

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

**YÜKSEK PERFORMANSLI ENDÜSTRİYEL  
TERMOPLASTİKLERİN YÜKSEK  
SICAKLIKLARDAKİ TRİBOLOJİK DAVRANIŞLARI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Tek. Öğr. Mehmet KURT**

**Enstitü Anabilim Dalı : METAL EĞİTİMİ**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Hüseyin ÜNAL**

**Haziran 2011**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

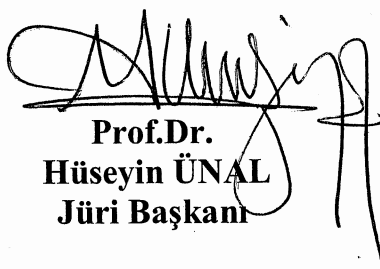
**YÜKSEK PERFORMANSLI ENDÜSTRİYEL  
TERMOPLASTİKLERİN YÜKSEK  
SICAKLIKLARDAKİ TRİBOLOJİK DAVRANIŞLARI**


**YÜKSEK LİSANS TEZİ**


**Mehmet KURT**

**Enstitü Anabilim Dalı : METAL EĞİTİMİ**

**Bu tez 30/ 06/ 2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği/ Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.**

  
**Prof.Dr.  
Hüseyin ÜNAL  
Jüri Başkanı**

  
**Yrd.Doç.Dr.  
Özkan ÖZDEMİR  
Üye**

  
**Yrd.Doç.Dr.  
Ahmet DEMİRER  
Üye**

## ÖNSÖZ

Tez çalışmamın yürütülmesi süresince maddi ve manevi desteğini esirgemeyen, her türlü bilgi ve birikiminden faydalandığım, saygıdeğer hocam Sayın Prof. Dr. Hüseyin ÜNAL'a sonsuz teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarda yardımını ve zamanını esirgemeyen Sayın Arş. Gör. Salih Hakan YETGİN ve Sn. Arş. Gör. Murat ÇOLAK' a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, çalışmalarım süresince yardımcı olan Arş. Gör. Nuri ERGİN ve Yavuz Plastik Display Teşhir Sis. Dek. İnş. San. Tic. Ltd. Genel Müdürü Sn. Hüseyin YAVUZASLAN' a, tez çalışmalarım sırasında bana yardımlarını esirgemeyen başta sevgili arkadaşım Kerem ÖNDER'e ve bütün sınıf arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Son olarak bugünlere gelmemde bana daima destek olan ve haklarını hiçbir zaman ödeyemeyeceğim sevgili Babama, Anneme ve Ablama teşekkürü bir borç bilirim.

Haziran 2011

Mehmet KURT

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
TABLolar LİSTESİ.....	xii
ÖZET.....	xiii
SUMMARY.....	xiv
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.	
POLİMERLER.....	10
2.1. Polimerlerin Sınıflandırılması.....	11
2.2. Katılma ve Kondensasyon Polimerizasyonları.....	11
2.3. Polimerleşme.....	12
2.4. Sınıflandırma.....	13
2.4.1. Termoset ve termoplastikler.....	14
2.4.1.1. Termoplastikler.....	15
2.4.1.2. Termoset plastikler.....	15
2.5. Termoplastik Malzemeler.....	16
2.5.1. Genel amaçlı mühendislik termoplastikler.....	16

2.5.1.1. Polietilen (PE).....	16
2.5.1.2. Polipropilen (PP).....	17
2.5.1.3. Polistiren (PS).....	17
2.5.1.4. Polivinilklorür (PVC).....	18
2.5.2. Mühendislik plastikleri.....	19
2.5.2.1. Poliasetal (POM).....	19
2.5.2.2. Polikarbonat (PC).....	19
2.5.2.3. Polietilentereftalat (PET).....	20
2.5.2.4. Poliamid (PA).....	21
2.6. Yüksek Performanslı Plastikler.....	22
2.6.1. Poliamid-imid (PAI) polimeri.....	22
2.6.1.1. Poliamid-imid yapısı.....	22
2.6.1.2. Poliamid-imid özellikleri.....	22
2.6.1.3. Poliamid-imid kullanım alanları.....	23
2.6.2. Polietereterketon ve Poliketon (PEEK ve PK) polimeri.....	23
2.6.2.1. Polietereterketon ve poliketon yapısı.....	23
2.6.2.2. Polietereterketon ve poliketon özellikleri.....	24
2.6.2.3. Polietereterketon ve poliketon kullanım alanlar.....	24
2.6.3. Poli-fenilen-sülfid (PPS) polimeri.....	25
2.6.3.1. Poli-fenilen-sülfid yapısı.....	25
2.6.3.2. Poli-fenilen-sülfid özellikleri:.....	25
2.6.3.3. Poli-fenilen-sülfid kullanım alanları.....	26
2.6.4. Polisülfon (PSU) polimeri.....	26
2.6.4.1. Polisülfon yapısı.....	26
2.6.4.2. Polisülfon özellikleri.....	27
2.6.4.3. Polisülfon kullanım alanları.....	27
2.6.5. Polieter-imid (PEI) polimeri.....	27
2.6.5.1. Polieter-imid yapısı.....	27
2.6.5.2. Polieter-imid özellikleri.....	28
2.6.5.3. Polieter-imid kullanım alanları.....	28
2.6.6. Sıvı Kristal Polimer (LCP) polimeri.....	28
2.6.6.1. Sıvı Kristal Polimer yapısı.....	28
2.6.6.2. Sıvı Kristal Polimer özellikleri.....	29

2.6.6.3. Sıvı Kristal Polimer kullanım alanları.....	29
--	----

### BÖLÜM 3.

AŞINMA .....	30
3.1. Aşınmanın Ekonomik Açıdan Önemi.....	31
3.2. Aşınmanın Kullanımı.....	32
3.3. Aşınmayı Etkileyen Faktörler.....	32
3.4. Aşınma Mekanizmaları.....	32
3.4.1. Adhesiv aşınma.....	33
3.4.2. Abrasiv aşınma.....	38
3.4.3. Erozyon aşınması.....	39
3.4.4. Oymalı aşınma.....	40
3.4.5. Korozif aşınma.....	40
3.4.6. Tribokimyasal reaksiyon veya tribokimyasal aşınma.....	41
3.4.7. Püskürtme aşınması.....	42
3.4.8. Tabaka aşınması.....	42
3.4.9. Kavitasyon aşınması.....	43
3.4.10. Uzun ömürlü yorulma aşınması.....	43
3.4.11. Kayma aşınması.....	44

### BÖLÜM 4.

AŞINMA DENEY YÖNTEMLERİ.....	45
4.1. Aşınma Deney Yöntemleri.....	45
4.2. Abrasiv Aşınma Deney Yöntemleri.....	50
4.3. Çalışma Şartlarının Değiştirilmesi.....	51
4.4. Aşınma ile İlgili Parametreler ve Boyutları.....	51
4.4.1. Yapısal parametreler.....	52
4.4.2. Dış parametreler.....	52
4.5. Aşınmaya Etki Eden Parametreler.....	52
4.5.1. Kayma hızı.....	52
4.5.2. Basınç ve yük.....	52
4.5.3. Sıcaklık.....	52
4.5.4. Aşınma mesafesi.....	53

4.5.5. Sertlik.....	53
4.5.6. Yüzey pürüzlülüğü.....	53
4.5.7. Tane boyutu.....	54
4.5.8. Çalışma ortamının etkisi.....	54
4.5.9. İşletme koşulları.....	54
BÖLÜM 5.	
DENEY MALZEMELERİ VE YAPILAN DENEYLER.....	56
5.1. Deneylede Kullanılan Malzemeler.....	56
5.2.Aşınma Analizi.....	56
BÖLÜM 6.	
DENEY BULGULAR.....	59
6.1.Yapılan Çalışmaların Aşınma ve Sürtünme Analizleri.....	59
6.1.1. Aşınma ve sürtünme sonuçlarına uygulanan yük, hız ve sıcaklığın etkisi.....	59
6.1.1.1.Sürtünme sonuçlarına uygulanan yükün etkisi.....	62
6.1.1.2.Sürtünme sonuçlarına kayma hızının etkisi.....	64
6.1.1.3.Aşınma sonuçlarına uygulanan yükün etkisi.....	67
6.1.1.4.Aşınma sonuçlarına kayma hızının etkisi.....	70
6.1.1.5. Aşınma ve sürtünme sonuçlarına yük ve ortam sıcaklığının etkisi.....	73
6.1.2. Mikro yapı incelemeleri.....	79
BÖLÜM 7.	
SONUÇLARVE ÖNERİLER.....	84
7.1. Sonuçlar.....	84
7.2. Öneriler.....	86
KAYNAKLAR.....	87
ÖZGEÇMİŞ.....	92

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

ASTM	: Amerikan ve Malzeme Testleri Derneği
CE	: Cam Elyaf
Dev/dk	: Devir/dakika
DIN	: Alman Kalite Normu
h	: Saat
ISO	: Uluslararası Kalite Standartları
J	: Joule
m	: Metre
Mohs	: Mineral Sertlik Birimi
N	: Newton
Pa	: Pascal
Sn	: Saniye
Tan $\Delta$	: Tanjant delta
$\mu\text{m}$	: Mikrometre
PAI	: Poliamid-imid
PEEK	: Poli-eter-eter-keton
PEI	: Polieter-imid
PPS	: Polifenilen-sülfit
PK	: Poliketon
PSU	: Polisülfon
LCP	: Sıvı kristal polimer
PVC	: Poli-vinil-klorür
PC	: Polikarbonat
PS	: Polistiren
PET	: Polietilentereftalat
PTFE	: Politetrafloretilen



## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Termoplastik zincir yapısı (Doğrusal ve dallanmış).....	15
Şekil 2.2.	Polietilen ve etilen monomerinin şematik gösterimi.....	16
Şekil 2.3.	Polipropilen polimerinin yapısı.....	17
Şekil 2.4.	Polistiren zincir yapısı.....	17
Şekil 2.5.	Polivinil klorür polimerinin zincir yapısı.....	18
Şekil 2.6.	Poliasetal (POM) zincir yapısı.....	19
Şekil 2.7.	Polikarbonat (PC) zincir yapısı.....	20
Şekil 2.8.	Polietilentereftalat zincir yapısı.....	20
Şekil 2.9.	Polietereterketon molekül polimerizasyonu.....	23
Şekil 2.10.	Polifenilensülfid polimerinin kimyasal yapısı.....	25
Şekil 3.1.	Aşınmayı oluşturan aşamalar.....	29
Şekil 3.2.	Dört esas aşınma mekanizmasının şematik olarak gösterilmesi.....	33
Şekil 3.3	Adhesiv aşınma, a) Kaynak bağlantılarının oluşumu, b ) Kaynak bağlantılarının kopması .....	34
Şekil 3.4	Adhesiv aşınma, a)Yüzeydeki adhezyon çizgileri, b)Yüzeydeki parlak bölge, c)Aşınan tabaka kalınlığı .....	34
Şekil 3.5	a.Görünen temas yüzeyi, b. Gerçek temas alanı, c. Statik temas durumunda gerçek temas alanları, d. Kayma temasında gerçek temas alanları.....	35
Şekil 3.6	Adhesiv aşınmanın olduğu tribolojik sistemler.....	36
Şekil 3.7	Malzemeler arasında meydana gelen transfer mekanizması.....	37
Şekil 3.8	Abrasiv aşınmanın oluşturduğu tribolojik sistemler.....	39
Şekil 3.9	Çarpışma açısı ve aşınma hızı arasındaki ilişki .....	40
Şekil 3.10	Tribokimyasal aşınma.....	42
Şekil 3.11	Uzun ömürlü yüzey yorulmasında çatlak oluşumu ve ilerlemesi...	43
Şekil 3.12	Uzun ömürlü yüzey yorulması aşınmasının olduğu tribolojik	

