sürtünme katsayısı-yük ilişkisi (kayma hızı:a) 0.5m/s,b)1.0 m/s)..	91
Şekil 7.8.	45 µm partikül boyutlu Al ₂ O ₃ katkılı PET kompozitlerin sürtünme katsayısı-yük ilişkisi (kayma hızı:a) 0.5m/s, b)1.0m/s)..	92
Şekil 7.9.	10 µm partikül boyutlu Al ₂ O ₃ katkılı PBT kompozitlerin sürtünme katsayısı-yük ilişkisi (kayma hızı:a)0.5m/s, b)1.0m/s)..	95
Şekil 7.10.	45 µm partikül boyutlu Al ₂ O ₃ katkılı PBT kompozitlerin sürtünme katsayısı-yük ilişkisi (kayma hızı:a)0.5m/s,b)1.0m/s)...	96
Şekil 7.11.	Katkısız PBT ve PET polimerleri ile bu polimerlerin karışımlarının sürtünme katsayısı-yük ilişkisi (kayma hızı: a) 0.5m/s, b) 1.0m/s).....	98
Şekil 7.12.	Al ₂ O ₃ katkılı (10 µm) PET kompozitlerin aşınma oranı-yük ilişkisi (kayma hızı: a) 0.5m/s, b) 1.0m/s).....	100
Şekil 7.13.	Al ₂ O ₃ katkılı (45 µm) PET kompozitlerin aşınma oranı-yük ilişkisi (kayma hızı: a) 0.5m/s, b) 1.0m/s).....	102
Şekil 7.14.	Al ₂ O ₃ katkılı (10 µm) PBT kompozitlerin aşınma oranı-yük ilişkisi (kayma hızı: a) 0.5m/s, b) 1.0m/s).....	104

Şekil 7.15.	Al ₂ O ₃ katkılı (45 µm) PBT kompozitlerin aşınma oranı-yük ilişkisi (kayma hızı: a) 0.5m/s, b) 1.0m/s).....	106
Şekil 7.16.	Katkısız PBT ve PET kompozitlerinin aşınma oranı-yük ilişkisi (kayma hızı: a) 0.5m/s, b) 1.0m/s).....	108
Şekil 7.17.	Katkısız PET ve PET kompozit pim malzemelerinin optik mikroskop aşınma yüzey görüntüleri (Partikül boyutu: 45µm, Kayma hızı:0.5m/s, Uygulanan yük:100N Büyütme: 100X).....	109
Şekil 7.18.	Katkısız PET ve PET kompozit disk malzemelerinin optik mikroskop aşınma yüzey görüntüleri (Partikül boyutu: 45µm, Kayma hızı:0.5m/s, Uygulanan yük:100N, Büyütme: 100X).....	111
Şekil 7.19.	Katkısız PET ve PET kompozit pim malzemelerinin optik mikroskop aşınma yüzey görüntüleri (Partikül boyutu: 10µm, Kayma hızı:0.5m/s, Uygulanan yük:100N Büyütme: 100X).....	112
Şekil 7.20.	Katkısız PET ve PET kompozit disk malzemelerinin optik mikroskop aşınma yüzey görüntüleri (Partikül boyutu: 10µm, Kayma hızı:0.5m/s, Uygulanan yük:100N Büyütme: 100X).....	113
Şekil 7.21.	Katkısız PBT ve PBT kompozit pim malzemelerinin optik mikroskop aşınma yüzey görüntüleri (Partikül boyutu: 45µm, Kayma hızı:0.5m/s, Uygulanan yük:100N Büyütme: 100X).....	115
Şekil 7.22.	Katkısız PBT ve PBT kompozit disk malzemelerinin optik mikroskop aşınma yüzey görüntüleri (Partikül boyutu: 45µm, Kayma hızı:0.5m/s, Uygulanan yük:100N Büyütme: 100X).....	116
Şekil 7.23.	Katkısız PBT ve PBT kompozit pim malzemelerinin optik mikroskop aşınma yüzey görüntüleri (Partikül boyutu: 10µm, Kayma hızı:0.5m/s, Uygulanan yük:100N Büyütme: 100X).....	118
Şekil 7.24.	Katkısız PBT ve PBT kompozit disk malzemelerinin optik mikroskop aşınma yüzey görüntüleri (Partikül boyutu: 10µm, Kayma hızı:0.5m/s, Uygulanan yük:100N Büyütme: 100X).....	119
Şekil 7.25.	Katkısız PET/ PBT mix pim malzemelerinin optik mikroskop aşınma yüzey görüntüleri (Kayma hızı:0.5m/s, Uygulanan yük:100N Büyütme:100X).....	121

Şekil 7.26.	26	Katkısız PET/ PBT mix disk malzemelerinin optik mikroskop aşınma yüzey görüntüleri (Kayma hızı:0.5m/s, Uygulanan yük:100N Büyütme:100X).....	121
Şekil 7.27.		Al ₂ O ₃ katkılı (10 µm, 45 µm, 60µm) PBT kompozitlerin erozyon aşınma oranı-çarpma açısı ilişkisi, a) %10 Al ₂ O ₃ , b) %20 Al ₂ O ₃ , c) %30 Al ₂ O ₃ (Süre: 30dak.).....	123
Şekil 7.28.		Al ₂ O ₃ katkılı PBT kompozitlerin erozyon aşınma oranı-çarpma açısı ilişkisi, a)10 µm b) 45 µm c) 60µm (Süre: 30dak.).....	125
Şekil 7.29.		Al ₂ O ₃ katkılı (10 µm, 45 µm, 60µm) PET kompozitlerin erozyon aşınma oranı-çarpma açısı ilişkisi, a) %10 Al ₂ O ₃ , b) %20 Al ₂ O ₃ , c) %30 Al ₂ O ₃ (Süre: 30dak.).....	127
Şekil 7.30.		Al ₂ O ₃ katkılı PBT kompozitlerin erozyon aşınma oranı-çarpma açısı ilişkisi, a) 10µm b) 45µm c) 60µm (Süre: 30dak.).....	129
Şekil 7.31.		PET malzemesinin erozyon aşınma yüzey görüntüleri (10µm deney süresi:30 dakika Büyütme: x100).....	131
Şekil 7.32.		PBT malzemesinin erozyon aşınma yüzey görüntüleri (10µm deney süresi:30 dakika Büyütme: x100).....	132
Şekil 7.33.		PET malzemesinin erozyon aşınma yüzey görüntüleri (45µm deney süresi:30 dakika Büyütme: x100).....	134
Şekil 7.34.		PBT malzemesinin erozyon aşınma yüzey görüntüleri (45µm deney süresi:30 dakika Büyütme: x100).....	135

TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1.	Temas yüzeyi çeşidine göre sürtünme katsayıları.....	32
Tablo 3.2.	Çeşitli polimerlerin sürtünme katsayıları.....	33
Tablo 3.3.	Polimer malzemelerin sürtünme ve aşınma sonuçlarının karşılaştırılması.....	39
Tablo 3.4.	Cam fiber üretiminde kullanılan cam çeşitleri ve bileşimleri (% ağırlıkça).....	40
Tablo 4.1.	PBT polimerinin kimyasal direnç özellikleri verilmiştir.....	45
Tablo 4.2.	PBT polimerinin mekanik özellikleri verilmiştir.....	46
Tablo 4.3.	PBT polimerinin elektriksel özellikleri verilmiştir.....	46
Tablo 4.4.	PBT polimerinin fiziksel özellikleri verilmiştir.....	47
Tablo 4.5.	PBT polimerinin termal özellikleri verilmiştir.....	47
Tablo 5.1.	PET polimerinin mekanik özellikleri.....	52
Tablo 5.2.	PET polimerinin kimyasal özellikleri.....	53
Tablo 5.3.	PET polimerinin fiziksel özellikleri.....	54
Tablo 5.4.	PET polimerinin elektriksel özellikleri.....	54
Tablo 6.1.	DeneYler İÇin Üretilen Malzemeler ve kodları.....	57
Tablo 6.2.	Çekme deneyi numunesi boyutları.....	64
Tablo 6.3.	AISI 4140 çeliğinin spektral analiz sonuçları.....	66
Tablo 7.1.	Üretilen deney numunelerin ölçülen yoğunluk değerleri.....	78

ÖZET

Anahtar Kelimeler: PBT, PET, termoplastik, kompozitler, mekanik özellikler, aşınma, sürtünme

Bu tez çalışmasında, PBT ve PET termoplastik malzemelerin içerisine değişik oranlarda (%10, %20 ve %30) ve farklı partikül boyutlarında (10µm, 45µm ve 60µm) Al₂O₃ katkı malzemeleri ilave edilerek PBT, PET ve PBT/PET karışım kompozitleri elde edilmiştir. Elde edilen kompozit malzeme üretimi tek vidalı ekstrüder'de gerçekleştirilmiştir. Deney numuneleri ise enjeksiyon makinasını kullanılması süreti ile üretilmişlerdir. Çekme, darbe ve sertlik deneyleri standarda uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Çekme mukavemeti, elastik modülü, kopmadaki uzama, sertlik ve darbe mukavemetlerinin artan Al₂O₃ katkıya göre değişimleri incelenmiştir. Mekanik deneylere ilave olarak, pim-disk aşınma deneyleri ile erozyon aşınma deneyleri yapılmıştır. Deneylerde üç farklı yük (50,100 ve 150N) ve iki farklı kayma hızı (0,5 ve 1,0m/s) kullanılmış olup deneyler oda şartlarında gerçekleştirilmiştir. Karşı malzeme olarak ise AISI 4140 çeliği kullanılmıştır. Partikül boyutu ve Al₂O₃ katkı oranının, sürtünme katsayısı ve aşınma oranının etkisi incelenmiştir. Deneyler sonunda tüm kompozit malzemelerin sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerleri artan kuvvetler ve kayma hızında artış göstermiştir. Adhezif aşınmaya ilave olarak erozif aşınma deneyi'de yapılmış olup, erozif aşınma deneyinde kompozit malzemelerin erozyon aşınma özelliklerine çarpma açılarının (0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°) etkisi araştırılmıştır. Adhezif ve erozyon aşınma deneyleri sonunda elde edilen yüzeyler optik mikroskop kullanılarak incelenmiştir.

THE INVESTIGATION OF MECHANICAL AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF SOME THERMOPLASTIC COMPOSITE MATERIALS

SUMMARY

Keywords: PBT, PET, thermoplastic, composites, mechanical properties, wear, friction

Poly-butylene-terephthalate (PBT), poly-ethylene-terephthalate and PBT/PET composites filled with up to 30 wt% alumina, were prepared by extrusion and injection molding machine. Alumina filler, with weight percentages varying between 10 and 30 wt%, were added to PBT, PET thermoplastic matrix and PBT/PET blend. In this study, alumina filler was used with three different particle sizes which are 10 μ m, 45 μ m and 60 μ m. Uniaxial tensile, impact and hardness tests were used to examine the effect of alumina filler addition on the mechanical behavior of PBT, PET thermoplastic materials and PBT/PET blend. Tensile strength, elongation at break, modulus of elasticity, impact energy and hardness were obtained. The results showed that the tensile strength values decreased while modulus of elasticity of PBT, PET composite linearly increased with the increase in alumina filler weight ratio. In addition to this, the impact strength and maximum elongation linearly decreased with the increase in filler weight ratio. In addition, in this wear study, dry sliding wear characteristics of PBT, PET and PBT/PET blends and its composite were investigated using a pin-on-disc ring. Disc materials are AISI 4140 steel disc. Wear tests were carried out at the sliding speeds of 0.5 and 1.0 m/s and applied loads of 50N, 100N and 150N and under atmospheric conditions of temperature and humidity. Friction coefficient and specific wear rate values for different combinations of the materials were obtained and compared. For all material combinations, it was observed that, the coefficient of friction increases linearly with the increase in applied pressure and sliding speed values. Furthermore, their specific wear rate slightly increases with the increase in applied loads and sliding speed values. Moreover, seven impingement angles (0 $^{\circ}$, 15 $^{\circ}$, 30 $^{\circ}$, 45 $^{\circ}$, 60 $^{\circ}$, 75 $^{\circ}$, 90 $^{\circ}$) were used for erosive wear test. The effect of impingement angles of PBT, PET composites in erosive wear tests was investigated. In addition, wear surface properties of all polymer composites used were investigated by using optical microscope.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Modern teknolojisinin her alanında kullanılmaya başlayan polimerler ve polimer esaslı kompozitler modern çağımızda kullanım bakımından önemli bir alana sahiptir. 21. yüzyılda plastiklerin önemi ve kullanım alanlarının artacağı görülmektedir. Polimer teknolojisinde özellikle son yıllardaki hızlı gelişmeler ve sağladığı avantajlar sayesinde polimer malzemelerin çelik malzemelere alternatif olmalarını sağlamıştır. Kurşun geçirmez camlar, yanmayan plastikler, yüksek su emme özelliği olan süperemciler, elektrik ev aletleri, yapay deri, ilaç yükleme sistemleri, kâğıt kaplama, dekoratif malzemeler, lens, roket yakıtı bileşeni, köpük elastomer vana pompa dişlileri ve çelikten daha mukavemetli tutkallar polimer malzemenin uygulama alanlarından sadece birkaç örnektir. Polimer malzemelerin işlenebilme kolaylığı, seri üretime uygunluk, korozyon ve çeşitli kimyasallara dayanıklılık, hafif ve ucuz olması gibi özellikler birleşince, plastiklerin günlük hayatta kullanıma girmesi ve hızla yaygınlaşması kolaylaşmıştır [1,2].

Genel anlamda aşınma birbiri ile temas ve hareket halinde bulunan cisimlerden oluşan, değişik oranda mekanik yüklemeler sonucunda mikroskobik parçacıkların malzeme yüzeyinde kopması sonucunda oluşan istenmeyen yüzey değişikliğidir. Aşınma, polimerin yıpranmasında kendini yavaş bir şekilde göstermesine rağmen uzun zaman diliminde önemli malzeme kayıplarına yol açmaktadır. Birbiri ile temas eden parçalar arasında kayma, yuvarlanma, kayma-yuvarlanma mevut olabilmektedir. Böylece sürtünme kinematik olarak kayma, yuvarlanma, kayma-yuvarlanma sürtünme şeklini alır.

Birbiri ile temas eden malzeme yüzeylerin arasında bir yağlayıcı madde bulunması veya koyulmaması bakımından sürtünme olayı kuru, sınır ve sıvı olmak üzere üç halde incelenebilir. Genel olarak kuru sürtünme birbiri ile temas eden yüzeyle

arasında yağlayıcı madde olmadan yapılan veya direk iki yüzeyin temas etmesi halinde oluşan sürtünmedir. Temas eden yüzeyler yağlayıcı malzeme ile ayrılmış olabilir. Bu süre zarfında esas sürtünme yağlayıcı maddenin tabakaları arasında oluşur; bu hale sıvı sürtünme denir. İkinci durumda ise yani yüzeyler tamamen ayrılmadığı takdirde, sınır sürtünmesi oluşmaktadır [3,4]. Aşınarak deforme olan parçaların dayanım özellikleri azalmakta ve eğilme, kopma, kırılma ve yağsız ortamlarda birbirine yapışma gibi istenmeyen arızalara sebebiyet verebilmektedir. Aşınmanın en aza indirilmesi için, bir birine uyumlu malzemelerin kullanılması yanında deney çalışma şartları oldukça önemlidir. Aşınmayı azaltan bir diğer faktör ise sürtünerek çalışan malzemelerin arasına yağlama sistemlerinin kullanılmasıdır. Fakat bazı durumlarda yağlamanın dezavantaj oluşturduğu da unutulmamalıdır. Özellikle sürtünme yoluyla çalışan kavramalarda ve fren sistemlerinde, birbiri ile temas halinde çalışan yüzeylere yağın bulaşması, bu sistemlerin verimli çalışmasını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu sebeple birbirleri ile uyumlu çalışabilecek ve en az aşınacak malzeme seçiminin yapılması büyük önem taşımaktadır [4].

Bu çalışmada, PET ve PBT polimerlerinin içerisine farklı partikül boyutlarında (10 μ m, 45 μ m ve 60 μ m) Al₂O₃ katkıları farklı oranlarda (%10, %20 ve %30 ağırlıkça) katılarak kompozit malzemeler üretilmiştir. Al₂O₃ katkının PBT ve PET kompozit malzemelerin aşınma ve sürtünme davranışları incelenmiştir. Bununla beraber aşınma ve sürtünmeye uygulanan yük ve kayma hızının etkisi de araştırılmıştır.

1.1. Polimerlerde Aşınma ve Sürtünme Üzerine Yapılan Literatür Çalışmaları

Polimerler ve polimer kompozitlerin aşınma ve sürtünme davranışları üzerine araştırmacılar ve bilim insanları çok sayıda çalışma yapmışlardır.

Jamal ve Basaam yaptıkları çalışmada [5]; epoksi polimerinin içerisine katılan farklı katkı malzemelerinin çelik yüzeye karşı aşınma özelliklerini incelemişlerdir. Bu çalışmada Al ve Al₂O₃ gibi iki farklı takviye malzemesi kullanılmıştır. Takviye malzemesinin parçacık boyutları 30 μ m'dan küçüktür. Bu katkılar epoksi polimeri içerisine hacimsel olarak %3, %6, %9 ve %12 oranında katılmıştır. Katkı

malzemesinin epoksiye sertlik özelliği sağladığından dolayı katkısız epoksi polimerine göre aşınma miktarı daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Yapılan çalışmada Al_2O_3 katkılı polimerin Al katkılı polimere göre aşınma miktarının daha az olduğu görülmüştür. Çünkü alüminyum oksit takviye malzemesi epoksi termoset polimerine Al takviye malzemesine göre daha fazla sertlik özelliği kazandırdığından dolayı bu sonuç elde edilmiştir. Sürtünme katsayısı değerleri ise Al_2O_3 katkılı kompozit malzemedede daha düşük değerlerde olduğu görülmüştür.

Guoliang Pan yaptıkları çalışmada [6]; nano Al_2O_3 katkılı PEEK kompozitin tribolojik özelliklerini incelemiştir. 15nm, 100nm, 500nm gibi farklı partikül boyutuna sahip Al_2O_3 oksit katkı malzemesi PEEK polimeri içerisine %5 ve %10 (ağırlıkça) oranında katılmıştır. PEEK+ Al_2O_3 ve PEEK+PTFE +%5 Al_2O_3 kompozitleri iki farklı üretim yöntemi ile elde edilmiştir. Al_2O_3 takviyeli PEEK kompozit malzemenin deneyleri sonucunda aşındırıcı malzeme üzerinde oluşan aşınma izinin az olduğu görülmüştür. Bunun nedeni olarak katkı malzemesi ile PEEK polimeri arasında bir sinerji olmaması sonucuna varıldığı tespit edilmiştir. Malzeme üzerindeki aşınma izi çizgileri düşük oranda olsa bile artış olduğu görülmüştür. EDS spektrum analizinde aşındırıcı malzeme üzerinde aşınma sırasında numunelerden oluşan demir (Fe) dışında karbo (C), oksijen (O) ve alüminyum (Al) kimyasal elementleri bulunduğu görülmüştür.

Bu da malzeme üzerinde kimyasal korozyon oluşmasına sebep olmuş ve aşınma sırasında demir oksit oluşmasına sebep verdiği kanaatine varıldığı görülmüştür. SEM analizinde partikül boyutları arttığında polimer içerisinde malzeme yüzeyinde aşınmış kalıntılarında arttığı tespit edilmiştir.

Li-xin Zhao yaptıkları çalışmada [7]; PA6 polimerinin içerisine nano ve mikron boyutlardaki Al_2O_3 takviye malzemesini %3 ve %5 oranında polimer içerisine katmışlardır. Katkı malzemesi takviyesi sonucunda elde edilen PA6 kompozitin aşınma ve tribolojik özellikleri araştırılmıştır. Aşındırıcı malzeme olarak AISI 1045 çelik malzemesi kullanmışlardır. Deneyler 0.42 m/s hızda, 50, 100, 150, 200, 250 N yüklerde ve 1 saat süre ile gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarında artan yük miktarı sonucunda elde edilen kompozit malzemedede aşınma miktarının arttığı görülmüştür.

Nano Al_2O_3 katkısı ile elde edilen kompozit malzemelerin aşınma miktarı mikron boyutunda katılan Al_2O_3 katkı malzemesi numunelerine göre daha az olduğu tespit edilmiştir. Artan yük miktarı sonucunda sürtünme katsayısı değerleri lineer olarak arttığı görülmüştür. Nano %3 Al_2O_3 katkılı numunesinin sürtünme katsayısı değeri mikron boyuttaki %3 Al_2O_3 katkılı kompozit malzeme değerine göre daha yüksek olduğunu tespit edilmiştir. Nano katkılı polimerlerin sürtünme katsayısı yüksek olmasının nedeni ise malzeme yüzeyinde aşınma sırasında numunenin güçlkle ilerlemesi sürtünme katsayısının artmasına sebep olduğu şeklinde yorumlanmıştır. Partikül boyutlarının büyük olmasından dolayı malzeme üzerinde çizikler oluşmakta ve matris'ten kopmalar meydana geldiği belirlenmiştir.

Sawyer yaptıkları çalışmada [8]; nano partikül boyutuna sahip Al_2O_3 takviye malzemesini PTFE polimeri içerisine katmışlardır. PTFE polimeri içerisine Al_2O_3 takviye malzemesi polimer içerisine %0,1, %1, %5, %10, %20, %30 ve %50 oranında katmışlardır. Aşınma sistemi olarak pin-on-disk kullanılmıştır. Kullanılan tüm polimerlerde sürtünme katsayı değerleri Al_2O_3 takviye oranının artması ile arttığı görülmüştür. En düşük sürtünme katsayısı değeri ise %0,1 oranında Al_2O_3 katkılı kompozit malzemede tespit edilmiştir. En yüksek sürtünme katsayısı değeri ise %50 Al_2O_3 takviyeli kompozit malzemede tespit edilmiştir. Yapılan çalışmada katkı oranının artması ile aşınma miktarlarında düşüş olduğu görülmüştür.

David L. Burris yaptıkları çalışmada [9]; PTFE polimer içerisine %1, %2, %5 ve %10 oranında takviye malzemesi olarak Al_2O_3 katmışlardır. Aşınma mekanizması olarak ise pin-on-disk aşındırma cihazı ve aşındırıcı olarak ise AISI 304 çeliği kullanılmıştır. Deneyde ortalama kayma hızı 50.8mm/s ve kullanılan yük 250N'dur. Kayma mesafesi artığında Al_2O_3 katkılı polimerin sürtünme katsayısı değerlerinde artış olduğunu görülmüştür. En yüksek sürtünme katsayısı değeri %10 Al_2O_3 katkılı kompozitte en düşük değer ise %5 Al_2O_3 katkılı kompozitte olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni yüzeydeki film tabakasının artması sonucu gerçekleştiği görülmüştür. Transfer film tabakası ise malzeme yüzeyinde eşit dağılım şeklinde olduğunu belirtmişlerdir. Transfer film tabakasının eşit dağılım olması ve aşınma sırasında malzemede kopmaların daha az olmasına nedeni ile malzemenin aşınma direncinin artmasına sebebiyet verdiği tespit edilmiştir.

Hong yaptıkları çalışmada [10]; Al_2O_3 takviye malzemesinin PEEK ve PTFE+PEEK polimerleri içerisinde katılması ile oluşan kompozit malzemelerin sürtünme ve aşınma davranışlarını araştırmışlardır. AFM mikro-yapı fotoğrafında Al_2O_3 oksit malzemenin yapı içerisinde homojen olarak dağıldığını tespit edilmiştir. Takviye malzemesinin parçacık boyutları 90 nm ve 500 nm olduğunda kompozit malzemenin aşınma miktarı 15nm Al_2O_3 takviyeli kompozit malzemeye göre daha az olsa bile artış olduğu görülmüştür. PEEK+PTFE polimerlerine takviye edilmiş olan Al_2O_3 malzemesinin sürtünme katsayısı değerleri PEEK+ Al_2O_3 kompozit malzemesine göre sürtünme katsayısı değerleri daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Lan-Hiu yaptıkları çalışmada [11]; değişik oranlarda (%3-%12 ağırlıkça) Al_2O_3 takviyeli POM malzemesinin tribolojik özelliklerini araştırmışlardır. Deneylede aşınma cihazı olarak pin-on-disk sistemini kullanmışlardır. Deneyleleri kuru ve yağlı ortam şartlarında gerçekleştirmişlerdir. Deneyleleri 0,42m/s kayma hızında, 98N, 147N, 196N, 245N ve 394N yükler ve 2 saat kayma süresinde gerçekleştirmişlerdir. Ortam sıcaklığı 23°C , ortamdaki nem oranı ise %60 oranında olarak belirtilmiştir. Kuru ortam şartlarında gerçekleştirilen deneyde POM+%3 Al_2O_3 kompozit malzemenin aşınma miktarı ve sürtünme katsayısı değerlerinin katkısız POM polimerinden düşük olduğu tespit edilmiştir. Fakat aşındırıcı malzeme üzerinde kalıntı parçacıkların olduğunu belirtmişlerdir. Yağlı ortam şartlarında gerçekleştirilen deneyler sonucunda ise POM+%3 Al_2O_3 kompozit malzemesinin aşınma miktarı ve sürtünme katsayısı değerleri yine benzer şekilde katkısız POM polimerine göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Bhimaraj yaptıkları çalışmada [12]; nano partikül boyutuna sahip Al_2O_3 katkılı PET malzemelerinin tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. PET polimerine (%1, %2, %5, %10 ağırlıkça) nano Al_2O_3 takviye etmişlerdir. Uygulanan yük 340N ve kayma hızı 25mm/s'dir. Bu katkı oranlarındaki deneyler sonucunda aşınma miktarı ve sürtünme katsayısının en az olduğu %2 Al_2O_3 takviyeli kompozit malzeme olduğu görülmüştür. PET polimeri içerisinde %10 Al_2O_3 katıldığında aşınma miktarında artış olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebi olarak ise aşındırıcı yüzeyde oluşan film tabakasının az olması ile aşınma sırasında malzemede kopmaların fazla olmasından dolayı olabileceği ifade edilmiştir. Film tabakası fazla olduğunda aşındırıcı malzeme

arasında yağlayıcı görevini yaparak sürtünme katsayısını düşürebileceği ifade edilmiştir.

Xiong yaptıkları çalışmada [13]; pin-on-disk aşınma cihazı kullanılarak yaptıkları çalışmada ÇYMAPE polimerinin kuru, tuzlu, damıtılmış ve plazma sürtünme şartlarında aşınma ve sürtünme özelliklerini incelemişlerdir. Deneyler 10km aşınma mesafesinde ve 3MPa yük altında gerçekleştirilmiştir. Bu deney’de çıkan sonuçlar kuru ortamda yapılan aşınma, sürtünme katsayısını sonuçları diğerlerine göre daha fazla olduğu görülmüştür. Bu değer belli bir aşınma mesafesi sonrasında takribi olarak belli bir sabit sürtünme katsayısı değerini aldığı görülmüştür. Diğer ortam şartları içerisinde en az sürtünme katsayısı plazma ortamında tespit edildiği görülmüştür.

H. Meng yaptıkları çalışmada [14]; PA 6’nın mekanik ve tribolojik özelliklerinin geliştirilmesi amacı ile polimer malzemesi içerisine karbon nano takviye etmişlerdir. Deney şartları kuru ve sulu ortamda gerçekleştirilmiştir. Aşındırıcı malzeme olarak pin-on-disk kullanılmıştır. Aşınma deneyi 1 m/s hızda 20N ve 50N yük altında 120 dakikada sürede gerçekleştirilmiştir. PA6+CNT sulu ve kuru ortamdaki sürtünme katsayısı değerleri, katkısız PA6 malzemenin sulu ve kuru ortamdaki sürtünme katsayısı değerlerinden düşük olduğu gözlenmiştir. Kuru ortamda yapılan deneyde yük miktarı arttırıldığında sürtünme katsayısı değerlerinde artış olduğu gözlenmiştir. Fakat sulu ortamda gerçekleştirilen deneyde ise tam tersi sonuç elde edildiği tespit edilmiştir. Sürtünme deneyi sonucunda pim yüzeyinde elde edilen sıcaklık değerleri PA6 polimerine göre PA6+CNT takviyeli kompozit malzemenin sıcaklık değerleri daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Burada sıcaklığın değerlerinin düşük olmasının sebebi yüksek sıcaklık iletkenliğine sahip olan karbon CNT’den (nanotüp) kaynaklandığı belirlemişlerdir. Sulu ortamdaki aşınma miktarlarının her ikisinde artış göstermesinin sebebini ise muhtemelen suyun kimyasal korozyon aşınmasına neden olabileceğini şeklinde yorumlanmıştır.

Ünal yaptıkları çalışmada [15]; PA66, POM, ÇYMAPE, %30 cam fiber takviyeli polifenilen sülfid (PPS+%30GFR) ve Alifatik keton (APK) polimerlerinin kayma hızı ve basınç altında sürtünme ve aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Çalışmada

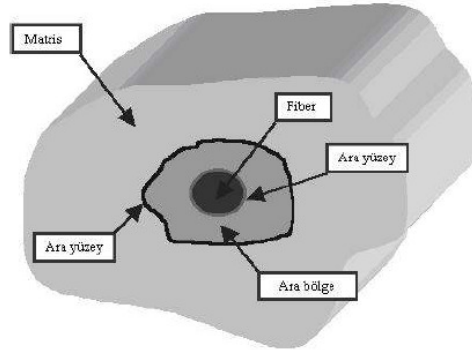
kullanılan tüm polimerlerde, sürtünme katsayısı basıncın artmasıyla birlikte lineer olarak azalmıştır. Kayma hızının artmasıyla sürtünme katsayısının arttığı belirlenmiştir. Spesifik aşınma oranının ise uygulanan yük ve basınçtan fazla etkilenmediğini belirtmişlerdir.

Seabra ve Baptista yaptıkları çalışmada [16]; PTFE, ÇYMAPE, YYPE, PA 6, POM-C ve polietilen tereftalat (PET) polimerlerinin paslanmaz çelik diske karşı, blok-on-ring aşınma sistemi ile tribolojik özelliklerini belirlemişlerdir. Kullanılan polimerler içerisinde ÇYMAPE, en düşük sürtünme katsayısı ve aşınma oranı göstermiştir. Artan yük ile sürtünme katsayısı poliamid için artarken, ÇYMAPE için azalmıştır. Kayma hızının artırılması ile PA6 ve ÇYMAPE için sürtünme katsayısı azalmıştır. PA6 ve ÇYMAPE polimerleri için yükün artması ile aşınma oranları artarken, kayma hızı ile azalmıştır.

Srinath ve Gnanamoorthy yaptıkları bu çalışmada [17]; nano-clay katkılı PA6 kompozitlerin kuru ve sulu ortam şartlarında tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Nano-clay ilavesi ile PA6'nın sürtünme ve aşınma oranları azalmıştır. Düşük yüklerde, sulu şartlar altındaki sürtünme katsayısının kuru ortam şartlarına göre daha yüksek olduğunu, artan yük ile birlikte yüzeyin yumuşaması nedeniyle sürtünme katsayısının azaldığı belirlenmiştir. Kuru ortamda artan yük ile birlikte sürtünme katsayısı sürekli artmıştır. Hem kuru hem de sulu ortam şartları altında artan yük ile spesifik aşınma oranı arttığı tespit edilmiştir.

Wang ve Li yaptıkları çalışmada [18]; ÇYMAPE'nin aşınma davranışı üzerine kayma hızı ve yükün etkisi incelemişlerdir. Çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar, ÇYMAPE'nin aşınma davranışı uygulanan yüke göre kayma hızından daha fazla etkilenmiştir. Aşınmanın başlangıcında sürtünme katsayısı 0,12 ile 0,14 arasında iken daha sonrasında 0,09 ile 0,10 arasında elde edilmiştir. Aşınma zamanına göre başlangıç, kararlı hal ve şiddetli aşınma periyotları olmak üzere üç farklı aşınma periyodu elde edilmiştir.

Sirirat Wacharawichanant yaptıkları çalışmada [19]; POM polimeri içerisine 71nm ve 250nm partikül boyutlarına sahip ZnO katmışlardır. Numuneleri extrüzyon yardımıyla elde edilmiştir. Çekme testi deneyleri ASTM D 638'e göre yapılmıştır. Çekme hızı 50mm/dk'dır. Charppy darbe testi deneyi ise oda sıcaklığında D6110-06 (ISO 179) standardına göre yapılmıştır. Nano partikül boyutlu ZnO katkı malzemesinin çekme mukavemetini artırmadığı görülmüştür ve bunun sonucu ZnO katkısının artması ile polimerin kristalleşme özelliğinin azaldığı ifade edilmiştir. ZnO katkı oranının artması ile POM kompozitin elastik modülünün arttığı tespit edilmiştir. Polimer içerisine ZnO katkı oranı artması ile belli bir değere kadar darbe mukavemetinin arttığı görülmüştür ve çekme mukavemet değerlerinde azalma olduğunu tespit edilmiştir. Şekil 1.1'de kompozit malzeme ara yüzey yapısının şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 1.1. Kompozit malzeme ara yüzey yapısının şematik gösterimi [20]

Shibo Wang yaptıkları çalışmada [21]; PA polimeri içerisine 50 ve 175 μ m partikül boyutlarına sahip ZnO katmışlardır. Çekme testi deneyleri LR 50k deney makinesi ile ASTM D 638 (ISO 527) standardına göre yapmışlardır. Çekme hızı 2mm/dak.'dır. %10 ZnO katkı oranına kadar çekme mukavemetinde artış olduğu görülmüştür. %15 ve %20 ZnO katkı miktarında ise mukavemet değerlerinde düşme olduğu görülmüştür. Bunun sonucu ZnO katkı oranı artması ile polimerin kristalleşme özelliğinin azalması belirlenmiştir.

Thomas P. Selvin yaptıkları çalışmada [22]; katkısız Polistiren (PS) polimeri içerisine TiO_2 takviye malzemesi %5, %10, %15, ve %20 oranlarında katmışlardır. Çekme testi deney numunelerin ölçüsü $10 \times 1,2 \times 2 \text{ cm}^3$ dür. Çekme testi deneyleri ASTM D 638 (ISO 527) standardına göre yapılmıştır. Çekme hızı 10mm/min'dır. %10 TiO_2 katkı kompozit malzemenin çekme mukavemetinde artış olduğu görülmüştür. %15 ve %20 TiO_2 katkı kompozit malzemenin mukavemet değerlerinde düşme olduğu tespit edilmiştir. Elastik modül sonuçları da aynı olduğu görülmüştür. Darbe testi deneylerini ise oda sıcaklığında D6110-06 (ISO 179) standardına göre yapmışlardır. Darbe deney cihazı olarak AMP 105 kullanmışlardır. Katkı oranının PS matris içerisinde artması darbe mukavemet değerlerinin doğrusal bir şekilde azalmaya sebep olmuştur. Bunun sebebi ise, TiO_2 katkı malzemesinin polimere gevreklik kazandırmasından dolayı olabileceğini ifade edilmiştir.

A.P. Harsha yaptıkları çalışmada [23]; PAEK polimeri içerisine takviye malzemesi olarak cam fiber, karbon fiber ve PTFE katmışlardır. Erozyon test aşındırıcı malzeme olarak kum (silika) malzemesini kullanmışlardır. Kullanılan kumun partikül boyutu 125-212 μm ölçülerindedir. Erozyon test numunesi için 30mm x 30x 5mm ölçülerinde deney numuneleri kesilmiştir. Deneyde çarpma açısı olarak 10, 30, 60, 90 ° açılarda ve 39, 68, 90 dakika süresi içinde deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Katkısız PAEK polimeri 39 ve 90 dakika süreler erozyon aşınma deneyine tabi tutulduğunda 60° açıda daha fazla aşınma gösterdiği tespit edilmiştir. Sebebi olarak bu açı değerinde aşındırıcı malzeme olan kumun polimer üzerine çarpma hızı arttığından dolayı polimer malzeme bu açı değerinde en fazla aşınmaya uğrayabileceği belirlenmiştir. 15-30° açılarda görülen erozyon aşınma pik değerinde bu malzemenin sünek , 90°'de görülen erozyon aşınma pik değerinde ise malzemenin gevrek yapıya sahip olduğu görülmüştür.

Sanjeev Kumar Jha yaptıkları çalışmada [24]; epoksi polimeri içerisine takviye malzemesi olarak cam fiber ve G 30-500 karbon fiberini katmışlardır. Erozyon test aşındırıcı malzeme olarak kum kullanılmıştır. Kullanılan kumun partikül boyutu 150-250 μm dir. Erozyon test numunesi için 30mm x 30mm x 5mm ölçülerinde deney numuneleri hazırlanmıştır. Deneyde çarpma açısı olarak 30, 45, 60, 75, 90 ° çarpma açılarında deneyler yapılmıştır. Deneyler 37, 67, 60 dakika da gerçekleştirilmiştir.

15-30° açılarda görülen erozyon aşınma değeri malzemenin sünek, 45-60° açılarda görülen erozyon aşınma değeri malzemenin yarı sünek, 90° ise görülen erozyon aşınma değeri ise malzemenin gevrek yapıya sahip olduğu belirlenmiştir. Katkısız epoksi polimeri 39 ve 90 dakika sürelerde erozyon aşınma deneyine tabi tutulduğunda 60° açıda daha fazla aşınma gösterdiği tespit edilmiştir. Bunun sebebi olarak bu açı değerinde aşındırıcı malzeme olan kumun polimer üzerine çarpma hızı arttığından dolayı polimer malzeme bu açı değerinde daha fazla aşınmaya maruz kalabildiği söylenmiştir.

BÖLÜM 2. AŞINMA VE SÜRTÜNME

2.1. Aşınma

Aşınma denilince akla gelen ilk şey, farklı etkiler sonucunda malzeme yüzeyinden sürekli malzeme kayıplarının oluşması olarak algılanmaktadır. DIN 50320 ve ASTM G4093 standardına göre aşınma, “kullanılan malzemelerin başka malzemelerle (katı, sıvı ve gaz) teması neticesinde mekanik etkenlerle yüzeyden küçük parçacıkların ayrılması sonucu meydana gelen ve istenilmeyen yüzey bozulması” şeklinde tanımlanmaktadır [25].

Aşınma; mekanik, fiziksel ve kimyasal etkiler sonucunda temas halindeki malzeme yüzeylerinde malzeme kalkması olarak tanımlanabilmektedir. Aşınma sürecinin bir nitel görünümü, eksilen malzeme miktarının çok küçük olması şeklindedir.

Bir aşınma olayının oluşmasını sağlayan ana etmenler

- Ana malzeme (aşınan)
- Karşı malzeme (aşındırıcı)
- Ara malzeme
- Yük
- Hareket

Aşınan ve aşındırıcı malzemelere “aşınma çifti” denilmektedir. Aşınma çifti ile ara malzemeye “aşınma kombinasyonu” denilmektedir. Bu aşınma çifti arasındaki ara malzeme birkaç farklı şekilde olabilmektedir. Bunlar sert taneli, sıvı, gaz ve buhar halinde olmaktadır.

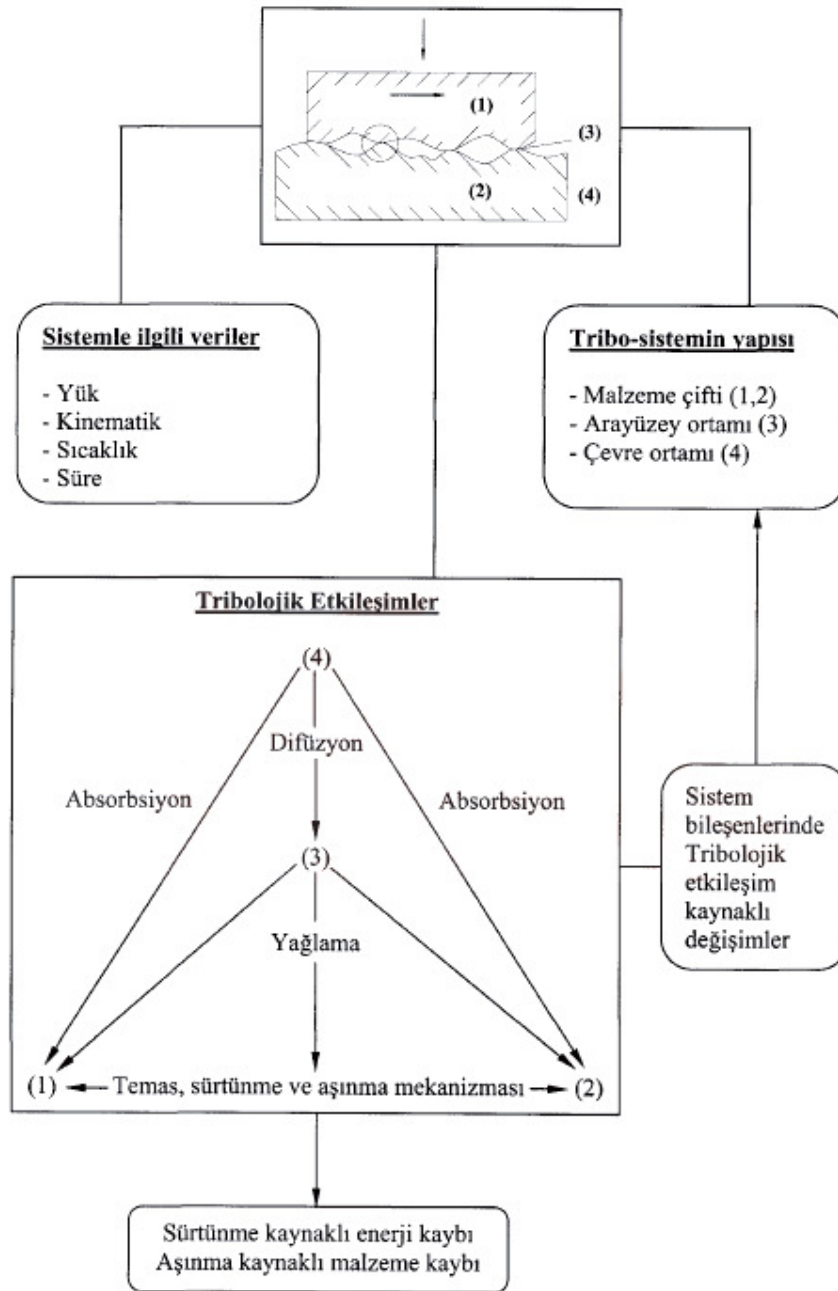
2.2. Tribolojik Sistem

Triboloji, “bir izafi hareket içinde bulunarak birbirlerine etki eden yüzeylerin ve bunlarla ilgili olayların bilimi veya tekniği” olarak tanımlanmaktadır. Yunanca sürtünme anlamına gelen “tribo” kelimesinden türetilen tribolojik; sürtünme, aşınma ve yağlamanın bilimsel olarak incelenmesini ve tribolojik bilgilerin teknik uygulanmasını içermektedir [4,11]. Şekil 2.1!de bir tribolojik sistemin şematik olarak gösterilmiştir.

İçinde aşınma ve sürtünme olaylarının gerçekleştiği teknik sistemlere tribolojik sistem denilmektedir. Mühendislik malzemelerinin sürtünme ve aşınma davranışlarının araştırılmasında mekanik sistemleri bir tribolojik sistem olarak dikkate almak gerekir. Yani aşınma olayı bir sistem bütünlüğü içerisinde ele alınmalıdır [4,11].

Tribolojik sistemi oluşturan unsurlar, ana malzeme (aşınan), karşı malzeme (aşındıran), ara malzeme, yük, hareket ve çevreden oluşmaktadır. Bir tribolojik sistem bu unsurların birçoğunu içinde bulundurur. Aşınma çiftini oluşturan ana malzeme ve karşı malzeme aralarında belirli bir ara malzeme varken az veya çok yük altında hareket ettiklerinde aşınma başlar. Ana malzeme; metal, mineral, plastik, kauçuk, ağaç, deri gibi aşınma karakteristiğine önem verilen katı cisimdir. Aşındıran malzeme ise metal, mineral, plastik, ağaç şeklinde katı olabileceği gibi sıvı veya gazlarla karışım durumunda da olabilir [1,4].

Ara malzeme ise yağlar ve aşınma partikülleri olabileceği gibi bir maddede olmayabilir. Endüstride çoğu zaman aşınma partikülleri yüzeylerden temizlenememektedir. Böyle durumlarda arada yağlayıcı olarak bir malzemede yoksa, kuru sürtünmeden söz edilir.



Şekil 2.1. Bir tribolojik sistemin şematik olarak gösterilmesi [12]

Çevre bir çalışma ortamıdır. Yükleme, darbeleri, darbesiz, sabit, değişken, artan, azalan şeklinde veya bunların birden fazlasının bir arada bulunması halinde olabilmektedir. Hareket ise kayma, yuvarlanma, kaymalı yuvarlanma, darbe gibi biçimlerde olabilir [4,11].

Tribolojik sistemde ortaya çıkan aşınma mekanizmaları da farklıdır. Adhesiv aşınma, abrasiv aşınma (şekil 2.3), yorulma aşınması, tribooksidasyon aşınması gibi mekanizmalarla tanımlanan aşınma, tribolojik sistem içerisinde genellikle tek başlarına bulunmazlar ve etkin oranları kesin olarak belirlenemez. Ancak etken olan aşınma mekanizmasına göre önlemler yoğunlaştırılabilir. Tribolojik test cihazları, gerçek sistemlerde etkenlerinin analiz edilebilmesinin zorluğu ve ölçümlerin uzun sürelerde ve güçlükle yapılabilmesinden dolayı model sistemlerinin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Araştırmacılar genellikle inceledikleri sistemi dikkate alarak çalışmalarında kullanacakları aşınma test cihazlarını seçerler ve tasarlarlar. Bu seçim veya tasarımlarda, gerçek sistemi oluşturan tribolojik unsurları sağlayabilen ve sonuçları büyük oranda tekrarlayabilen cihazların belirlenmesi önemlidir. Aşınma test cihazları kısmen standartlaştırılmıştır. Ancak standart test cihazlarında her sistemin şartlarını bulmak mümkün olmamaktadır [6].