	sistemler.....	44
Şekil 4.1.	Kayma aşınması testlerinde kullanılan geometrik düzenler.....	46
Şekil 4.2.	a)Çizgisel temas b) Noktasal temas geometrileri.....	47
Şekil 4.3.	Genellikle iyi bir yağlama sağlamak için kullanılan dört top testi a) Perspektif görünüş b) üstten görünüş.....	48
Şekil 4.4.	Malzemenin aşınma miktarını ölçmek için en yaygın kullanılan dört metodun şematik gösterilmesi, a) abrasiv disk üstü pim, b) abrasiv düzlem üstü pim, c) abrasiv tambur üstü pim, d) lastik tekerlekli abrazyon testi.....	51
Şekil 5.1.	Aşınma deneyin de excel formatında elde edilen sürtünme katsayısı değerleri ve grafiği gösterilmiştir.....	57
Şekil 5.2.	Aşınma test cihazı.....	58
Şekil 6.1.	Saf PAI ve PAI+%12grafit+%3PTFE katkıli kompozitin sürtünme katsayısı-kayma yolu ilişkisi (Kayma hızı: 0,5m/s, uygulanan yük: 50N).....	59
Şekil 6.2.	Saf PK, PEEK+%30CF, PEEK+%30GFR kompozitlerin sürtünme katsayısı-kayma yolu ilişkisi (Kayma hızı: 0,5m/s, Uygulanan yük: 50N) .....	60
Şekil 6.3.	a) PEI+%15PTFE ve PSU+%20GFR kompozitlerin ve b) Saf sıvı kristal polimer ile PPS+%40GFR kompozitinin, sürtünme katsayısı-kayma yolu ilişkisi (Kayma hızı: 0,5m/s,yük: 50N).....	61
Şekil 6.4.	Saf PAI ve PAI+%12grafit+%3PTFE katkıli kompozitin sürtünme katsayısı-yük ilişkisi (Kayma hızı: 0,5m/s).....	62
Şekil 6.5.	PEEK+%30CF,PEEK+%30GFR katkıli kompozitin ve PK polimerinin sürtünme katsayısı-yük ilişkisi(Kaymahızı: 0,5m/s)..	63
Şekil 6.6.	PPS+%40GFR, PEI+%15PTFE ve PSU+%20GFR kompozit malzemelerinin sürtünme katsayısı-yük ilişkisi (Kayma hızı: 0,5m/s).....	64
Şekil 6.7.	Saf PAI ve PAI+%12grafit+%3PTFE katkıli kompozitin 50N yük altında sürtünme katsayısı-kayma hızı ilişkisi.....	65
Şekil 6.8.	PEEK+%30CF, PEEK+%30GFR katkıli kompozitleri ve PK	

	polimerinin 50N yük altında sürtünme katsayısı-kayma hızı ilişkisi.....	66
Şekil 6.9.	PEI+%15PTFE, PPS+%40GFR ve PSU+%20GFR kompozit malzemelerinin 50N yük altındaki sürtünme katsayısı-kayma hızı ilişkisi .....	67
Şekil 6.10.	Saf PAI polimeri ile PAI+%12grafit+%3PTFE katkılı kompozitin aşınma oranı-yük ilişkisi (Kayma hızı:0,5 m/s).....	68
Şekil 6.11.	PEEK+%30CF, PEEK+%30GFR katkılı kompozitin ve PK polimerinin aşınma oranı-yük ilişkisi (Kayma hızı:0.5m/s).....	69
Şekil 6.12.	PEI+%15PTFE, PSU+%20GFR ve PPS+%40GFR kompozit malzemelerinin aşınma oranı-yük ilişkisi (Kayma hızı: 0.5m/s).....	69
Şekil 6.13.	Saf PAI ve PAI+%12grafit+%3PTFE katkılı kompozitin 50N yük altında aşınma oranı-kayma hızı ilişkisi.....	71
Şekil 6.14.	PEEK+%30CF, PEEK+%30GFR katkılı kompozitin ve PK polimerinin 50N yük altında aşınma oranı-kayma hızı ilişkisi .....	72
Şekil 6.15.	PPS+%40GFR, PEI+%15PTFE ve PSU+%20GFR kompozit malzemelerinin 50N yük altında aşınma oranı-kayma hızı ilişkisi .....	73
Şekil 6.16.	Saf PAI ve PAI+%12grafit+%3PTFE katkılı kompozitin aşınma oranı-yük ilişkisi (Kayma hızı: 1.0 m/s, Ortam sıcaklığı= 250 °C).....	74
Şekil 6.17.	Saf PAI ve PAI+%12grafit+%3PTFE katkılı kompozitin sürtünme katsayısı-sıcaklık ilişkisi (Kayma Hızı 1.0 m/s Uygulanan yük: 10N).....	74
Şekil 6.18.	PEEK+%30 CF, PEEK+%30 GFR kompozitlerinin ve PK polimer malzemelerinin katkılı kompozitin aşınma oranı-yük ilişkisi (Kayma hızı: 1.0 m/s Sıcaklık 250°C).....	75
Şekil 6.19.	PEEK+%30 CF, PEEK+%30 GFR kompozitlerinin ve PK polimer malzemenin sürtünme katsayısı-sıcaklık ilişkisi (Kayma hızı 1.0m/s, Uygulanan yük: 10N).....	76

Şekil 6.20.	PPS+%40GFR, PEI+%15PTFE kompozit malzemelerinin 250°C ortam sıcaklığındaki aşınma oranı-yük ilişkisi (Kayma hızı: 1.0 m/s).....	77
Şekil 6.21.	PPS+%40GFR, PEI+%15PTFE, PSU+%20GFR kompozit malzemeleri ile ve sıvı kristal polimer malzemesinin sürtünme katsayısı-sıcaklık ilişkisi (Kayma Hızı:1.0m/s, Uygulanan yük: 10N).....	78
Şekil 6.22.	Deneyleerde kullanılan tüm test numunelerinin kuru kayma şartları altındaki optik mikroskop mikroyapı görüntüleri ( Ortam sıcaklığı: 22±2°C, Kayma hızı:1.0m/s, Uygulanan yük: 100N).....	79
Şekil 6.23.	Katkısız PAI polimeri ile PAI+%12graphite+%3PTFE, PEEK+%30CF, PEEK+%30GFR ve PPS+%40GFR kompozit malzemelerinin kuru kayma şartları altındaki optik mikroskop mikroyapı görüntüleri (Ortam sıcaklığı: 250±3°C, Kayma hızı: 1.0m/s, Uygulanan yük: 100N) .....	81
Şekil 6.24.	Katkısız PK, katkısız Sıvı kristal polimeri ile PSU+%20GFR ve PEI+%15PTFE kompozit malzemelerinin kuru kayma şartları altındaki optik mikroskop mikroyapı görüntüleri (Ortam sıcaklığı: 250±3°C, Kayma hızı:1.0m/s, Uygulanan yük: 10N).....	82

## TABLULAR LİSTESİ

Tablo 2.1.	Polimerlerin sınıflandırılmasının şematik gösterilmesi.....	13
Tablo 2.2.	Dolgunsuz,cam elyafı ve karbon elyafı PEI özellikleri.....	28
Tablo 3.1	Adhezyona etki eden genel malzeme özellikleri.....	37
Tablo 5.1.	Deneylerde kullanılan plastiklerin ticari isimleri kompozisyonu, üretici firma ve üretim şekli.....	56

## ÖZET

Anahtar Kelimeler: Aşınma, triboloji, polimer, kompozit, poliamid-imid, poli-eter-eter-keton, poli-fenilen-sülfid, poli-eter-imid, sıvı kristal polimer, grafit, PTFE, cam elyaf, karbon elyaf.

Bu deneysel çalışmada, endüstrinin değişik alanlarında kullanılan yüksek sıcaklığa dirençli ve yüksek performanslı poliamid-imid (PAI), sıvı kristal polimer (LCP) ve poliketon (PK) polimerleri ile %30 karbon elyaf takviyeli PEEK (PEEK+%30CF), %30cam elyaf takviyeli PEEK (PEEK+%30GFR), %12 grafit+%3 PTFE katkılı poliamid-imid (PAI+%12graphite+%3PTFE), %40 cam elyaf takviyeli poli-fenilen-sülfid (PPS+%40GFR), %15 teflon katkılı polieterimid (PEI+%15PTFE) ve %20 cam elyaf takviyeli polisülfon (PSU+%20GFR) kompozitleri kullanılmıştır. Deneyleerde kullanılan yüksek performanslı polimerlerin aşınma ve sürtünme davranışları pim-disk aşınma cihazında gerçekleştirilmiş olup, deneyler kuru ortam şartlarında yapılmıştır. Deneyler farklı ortam sıcaklık aralıklarında (23°C-250°C), 10N-150N yük aralığında ve 0.5m/s-4.0m/s kayma hızı aralıklarında 2000 metre kayma yolunda yapılmıştır. Deneyler sonucunda polimer ve kompozit malzemelerin aşınma ve sürtünme davranışlarına uygulanan yükün etkisi, hızın etkisi ve sıcaklığın etkisi incelenmiştir. Deneyleerde aşınma oranları ve sürtünme katsayıları, kayma hızının, uygulanan yükün ve sıcaklığın etkisine göre tespit edilmiş ve etkileri birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Mikroyapı incelemeleri için ise optik mikroskop kullanılmıştır. Deneyler sonucunda, 10-150N yük aralığı, 23-250°C ortam sıcaklıklarında ve 0.5-4.0m/s kayma hızlarında AISI 316L çelik malzemeye karşı çalışılabilecek en iyi yüksek performanslı plastikler sırasıyla PAI+%12grafit+%3PTFE, PEEK+%30CF kompozitleri ile katkısız PAI polimerleri olarak tespit edilmiştir.

# **TRIBOLOGICAL BEHAVIOURS OF HIGH PERFORMANCE INDUSTRIAL THERMOPLASTICS AT ELEVATED TEMPERATURES**

## **SUMMARY**

Key words: Wear, tribology, polymer, composite, polyamide-imide, polyetheretherketone, polyphenylenesulfide, polyetherimide, liquid crystal polymer, graphite, PTFE, fiberglass, carbon fiber.

In this tentative study, thermoplastic materials with high performance characteristics such as pure polyamide-imide (PAI), pure liquid-crystal-polymer (LCP), pure polyketone (PK), 30% carbon fiber reinforced poly-ether-ether-ketone (PEEK+30%CF), 30% glass fiber reinforced poly-ether-ether-ketone (PEEK+30%GFR), 12% graphite and 3% poly-tetra-fluoro-ethylene (PTFE) filled polyamide-imide (PAI+12%graphite +3%PTFE), 40% glass fiber reinforced polyphenylene sulfide (PPS+40%GFR), 20% poly-tetra-fluoro-ethylene filled polyether imide (PEI+15% PTFE) and 20% glass fiber reinforced polysulphone (PSU+20%GFR) composites have been examined. Tribological behaviours of high performance polymers employed in the experiments have been assessed. Wear and friction tests have been performed under dry ambient conditions by way of pin-on-disc wear & friction tester. Tests have been repeated at the range of 23°C-250°C temperature. Tribology tests have been carried out at the range of 10N-150N loads, at unidirectional sliding velocity ranges of 0,5-4.0m/s on 2km sliding distance. Effects of the applied loads, velocity, and temperature on the wear and friction characteristics of the aforementioned polymer and polymer composites have been identified at the end of tests. In the experiments, wear rates and friction coefficients have been determined in correlation with the effects of velocity, load and temperature and those effects have been benchmarked with each other. An optical microscope has been employed for microstructural analysis.

## BÖLÜM 1.GİRİŞ

Polimer malzemelerin ve polimer teknolojisinin son yıllarda hızla gelişmesi ile polimer malzemeler çeliklerin yerlerini almaya ve çeliklere alternatif olmaya başlamışlardır. Plastik malzemesinin üretiminin kolay olması, hafif ve ucuz olması, kimyasallara dayanıklı, ısı ve elektrik yalıtkanlığının iyi olması gibi birçok özelliğinin olmasından dolayı günümüzde yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Polimerlerin en büyük avantajlarından birisi de enjeksiyonla kalıplama, ekstrüzyon, ısı ile şekillendirme, döner kalıplama gibi çeşitli imalat yöntemleri ile üretilebilmeleridir. Polimerler genellikle toz ya da granül halde üretilirler. İstenildiği özelliklerine göre katkılar katılarak istenilen özellikler elde edilir.

Enjeksiyonla kalıplama yöntemi, diğer yöntemlere göre karmaşık şekilli parçaların üretilebilmesinde kolaylık sağladığı için en fazla tercih edilen üretim yöntemidir. Enjeksiyonla kalıplama yöntemi, toz veya granül haldeki termoplastik malzemenin kovan içerisindeki ısıtıcılar ve vidanın dönme hareketi sayesinde ergiyik hale getirilmesi, ergiyik haldeki malzemenin enjeksiyon kalıbına basınçlı bir şekilde enjekte edilmesi ve soğuyan parçanın kalıptan alınması aşamalarından oluşmaktadır. Katkısız haldeki polimerlerin, mekanik, kimyasal, termal ve fiziksel özellikleri geleneksel malzemelere göre daha kötüdür. Bu amaçla, katkısız polimerlere cam elyaf, aramid elyaf ve karbon elyaf gibi mukavemet artırıcı katkılar, kalsiyum karbonat, kaolin, talk, wollastonit, cam bilya, uçucu kül gibi mineral dolgular ve PTFE, karbon, MoS<sub>2</sub> gibi aşınma ve sürtünmeye dirençli katkılar ilave edilerek üstün performanslı polimer kompozit malzemeler üretilmektedir.



Polimer malzemelerin farklı katkıları kullanılarak özelliklerinin geliştirilmesi ile dişliler, contalar, silindirler, miller, motorlar ve uzay aletleri gibi endüstrinin değişik alanlarında, polimer ve polimer esaslı kompozitlerin kullanımı hızlı bir şekilde artmıştır. Bu polimer malzemelerin bir kısmı farklı karşı yüzeylere temas ederek çalışmaktadır. Malzemelerin birbirleri ile teması ise aşınma ve sürtünme olayını ortaya çıkarmıştır. Aşınma sonucu temas eden her iki yüzeyde de malzeme kaybı, hassasiyetin kaybolması, malzeme kırılması ve parçalar arasındaki açıklığın artması gibi birçok istenmeyen durum meydana gelecektir. Bu yüzden, aşınma hem dünya ekonomisi hem de Türkiye ekonomisi için oldukça önem arzeden bir konudur.

Aşınma ve sürtünmeyi azaltmak, malzemelerin ömrünü uzatmak ve işçilik masraflarını minimize etmek için endüstride kullanım alanı olan bazı mühendislik polimerlerinin tribolojik davranışları uzun zamandan beri ülkemizde ve dünyada birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir.

Bu araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda, farklı polimer ve polimer esaslı kompozit malzemeler üzerine çalışmışlardır. Bunlardan bazılarında ise polimerlerin sürtünme ve aşınma davranışları üzerine kayma hızının, uygulanan yükün, sıcaklık ve yüzey pürüzlülüğü gibi önemli parametrelerin etkileri incelenmiştir. Bu çalışmalardan bazıları ise aşağıda verilmiştir.

Paulo ve arkadaşı [1]; Katkısız PEEK polimeri ve ağırlıkça %30 oranında cam elyaf ve karbon elyaf katkılı PEEK kompozitlerinin aşınma ve sürtünme davranışlarını incelemişlerdir. Aşınma testleri, pim disk aşınma sistemi kullanılarak 1045 çeliğine karşı, 15000m kayma mesafesinde ve kuru ortam şartlarında gerçekleştirilmiştir. Testlerde, 2,68MPa ve 8.0 MPa olmak üzere iki farklı basınç ve 0,25 ve 0,75m/s kayma hızı kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, %30 karbon elyaf katkılı PEEK kompozit malzemenin katkısız PEEK ve %30 cam elyaf katkılı PEEK kompozit malzemeye göre daha az sürtünme katsayısı ve aşınma oranı gösterdiği belirlenmiştir.

Sümer ve arkadaşları [2]; Katkısız PEEK ve %30 cam elyaf takviyeli PEEK malzemelerini kullanarak AISI D2 çelik diske karşı 1.77, 3.54 ve 5.30 MPa basınç,

0.80 ve 1.60 m/s kayma hızları altında kuru ve sulu ortam şartlarında aşınma deneylerini yapmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda ise kuru ve sulu ortam şartlarında, katkısız PEEK malzemenin aşınma oranının ve sürtünme katsayısının %30 cam elyafı PEEK' e göre daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

Lu ve arkadaşı [3]; Katkısız PEEK ve PTFE katkı PEEK kompozitin sürtünme davranışlarını, kuru kayma şartlarında çelik diske karşı incelemiştir. %5'den % 85'e kadar farklı oranlarda PTFE katkı PEEK kompozitlerin aşınma oranının katkısız PEEK'den daha az olduğu bulunmuştur. En düşük aşınma oranı ise % 5 PTFE katkı PEEK kompozitinde elde edilmiştir.

Mimaroğlu ve arkadaşları [4]; Saf PEI ile ağırlıkça %20 oranında cam elyaf katkı PEI kompozit malzeme üretmişlerdir. Bu malzemelere AISI D2 çelik disk kullanarak, 0.5, 1.0, 1.5m/s kayma hızı ile 0.69, 1.38 ve 2.07 MPa basınç kullanılarak kuru ortam şartlarında sürtünme ve aşınma testleri uygulamışlardır. Bu testler sonucunda, katkısız PEI'nin katkı PEI'ye göre aşınma ve sürtünme oranının yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Ünal ve arkadaşları [5]; Katkısız PTFE ve %17 oranında cam elyaf, %25 oranında bronz ve %35 oranında karbon katkı PTFE kompozit malzemelerin aşınma ve sürtünme davranışlarını incelemiştir. Aşınma testleri, kuru ortamda, AISI 440C paslanmaz çelik diske karşı, 0.32, 0.64, 0.96, 1.28 m/s kayma hızı ile 5, 10, 20 ve 30 N yüklerde gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, saf PTFE malzemenin diğer katkı PTFE malzemelere göre aşınma oranının daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir. PTFE polimerine katılan bronz, cam elyaf ve grafit gibi katkıların kompozit malzemenin aşınma oranını düşürmede etkili olduğunu belirtmişlerdir.

Ünal ve arkadaşları [6]; %30 cam elyaf katkı PPS, alifatik poliketon, poliamid 66, poliasetal ve çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen (ÇYMAPE) polimer ve kompozitlerini kullanarak, farklı kayma hızı ve yükler altında aşınma ve sürtünme deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde aşındırıcı malzeme olarak 150-1200 numara zımpara kağıtları kullanılmış ve kayma mesafesi 50-200m olarak belirlenmiştir. Çalışmada, farklı kayma hızlarının (0.5-2.0m/s) ve uygulanan yükün

(0.35-1.05MPa) aşınma oranına ve sürtünme katsayısına etkileri incelenmiştir. Deneyle sonuçunda, uygulanan yük miktarının artmasıyla aşınma oranı ve sürtünme katsayısının düştüğü, fakat kayma hızının artması ile aşınma oranı ve sürtünme katsayısının arttığını tespit etmişlerdir.

Li ve arkadaşları [7]; Poliamid 6/poliüretan (PA6/PU) karışımına hacimce %0 ile %5 arasında değişen oranlarda cam elyaf ilave ederek kompozit malzeme üretmişlerdir. Üretilen kompozitlerin çekme mukavemeti ve aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Yapılan bu incelemeler sonucunda PA6/PU karışımına ilave edilen cam elyaf oranı arttıkça çekme mukavemetinin ve sürtünme katsayısının arttığı, aşınma oranının ise düştüğünü tespit etmişlerdir.

Ünal ve arkadaşları [8]; PTFE ve PTFE esaslı kompozit malzemeleri kullanarak 400–1200 numara zımpara kağıtlara karşı, 1m/s kayma hızında, 4-10N yük aralıklarında aşınma testleri gerçekleştirmişlerdir. Testler sonucunda, uygulanan yükün artmasıyla aşınma oranının arttığını belirlemişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda en az aşınmanın PTFE+%17 cam elyaf takviyeli kompozit malzeme, en fazla aşınmanın ise katkısız PTFE malzeme olduğunu tespit etmişlerdir.

Mimaroglu ve arkadaşları [9]; PEEK, PTFE ve polifenilensülfid (PPS) polimerlerine ağırlıkça %0-30 oranlarında bronz ve cam elyaf katarak kompozit malzemeler üretmişlerdir. Aşınma testlerinde, karşı aşındırıcı disk olarak katkısız PEEK, alifatik polieton (APK) ve %15 cam elyaf takviyeli doymamış poliester (BMC) kullanmışlardır. Aşınma testlerini 20-60N yük ve 0,5m/sn kayma hızı altında gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalar sonucunda, en düşük sürtünme katsayısının %15 cam elyaf takviyeli poliester (BMC) diske karşı çalışan APK polimerinde elde edildiği belirlenmiştir. Uygulanan yükün artmasıyla, PEEK, PEEK+%20 cam elyaf ve PTFE+%17 cam elyaf polimerlerinde aşınma oranının azaldığı diğer polimer kompozitlerinde arttığı belirlenmiştir.

Ünal ve arkadaşları [10]; Poliamid 66, poliamid 46 ve PPS malzemelerine ağırlıkça %30 oranında cam elyaf malzemesi katarak kompozit malzeme üretmişlerdir. Ürettikleri bu kompozitlere %15 cam elyaf takviyeli doymamış poliester (BMC)

disk malzemesi ile 0,5 m/sn kayma hızında ve 20N'dan 60N'a kadar yük kullanarak aşınma testleri uygulamışlardır. Yapılan çalışmalar sonucunda yük oranı arttıkça sürtünme katsayısı ve aşınma oranının arttığını tespit etmişlerdir.

Ünal ve arkadaşları [11]; Katkısız poliamid 6, ÇYMAPE ve poliasetal malzemelerini enjeksiyon kalıplama yöntemiyle üretmişlerdir. Ürettikleri malzemelere, 20N yükten 40N yüke kadar, 0,88m/sn ve 1,76m/sn kayma hızlarını kullanarak çelik disk üzerinde aşınma testlerini uygulamışlardır. Sonuç olarak yük ve hız miktarının artmasıyla sürtünme katsayısının arttığını tespit etmişlerdir.

Elliott ve arkadaşları [12]; 230 ve 300 Vickers sertlik değerlerine sahip iki farklı PEEK polimeri ile 600 Vickers sertliğine sahip karbon elyaf katkılı APC2 kompozit malzemesini kullanarak aşınma testleri gerçekleştirmişlerdir. Aşınma testleri, 15000m kayma mesafesi kullanılarak pim disk aşınma cihazında, 0.18m/s kayma hızı ve 1MPa yük altında 316S çelik diske karşı gerçekleştirilmiştir. Yaptıkları çalışma sonucunda, APC2 kompozitinin aşınma oranı ve sürtünme katsayısının diğer malzemelerden daha düşük olduğunu tespit etmişlerdir.