2.3. Aşınmanın Ekonomik Boyutu

Endüstride aşınma önemli bir tehlike oluşturmaktadır. Aşınma olayına zamanında ve sistematik bir şekilde önlem alınmadığı takdirde önemli sonuçların oluşmasına sebebiyet verebilmektedir. Aşınmanın oluşturduğu maliyet hakkında fikir verebilmek için Almanyada aşınmanın 2 milyarı metalurji, 500 milyonu plastik imalat sanayi, 1 milyarıda diğer sanayi kolları olmak kaydı ile 5 milyar DM'lik bir maliyet yüklendiği söyleyebilmekteyiz. Hala ülkemizde aşınmanın ekonomik olarak oluşturduğu olumsuzluklar, etkili bir şekilde dikkate alınmamaktadır. Herhangi bir nesnenin kullanılmaz hale gelebilmesi üç sebepten olabilmektedir. Bunlar: kullanılmaz hala gelmesi (modasının geçmesi), kırılma ve aşınmadır. Elbette farklı nesne sınıflarındaki bu nedenlerin etkileride farklıdır.

2.4. Aşınmaya Etkileyen Faktörler

ASLE (American Society of Lubrication Engineers)'ye göre aşınma, mekanik etkilerle malzeme kaybı olarak tanımlanır. OECD (Organization for Economic Cooperation and Development) araştırma grubuna göre, yüzeyde relatif hareket sonucu olarak cisimden sürekli malzeme kaybı olarak tanımlanmaktadır. Alman DIN 50320 normuna göre ise aşınma, kullanılan malzemelerin başka malzemelerle (katı, sıvı, gaz) teması neticesinde mekanik etkenlerle yüzeyden küçük parçacıkların ayrılması sonucu meydana gelen ve istenilmeyen yüzey bozulması şeklinde tanımlanmaktadır.

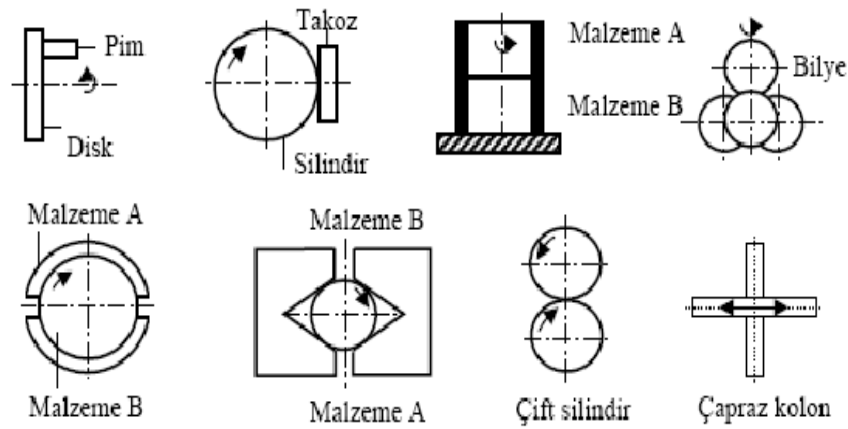
Bu temas halinde olan malzemelerde malzeme kayıpları üç şekilde olmaktadır. Bunları şöyle söyleyebiliriz: bölgesel erime, kimyasal çözünme ve yüzeyden fiziksel anlamda oluşan ayrılmalardır. Uygulamalarda aşınma kapsamına bu üç malzeme kaybı çeşidinden fiziksel anlamda meydana gelen malzeme kayıpları da dahil edilmektedir. Fiziksel aşınma türünün meydana gelebilmesi için temel unsurlar şunlardır;

- a. Ana malzeme (Aşınan)
- b. Karşı malzeme(Aşındırıcı)
- c. Ara malzeme
- d. Yük
- e. Hareket

Çevresel şartlar aşınmayı etkileyen diğer en önemli faktörlerden bir tanesidir. nemli veya korozif ortam aşınma olayını hızlandırıcı etkiye sahiptir. Aşınma sırasında yüzeyler arasında yağlayıcı malzeme veya malzeme yüzeyini koruması açısında yapılan sert kaplamalar bile mekanik etkiler bozulması sonucunda aşınma sırasında temas halinde olabilirler. Bunun sonucunda bu malzemenin kullanım ömründe bir azalma meydana getirmektedir.

2.5. Aşınma Test Modelleri

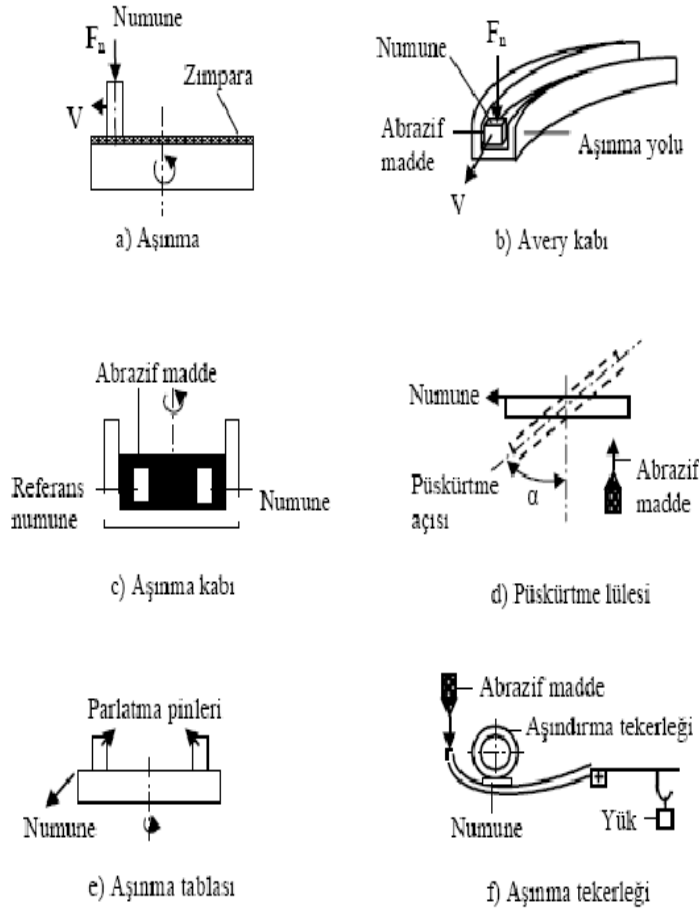
Aşınmanın gerçek sistemlerde belirlenmesinin zorluğu, bir kısmı standartlaştırılan model cihazların geliştirilmesine yol açmıştır. Model cihazlarda tribolojik sistemi oluşturan unsurların, gerçek sisteme uygun şekilde oluşturulması, sonuçların tekrarlanabilir olması bu cihazlardan beklenen özelliklerdir. Kayma sürtünme ve aşınma test cihazı modelleri tribolojik prensiplere göre Şekil 2.2’de şematik olarak gösterilmiştir [26].



Şekil 2.2. Şematik kayma sürtünmesi ve aşınma test modelleri [26]

Model aşınma test cihazlarıyla yapılan testlerin amaçları genellikle şöyle sıralanabilir;

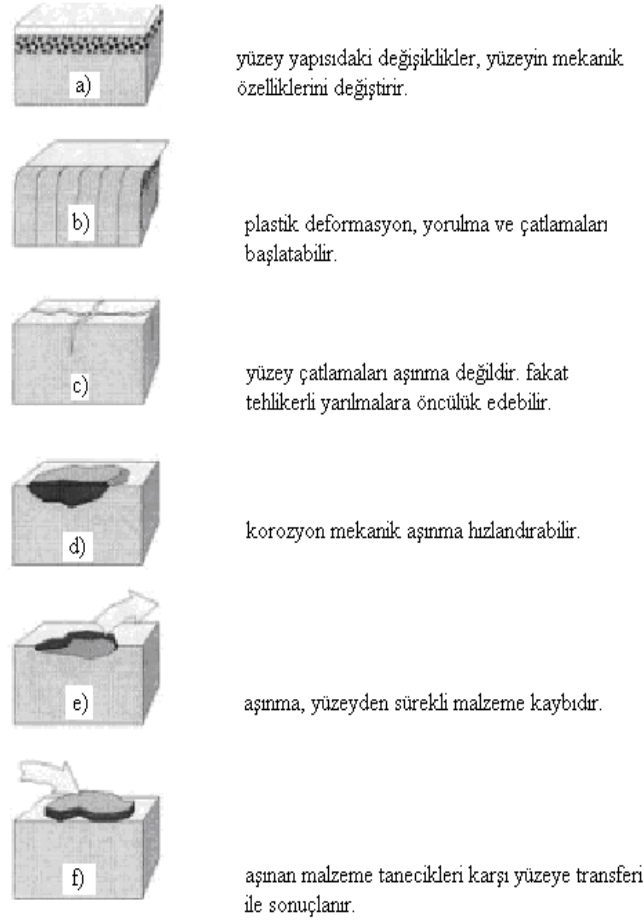
- Sistem elemanlarının verimini, ömrünü, güvenilirliğini, fonksiyonunu, bakım yapılıp yapılmaması gerektiğini belirlemek, kalite kontrolünü yapmak.
- Malzemelerin ve yağlayıcıların tribolojik davranışlarını belirlemek.
- Malzeme kayıplarını araştırmak.
- Yeni malzeme veya sürtünme ve aşınma azaltıcı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



Şekil 2.3. Şematik abrazif aşınma test modelleri [1]

2.6. Aşınma veya Yüzey Deformasyonu

Yüzey deformasyonu ve bozulma nedenleri çok geniştir [8]. Önemli tribolojik yüzey bozulmalarının sınıflandırılması Şekil 2.4'de gösterilmiştir. Yüzey yapısındaki değişiklikler, yüzeyin mekanik özelliğini değiştirdiği gibi plastik deformasyonu sağlar, yorulma ve çatlama başlmasına neden olmaktadır. Yüzey çatlakları malzemenin tehlikeli bir biçimde yarılmasına sebep vermektedir fakat bu çatlama olayı aşınmaya girmemektedir. Malzeme yüzeyinde oluşan korozyonlar mekanik aşınmayı hızlandırıcı etkiye sahiptirler. Bu da malzeme yüzeyinden sürekli malzeme kaybına neden olur.



Şekil 2.4. Yüzey aşınma ve bozulmalarının sınıflandırılması [7]

Şekil 2.4'deki yüzey aşınma ve bozulmaları sırasıyla açıklanacak olursa;

- Yüzeydeki yapısal değişiklikler, yüzey kaplama ya da kristalleşme gibi yüzey değişiklikleri yüzeyin mekanik deformasyonuna yol açabilir. Yüzeydeki yapısal değişiklikler aşınmayı gerektirmez, fakat dış yüzeyin mekanik özelliklerini değiştirebilir ve aşınma durumunu başlatabilir veya diğer çeşitli yarılmaları oluşturabilir (Şekil 2.4 a).
- Plastik deformasyon, yüzeyde termal genişleme ve azalmalar ya da mekanik gerilmelerin etkisiyle oluşur. Yüzey bölgesinin plastik deformasyonu, dereceli aşındırmayı gerektirmemesine rağmen sonuçta tehlikeli yarılmalara öncülük

- edebilecek önemli yüzey hasarlarının meydana gelmesi muhtemeldir (Şekil 2.4 b).
- Yüzey bölgesindeki çatlamlar, aşırı yüzey gerilmeleri, yorulma deformasyonları ya da tekrar eden termal değişikliklerin nedeni olabilir (Şekil 2.4 c).
 - Korozyon ve diğer kimyasal etkiler, başlıca aşınma mekanizmasında yer alabilir. Kimyasal etkiler çatlağın genişlemesini hızlandırır ve yüzey kayıplarının da nedenidir (Şekil 2.4 d).
 - Aşınma yada yüzey hasarı, çeşitli aşınma çeşitleri ile mikroskobik parçacıklar şeklinde yüzeyden sürekli malzeme kayıplarını içerir. Neticede aşınma mekanizması hem mekanik hem de kimyasal olabilir (Şekil 2.4 e).
 - Aşınan malzeme taneleri, karşı yüzeye transfer olur. Yüzeyde sürtünmeden dolayı oluşan aşırı ısınmanın etkisi ile aşınan tozlar toplanarak ara yüzeyde üçüncü yüzey tabakası meydana getirirler bu durum uygun kayma sürtünmesinin de nedenidir (Şekil 2.4 f) [1,8].

2.7. Aşınma Mekanizmaları

Aşınma işlemleri, aşınma iz şeklinin görünüşüne, malzeme yüzeyinden malzeme kayıplarının oluşması veya hasarın meydana geldiği fiziksel mekanizmaya göre ve aşınmanın gerçekleştiği koşullara göre üç ayrı grupta da sınıflandırılabilirler. Malzeme yüzeyindeki aşınma iz görünüşleri şu şekilde olabilmektedir: çukurlanma, pullanma, çizilme, parlama, oyulma, kemirilme ve kazımadır.

2.7.1. Adhezyon aşınma (yapışma ve yenme aşınması)

Bu aşınma türü, özellikle birbiri ile kayma sürtünmesi yapan metal-metal çiftinde meydana gelen kaynaklaşma olayı olarak adlandırılmaktadır. Birbiri üzerinde temas eden yüzeylerin temas kısımları çok küçük olmasına rağmen temas eden yüzeylerdeki gerilmeler, küçük miktarda yüklemeler sonucunda olsa akma gerilmesi

sınırına ulaşır ve geçerler. Bunun sonucunda moleküller yapışma etkisi göstermektedir. Bunun sebebi ise bir parçadan diğerine malzeme geçişi, soğuk kaynaklaşmadır. Buda küçük parçaçıkların kopması gibi olayların meydana gelmesine sebep verir. Bu tip aşınmada bu tür sonuçlardan kaçınmak mümkün değildir [25].

Adhezyon aşınma ile ilgili yapılan çalışmalar da elde edilen sonuçlar kısaca şu başlıklar altında toplanmaktadır.

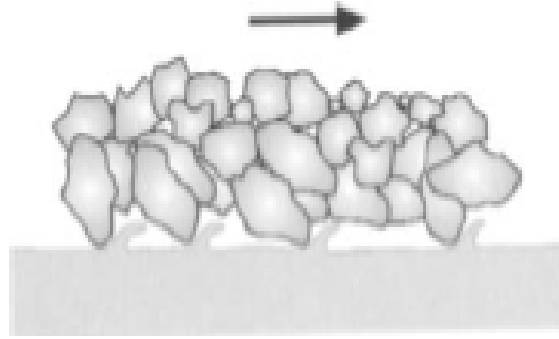
1. Adhezyon aşınma benzer veya kolay alaşım yapabilen malzemeler arasında gerçekleşmektedir.
2. Olay, yüzeylerin izafi hızına ve normal kuvvete bağlıdır.
3. Adhezyon aşınması sürtünmeyi tayin eden bütün kaynak noktalarında meydana gelmektedir.
4. Oksit veya nemden oluşan doğal tabakanın olay üzerinde etkisi büyüktür.

Adhezyon aşınmasını önlemek amacı ile gereken tedbirler şu şekilde sıralanabilir:

1. Eş çalışacak malzeme çiftleri uygun seçilmelidir. Örneğin çelik ile eş olarak çalışabilen metal malzemeler kullanılmalıdır.
2. İyi bir yağlanma yöntemi sağlanmalı ve uygun yağlayıcı maddeler ile katkıları kullanılmalıdır.

2.7.2. Abrasiv aşınma

Abrasiv aşınma, temas eden iki cisimden daha sert olanın, pürüzlü yüzey tepecikleri vasıtasıyla diğer malzeme üzerinden mikron mertebesinde talaş kaldırması olayına denilmektedir. Şekil 2.5. Abrasiv aşındırma şeması verilmiştir.

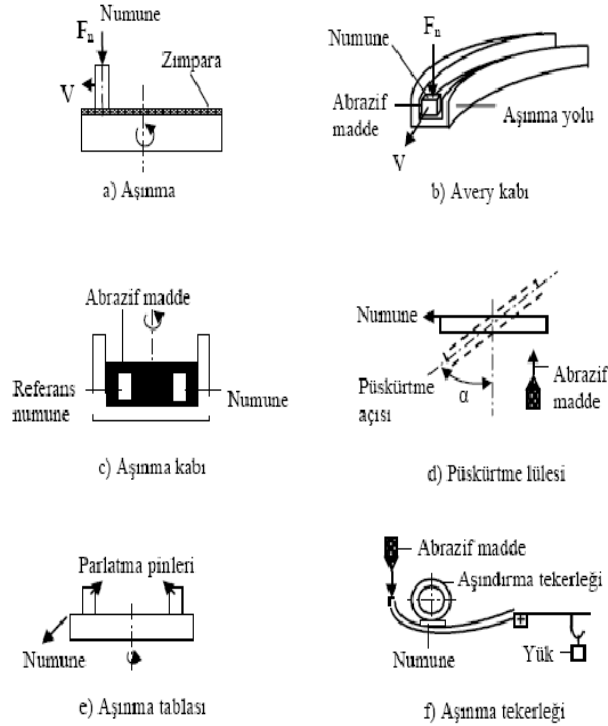


Şekil 2.5. Abrasiv aşındırma şeması [27]

Aşınma olayı talaş çizme, kesme, raybalama ve çarpma sonucunda meydana gelebilir. Abrasiv aşınma için kullanılan test yöntemler şekil 2.6 ve şekil 2.3’de gösterilmiştir. Şekil 2.6-a’da görüldüğü gibi sabitleştirilmiş bir abrasiv malzeme üzerinde pim şeklinde numunenin aşındırıcı malzeme üzerinde dairesel dönme yöntemi ile aşınması sonucunda oluşmaktadır. Bu dairesel dönme hareketi sonucunda oluşan aşınma ile aşındırıcı malzeme yüzeyinde bir iz oluşmaktadır. Test işlemi öncesinde deney numunesi iyi bir kurutma işlemi yapıldıktan sonra tartılır ve aşınma işlemi yapılır. Aşınma testinden sonra polimer malzeme nem almış olabileceği baz alarak kurutma işlemi tekrar yapılır. Son ağırlığı tartıldıktan sonra aşınma miktarı tespit edilir. Abrasiv aşınma genel olarak tarım aletleri ve makinalarında, maden işletmelerinde, iş makinalarında, imalat, çimento ve seramik sanayisinde görülür [26].

Kayan sistemlerde abrasiv aşınma işlemini engellemek için, abrasiv aşınmaya direnç gösterecek malzemenin yüzeylere yapışan partiküllerden daha sert olmalıdır. Bir malzeme için en yüksek aşınma direncine orta seviyedeki sertlik ve tokluk değerlerinde ulaşabilmektedir. Genelde sertliği yüksek malzemelerin, kırılma tokluğu düşüktür ve gevrek kırılma yoluyla abrasiv aşınırlar. Ortamda oksijen varlığında, metallerin abrasiv aşınması daha şiddetlidir. Genelde abrasiv aşınma, aşınmaya maruz malzemenin sertliği, abrasiv aşındırıcı partiküllerin geometrisi, uygulanan yük ve kayma mesafesiyle orantılıdır [26].

Abrasiv aşınmada yağlama aşınma hızını yükseltirken, adhesiv aşınmada aşınma hızını azaltır. Abrasiv aşındırma işleminde, aşındırıcı malzemenin kendinden sert bir cismi aşındırmayacağı bir gerçektir. Abrasiv aşınmada abrasiv aşındırıcı malzeme, aşındırılacak yüzeyden sert olmalıdır. Çalışılan ortamdaki yüksek nem oranı da aşınma hızını yaklaşık % 15 artırır [26].



Şekil 2.6. Şematik abrasiv aşınma test modelleri [1]

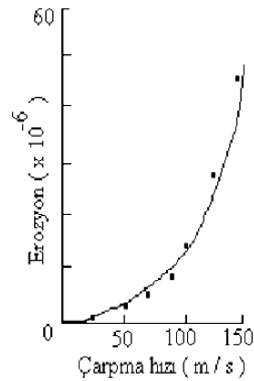
2.7.3. Erozyon aşınması

Erozyon aşınma veya daha başka bir şekilde kullanım şekli ile erozyon aşınma: bir gaz akımı veya akışkan bir sıvı yardımı ile taşınan sert partiküllerin malzeme yüzeyine çarpması ile meydana getirdikleri bir aşınma mekanizmasıdır. Bazı kısımları ile abrasiv aşınmaya benzemektedir. Isı üretim, sentetik yakıt santralleri, dizel motorları, gaz, buhar, dizel tribünler, akışkan yataklar, madencilikte, kum/su çamur taşıma sistemleri gibi endüstri dallarında erozyon aşınmadan dolayı yüksek derecede maliyete yol açmaktadırlar. Erozyon aşınmada genellikle sert yapıya sahip

partiküllerin mevcut olduğu ortama, aşınan malzemenin çarpma açısı ve deney hızına bağlı olarak iki şekilde sınıflandırılabilir [26].

Genellikle görülen erozyon aşınma çeşidi katı partikül ile oluşan erozyon aşınma şeklindedir. Bu tür erozyon hasarları yüksek hasar ve maliyete neden olmaktadır. Kum-su taşıma sistemleri gibi sistemlerde sert partiküller mevcut olduğundan erozyon aşınmaya neden olurlar. Bazı durumlarda ise aşındırıcı malzeme olarak giderilemeyen partiküller sayesinde erozyon aşınma meydana gelmektedir. Erozyon aşınma aşağıdaki dört grupta toplanabilir. Şekil 2.7’de çarpma hızı artması ile erozyon etkisi görülmektedir.

- katı partikül erozyonu
- sıvı partikül erozyonu
- kavitasyon erozyonu
- kıvılcım erozyonu



Şekil 2.7. Aşındırıcı çarpma hızının erozyona etkisi [27,4]

2.7.4. Öğütmeli aşınma

Bu tip aşınma ise, ağır yükler uygulandığında oluşan aşınma ile kırılan malzemelerin keskin köşeli parçacıklar halini alması sonucu malzeme yüzeyini çizmesi ve kırması ile meydana gelen aşınma türüdür.

2.7.5. Kazımalı aşınma

Karşılıklı iki yüzeyden birisinin sahip olduğu sert pürüzlerin sebep olduğu iki elemanlı abrasiv aşınmada, yüzeyde yüksek oranda deformasyon söz konusu olmaktadır. Yüzeyden kopan sert partiküllerin iğne şeklinde oluşturmuş oldukları yapıdan dolayı yüzeyin aşınması ve delinmesi sonucunda meydana gelmektedir.

2.7.6. Oymalı aşınma

Oymalı aşınma ise, karşılıklı yüzeylerden birisinin üzerindeki mikro boyuttaki sert partiküllerin neden olduğu iki elemanlı abrasiv aşınma çeşidine denilmektedir.

2.7.7. Koroziif aşınma

Korozyonlu aşınma; birbirleriyle temas halindeki yüzeylerin kayma sırasında çevrelerindeki ortamla kimyasal olarak reaksiyona girmeleriyle oluşur. Korozyonlu aşınmada ortamla temas halindeki yüzeyler arasında dinamik bir ilişki mevcuttur. Koroziif aşınma iki kademedede gerçekleşmektedir [24].

- İlk adımda; temas halindeki yüzeyler ortamla reaksiyona girerler. Reaksiyon ürünleri yüzeylerde meydana gelir.
- İkinci adımda; temas alanındaki reaksiyon ürünleri çatlak oluşumu veya abrasiv etkiye neden olur.

Tribooksidasyon-tribokimyasal aşınma adı da verilen koroziif aşınma durumunda, ana malzeme ile karşı malzeme arasındaki tribolojik zorlanmalardan dolayı meydana gelen kimyasal reaksiyon etkindir. Malzeme yüzeyinin hava ile reaksiyona girerek oluşturduğu yüzey tabakaları (oksit tabakası) aşınmayı azaltmasına rağmen, bu yüzey tabakalarının tribooksidasyon sonucu malzemenin özelliklerinin değişmesi sonucunda aşınmayı hızlandırmaktadır. Tribooksidasyon aşınması, özellikle metalik malzeme yüzeylerinde görülür [27].

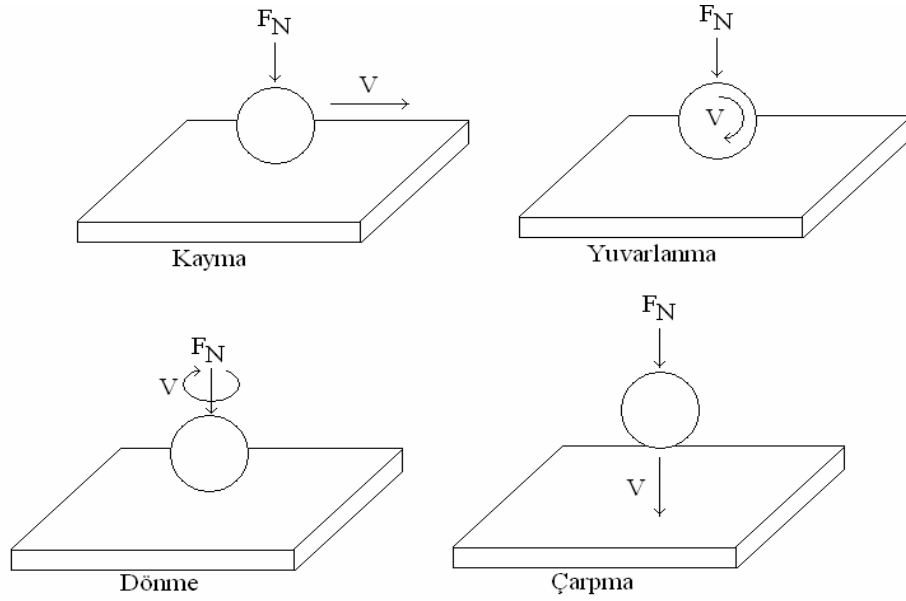
Neticede malzeme yüzeyinde çatlaklar oluşur, bu çatlaklar daha sonra yüzeyden küçük parçacıkların ayrılmasına, çukur ve oyukların meydana gelmesine neden olur. Bilya ve yatak arası veya yatak ve bilyalı yatak üzerindeki muhafaza arası, mahrutu dişliler, miller ve demiryolu aksları, perçinli bağlantılar, kavramalar, zincir halkaları, yaprak yaylar, kayan yüzeyler arasındaki contalar tribokimyasal reaksiyondan dolayı aşınabilen parçalardır [27].

2.8. Sürtünme

En genel anlamda sürtünme, temasta olan ve birbirine göre bağıl hareket yapan elemanlar arasındaki harekete karşı ortaya çıkan direnç olarak tanımlanır. Bazı durumlarda sürtünmenin sayısal değeri hesaba katılmayacak kadar küçük olsa bile pratikte daima mevcuttur. Sürtünme sırasında oluşan direnç mekanizmaları oldukça fazladır ve yaptıkları etki oldukça farklıdır. Bağıl hareketin türü, elemanların fiziksel durumları, aralarında üçüncü maddenin bulunup bulunmadığı ve ortam şartları gibi parametreler sürtünme olayı daha karmaşık hale getirmektedir. Hareketin cinsine göre sürtünme, kayma, yuvarlanma, kaymalı yuvarlanma, dönme veya çarpma şeklinde olmaktadır [28].

2.8.1. Sürtünme mekanizmaları

Sürtünme kavramı; birbiri üzerinde hareket eden iki yüzey arasına yağlayıcı madde koyulması veya koyulmaması bakımından temas eden yüzeyler arasında duruma göre, kuru, yarı sıvı (sınır sürtünmesi) ve sıvı sürtünme (film sürtünmesi) olarak üç grupta incelenmektedir [6]. Şekil 2.8’de tribolojik sistemlerin kinematikleri gösterilmektedir.



Şekil 2.8. Tribolojik sistemlerin kinematikleri [4,5]

2.8.1.1. Kuru sürtünme

Genel olarak yabancı maddelerden arındırılmış yüzeylerin atmosfer şartlarındaki sürtünme hali kuru sürtünme olarak kabul edilmektedir. Gerçek anlamda kuru sürtünme, her türlü yabancı maddeden tam olarak arındırılmış, yüzeylerin, mutlak basınçta birbirlerine göre izafi olarak hareket ettirilmeleri durumunda meydana gelmektedir. Teknik olarak sürtünme hem istenen durum hem de istenmeyen durum olabilmektedir. Fren kavrama ve sürtümlü çarklar gibi durumlarda makine elemanlarında sürtünme işlemi istenmektedir. Bunun dışınma, bütün izafi hareket yapan yüzeylerde sürtünmenin oluşması istenmez ve sürtünme işleminin azaltılması gerekmektedir [3].

2.8.1.2. Sınır (yarı sıvı) sürtünme

Bu sürtünme şeklinde yüzeyler arasında yağlayıcı maddenin koyulmasına rağmen yüzeyler arasında sıvı sürtünme gerçekleşmemişse bu sürtünme çeşidine sınır sürtünmesi denilmektedir. Sürtünme sırasında sürtünme katsayısı değeri $0,03 \mu\text{m}$ ile $0,1\mu\text{m}$ arasında gerçekleşmektedir. Sürtünme sırasında yüzeyler arasında koyulan

yağlayıcı madde adsorpsiyon olayının sonucu olarak yüzeyler üzerine düzgün bir şekilde yapışmaktadır [3].

2.8.1.3. Film (sıvı) sürtünme

Yüzeyler arasında bir yağlayıcının bulunması halinde sürtünme direncinin azaldığı deneysel olarak bilinmektedir. En ideal tribolojik ortam, iç sürtünme direnci çok düşük olan kesintisiz bir ara tabakanın oluşumu ile ortaya çıkar. Bu durumda bağlı hareket yapan yüzeyler arasında oluşabilecek adhezif ve deformasyon dirençleri ortadan kalkar. Uygun ara tabaka yani yağlayıcı seçimi ile kontrol altında tutulabilecek bir sürtünme ve aşınma durumu elde edilir [8].

BÖLÜM 3. POLİMERLERİN AŞINMA VE SÜRTÜNME DAVRANIŞLARI

3.1. Polimerlerde Aşınma

Polimerlerin aşınmasında üç temel mekanizma vardır. Bunlar;

- 1) Adhesiv aşınma,
- 2) Abrasiv aşınma
- 3) Yorulma aşınması.

şeklinde sınıflandırılabilir.

Polimerlerde, metallerde görülen adhezyon aşınmasının şiddetli bir şekli olan yenme aşınması meydana gelmemektedir.

3.1.1. Adhesiv aşınma

Malzeme yüzeyleri ne kadar işlenirse işlensin pürüzlülük tamamen giderilemez ve değişik pürüzlülük seviyeleri elde edilir. Yükün etkisi altında, pürüzlülük seviyesinde oluşan küçük temas alanlarında, çok büyük basınçlar meydana gelir ve bazı temas alanlarında, mikroskobik seviyede kaynak bağları oluşmaktadır. İzafi hareket sırasında bu bağlar kopar. Bağların kopması için gereken kuvvet, sürtünme kuvvetini temsil eder. Bağların kopmasında meydana gelen malzeme kaybı ise adhesiv aşınmayı oluşturur. Adhesiv aşınma, tekrarlanan hareket ile aşınma partiküllerinin öncülüğünde oluşan transfer film tabakası ile meydana gelir. Transfer film tabakaları düşük yüklerde çok düşük aşınma oranlarına öncülük edebilirler [25].

Adhesiv aşınma en yaygın aşınma çeşididir. Bu nedenle pratikte polimerlerde aşınma denilince adhesiv aşınma anlaşılmaktadır. Polimerler mühendislik malzeme

kullanımlarında metallerin yağlı olarak kullanımlarının tersine, yaygın bir şekilde metal karşı yüzeylerine yağlamasız olarak kullanılırlar. Polimerlerin adhesiv aşınma mekanizmasında incelenen bazı özel durumlar şunlardır:

- a) Polimer ve karşı yüzey arasındaki iç adhezyon durumu
- b) Birleşme noktasındaki bozulma tarzı
- c) Transfer film tabakasının yapısı
- d) Transfer edilmiş film ve yüzey arasındaki bağ
- e) Film yer değiştirme mekanizması
- f) Polimer/karşı yüzey arasındaki iç adhezyon

- a) Polimer ve karşı yüz arasındaki iç adhezyon durumu

Polimerlerle ilgili adhezyon iki kaynaktan açığa çıkar. Biri Kolomb'un elektrostatik kuvvetleridir, bu bağ tipinin önemi ise uyumsuzluk göstermesidir. Diğer Van der Waals bağlarıdır. Ayrıca polimer/karşı yüzeydeki oksitlenmiş tabakalar arasında hidrojen bağları da olabilir. Eğer iki yüzey kuvvetlice yapışmışsa, adhezyon işi, adhezyonun termodinamik işinden daha büyük olabilir. Çünkü işin büyük bir kısmı sünek ve viskoelastik kayıpları içerir. Bu kayıplar polimerin ve elastomerin camsı hale geçiş sıcaklıklarının üzerinde meydana gelir. Sonuç olarak, transfer film gerçekleşebilir. Temas sıcaklığı camsı geçiş sıcaklığının altında ise, polimerler veya kauçukların adhezyonu ve polimer transfer film eğilimi çok daha düşük olacaktır.

- b) Birleşme noktasındaki bozukluklar

Yüzeyleri temizlenen polimerler ve elastomerlerin pürüzsüz yüzeyleri ile elastomerik bileşimler, ara yüzeyde kendi başlarına bozulabilirler ve bu durumda yapışık bir transfer gerçekleşmez.

- c) Transfer film tabakasının yapısı

Sünek malzemeler sürekli olarak karşı yüzeye polimer transfer ederler. Transfer edilen polimerlerde kayma durumuna göre iki tip davranış görülür. En genel

davranış, yapıştırıcı oluşumunda, oldukça yüksek miktarda polimer madde içeren filmin nispeten kalınlığı da 0.1-10 µm arasındadır. Bu davranış düşük yoğunluklu polietilen, polipropilen ve poliamid 6/66'da bulunmaktadır. Diğer davranış sınıfı, yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE), teflon (PTFE) tarafından gösterilir. YYPE, PTFE ve POM'un özel davranışı, düşük hızlarda, orta dereceli sıcaklıklarda karşı yüzeylere ince bir film transferi görünümündedir. Daha yüksek kayma hızlarında YYPE ve POM'un transfer film tabakası sürtünme erimesi şeklinde ifade edilebilirken, PTFE'nin yüksek ısıya dirençli olmasından dolayı bu durum görülmez.

d) Transfer edilmiş film tabaka ile karşı yüzey arasındaki bağ

Kimyasal indirgemenin olmadığı bir ortamda bağ, Kolomb ve Van der Wals olacaktır. Transfer edilmiş bir katman, ara yüzden soyulursa elektrostatik kuvvetler bu durumda daha büyük olacaktır. Bununla beraber filmlerin adhezyonu biraz zayıftır. Polimerlerin aşınmasını geliştirebilmek için ilave katkıları kullanılmalıdır. Polimerlerin kayma sürtünmelerinde ilave katkıların etkisiyle transfer edilmiş film tabakası karşı yüzeyi biçimlendirmekte ve polimerin aşınma direncini geliştirmektedir.

e) Film yer değiştirmesi

Bazı durumlarda, çekme gerilmesi tarafından transfer edilen film katmanlarının yüzeyinden film parçacıkları çekilirler. Bu çekilen film parçacıkları polimerlerin yüzeyine yapışırken gözlenebilmektedir.

Transfer film tabakasında malzeme transferine sebep olan 3 genel düşünce vardır;

- Yük altında yüzeyin deforme olması,
- Ana malzemenin çatlaması,
- Karşı yüzeye malzemenin transferi,

Deformasyon ve çatlama, normal yük, temas geometrisi ve sürtünme katsayısının etkisiyle temas bölgesindeki gerilme durumlarından ortaya çıkar. Transfer film tabakası, hız, yük, atmosfer, sıcaklık, polimer yapısı, kristalite, yüzey pürüzlülüğü,

karşı yüzey ile olan kimyasal reaksiyonlar gibi kayma şartları tarafından etkilenir. Transfer film tabakaları arasındaki kohezyon ve transfer film-karşı yüzey arasındaki adhezyon tam anlamıyla çözülememiştir [25].

3.1.2. Abrasiv aşınma

Abrasiv aşınma numuneyi sert bir partikülün kesmesi veya numuneden bir parça koparması, yerinden çıkarması sonucu meydana gelir. Dışarıdan yüzeyler arasına giren toz, talaş gibi sert parçacıkların etkisi altında meydana gelmektedir. Abrasiv aşınma hemen hemen metallere benzerdir. Genellikle yumuşak polimer yüzeylerin karşı yüzeydeki sert metal pürüzlülüklerini doldurarak koruyucu bir kılıf oluşumunu ve dolayısıyla sürtünme olayında abrasiv etkinin azaltıldığı açıklanmıştır [25].

3.1.3. Yorulma aşınması

Temas yüzeylerindeki tekrarlı hareketlerin sonucu oluşan aşınmadır. Polimerlerdeki yorulma aşınması metallerdeki yorulma aşınması kadar etkili değildir. Polimerlerdeki aşınma oranı etkili bir şekilde yüke ve karşı yüzeyin yüzey pürüzlülüğüne bağlıdır. Çatlaklar kayma yönü doğrultusunda [25].

3.2. Polimerlerde sürtünme

Polimerlerin sürtünmesi metal ve seramiklerden farklıdır. Gerçek temas alanı yüke bağlıdır. Adhezyon, sürtünmenin önemli parçasıdır. Polimer sürtünmelerinde kendinden yağlamalı özellikteki polimerler ve diğer polimer yüzeyleri ile birlikte kayma testlerinde deformasyon ve adhezyon minimuma indirilir. Düşük yüklerde pürüzlü temas oluşmaktadır ve bu temas alanı yük ile orantılıdır. Polimerler kuru sürtünme şartlarında metallere göre daha iyi davranmaktadır. Bu hususta PTFE, poliamid gibi plastikler örnek verilebilir. Polimerlerin sürtünme davranışı; kayma hızı, temas yüzeyinin çeşidi, çevre koşulları gibi faktörlerden etkilenir. Bu yüzden polimer malzemeler için tam bir sürtünme katsayısı değeri verilemez. PTFE (teflon), YYPE (yüksek yoğunluklu poli-etilen) gibi polimer malzemelerde adhezyon bağ güçleri çok düşüktür. Kayma esnasında karşı yüzeyde ince bir transfer film tabakası

oluştuğu zaman, sürtünme katsayısı yaklaşık 0.2-0.3 arasında oluşur. Kaymanın artması ile transfer film tabakası her bir yüzeyde artarak oluşur ve yaklaşık 0.05 μm 'e kadar düşer. Eğer kayma yüzeylerinde hatalı polimer zincirleri dizilirse, tekrar 0.2-0.3 μm değerlerine yükselir [25].

3.2.1. Polimerlerin temas yüzeylerinin sürtünme katsayısı üzerine etkisi

Tablo 3.1'de görüldüğü gibi temas yüzeyinin çeşidine göre sürtünme katsayısı değerleri verilmiştir. Plastik-metal temas yüzeylerinin sürtünme katsayısı plastik-plastik temas yüzeylerinden daha düşüktür [29].

Tablo 3.1. Temas yüzeyi çeşidine göre sürtünme katsayıları [29].

Malzeme	Sürtünme katsayısı (μ)
Polipropilen üzerine polipropilen	0.6
Polipropilen üzerine polipropilen	0,28
Çelik üzerine polipropilen	0,25
Naylon üzerine naylon	0,65
Naylon üzerine naylon	0,46
Çelik üzerine naylon	0,41

Plastiklerin sürtünme davranışı; PTFE, silikon, karbon, cam elyafı, grafit ve molibden disülfid gibi katkılar ile iyileştirilmektedir. Tablo 3.2'de katkı ve katkısız polimerlerin sürtünme katsayısı değerleri verilmiştir.

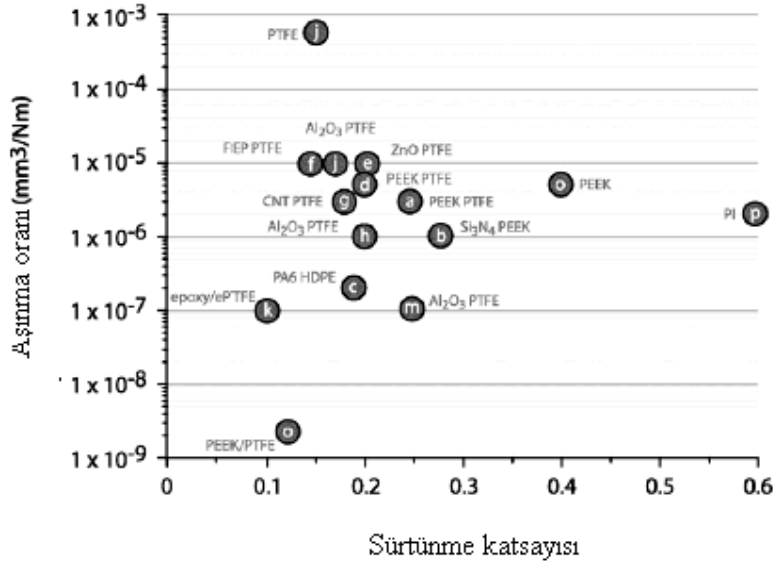
Tablo 3.2. Çeşitli polimerlerin sürtünme katsayıları [29].

Malzeme	Sürtünme katsayı (μ)
Asetal (POM)	0,21
Asetal+%20 PTFE	0,009-0,15
Asetal+%2 Silikon	0,12
Akrilik	0,5
Naylon 66	0,28-0,46
Naylon 66+%20 PTFE	0,18
Naylon 66+%2 Silikon	0,09
Naylon 66+%30 cam elyaf	0,26-0,31
Naylon 66+%30 karbon elyaf	0,11
Polibutilen tereftalat (PBT)	0,25
PBT +%30 cam elyaf	0,12
Polikarbonat	0,38
Polikarbonat+%15 PTFE	0,15
Polikarbonat+%30 cam elyaf	0,20
Poliestersülfon+%30 cam elyaf	0,20
Polietilen	0,30-0,70
Polietilen+%30 karbon elyaf	0,25
Polifenilen sülfid (PPS)	0,24
PPS+%30 cam elyaf	0,17
PPS+%30 karbon elyaf	0,15
Polipropilen	0,28

3.3. Aşınmaya Dirençli Polimer Kompozit Tasarımı

Polimerik malzemelerin sürtünme ve aşınma davranışlarını geliştirmek için geleneksel görüşlerden biri, karşı malzemenin adhezyonunu azaltmak, sertliğini, tokluğunu ve gerilme mukavemetini artırmaktır. Adhezyonu azaltmak için teflon (PTFE) ve grafit tozları gibi iç yağlayıcılar sık sık kullanılmaktadır. Kısa aramid fiberler, cam fiberler ya da karbon fiberler, polimer matrisin gerilme mukavemetini

ve sürünme direncini artırmada kullanılır. Şekil 3.1’de katkı maddelerinin aşınma oranı üzerine etkisi verilmiştir [29].



Şekil 3.1. Katkı maddelerinin aşınma oranı üzerine etkisi [29].

3.4. Aşınmaya Etki Eden Parametreler

Aşınma davranışı, kayma hızı, basınç ve yük, sıcaklık, aşınma mesafesi, sertlik, yüzey pürüzlülüğü, tane boyutu, çalışma ortamının etkisi ve işletme koşulları gibi parametrelere bağlıdır [29].

3.4.1. Kayma hızı

Genel olarak aşınma miktarı kayma hızı ile artmaktadır. Blanchet’in çalışmalarında katkısız PTFE’nin aşınma miktarının hız arttıkça arttığı, bronz katkılı PTFE ile cam elyaf katkılı PTFE’nin aşınma miktarının ise kayma hızı arttıkça azaldığı görülmektedir [29].

3.4.2. Basınç ve yük

Katkılı polimerlerde aşınma miktarının yükü fazla değişmediği görülmüştür.

3.4.3. Sıcaklık

Aşınma polimer cinsine bağlı olarak sıcaklıkla değişir. Sıcaklığın artması ile ara yüzeyde moleküllerin esnekliği değişir ve karşı yüzeyin reaktivitesini etkiler.

3.4.4. Yüzey pürüzlülüğü

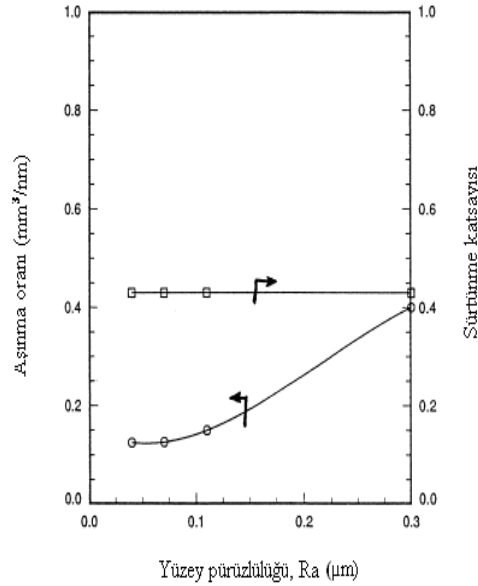
Aşındırıcı malzemelerin yüzey pürüzlülüğü, sürtünme kuvvetini yakından ilgilendirdiği için, aşınmaya etkisi büyüktür. Pürüzlülüğün yüksek olduğu yüzeylerde, temas alanı küçük, birim yüzeye etki eden kuvvet büyük olacaktır. Pürüzlülüğün az olduğu yüzeylerde ise; temas alanı büyük, birim yüzeye etki eden kuvvet küçük olacaktır. Şekil 3.2'de %35 PbS takviyeli naylon polimerin yüzey pürüzlülüğünün aşınma oranı ile değişimi verilmiştir.