Chang ve arkadaşları [13]; Polieterimid (PEI) polimerine hacimce %5grafit+%15karbon fiber ve %5TiO<sub>2</sub>+%5grafit+%15karbon fiber katarak kompozit malzemeler üretmişlerdir. Aşınma testleri, pim disk aşınma cihazı kullanılarak kuru şartlar altında 20km kayma mesafesi boyunca çelik diske karşı, 1m/s kayma hızında ve iki farklı basınç (1 ve 4 MPa) altında gerçekleştirilmiştir. Sıcaklığın aşınma oranına etkisini incelemek için testler oda sıcaklığından 70°C sıcaklığa kadar değişen sıcaklık aralıklarında yapılmıştır. Elde edilen sonuçlarda, 1 ve 4 Mpa basınç altında, sıcaklığın artmasıyla sürtünme katsayısı değerlerinin düştüğünü, aşınma oranının ise 1MPa basınçta %5grafit+%15karbon fiber kompozitinde arttığını, %5TiO<sub>2</sub> +%5grafit+%15karbon fiber kompozitinde ise azaldığını gözlemişlerdir.

Başka bir çalışmada ise Wang ve arkadaşları [14]; katkısız poliimid ve poliimid polimerine sırasıyla hacimce %3, %10 ve %10 oranlarında Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, grafit ve karbon elyaf katarak ikili kompozit malzeme ve hibrit kompozit malzemeler üretmişlerdir. Ürettikleri bu malzemelere 0,43m/sn kayma hızında ve 200N yük altında GCr15

çelik diske karşı aşınma testi uygulamışlardır. Aşınma deneyleri sonucunda hibrit kompozitlerin, ikili kompozit malzemelere ve katkısız poliimid malzemesine göre daha az sürtünme katsayısına sahip olduğunu ve ayrıca karbon elyaf takviyeli hibrit kompozit ve ikili kompozit malzemelerin tümünde aşınma oranının diğer malzemelerden daha az olduğunu tespit etmişlerdir.

Koç ve arkadaşları [15]; %20 silikon-vaks katkılı poliasetal ve %30 kısa cam elyaf katkılı poliasetal polimer kompozitlerine aşınma testleri uygulamışlardır. İki farklı kayma hızı (0,5-1m/sn) ve üç farklı yük (60N, 80N ve 100N) kullanarak çelik disk malzemeye karşı aşınma deneylerini yapmışlardır. Çalışma sonucunda, en düşük sürtünme katsayısının poliasetal+%20 silikon/vaks kompozitinde olduğunu tespit etmişlerdir. Katkısız poliasetal ve %20 silikon/vaks katkılı kompozitin sürtünme katsayısı, uygulanan yükü azalırken, %30 cam elyaf katkılı kompozitin sürtünme katsayısının arttığını tespit etmişlerdir. En düşük aşınma oranı ise %30cam elyaf katkılı poliasetal kompozit malzeme elde edilmiştir.

Hu [16]; Silindir-takoz aşınma yöntemiyle, PTFE ve POM katkılı PA6G-MC polimerlerinin, 200N yükte ve 0.84 m/s kayma hızında aşınma deneylerini yapmıştır. Yapılan bu deneyler sonucunda POM ve PTFE katkıların sürtünme ve aşınma özelliklerini iyileştirdiği gözlenmiştir.

Kapoor ve arkadaşı [17]; %35PbS katkılı PA11'in 1.0 m/s kayma hızında ve 0.65 MPa yükteki aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Yapılan bu deneyler sonucunda katkılı PA11'in katkısız PA11'e göre daha az aşındığı tespit edilmiştir.

Bahadur ve arkadaşları [18]; Poliamid polimerine ilave ettiği CaS, CaO ve CaF<sub>2</sub> gibi dolguların aşınma özelliklerine etkisini incelemişlerdir. CaS ve CaO, dolgu malzemesi olarak kullanıldığında Poliamidin aşınma oranında azalma, CaF<sub>2</sub> dolgu malzemesi kullanıldığında ise aşınma oranında artış olduğu tespit edilmiştir. CaS-PA ve CaO-PA kompozitlerinde, karşı disk yüzeyinde üniform, sürekli ve ince bir film tabakası oluşumu gözlenmiştir.

Liu ve arkadaşları [19]; Sulu ortam şartları altında PA, ÇYMAPE ve PA/ÇYMAPE karışımlarının aşınma davranışlarına, kayma mesafesi, yüzey pürüzlülüğü, uygulanan yük ve kayma hızının etkilerini incelemişlerdir. Yapılan çalışmada uygulanan yükün ve karşı yüzey pürüzlülüğünün en önemli kontrol edilebilir parametreler olduğunu ve kayma mesafesi ile kayma hızının ise aşınma üzerinde daha az etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Bahadur ve arkadaşı [20, 21]; Yapılan deneysel çalışmalarda polietereterketon'un aşınma ve transfer film özelliklerine bakır bileşimlerinin etkilerini incelemişlerdir. Kuru ortam şartlarında, CuO, CuS ve CuF<sub>2</sub> inorganik dolguların ilavesiyle yapılan aşınma deneyleri sonucunda aşınmanın büyük ölçüde azaldığı fakat sürtünme katsayısının arttığı tespit edilmiştir. Bahadur ve arkadaşı [22]; PA malzemeye %35 oranında CuS dolgu malzemesi ilave ederek yaptıkları diğer bir çalışma sonucunda CuS dolgu malzemesinin aşınma oranını azalttığını belirtmişlerdir.

Franklin [23]; Yaptığı çalışmada katkısız POM, 30% cam elyaf takviyeli POM (POM+%30CE), %20 PTFE katkılı POM (POM+%20PTFE), PA66, 30% cam elyaf takviyeli PA66 (PA66+%30CE) ve ÇYMAPE gibi polimerlerin aşınma ve sürtünme davranışlarına kayma hızı ve aşındırıcı yüzey pürüzlülüğünün etkisini araştırmıştır. Düşük yüzey pürüzlülüğünde, kayma hızının artması ile birlikte PA66, POM+%20PTFE ve POM+%30CE polimerleri için aşınma oranı artarken, POM, UHMWPE ve PA66+%30CE polimerleri için azalmıştır. Yüzey pürüzlülüğünün artması ile katkısız POM polimerinin aşınma oranı artarken, POM+%30CE ve PA66+%30CE polimer kompozitlerinde azaldığı tespit edilmiştir.

Srinath ve arkadaşı [24]; Nano-clay katkılı Poliamid 6 kompozitlerin kuru ve sulu ortam şartları altındaki 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 azaldığını belirtmişlerdir. Kuru ortamda artan yük ile birlikte sürtünme katsayısı sürekli artmıştır. Hem kuru hem de sulu ortam şartları altında yükün artması ile aşınma oranı değerlerinin arttığını gözlemişlerdir.

Dickens ve Sullivan [30]; Yaptıkları çalışma sonucunda, kayma hızının artmasıyla sürtünme katsayısının PPO ve PEEK polimerlerinde azaldığını, PTFE polimerinde ise arttığını belirlemişlerdir. PPO, PEEK ve PTFE polimerleri için kayma hızının artması ile aşınma oranı artmıştır. Anderson [26]; tarafından yapılan çalışmada da çok yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (ÇYMAPE) polimeri için artan kayma hızı ile aşınma oranının arttığı belirlenmiştir.

Wang ve Li [27]; Yaptıkları çalışmada, ÇYMAPE'nin aşınma davranışı üzerine kayma hızı ve yükün etkisini incelemişlerdir. Çalışmalar sonucunda, ÇYMAPE'nin aşınma davranışının uygulanan yüke göre kayma hızından daha fazla etkilendiğini belirlemişlerdir.

Bose ve arkadaşları [28]; Poliamid 6 polimerine %5 ile %40 arasında değişen oranlarda mika ilave edilerek ürettikleri kompozitin elastiklik modülü, çekme mukavemeti, %uzama ve dielektrik özelliklerini belirlemek için bir takım deneyler yapmışlardır. Deneyler sonucunda mika ilavesiyle elastite modülü, çekme mukavemeti ve dielektrik özelliklerinin arttığı ancak % uzamanın ise düştüğü tespit edilmiştir.

Bu çalışmada, katkısız Poliamid-imid (PAI), %12 grafit ve %3 PTFE katkılı Poliamid-imid, %30 karbon elyaf katkılı Poli-eter-eter-ketone, %30 cam elyaf katkılı Polieteterketone, %40 cam elyaf katkılı Polifenilensülfid, %20 cam elyaf katkılı Polisülfon, %15 PTFE katkılı Polieterimid, Poliketon (PK) ve sıvı kristal polimer (LCP) gibi mühendislik polimer ve kompozitlerinin aşınma ve sürtünme davranışları incelenmiştir.

Aşınma deneyleri, pim disk aşınma cihazında 2 km kayma mesafesinde gerçekleştirilmiş olup 10-200N yük aralıklarında ve 0.5-4.0m/s kayma hızlarında gerçekleştirilmiştir. Karşı disk olarak 316L paslanmaz çelik disk kullanılmıştır. Çalışmada ayrıca, sıcaklığın etkisini incelemek için, oda sıcaklığından (23°C) başlayarak 250°C'ye kadar sıcaklık aralıklarında, uygulanan yüke ve kayma hızına

bağlı olarak aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Disk ve pim aşınma yüzeyleri optik mikroskop yardımıyla incelenmiştir.

Yapılan çalışmalar sonucunda, yüksek sıcaklık polimerleri arasında elektrik endüstrisinde kullanmak için aşınma ve sürtünmeye karşı direnci en iyi olan yüksek performanslı polimer/çelik disk çifti belirlenmiş ve kullanım açısından sıralama yapılmıştır.



## BÖLÜM 2. POLİMERLER

### 2.1. Polimerlerin Sınıflandırılması

Polimerler, organik molekül zincirlerinden oluşan yüksek molekül ağırlıklı kimyasal bileşiklerdir. Genellikle zincir bağı, karbon-karbon şeklindedir. Moleküller içinde karbon atomu genellikle dört değerlidir. Bu durumda karbon atomları diğer atomlar veya gruplarla dört tek bağ meydana getirirler.

Düz zincir veya doğrusal polimer molekülü, molekülündeki her bir karbon atomunun diğer karbon atomlarına ve başka atom veya atom gruplarına ikişer bağla bağlanması sonucunda oluşur. Zincirin uçlarındaki karbon atomları diğer atomlar veya atom grupları ile üçlü bağlar oluştururlar. Tek karbon - karbon bağında bağ çevresinde bir dönüş serbestliği vardır. Buna göre dört karbonlu bir sistemde karbon atomlarının uzaysal düzenleri de farklı olur. Bağlar çevresinde serbest dönme nedeniyle sistem sürekli olarak bir düzenden diğerine değişir. Bu nedenle düz bir molekül bulma olasılığı çok zordur. "Düz zincir" terimi ise zincirin fiziksel şekli ile değil, sadece kimyasal yapısı ile ilgilidir.

Her karbon atomunun zincire girmeyen iki bağı, hidrojen atomuna veya basit bir organik grubun (örneğin  $\text{CH}_3$ ) karbon atomlarına bağlanabilir. Böyle bir grup zincirde düzenli aralıklarla yer alabilir. Bu tip moleküllere de yine "doğrusal zincir" denir.

Polimerde bazı karbon atomları, basit grupların dışındaki karbon atomları ile üç ya da dört bağ meydana getiriyorsa ve molekül büyümüşse bu tip polimerlere " karmaşık polimer" denir. Karmaşık polimerler genellikle iki aşamada meydana gelir. Birinci

aşamada daha çok doğrusal yapıya oldukça küçük moleküller oluşur. İkinci aşamada ise bu küçük moleküller uygun şartlar altında reaksiyonlara girerek aralarında bağlar meydana getirirler ve karmaşık polimeri oluştururlar. Bu ikinci işleme "çapraz bağlanma" adı verilir [29].

## 2.2. Katılma ve Kondenzasyon Polimerizasyonları

Oluşum reaksiyonları açısından polimer molekülleri, katılma veya kondenzasyon tipi olarak sınıflandırılır. Bu sebepten polimerlerin katılma polimerizasyonu ve kondenzasyon polimerizasyonu şeklinde sınıflandırılması daha doğrudur.

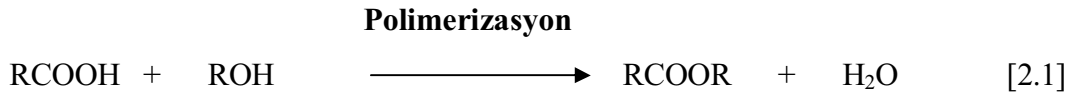
Karbon, sadece düzgün dört yüzlü bağ şeklinde değil farklı olan bağ düzenlerinde de bulunabilir. Bunlardan birinde bir karbon atomu diğer bir karbon atomu ile ikili bir bağ, başka atomlar veya atom gurupları ile de iki tane tekli bağ yapar. Aynı düzlemde olan bu bağlar arasındaki açı  $120^\circ$  dir. Bu tip bağlarda polimerleşme reaksiyonu sırasında karbon - karbon çift bağı genellikle bozulur. İki karbon atomu dörtgen valans durumuna dönerek tek bir bağla bağlanır. Karbon atomunun çift bağın açılması ile ortaya çıkan dördüncü bağ ise reaksiyona giren diğer bir atomla bağlanır. Bu oluşan reaksiyonlara katılma reaksiyonları denir.

Bu katılma reaksiyonları sonucunda küçük ve yeni bir molekül yapı meydana gelir. Bazen bu moleküllerin birbirleriyle reaksiyona girmeleride mümkündür. Bu reaksiyon sonucunda molekülün karbon atomları ile diğer molekülün karbon atomları arasında yeni bağlar meydana gelir. Çok fazla sayıda moleküller ile oluşan bu tip katılma reaksiyonu, çok büyük bir doğrusal molekül meydana getirir. Katılma reaksiyonu metoduyla oluşan en basit polimer polietilen (politen)  $-(CH_2 - CH_2)_n$  molekülüdür.

Endüstride çok kullanılan polimerlerden olan polivinil klorür, polistiren ve politetrafloretillen polimerleri de aynen polietilen gibi vinil klorür, stiren ve florlu monomerlerin katılma reaksiyonları ile üretilir.

Pek çok organik molekülde, hidrojen ve karbondan daha aktif olan gruplar bulunur.

Organik bileşiklerin, bütün üyeleri aynı fonksiyonel gruplardan oluşan asitler, alkoller, aminler gibi gruplarda sınıflandırılabilir. Organik bileşikler arasındaki reaksiyonlar genellikle bu fonksiyonel gruplar arasındaki reaksiyonlar ile oluşur. Örneğin bir asit ve alkol arasındaki reaksiyon, karboksil ve hidroksil grupları arasındaki reaksiyondan ibarettir ve sonuç olarak su ve aşağıdaki kimyasal reaksiyon sonucu bir ester meydana gelir:



İki molekülün fonksiyonel gruplarının, su veya başka bir basit molekül meydana getirerek birleşmeleri sonucu oluşan bu tip reaksiyonlara "kondensasyon reaksiyonu" denir. Ancak, alkol grubu veya mono asit grubu ile meydana gelen kondensasyon reaksiyonları ile polimer elde edilemez. Bunun için molekülde birden fazla fonksiyonel grup olması gerekir. Birinci adımda kondensasyon reaksiyonu ile yeni bir dibazik asit veya daha büyük moleküllü bir dihidrik alkol oluşur. Bunlar da bir polimer oluşuncaya kadar birbirleriyle reaksiyona girmeye devam ederler. Bu metotla üretilen polimerlere «kondenzasyon polimerleri» denir. Asit klorürlerle alkoller veya aminler de kondenzasyon reaksiyonlarına girebilir.

### 2.3. Polimerleşme

Polimeri meydana getiren küçük moleküllere "monomer" adı verilir. Katılma polimerizasyonunda monomerin ve polimerde tekrar eden ünitenin bileşimleri aynıdır. Bir kopolimerdeki monomer ünitelerinin sayıları değiştirilerek farklı özelliklerde polimerler elde edilebilir. Örneğin  $\text{CH}_2=\text{CH-R}$  tipinde bir monomer polimerleştirildiğinde üç tip farklı polimer meydana gelir.

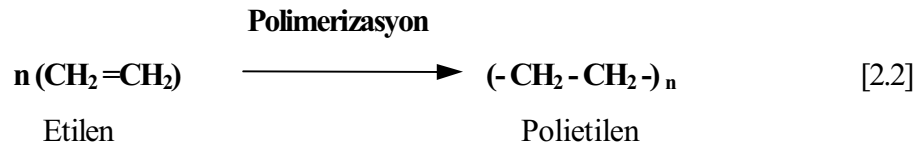
- 1) Bütün (R) gruplarının zincirin her bir tarafında bulunduğu polimerlere "izotaktik polimer" denir.
- 2) (R) gruplarının geliş güzel bir şekilde dağılmaları halinde polimere "ataktik

polimer" adı verilir.

- 3) Polimer zincirinde bulunan (R) grupları zincirin her iki tarafında birer atlıyarak yer alıyorsa bu polimere "sindiyotaktik polimer" denir.

## 2.4. Polimerlerin Sınıflandırması

Polimerler, en genel haliyle yapay ve doğal olarak iki gruba ayrılır. Yapay polimerler genellikle çok sayıda tekrarlanan "monomer" denilen basit ünitelerden meydana gelir. Bunların adlandırılmasında çok miktarda anlamına gelen "poli" sözcüğü ile "mer" sözcüğü birleştirilir. "Poli" kelimesi Yunancadan gelir ve "çok" anlamındadır. "Mer" sözcüğü ise "birim" anlamındadır. Yani poli-mer, çok sayıda birimden meydana gelen yapı anlamındadır. Tanımın açıklanması polietilen üzerinde yapılsa, etilen monomerinin polimerizasyonu ile (n) sayıda monomer içeren polietilen elde edilmektedir, (n) ise polimer zincirindeki monomer sayısını ifade eder [30].



Tablo 2.1'de gösterildiği gibi polimerler 5 ana grupta incelenebilir. Polimerler kimyasal bileşimlerine göre organik ve inorganik olmak üzere iki gruba ayrılırlar [30]. Organik polimerlerde başta karbon atomu olmak üzere oksijen, hidrojen, azot ve halojen atomları bulunur. Bir atomun polimer ana zinciri üzerinde bulunabilmesi için en az iki değerlikli olması şarttır. Bu sebeple halojenler ve hidrojenler ana zincir üzerinde bulunamazlar. İkinci koşul ise, ana zincir üzerinde yer alan atomların arasındaki bağ enerjisinin yeterli olmasıdır. C-C bağ enerjisi 80 kcal/mol, O-O bağ enerjisi 34 kcal/mol ve N-N bağ enerjisinin 37 kcal/mol olduğu dikkate alınır, neden birçok organik polimerde, ana zincirin karbon atomlarından oluştuğu anlaşılır.

Tablo 2.1 Polimerlerin sınıflandırılmasının şematik gösterilmesi

Kimyasal Bileşimlerine	Yapılarına	İşleme Esasına	Kullanım Alanına	Fiziksel Yapı
Organik	Homopolimer	Termoplastik	Plastikler	Amorf
İnorganik	Kopolimer	Termoset	Fiberler	Kristalin
	Termopolimer		Kaplamalar	YarıKristalin

İnorganik polimerlerde ise ana zincirde (C) yerine silisyum (Si), germanyum (Ge), bor (B), fosfor (P) gibi elementler bulunur. Ana zincirde bulunan elementlerin bağ enerjileri, organik polimerlerde bulunan elementlerin enerjilerinden daha yüksektir. (Örneğin B–O bağ enerjisi 119,3 kcal/mol, Si–O bağ enerjisi 89,3 kcal/mol dür.) Bu yüzden, organik polimerler daha çok kullanılmalara rağmen, inorganik polimerler daha yüksek mekanik ve termal dayanıklılığa sahiptirler. Doğal ve sentetik zeolitler ve alüminasilikatlar birer inorganik polimer sayılabilir.

Polimerler yapılarına göre homopolimer, kopolimer ve terpolimer olarak üç sınıfa ayrılır. Homopolimer polimeri tek bir monomerin tekrarlanması ile elde edilirken, kopolimer polimeri ise iki değişik monomer ile elde edilir. Üç farklı cins monomerden oluşan polimerlere ise terpolimer denir. Örneğin, polietilen (PE) bir homopolimerdir, stiren-butadien kauçuğu (SBR) kopolimer ve akrilonitril-butadien-stiren (ABS)'de bir terpolimerdir [29].

#### **2.4.1. Termoset ve termoplastikler**

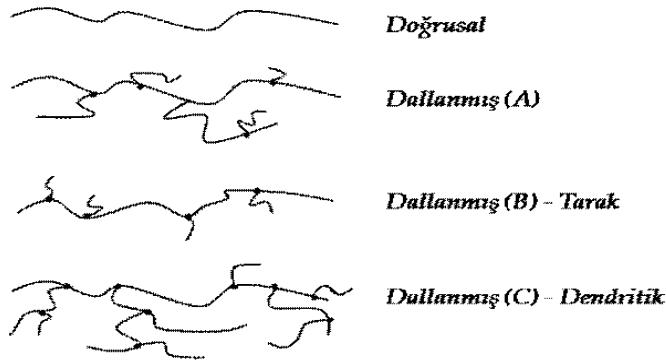
Plastiklerin en önemli sınıflandırılma şekli, termoplastik ve termoset adları altında işleme yöntemlerine göre yapılan sınıflandırmadır. Termoplastik malzemeler ısıtıldıklarında kalıcı değişime girmeyen plastiklerdir. Bu plastikler ısıtıldıklarında akıcı hale gelirler ve soğutulduklarında ise, içinde buldukları kalıbın şeklini alırlar. Molekülleri doğrusaldır ve çapraz bağlanamazlar. Buna karşın termoset plastikler büyük ölçekte çapraz bağlanabilirler. Kısmen polimerleşmiş durumda ısıtılarak kalıplanırlar. Kalıplama esnasında polimerleşme ilerleyerek plastik çapraz bağlanmaya geçer ve akma özelliğini kaybeder.

Kısmen polimerleşmiş durumdaki termoset malzemelere "reçine" adı verilir. Reçinenin nihai duruma getirilme işlemine "pişirme" denir. Pişirme işleminden sonra polimer artık plastik olarak adlandırılır [31].

### 2.4.1.1. Termoplastikler

Termoplastikler, uzun bağımsız Wan der Waals bağ zincirleri halinde bulunan, ısıtıldığı zaman eriyebilen ve yeniden şekillendirilebilen polimerlerdir. Eritildikten sonra yaygın kullanılan kalıplama teknikleriyle her türlü şekilde kalıplanabilirler. Üretimde ya da kalıplama esnasında eriyik halden soğutulan termoplastik polimerler kolaylıkla kristal yapıyı kuramazlar. Çünkü polimer zincirinin çokça kıvrılan ve büzülen yapısını, düzenli bir yapıya sokup, polimerin kristal oluşturması için yüksek enerjiye ihtiyaç vardır. Termoplastikleri oluşturan kristalleşebilen zincirler ise tam anlamıyla mükemmel bir kristal yapı kuramaz. Bunun yerine hem amorf hem de kristal yapıyı barındıran yarı-kristal yapı oluştururlar. Yarı-kristalin içindeki amorf yapı elastikiyet sağlarken, kristal yapı da mukavemeti ve bükülmezliği sağlar [32].