Yüzey pürüzlülüğü(Ra);

Ra < 0.01 ise adhesiv aşınma,

Ra > 0.01 ise abrasiv ve yorulma aşınması,

Ra = 0.01-0.10 ise aşınma tesirinde kademeli değişiklikler bölgesidir.



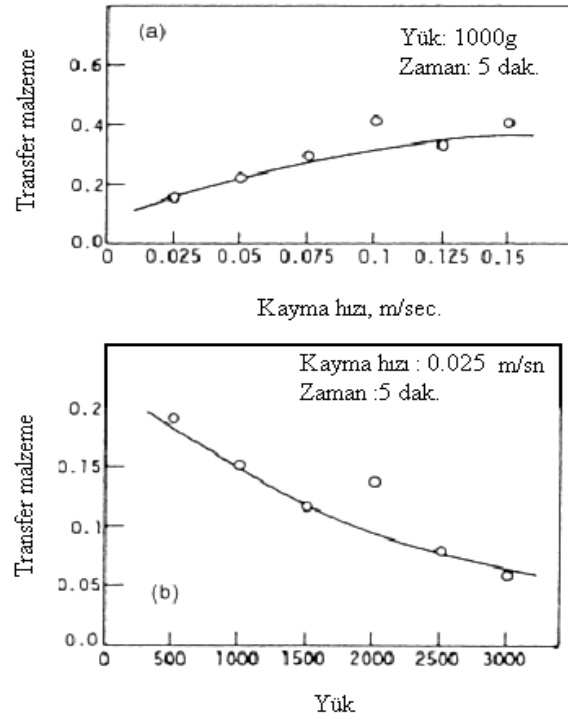
Şekil 3.2. %35 PbS takviyeli naylon polimerin yüzey pürüzlülüğünün aşınma oranı ile değişimi [29].

3.5. Polimerlerin Karşı Yüzey Sürtünme Malzemeleri ve Sonuçları

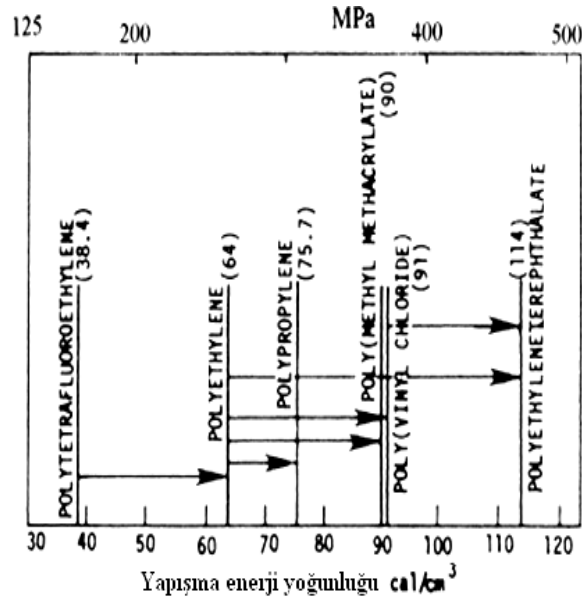
3.5.1. Polimer-Polimer aşınması

Kayma hızının artmasıyla transfer olan malzemenin kalınlığı artmıştır. (Sıcaklığın yükselmesiyle adhezyon artmıştır). Daha fazla sıkıştırma ve yüzeyden malzeme kaybı nedeniyle, artan yük ile transfer film tabakası kalınlığı azalmıştır. Farklı polimer sürtünmelerinde, statik sürtünme katsayısında bir azalma görülür. Şekil 3.3'de görüldüğü gibi PTFE yağlayıcısının kullanımı, hem benzer hem de farklı reçineli polimerlerde aşınma oranını azaltır. Fiber takviye edilmiş kompond polimerlerin kayma sürtünmesinde, karşı malzemenin dolgusunda yağlayıcı PTFE kullanılır. Aramid fiber kompondlar mükemmel aşınma karakteristiklerine sahiptir [29].

Polimer malzemelerde, malzeme transferi daima düşük koheziv enerji yoğunluklu polimerden yüksek koheziv enerji yoğunluklu polimere doğru meydana gelir. Koheziv enerji yoğunluğu polimerdeki ikincil bağların dayanımının bir göstergesidir. Şekil 3.4'de çeşitli polimer malzemelere ait koheziv enerji yoğunluğu verilmiştir. Transfer, polimerin düşük ikincil bağ dayanımından yüksek ikincil bağ dayanımına doğru meydana gelir.



Şekil 3.3. Polietilen yüzeye PTFE transfer tabakasının kayma mesafesi ve yük ile değişimi (a)kayma hızı, (b)normal yük [29].



Şekil 3.4. Çeşitli polimer malzemelere ait koheziv enerji yoğunluğu [29].

3.5.2. Polimer-Metal aşınması

Sürtünme ısısının % 90' nından fazlası metal parçaya iletilir. Fiber takviye edilmiş polimerler, metal yüzeyi aşındırır. Genellikle transfer film tabakası metal üzerinde şekillenir. Böylece sürtünme kendi kendine kaymaya benzer. Transfer edilen polimerlerde kayma durumuna göre iki tip davranış görülür. Nispeten transfer kalınlığı 0.1-10 µm arasında olan ve topak film olarak bilinen “normal” davranıştır. Bu davranış düşük yoğunluklu polietilen, polipropilen ve poliamid 6/66'da bulunmaktadır. Diğer davranış sınıfı, yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE), teflon (PTFE) ve polioksimetilen (POM) tarafından gösterilir. Transfer filmin kalınlığı daha düşüktür [29].

3.6. Polimer Malzemelerin Sürtünme ve Aşınma Sonuçlarının Karşılaştırılması

Tablo 3.3'de polimer malzemelerin sürtünme ve aşınma sonuçlarının karşılaştırılması verilmiştir. Yüksek performans polimerleri mükemmel tribolojik özelliklere sahip olabilir, ancak karşılıklı beraber çalışacağı malzemedeki uyum özellikleri yoksa bu özelliği görülmeyebilir. Örneğin, cam fiber takviyeli polimer kompozitler çelik yüzeyini aşındırabilir. Kabul edilebilir aşınma direnci ve düşük statik sürtünmeye sahip olmak için aynı tipten olmayan farklı bir polimer kompozitin seçimi gereklidir. Yüksek temas sıcaklığı ile kötü bir sıcaklık iletimi, sistemin tribolojik yönünün bozulması ile sonuçlanır. Birbirleri ile çalışan bazı malzeme kombinasyonları çok düzgün bir karşı yüzey pürüzlülüğü gereklidir.

Tablo 3.3. Polimer malzemelerin sürtünme ve aşınma sonuçlarının karşılaştırılması [29].

Hareketli Malzeme	Sabit Malzeme	Hareketli Malzemenin Aşınma Oranı ($k \cdot 10^{-15} \text{ m}^2 / \text{N}$)	Sabit Malzeme Aşınma Oranı ($k \cdot 10^{-15} \text{ m}^2 / \text{N}$)	μ_s	μ_k
PA 6	Çelik	4	-	-	0.28
POM	Çelik	1.3	-	0.14	0.21
POM+%20PTFE	Çelik	0.3	-	0.07	0.15
PA 6	PA 6	50	22	0.06	0.07
POM	POM	280	200	0.19	0.15
POM+%20PTFE	POM+%20PTFE	11	12	0.19	0.17
POM	PA 6	1.2	1.0	0.04	0.06
POM+%20PTFE	PA 6	0.4	0.7	0.05	0.06
POM+%20PTFE	POM+%20PTFE	0.5	0.24	0.03	0.04

3.7. Polimerlerde Kullanılan Aşınmayı Azaltıcı Katkı Malzemeleri

Polimerin özellikleri, dolgu maddesi kullanılarak değiştirilebilir. Örneğin; mukavemeti artırmak ve maliyeti azaltmak için polimer içerisine değişik elyaf veya parçacıklar katılabilir. Dolayısıyla polimer kompozite dönüştürülebilir. Isıl ve boyutsal kararlılığı iyileştirilebilir. Katkı maddelerinin pekiştirici, yağlayıcı, yanmayı geciktirici ve oksit giderici gibi görevleri vardır.

Cam fiberler, polimerlerin mekanik özelliklerini iyileştirir. Bu takviye elemanı, malzemenin akma, kopma ve darbe dayanımı gibi temel mekanik değerlerini, ısı ve yük altındaki boyutsal kararlılığını artırır. Daha yüksek yüzey basıncı, kayma hızı ve kayma mesafesi sağlar. Fiber üretimi amacıyla çok değişik bileşimde cam mineralleri kullanılmaktadır. Tablo 3.4'de cam fiber üretiminde kullanılan cam çeşitleri ve bileşimleri verilmektedir. Bunlardan en önemlisi oksit, kalsiyum, bor, sodyum, demir ve alüminyum içeren silika (SiO_2) dir.

Tablo 3.4. Cam fiber üretiminde kullanılan cam çeşitleri ve bileşimleri (% ağırlıkça)

Bileşen	E-Camı	C-Camı	S-Camı
SiO ₂	52.4	64.4	64.4
Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	14.4	4.1	25.0
CaO	17.2	13.4	-
MgO	4.6	3.3	10.3
Na ₂ .K ₂ O	0.8	9.6	0.3
Ba ₂ O ₃	10.6	4.7	.
BaO	-	0.9	.

E camları (E elektriksel özellikli camı ifade eder) iyi mukavemet, modül ve elektriksel özelliklerinden dolayı kullanılır ve fiber üretimi oldukça kolaydır. C camı kimyasal korozyona karşı oldukça dirençlidir ancak mekanik özellikleri E camına göre daha kötüdür. Bunun yanında maliyeti de yüksektir. S camı (S yüksek mukavemet ve modülü temsil eder) hem E ve hem de C camından daha yüksek maliyete sahip olmasına rağmen çok daha yüksek mukavemet ve elastik modül özellikleri sergiler. Karbon fiberler, polimerlerin mekanik performansını geliştirir. Karbon fiberlerin yoğunluğunun daha düşük olması nedeniyle yüksek mekanik değerler ve hafiflik gerektiren uygulamalarda cam elyafın yerine kullanılır. Yeteri kadar uzun karbon fiberlerin kullanılması bu değerleri üst noktalara taşır. Bu takviye elemanı ayrıca malzemenin sürtünme katsayısını düşürür, aşınma direncini ve UV dayanımını artırır. Daha yüksek kayma hızı, yüzey basıncı ve kayma mesafesi sağlar. Karbon (C) elementi 2.268 g/cm³ yoğunluğu ile oldukça hafif bir elementtir. Bunun yanında fiber üretimi amacıyla çok değişik bileşimde cam mineralleri kullanılmaktadır.

Bunlardan en önemlisi oksit, kalsiyum, bor, sodyum, demir ve alüminyum içeren silika (SiO₂)' dir. Fiber üretiminde, daha doğrusu takviye amaçlı kullanılan C fiberler hegzagonal yapıda olan grafit kristalleri halindedir. C element olarak kovalent elmas yapıda iken grafit kristalleri, karbon atomlarının üç boyutta dizilmeleri sonucu oluşan ve oldukça yüksek elastik modül değerleri veren sıkı hegzagonal kristal yapısındadır.

Karbon fiberlerde fiber çapları 7-8 µm, sürekli veya kısa olabilir. Bu fiberler petrol veya kömürden üretilirler. Önemli karbon fiberleri, PAN fiberlerdir.

Aramid fiberler, polimerlerin aşınma faktörünü geliştirir. Bakır ve alüminyum gibi yumuşak metallere karşı, karşı yüzeyin aşınmasını düşürür. Plastik üzerinde plastik aşınmasını düşürür ve gürültü ve abrasiv aşınmayı azaltır.

Yaygın olarak kullanılan PTFE, teflon ticari ismiyle tanınır. PTFE, bir yüksek sıcaklık fluorokarbon polimeridir. Bilinen en iyi özelliği yüksek sıcaklıklarda bile yapışmazlığıdır (anti-stick). PTFE dolgu partikülleri malzemenin yüzeyinde bir film etkisi yaparak kaydırıcılığı üst değerlere çıkartır. Sürtünme katsayısını düşürür ve malzemenin yüksek basınçlarda kullanılmasını sağlar.

Grafit tozu, saf karbon allotropu olup polimer malzemeye çok ince toz halinde ve dengeli olarak karıştırıldığında yayılma özelliği ile kristal yapının her tarafını kaplar. Kuru yağlayıcı etkisiyle malzemenin sürtünme katsayısını alt değerlere çeker. Polimer içerisinde yağlayıcı bağ gibi sulu ve nemli ortamlarda sık sık kullanılır. Grafit tozu, kuru yağlayıcı etkisiyle malzemenin sürtünme katsayısını düşük sürtünme katsayısı değerlere çeker.

Çok az miktarlardaki molibden disülfid (MoS_2) katkısı polimer malzemenin zincirine etki yaparak çok iyi bir kristal yapının oluşmasına yardımcı olur. Bu yapı malzemenin sürtünme katsayısını azalttığı gibi aşınma direncini de artırır. Poliamid'lerin kristalleşmesini (yüzey sertliğini) artırır. Yapışarak kayma (slip-stick) etkisini azaltır. Molibden disülfid kullanımının aşınma probleminin çözümüne katkısında iki ayrı yaklaşım vardır. Birincisi deformasyon ve kırılma işlemlerine direnç göstermesi ile aşınmaya direnen sert yüzeyler üretmek, ikincisi yüzeyler arasında yumuşak yağlama filmleri uygulayarak yapışmayı yani yapışmayı azaltmaktır. Sürtünme katsayısını katkı malzemesi olan silikon yağı da düşürür. Yüzey aşınmasını engeller. Yüksek hızlarda ve başlangıçta yağlayıcılık sunar. Yüksek yüzey basıncında etkili değildir. Ayrıca silikon reçineler, plastikleştirici ve yüzey yağlayıcı olarak değerlendirilirler. Sürtünmeye dirençli kaplama imalinde,

silikon elastomerleri takviye etmek için ve basınca duyarlı yapışkan imalinde kullanılırlar.

Silikon yağlı PTFE, yüksek hız oranlarında tribolojik özellikleri geliştirir. Değişken hareketler için mükemmeldir. Yüksek hızlarda yüzey basıncı ve yüksek kayma mesafesi gerektiren uygulama alanlarında dikkate alınabilir.

3.8. Alüminyum Oksit (Al_2O_3 , Alümina)

Alümina, en yaygın olarak kullanılan seramik malzemelerden bir tanesidir. Seramik yapılar yüksek derece performans özelliğine sahiptir. Kolayca elde edilebilirler. Alümina seramik, alüminyum oksit oranı % 80 olan bir seramik olup, saf alfa alumina tozlarından genellikle presleme yöntemiyle üretilmektedir. Bunun dışında dökme yöntemi ile çok farklı şekil ve boyuttaki parçaları üretmek mümkün olmaktadır. Alümina seramiğin yoğunluğu $3,7 \text{ g/cm}^3$, sertliği 9 (Mohs) ve basma dayanımı $2000 - 2400 \text{ N/mm}^2$ dir. Alumina seramik plaka, boru, dirsek şeklinde standart olarak üretilebileceği gibi istenen her şekil ve boyutta döküm olarak üretilmesi de mümkündür. Boru ve dirsekler, 450mm çapa kadar üretilebilir. Bu boru ve dirseklerin kalınlıkları 8-25 mm arasında olabilir. Alümina seramik; fazla aşınmanın olduğu ve aynı zamanda yüksek servis sıcaklığının bulunduğu yerlerde başarıyla kullanılmaktadır. Bu malzeme inceliği sayesinde dar alanlarda kalın kaplama malzemelerinin kullanılmadığı yerlerde de rahatlıkla kullanılabilir [31].

Alümina katkının temel özellikleri aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir.

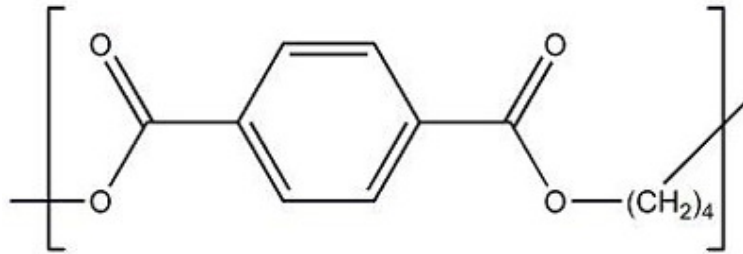
1. Sert, aşınmaya dayanıklı
2. Dielektrik özellikleri mükemmeldir
3. Asit ve yüksek sıcaklık değerlerine yüksek dayanım
4. İyi termal iletkenlik
5. Mükemmel boyut ve şekil kararlılığı
6. Yüksek mukavemet ve sertlik

Alümina katkının tipik kullanım alanları aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir;

1. Gaz lazer tüpler
2. Keçelerde
3. Yüksek sıcaklık elektrik izolatörlerde
4. Yüksek gerilim izolatörleri
5. Aşınmaya karılı boru ve dirsek gömlekleri
6. Elektronik yüzeylerde
7. Fırın astar tüpler
8. Laboratuar araç tüpleri ve numune tutucular
9. Enjeksiyon memeleri
10. Oluk ve kanallar

BÖLÜM 4. POLİ-BUTİLEN-TEREFTALAT (PBT)

PBT, yüksek kristal yapıya sahip olan kristalleşme özelliği hızlı gerçekleşen bir malzemedir. Erime noktası ve camsı geçiş sıcaklığı gibi ısısızal özellikleri PA 6' ya yakındır. Fakat PA gibi higroskopik yapıda olmamasından dolayı bünyesine çok düşük oranda nem çeker. Şekil 4.1'de PBT zincirinde yinelenen birim verilmiştir. Teknik olarak kullanılan hammaddelerin polimerleşme derecesi genellikle 90°C ile 200°C arasında olup kullanım yerine göre değişmektedir. PBT polimeri kesikli veya sürekli sistemler olmak üzere iki farklı sistemde üretilmektedir. Kesikli sistemlerde üretim kapasitesi düşüktür ve ürün özellikleri her üretimde farklı olabilir, ancak daha ucuz üretim imkânı vardır. Yüksek üretim kapasitesinde ve sürekli sabit bileşimde ürün eldesi için sürekli sistemde üretim gerekmektedir. PBT' nin özelliklerinin uygulama alanına göre geliştirilmesi için işleme sırasında çeşitli katkı maddeleri ilave edilir. Katkı ilavesi genellikle çift vidalı ekstruderler veya yoğurma makineleriyle gerçekleşmektedir [32].



Şekil 4.1. PBT zincirinde yinelenen birim (mer) şekli [32]

Özellikle cam elyaf takviyeli çeşitleri ısıya karşı direnç, boyutsal kararlılık ve düşük nem emme özellikleriyle ısıya karşı dayanıklı parçaların üretilmesi, elektrik, elektronik, haberleşme ve otomotiv endüstrisinde kullanılmaktadır. Ayrıca cam elyaf

katkılı çeşitleri yüksek ısı direncine sahip olduklarından, prizler, duylar, adaptörler, el feneri gövdesi, bilgisayar klavyeleri, telefon ve fax makinelerinin gövdeleri gibi parlak yüzey ve hassasiyet istenen yerlerde kullanım alanı bulurlar.

PBT'nin dikkate alınması gereken genel özellikleri aşağıda verilmiştir.

Erime Noktası: 225 °C

Camsı Geçiş Sıcaklığı: 50 °C

Yoğunluk: 1,31 g/cm³

Oksijen Endeksi : % 21

En Yüksek Kullanım Sıcaklığı: 120 - 140 °C

Kısa Süreli Sıcaklık Dayanımı: 200 – 220 °C

Kristallik Oranı : % 40 – 60

Kristalleşme Hızı: Yüksek

Soğuma Hızı: Yüksek

Nem Doyma Noktası : % 0.2 – 0.5

4.1. Kimyasal Dayanım

Tablo 4.1' de gösterildiği gibi PBT kimyasal bakımdan zayıf asitlere, bazlara, deterjanlara, alifatik hidrokarbonlara, yağlara, ester, alkol, keton ve glikollere oda sıcaklığında dayanır. 60°C'ye kadar benzin, hidrolik yağı PBT'yi etkilemez. Kuvvetli bazlara karşı kullanımı ise iyi değildir.

Tablo 4.1. PBT polimerinin kimyasal direnç özellikleri [32].

Kimyasal Direnç	
Asitler – sulandırmak	İyi
Alkoller	İyi
Alkaliler	Zayıf-İyi
Aromatik hidrokarbonlar	İyi
Gresler ve Yağlar	İyi
Keton	İyi

4.2. Mekanik Özellikler

Tablo 4.2’ de PBT polimerinin mekanik özellikleri verilmiştir. PBT polimeri mükemmel aşınma direncine sahiptir ve iyi dökme özelliği göstermektedir. Yüksek sertlik ve darbe dayanımı, iyi sürünme özellikleri içerir. Aynı zamanda mukavemet özellikleri de iyidir.

Tablo 4.2. PBT polimerinin mekanik özellikleri verilmiştir [32].

Mekanik Özellikler	Birimi	Değerler
Kopma Uzunluğu	(%)	250
Sertlik - Rockwell	-	M70
Izod darbe dayanımı	(J/m)	60
Çekme modülü	(MPa)	2000
Çekme dayanımı	(MPa)	50

4.3. Elektriksel Özellikler

Tablo 4.3’ de gösterildiği gibi PBT polimeri mükemmel elektriksel özelliklere sahiptir. Korozyon dirençleri iyidir. Elektriksel özellikleri çevre koşullarında özellikle nemden etkilenmemektedir. Nemden etkilenmemesi PBT’yi elektrik/elektronik sektörünün tercih edilir malzemelerinden birisi yapmaktadır.

Tablo 4.3. PBT polimerinin elektriksel özellikleri [32].

Elektriksel Özellikler	Birimi	Değerler
Dielektrik sabiti	1kHz	3,2
Dielektrik gücü	(kV. mm ⁻¹)	20
Dağılım faktörü	1kHz	0,002
Hacimsel öz direnç	(Ohm. cm)	10 ¹⁵

4.4. Fiziksel Özellikler

Tablo 4.4’ de PBT polimerinin fiziksel özellikleri verilmiştir. Yoğunluğu ise 1.31g/cm^3 olan PBT polimeri düşük nem alma özelliğine sahiptir. Yüksek boyutsal kararlılık ve kolay işlenebilirlik gibi özelliklere de sahiptir.

Tablo 4.4. PBT polimerinin fiziksel özellikleri [32].

Fiziksel Özellikler	Birimi	Değerler
Yoğunluk	(g.cm^{-3})	1,31
Oksijen index	-	25
Su emme - 24 saatin üzerinde	(%)	0,1

4.5. Termal Özellikler

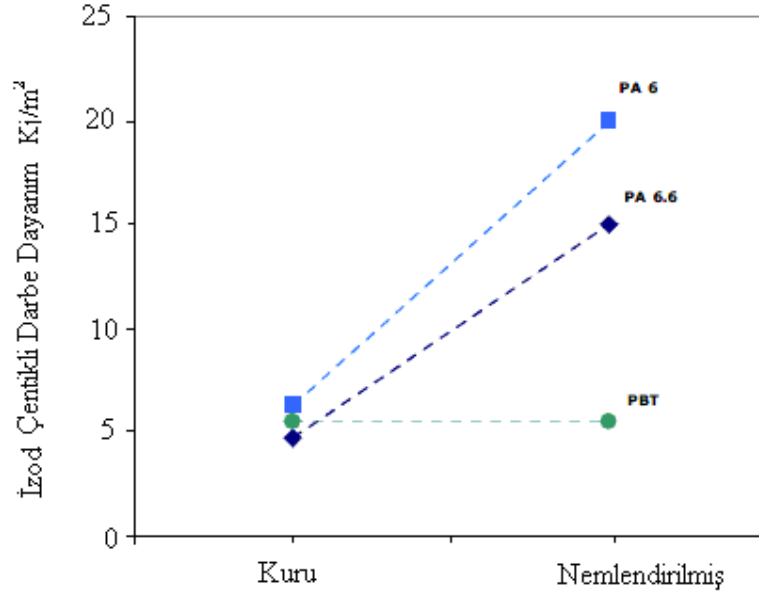
Tablo 4.5’ de PBT polimerinin termal özellikleri verilmiştir. Erime sıcaklığı ve molekül yapısına bağlı olarak PBT polimeri mükemmel termal özellikler gösterir. Yüksek sıcaklıklarda çok iyi boyutsal kararlılık, düşük ısıl genleşme katsayısı gibi önemli özelliklere sahiptir.

Tablo 4.5. PBT polimerinin termal özellikleri verilmiştir [32]

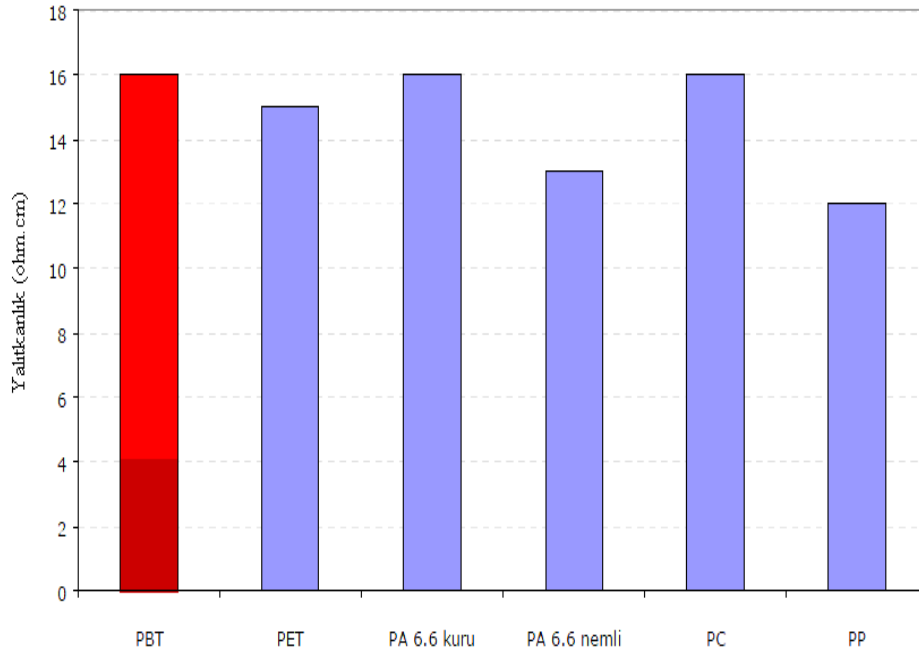
Termal Özellikler	Birimi	Değerler
Isı sapma sıcaklığı - 0.45MPa	($^{\circ}\text{C}$)	150
Isı sapma sıcaklığı - 1.8MPa		60
Maksimum çalışma sıcaklığı	($^{\circ}\text{C}$)	120

Şekil 4.2, PBT, PA 6 ve PA 6.6 polimerlerinin mekanik özelliklerine nemlendirmenin etkisi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi nemlendirmenin PBT’ nin mekanik özelliklere herhangi bir etkisi olmamakta beraber, PA 6 ve PA 66’

polimerleride darbe dayanımı artmaktadır. Şekil 4.3'de ise çeşitli polimer malzemelerin yalıtkanlık değerleri yer almaktadır. PBT polimeri bu özellikleri geniş bir sıcaklık ve nem aralığında muhafaza edebilmektedir.

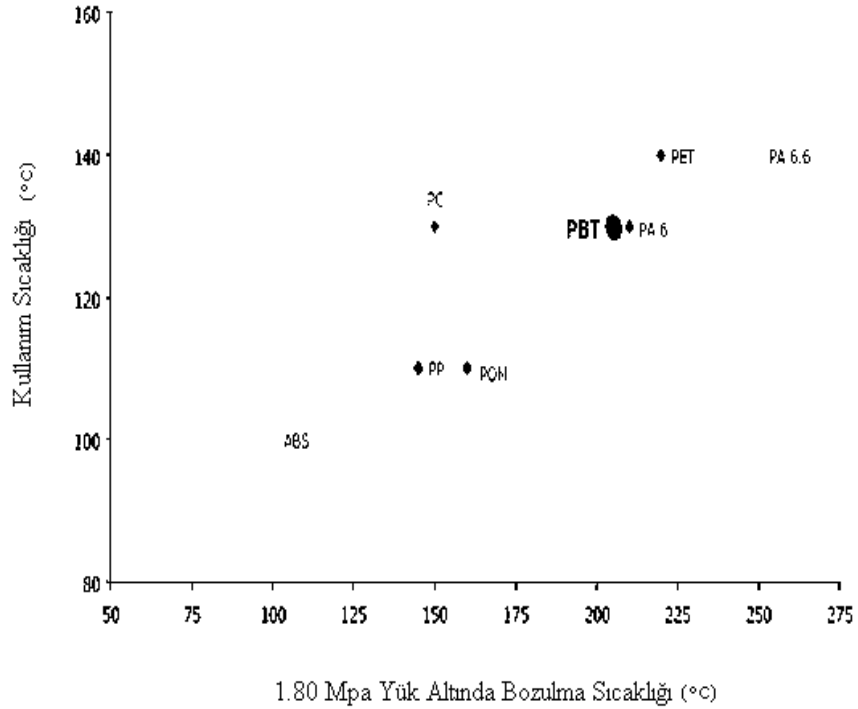


Şekil 4.2. Nemlendirmenin PBT, PA 6 ve PA 6.6 polimerlerinin mekanik özelliklerine etkisi [33].



Şekil 4.3. Çeşitli polimerlerin yalıtkanlık değerleri [33].

PBT çok düşük oranda nem almakta ve poliamid polimerinde olduğu gibi nemli ortamlarda yalıtkanlık özelliği azalmamaktadır. Ergime sıcaklığı ve molekül yapısına bağlı olarak PBT, mükemmel ısıl özellikler göstermektedir. Yaygın olarak kullanılmakta olan polimerlerin %30 cam elyaf takviyeli tiplerinin ısı ve sıcaklık dayanım özellikleri Şekil 4.4’ de sunulmuştur.



Şekil 4.4. Çeşitli polimerlerin %30 cam elyaf takviyeli tiplerinin kullanım sıcaklığı ve yük altında bozulma sıcaklığı değerleri [33].

PBT'nin, 130 °C sıcaklıklarda uzun süreli kullanımları var iken, kısa süreli uygulamalarda 220 °C 'ye kadar dayanım göstermektedir. Bu değerlere ulaşmak için ise cam elyaf takviyeli ve ısıya karşı dayanımı arttırılmış özel PBT çeşitleri tavsiye edilmektedir.

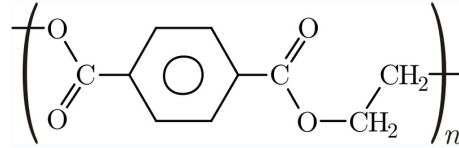
4.6. PBT Kullanımı, Sağladığı Avantajlar ve Kullanım Yerleri

Polibütilen tereftalat (PBT) yüksek performansa sahip dayanıklı bir polimer malzeme olup mühendislik plastikleri içerisinde sınıflandırılmaktadır. Fiber optik kablolarda kullanılmaktadır. Ön panellerde PC alaşımları ile otomotiv sanayisinde kullanılır. Kullanım alanı termoplastik poliestherler levha, boru, film veya fiber gibi değişik şekillerde kolayca ekstrüde edilebilirler. PBT elektrik, elektronik haberleşme ve otomobil endüstrisinde kullanılır. Örneğin, elektrik motor aksamları, cihaz şasileri, kondenser kapları, elektronik cihazlar için havalandırma pervaneleri, bağlantı serileri, bobinler, telefon dağıtım kutuları bu polimerden imal edilebilir.

Cam fiber katkılı PBT çeşitleri, yüksek sıcaklıklarda yüksek çarpma direnci gerektiren elektronik ateşleme buji kapaklarında kullanılmaktadır. Otomobil endüstrisindeki uygulama alanları, pedallar, ızgaralar, hava filtre tutacakları, kül tablaları, emniyet kemeri parçaları, elektrikli aynalar ve kapı kolları ve özellikle cam fiber katkılı PBT, kızartma fırınları, fırın kapısı tutma kollarında kullanılır. Mutfak robotları, kahve makineleri, soba başlıkları, tost makineleri, vakumlu temizleme parçaları, saç bigudileri, saç kurutucuları, makas sapları örnek verilebilir [34].

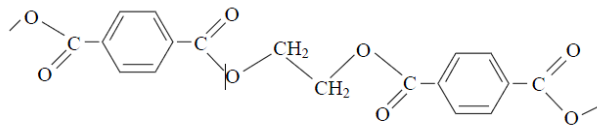
BÖLÜM 5. POLİ-ETİLEN –TEREFTALAT (PET)

Endüstriyel olarak PET, tereftalik asit ya da dimetil tereftalatın etilen glikol ile polimerizasyonu sonucu elde edilen bir kondenzasyon polimeridir. Polimerizasyonun son kademesi vakumda ve 270°C' nin üstünde tamamlanır. Viskoz ürün hızlı su verme ile granül haline getirilir. 325°C' de bile kullanılan tipleri vardır. PET zincirinde yinelenen birim (mer) Şekil 5.1' de verilmiştir [30].



Şekil 5.1. PET zincirinde yinelenen birim (mer) şekli [33].

Kristal oluşumu, titan dioksit, magnezyum dioksit, antimon gibi çekirdeklenme maddeleri kullanılarak hızlandırılabilir. PET makromolekülleri yüksek bir simetri düzeyine sahip olduğu için trans-trans konformasyonunda bulunmayı tercih etmektedirler. Trans-Trans konformasyonunda, karbonil gruplarının oluşturdukları dipoller zıt yönlerde uzanmış olduklarından, birbirlerini doyurmakta ve böylece daha düşük enerji düzeyi, daha stabil bir molekül yapısı ve daha yüksek bir erime noktası sonuçlarını doğurmaktadır [30]. Şekil 5.2'de trans-trans konformasyon yapı şekli verilmiştir [33].



Şekil 5.2. Trans-Trans konformasyon yapı şekli [33].

5.1. İşleme Teknolojileri

PET reçine normal olarak kristal yapılı pelletler şeklinde üretilmektedir. Tipik olarak kristalleşme %50 civarındadır. Ekstrüzyondan önce eriyikteki hidrolik enerji kaybına engel olmak için reçine, 0.005'den daha az nemli olacak şekilde kurutulmalıdır. Kurutma, kuru sıcak huni şeklindeki kurutucularla sağlanmalıdır. Bu sıcaklıkta amorf reçine yumuşama ve yapışma eğilimi gösterir. Kurutucudaki birbirini izleyen problemlerden kaçınmak için reçineyi kristal halinde alışılmış kurutma şekli ile getirmek gerekmektedir. Tipik ekstruder vidalarının besleme, geçiş ve ölçme alanları vardır. Sıkıştırma oranları 1 ve 3.2 arasındadır. Erime safhasında kalış zamanı ve kayma işini azaltmak için karıştırma bölgesi kullanılmaz. Tipik erime sıcaklığı 255 °C'dir. Erime sıcaklığının alt sınırları tercih edilerek polimerin bozulma ihtimali azaltılır. Bir çok uygulamada optimum özelliğe ulaşmak için PET' in yönlenme ve kristalize edilmesi gerekmektedir. Bunu oluşturmak için tek eksenli elyaf ve çift eksenli film çekme prosesi takip eder [30].

5.2. Mekanik Özellikler

Tablo 5.1' de PET polimerinin mekanik özellikleri verilmiştir. Tablo incelendiğinde PET polimerinin çekme dayanımının yüksek olduğu görülmektedir. PET polimeri 80 ila 260 MPa çekme değeri aralığında ulaşabilir. Yüksek elastik modülü, biçimsel kararlılığı, yüksek aşınma dayanımı, düşük sürtünme katsayısı, iyi boyutsal kararlılık, tokluk, darbe dayanımı gibi önemli ve avantajlı mekanik özelliklere sahiptir.

Tablo 5.1. PET polimerinin mekanik özellikleri [32]

Mekanik Özellikler	Birimi	Değerler
Çekme dayanımı	(MPa)	80-260
Çekmede Elastiklik modülü	(MPa)	2000-4000
Poisson oranı	-	0,37-0,44
Izod darbe dayanımı	(J/m)	13-35
Sertlik - Rockwell	-	M94-101
Sürtünme katsayısı	-	0,2-0,4

5.3. Kimyasal özellikler

Tablo 5.2’de PET polimerinin kimyasal özellikleri verilmiştir. PET polimeri konsantre sülfürik asit, nitrobenzen, trikloroasetik asit, klor, fenol, metanol çözünen, etanol, aseton, alkanlar, alkoller, asit, gres ve yağlar, keton, aromatik hidrokarbonlara karşı kimyasal direnç özellikleri iyidir.

Tablo 5.2. PET polimerinin kimyasal özellikleri [32]

Kimyasal Özellikler	Birimi	Değerler
Asitler - konsantre	-	İyi
Asitler - sulandırılmış	-	İyi
Alkoller	-	İyi
Alkali Alkaliler	-	Kötü
Aromatik hidrokarbonlar	-	Orta
Gresler ve Yağlar	-	İyi
Halojenler	-	İyi
Keton	-	İyi

5.4. Fiziksel özellikler

Özgül ağırlığı 1,3-1,4 gr/cm³ aralığında, şeffaf ve renksiz bir polimerdir. Daha kalın kesitlerde rengi kirli beyaz ve opak olabilmektedir. Su emme ve nem alması oldukça düşüktür. Tablo 5.3’de PET polimerinin fiziksel özellikleri verilmiştir.

Tablo 5.3. PET polimerinin fiziksel özellikleri [32]

Fiziksel Özellikler	Birimi	Değerler
Yoğunluk	(g/cm ³)	1,3-1,4
Oksijen index	-	21
Kırılma indisi	-	1.58-1.64
Mor-direnç için Ultra	-	İyi
Su emme - denge	(%)	<0,7
Su emme - 24 saatin üzerinde	(%)	0,1

5.5. Elektriksel Özellikler

Suda çözünürlüğü %0,4 oranındadır. Yüksek sıcaklıklarda bile mükemmel dielektrik direnci vardır. Bu özelliğinden dolayı elektriksel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Tablo 5.4' de PET polimerinin elektriksel özellikleri verilmiştir.

Tablo 5.4. PET polimerinin elektriksel özellikleri [32]

Elektriksel Özellikler	Birimi	Değerler
Dielektrik sabiti	1MHz	3.0
Dielektrik gücü	(kV. mm ¹)	17
1kHz Dağılım faktörü	1kHz	0.002
Yüzey direnci	(Ohm / sq)	10 ¹³
Hacimsel öz direnç	(Ohm.cm)	>10 ¹⁴

5.6. Kullanım Alanları

Plastik sektöründe PET çoğunlukla gazlı, düşük alkollü içki şişelerinde kullanılmaktadır. PET polimeri yönlenmiş veya yönlenmemiş birçok gazsız içki şişesi uygulamaları için kullanılmaktadır (maden suyu, meyve suları, şuruplar, yağlar, çeşitli gıda maddeleri, tuvalet malzemeleri, kozmetik ve eve ait kimyasal maddeler gibi). Bu uygulamaların bazıları için amber ve sarı gibi renkler gerekebilir. PET mikrodalga fırınlarda kullanıldığı gibi, mukavva çeşitleri üzerine 0.75 ila 1.5mm PET ile ekstrüzyon kaplama yapılarak, geleneksel yemek kapları olarak kullanılabilir. Endüstriyel uygulamalara manyetik şerit, röntgen, fotoğraf filmi ve elektriksel yalıtım dahil edilebilir [30].

BÖLÜM 6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1. Deneyde Kullanılan Numuneler

Bu tez çalışmasında, termoplastik polyester esaslı polibutilen tereftalat (PBT) ve polietilen tereftalat (PET) polimerleri kullanılmıştır. PBT polimeri Euro Mühendislik Plastikleri ve Ticaret A.Ş. ürünü olup Tecodur PB70 N1 ticari isimiyle bulunmaktadır. PET termoplastik polimeri ise PET OCTAL GP01 ticari ismi ile Octal Holding & Co. (SAOC) firmasından elde edilmişlerdir. Katkı malzemesi olarak ise Al_2O_3 farklı boyutlarda (10 μ m, 45 μ m, 60 μ m) olacak şekilde, Eczacıbaşı Essan firmasından karşılanmıştır. Bu çalışmada farklı partikül boyutlarındaki Al_2O_3 katkısı PBT hem de PET polimerine farklı oranlarda (%10, %20, %30) katılarak 34 adet farklı deney numuneleri kombinasyonu sağlanmıştır. Tablo 6.1.'de tez çalışmasında üretilen numuneler ve kompozisyonları gösterilmektedir.

6.2. Test Numunelerinin Hazırlanması

Hem PBT hem de PET polimeri Labtech marka 10kg/h kg kapasiteli Labtech scientifre Ø20 çaplı tek vidalı ekstrüderde üretilmiştir. PBT için ekstrüzyon sıcaklıkları 220-250°Cdir. PET polimeri için ekstrüzyon sıcaklıkları ise 260-290°C arasındadır. Tablo 6.1'de görüldüğü gibi ekstrüderde üretilen malzemeler soğutma havuzunda soğutulduktan sonra granül halinde kesilip kompozit malzemeler üretilmiştir. Homojen bir karışım sağlamak amacıyla üretilen granüller ikinci kez besleme ünitesinden ekstrudere beslenip karıştırma işlemi homojen hale getirilmiştir. Numuneleri basmak için elde edilen granül haldeki kompozit malzeme İstanbul Aksoy Plastik A.Ş. firmasında bulunan ikiz vidalı ekstruderinde üretilmiştir.

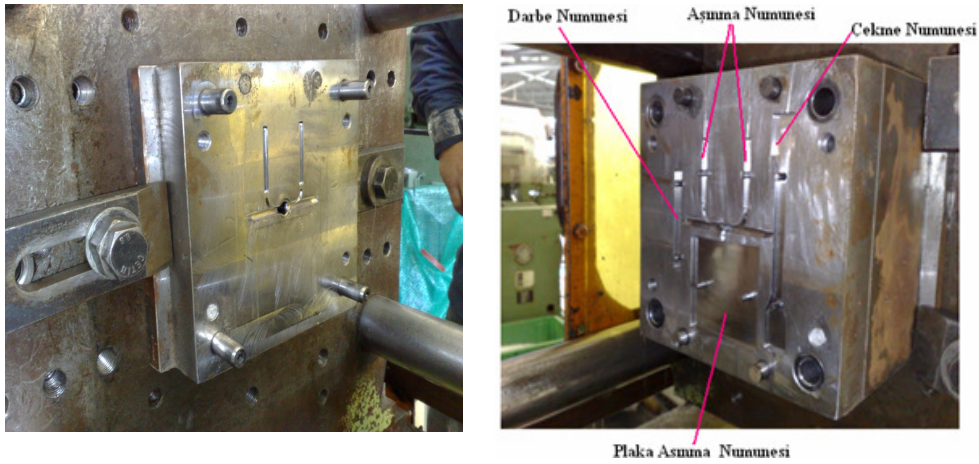
Tablo 6.1. Deneyler İçin Üretilen Malzemeler ve kodları

NUMARA	NUMUNE ADI
1	PBT (Polibutilen Trefalat)
2	PBT+ %10 Al ₂ O ₃ (10 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)
3	PBT+ %20 Al ₂ O ₃ (10 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)
4	PBT+ %30 Al ₂ O ₃ (10 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)
5	PBT+ %10 Al ₂ O ₃ (45 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)
6	PBT+ %20 Al ₂ O ₃ (45 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)
7	PBT+ %30 Al ₂ O ₃ (45 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)
8	PBT+ %10 Al ₂ O ₃ (60 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)
9	PBT+ %20 Al ₂ O ₃ (60 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)
10	PBT+ %30 Al ₂ O ₃ (60 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)
11	PET (Polietilen Trefalat)
12	PET+ %10 Al ₂ O ₃ (10 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)
13	PET+ %20 Al ₂ O ₃ (10 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)
14	PET+ %30 Al ₂ O ₃ (10 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)
15	PET+ %10 Al ₂ O ₃ (45 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)
16	PET+ %20 Al ₂ O ₃ (45 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)
17	PET+ %30 Al ₂ O ₃ (45 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)
18	PET+ %10 Al ₂ O ₃ (60 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)
19	PET+ %20 Al ₂ O ₃ (60 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)
20	PET+ %30 Al ₂ O ₃ (60 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)
21	%75PET+%25PBT (Mix)
22	%25PET+%75PBT (Mix)
23	%75PET+%25PBT (Mix) %10 Al ₂ O ₃ (10 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)
24	%75PET+%25PBT (Mix) %20 Al ₂ O ₃ (10 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)
25	%75PET+%25PBT (Mix) %10 Al ₂ O ₃ (45 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)
26	%75PET+%25PBT (Mix) %20 Al ₂ O ₃ (45 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)
27	%75PET+%25PBT (Mix) %10 Al ₂ O ₃ (60 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)
28	%75PET+%25PBT (Mix) %10 Al ₂ O ₃ (60 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)
29	%25PET+%75PBT (Mix) %10 Al ₂ O ₃ (10 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)
30	%25PET+%75PBT (Mix) %20 Al ₂ O ₃ (10 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)
31	%25PET+%75PBT (Mix) %10 Al ₂ O ₃ (45 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)
32	%25PET+%75PBT (Mix) %20 Al ₂ O ₃ (45 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)
33	%25PET+%75PBT (Mix) %10 Al ₂ O ₃ (60 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)
34	%25PET+%75PBT (Mix) %10 Al ₂ O ₃ (60 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)



Şekil 6.1. Ekstüruder makinasında üretilen granül formundaki kompozit malzemenin görüntüsü

Çekme, darbe ve aşınma numunelerin hazırlanması için öncelikle bu amaçla şekil 6.2’de görülen bir enjeksiyon kalıbı imal edilmiştir. Deneyler için kullanılan çekme numuneleri ISO 527 standardına uygun olarak hazırlanmıştır. Darbe test numuneleri ise ISO 179 standardında belirtilen ölçülerde hazırlanmıştır. Aşınma çubukları ise 6mm çapında ve 50mm boyutlarında olacak şekilde her kalıptan 2 adet çıkacak şekilde üretilmiştir. Şekil 6.3 ve şekil 6.4’de ise enjeksiyon kalıbından çıkan numunelerin şeklini göstermektedir.

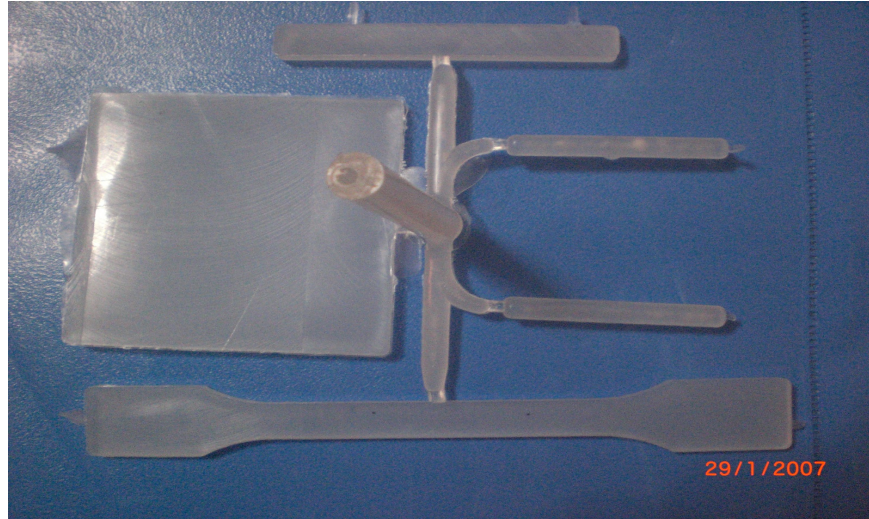


Şekil 6.2. Enjeksiyon kalıbının şematik olarak gösterimi



Şekil 6.3. Enjeksiyon kalıbında üretilen çekme, darbe, aşınma ve renk plakalarının görüntüsü

Ekstrüzyonda hazırlanan granül haldeki kompozit malzemelerin çekme, darbe ve aşınma deney numunelerinin hazırlanması için Sintaş Plastik Firmasında bulunan ve Şekil 6.5'te görülen Enkel marka enjeksiyon makinası kullanılmıştır.

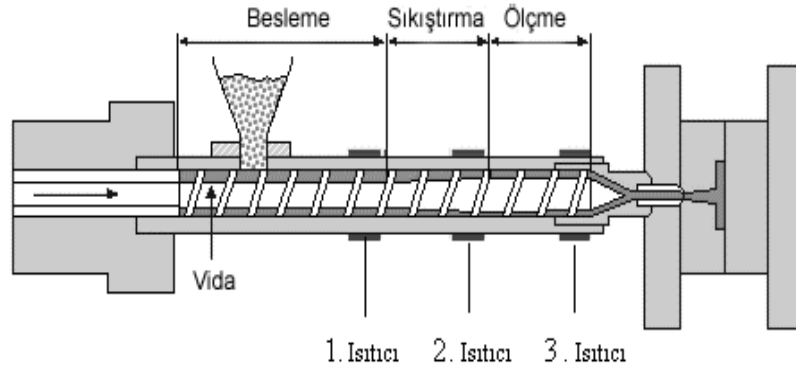


Şekil 6.4. Plastik Enjeksiyon kalıbında basılmış katkısız PET deney numuneleri



Şekil 6.5. Test numunelerinin yapıldığı Enkel plastik Enjeksiyon makinasının resmi

PBT, PET termoplastik polimerlerinden test numunesi üretmek için kullanılan enjeksiyon makinasının şematik resmi şekil 6.6’da gösterildiği gibidir.



Şekli 6.6. Enjeksiyon makinasının şematik gösterimi

Saf PBT polimerinin enjeksiyon sıcaklığı, mal alma mesafesi ve enjeksiyon basıncı aşağıdaki gibi ayarlanmıştır.

Sıcaklık : 1. Isıtıcı: 190 °C
2. Isıtıcı :205 °C
3. Isıtıcı: 245 °C
Mal alma mesafesi : 50 mm
Enjeksiyon basıncı : 0,8 bar

Saf PET polimerinden üretilen numunelerin sıcaklık, mal alma mesafesi ve enjeksiyon basıncı değerleri aşağıdaki gibi ayarlanmıştır.

Sıcaklık : 1. Isıtıcı: 150 °C
2. Isıtıcı :205 °C
3. Isıtıcı: 245 °C
Mal alma mesafesi : 50 mm
Enjeksiyon basıncı : 0,8 bar

Deneylerde için üretilen Al_2O_3 katkılı PBT kompozitlerinin enjeksiyon sıcaklığı, mal alma mesafesi, enjeksiyon basıncı değerleri ise aşağıdaki gibi ayarlanmıştır.

Sıcaklık : 1. Isıtıcı: 140 °C
2. Isıtıcı :155 °C
3. Isıtıcı: 230 °C
Mal alma mesafesi : 20 mm
Enjeksiyon basıncı : 0,6 bar

Al_2O_3 katkılı PET kompozitlerinin enjeksiyon sıcaklığı, mal alma mesafesi, enjeksiyon basıncı gibi değerleri ise aşağıdaki şekilde ayarlanmıştır.

Sıcaklık : 1. Isıtıcı: 175 °C
2. Isıtıcı :225 °C
3. Isıtıcı: 235 °C
Mal alma mesafesi : 20 mm
Enjeksiyon basıncı : 0,6 bar

6.3. Çekme Deneyi

Çekme deneyi, malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek için yapılan deney yöntemlerinden bir tanesidir. Bu deneyde malzemenin akma mukavemeti, çekme mukavemeti, kopma mukavemeti, % uzama ve elastiklik modülü gibi değerler tespit edilmiştir. Tüm katkısız ve Al_2O_3 katkılı malzemelerin çekme testi ISO 527 standardına uygun yapılmıştır. Çekme deneyi öncesinde hazırlanan test numuneleri 24 saat %50 nem ortam şartlarında kondüsyonlanmıştır. Çekme deneyleri Federal Elektrik firmasında bulunan Testometric MICRO 350 marka çekme cihazında gerçekleştirilmiştir. Firmadaki çekme cihazının fotoğrafı ve çekme çenelerinin detaylı görüntüsü sırasıyla Şekil 6.7 ve Şekil 6.8'de görülmektedir.

Deneyler 23 ± 2 oda sıcaklığında yapılmıştır. Al_2O_3 katkılı PBT ve PET ve kompozit malzemelerinin yapılan deneyler sonucunda gerilme birim şekil değiştirme grafikleri elde edilmiştir. Çekme deney numunelerinin çekme cihazı çeneleri arasındaki bağlanması şekil 6.8'de görülmektedir.

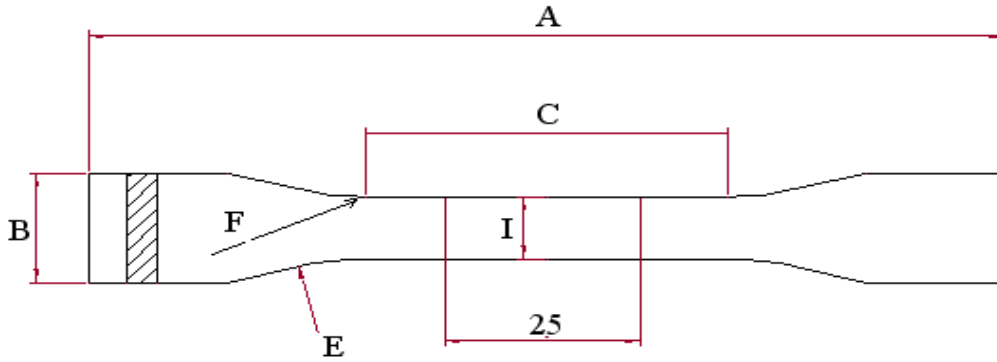


Şekil 6.7. Deneylerde kullanılan çekme test cihazı fotoğrafı



Şekil 6.8. Çekme cihazı çenelerine deney numunelerinin bağlantısının gösterimi

ISO 527'e göre üç farklı tip çekme deneyi numuneleri üretilebilmektedir. Bu numunelerin şekli 6.8 ve şekil 6.9'da, ölçü boyutları ise tablo 6.2'de gösterilmektedir.



Şekil 6.9. Çekme deneyi numunesinin şematik gösterimi (ATipi)

Tablo 6.2 Çekme deneyi numunesi boyutları

	BOYUT	TİP 1	TİP 2	TİP 3
A	Toplam uzunluk, en az	115	75	35
B	Uçların genişliği	25±1	12.5±1	6±0,5
C	Dar paralel kısmın uzunluğu	33±2	25±1	12±0,1
D	Dar paralel kısmın genişliği	6.0±4	4±0,1	2±0,1
E	Küçük yarıçap	14±1	8±0,5	3±0,1
F	Büyük yarıçap	25±1	12.5±1	3±0,1
	Kalınlık	2±0,2	2±0,2	1±0,1

Çekme deneylerinde elde edilen veriler kullanılarak malzemenin çekme mukavemeti aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\sigma_{\max} = \frac{F}{A} \quad (6.1)$$

Burada;

F= Uygulanan kuvvet, (N)

A= Numunenin ilk kesit alanı (mm²)' dir.

Kopmadaki uzama ise aşağıdaki formülle hesaplanır. Kısaca e_{kopma} olarak gösterilmektedir.

$$e_{\text{kopma}} = \left(\frac{L_k - L_0}{L_0} \right) \times 100 \quad (6.2)$$

L_k = Numunenin koptuğu andaki son boy (mm)

L_0 = Numunenin başlangıctaki ölçü boyu (mm)

Elastiklik modülü ise

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (6.3)$$

formülü ile hesaplanmaktadır. Burada;

E = Elastiklik modülü (N/mm²)

σ = Malzemenin elastik bölgedeki herhangi bir andaki mukavemeti (N/mm²)

ε = Elastik bölgedeki gerilmeye karşılık gelen birim şekil değiştirmediir.

Elastik bölgedeki birim şekil değiştirme ($e_{elastik}$) ise aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır.

$$e_{elastik} = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100 \quad (6.4)$$

formülü ile hesaplanır. Burada;

L_0 = Denei numunelerin başlangıçtaki ölçü boyu (mm)

L = Elastik bölgedeki herhangi bir andaki numune boyutu (mm)

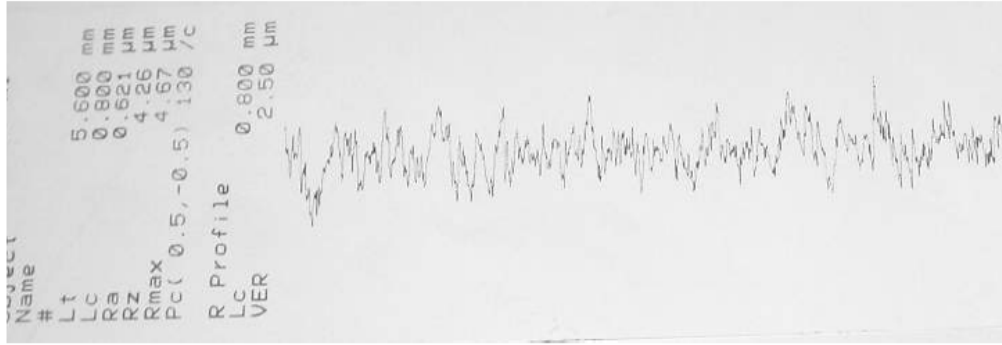
6.4. Aşınma Denei

Saf PET, PBT ve elde edilen Al₂O₃ katkıli kompozit malzemelerin aşınma numuneleri 6mm çapında ve 50 mm boyunda olacak şekilde enjeksiyonla kalıplama yöntemiyle üretilmişlerdir. Karşı disk malzeme olarak AISI 4140 çeliği kullanılmıştır. AISI 4140 çelik malzemesi Ø100x10 mm ölçülerinde olacak şekilde çok sayıda çelik disk hazırlanmıştır. Çelik disklerin yüzeyleri her denei sonucunda 1000 nolu zımpara ile parlatılmış ve yüzeyleri aseton ile temizlenmiştir. Deneilerde kullanılan AISI 4140 çaliğinin spektral analiz sonuçları tablo 6.3.'de verilmiştir.

Tablo 6.3. AISI 4140 çeliğinin spektral analiz sonuçları

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo	%Ni	%Cu
0,369	0,257	0,634	0,029	0,005	0,990	0,184	0,143	0,451

Şekil 6.10'da çelik diskin aşınma deney öncesinde yüzey profilometresi ile ölçülen yüzey pürüzlülüğü verilmiştir. Deney öncesi ortalama yüzey pürüzlülüğü 0,62 μm Ra olarak ölçülmüştür.



Şekil 6.10. Taşlanmış çelik diskin aşınmadan önceki yüzey pürüzlülüğü

Aşınma deneyleri, Sakarya Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi laboratuvarında bulunan, Şekil 6.11'da gösterilen pim-disk aşınma cihazında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.11. Aşınma test düzeneği

6.4.1. Aşınma deneyinin uygulanması

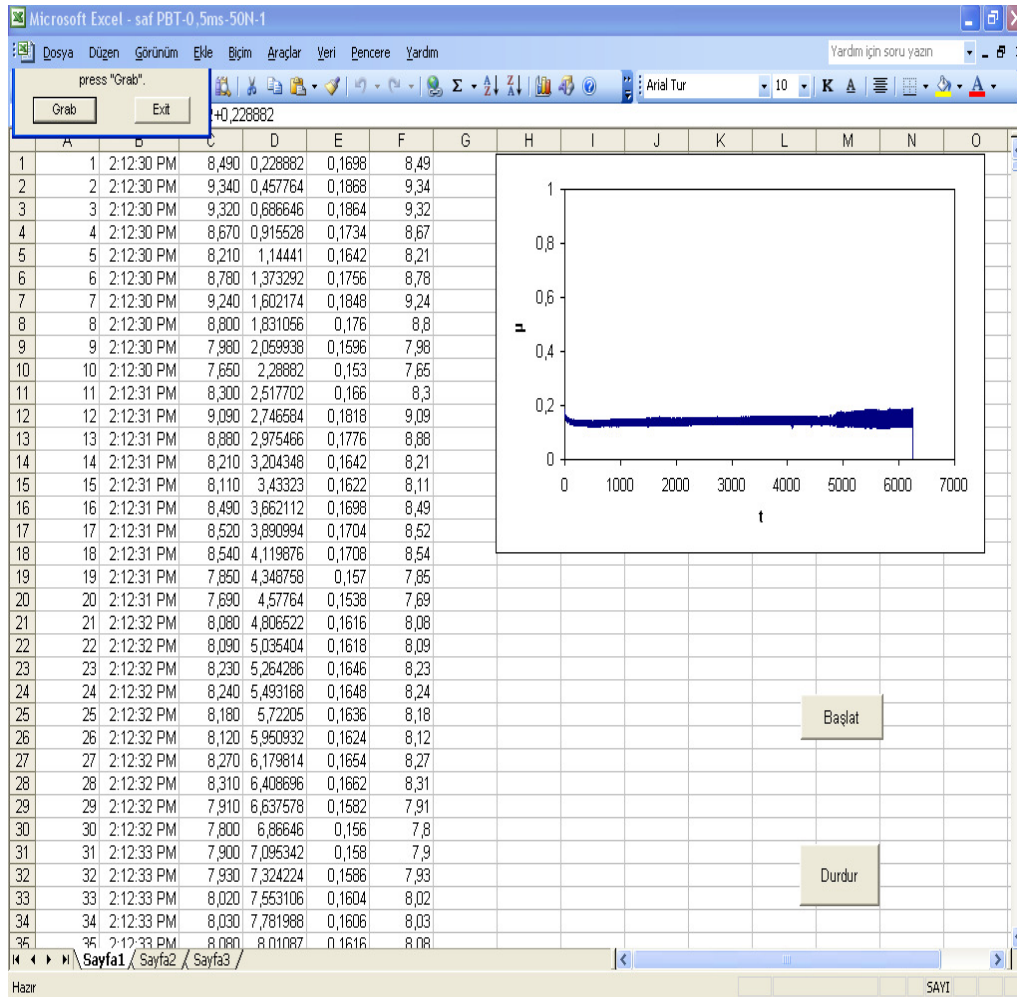
Aşınma cihazı, ana gövde üzerinde bir elektrik motoru, bir yük kolu, load-cell ve bilgisayar gibi bir takım kısımlardan oluşmaktadır.

Bir elektrik motorunun tahriki ile dönen rulmanlar vasıtasıyla yataklanmış bir mile bağlı bulunan bir sabit disk vardır. Bu sabit diskin üzerine deneylerde kullanılacak olan çelik disk, bir vida yardımıyla sabit diske bağlanır. Kol üzerinde bulunan bir mekanizma ile 6mm çapındaki polimer pim malzemeler kola bağlanır. Çelik disk yüzeyi ve deney numuneleri aşınma deneyine başlamadan önce aseton ile temizlenir.

Aparata bağlanan pim numunesi diskin üzerine yavaşça bırakılır, pim numunesinin diske sürtünmesiyle pim numunesinin bağlı olduğu kol aparatıda diskin dönme yönüne hareket etmek istemektedir. Bu istek sonucunda kolda ileriye doğru bir hareket gerçekleşir. İleriye doğru olan hareket yanıl kuvveti vermektedir. Bu yanıl

kuvvet ise Load cell ile ölçülüp elektronik göstergede değerleri göstermektedir. Aynı zamanda bu veriler doğrudan bilgisayarda Excel programına depolanmaktadır.

Deneylerde dakikada 1000 veri alacak şekilde ayarlanmıştır. Deney süresince toplam 65536 data değeri elde edilmiştir. Bu yanal yük değerleri Excel programında deneylerde kullanılan yüke bölünerek Excel programında D sütununda görülen değerler elde edilmektedir. Bu veriler Y ekseninde olacak şekilde, X ekseninde de deney süresi olacak şekilde grafik haline getirilmiştir. Deney süresince zamanla oluşan sürtünme katsayısı grafiği elde edilir. Şekil 6.12. Bilgisayarda elde edilen Excel program formatının şeklini göstermektedir.



Şekil 6.12. Aşınma deneyin’de excel formatında elde edilen sürtünme katsayısı değerleri ve grafiği gösterimi

Sürtünme katsayısı yanal kuvvetin, normal uygulanan kuvvete oranı olarak ifade edilir ve aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$\mu = \frac{F_S}{F_N} \quad (6.5)$$

Burada;

μ : Sürtünme katsayısı

F_S : yanal sürtünme kuvveti N;

F_N : Normal kuvvet, N ifade eder.

Aşınma süresinin bitiminde, önce kol kaldırılarak aşınma programı durdurulur. Daha sonra diski döndüren motor durdurulur. Pim bağlı olduğu yerden çıkarılır, varsa üzerindeki aşınma partikülleri ve çapakları alınır, son ağırlık ölçümü için dijital terazide tartılır. Deneylerde kullanılan hassas terazi Precisa marka olup 0.0001g hassasiyetindedir. İlk ağırlık ile son ağırlık arasındaki fark hesaplanarak belirlenen şartlar için numunenin aşınma kaybı değeri bulunur.

Numunelerin aşınma oranının hesaplanmasında aşağıdaki formül kullanılır.

$$W_a = \frac{\Delta m}{S \times \rho \times F_N} \quad (6.6)$$

Burada;

W_a : Aşınma oranı, mm^3/Nm veya m^2/N

Δm : aşınma miktarı, g

S : kayma yolu, m

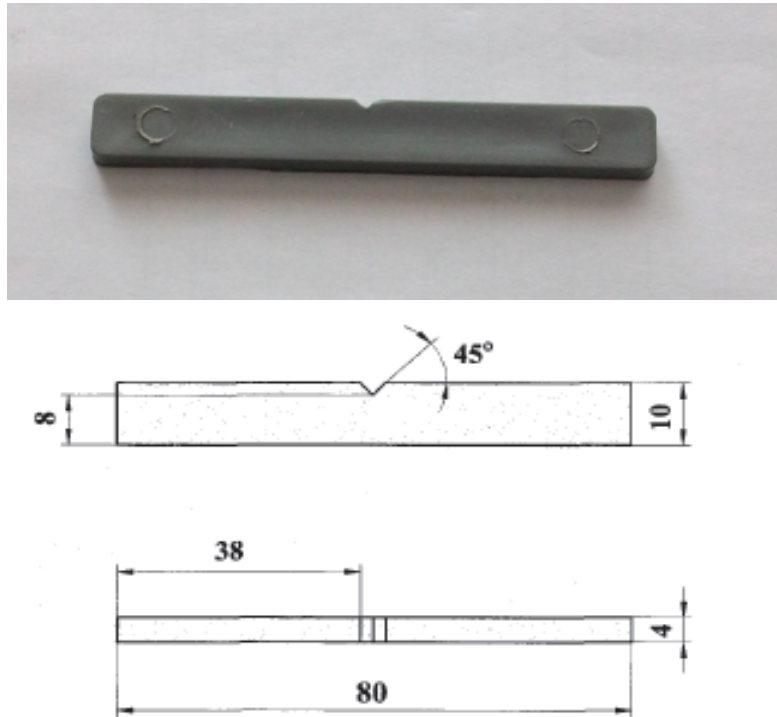
ρ : numunenin yoğunluğu, g/cm^3

F : normal kuvvet, N

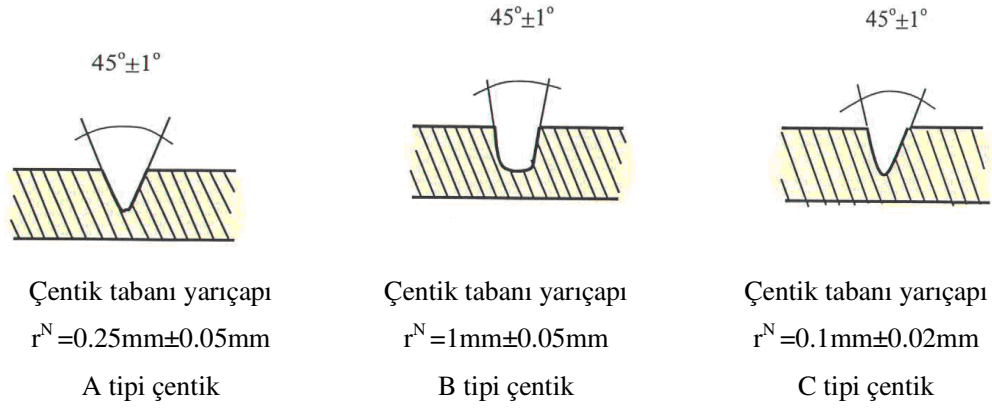
ifade eder.

6.5. Charpy Darbe Deneyi

Katkısız ve alümina katkılı PBT, PET kompozit malzemelerin darbe testi için Devotrans marka 0.5 ile 25 joule çalışma aralığına sahip dijital göstergeli bir charpy darbe deney cihazı kullanılmıştır. Darbe cihazının çekiç düşme açısı 150° , düşme hızı 3,8 m/s'dir. Çentik darbe deney cihazı ile TS 1004 standardına uygun şekilde deneyler gerçekleştirilmiştir. Darbe deneyleri SAKARYA SAZCILAR Otomotiv Sanayi laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Her bir darbe deneyi için en az 3 adet deney numunesi kullanılmış ve darbe değeri için aritmetik ortalaması alınmıştır. Deney numuneleri standartlara göre hazırlanmış olup TS 3780 göre malzemeler enjeksiyon kalıplama yöntemi ile elde edilmiştir. Şekil 6.13'de görüldüğü gibi çentikler ise TS 3779 'a göre sonradan hazırlanmıştır. Çentikler deney parçasının uzunlama eksenine dik olarak açılmıştır. Darbe deneyleri yapılmadan önce test numuneleri 23°C oda sıcaklığında ve %50 nem şartlarında 24 saat süre ile kondisyonlanmıştır.



Şekil 6.13. Deneyde kullanılan çentik darbe deney numuneleri şekli ve boyutları



Şekil 6.14. Çentik tipleri

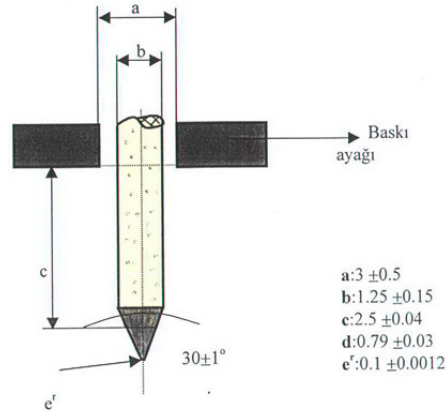


Şekil 6.15. Deneylerde kullanılan Devotrans marka darbe cihazı

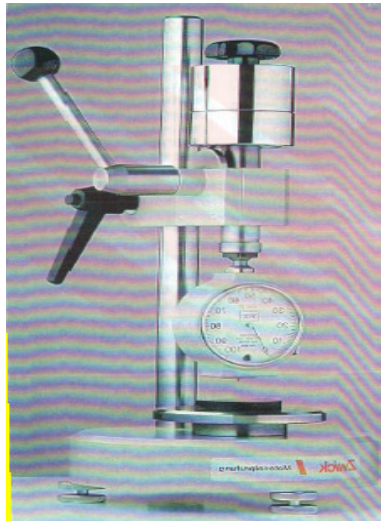
Şekil 6.16'da test parçaları için darbe ucu ve destek bloklarının durumunun şematik olarak gösterilmektedir. Destekler arasındaki deney parçasının desteklerle temas ettiği hatlar arasındaki mesafe (L) uygun ölçülerde olmalıdır. Şekil 6.14'de çentik tipleri gösterilmiştir. Şekil 6.15'de ise darbe testi yapılan makinanın şekli gösterilmiştir.

Shore D tipi sertlik ölçen durometre şu parçalardan meydana gelir;

- Kenarlardan en az 6mm içeride, ortalanmış 2.5-3.5 mm çapında bir deliği bulunan bir baskı ayağı.
- Batıcı uç, çapı 1.10–1.40mm arasında olan, sertleştirilmiş çelik çubuktan yapılmıştır. (Şekil 4.17 de gösterilmiştir.)
- Gösterge, batıcı ucun baskı ayağından itibaren batma miktarını gösteren kısım. Baskı ayağı ve batıcı uç, düz bir çam parçasına değdiğinde skalasında 100'e ve baskı ayağından itibaren 2.50 ± 0.004 'lük en çok batma halinde sıfıra ayarlıdır
- Batıcı uç'a kuvveti uygulayan ayarlı yaydan meydana gelir.



Şekil 6.17. Shore D tipi durometre için batıcı uç



Şekil 6.18. Sertlik ölçme test cihazı

Yukarıda şekil 6.17’de shore D tipi durometre için batıcı uç ve şekil 6.18’ ise deneylerde kullanılan Shore D sertlik ölçme cihazının fotoğrafı görünmektedir.

6.7. Test Numunelerinin Yoğunluk Testi

Deney numunesi olarak kullanılan katkısız ve katkılı PBT ve PET kompozit malzemelerin yoğunluk ölçme işlemi TS 1818 standardına uygun olarak şekil 6.19’da görüldüğü gibi Sakarya Üniversitesi PRECISA marka 0.0001 g hassasiyetli hassas terazi kullanılarak yapılmıştır. Numunelerin kuru ortamdaki ve su ortamındaki ağırlıkları ölçülmüş ve eşitlik 6.7’de verilen Arşimet formülü ile yoğunluklar hesaplanmıştır.

$$D = \frac{K_A}{K_A - Y_A} \quad (6.7)$$

formülüyle hesaplanır. Burada;

D = yoğunluk

K_A = kuru ağırlık

Y_A = yaş ağırlık



Şekil 6.19. Yoğunluk ölçme test cihazı

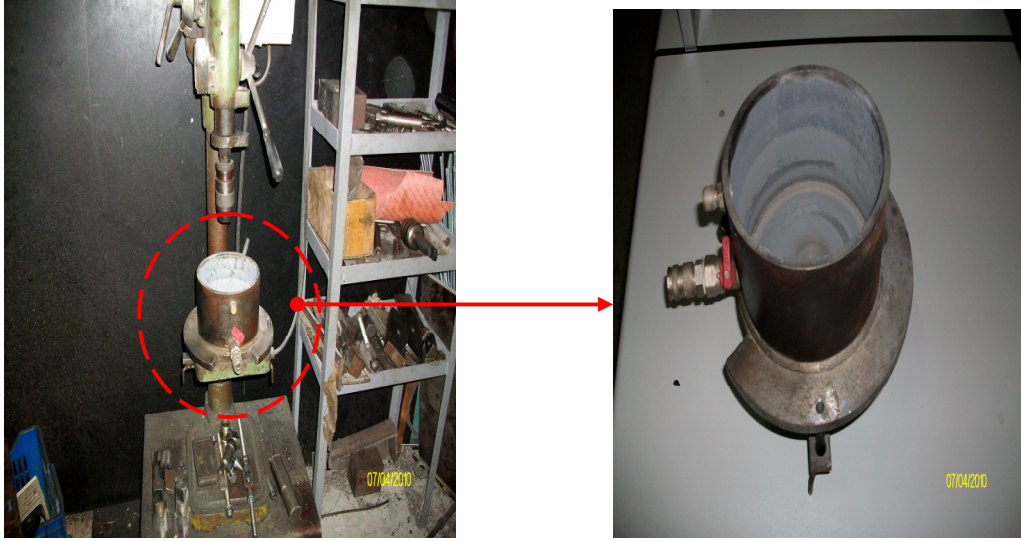
6.8. Erozyon Aşınma Deneyi

Şekil 6.20’de görüldüğü gibi katkısız PET, PBT ve Al_2O_3 katkılı kompozit malzemeler enjeksiyon üretim yöntemi ile elde edildikten sonra darbe veya çekme numunelerinden erozyon aşınma deneylerini gerçekleştirmek için $20mm \times 8mm \times 4mm$ ölçülerinde deney numuneleri kesilerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deney numunelerinin boy ölçüleri istenen değerde olabilmesi için sürekli kumpas yardımı ile ölçüler alınarak kontrol edildikten sonra dikkatli bir biçimde kesim işlemi yapılmıştır. Deney numunelerinin üzerinde çapak kalmıyacak şekilde temizlenmiştir.



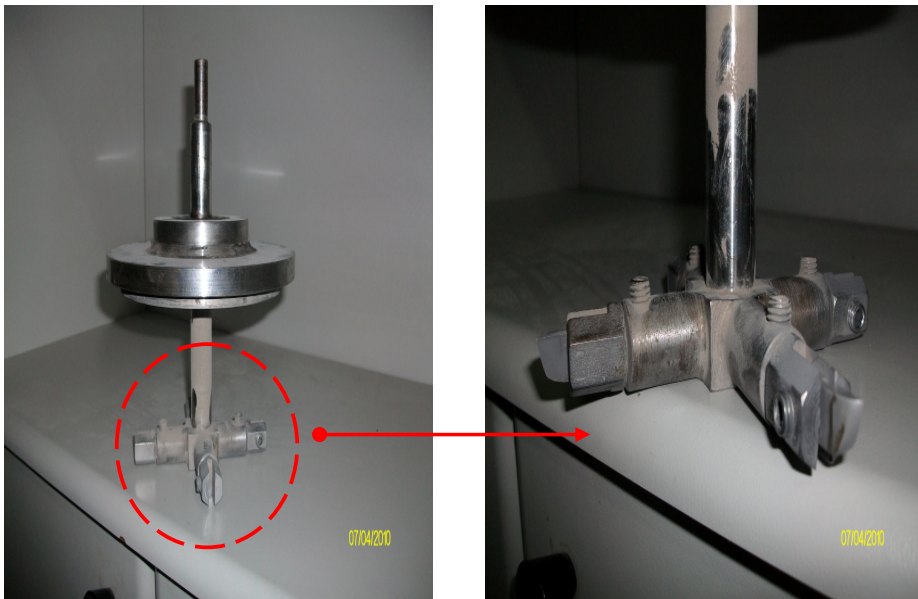
Şekil 6.20. Erozyon aşınma deneyi için hazırlanmış numune resmi

Erozyon aşınma deneyleri, $0^\circ-15^\circ-30^\circ-45^\circ-60^\circ-75^\circ-90^\circ$ çarpma açısı ve 30dak. deney süresinde gerçekleştirilmiştir. Deneyler Sintaş Plastik fabrikasında erozyon aşınma cihazında gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.21’de erozyon aşınma deneyi cihazı ve aşınma deney haznesi gösterilmektedir.



Şekil 6.21. Erozyon aşınma deneyi cihazı ve aşınma deney haznesi

Şekil 6.22’de se aşındırıcı ve bağlantı aparatının şekli verilmiştir. Aşındırıcı mekanizmayı matkap ucunu sıkarak aşındırıcı mekanizmanın matkap ucunda sabit kalmasını sağlar.



Şekil 6.22. Erozyon aşındırıcı ve bağlantı aparat şekli

Matkap üzerinde aşağı ve yukarı şeklinde hareket edebilen bir dayama aparatına şekil 6.21’de görülen erozyon aşınma deneyini gerçekleşmesi için ikinci mekanizma olan içine aşındırıcı malzemenin koyulduğu aşınma deney haznesi sabitlenir. Bu işlemleri gerçekleştirdikten sonra deney numunelerinin üzerindeki kalıntı parçalar fırça yardımıyla temizledikten (temizlememizin sebebi hasas tartı ölçümlerinin yanlış çıkmaması için) sonra hassas terazi ile ilk ağırlık ölçümü gerçekleştirilir. Deney numunelerini şekil 6.22’de grldğu gibi aşındırıcı mekanizmaya bir vida yardımı ile tutturduktan sonra ve haznenin içerisine aşındırıcı malzeme dökülmesi ile haznenin içerisine numunelerin tutturulmuş olduğu aşındırıcı mekanizması yerleştirilir. Numunelerin tutturulmuş olduğu aparatı istenilen aı değerine getirmek kaydı ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonra numunelerle diş fırçası ile temizledikten sonra hassas terazide deney sonrası ağırlığu ölçülür.

BÖLÜM 7. DENEYSEL SONUÇLAR VE YORUMLAR

7.1. Yoğunluk Ölçüm Sonuçları

TS EN ISO 1818 standardına uygun olarak ölçülen PET, PBT ve PET/PBT kompozitlerin yoğunluk değerleri Tablo 7.1’de verilmiştir. Her iki polimer malzemesi için katkı oranının artması ile yoğunluk değerlerinin arttığı gözlenmiştir. PET ve PBT kompozitleri incelendiğinde PBT kompozitlerin yoğunlukları daha düşük çıkmıştır.

Tablo 7.1 Üretilen deney numunelerin ölçülen yoğunluk değerleri

NUMARA	NUMUNE ADI	Yoğunluk (g/cm ³)
1	PBT (Polibutilen Trefalat)	1.200
2	PBT+ %10 Al ₂ O ₃ (10 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)	1.311
3	PBT+ %20 Al ₂ O ₃ (10 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)	1.428
4	PBT+ %30 Al ₂ O ₃ (10 µm partikül boyutlu Al ₂ O ₃)	1.500
5	PBT+ %10 Al ₂ O ₃ (45 µm partikül boyutlu Al ₂ O ₃)	1.347
6	PBT+ %20 Al ₂ O ₃ (45 µm partikül boyutlu Al ₂ O ₃)	1.469
7	PBT+ %30 Al ₂ O ₃ (45 µm partikül boyutlu Al ₂ O ₃)	1.544
8	PBT+ %10 Al ₂ O ₃ (60 µm partikül boyutlu Al ₂ O ₃)	-
9	PBT+ %20 Al ₂ O ₃ (60 µm partikül boyutlu Al ₂ O ₃)	-
10	PBT+ %30 Al ₂ O ₃ (60 µm partikül boyutlu Al ₂ O ₃)	-
11	PET (Polietilen Trefalat)	1.330
12	PET+ %10 Al ₂ O ₃ (10 µm partikül boyutlu Al ₂ O ₃)	1.372
13	PET+ %20 Al ₂ O ₃ (10 µm partikül boyutlu Al ₂ O ₃)	1.465
14	PET+ %30 Al ₂ O ₃ (10 µm partikül boyutlu Al ₂ O ₃)	1.599
15	PET+ %10 Al ₂ O ₃ (45 µm partikül boyutlu Al ₂ O ₃)	1.390

Tablo 7.1. (devamı)

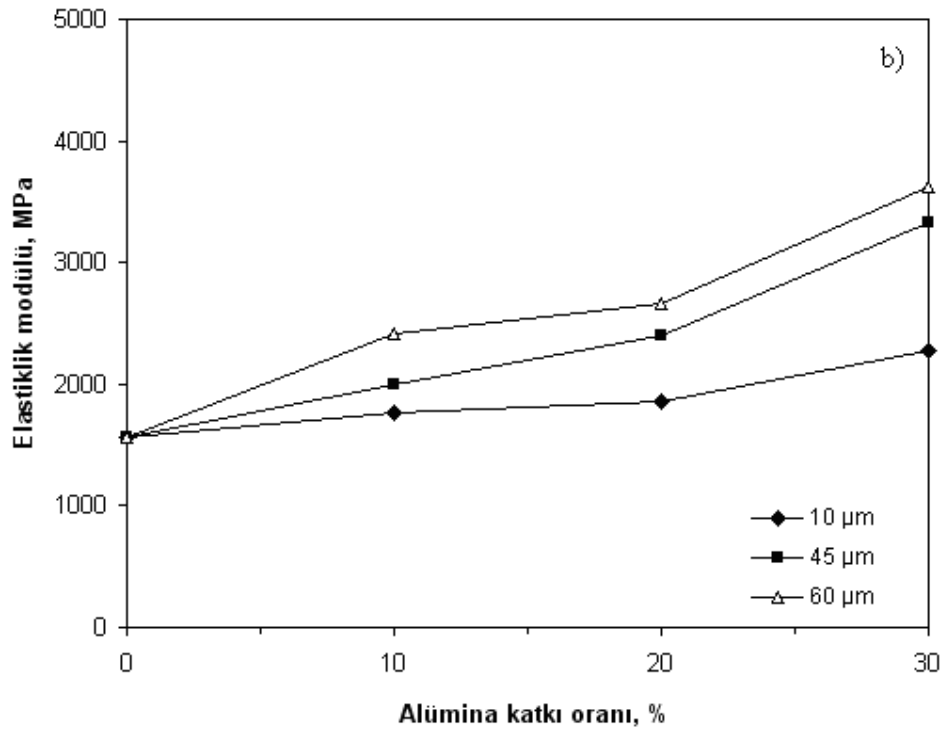
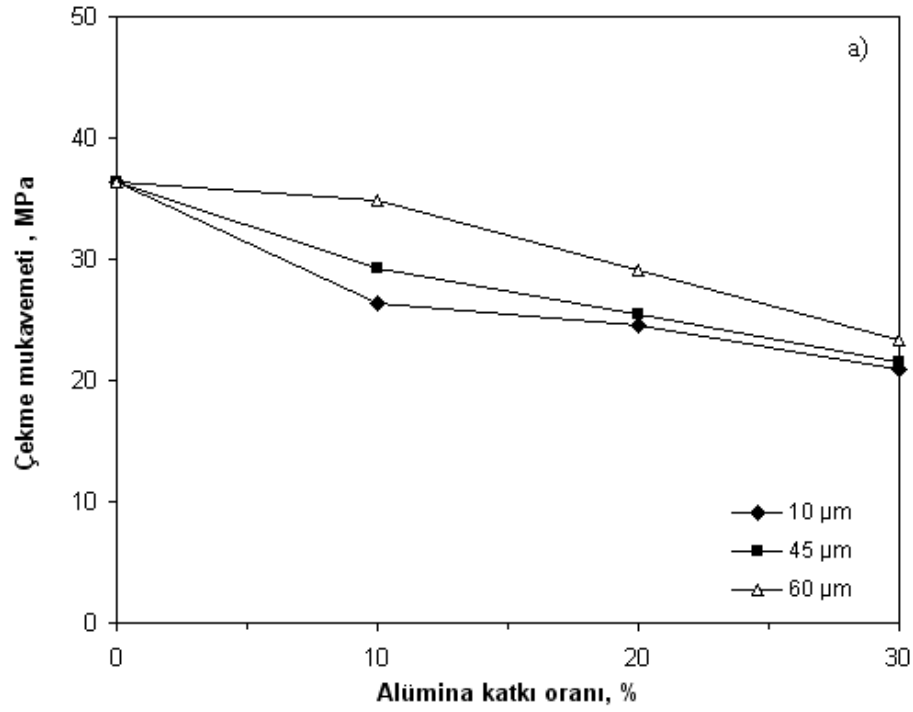
16	PET+ %20 Al ₂ O ₃ (45 µm partikül boyutlu Al ₂ O ₃)	1.489
17	PET+ %30 Al ₂ O ₃ (45 µm partikül boyutlu Al ₂ O ₃)	1.625
18	PET+ %10 Al ₂ O ₃ (60 µm partikül boyutlu Al ₂ O ₃)	-
19	PET+ %20 Al ₂ O ₃ (60 µm partikül boyutlu Al ₂ O ₃)	-
20	PET+ %30 Al ₂ O ₃ (60 µm partikül boyutlu Al ₂ O ₃)	-
21	%75PET+%25PBT (Mix)	-
22	%25PET+%75PBT (Mix)	-
23	%75PET+%25PBT (Mix) %10 Al ₂ O ₃ (10 µm partikül boyutlu Al ₂ O ₃)	-
24	%75PET+%25PBT (Mix) %20 Al ₂ O ₃ (10 µm partikül boyutlu Al ₂ O ₃)	-
25	%75PET+%25PBT (Mix) %10 Al ₂ O ₃ (45 µm partikül boyutlu Al ₂ O ₃)	-
26	%75PET+%25PBT (Mix) %20 Al ₂ O ₃ (45 µm partikül boyutlu Al ₂ O ₃)	-
27	%75PET+%25PBT (Mix) %10 Al ₂ O ₃ (60 µm partikül boyutlu Al ₂ O ₃)	-
28	%75PET+%25PBT (Mix) %10 Al ₂ O ₃ (60 µm partikül boyutlu Al ₂ O ₃)	-
29	%25PET+%75PBT (Mix) %10 Al ₂ O ₃ (10 µm partikül boyutlu Al ₂ O ₃)	-
30	%25PET+%75PBT (Mix) %20 Al ₂ O ₃ (10 µm partikül boyutlu Al ₂ O ₃)	-
31	%25PET+%75PBT (Mix) %10 Al ₂ O ₃ (45 µm partikül boyutlu Al ₂ O ₃)	-
32	%25PET+%75PBT (Mix) %20 Al ₂ O ₃ (45 µm partikül boyutlu Al ₂ O ₃)	-
33	%25PET+%75PBT (Mix) %10 Al ₂ O ₃ (60 µm partikül boyutlu Al ₂ O ₃)	-
34	%25PET+%75PBT (Mix) %10 Al ₂ O ₃ (60 µm partikül boyutlu Al ₂ O ₃)	-

7.2. Mekanik Özelliklerin İncelenmesi

7.2.1. PBT kompozitlerin mekanik özellikleri

Şekil 7.1 (a-b)'de 10 μm , 45 μm ve 60 μm partikül boyutuna sahip Al_2O_3 katkılı PBT kompozitlerin sırasıyla çekme mukavemeti ve elastik modülü ilişkileri verilmiştir. Şekil 7.1 (a)'da görüldüğü gibi Al_2O_3 katkı oranı arttıkça çekme mukavemetinin azaldığı gözlenmiştir. Bunun sebebi ise Al_2O_3 katkısı ile matris malzemenin birbirine bağlanamaması olarak ifade edilebilir. Çünkü, Al_2O_3 katkının yüzeyine herhangi bir modifiye edici bağlayıcı kullanılmamıştır. Burada elde edilen sonuçlar bazı literatürle yapılanlarla uyumluluk göstermektedir[19,20,22]. Katkısız PBT polimerin çekme mukavemeti 36.37 MPA iken %30 Al_2O_3 katkılı kompozitlerin çekme mukavemetleri 10 μm , 45 μm ve 60 μm partikül boyutları için sırasıyla 20.87 MPa, 21.50 MPa ve 23.30MPa olduğu tespit edilmiştir. Yine şekilde görüldüğü gibi partikül boyutunun artması ile çekme mukavemetinin arttığı görülmektedir. %10 Al_2O_3 katkılı PBT kompozitlerde partikül boyutunun 10 μm 'den 60 μm 'ye çıkmasıyla çekme mukavemeti % 24 oranında artmıştır.