Şekil 2.1'de görüldüğü gibi termoplastik polimerlerin zincirleri doğrusal ya da dallanmış yapıda bulunurlar.



Şekil 2.1. Doğrusal ve dallanmış termoplastik zincir yapısı [33]

### 2.4.1.2. Termoset plastikler

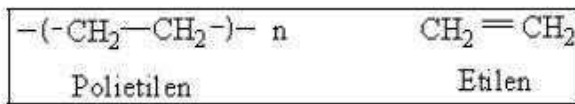
Isı işlemiyle yalnız bir defa istenilen şekli alabilen plastiklerdir, yani tekrar ısıtıldığında şekillendirilemezler. Ayrıca bu plastikler solventlerde çözünmezler. Termosetler polikondensasyon reaksiyonu ile elde edilir ve genellikle çapraz bağlı bir yapıya sahiptirler. Bu plastiklerde polimerizasyon işlemi, malzemeyi ihtiva eden monomerlerin bir araya getirildiği reaktörlerde başlar ve kalıplama işlemi sırasında biter.

## 2.5. Termoplastik Malzemeler

### 2.5.1. Genel amaçlı termoplastikler

#### 2.5.1.1. Polietilen (PE)

Polietilen, etilen monomerinin polimerizasyonu sonrası oluşan uzun zincirli bir yapıya sahip makromoleküllü bir polimerdir (Şekil 2.2). Polietilen bir homopolimerdir. Polietilen'in tarihine bakıldığında, ilk üretilen polietilen türü, alçak yoğunluklu polietilen (AYPE)'dir [34].



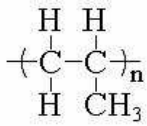
Şekil 2.2. Polietilen ve etilen monomerinin şematik gösterimi [33]

Polietilen, 2. Dünya Savaşı sırasında kalıplama, paketleme, elektronik ve elektrik nakli gibi alanlarda hammadde olarak kullanılmıştır. Sonrasında Ziegler-Natta diye bilinen katalizörün icadıyla, etilen monomeri daha düşük basınçta polimerizasyon işlemine tabi tutulmuş ve yapının daha düzenli hale gelmesi sağlanmıştır. Bu sayede yüksek yoğunluklu Polietilen (YYPE) ve lineer zincirli alçak yoğunluklu Polietilen (LAYPE) üretimi devreye girmiştir [34].

1980' li yılların başında Metalosen katalizörün geliştirilmesiyle Polietilen zincir boyu kontrol edilebilir bir konuma gelmiştir. Bu katalizörle üretilen Polietilen'in fiziksel özellikleri daha üstün hale gelmiştir. Günümüzde Polietilen, plastik üretiminin %40' ını oluşturmaktadır. Birçok plastik işleme yöntemiyle şekillendirilebilen polietilen, film, levha, profil gibi ürünlerin üretiminde kullanılmaktadır [35].

### 2.5.1.2. Polipropilen (PP)

Polipropilen, kırılganlığı az, ısıya karşı dirençli, yoğunluğu düşük, kolayca kaynak edilebilen, çekme dayanımı yüksek olan beyaz renkli ve oda sıcaklığında katı halde bulunan bir termoplastiktir (Şekil 2.3). Çekme dayanımı yaklaşık olarak 3500 N/cm<sup>2</sup>'dir. Polipropilen 1950 yılların ortalarında, propilen monomerinin polimerizasyonu sırasında bulunmuştur [35].

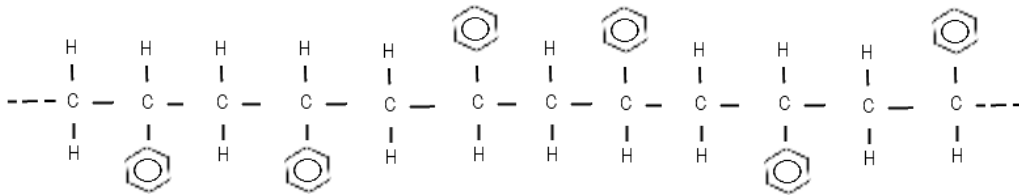


Şekil 2.3 Polipropilen polimerinin yapısı [33]

Hafif bir plastik olan polipropilenin yoğunluğu 0.905 gr/cm<sup>3</sup>'tür. Elektrik olarak yalıtıcıdır ve iyi bir izolasyon maddesidir. Polipropilen, sentetik çim yapımında, halı ve yer döşemesi yapımında, oyuncak sanayide, gıda ambalajlarında, ev aletlerinde, çeşitli otomobil parçalarında, plastik boru üretiminde, ambalaj sanayisinde sıklıkla kullanılmaktadır [35].

### 2.5.1.3. Polistiren (PS)

Polistiren, monomer yapıdaki stiren'in polimerizasyonu ile üretilen bir polimerdir. Şekil 2.4'de Polistiren polimerinin zincir yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.4 Polistiren zincir yapısı

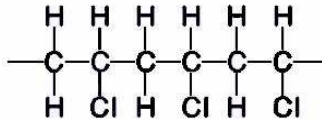


100 °C' ye kadar katı ve şeffaf bir haldeyken, 100 °C' nin üstünde akışkan bir hal almaktadır. Polistirenin yoğunluğu, 1.02 gr/cm<sup>3</sup>–1.06 gr/cm<sup>3</sup> arasında değişmektedir. Camı geçiş sıcaklığı ise, T<sub>g</sub>=100°C'tır. 1938 yılında ilk Polistiren üretimine başlandığı bilinmektedir. Polistiren, Polikarbonat gibi amorf bir yapıya sahiptir. Amorf yapıda olmayan diğer polimerlere göre kalıplama esnasında çekme miktarının çok az olması önemli avantajlarından birisidir [36].

Akışkanlığının mükemmel olması ve ısısal karalığı sayesinde, günümüzde Polistiren polimeri birçok alanda kullanılmaktadır. Bunlar arasında; oyuncak sanayi, radyo ve televizyon kabinleri, buzdolabı parçaları, mutfak gereçlerini sayabiliriz. Polistiren levha, film, profil ve köpük plastik haline rahatlıkla getirilebilir, bu sayede bu ürünlerin üretiminde de kullanılmaktadır [36].

#### 2.5.1.4. Polivinil klorür (PVC)

Polivinil klorür, monomer haldeki vinil klorürün polimerizasyonu ile üretilir (Şekil 2.5).



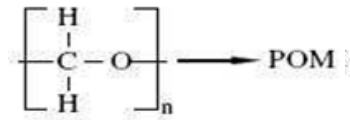
Şekil 2.5 Polivinil klorür polimerinin zincir yapısı [33]

Polivinil klorürün çekme dayanımı 140–240 kgf/cm<sup>2</sup>, özgül ağırlığı ise 1,4 gr/cm<sup>3</sup> civarındadır. PVC sert bir plastik olup, daha yumuşak ve daha esnek hale getirmek için plastikleştiriciler ilave edilir. Boru, profil, yer döşeme malzemeleri, su hortumları ve cam çerçeveleri (pencere) üretiminde oldukça fazla kullanılmaktadır [37].

## 2.5.2. Mühendislik plastikleri

### 2.5.2.1. Poliasetal (POM)

Bir mühendislik termoplastiği olan POM (Poli-Oksi-Metilen), Şekil 2.6'da gösterilen monomerin formaldehit polimerizasyonu ile elde edilmiştir. POM'un en belirgin olan özellikleri dayanıklılık ve sertliktir. Bu özellikler, kimyasal yapısında bulunan oksijen ve metilen gruplarının yüksek orandaki kristaliniteye sahip olmasındandır [38].



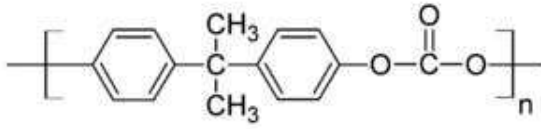
Şekil 2.6. POM Zincir Yapısı [33]

Günümüzde birçok alanda kullanılan Poliasetalin, ergime sıcaklığı 165°C ile 175°C, yoğunluğu 1,41–1,43 gr/cm<sup>3</sup> arasındadır. Sürtünme gereken yerlerdeki kullanım kolaylığı ve dayanıklılığından, fermuar, pim, toka ve yakıt sistemleri gibi ürünlerde kullanılmaktadır.

### 2.5.2.2. Polikarbonat (PC)

Polikarbonat düşük özgül ağırlığı, iyi ısı yalıtımı ve dayanıklılığı, darbelere karşı direnci ile önemli bir mühendislik termoplastiğidir. Polikarbonatların yoğunluğu 1,20 gr/cm<sup>3</sup>'tür. Camsı geçiş sıcaklığı (T<sub>g</sub>), 147°C' dir. 320°C'de ise polikarbonat işlenebilir hale gelir.

Çoğunlukla bisfenol A (*bisphenol A* BPA) kimyasalından üretilse de fosgen kullanılarak da sentezlenebilir. Şekil 2.7' de Polikarbonatın zincir yapısı verilmiştir [38].

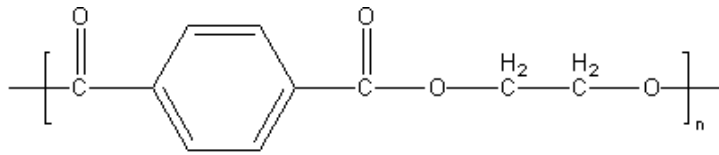


Şekil 2.7. PC Zincir Yapısı [33]

Polikarbonatlar önemli özellikleri sayesinde birçok alanda kullanılmaktadır. Otomotiv ve elektronik endüstrisinde, su şişelerinde, bilgisayar parçaları ve şeffaf ve iyi ışık geçirgenliğine sahip olması sebebiyle gözlük camı gibi optik eşyalarda kullanılmaktadır.

### 2.5.2.3. Polietilentereftalat (PET)

Dünyadaki plastik üretiminin %18'ini oluşturan poli-etilen-tereftalat, polietilen ve polipropilenden sonra en çok kullanılan polimerdir. Günlük hayatımızda en çok karşılaştığımız ve kullandığımız plastiklerden biri olan poli-etilen-tereftalat genellikle PET kısaltmasıyla kullanılır. Poliester grubundan olan PET, doğrusal bir termoplastik polimerdir ve çoğunlukla sentetik elyaf, yiyecek paketlenme endüstrisi ve özellikle şişeleme gibi alanlarda karşımıza çıkar. En çok ısıl-şekillendirme yöntemiyle şekil verilen PET malzemeler, saf PET polimerinden oluşabileceği gibi bazı uygulamalarda cam elyafı takviye edilerek mühendislik uygulamalarında da kullanılabilir [39]. Şekil 2.8'de PET polimerinin zincir yapısı verilmiştir.



Şekil 2.8 Poli(etilen tereftalat) zincir yapısı [39]

270°C gibi yüksek bir erime noktasına sahip olan Polietilentereftalat, bükülmesi zor ve sert bir zincir omurgasına sahiptir. Bu yüzden yüksek mukavemete, tokluğa ve 150°C'ye kadar yorulmaya karşı yüksek dirence sahiptir. Ayrıca PET polimeri darbeye karşı da yüksek bir dayanıklılığa sahiptir. İyi mekanik özelliklere sahip

olmasının yanı sıra gazlara, çözücü kimyasallara ve alkollere karşıda dayanıklıdır. Kuvvetli bariyer özellikler sayesinde özellikle plastik şişelerde sıklıkla kullanılan PET, oksijen geçirgenliğinin önemli olduğu zamanlarda ise poli(vinil alkol) ile kompozit oluşturularak daha iyi bir dayanım elde edilebilir.