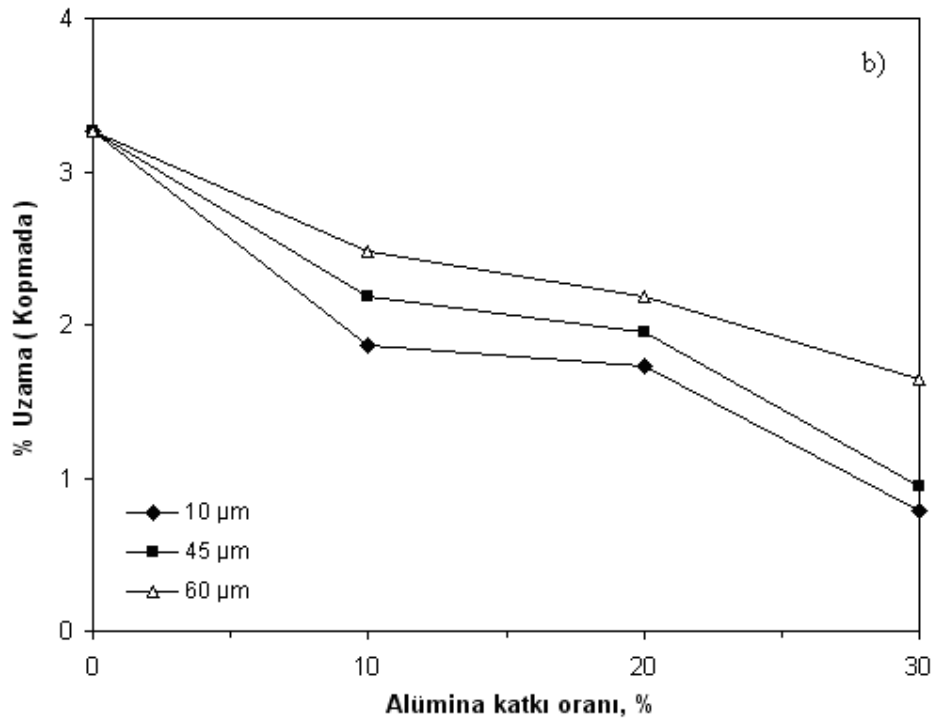
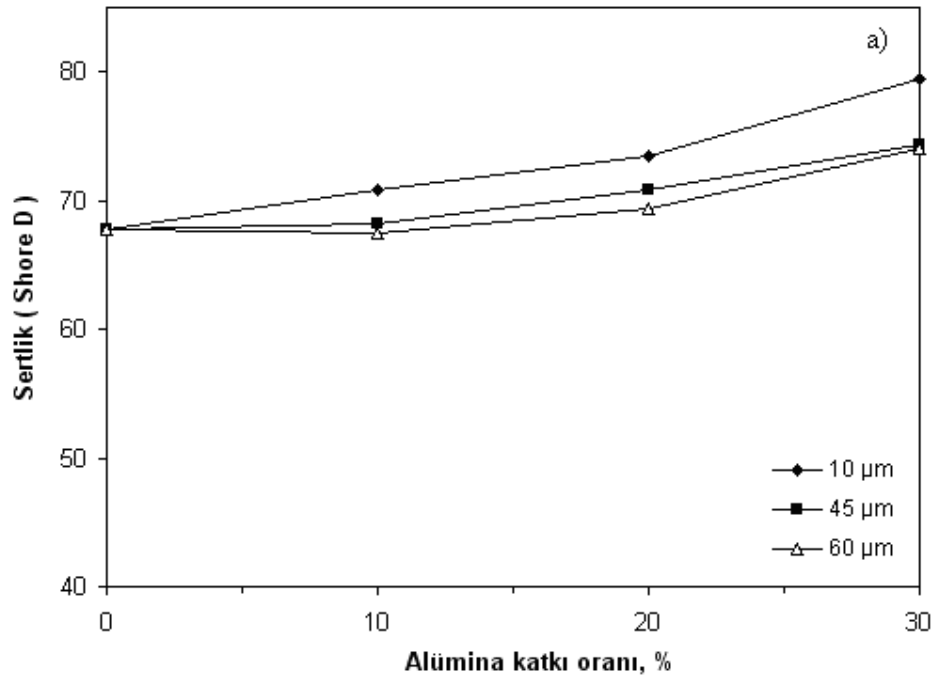
PBT ve kompozitlerinin katkı oranına göre elastik modülü değişimi Şekil 7.1 (b)'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi Al_2O_3 katkı oranı arttıkça elastiklik modülünün arttığı gözlenmiştir. Katkısız PBT polimerin elastiklik modülü 1570,83 MPa iken %20 Al_2O_3 katkılı kompozitlerin elastiklik modülü 10 μm , 45 μm ve 60 μm partikül boyutları için sırasıyla %15, %34 ve %41 oranlarında arttığı tespit edilmiştir. Yine şekilde görüldüğü gibi partikül boyutunun artması ile elastiklik modülü arttığı görülmektedir. %30 Al_2O_3 katkılı PBT kompozitlerde partikül boyutunun 10 μm 'den 60 μm 'ye çıkmasıyla çekme mukavemeti %37 oranında artmıştır. Burada elde edilen deney sonuçları bazı literatürde yapılan çalışmaların sonuçları ile benzerlik göstermektedir [19].



Şekil 7.1. Farklı partikül boyutlu Al₂O₃ katkılı (10µm, 45µm, 60µm) PBT kompozitlerin a) çekme mukavemeti- Al₂O₃ katkı oranı ilişkisi, b)Elastiklik modülü- Al₂O₃ katkı oranı ilişkisi

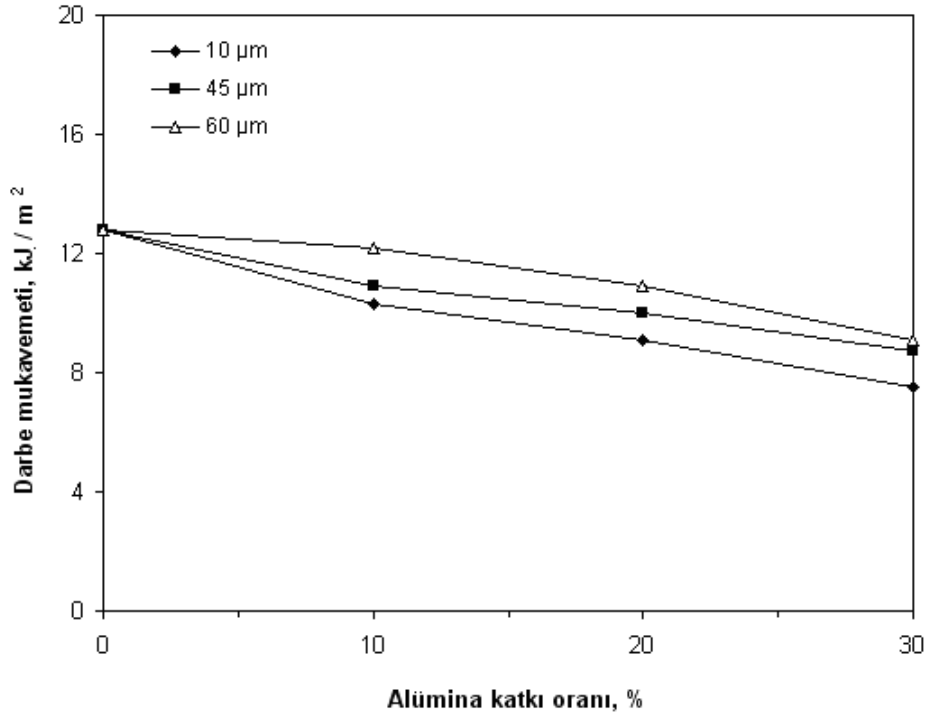
Şekil 7.2 (a-b)'de 10µm, 45µm ve 60µm partikül boyutuna sahip Al₂O₃ katkılı PBT kompozitlerin sertlik (shore D) ve kopmadaki % uzama ilişkileri verilmiştir. PBT ve kompozitlerinin katkı oranına göre sertlik değişimi Şekil 7.2 (a)'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi Al₂O₃ katkı oranı arttıkça sertlik değerinde arttığı gözlenmiştir. Bunun sebebi ise katkı malzemesi olan Al₂O₃' nın matris malzemeye göre daha sert olması olarak ifade edilebilir. Katkısız PBT polimerin sertliği 67.8 (Shore D) iken %30Al₂O₃ katkılı kompozitlerin sertliği 10µm, 45µm ve 60µm partikül boyutları için sırasıyla %14, %9 ve %8 oranlarında arttığı tespit edilmiştir. Yine şekilde görüldüğü gibi partikül boyutunun artması ile sertliğin azaldığı görülmektedir. %10Al₂O₃ katkılı PBT kompozitlerde partikül boyutunun 10µm'den 60µm'ye çıkmasıyla sertlik %5 oranında azalmıştır. Bu deneyler sonucunda elde edilen veriler literatürde verilen bazı çalışmalar ile uyumludur [5].

PBT ve kompozitlerinin katkı oranına göre % uzama (kopmada) değişimleri Şekil 7.2 (b)'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi Al₂O₃ katkı oranı arttıkça kopmadaki %uzama değerinin azaldığı gözlenmiştir. Katkısız PBT polimerin kopmadaki % uzama değeri 3,26 mm iken %10Al₂O₃ katkılı kompozitlerin %uzama (kopmada) 10µm, 45µm ve 60µm partikül boyutları için sırasıyla %43, %33 ve %24 oranlarında azaldığı tespit edilmiştir. Yine şekilde görüldüğü gibi partikül boyutunun artması ile kopmadaki %uzama arttığı görülmektedir. %30Al₂O₃ katkılı PBT kompozitlerde partikül boyutunun 10µm'den 60µm'ye çıkmasıyla kopmadaki %uzama değeri % 10 artmıştır.



Şekil 7.2. Farklı partikül boyutlu Al₂O₃ katkıli (10 μm, 45μm, 60μm) PBT kompozitlerin a) Sertlik-- Al₂O₃ katkı oranı ilişkisi, b) % uzama - Al₂O₃ katkı oranı ilişkisi

Şekil 7.3’de 10µm, 45µm ve 60µm partikül boyutuna sahip Al₂O₃ katkılı PBT kompozitlerin darbe mukavemeti Al₂O₃ katkı oranı ilişkileri verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi Al₂O₃ katkı oranı arttıkça darbe mukavemeti değerlerinde azalma gözlenmiştir. Bunun sebebi ise Al₂O₃ katkının polimer matris malzemeye ilave edilmesiyle kompozit malzeme gevrekleşmektedir. Bununla birlikte Al₂O₃ katkının yüzey modifiyesinin olmaması sonucu matris ve katkının birbirlerine iyi bağlanamamasından dolayı, darbe mukavemetinin düşmesine sebep olabileceği ifade edilebilir. Burada elde edilen deney sonuçları, Seklin ve arkadaşları[22]’nın yapmış olduğu çalışma ile benzerlik göstermekte olup deneylerde elde edilen sonuçları desteklemektedir. Katkisız PBT polimerin darbe mukavemeti değeri 12.81 kJ/m² iken %30Al₂O₃ katkılı kompozitlerin darbe mukavemeti 10, 45 ve 60µm partikül boyutları için sırasıyla %41, %38 ve %29 oranlarında azaldığı tespit edilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi partikül boyutunun artması ile darbe mukavemeti değerlerinin arttığı görülmektedir. %10Al₂O₃ katkılı PBT kompozitlerde partikül boyutunun 10µm’den 60µm’ye çıkmasıyla darbe mukavemeti % 15 artmıştır.

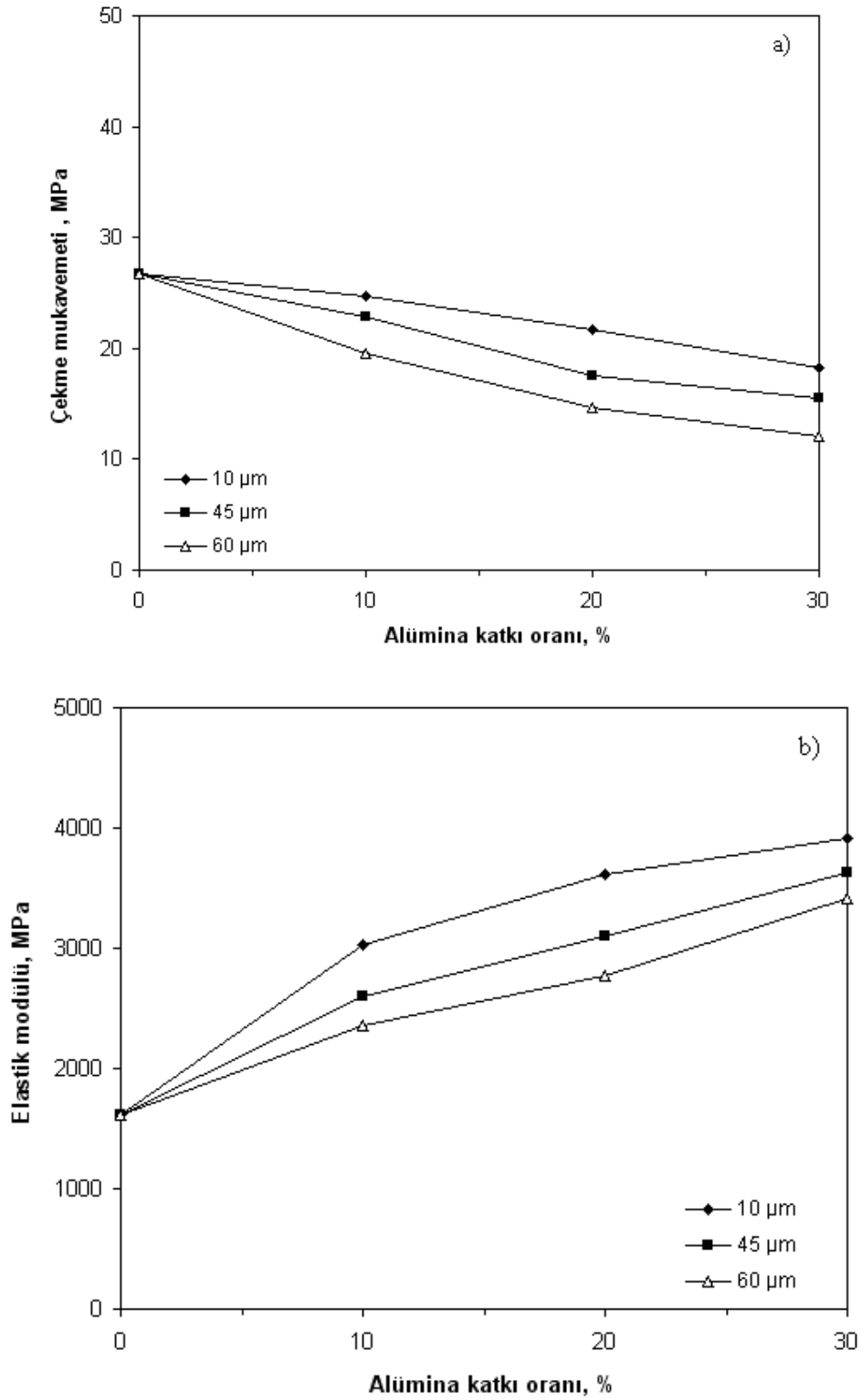


Şekil 7.3. Farklı partikül boyutlu Al₂O₃ katkılı (10µm, 45µm, 60µm) PBT kompozitlerin darbe mukavemeti – Al₂O₃ katkı oranı ilişkisi

7.2.2. PET kompozitlerin mekanik özellikleri

Şekil. 7.4 (a-b)'de sırasıyla 10µm, 45µm ve 60µm partikül boyutuna sahip Al₂O₃ katkılı PET kompozitlerin çekme mukavemeti ve elastik modülü ilişkileri verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi partikül boyutunun artması ile çekme mukavemetinin azaldığı görülmektedir. %10Al₂O₃ katkılı PET kompozitlerde partikül boyutunun 10µm'den 60µm'ye çıkmasıyla çekme mukavemeti %20 azalmıştır. Yine şekil incelendiğinde Al₂O₃ katkı oranı arttıkça çekme mukavemetinin azaldığı gözlenmiştir. Bunun sebebi ise matris malzemenin ile Al₂O₃ katkısının birbirine bağlanamaması olarak söylenebilir. Bu sonucun çıkmasının sebebi Al₂O₃ katkısının yüzeyine herhangi bir modifiye edici bağlayıcı kullanılmamıştır. Burada elde edilen sonuçlar literatür sonuçları ile uyumluluk göstermektedir [19,20,22]. Katkısız PET polimerin çekme mukavemeti 26,7 MPa iken %20Al₂O₃ katkılı kompozitlerin çekme mukavemeti 10, 45 ve 60µm partikül boyutları için sırasıyla %19, %34 ve %45 oranlarında azaldığı tespit edilmiştir.

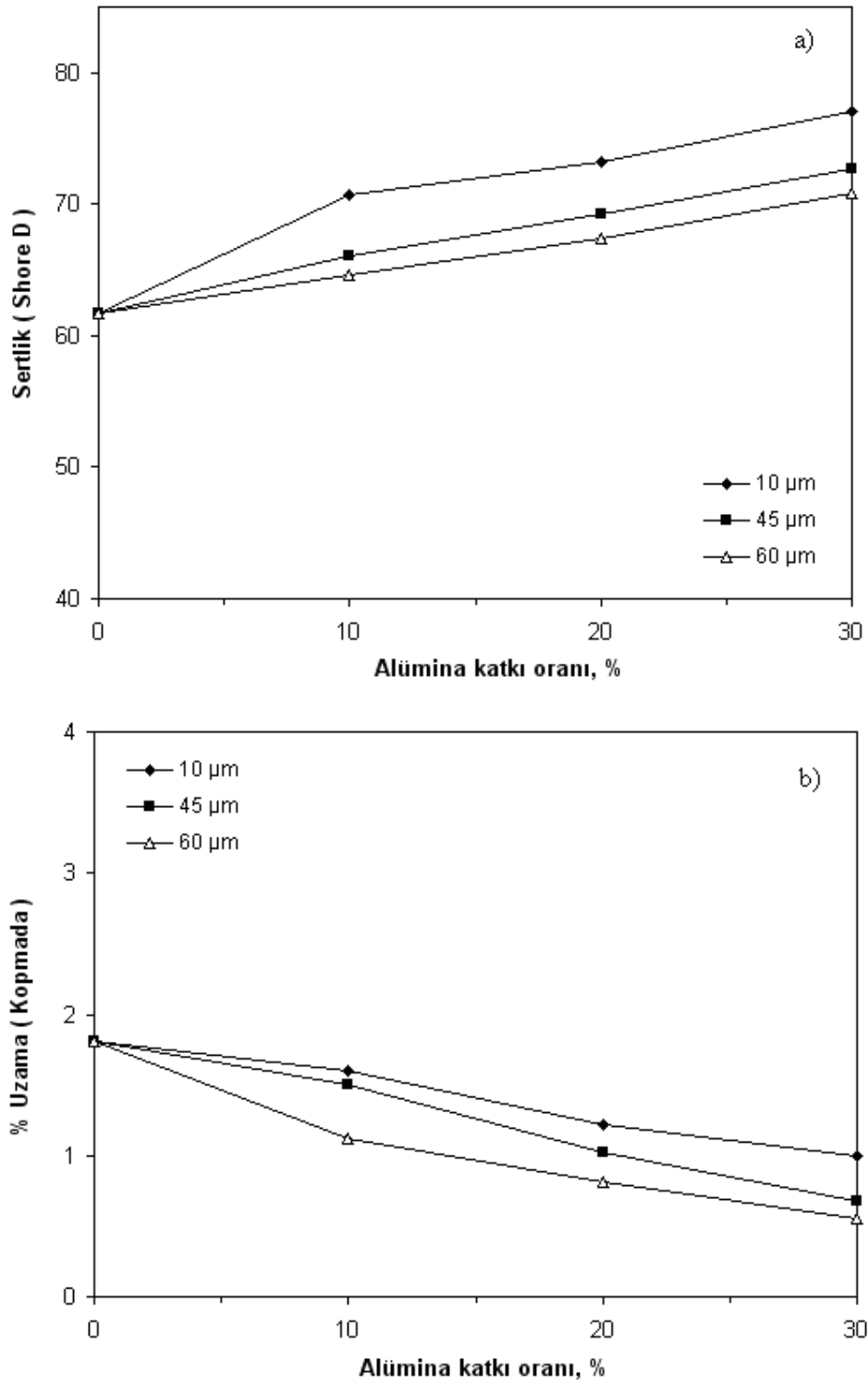
PET ve kompozitlerinin katkı oranına göre elastik modülü değişim Şekil 7.4 (b)'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi partikül boyutunun artması ile elastik modülü azaldığı görülmektedir. %20Al₂O₃ katkılı PET kompozitlerde partikül boyutunun 10 µm'den 60µm'ye çıkmasıyla elastik modülü %23 oranında azalmıştır. Yine şekil incelendiğinde Al₂O₃ katkı oranı arttıkça elastik modülünün arttığı gözlenmiştir. Buradaki elde edilen sonuçlar literatür sonuçları ile uyumluluk göstermektedir [19]. Katkısız PET polimerinin elastiklik modülü 1610,54 MPa iken %30Al₂O₃ katkılı kompozitlerin çekme mukavemeti 10, 45 ve 60µm partikül boyutları için sırasıyla %58, %55 ve %52 oranlarında arttığı tespit edilmiştir.



Şekil 7.4. Farklı partikül boyutlu Al₂O₃ katkılı (10μm, 45μm, 60μm) PET kompozitlerin; a) Çekme mukavemeti- Al₂O₃ katkı oranı ilişkisi, b) Elastiklik modülü- Al₂O₃ katkı oranı ilişkisi

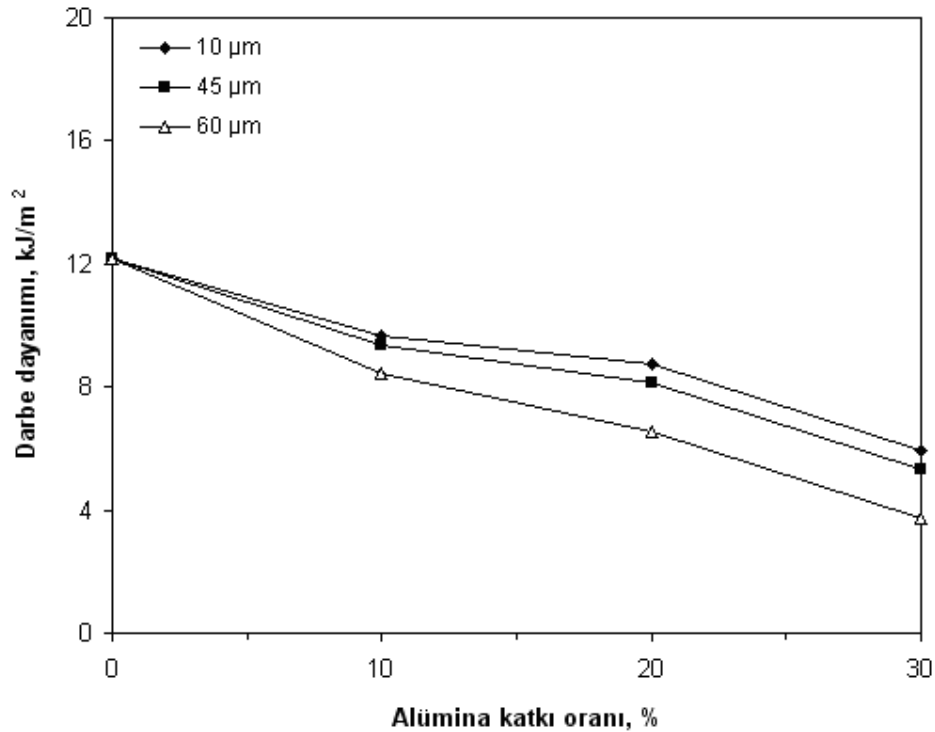
Şekil 7.5 (a-b)'de 10µm, 45µm ve 60µm partikül boyutuna sahip Al₂O₃ katkılı PET kompozitlerin sertlik- kopmadaki % uzama ilişkileri verilmiştir. PET ve kompozitlerinin katkı oranına göre sertlik değişim Şekil 7.5 (a)'da verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi partikül boyutunun artması ile sertliğin azaldığı görülmektedir. %20Al₂O₃ katkılı PET kompozitlerde partikül boyutunun 10µm'den 60µm'ye çıkmasıyla sertlik %8 oranında azalmıştır. Yine şekil dikkatli bir şekilde incelendiğinde Al₂O₃ katkı oranı arttıkça sertliğin arttığı gözlenmiştir. Bunun sebebi ise katkı malzemesi olan Al₂O₃ 'nın matris malzemeye göre daha sert olması olarak ifade edilebilir. Bu deneyler sonucunda elde edilen veriler literatür ile uyuşmaktadır [5]. Katkısız PET polimerin Shore D sertliği 61,7 iken %10Al₂O₃ katkılı kompozitlerin sertlik değerleri 10, 45 ve 60µm partikül boyutları için sırasıyla %13, %7 ve %4 oranlarında arttığı tespit edilmiştir.

PET ve kompozitlerinin katkı oranına göre kopmadaki %uzama değişimi Şekil 7.5 (b)'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi partikül boyutunun artması ile %uzama miktarının azaldığı görülmektedir. %30Al₂O₃ katkılı PET kompozitlerde partikül boyutunun 10µm'den 60µm'ye çıkmasıyla kopmadaki %uzama %45 azalmıştır. Yine şekil incelendiğinde Al₂O₃ katkı oranı arttıkça kopmadaki %uzama azaldığı gözlenmiştir. Katkısız PET polimerin kopmadaki %uzama 1,81 iken %10 Al₂O₃ katkılı kompozitlerin %uzama 10, 45 ve 60µm partikül boyutları için sırasıyla %12, %17 ve %38 oranlarında azalma tespit edilmiştir. Çekme mukavemeti (MPa), elastik modülü (MPa), %uzama (kopmada), sertlik (ShoreD), darbe mukavemeti (Kj/m²) sonuçlarının rakamsal olarak değerleri Ek-B'de verilmiştir.



Şekil 7.5. Farklı partikül boyutlu Al₂O₃ katkılı (10μm, 45μm, 60μm) PET kompozitlerin; a) sertlik-Al₂O₃ katkı oranı ilişkisi, b) % uzama- Al₂O₃ katkı oranı ilişkisi

Şekil 7.6'da 10µm, 45µm ve 60µm partikül boyutuna sahip alümina katkılı PBT kompozitlerin darbe mukavemeti sonuçları verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi partikül boyutunun artması ile darbe mukavemeti değerlerinde azalma görülmektedir. %20Al₂O₃ katkılı PET kompozitlerde partikül boyutunun 10µm'den 60µm'ye çıkmasıyla darbe mukavemeti % 25 azalmıştır. Yine şekil incelendiğinde Al₂O₃ katkı oranı arttıkça darbe mukavemeti değerlerinde azalma gözlenmiştir. Bunun sebebi ise Al₂O₃ katkının polimer matris malzemeye ilave edilmesiyle kompozit malzeme gevrekleşmektedir. Bununla birlikte Al₂O₃ katkının yüzey modifiyesinin olmaması da matris ile katkının birbirlerine iyi bağlanamaması, darbe mukavemetinin düşmesinin sebebi olarak ifade edilebilir. Bu deneyler sonucunda elde edilen veriler incelediğinde literatür ile uyuşmaktadır [22]. Katkısız PET polimerin darbe mukavemeti değeri 12.18 kJ/m² iken %20Al₂O₃ katkılı kompozitlerin darbe mukavemeti 10, 45 ve 60µm partikül boyutları için sırasıyla %28, %33 ve %46 oranlarında azaldığı tespit edilmiştir.



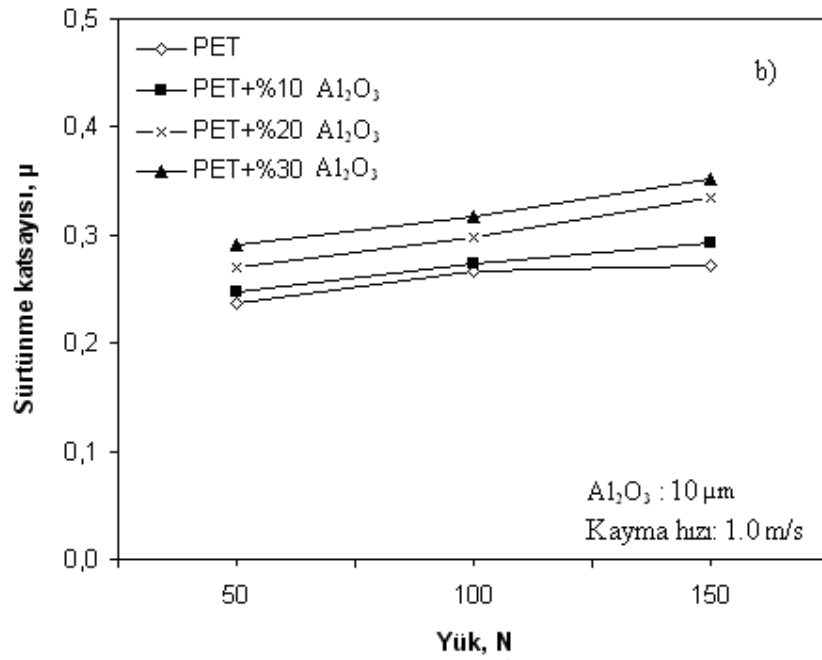
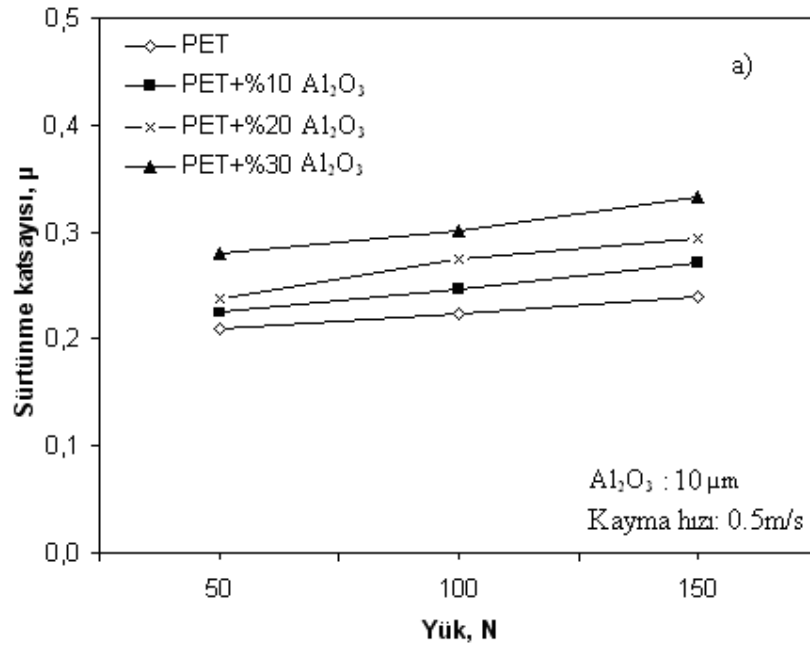
Şekil 7.6. Farklı partikül boyutlu Al₂O₃ katkılı (10µm, 45µm, 60µm) PET kompozitlerin darbe mukavemeti – Al₂O₃ katkı oranı ilişkisi

7.3. Sürtünme Katsayısı-Yük İlişkisi

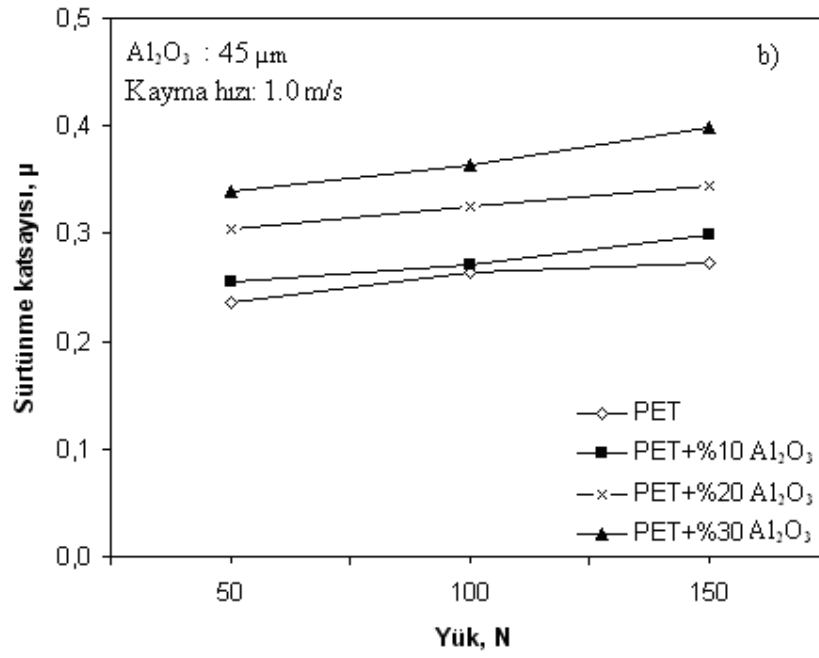
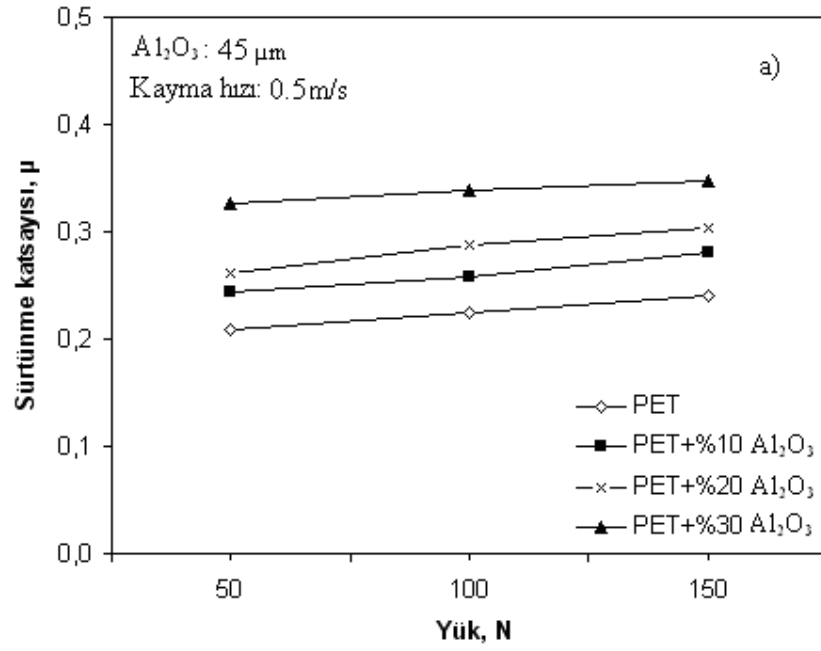
7.3.1. PET kompozitlerin sürtünme katsayısı-yük ilişkisi

Şekil 7.7 (a) ve (b)'de katkısız PET ve 10 μ m partikül boyutuna sahip PET kompozitin 0,5 ve 1.0 m/s kayma hızları altında uygulanan yüke göre sürtünme katsayısı değişimi verilmiştir. Her iki kayma hızında da artan yük miktarı ile sürtünme katsayısı artmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı verileri literatür sonuçları ile uyum içindedir [7,14]. 0.5 m/s kayma hızında, en yüksek sürtünme katsayısı değeri 150N yük altında 0,33 iken %30Al₂O₃ PET katkılı kompozit malzemesinde, en düşük sürtünme katsayısı değeri ise 0,20 ile katkısız PET polimerinde tespit edilmiştir. 0,5m/s kayma hızı ve 50N yük altında, PET+%30Al₂O₃ katkılı kompozitin sürtünme katsayısı değerinin katkısız PET polimerine göre %26 daha fazla olduğu gözlenmiştir. 1,0m/s kayma hızı ve 150N yük altında, %30Al₂O₃ katkılı PET kompozitin sürtünme katsayısı değeri katkısız PET polimerine göre %22 daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 7.8 (a) ve (b)'de katkısız PET ve 45 μ m partikül boyutuna sahip PET kompozitlerinin 0,5 ve 1.0 m/s kayma hızları altında uygulanan yüke göre sürtünme katsayısı değişimi verilmiştir. Uygulanan yükün %200 artması ile katkısız PET ve kompozitlerinin her ikisinde de sürtünme katsayısı değerlerinde artış gözlenmiştir. 0,5m/s kayma hızı ve 100N yük altında, PET %30Al₂O₃ katkılı kompozitin sürtünme katsayısı değeri katkısız PET polimerine göre %33 daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Yani Al₂O₃ katkı oranı arttıkça kompozit malzemenin sürtünme katsayısının arttığı görülmüştür. Bunun sebebi ise kompozit malzeme bünyesinde bulunan Al₂O₃ katkısının aşınma deneyi sırasında çelik karşı yüzey ile temas halinde olduğundan dolayı sürtünme katsayısı artmıştır. Çünkü Al₂O₃ katkısı ile polimer çelik yüzey sürtünmesi yerine, çelik-Al₂O₃ katkının sürtünmesi gerçekleşmiştir. Bu durum ise kompozit malzemenin sürtünme katsayısını artırmaktadır. Bu deneyler sonucunda elde edilen veriler incelendiğinde literatür ile uyuşmaktadır [5,9]. 1.0 m/s kayma hızında, uygulanan yük aralıklarında en yüksek sürtünme katsayısı değeri 150N yük altında 0,39 μ m değeri ile %30 Al₂O₃ katkılı PET kompozitinde, en düşük sürtünme katsayısı değeri 0,23 μ m ile katkısız PET polimerinde tespit edilmiştir.



Şekil 7.7. 10 µm partikül boyutlu Al₂O₃ katkılı PET kompozitlerin sürtünme katsayısı-yük ilişkisi, kayma hızı: a) 0.5 m/s, b) 1.0 m/s



Şekil 7.8. 45 μm partikül boyutlu Al_2O_3 katkılı PET kompozitlerin sürtünme katsayısı-yük ilişkisi, kayma hızı: a) 0.5m/s, b) 1.0m/s

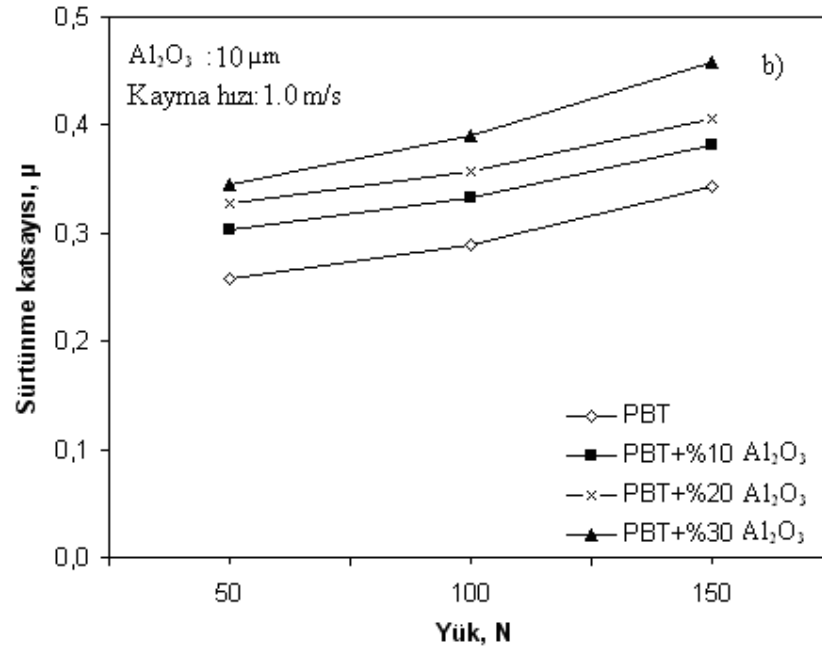
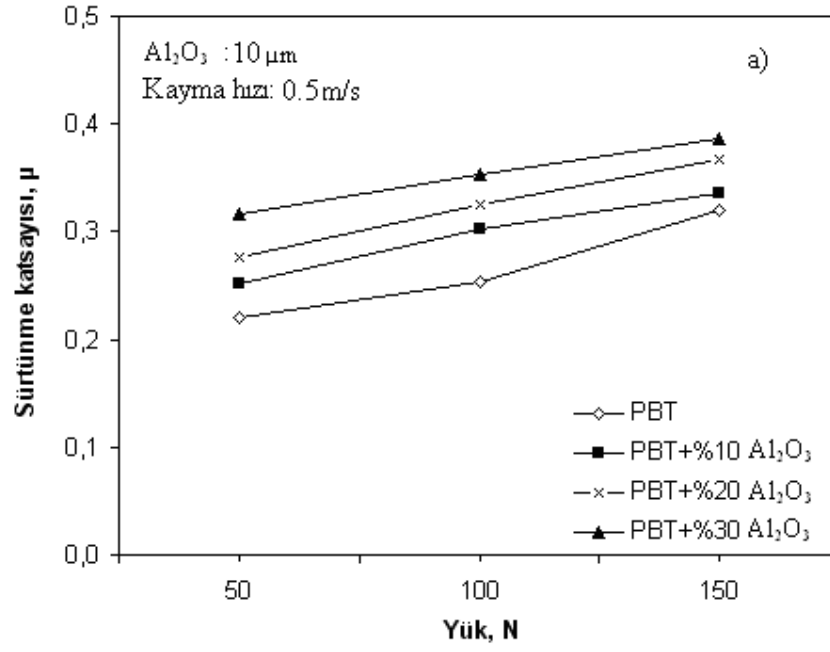
7.3.2. PBT kompozitlerin sürtünme katsayısı-yük ilişkisi

Şekil 7.9 (a) ve (b)'de katkısız PBT ve 10 µm partikül boyutuna sahip PBT kompozitlerinin 0,5 ve 1.0 m/s kayma hızları altında uygulanan yüke göre sürtünme katsayısı değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi uygulanan yükün artması ile sürtünme katsayısı değerlerinin önemli oranda arttığı tespit edilmiştir. Bunun sebebi ise PBT kompozit malzeme bünyesinde bulunan Al_2O_3 katkının çelik karşı yüzey ile çalıştığında sürtünme katsayısını artırmaktadır. Çünkü Al_2O_3 katkısı ile polimer çelik yüzey sürtünme şartları yerine, çelik Al_2O_3 çalışma ortamı sağlanmaktadır. Bu durum ise kompozit malzemenin sürtünme katsayısını artırmaktadır. Yaptıkları çalışmada benzerlik [16,17]. 100N yük altında, katkısız PBT polimerine göre katkı oranı arttırıldığında (%10, %20, %30) sürtünme katsayısı değerleri sırası ile %16, %22, %28 oranında artmıştır. En fazla sürtünme katsayısı %30 Al_2O_3 katkılı PBT kompozit malzemesinde görülmüştür. En az sürtünme katsayısına sahip olan malzeme ise katkısız PBT polimeridir. 1.0 m/s kayma hızında ise, uygulanan yükün artması ile sürtünme katsayısının arttığı tespit edilmiştir. Yaptıkları çalışmada benzerlik [16,17]. Katkısız PBT polimerinin 50N yük altında sürtünme katsayısı değeri 0.25µm iken 100N'daki sürtünme katsayısı değeri ise 0.28µm dir. Uygulanan yük %200 arttırıldığında ise sürtünme katsayısındaki artış %24 oranında olmuştur. 150N yük altında %10, %20, %30 Al_2O_3 katkılı PBT kompozitlerinde sürtünme katsayılarında sırası ile %10, %15, %25 şeklinde bir artış olduğu gözlenmiştir.

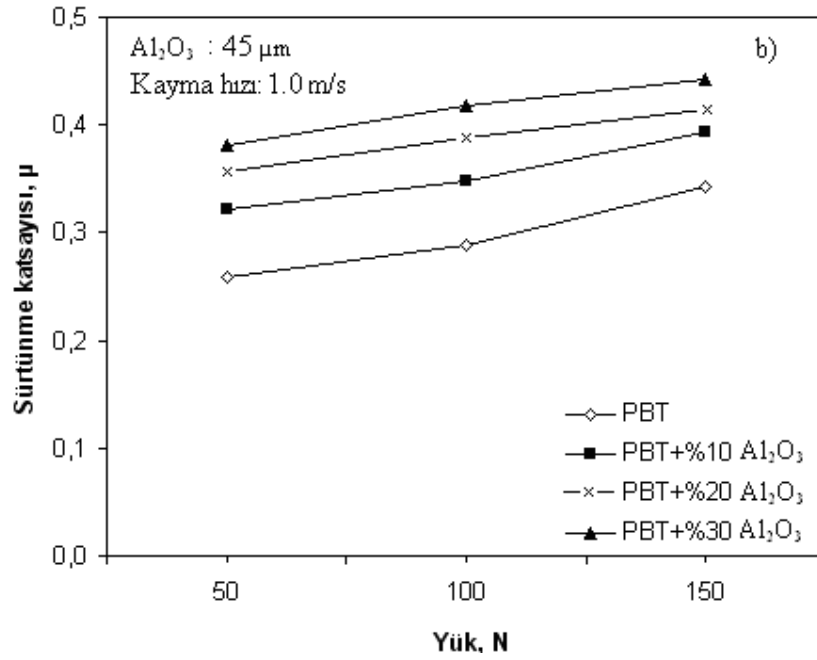
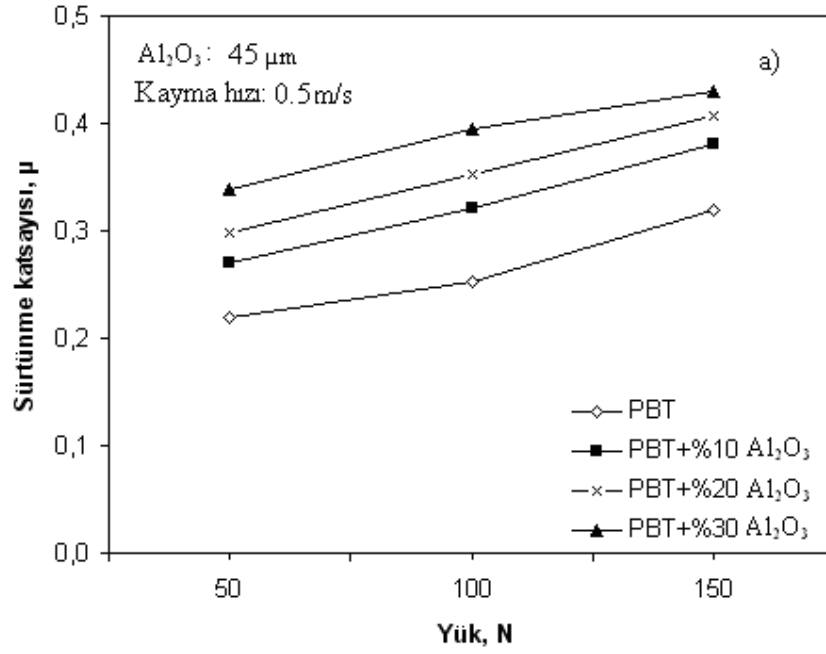
Şekil 7.10 (a) ve (b)'de katkısız PBT ve 45 µm partikül boyutuna sahip PBT kompozitlerin 0,5 ve 1.0 m/s kayma hızları altında uygulanan yüke göre sürtünme katsayısı değişimi verilmiştir. Grafikteki bütün malzemeler için yükün artması ile sürtünme katsayısı değerlerinde artış gözlenmiştir. Bunun sebebi ise PBT kompozit malzeme bünyesinde bulunan Al_2O_3 katkısının çelik disk ile yapılan deney sonucunda sürtünmesi ile sürtünme katsayısını artırmıştır. Çünkü çelik yüzey ile Al_2O_3 katkısının sürtünmesinden dolayı oluşmaktadır. Bu durum ise kompozit malzemenin sürtünme katsayısını artırmaktadır. Burada çıkarılan sonuçlar literatür ile paralellik göstermektedir [17,28]. Örneğin katkısız PBT polimerinin 50N yük altındaki sürtünme katsayısı değerlerinde 0.22 civarında iken %30 katkılı Al_2O_3 PBT kompozitinin sürtünme katsayısı 50N değeri 0.33 olduğu tespit edilmiştir. 150N yük

altında sürtünme katsayısı değeri 0.32 değerinden 0.42 değerine kadar yükseldiği gözlenmiştir. Uygulanan yük aralıklarında en yüksek sürtünme katsayısı değeri 150N yük altında 0,42 değeri ile PBT %30Al₂O₃ katkılı kompozitinde, en düşük sürtünme katsayısı değeri 0,22 ile katkısız PBT polimerinde tespit edilmiştir.