Polietilentereftalat çok çeşitli yerlerde kullanılmaktadır. Örnek olarak perdelerde, döşeme kumaşlarında, giyim eşyalarında, lastik şeritlerinde kullanılır. PET'in başarılı gaz bariyeri özelliği sayesinde, şişeleme başta olmak üzere yiyecek-içecek paketleme endüstrisinde kullanılır. Film uygulamalarında kullanılan PET polimeri daha çok fotoğraf filmlerinde, manyetik ve X-ışını bantlarında ve elektrik yalıtımı uygulamalarında kullanılır. Bazı mühendislik uygulamalarında çelik ve alüminyum gibi metallerin yerini alarak, ofis teçhizatlarında, elektronik cihazlarda ve otomotiv parçalarında da PET kullanımı yaygındır [39].

#### **2.5.2.4. Poliamid (PA)**

Poliamid' in ilk üretimi, 1935 yılında Wallace Carothers tarafından, doğrusal kondenzasyon polimerizasyonu ile başlamıştır. Poliamid adıyla birlikte bir numaralandırma sistemi kullanılmaktadır. Bu numaralandırma sisteminin kullanılma sebebi, yapımında kullanılan monomerlerden dolayı cinsini belirlemek içindir. Poliamid için 7 tip ve 20' nin üzerinde çeşit tanımlanmaktadır [33].

Poliamid tek bir monomerden yapılıyorsa, monomerdeki atom sayısını gösteren sayı kullanılır. Tek monomerden yapılan Poliamidler;

1. Poliamid 6
2. Poliamid 7
3. Poliamid 8
4. Poliamid 11
5. Poliamid 12

Poliamid, diamin ve diasitlerin polimerizasyonu ile elde edildiğinde, numaralandırmada önce diamin'in sonra diasit'in karbon atom sayıları yazılır.

6. Poliamid 4.6
7. Poliamid 6.6
8. Poliamid 6.9
9. Poliamid 6.10

Poliamid, otomotiv yan sanayiinde, misina, diş fırçası kılı ve elyaf gibi ürün ve alanlarda kullanılmaktadır [40].

## **2.6. Yüksek Performanslı Plastikler**

### **2.6.1. Poliamid-imid (PAI)**

#### **2.6.1.1. Poliamid-imid yapısı**

Poliamidimid'ler amorfik yapıya sahip yüksek performanslı mühendislik polimer ailesinin en önemlilerinden biridir. PAI'ler yüksek sıcaklıklarda ve yük altında bile çalışabilme özelliği gösteren malzemeler olarak 260°C sıcaklıkta bile sürekli olarak kullanılabilirler. Poliamid-imid, 315–335°C sıcaklık aralığında enjeksiyon yöntemiyle ya da 315–335°C sıcaklık aralığında ekstrüzyonla şekillendirilebilir. Metallerle birlikte uygulamalarda genleşme katsayısının düşük olması önemli bir avantajdır. Ancak en uygun fiziksel özellikleri elde edebilmek için çıkan parçaların 260 °C'ye kadar oldukça yavaş bir şekilde ısıtılarak tavllanması gereklidir [41, 42].

#### **2.6.1.2. Poliamid-imid özellikleri**

Poli (amid-imid) yüksek güç ve darbe dayanımıyla tanımlanabilen kalıplanabilir, yüksek performanslı bir termoplastiktir. Özelliklerini 260 °C sıcaklığa kadar korur. Poliamid-imid'ler, enjeksiyon kalıplama tekniğiyle imal edilebilir. Kimyasallara ve radyasyona karşı dayanımı çok iyidir. Yüksek sıcaklıktaki buhar, kostik ve bazı

asitler, Poliamid-imid'e etki edebilir. Poli(amid-imid) özellikleri mineral, cam elyaf, grafit-elyaf vb. dolgularla kompozit haline getirilerek kullanılabilir [42].

### 2.6.1.3. Poliamid-imid kullanım alanları

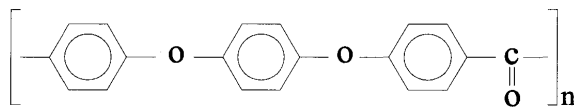
PAI'ler yüksek sıcaklık ve mukavemet özelliklerinden dolayı endüstriyel olarak değişik alanlarda ve yerlerde kullanılmaktadır. Özellikle pompalar, hidrolik ve dokuma teçhizatı, valf ve tribülenler gibi endüstriyel uygulamalarda, jet motorların parçalarında, otomotiv sektöründe, mutfak malzemelerinde, elektrik ve elektronik gibi birçok alanda kullanılmaktadır [41, 42].

### 2.6.2. Polietereterketon (PEEK) ve Poliketon (PK) Polimeri

#### 2.6.2.1. Polietereterketon ve poliketon yapısı

Aromatik polieter grubunda bulunan bu poliketonlar yüksek performanslı mühendislik polimerleri olarak bilinirler. Genellikle piyasada yaygın olarak üretilen poliketonlar, poli(eter-eter-keton) (PEEK) ve poli(eter-keton) (PEK)'dur. Her iki poliketonunda yüksek mukavemet, ısı ve kimyasallara karşı dayanımından dolayı otomotiv ve uzay endüstrisinde yaygın olarak kullanılırlar. Bu poliketonlar, 240-280°C aralığında sürekli olarak kullanabilirler. PEEK, bazı yerlerde poli(aril-eter-keton) ismiyle yani poliketon ismiyle de anılabilir. Fakat endüstride ve sanayide PEEK adıyla kullanımı daha yaygındır [43].

PEEK polimerinin polimerizasyon mekanizması Şekil 2.9'da verilmiştir. Poliketonlarda diğer termoplastik polimerleri gibi yarı kristal bir yapıdadır. PEEK kristallerinin erime sıcaklığı 340°C, camsı geçiş sıcaklığı ise 145°C dir. Poliketonların yüksek camsı geçiş sıcaklığına sahip olmasının sebebi rijit bir yapıya sahip olmalarıdır [39].



Şekil 2.9 PEEK'in molekül polimerizasyonu [44]

Poliketonlar yüksek sıcaklıklarda kimyasallara ve bozunmaya karşı oldukça dirençlidir. Poliamid polimerleri ile organik çözücülere karşı dayanımı eşdeğerdedir. Sulu ortamlarda ya da suda dayanımı polisültonlarla hemen hemen aynıdır [39].

PEEK+%30 karbon fiber ilavesi, PEEK malzemenin basma mukavemetini ve tokluğunu artırırken diğer yandan genleşme oranını düşürür. PEEK+%30 karbon fiber kompozitinin termal iletkenliği katkısız PEEK'den 3.5 kat daha iyidir. Bu yüzden yatak malzemesi olarak kullanımında ısı yayılımını daha iyi sağlar. PEEK+%30 karbon fiber kompoziti siyah renktedir.

PEEK+%30 cam fiber katkısı, PEEK polimerinin elastiklik modülünü artırır ve genleşme oranını azaltır. Bu PEEK+%30 cam fiber katkılı kompozit özellikle 150°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda tokluk, mukavemet ya da dayanıklılık gerektiren uygulamalar için idealdir. Cam fiber katkılı PEEK kompozitinin rengi açık kahverengidir.

#### **2.6.2.2. Polietereterketon ve poliketon özellikleri**

PEEK'in çözünebildiği organik çözücülerin miktarı oldukça az sayıdadır. Az sayıda da olsa bazı yüksek buharlaşma noktasına sahip olan polar organik çözücülerin içinde rahatlıkla çözünebilirler. Örnek olarak pyrene ya da benzofenon çözücüler verilebilir. Organik çözücülerde PEEK'in çözünmemesi polimer zincirinin kimyasal modifikasyonunu sınırlar. Fakat, PEEK halojenlere, halojenli bileşiklere, Bronsted ve Lewis asitlerine ve aromatik hidrokarbonlara karşı duyarlıdır. PEEK zincirinin modifikasyonu kuvvetli asitler kullanılarak yapılır ve genellikle sülfürik asit kullanılmıştır. Sülfürik asit çok kuvvetli bir asit olduğu için polimerin bozunmasına, molekül ağırlığının düşmesine ve bundan dolayı PEEK'in fiziksel özelliklerinin bozulmasına neden olur [39].

#### **2.6.2.3. Polietereterketon ve poliketon kullanım alanları**

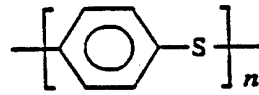
Poliketonların yüksek erime noktasına sahip olması parça üretimini zorlaştırır fakat bu soruna karşı kullanılacak bazı katkı maddeleri mevcuttur. Bu katkı maddeleri

ilave edildiğinde poliketonların viskoziteleri azalarak daha kolay bir üretim sağlanabilir. Yeni bir termoplastik sayılan poliketonlar farklı ortamlara karşı direnci ve yüksek mukavemeti sayesinde yüksek ısı gereken ve aşınmaya karşı direnç istenen yerlerde kullanılır. Yük altında çok yüksek sıcaklıklara ve kimyasallara maruz kalan ve boyutsal kararlılık beklenen parçalarda, yatak burçları, valfler, tıbbi cihazlar, elektrik yalıtım parçaları, otomotiv, ilaç, robot, uzay ve havacılık sanayi, askeri nükleer santral ve metro gibi alanlarda, tel ve kablolar için elektrik izolasyon malzemeleri olarak kullanılabilir.

### 2.6.3. Polifenilensülfid (PPS) polimeri

#### 2.6.3.1. Polifenilensülfid yapısı

Şekil 2.10'da görüldüğü gibi Poli-fenilen-sülfid (PPS), aromatik halka ve sülfür atomlarının birbirini takip etmesiyle oluşan bir polimer malzemedir [45].



Şekil 2.10 PPS polimerinin kimyasal yapısı [46]

Aromatik halkaya kükürtün bağlanmasıyla çok kararlı bir bileşik oluşur. Bu yüzden PPS kimyasal, alev direnci ve yüksek sıcaklık bakımından çok iyi özelliklere sahiptir. Bu özelliklerinden dolayı PPS polimeri imalatta defalarca kullanılabilir [46].

PPS' nin en önemli özelliği kontrollü sertleşmiş çarpaz halkalar ve zincir uzantılarından oluşmuş katlanma kapasitesine sahip olmasıdır. Viskozitenin yükselmesiyle daha iyi özellikler göstermeye başlar. PPS, mineral ve cam dolgularla çok iyi bir birleşme özelliği gösterir [46].

#### 2.6.3.2. Polifenilensülfid özellikleri

Kullanıldığı şekle ve kalınlığa bağlı olarak PPS polimeri 200–240°C arasında kullanım sıcaklığına sahiptir. PPS polimerinin kristal polimerizasyonunun ısı ile



eğilme sıcaklığı 260°C'dir. Bu yüzden, ayrıca alev geciktirici ve sıcaklık dayanımı arttırıcı maddelerin katılmasına ihtiyaç duyulmaz. PPS polimeri muadili rakip polimerler arasında sıcaklığa karşı en yüksek direnci göstermektedir. PPS'nin en önemli özelliklerinden biriside iyi yalıtım özelliğidir. Özellikle elektronik uygulamalar için uygundur. Bu tarz uygulamalarda güvenlik ve hassasiyet büyük bir önem taşır. Aşırı nem ve sıcaklıklarda güvenilirliği sağlamak için Poli-fenilen-sülfite bileşiği kullanılabilir [45, 46].

### **2.6.3.3. Polifenilensülfite kullanım alanları**

PPS polimerinin yüksek dayanım ve mükemmel kimyasal özellik göstermesi birçok alanda kullanılma olanağı sağlamıştır. Birçok uygulamada metallerin yerini almaya başlamıştır. Soğutma kuleleri ve buhar türbinlerinde sıvı damlaması PPS ile ortadan kaldırılmıştır. Yüksek ısı dayanıklılığından dolayı mikrodalga fırınlarında, otomotiv parçalarında, aşırı korozyon ortamları için kullanılan parçalarda, vana ve pompalar gibi birçok değişik sektörde PPS polimeri kullanılmaktadır [45, 46].