0,5m/s kayma hızı ve 100N yük altında, PBT+%30Al₂O₃ katkılı kompozitin sürtünme katsayısı değeri katkısız PBT polimerine göre %35 daha büyük olduğu gözlenmiştir. 1.0m/s kayma hızında ise, katkısız PBT polimerinin 100N yük altındaki sürtünme katsayısı değeri 0.28µm civarında iken %30Al₂O₃ katkılı PBT kompozitinin sürtünme katsayısı değeri 0.41µm olduğu tespit edilmiştir. Uygulanan yük aralıklarında en yüksek sürtünme katsayısı değeri 150N yük altında 0,44 değeri ile PBT+%30 Al₂O₃ katkılı kompozitte, en düşük sürtünme katsayısı değeri 0,25 ile katkısız PBT polimerinde tespit edilmiştir. 1,0m/s kayma hızı ve 150N yük altında, PBT %30 Al₂O₃ katkılı kompozitin sürtünme katsayısı değeri katkısız PBT polimerine göre %22 daha büyük olduğu gözlenmiştir.



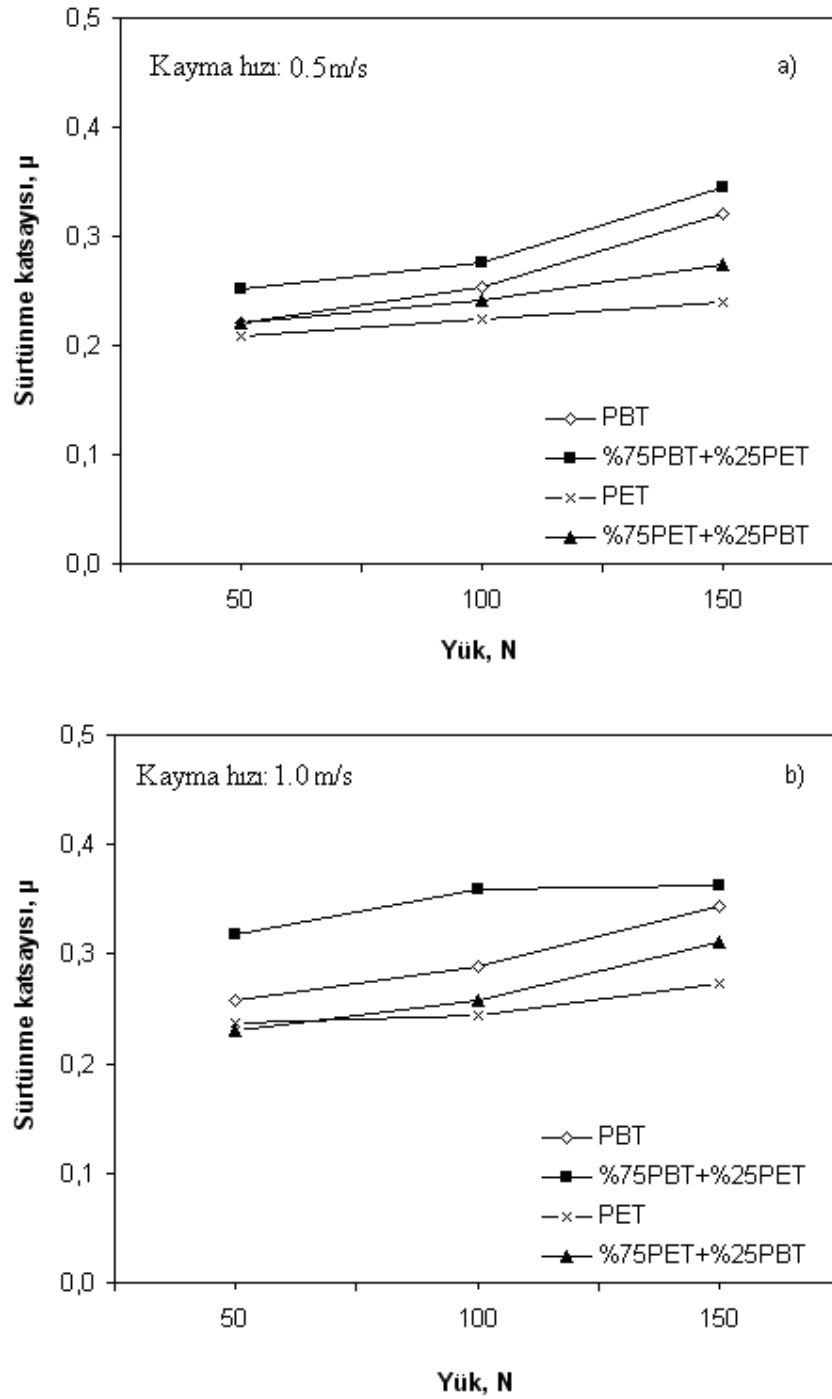
Şekil 7.9. 10 μm partikül boyutlu Al₂O₃ katkılı PBT kompozitlerin sürtünme katsayısı-yük ilişkisi, kayma hızı: a) 0.5m/s, b) 1.0m/s



Şekil 7.10. 45 µm partikül boyutlu Al₂O₃ katkılı PBT kompozitlerin sürtünme katsayısı-yük ilişkisi, kayma hızı: a) 0.5m/s, b) 1.0m/s

7.3.3. PET/PBT kompozitlerin sürtünme katsayısı-yük ilişkisi

Şekil 7.11 (a) ve (b)'de katkısız PBT, PET / kompozitlerinin 0,5 ve 1.0m/s kayma hızları altında uygulanan yüke göre sürtünme katsayısı değişimi verilmiştir. Her iki kayma hızında da artan yük miktarı ile sürtünme katsayısı artmıştır. 0.5m/s kayma hızında, en yüksekten en düşüğe elde edilen sürtünme katsayısı değerleri, %75 PBT + %25 PET > PBT > %75 PET + %25 PBT > PET tespit edilmiştir. PBT ile PET kompozitlerinin sürtünme katsayısı değerleri katkısız PBT veya katkısız PET polimerlerine göre daha yüksek çıktığı tespit edilmiştir. 1,0m/s kayma hızı ve 150N yük altında, en yüksek sürtünme katsayısı değeri %75 PBT + %25 PET kompozitinde, en düşük sürtünme katsayısı değeri ise PET polimerlerinde tespit edilmiştir.

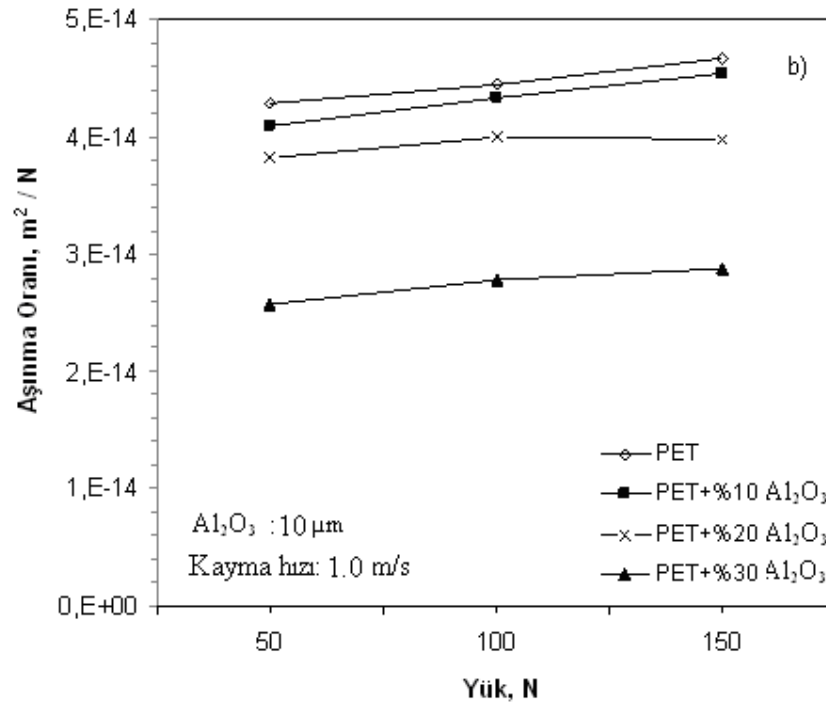
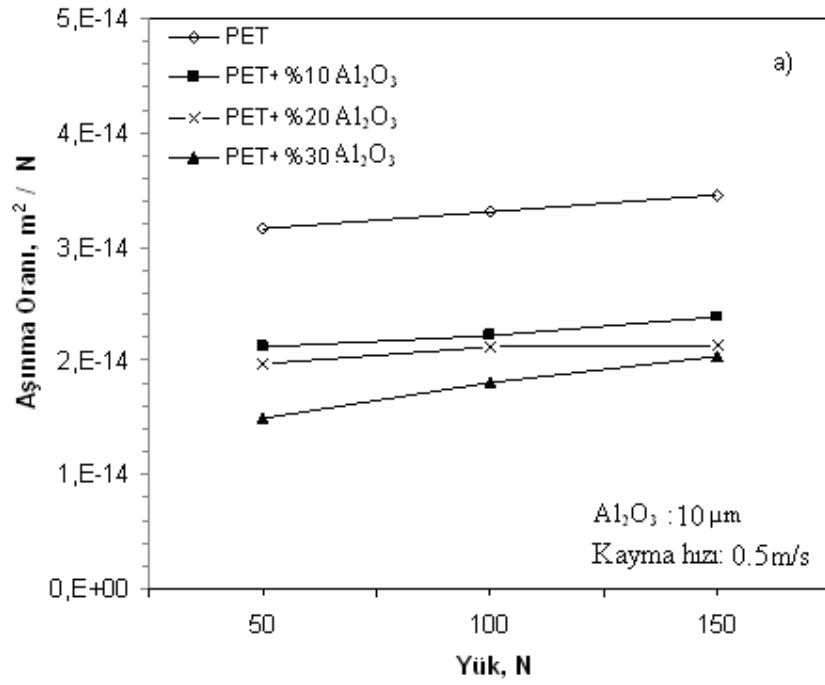


Şekil 7.11. Katkısız PBT ve PET polimerleri ile bu polimerlerin karışımlarının sürtünme katsayısı-yük ilişkisi, kayma hızı: a) 0.5m/s, b) 1.0m/s

7.4. Aşınma Oranı-Yük İlişkisi

7.4.1. PET kompozitlerin aşınma oranı-yük ilişkisi

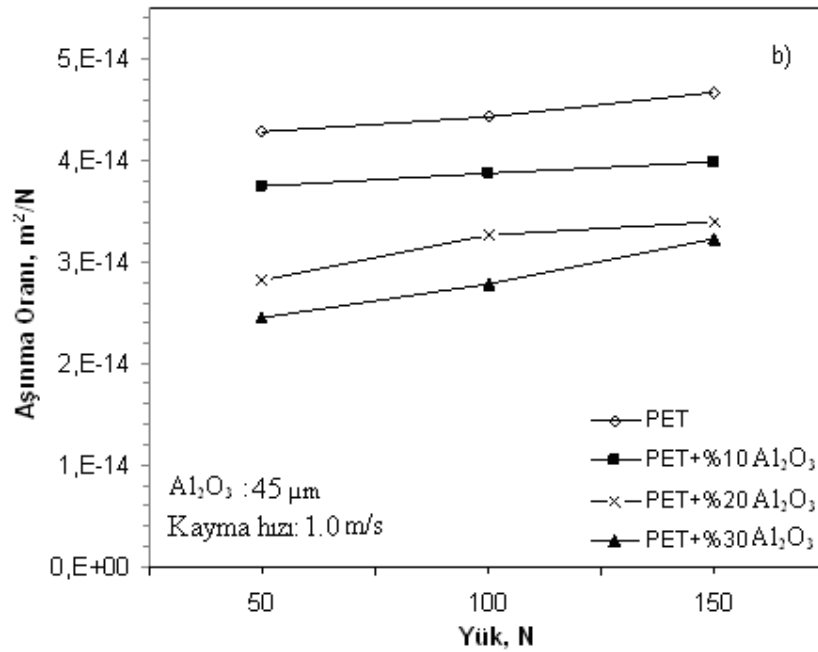
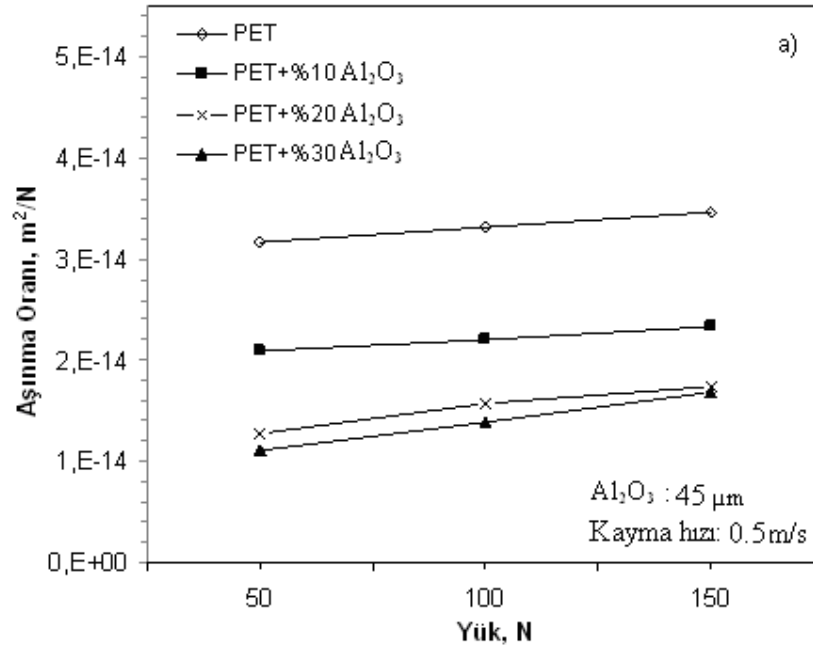
Şekil 7.12 (a) ve (b)'de katkısız PET ve 10µm partikül boyutuna sahip PET kompozitlerinin 0,5 ve 1.0m/s kayma hızları altında uygulanan yüke göre aşınma oranı değişimleri verilmiştir. 0,5m/s kayma hızı altında uygulanan yüke göre en fazla aşınma oranı katkısız PET polimerinde elde edilirken en az aşınma oranı ise %30 oranında Al₂O₃ katkılı kompozite tespit edilmiştir. 50N yük altında katkısız PBT polimerine göre Al₂O₃ katkılı kompozitlerin (%10, %20, %30) aşınma oranları sırası ile %7, %9, %15 oranında azalmıştır. Katkısız PET ve kompozitlerde aşınma oranı 10⁻¹⁴ m²/N değerlerinde elde edilmiştir. Uygulanan yük aralıklarında en yüksek aşınma oranı 150N yük altında 3.4x10⁻¹⁴ m²/N değeri ile katkısız PET polimerinde, en düşük aşınma oranı ise 50N yük altında 1.5x10⁻¹⁵ m²/N değeri ile %30Al₂O₃ katkılı PET kompozitinde elde edilmiştir. Katkısız PET ve kompozitlerinin 1,0m/s kayma hızı altında uygulanan yüke göre aşınma oranlarındaki değişim incelendiğinde 150N yük miktarına kadar katkısız PET polimerinin aşınma oranı Al₂O₃ katkılı kompozitlerin aşınma oranına göre daha yüksek elde edilmiştir. Uygulanan yük aralıklarında en yüksek aşınma oranı 150N yük altında 4.8x10⁻¹⁴ m²/N değeri katkısız PET polimerinde, en düşük aşınma oranı ise 50N yük altında 2.5x10⁻¹⁵ m²/N değeri ile PET +%30Al₂O₃ katkılı kompozitte elde edilmiştir. 150N yük altında polimer içerisine %30 oranında Al₂O₃ takviye ettiğimizde aşınma oranı değeri %40 oranında düşmüştür. Tüm bu yapılan deneylerde yük miktarının artması ile aşınma oranının arttığı belirlenmiştir. Yük miktarı artırıldığında aşınma sırasında polimer içindeki Al₂O₃ partiküllerinin kopması ile bu sonucun olabileceği söylenebilir. Elde edilen sonuçlar bazı literatür sonuçları ile benzerlikler içermektedir [16,17].



Şekil 7.12. Al₂O₃ katkılı (10 µm) PET kompozitlerin aşınma oranı-yük ilişkisi, kayma hızı: a) 0.5m/s, b) 1.0m/s

Şekil 7.13 (a) ve (b)'de katkısız PET ve 45µm partikül boyutuna sahip PET kompozitlerinin 0,5 ve 1.0m/s kayma hızları altında uygulanan yüke göre aşınma oranı değişimleri verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi en az aşınma oranı %30Al₂O₃ katkıli kompozitte elde edilirken, ikinci olarak en az aşınan malzeme %20Al₂O₃ katkısına sahip kompozit malzeme olduğu tespit edilmiştir. Uygulanan yük aralıklarında en yüksek aşınma oranı 150N yük altında 3.4×10^{-14} m²/N değeri ile katkısız PET polimerinde, en düşük aşınma oranı ise 50N yük altında 1.1×10^{-14} m²/N değeri ile %30 Al₂O₃ katkıli PET kompozitinde elde edilmiştir. 0,5m/s kayma hızı ve 50N yük altında, %30 Al₂O₃ katkıli PET kompozitin aşınma oranı katkısız PET polimerine göre %48 daha düşüktür.

Katkısız PET ve kompozitlerinin 1,0 m/s kayma hızı altında uygulanan yüke göre aşınma oranlarındaki değişim ise Şekil 7.13 (b)'de verilmiştir. Uygulanan yükün %200 artması ile katkısız PET ve kompozitlerinin her ikisinde de aşınma oranı değerlerinde artış tespit edilmiştir. Başlangıçta %30 Al₂O₃ katkıli PET polimerinin 50N yük altında aşınma oranı 2.4×10^{-14} iken yük miktarını 150N'a çıkarıldığında aşınma oranı 3.2×10^{-14} değerine sahip olduğu görülmüştür. Uygulanan yük aralıklarında en yüksek aşınma oranı 150N yük altında 3.4×10^{-14} m²/N değeri katkısız PET polimerinde, en düşük aşınma oranı ise 50N yük altında 1.1×10^{-15} m²/N değeri ile PET+%30Al₂O₃ katkıli kompozitte elde edilmiştir. 1,0m/s kayma hızı ve 100N yük altında, PET+%30Al₂O₃ katkıli kompozitin aşınma oranı katkısız PET polimerine göre %37 daha düşüktür. Tüm bu yapılan deneylerde polimer içerisine katılan katkı miktarının artması ile aşınma oranının azaldığı tespit edilmiştir. Katkı oranının artması ile kompozit malzemenin sertliği artmakta, dolayısıyla aşınma direnci artmaktadır. Bu deneyler sonucunda elde edilen veriler literatür ile uyumaktadır [24,26].

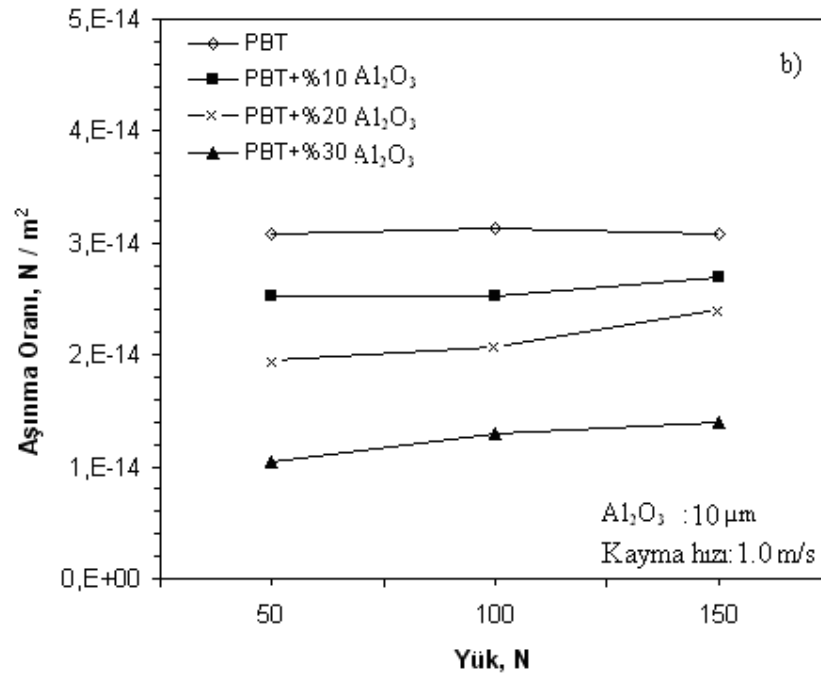
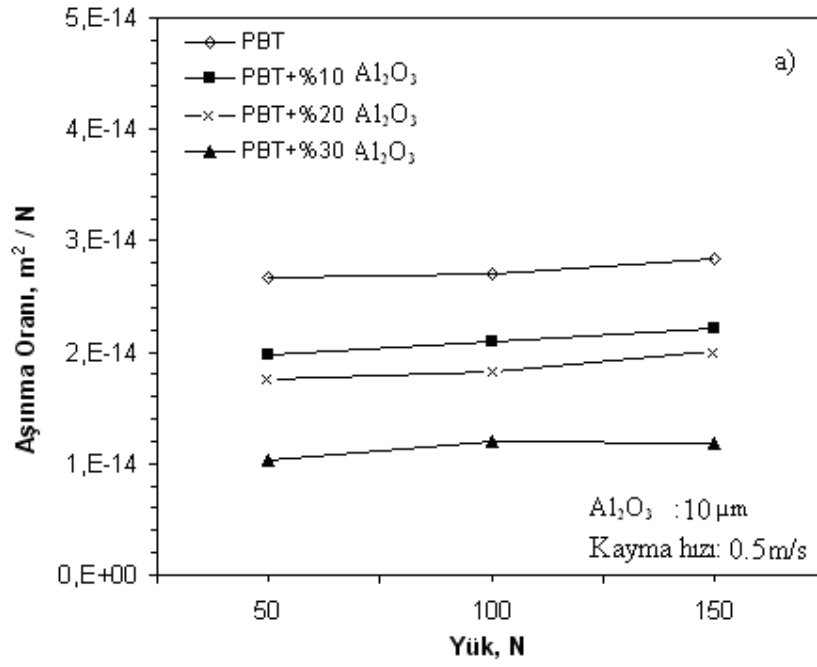


Şekil 7.13. Al_2O_3 katkılı (45 μm) PET kompozitlerin aşınma oranı-yük ilişkisi, kayma hızı: a) 0.5m/s, b) 1.0m/s

7.4.2. PBT kompozitlerin aşınma oranı-yük ilişkisi

Şekil 7.14 (a) ve (b)'de katkısız PBT ve 10 µm partikül boyutuna sahip PBT kompozitlerinin 0,5 ve 1.0 m/s kayma hızları altında uygulanan yüke göre aşınma oranı değişimleri verilmiştir. 0,5 m/s kayma hızı altında uygulanan yüke göre aşınma oranlarında artış olduğu gözlemlenmiştir. Yük miktarı artırıldığında aşınma sırasında polimer ana matris içindeki Al₂O₃ partiküllerinin kopması ile aşınmanın artması tespit edilmiştir. Sonuçlar literatür ile uyum göstermektedir[17,18]. Benzer şekilde en az aşınma oranı ise PBT %30 Al₂O₃ katkılı kompozitte gözlenmiştir. Katkısız PBT ve diğer kompozit malzemelere göre aşınma oranı artışı çok az olmuştur. Uygulanan yük aralıklarında, en yüksek aşınma oranı 150N yük altında 2.8×10^{-14} m²/N değeri katkısız PBT polimerinde, en düşük aşınma oranı ise 50N yük altında 1.2×10^{-15} m²/N değeri ile PBT+%30Al₂O₃ katkılı kompozitte elde edilmiştir. 0,5m/s kayma hızı ve 150N yük altında, PBT+%30Al₂O₃ katkılı kompozitin aşınma oranı katkısız PBT polimerine göre %38 daha düşüktür.

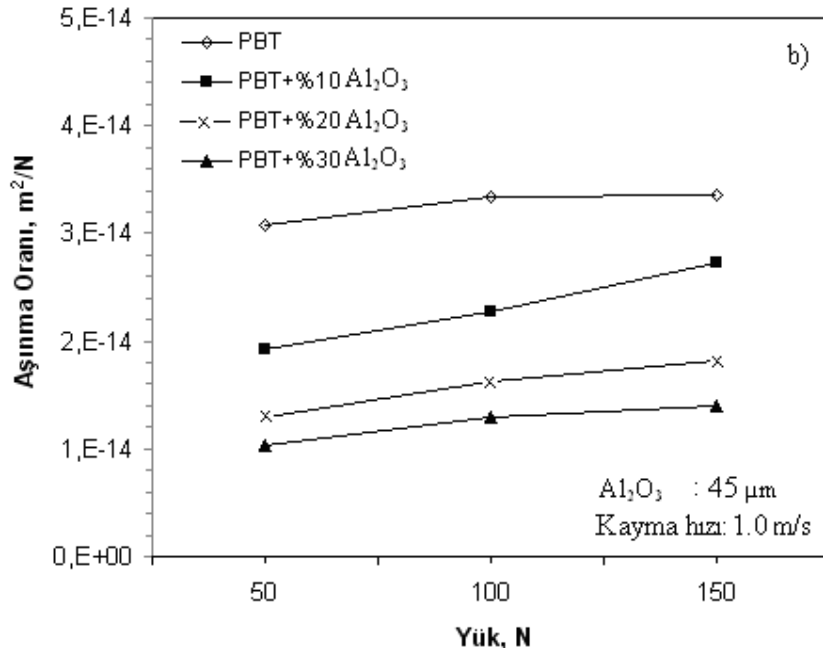
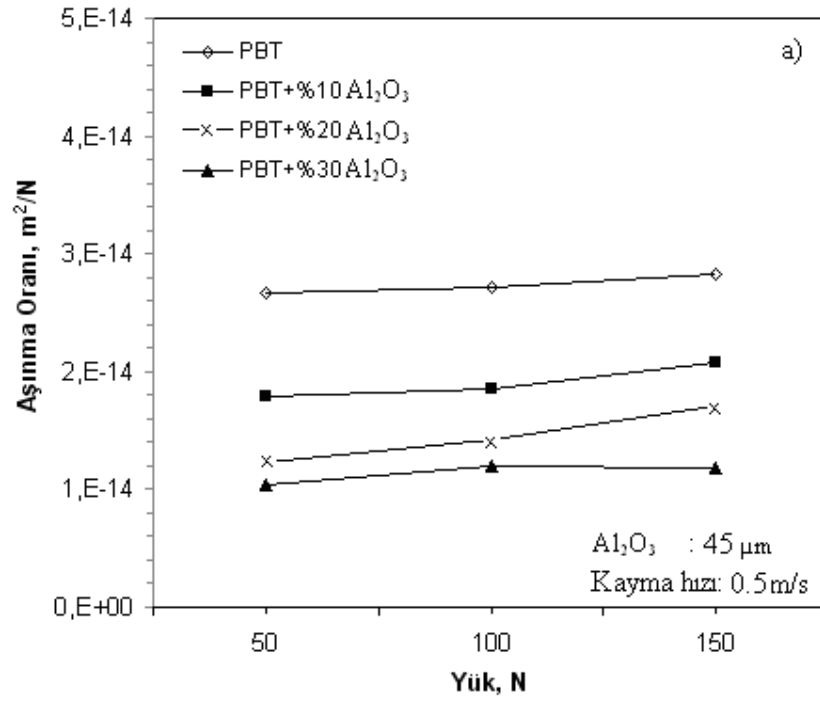
PBT ve kompozitlerinin 1,0 m/s kayma hızı altında uygulanan yüke göre aşınma oranlarındaki değişim Şekil 7.14 (b)'de verilmiştir. Genel olarak, katkısız PBT polimeri için aşınma oranı 10^{-14} m²/N değerlerinde elde edilirken, kompozitlerinde aynı şekilde aşınma oranı 10^{-14} m²/N değerlerinde elde edilmiştir. Uygulanan yük aralıklarında en yüksek aşınma oranı 150N yük altında 3.8×10^{-14} m²/N değeri ile katkısız PBT polimerinde, en düşük aşınma oranı ise 50N yük altında 2.2×10^{-15} m²/N değeri ile PBT+%30Al₂O₃ katkılı kompozitinde elde edilmiştir. 1,0m/s kayma hızı ve 150N yük altında, PBT+%30Al₂O₃ katkılı kompozitin aşınma oranı katkısız PBT polimerine göre %58 daha düşüktür. Uygulanan yükün %200 artması ile katkısız PBT ve kompozitlerinin her ikisinde de aşınma oranı değerleri benzer şekilde değişim 50 N yük altındaki aşınma oranı kaybı diğer yüklere göre daha az olduğu görülmüştür.



Şekil 7.14. Al₂O₃ katkı (10 μm) PBT kompozitlerin aşınma oranı-yük ilişkisi, kayma hızı: a) 0.5m/s, b) 1.0m/s

Şekil 7.15 (a) ve (b)'de katkısız PBT ve 45 µm partikül boyutuna sahip PBT kompozitlerinin 0,5 ve 1.0 m/s kayma hızları altında uygulanan yüke göre aşınma oranı değişimleri verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi yük miktarları 50N'dan 150N'a çıkarıldığında aşınma oranı lineer bir şekilde artmıştır. En az aşınma oranına sahip malzeme ise %30Al₂O₃ katkılı kompozit malzemesidir. Aşınma oranlarını küçükten büyüğe doğru PBT+%30 Al₂O₃ < PBT+%20 Al₂O₃ < PBT+%10 Al₂O₃ < katkısız PBT olarak sıralanabilir. Uygulanan yük aralıklarında en yüksek aşınma oranı 150N yük altında 2.8x10⁻¹⁴ m²/N değeri ile katkısız PBT polimerinde, en düşük aşınma oranı ise 50N yük altında 1.4x10⁻¹⁴ m²/N değeri ile PBT+%30 Al₂O₃ katkılı kompozitte elde edilmiştir. 0,5m/s kayma hızı ve 100N yük altında, PBT+%30Al₂O₃ katkılı kompozitin aşınma oranı katkısız PBT polimerine göre %55 daha düşüktür.

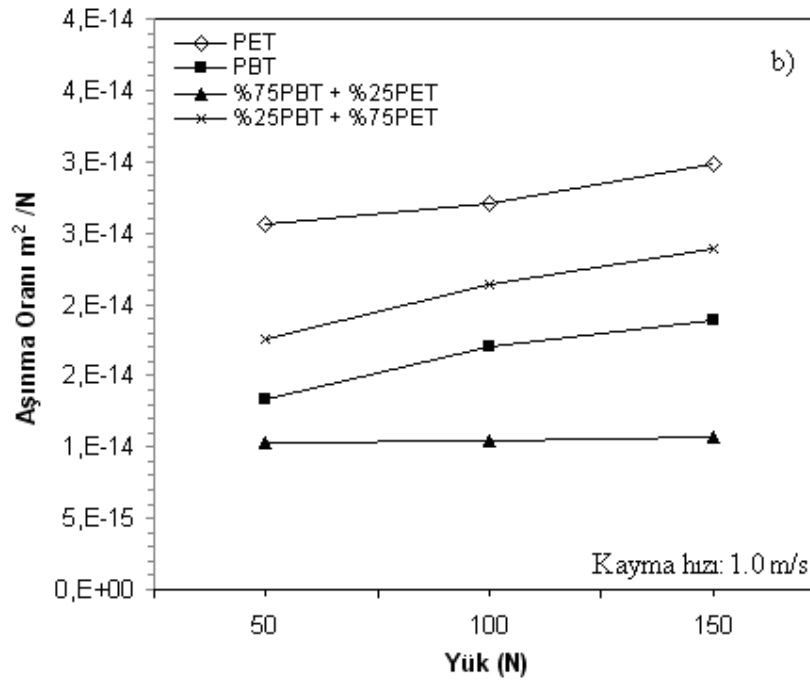
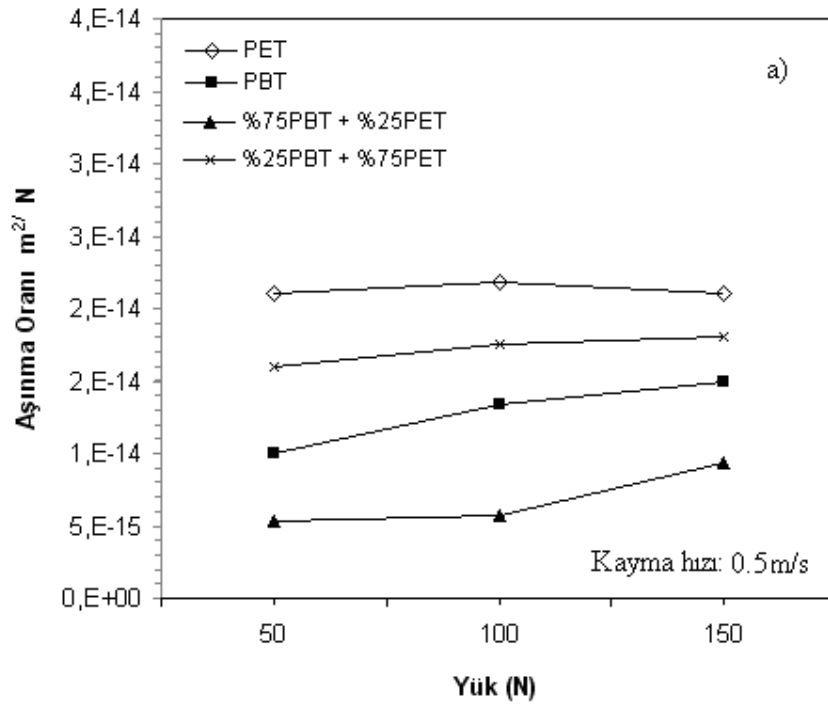
PBT ve kompozitlerinin 1,0 m/s kayma hızı altında uygulanan yüke göre aşınma oranlarındaki değişim Şekil 7.15 (b)'de verilmiştir. Uygulanan yük 100N'dan 150N'a çıkartıldığında en fazla aşınma oranı artışı %10Al₂O₃ katkılı kompozitinde olduğu tespit edilmiştir. Şekil incelendiğinde malzeme içerisine katkı oranının miktarı arttırıldığında aşınma oranında bir düşüş tespit edilmiştir. Katkı oranının artması ile kompozit malzemenin sertliği artmakta, dolayısıyla aşınma direnci artmaktadır. Elde edilen veriler literatür ile uyuşmaktadır [5,11]. Fakat yük miktarı arttırıldığında ise aşınma oranında bir yükselme olduğu tespit edilmiştir. Uygulanan yük aralıklarında en yüksek aşınma oranı 150N yük altında 3.3x10⁻¹⁴ m²/N değeri ile katkısız PBT polimerinde, en düşük aşınma oranı ise 50N yük altında 1.0x10⁻¹⁴ m²/N değeri ile PET+%30Al₂O₃ katkılı kompozitinde elde edilmiştir. 1,0m/s kayma hızı ve 150N yük altında, PBT +%30Al₂O₃ katkılı kompozitin aşınma oranı katkısız PBT polimerine göre %58 daha düşüktür.



Şekil 7.15. Al_2O_3 katkılı (45 μm) PBT kompozitlerin aşınma oranı-yük ilişkisi, kayma hızı: a) 0.5m/s, b) 1.0m/s

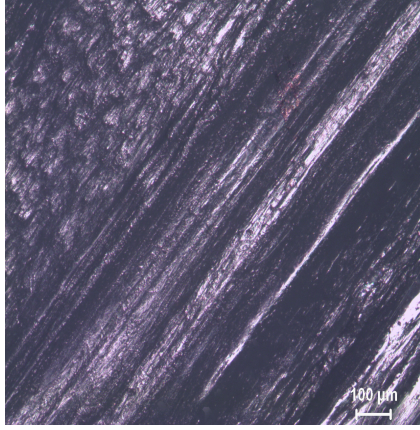
7.4.3. PET/PBT kompozitlerin aşınma oranı -yük ilişkisi

Şekil 7.16 (a) ve (b)'de katkısız PBT, PET kompozitlerinin 0,5 ve 1.0m/s kayma hızları altında uygulanan yüke göre aşınma oranı değişimleri verilmiştir. Her iki kayma hızında da artan yük miktarı ile aşınma oranı artmıştır. 0.5 m/s kayma hızında, en yüksekten en düşüğe aşınma oranı değerleri; PET >%75 PET %25 PBT > PBT>%75 PBT %25 PET olarak tespit edilmiştir. PBT ile PET kompozitlerinin aşınma oranı değerleri katkısız PBT veya katkısız PET polimerlerine göre daha olduğu belirlenmiştir. 1,0m/s kayma hızı ve 150N yük altında, en yüksek sürtünme katsayısı değeri PET kompozitinde, en düşük sürtünme katsayısı değeri ise %75 PBT/ %25 PET tespit edilmiştir. Aşınma oranı ile sürtünme katsayısı değerleri rakamsal olarak Ek-A'da verilmiştir.

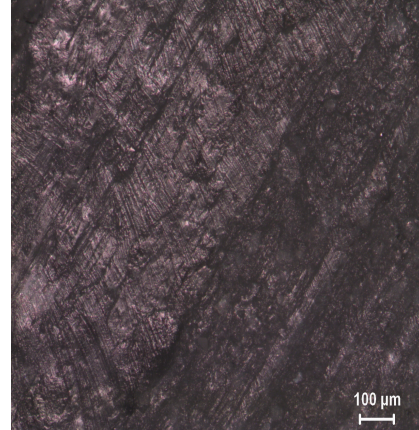


Şekil 7.16. Katkısız PBT ve PET kompozitlerinin aşınma oranı-yük ilişkisi, kayma hızı: a) 0.5m/s, b) 1.0m/s

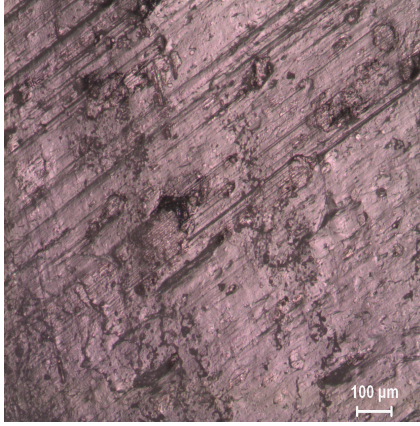
7.5. PET Polimerinin Aşınma Yüzeyi Mikroyapılarının İncelenmesi



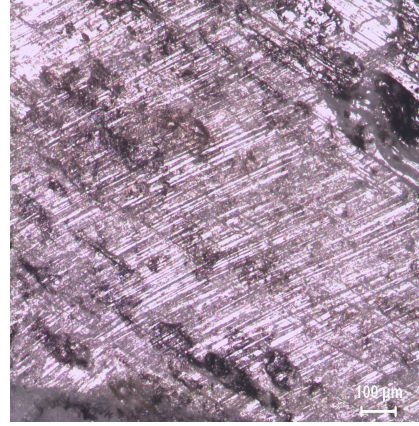
a) Katkısız PET



b) PET+%10 Al₂O₃



c) PET+%20 Al₂O₃



d) PET+%30 Al₂O₃

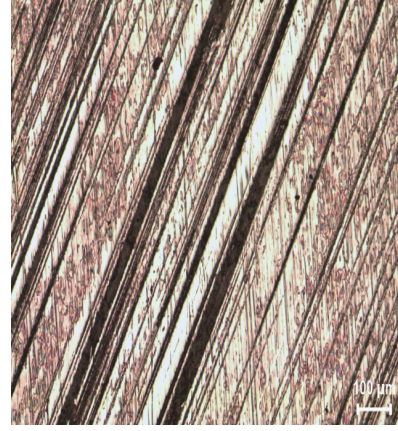
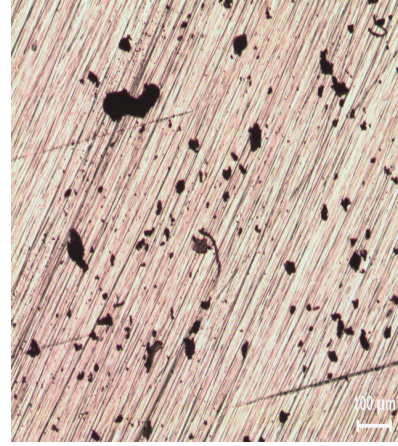
Şekil 7.17. Katkısız PET ve PET kompozit pim malzemelerinin optik mikroskop aşınma yüzey görüntüleri (Partikül boyutu: 45µm, Kayma hızı:0.5m/s, Uygulanan yük:100N)

Şekil 7.17’de katkısız PET ve PET kompozitlerin 100N yükte ve 0,5m/s kayma hızında optik mikroskopta pim aşınma yüzey görüntüleri verilmiştir. Katkısız PET polimeri en fazla aşınma oranına sahip polimerdir. Bu durum Şekil 7.17 (a)’da görüldüğü gibi malzeme yüzeyinde oluşan mikro kazıma izlerinin diğer kompozit malzemelere göre daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Katkısız PET polimerinin aşınma sırasında çelik disk üzerinde oluşturduğu film tabakasının düşük oranda olmasından dolayı, daha yüksek aşınma oranı meydana gelmiştir. Malzeme yüzeyinde en az miktarda oluşan mikro kazıma izleri ise PET+%30 Al₂O₃ kompozitte görülmüştür. Bunu sebebi ise polimerik malzemelerin sürtünme ve aşınma özelliklerini iyileştirmek için malzemelerin yapışma özelliğini azaltmak gerekir. Bu nedenden dolayı malzemeye katılan katkı malzemesi ile polimerin sertlik özelliğinin artması sonucunda mikro aşınma izleri en az oranda görülmüştür.

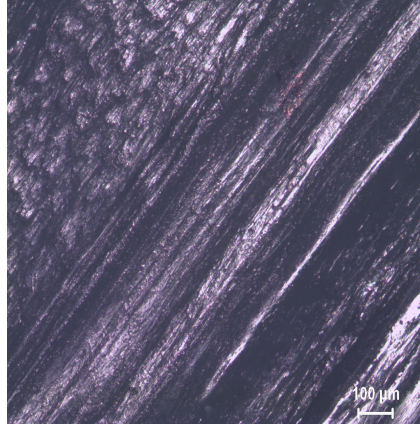
Şekil 7.18’de katkısız PET ve PET kompozit disk malzemelerinin 100N yükte ve 0,5 m/s kayma hızında optik mikroskopta çekilen aşınma yüzey görüntüleri görülmektedir. Şekil 7.18 (a) incelendiğinde katkısız PET polimerin aşınma deney sonucunda disk malzemesi üzerindeki transfer film tabakası tespit edilmiştir. Aşınma sırasında disk üzerinde oluşan transfer film tabakası veya yapışmalar en az PET+%30Al₂O₃ disk yüzeyinde görülmüştür. Aşınmış polimer parçacıklarının disk üzerinde en fazla bir araya toplanmış olduğu malzeme katkısız PET polimerdir. Al₂O₃ takviyeli PET kompozitlerin deneyleri sonucunda disk yüzeyleri incelendiğinde en düşük aşınma miktarı ile en fazla sürtünme katsayısı değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebi olarak ise çelik yüzeye karşı Al₂O₃ katkının abrasiv etki yapmış olabileceği şeklinde ifade edilebilir.



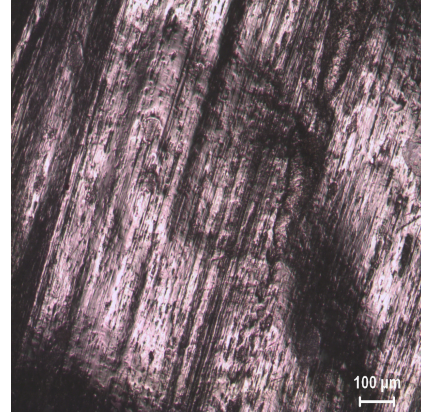
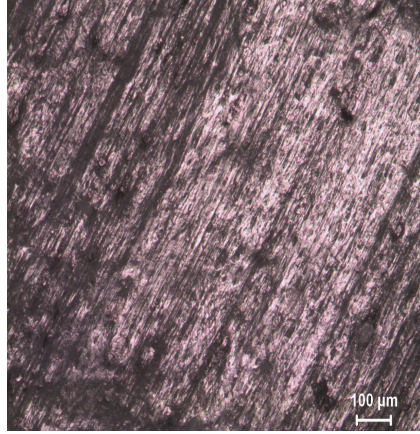
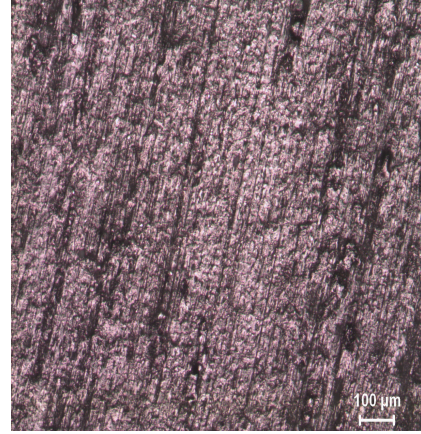
a) Katkısız PET

b) PET+%10 Al₂O₃c) PET+%20 Al₂O₃d) PET+%30 Al₂O₃

Şekil 7.18. Katkısız PET ve PET kompozit disk malzemelerinin optik mikroskop aşınma yüzey görüntüleri (Partikül boyutu: 45µm, Kayma hızı:0.5m/s, Uygulanan yük:100N)



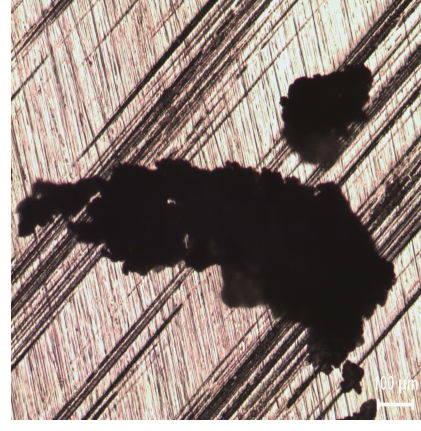
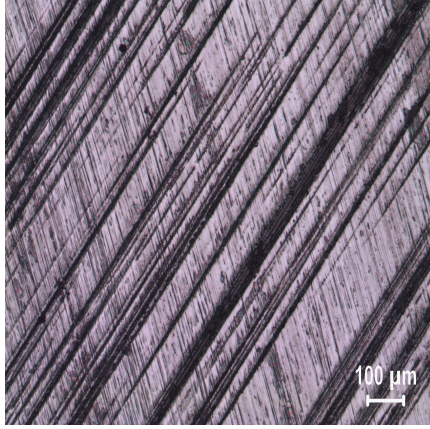
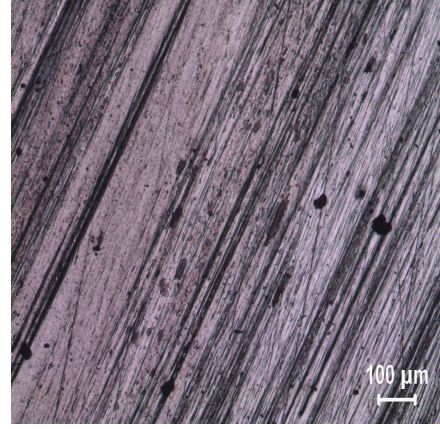
a) Katkısız PET

b) PET+%10 Al₂O₃c) PET+%20 Al₂O₃d) PET+%30 Al₂O₃

Şekil 7.19. Katkısız PET ve PET kompozit pim malzemelerinin optik mikroskop aşınma yüzey görüntüleri (Partikül boyutu: 10µm, Kayma hızı:0.5m/s, Uygulanan yük:100N)



a) Katkısız PET

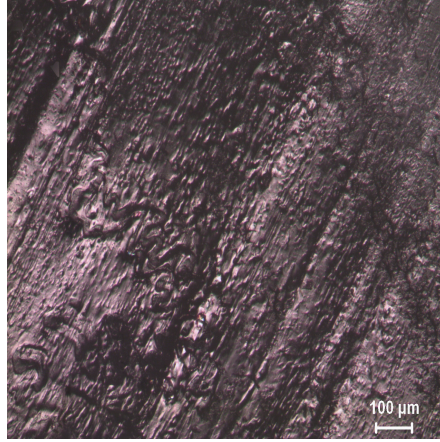
b) PET+%10 Al₂O₃c) PET+%20 Al₂O₃d) PET+%30 Al₂O₃

Şekil 7.20. Katkısız PET ve PET kompozit disk malzemelerinin optik mikroskop aşınma yüzey görüntüleri (Partikül boyutu: 10μm, Kayma hızı:0.5m/s, Uygulanan yük:100N)

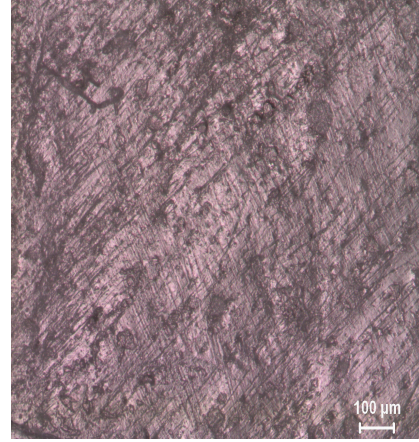
Şekil 7.19’de katkısız PET ve PET kompozit numunelerin 100N yükte ve 0,5 m/s kayma hızında optik mikroskopta elde edilen pim aşınma yüzey görüntüleri görülmektedir. Optik mikroskopta pim yüzeyindeki aşınma yüzey çizgi görüntüleri birbirine paralel, geniş ve boydan boya olduğu tespit edilmiştir. Aşınma çizgi görüntüleri genişten daraya doğru sıralayacak olursak şöyle yapabiliriz: katkısız PET > PET+%10Al₂O₃ >PET+%20Al₂O₃ > PET+%30 Al₂O₃ şeklindedir. Uygulanan 100N yükte, Şekil 7.19 (d)’de pim malzemelerden PET+%30 Al₂O₃ kompozit malzemesinin aşınmaya karşı daha dirençli olduğu aşınma izlerinin daha az olmasından anlaşılabilmektedir. Bunu sebebi ise %30Al₂O₃ takviyeli PET polimerinin sertlik ve tokluk değerlerinin yüksek olmasından dolayı olabilir.

Şekil 7.20’de katkısız PET ve PET kompozit disk malzemelerinin 100N yükte ve 0,5 m/s kayma hızında optik mikroskopta aşınma yüzey görüntüleri görülmektedir. Aşınma deneyi sonucunda kopan polimer veya Al₂O₃ parçacıklarının bulunduğu disk malzemesinin aşınma yüzey görüntüleri Şekil 7.20 (a), (b), (c), (d)’de gösterilmiştir. Malzeme ara yüzeyinden kopan matrisin veya Al₂O₃’ nın aşınma sırasında oluşan parçacıkların disk malzemesi üzerinde toplandığı tespit edilmiştir. Burada Al₂O₃ katkının aşınma deneyi sırasında önemli etkisi olduğu söylenebilir. PET+%20Al₂O₃ ve PET+%30Al₂O₃ polimerlerde transfer film tabakası, disk malzemenin ara pürüzlü boşluklarını doldurduğu ve kopan polimer parçacıkların ise malzeme yüzeyinde katkısız PET ve PET+%10Al₂O₃ katkılı disk görüntülerindeki gibi topak film tabakası halinde toplanmadığı tespit edilmiştir. Bunun sebebi olarak, Al₂O₃ partiküllerinin disk malzemesi yüzeyinde toplanan polimer parçacıklarını kazıması sonucunda disk yüzeyinde film tabakasının oluşmasını önlemesi olarak ifade edilebilir.

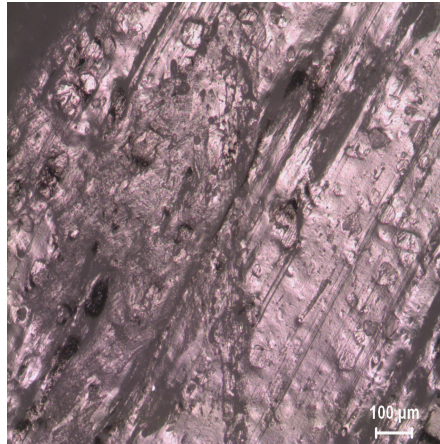
7.6. PBT Polimerinin Mikroyapı İncelemesi



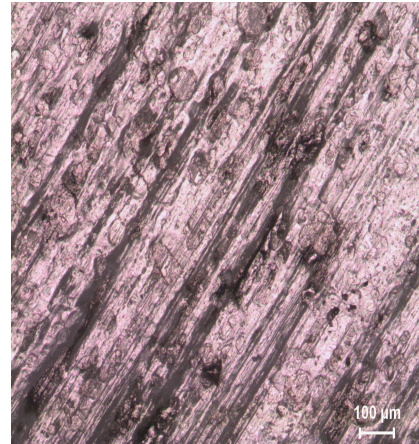
a) Katkısız PBT



b) PBT+%10 Al₂O₃

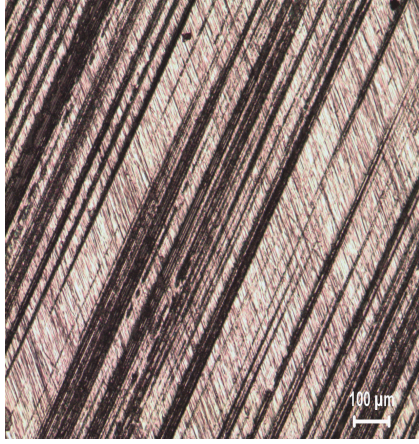


c) PBT+%20 Al₂O₃

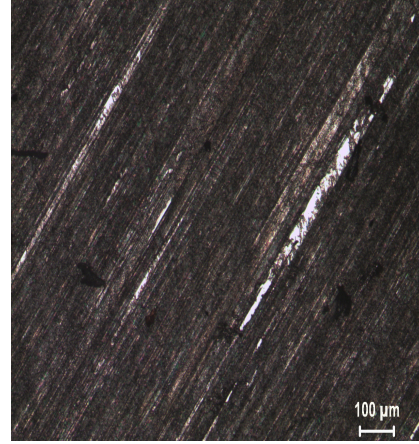
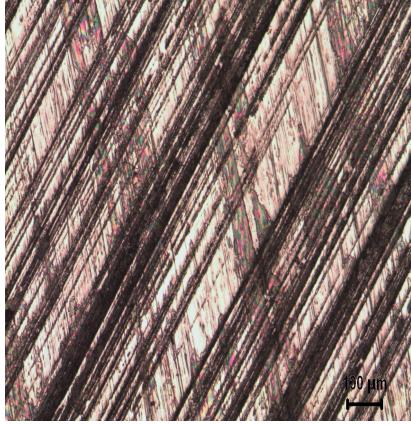
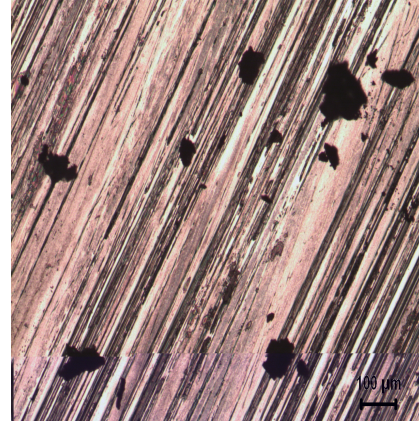


d) PBT+%30 Al₂O₃

Şekil 7.21. Katkısız PBT ve PBT kompozit pim malzemelerinin optik mikroskop aşınma yüzey görüntüleri (Partikül boyutu: 45µm, Kayma hızı:0.5m/s, Uygulanan yük:100N)



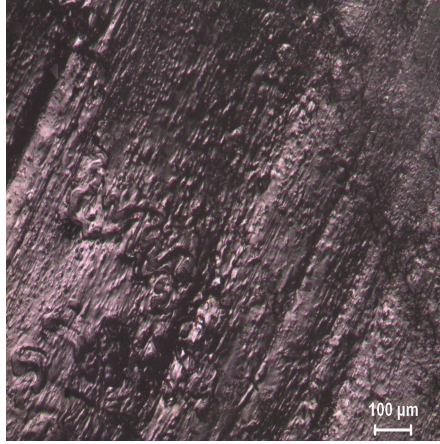
a) Katkısız PBT

b) PBT+%10 Al₂O₃c) PBT+%20 Al₂O₃d) PBT+%30 Al₂O₃

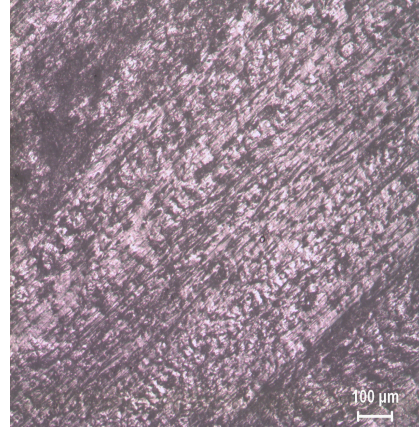
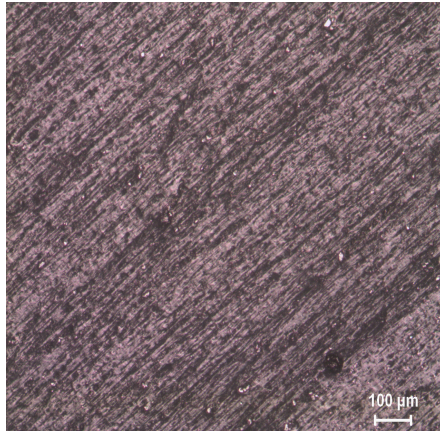
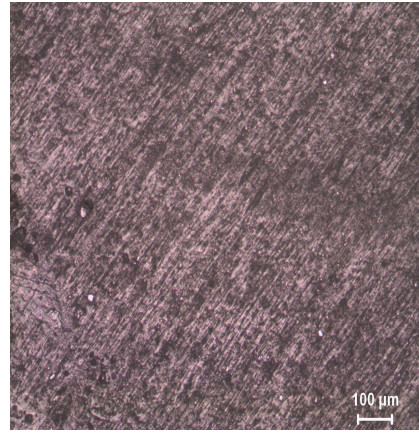
Şekil 7.22. Katkısız PBT ve PBT kompozit disk malzemelerinin optik mikroskop aşınma yüzey görüntüleri (Partikül boyutu: 45µm, Kayma hızı:0.5m/s, Uygulanan yük:100N)

Şekil 7.21’de katkısız PBT ve PBT kompozit numunelerin 100N yükte ve 0,5 m/s kayma hızında optik mikroskopta pim aşınma yüzey görüntüleri görülmektedir. Şekil incelendiğinde katkısız PBT polimerinin pim malzemesi üzerindeki aşınma çizgileri kompozit malzemelere göre daha fazla olduğu görülmektedir. Fakat Şekil 7.21’e bakıldığında Al_2O_3 katkı malzemesinin polimer içerisindeki oranını artması sonucunda pim malzeme yüzeyinde çizgi derinliklerinin ve boyutlarının arttığı görülmüştür. En fazla aşınma çizgisine sahip olan PBT+%30 Al_2O_3 kompozit malzemedir.

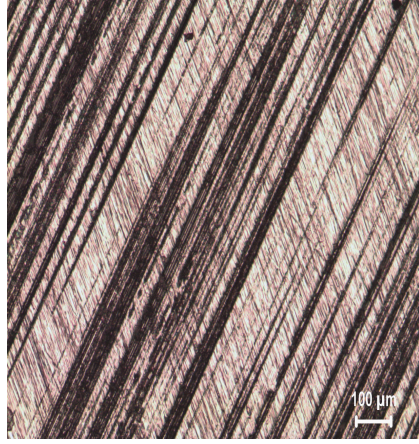
Şekil 7.22’de katkısız PBT ve PBT kompozit disk malzemelerinin 100N yükte ve 0,5 m/s kayma hızında optik mikroskoptaki aşınma yüzey görüntüleri görülmektedir. Disk malzemesi yüzeyinde en fazla transfer film tabakasının Şekil 7.22 (b) ’de (PBT+%10 Al_2O_3) olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebi deneyin yapılış sırasında disk malzeme ısısının artması sonucunda polimer malzemesi erimesi ile disk malzeme yüzeyinde film tabakası oluşumuna neden olmuştur. Disk yüzeyinde fazla derin ve geniş olmayan transfer film tabakası şekil 7.22 (d) ’de olduğu görülmektedir. Disk yüzeyinde aşınma sırasında malzemeden kopan parçacıklar olduğu görülmüştür. Transfer film tabakası düzenli olmayıp, yer yer çizgiler halinde olduğu görülmektedir. Bu özelliğinden dolayı en az PBT+%30 Al_2O_3 malzemesinin aşınma oranı diğerlerine göre daha düşük miktarda olduğu belirlenmiştir. Transfer film tabakasının az olmasının sebebi aşınma sırasında kırılıp veya kopan Al_2O_3 ’ nın disk yüzeyinde bulunması sonucunda transfer film tabakasının oluşmasını engellemiştir.



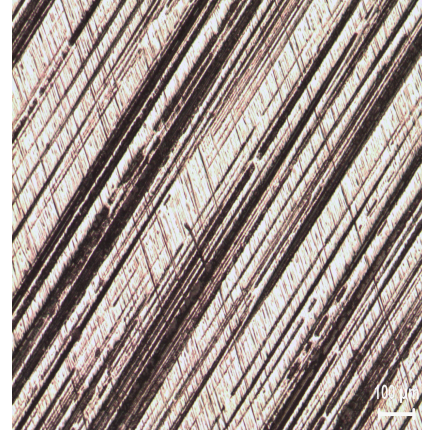
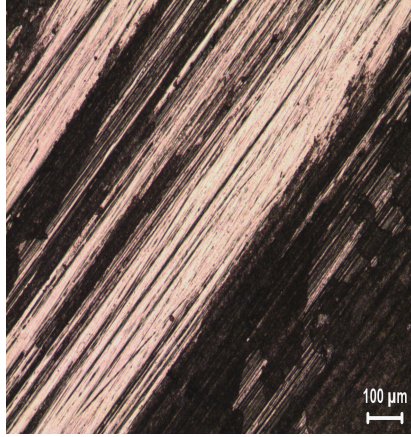
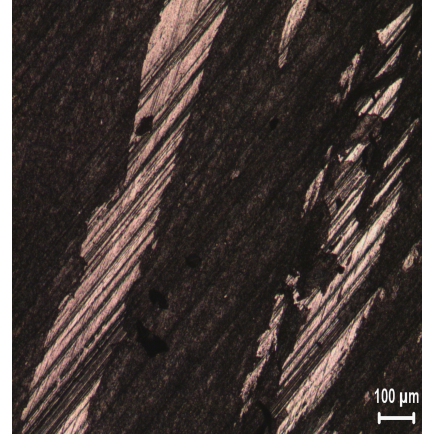
a) Katkısız PBT

b) PBT+%10 Al₂O₃c) PBT+%20 Al₂O₃d) PBT+%30 Al₂O₃

Şekil 7.23 Katkısız PBT ve PBT kompozit pim malzemelerinin optik mikroskop aşınma yüzey görüntüleri (Partikül boyutu: 10µm, Kayma hızı:0.5m/s, Uygulanan yük:100N)



a) Katkısız PBT

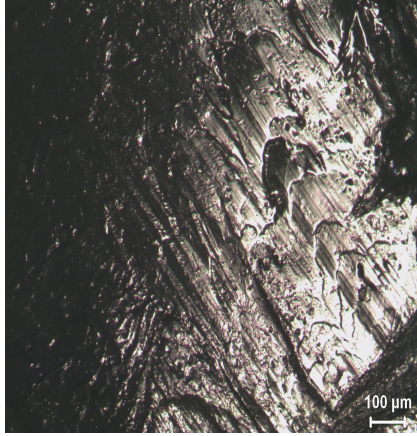
b) PBT+%10 Al₂O₃c) PBT+%20 Al₂O₃d) PBT+%30 Al₂O₃

Şekil 7.24. Katkısız PBT ve PBT kompozit disk malzemelerinin optik mikroskop aşınma yüzey görüntüleri (Partikül boyutu: 10µm, Kayma hızı:0.5m/s, Uygulanan yük:100N)

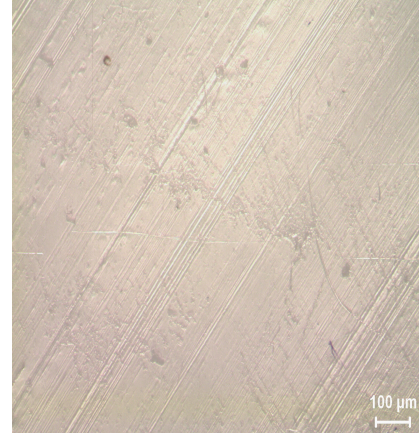
Şekil 7.23’de katkısız PBT ve PBT kompozit numunelerinin 100N yükte ve 0,5 m/s kayma hızında optik mikroskopta pim aşınma yüzey görüntüleri görülmektedir. Yüzey görüntüleri incelendiğinde katkısız PBT polimerinin pim malzemesi üzerindeki aşınma çizgileri kompozit malzemelere göre daha fazla olduğu görülmektedir. Fakat şekil 7.23’de baktığımızda Al_2O_3 katkı malzemesinin oranını artması sonucunda pim malzeme yüzeyinde çizgi derinlikleri ve boyutları azaldığı ve sıklaştığı tespit edilmiştir. Kompozit malzemelerden en fazla aşınma çizgisine sahip PBT+%10 Al_2O_3 kompozit malzemesidir. 10 μ m partikül boyutuna sahip kompozit malzemelerin pim aşınma çizgi görüntüleri daha derin olmamasının sebebi (45 μ m partikül boyutuna sahip kompozit malzemeler göre) daha küçük partikül boyutu ve Al_2O_3 ‘nın polimer malzeme yüzeyinden kopmamasının sonucu olabilir.

Şekil 7.24’de katkısız PBT ve PBT kompozit disk malzemelerinin 100N yükte ve 0,5 m/s kayma hızında optik mikroskoptaki aşınma yüzey görüntüleri görülmektedir. Disk malzemesi yüzeyinde en fazla transfer film tabakası şekil 7.24 (d) ’de (PBT+%10 Al_2O_3) olduğu tespit edilmiştir. Deney sırasında transfer film tabakası sürekli artmış ve geniş bir transfer film tabakası halini aldığı tespit edilmiştir. Disk yüzeyinde gerçekleşen yapışma malzemenin viskoelastik olduğunu belirtmektedir. Polimerlerin viskoelastik özelliği malzemelerin camsı geçiş sıcaklık değerlerinin üzerindeki sıcaklıklarda oluşmaktadır. Sonuç olarak disk malzeme üzerinde transfer film tabakası oluşmaktadır. Disk yüzeyinde derin ve geniş olmayan transfer film tabakası ise Şekil 7.24 (a) ’da olduğu görülmektedir Transfer film tabakası düzenli olmayıp, yer yer çizgiler halinde olduğu görülmektedir.

7.7. PET/PBT Kompozitlerin Mikroyapı İncelemesi

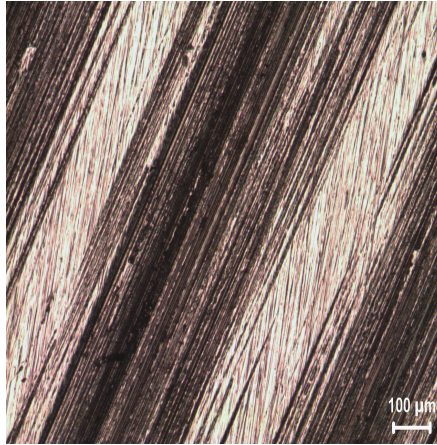


a) Katkısız %25PBT -%75PET

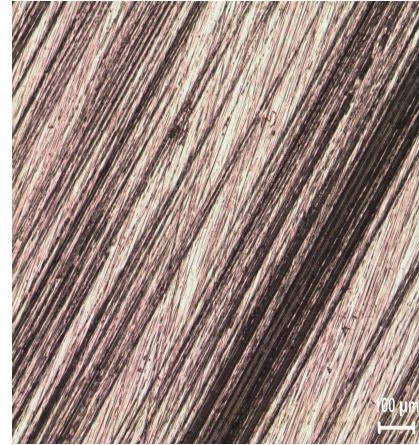


b) Katkısız %25PET -%75PBT

Şekil 7.25 Katkısız PET/ PBT karışım pim malzemelerinin optik mikroskop aşınma yüzey görüntüleri (Kayma hızı:0.5m/s, Uygulanan yük:100N)



a) Katkısız %25PBT -%75PET



b) Katkısız %25PET -%75PBT

Şekil 7.26 Katkısız PET/ PBT karışım disk malzemelerinin optik mikroskop aşınma yüzey görüntüleri (Kayma hızı:0.5m/s, Uygulanan yük:100N)

Şekil 7.25’de katkısız PET/ PBT karışım numunelerin 100N yükte ve 0,5 m/s kayma hızında optik mikroskopta pim aşınma yüzey görüntüleri görülmektedir. Karışım pim malzemeler içerisinde aşınma çizgisi en fazla olan malzeme katkısız %25PBT /%75PET polimer malzemesinde olduğu tespit edilmiştir. Katkısız %25PET

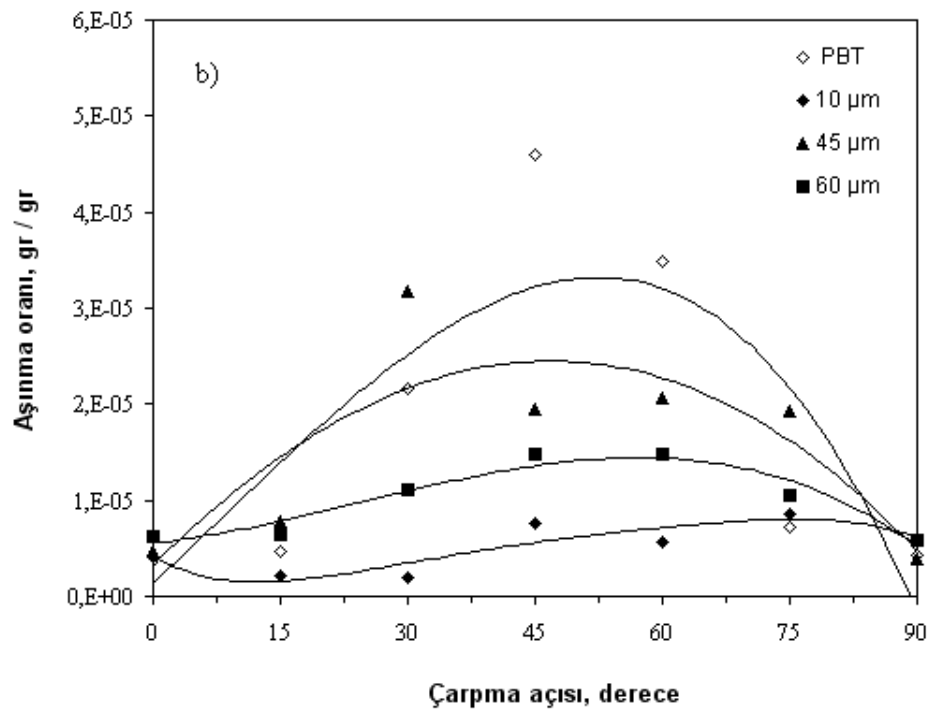
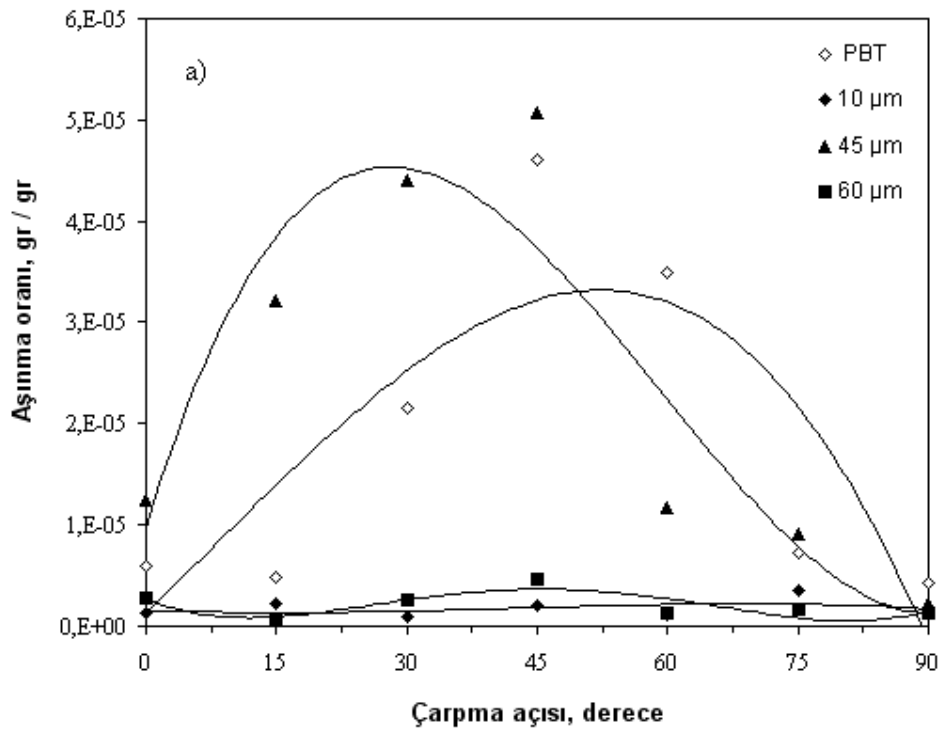
/%75PBT polimer malzemesinin aşınma çizgileri diğerine göre daha az ve ince bir çizgi şeklinde olduğu görülmüştür. Karışım malzemelerin içerisinde %75PBT oranının oluşması elde edilen malzemeye mukavemet sonuçları açısından olumlu bir değer kattığından pim malzemesi üzerinde aşınma çizgileri diğerine göre daha az oranda oluşmuştur.

Şekil 7.26'da katkısız PET/ PBT karışım disk malzemelerinin 100N yükte ve 0,5 m/s kayma hızında optik mikroskoptaki aşınma yüzey görüntüleri görülmektedir. Karışımli disk malzemeler içerisinde transfer film tabakası en fazla olan malzeme katkısız %25PBT-%75PET polimer malzemesi olduğu tespit edilmiştir. Katkısız %25PET-%75PBT polimer malzemesinin transfer film tabakası diğerlerine göre daha az ve yer yer çizgiler şeklinde olduğu görülmüştür. % 75 PET oranında elde edilen deney numunelerinin aşınma deneyleri sırasında deney numunesinin aşınma özelliğinin düşük olması ve sürekli temas eden pim malzeme yüzeyinin genişlemesi gözlenmiştir. Buda disk malzeme yüzeyinde film tabakasının yapışmasını ve oluşmasını hızlandırmıştır.

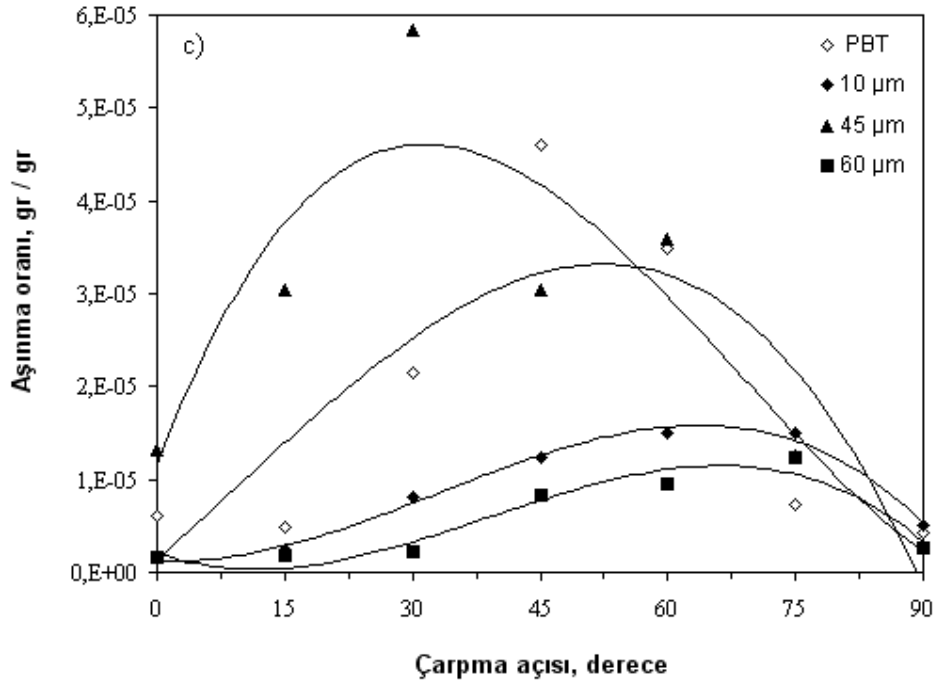
7.8. Erozyon Aşınma Oranı-Çarpma Açısı Sonuçları

7.8.1. PBT kompozitlerin erozyon aşınma oranı-çarpma açısı sonuçları

Şekil. 7.27 (a-c)'de 10, 45 ve 60µm partikül boyutuna sahip Al₂O₃ katkılı PBT kompozitlerin çarpma açısı-aşınma oranı ilişkisi verilmiştir. Grafikler incelendiğinde en fazla aşınmanın katkısız PBT ve 45 µm partikül boyutuna sahip PBT kompozitinde meydana geldiği görülmüştür. 10 µm ve 60 µm partikül boyutlu kompozit numunelerde ise aşınma oranı daha düşük bulunmuştur. PBT ve 45 µm partikül boyutuna sahip PBT kompozitlerde aşınma oranı çarpma açısının daha düşük olduğu 30°'de, 10 µm ve 60 µm partikül boyutlu kompozit numunelerde ise 75°'de olduğu gözlenmiştir. Al₂O₃ katkı oranının artması ile aşınma oranının arttığı görülmüştür. Bu deneyler sonucunda elde edilen veriler incelendiğinde literatür ile benzer sonuçlar elde edilmiştir [23,24].

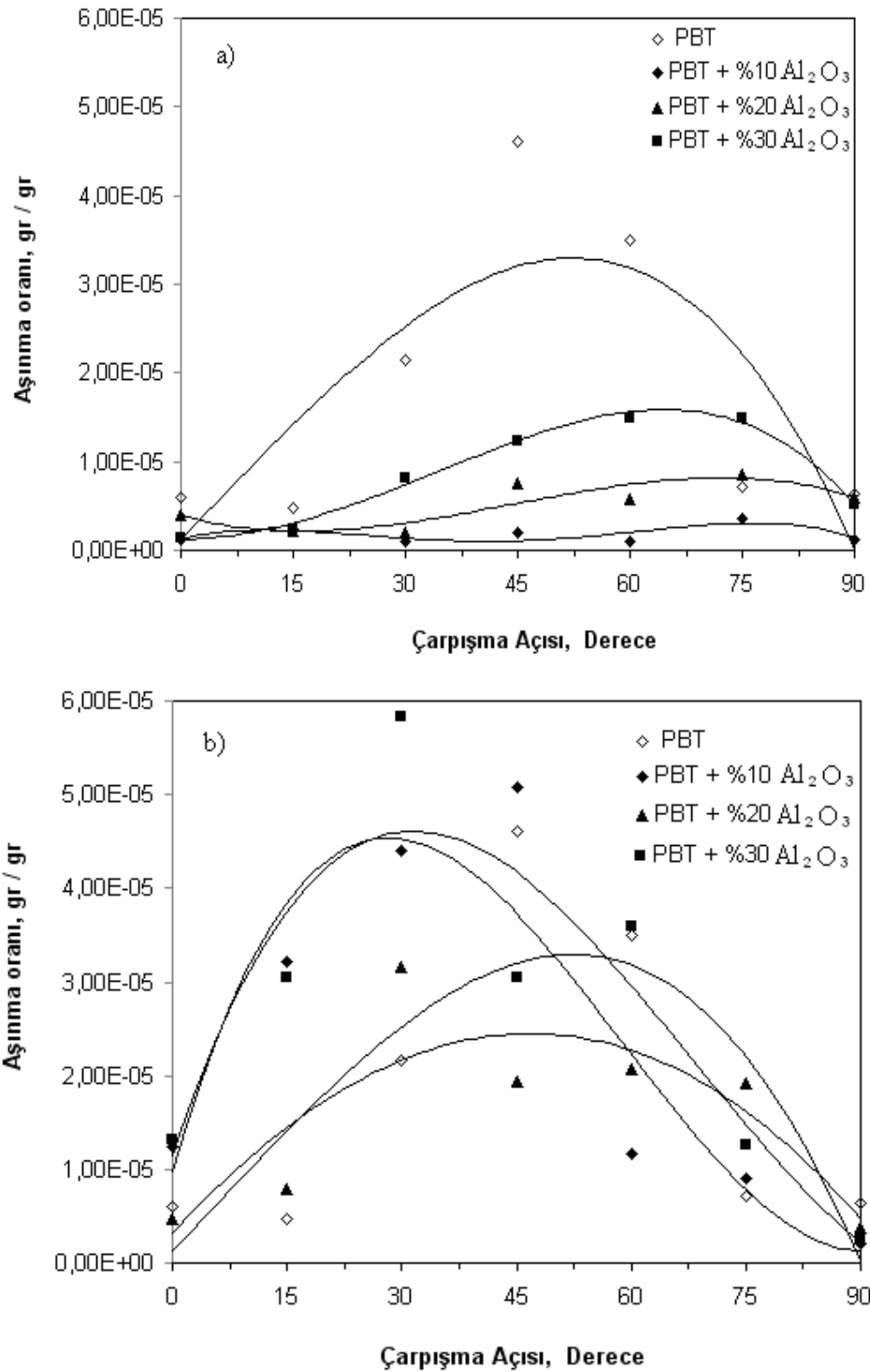


Şekil 7.27. Al₂O₃ katkılı (10 µm, 45 µm, 60µm) PBT kompozitlerin erozyon aşınma oranı-çarpma açısı ilişkisi, a) %10 Al₂O₃, b) %20 Al₂O₃, c) %30 Al₂O₃ (Süre: 30dak.)

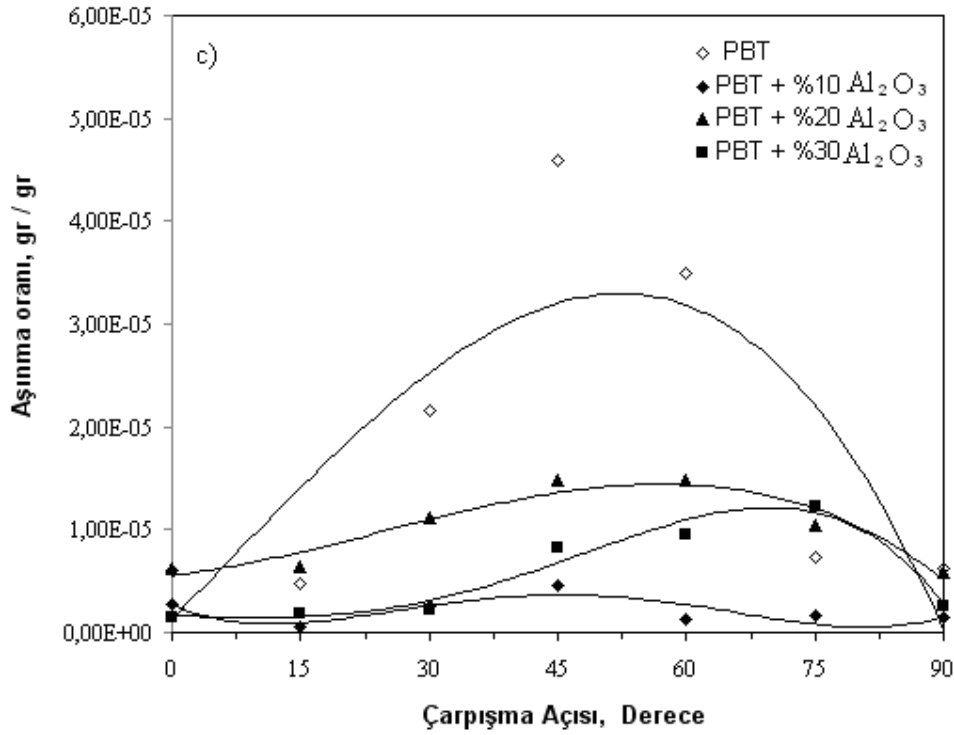


Şekil 7.27. (devamı)

Şekil 7.28 (a-c)'de %10, %20 ve %30 alümina katkılı PBT kompozitlerin çarpma açısı- aşınma oranı ilişkisi verilmiştir. Al_2O_3 katkı oranının artması ile aşınma oranının azaldığı belirlenmiştir. Katkı oranının eklenmesi ile çarpma açısının sağa doğru eğim gösterdiği görülmüştür. En fazla aşınma oranı katkısız PBT numunelerde gözlenirken, en düşük aşınma oranı ise %10 Al_2O_3 katkılı kompozitlerde elde edilmiştir.



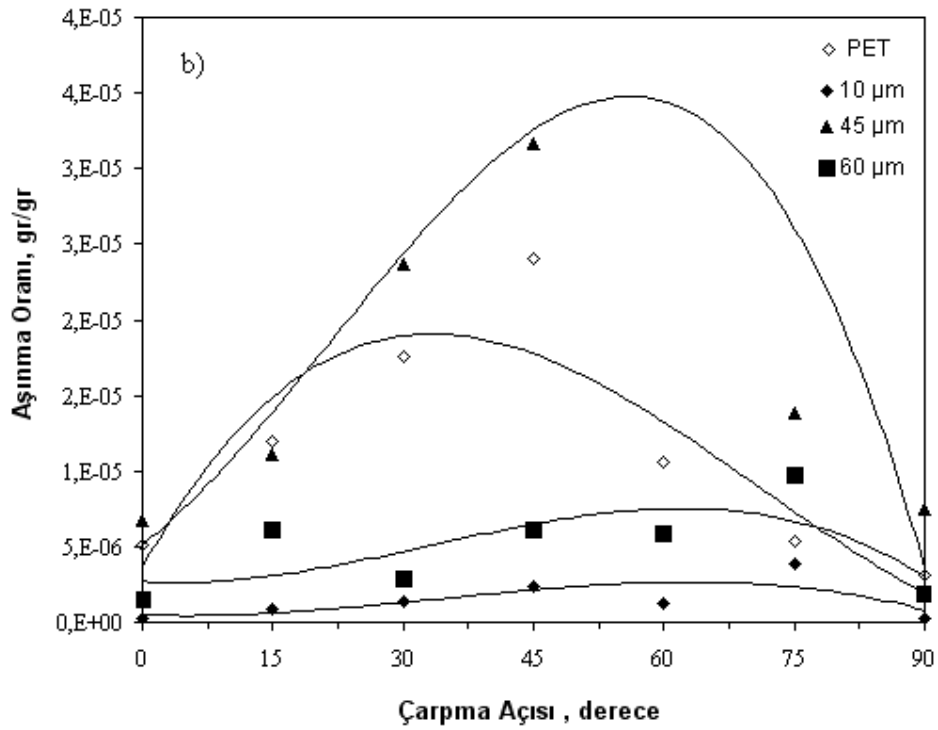
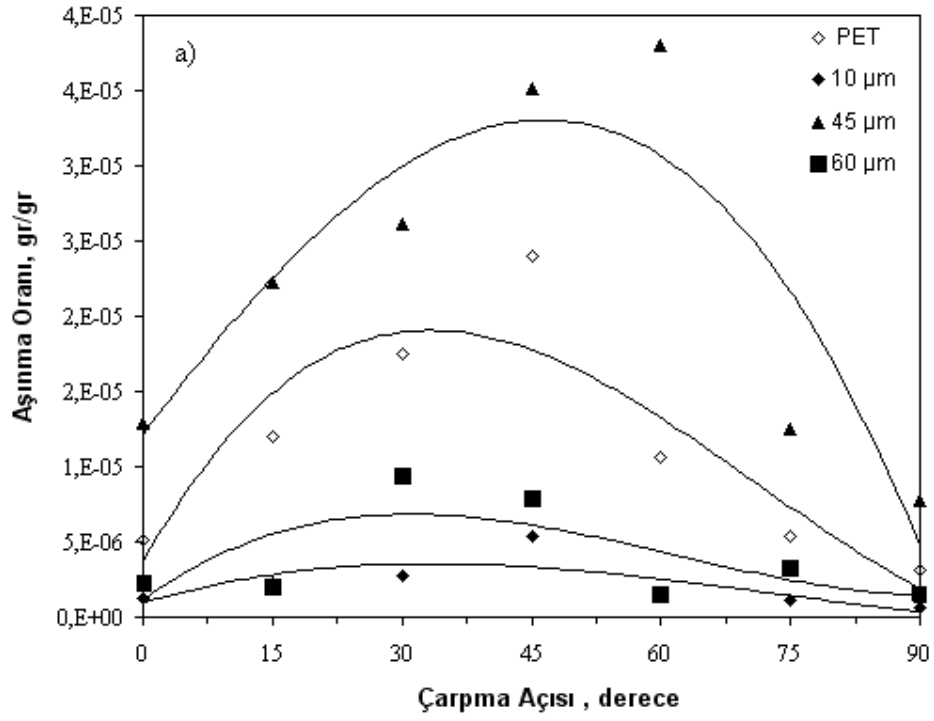
Şekil 7.28. Al₂O₃ katkılı PBT kompozitlerin erozyon aşınma oranı-çarpma açısı ilişkisi, a) 10 µm b) 45 µm c) 60µm (Süre: 30dak.)



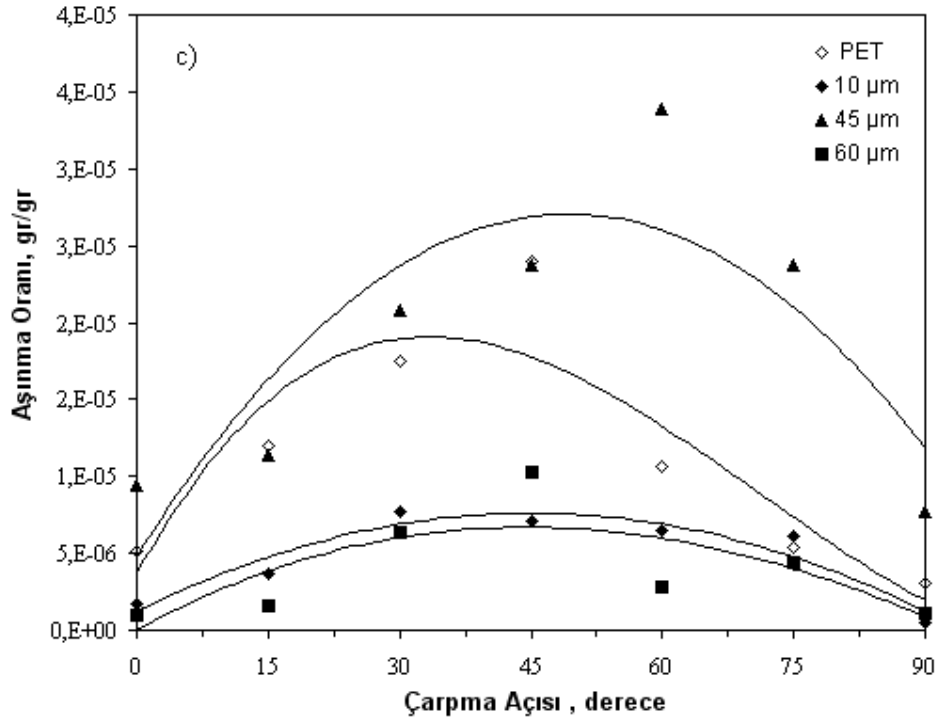
Şekil 7.28. (devamı)

7.8.2. PET kompozitlerin erozyon aşınma oranı-çarpma açısı sonuçları

Şekil 7.29 (a-c)'de 10, 45 ve 60µm partikül boyutuna sahip Al₂O₃ katkıli PET kompozitlerin çarpma açısı-aşınma oranı ilişkisi verilmiştir. Grafikler incelendiğinde en fazla aşınmanın 45 µm partikül boyutuna sahip PET kompozitinde meydana geldiği görülmüştür. 10 µm ve 60 µm partikül boyutlu kompozit numunelerde ise aşınma oranı daha düşük bulunmuştur. PET kompozitlerde aşınma oranı çarpma açısının daha düşük olduğu 30°'de, kompozit numunelerde ise 60° ve 75°'de olduğu gözlenmiştir.

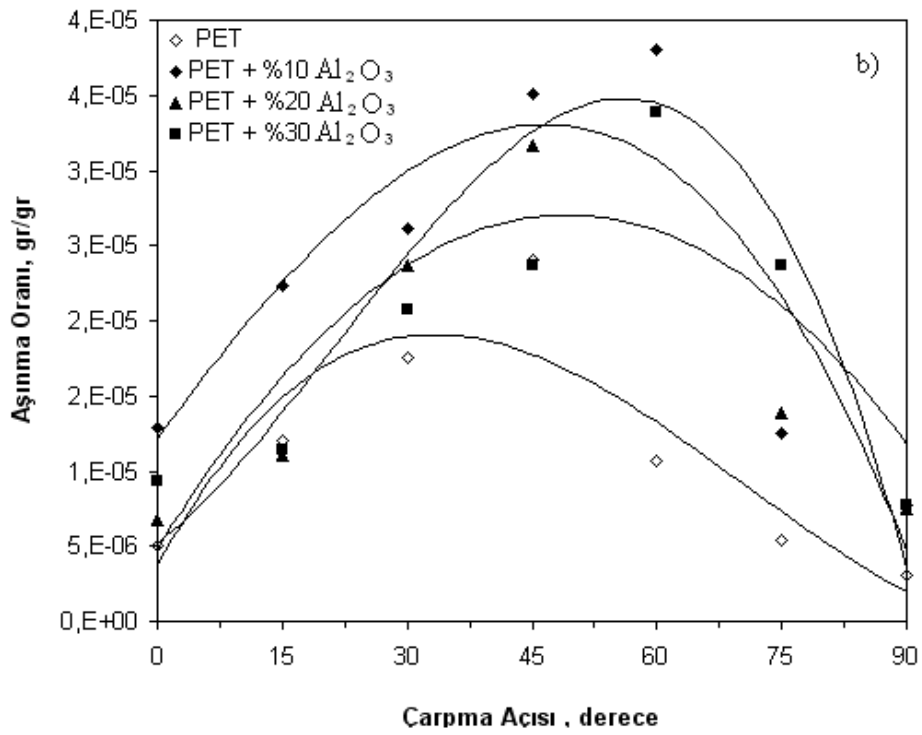
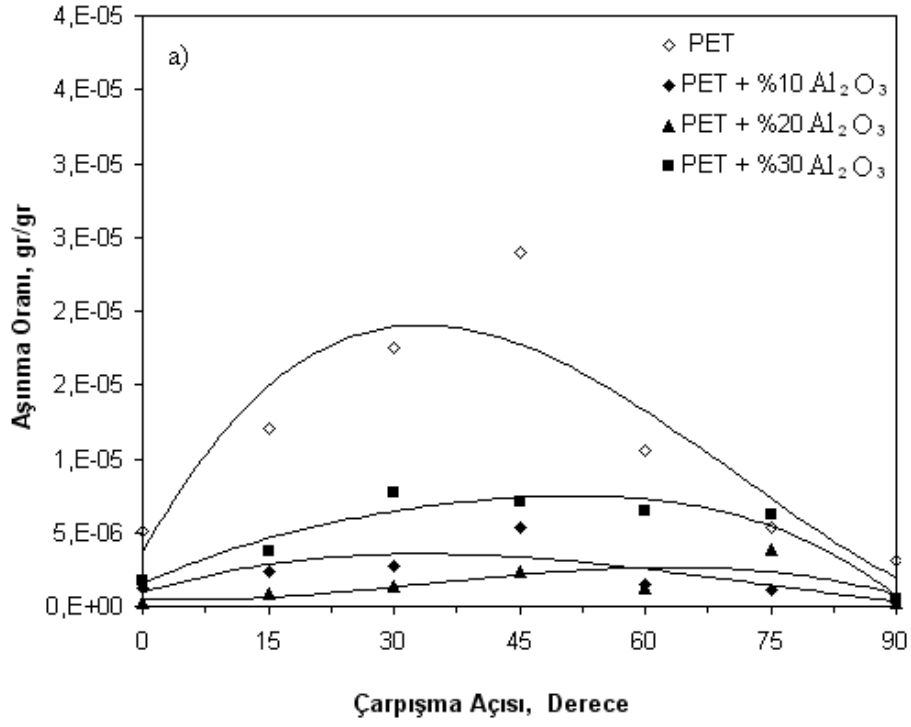


Şekil 7.29. Al₂O₃ katkı (10 µm, 45 µm, 60µm) PET kompozitlerin erozyon aşınma oranı-çarpma açısı ilişkisi, a) %10 Al₂O₃, b) %20 Al₂O₃, c) %30 Al₂O₃ (Süre: 30dak.)

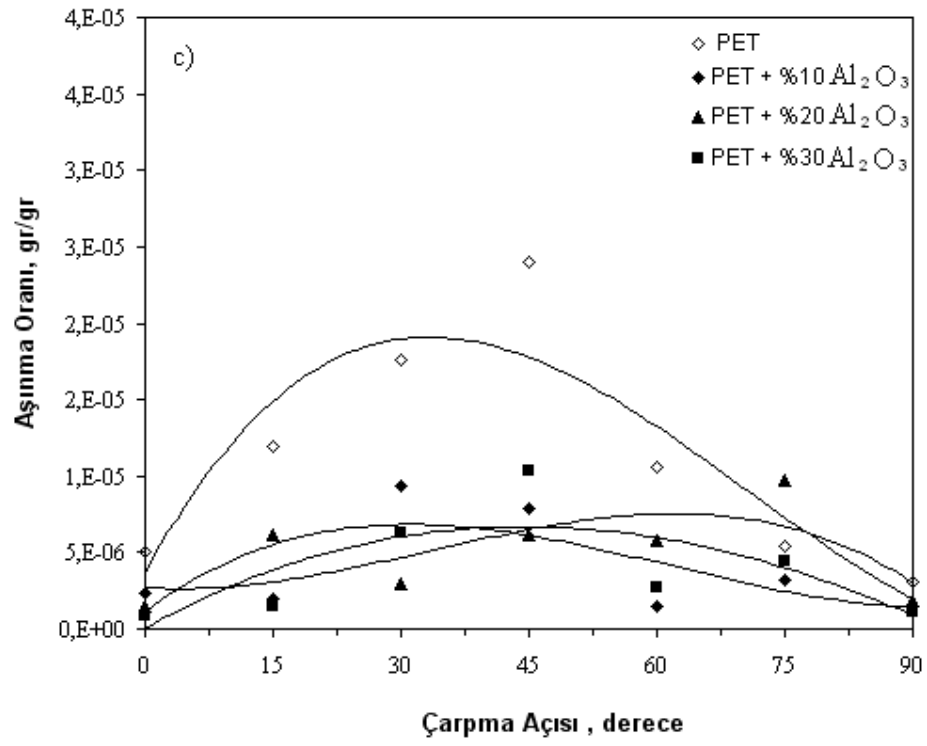


Şekil 7.29. (devamı)

Şekil 7.30 (a-c)'de %10, %20 ve %30 Al_2O_3 katkılı PET kompozitlerin çarpma açısı-aşınma oranı ilişkisi verilmiştir. 10 µm ve 60 µm katkılı numunelerde alümina katkı oranının artması ile aşınma oranının azaldığı, 45 µm katkılı kompozitlerde ise alümina katkı oranının artması ile aşınma miktarının arttığı görülmüştür. Katkısız PET numuneleri düşük çarpma açılarında aşınırken, katkı oranının artması ile çarpma açısının 60° ve 75° olduğu durumlarda daha fazla gözlenmiştir.

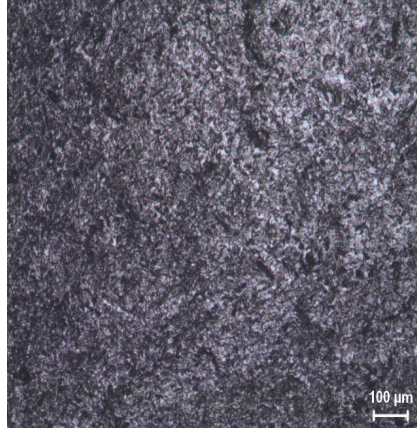


Şekil 7.30. Al₂O₃ katkılı PBT kompozitlerin erozyon aşınma oranı-çarpışma açısı ilişkisi, a) 10 µm b) 45 µm c) 60µm (Süre: 30dak.)

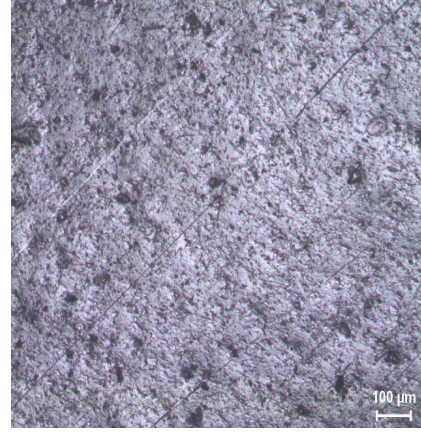


Şekil 7.30. (devamı)

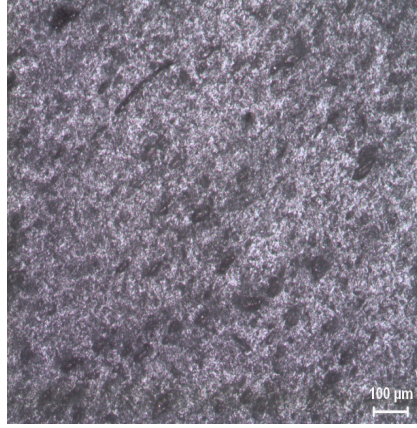
7.9. PBT ve PET Polimerlerinin Mikroyapı İncelenmesi



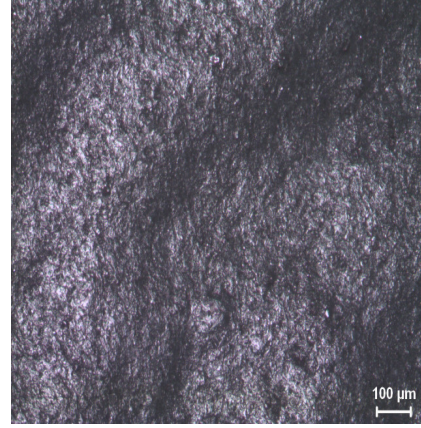
a) Katkısız PET



b) PET+%10 Al₂O₃

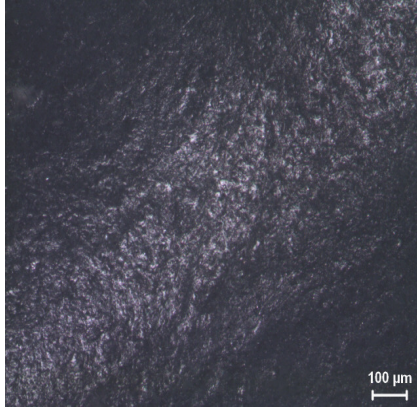


c) PET+%20 Al₂O₃

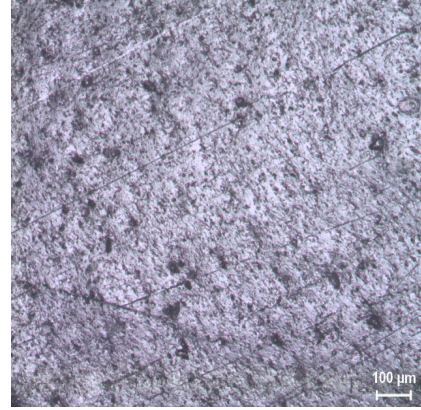
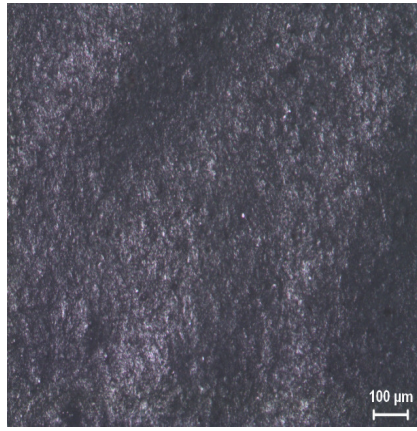
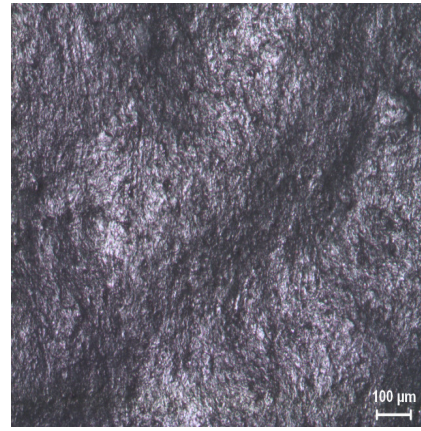


d) PET+%30 Al₂O₃

Şekil 7.31. PET malzemesinin erozyon aşınma yüzey görüntüleri (partikül boyutu: 10µm, deney süresi:30 dakika)



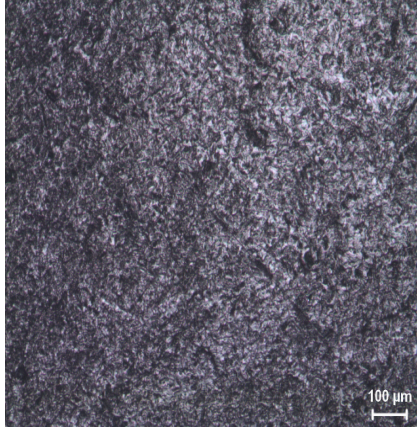
a) Katkısız PBT

b) PBT+%10 Al₂O₃c) PBT+%20 Al₂O₃d) PBT+%30 Al₂O₃

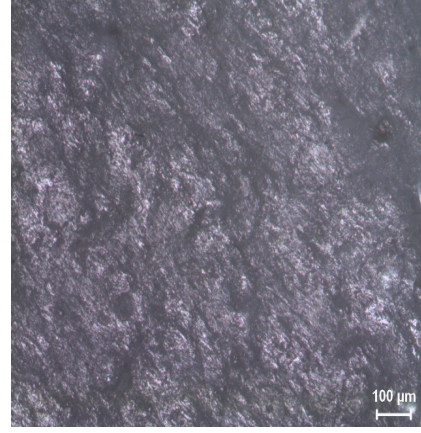
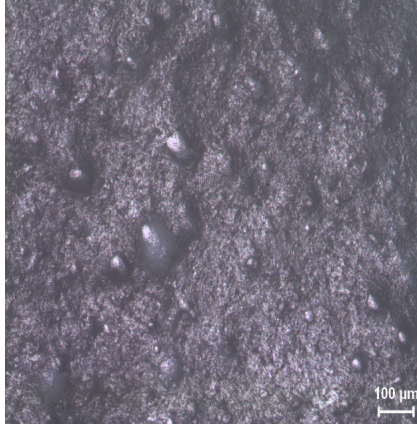
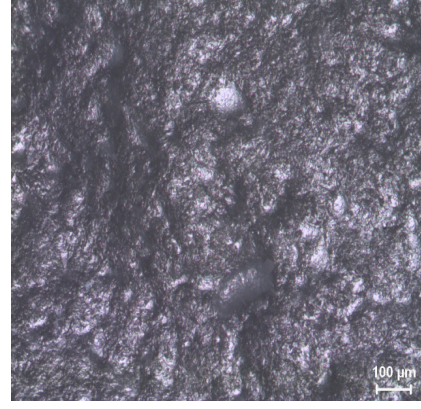
Şekil 7.32. PBT malzemesinin erozyon aşınma yüzey görüntüleri (partikül boyutu: 10μm, deney süresi:30 dakika)

Şekil 7.31’de katkısız PET ve 10µm partikül boyutuna sahip PET kompozitlerinin (deney süresi: 30 dak.) optik mikroskoptaki erozyon aşınma yüzey görüntüleri görülmektedir. Şekil 7.31 (b), (c), (d)’de PET kompozit malzemelerin erozyon aşınma yüzey görüntüleri incelendiğinde erozyon aşınma çizgilerinin arttığı tespit edilmiştir. Aşınma çizgilerinin derinliği ve genişliği en fazla PET+%30Al₂O₃ kompozitinde (şekil 7.31-d) olduğu belirlenmiştir. Çizgi derinliği en az ve dar olan polimer malzeme ise katkısız PET malzemesinin olduğu görülmüştür. Burada aşınma çizgilerin görülmesinin sebebi aşındırıcı malzemenin kompozit ve katkısız polimer malzemenin yüzeyine çarpması sonucunda oluşmaktadır. Malzeme yüzeyindeki oyukların fazla oluşması (PET+%30 Al₂O₃ gibi) ise erozyon aşınma sırasında malzeme yüzeyinden kayıpların fazla olmasından dolayı olabilir.

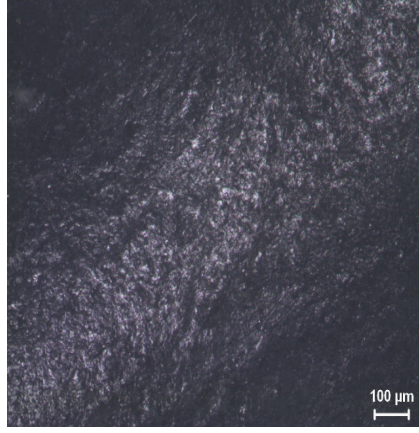
Şekil 7.32’de katkısız PBT ve 10µm partikül boyutuna sahip PBT kompozitlerinin (deney süresi: 30 dak.) optik mikroskoptaki erozyon aşınma yüzey görüntüleri verilmiştir. Optik mikroskopta erozyon aşınma yüzey çizgi görüntüleri birbirine paralel, geniş ve boydan boya olduğu tespit edilmiştir. Şekil 7.32 (d)’de PET+%30 Al₂O₃ kompozitin erozyon aşınma yüzey çizgilerinin, şekil 7.32 (c)’de olan PET+%20Al₂O₃ kompozitin erozyon aşınma çizgilerine göre daha geniş ve büyük olduğu görülmüştür. PBT+%10 Al₂O₃ kompozitinde ise erozyon aşınma çizgilerinin diğer malzemelere göre daha sık olduğu ve aşındırıcı olarak kullanılan malzemenin çarpma yönüne göre olduğu tespit edilmiştir. Erozyon aşınma çizgilerinin malzeme yüzeyinde artması ise deney sırasında silika kumun çarpma açısı artırıldığında malzemenin yüzeyine daha fazla temas edeceğinden dolayı malzeme yüzeyinde derin çukurluklar oluşmuştur.



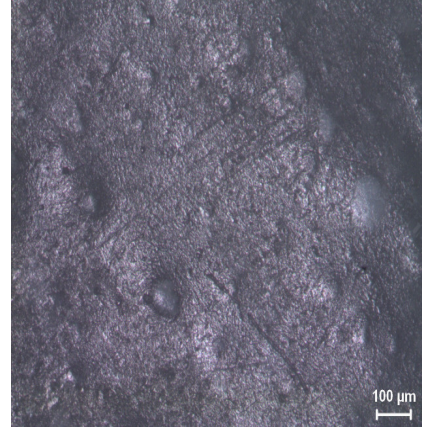
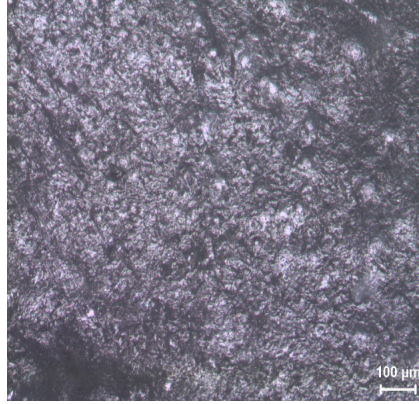
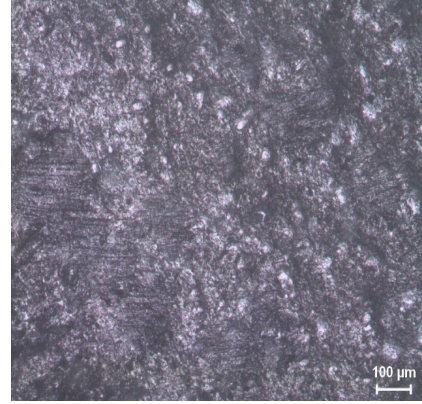
a) Katkısız PET

b) PET+%10 Al₂O₃c) PET+%20 Al₂O₃d) PET+%30 Al₂O₃

Şekil 7.33. PET malzemesinin erozyon aşınma yüzey görüntüleri (45µm deney süresi:30 dakika)



a) Katkısız PBT

b) PBT+%10 Al₂O₃c) PBT+%20 Al₂O₃d) PBT+%30 Al₂O₃

Şekil 7.34. PBT malzemesinin erozyon aşınma yüzey görüntüleri (45μm deney süresi:30 dakika)

Şekil 7.33'de katkısız PET ve 45µm partikül boyutuna sahip PET kompozitlerinin optik mikroskoptaki erozyon aşınma yüzey görüntüleri görülmektedir. PET malzemesinin erozyon aşınma yüzey görüntüleri incelendiğinde malzeme yüzeyinde oluşan aşınma çizgilerinin kısmi olduğu ve malzeme yüzeyinde küçük çukurluklar olduğu tespit edilmiştir. Bu durum diğer malzemelerde gözlenmiştir. 10µm partikül boyutlarına sahip katkısız PET ve Al₂O₃ katkılı kompozit malzemelere göre erozyon aşınma çizgileri daha az ve seyrek olduğu gözlenmiştir. Bunun sebebi, partikül boyutunun büyük olması sonucunda partiküllerin erozyon sırasında mukavemet sağlaması ile malzemenin aşınmaya karşı daha fazla direnç göstermesi şeklinde yorumlanabilir.

Şekil 7.34'de katkısız PBT ve 45µm partikül boyutuna sahip PBT kompozitlerinin optik mikroskoptaki erozyon aşınma yüzey görüntüleri verilmiştir. Optik mikroskopta erozyon aşınma yüzey çizgi görüntüleri diğer kompozit malzemelere göre daha belirgin olan malzeme PBT+%10 Al₂O₃ kompozit malzemesidir. Aşınma çizgileri paralel bir şekilde gerçekleşmiştir. Bu deney sonucunda oluşan aşınma deney çizgileri katkısız PBT polimer malzemenin 10µm partikül boyutlarına sahip Al₂O₃ katkılı kompozit malzemelere göre erozyon aşınma çizgileri daha az ve seyrek olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebi aşındırıcı malzemenin daha büyük partikül boyutuna sahip ve daha fazla oranda Al₂O₃ içeren malzemelerdeki Al₂O₃ ile temas etmesi sonucunda aşınma izleri daha az olmuştur. Aşınma oranlarının sonuçları rakamsal olarak Ek-C'de verilmiştir.

BÖLÜM 8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Deneyisel çalışmalarda, Al_2O_3 tozları kullanılmak suretiyle Al_2O_3 takviyeli PBT, PET kompozit malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir. PBT ve PET polimerleri içerisine farklı partikül boyutlarında (10-45-60 μ m) ve farklı oranlarda (%10,%20,%30) alümina katılması ile elde edilen kompozit malzemelerin çekme deneyleri, sertlik ölçümleri, darbe deneyleri, optik mikroyapı incelemeleri, aşınma deneyleri ve yoğunluk ölçümleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

8.1. Sonuçlar

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- PBT polimer ve kompozitlerini partikül boyutu açısından mekanik değerleri incelendiğinde mekanik değerleri en iyi olan malzeme 60 μ m Al_2O_3 takviyeli malzeme olduğu tespit edilmiştir.
- PET polimer ve kompozitlerini partikül boyutu açısından mekanik değerleri incelendiğinde mekanik değerleri en iyi olan malzeme 10 μ m Al_2O_3 takviyeli PET kompozit malzemesi olduğu tespit edilmiştir.
- Elastik modülü değerlerini partikül boyutu açısından incelenecek olursa PET polimeri için en yüksek elastik modüle sahip malzeme 10 μ m partikül boyutlu Al_2O_3 takviyeli malzemede olduğu tespit edilmiştir. PBT polimeri için en yüksek elastik modüle sahip malzeme 60 μ m partikül boyutlu Al_2O_3 takviyeli malzemede olduğu tespit edilmiştir.

- Katkısız PET, PBT ve PBT/PET grupları için % uzama değerleri 1,81-3,26 ve 3,15 olarak bulunmuştur.
- PET ve PBT polimer malzemeleri için Al_2O_3 katkı oranının artması ile yoğunluk değerlerinin arttığı gözlenmiştir.
- Aşınma deneylerinde yapılan veri aralığında en düşük sürtünme katsayısı katkısız PBT polimer malzemesinde, PET grubunda ise katkısız PET malzemesinde, PBT/PET karışımı grubunda ise %75PET+%25PBT malzemesinde görülmüştür.
- Uygulanan yük aralığında, yükün artması ile PBT, PET ve PBT/PET kompozit malzemeleri tamamının sürtünme katsayısının yükün artması ile arttığı gözlenmiştir. 50N yük altında ve 0,5m/s kayma hızında katkısız PBT ve PET polimerlerinin sürtünme katsayısı değerleri sırası ile 0,22 ila 0,20 iken yük 150N çıkarıldığında 45µm partikül boyutuna sahip %30 Al_2O_3 takviyeli PBT ve PET kompozit malzemelerin sırasıyla sürtünme katsayısı değerleri 0,42 ile 0,34 olarak tespit edilmiştir.
- 0,5m/s ve 1,0m/s kayma hızlarında yapılan deneylerde hızın artması ile PBT,PET ve kompozitlerinde sürtünme katsayısının arttığı tespit edilmiştir. En yüksek sürtünme katsayısı değerleri 45µm veya 10µm partikül boyutuna sahip %30 Al_2O_3 takviyeli malzemelerde tespit edilmiştir.
- Aşınma deneylerinde yapılan veri aralığında en düşük aşınma oranı PBT malzemesi için 45µm partikül boyutuna sahip %30 Al_2O_3 takviyeli malzemesinde, PET grubunda ise 45µm partikül boyutuna sahip %30 Al_2O_3 takviyeli malzemesinde, PBT/PET karışım grubunda ise %75PBT+%25PET malzemesinde görülmüştür.
- Uygulanan yük aralığında yükün artması ile PBT, PET ve PBT/PET kompozit malzemelerinin tamamının aşınma oranlarının yükün artması ile arttığı gözlenmiştir.

- 0,5m/s ve 1,0m/s kayma hızlarında hızın artması ile aşınma oranları artmıştır. En yüksek aşınma oranı katkısız PBT polimer malzemede, en düşük aşınma oranı ise %30 Al₂O₃ takviyeli kompozit malzemelerinde tespit edilmiştir.

8.2. Öneriler

Deneyle yapılan katkısız PBT, PET ve kompozitlerinin aşınma ve sürtünme deneyle farklı sıcaklıklarda yapılabilir. Aşınma ve sürtünmeye sıcaklığın etkisi araştırılabilir.

PET, PBT ve PBT/PET karışımlarına ilave edilen alümina katkıların yüzey modifiyeli olarak hazırlanarak üretimleri yapıp, mekanik ve tribolojik özellikleri incelenebilir. Yapılan bu tez çalışmasındaki sonuçlar ile karşılaştırılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] EZDEŞİR, A., ERBAY, E., TAŞKIRAN, İ., YAĞCI, M.A., CÖBEK, M. ve BİLGİÇ, T., “Polimerler I”, Pagev yayınları, II. Baskı, s. 231-237, İstanbul, 2001
- [2] AKYÜZ, F.Ö., “Plastikler ve Plastik Teknolojisine Giriş”, Pagev Yayınları, İstanbul , 1999
- [3] UZUNER, H., “Polimerlerin Sürtünme ve Aşınma Davranışları”, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2001
- [4] KARAOĞLU, Y., “Bir Aşınma Test Cihazının Tasarımı ve İmalatı”, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006
- [5] DAWOOD, J.J., “Study The Effect Of The (Al) And (Al₂O₃) Particles Reinforcing On The Wear Volume Loss Characteristics Of Epoxy” Eng. & Tech. Journal, Vol. 27. No 1, 2009
- [6] NIKLAS, A., STURE, H., STAFFAN J., “Friction and Wear Measurement Techniques”, Modern Tribology Handbook, Vol.13, 2001
- [7] BUDINSKI, K.G., “Hardfacing III: The Wear Processes”, Welding Design and Fabrication, pp. 40–47, December, 1986
- [8] BHUSHAN, B., GUPTA, B.K., “Materials Coating and Surface Treatments”, Handbook and Tribology, pp.6.1-6.29, McGraw-Hill, Inc., USA, 1991
- [9] NEALE M.J., GEE M., “Wear Problems and Testing for Industry”, William Andrew Incorporated, USA, 2001
- [10] QIAO H., GUO, Q., TIAN, A., PAN, G., XU, L., “A Study on Friction and Wear Characteristics of Nanometer Al₂O₃/PEEK composites under the Dry Sliding Condition”, Tribology International 40, 105–110, 2007
- [11] SUN, L., YANG, Z., LI, X., “Study on the Friction and Wear Behavior of POM/Al₂O₃ Nanocomposites” Wear 264, 693–700, 2008

- [12] BHIMARAJ, P., BURRIS, D.L., ACTION, J., SAWYER, W.G., TONEY, C.G., SIEGEL, R.W., SCHADLER L.S., "Effect of Matrix Morphology on the Wear and Friction Behavior of Alumina Nanoparticle/Poly(Ethylene) Terephthalate composites", *Wear* 258, 1437–1443, 2005
- [13] XIONG, D., GE, S., "Friction and Wear Properties of UHMWPE/Al₂O₃ Ceramic Under Different Lubricating Conditions", *Wear* 250, 242–245, 2001
- [14] MENG, H., SUI, G.X., XIE, G.Y., YANG, R., "Friction and Wear Behavior of Carbon Nanotubes Reinforced Polyamide 6 Composites Under Dry Sliding and Water Lubricated Condition", *Composites Science and Technology*, 2009
- [15] ÜNAL, H., ŞEN, U., MİMAROĞLU, A., "Dry sliding wear characteristics of some industrial polymers against steel counterface", *Tribology International* 37, 727-732, 2004
- [16] SEABRA, L.C., BAPTISTA A.M., "Tribological Behaviour of Food Grade Polymers Against Stainless Steel in Dry Sliding and With Sugar", *Wear* 253, 394–402, 2002
- [17] SRINATH, G., GNANAMOORTHY, R., "Sliding Wear Performance of Polyamide 6–Clay Nanocomposites in Water", *Composites Science and Technology* 67, 399–405, 2007
- [18] WANG, Y.Q., LI, J., "Sliding Wear Behavior and Mechanism of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene", *Materials Science and Engineering A266*, 155–160, 1999
- [19] WACHARAWICHANANT, S., THONGYAI, S., PHUTTHAPHAN, A., EIAMSAM-ANG, C., "Effect of Particle Sizes of Zinc Oxide on Mechanical, Thermal and Morphological Properties of Polyoxymethylene/Zinc Oxide nanocomposites", *Polymer Testing* 27, 971–976, 2008
- [20] ERDEN, S., SARIKANAT, M., YILDIZ, H., "Karbon Fiber Takviyeli Termoplastik Kompozitlerde Ara Yüzey Dayanımının Arttırılmasında Kullanılan Yöntemler", *Tekstil Teknolojileri Elektronik Dergisi*, Cilt: 3, No: 1, 2009 (39-56)
- [21] WANG, S., GE, S., ZHANG, D., "Comparison of Tribological Behavior of Nylon Composites Filled with Zinc Oxide Particles and Whiskers", *Wear* 266, 248–254, 2009
- [22] SELVIN, T.P., KURUVILLA, J., SABU, T., "Mechanical Properties of Titanium Dioxide-Filled Polystyrene Microcomposites", *Materials Letters* 58, 281– 289, 2004

- [23] HARSHA, A.P., TEWARI, U.S., VENKATRAMAN, B., “Solid Particle Erosion Behaviour of Various Polyaryletherketone Composites”, *Wear* 254, 693–712, 2003
- [24] HARSHA, A.P., JHA, S.K., “Erosive Wear Studies of Epoxy-Based Composites at Normal Incidence”, *Wear* 265, 1129–1135, 2008
- [25] YILMAZ, F., “Sürtünme ve Aşınma”, 9th International Metallurgy and Materials Congress, p 229-256, İstanbul, 1997.
- [26] VAROL, N., “Plastik Malzemelerde Aşınma”, T.C. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji Eğitimi Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, 1994.
- [27] Neale, M.J., and Guide, M.G., “Wear Problem and testing for Industry”, William Andrew Publishing, LLC 13 Eaton Avenue, USA
- [28] ASHBY, M., JONES, R.H.D., “Friction and Wear Engineering Materials”, Cambridge University, England, 1996.
- [29] AKBULUT, H., “Malzemelerin Sürtünme ve Aşınma Davranışları”, Ders notları, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006
- [30] ALAKARA, Ş., “Azobisizobütironitril başlatıcısı ile Poli(etilen teraftalat) liflere metakrilamidin aşılınması”, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi
- [31] http://www.matasmaden.com/asinma/alumina_seramik.htm, Eylül 2010
- [32] <http://www.azom.com/details.asp?ArticleID=2047>, Eylül 2010
- [33] <http://promosyon.azbuz.ekolay.net/allForums.jsp?userId=908475>, Eylül 2010
- [34] http://en.wikipedia.org/wiki/Polyethylene_terephthalate, Eylül 2010

EKLER

EK-A

Numune Adı	Kayma Hızı (m/sn)	Yük (N)			Yük (N)		
		50	100	150	50	100	150
		Aşınma Oranı ($\times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{N}$)			Sürtünme Katsayısı (μ)		
PBT (Polibutilen Trefalat)	0,5 1	2.67 3.08	2.70 3.13	2.83 3.28	0.22 0.25	0.25 0.28	0.32 0.24
PBT+ %10 Al ₂ O ₃ (10 μm partikül boyutu Al ₂ O ₃)	0,5 1	1.98 2.52	2.09 2.54	2.21 2.70	0.25 0.30	0.30 0.33	0.33 0.38
PBT+ %20 Al ₂ O ₃ (10 μm partikül boyutu Al ₂ O ₃)	0,5 1	1.75 1.96	1.82 2.07	2.00 2.40	0.27 0.32	0.32 0.35	0.36 0.40
PBT+ %30 Al ₂ O ₃ (10 μm partikül boyutu Al ₂ O ₃)	0,5 1	1.20 1.70	1.60 1.90	1.75 2.20	0.31 0.34	0.35 0.39	0.38 0.45
PBT+ %10 Al ₂ O ₃ (45 μm partikül boyutu Al ₂ O ₃)	0,5 1	1.78 1.93	1.85 2.26	2.07 2.72	0.26 0.32	0.32 0.34	0.38 0.39
PBT+ %20 Al ₂ O ₃ (45 μm partikül boyutu Al ₂ O ₃)	0,5 1	1.22 1.29	1.42 1.63	1.70 1.81	0.29 0.35	0.35 0.38	0.40 0.41
PBT+ %30 Al ₂ O ₃ (45 μm partikül boyutu Al ₂ O ₃)	0,5 1	1.03 1.04	1.19 1.29	1.18 1.40	0.33 0.38	0.39 0.41	0.42 0.44
PET (Polietilen Trefalat)	0,5 1	3.15 4.28	3.30 4.43	3.45 4.66	0.20 0.23	0.22 0.26	0.23 0.27
PET+%10Al ₂ O ₃ (10 μm partikül boyutu Al ₂ O ₃)	0,5 1	2.11 4.08	2.22 4.33	2.35 4.54	0.22 0.24	0.24 0.27	0.27 0.29
PET+%20Al ₂ O ₃ (10 μm partikül boyutu Al ₂ O ₃)	0,5 1	1.98 3.82	2.11 3.99	2.13 3.98	0.23 0.27	0.27 0.29	0.29 0.33
PET+%30Al ₂ O ₃ (10 μm partikül boyutu Al ₂ O ₃)	0,5 1	1.50 2.56	1.81 2.78	2.04 2.82	0.28 0.29	0.30 0.31	0.33 0.35
PET+%10 Al ₂ O ₃ (45 μm partikül boyutu Al ₂ O ₃)	0,5 1	2.08 3.74	2.20 3.88	2.33 3.99	0.24 0.25	0.25 0.27	0.28 0.29
PET+%20Al ₂ O ₃ (45 μm partikül boyutu Al ₂ O ₃)	0,5 1	1.27 2.82	1.56 3.26	1.74 3.59	0.26 0.30	0.28 0.32	0.30 0.34
PET+%30Al ₂ O ₃ (45 μm partikül boyutu Al ₂ O ₃)	0,5 1	1.10 2.56	1.39 2.78	1.69 2.95	0.32 0.33	0.33 0.36	0.34 0.39
%75PET+%25PBT (Mix)	0,5 1	2.10 2.30	2.30 2.74	2.50 2.91	0.22 0.24	0.26 0.28	0.27 0.30
%25PET+%75PBT (Mix)	0,5 1	0.07 1.05	0.22 1.20	0.49 1.45	0.25 0.38	0.27 0.43	0.34 0.36

EK-B

Numune Adı	Çekme Mukavemeti (MPa)	Elastik Modülü (MPa)	% Uzama (Kopmada)	Sertlik (Shore D)	Darbe mukavemeti (Kj/m ²)
PBT (Polibütülen Treftalat)	36,375	1570,83	3,2601	67	12,81
PBT+ %10 Al ₂ O ₃ (10 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)	26,425	1770,03	1,8600	70	10,31
PBT+ %20 Al ₂ O ₃ (10 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)	24,531	1860,87	1,7300	73	9,06
PBT+ %30 Al ₂ O ₃ (10 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)	20,878	2270,81	0,7800	79	7,50
PBT+ %10 Al ₂ O ₃ (45 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)	29,300	2000,05	2,1900	68	10,93
PBT+ %20 Al ₂ O ₃ (45 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)	25,400	2400,12	1,9500	70	10,00
PBT+ %30 Al ₂ O ₃ (45 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)	21,500	3330,25	0,9500	74	8,75
PBT+ %10 Al ₂ O ₃ (60 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)	34,800	2410,60	2,4800	67	12,18
PBT+ %20 Al ₂ O ₃ (60 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)	29,100	2670,05	2,1900	69	10,93
PBT+ %30 Al ₂ O ₃ (60 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)	23,300	3620,57	1,6400	74	9,06
PET (Polietilen Treftalat)	26,756	1610,54	1,8100	61	12,18
PET+ %10 Al ₂ O ₃ (10 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)	24,712	3030,21	1,6000	70	9,68
PET+ %20 Al ₂ O ₃ (10 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)	21,645	3610,31	1,2200	73	8,75
PET+ %30 Al ₂ O ₃ (10 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)	18,245	3910,05	1,0000	77	5,93
PET+ %10 Al ₂ O ₃ (45 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)	22,900	2600,79	1,5025	66	9,37
PET+ %20 Al ₂ O ₃ (45 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)	17,600	3100,69	1,0200	69	8,12
PET+ %30 Al ₂ O ₃ (45 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)	15,500	3630,01	0,6800	72	5,31
PET+ %10 Al ₂ O ₃ (60 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)	19,600	2360,46	1,1258	64	8,43
PET+ %20 Al ₂ O ₃ (60 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)	14,700	2770,09	0,8100	67	6,56
PET+ %30 Al ₂ O ₃ (60 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)	12,000	3420,21	0,5500	70	3,75
%75PET+%25PBT (Mix)	33,075	206,81	2,6300	-	9,06
%25PET+%75PBT (Mix)	43,425	199,91	3,1500	-	10

EK-C

Numune Adı	Deney Süresi (dak.)	Çarpma Açısı (derece)						
		0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
		Aşınma Oranı (gr/gr)						
PBT (Polibutilen Trefalat)	30	6.00	4.76	2.15	4.60	3.50	7.23	4.62
PBT+ %10 Al ₂ O ₃ (10 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)	30	1.23	2.30	9.23	2.00	1.07	3.54	1.23
PBT+ %20 Al ₂ O ₃ (10 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)	30	4.00	2.15	2.00	7.53	5.69	8.62	6.01
PBT+ %30 Al ₂ O ₃ (10 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)	30	1.38	2,46	8.15	1.23	1.49	1.39	5.08
PBT+ %10 Al ₂ O ₃ (45 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)	30	1.25	3.21	4.40	5.07	1.16	9.08	2.15
PBT+ %20 Al ₂ O ₃ (45 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)	30	4.77	7.84	3.16	1.93	2.06	1.92	3.85
PBT+ %30 Al ₂ O ₃ (45 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)	30	1.32	3.04	5.81	3.04	3.58	1.26	2.62
PBT+ %10 Al ₂ O ₃ (60 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)	30	2.77	6.14	2.61	4.61	1.23	1.69	1.38
PBT+ %20 Al ₂ O ₃ (60 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)	30	6.15	6.46	1.10	1.47	1.55	1.05	5.85
PBT+ %30 Al ₂ O ₃ (60 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)	30	1.54	1.84	2.15	8.30	9.53	1.23	2.62
PET (Polietilen Trefalat)	30	5.08	1.21	1.75	2.45	1.06	5.38	3.08
PET+ %10 Al ₂ O ₃ (10 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)	30	1.23	2.31	2.77	5.38	1.54	1.08	6.15
PET+ %20 Al ₂ O ₃ (10 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)	30	3.08	9.23	1.38	2.31	1.23	3.85	3.08
PET+ %30 Al ₂ O ₃ (10 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)	30	1.69	3.69	7.69	7.08	6.46	6.15	4.62
PET+ %10 Al ₂ O ₃ (45 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)	30	1.29	2.23	2.62	3.51	3.80	1.25	7.69
PET+ %20 Al ₂ O ₃ (45 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)	30	6.77	1.11	2.37	3.17	4.55	1.38	7.54
PET+ %30 Al ₂ O ₃ (45 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)	30	9.38	1.14	2.08	2.37	3.38	2.37	7.46
PET+ %30 Al ₂ O ₃ (60 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)	30	2.31	2.55	9.38	7.85	4.54	3.20	1.54
PET+ %30 Al ₂ O ₃ (60 µm partikül boyutu Al ₂ O ₃)	30	1.54	6.15	2.92	6.15	5.85	9.69	1.85

ÖZGEÇMİŞ

Emre KURTULUŞ, 01.08.1982 tarihinde Sakarya'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Sakarya'da tamamladıktan sonra 2000 yılında Sakarya Fatih Teknik Lisesi Elektrik Bölümü'nden ve 2007 yılında Sakarya Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Öğretmenliği programından mezun oldu. Yine 2007 yılında Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi programında yüksek lisans öğrenimine başladı 2009–2010 yılları arasında PVC boru ve ek parçaları üretim yapan Sintaş Plastik San. Ve Tic. A.Ş.'de kalite kontrol elemanı olarak çalıştıktan sonra Eylül 2010 tarihinde Erkurt Holding San. ve Tic. A.Ş.'de halen bakım onarım Şefi olarak görev yapmaktayım. Plastik malzemeler ve plastik işleme teknikleri konularında halen çalışmakta ve kendimi geliştirmekteyim.