### **2.6.4. Polisülfon (PSU) polimeri**

#### **2.6.4.1. Polisülfonun yapısı**

Sülfon polimeri amorf, rijit, saydam, sürtünme dayanımı düşük, yüksek sıcaklıklarda hava ve suyun etkilerine dayanımı yüksektir. Bu grupta başlıca 3 tür polimer vardır. Bunlar polisülfon, polietersülfon ve polifenil-sülfon'dur. Polisülfonlar, 2.2 bis propan sodyum tuzu ve 4.4 diklor difenil sülfonun tepkimesiyle ara ürün oluşturur. Sülfon polimeri difenilen sülfon ve diaril sülfon ardışık gruplarıyla karakterize edilir [46].

Bu fenil halkaları arasında bir elektron hareketliliği vardır. Para konumundaki oksijen atomlarının rezonansı da moleküle oksitlenme direnci sağlar. Eter köprüleri ise polimere darbe ve esneklik dayanımı kazandırır [46].

#### **2.6.4.2. Polisülfonun özellikleri**

Polisülfonların çekme, basma ve sürünme dayanımları çok yüksektir. Mekanik dayanımı, sıcakla fazla değişmez. 148°C'de, çok uzun süre dayanım değerinden en fazla %10 kaybeder. 18.5atm basınç altında, eğilme sıcaklığı 174°C gibi yüksek bir değerde olduğundan, polisülfondan yapılan tıbbi araç ve gereçler herhangi bir sıcaklık yöntemiyle rahatça sterilize edilebilir. Ekstrüzyon ve enjeksiyon ile biçimlendirilebilen malzeme, profil haline getirilebilir. Karbon elyafı, cam elyafı, mineral maddeler gibi çeşitli dolgu maddeleri kullanılarak mekanik özellikleri daha da artırılabilir. Polisülfonlar elektrolitik olmayan yöntemler ile krom ve bakır kaplanabilir [46].

#### **2.6.4.3. Polisülfonların kullanım alanları**

Polisülfon polimerinin dayanımını arttırmak için cam elyaf ve teflon takviyeli olarak da üretilmektedir. Polisülfonlar işlenebilirliği ve ekonomik oluşundan dolayı geniş bir kullanım alanı vardır. Polisülfonlar, elektriksel bağlantılar, otomotiv sanayinde sigorta ve anahtar yuvaları, tıbbi araç ve gereçler, korozyona dayanıklı borular, pompalar, filtre elemanları, kamera ve saat gövdeleri, batarya yalıtma plakaları, uzay ve havacılık komponentleri imalat gibi değişik birçok alanda kullanılırlar [46].

#### **2.6.5. Polieter-imid (PEI) polimeri**

##### **2.6.5.1. Polieter-imid yapısı**

İlk kez 1982 yılında sentez edilen bu termoplastik polimer yüksek performanslı mühendislik malzemelerinden biridir. Isıl direnci, elektriksel ve yüksek mekanik özellikleriyle dikkat çekmekte olup değişik işleme süreçlerine uygundur. Polieterimid dolgusuz, %30 cam elyafı ve %30 karbon elyafı olarak imal edilmektedir [46].

### 2.6.5.2. Polieter-imid özellikleri

Polieter imidin çeşitli türlerine göre sayısal özellikleri Tablo 2.2.'de verilmiştir:

Tablo 2.2. Dolgusuz, cam elyafı ve karbon elyafı PEI'lerin özellikleri [46]

	Katkısız	Cam elyaf katkılı	Karbon elyaf katkılı
Yoğunluk, g/cm <sup>3</sup>	1,27	1.49–1.51	1.39–1.40
Çekme dayanımı, MPa	-	196	207–230
Sertlik (Rockwell M)	109	225	-
Uzama, %	60	3 5	1,4 - 3

Reçine, 24 saatte %0.25'e kadar nem aldığından üretim öncesi nem değerleri % 0.05 olana kadar kurutulmalıdır. PEI yüksek sıcaklıklara dayandığından dolayı enjeksiyon sıcaklığı 357°C olarak uygulanmalıdır. Ekstrüzyon, tel kaplama ve sıcağa dayanıklı film ve levha imalı diğer süreçlerdir [46].

### 2.6.5.3. Polieter-imid kullanım alanları

Sıcaklığa karşı dayanımı, şeffaflık, kimyevi dayanıklılığı ve alevlenme geciktiriciliği özelliğinden dolayı Polieterimid'lerin geniş bir kullanım alanına sahiptir. Parçalar talaşlı ve lazerle işleme, solventli ve ultrasonik yapıştırma metotlarına uygundur. Önemli kullanım yerleri taşımacılık, elektrik, elektronik, otomotiv, uzay ve havacılık alanında kullanılmaktadır [46, 47].

### 2.6.6. Sıvı kristal polimeri (LCP)

#### 2.6.6.1. Sıvı kristal polimerin yapısı

Aromatik poliesterlerin bir sınıfı olan bu reçineler önemli özelliklere sahiptirler. Sıvı kristal polimeri kimyasal bakımdan inert bir malzemedir. Yüksek sıcaklıkta bulunan derişik sülfürik asid ve buhar tarafından etkilenmesine rağmen, hemen hemen bütün

kuvvetli asit ve bazlar olmak üzere kimyasal maddeler tarafından yüksek sıcaklıkta bile etkilenmez [48].

#### **2.6.6.2. Sıvı kristal polimerin özellikleri**

LCP reçineleri, mekanik özelliklerini yüksek sıcaklıklarda hava ve radyasyonun etkisinde uzun süre tutulduktan sonra bile bu özelliklerini muhafaza etme özelliklerine sahiptirler. Ayrıca iyi dielektrik direnci, boyutsal kararlılık, ark direnci, ateşe karşı iyi mukavemet ve yüksek genleşme katsayısı vardır [48].

#### **2.6.6.3. Sıvı kristal polimerin kullanım alanları**

Sıvı kristal polimer, yüksek sıcaklığa ve kimyasal maddelere karşı direnci iyidir. Elektrik-elektronik, otomotiv ve makine alanında, bobinlerde ve sensör aletlerinin parçalarının yapımında kullanılır. Sürünme ve çekme mukavemeti istenilen yerlerde, metal, seramik ve diğer plastiklerin yerlerini alması beklenilmektedir [39, 48].

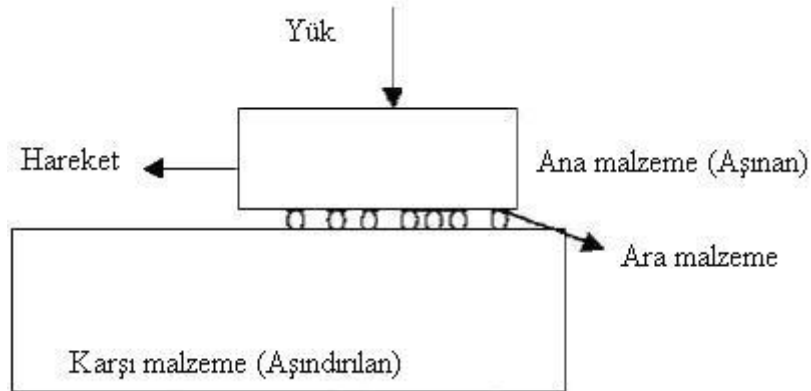
## BÖLÜM 3. AŞINMA

Aşınma, mekanik, fiziksel ve kimyasal etkiler sonucu, temas eden yüzeylerden malzeme kalkmasına aşınma denir. Aşınma sürecinin görünümü, aşınan ve eksilen malzeme miktarının çok küçük olması şeklindedir [49].

Bir aşınma olayını oluşturan beş unsur vardır. Bunlar;

1. Aşınan Ana malzeme,
2. Aşındıran karşı malzeme
3. Yük,
4. Ara malzeme
5. Hareket.

Aşınan ve aşındırılan malzemelerin tümüne "aşınma çifti" denilir. Aşınma çifti ve ara malzemeye de "aşınma kombinasyonu" adı verilir (Şekil 3.1). Bir malzemenin aşınması sadece bu sistem ile belirlenebilir. Aşınma çifti ile bu malzemeler arasında bulunan ara malzeme, sert taneli, gaz, sıvı ve buhar halinde olabilir. Aşınma olayında meydana gelen aşınma parçacıkları da, ara malzeme gibi aşınma olayına etki yaparlar [50].



Şekil 3.1 Aşınmayı oluşturan aşamalar [50]

Aşınmayı olayını etki eden parametreler 4 sınıfa ayrılmıştır. Bunlar;

- 1-)Malzeme parametreleri: Malzeme bileşimi, sertlik, tane boyutu, ısısal iletkenlik, soğuk işlem oranı,
- 2-)Dizayn parametreleri: Malzemenin şekli, yük miktarı ve yükleme şekli, hareket yönü, yüzey durumu, zaman faktörü, titreşim durumu
- 3-)Çevre parametreleri: Çevre sıcaklığı, atmosfer koşulları, ortamın nemliliği ve kirlilik durumu,
- 4-)Yağlayıcı parametreleri: Yağlamanın kararlılığı, yağlamanın tipi, akışkan yağlayıcının tipi [51].

### 3.1. Aşınmanın Ekonomik Açıdan Önemi

Teorik yöntemlerini incelemiş olduğumuz sürtünmeden dolayı oluşan aşınma, tüm endüstri kollarında istenmeyen bir olay olup, zamanında ve sistematik önlem alınmadığı takdirde çok pahalıya mal olabilecek sonuçlar oluşturabilir [52].

Aşınma; katı yüzeylerden mekanik etkiler sonucu malzemenin kalkması yani eksilmesidir. Aşınma sürecinin nitel görünümü, kalkan ve eksilen malzeme miktarının çok küçük olması şeklinde olur. Her ne kadar aşınma genellikle kayan sistemlerde çok yavaş bir aşama olsa bile, bu aşama kararlı ve sürekli [50].

Konunun bugüne kadar ihmal edilmiş olmasının en önemli üç sebebi vardır. Bunlardan birincisi, önceki zamanlardaki aşınma olayı bugüne göre, makine ve diğer mekanizmaların yararlı ömürlerinin saptanmasında çok daha az önemli bir etken olmuş olmasıydı. Nitekim günümüzün otomobilin silindiriyle, 1760'ların buhar silindiriyle kıyasladığımızda, her ne kadar iki makinenin beygir güçleri aynı büyüklükte olsada, tasarımının birbirinden tamamen farklı olduğu görülür. 1760'ların silindiri hayli ılımlı buhar basıncı ile çalışırken ve her zaman en azından 6-7 mm işleme hatasıyla çalışıyordu. Fakat bildiğimiz gibi günümüz otomobilinde bu koşullar tamamen farklıdır. Çünkü izin verilebilir olan aşınma, çok dar sınırlar içerisinde belirlenmektedir [50].

İkinci olarak, çoğunlukla aşınma oranlarının çok az olması ve yakın zamana kadar bu aşınma oranlarını uygun şekilde ölçecek olanağın bulunmaması söylenebilir [50]. Daha önceden bütün yapılabilen deneylerden önce ve sonra, parçaların tartılabilmesinden ibaretti. Fakat sıradan mühendislik metallerinin radyo-izotoplarının 1940'lerde ortaya çıkmalarıyla birlikte, araştırmacıların eline yeni bir olanak verilmiştir [53].

Üçüncü olarak ise, birçok bilim adamı ve mühendisin bu konudaki davranışları belirtilebilir. Aşınma o kadar çapraşık ve hataya götürebilecek bir olgudur ki, bunun üzerine değinmek zaman kaybından başka bir şey olmayıp yeni bir tasarımda yapılacak en iyi şey ise, bundan önceki denemelerden yararlanıp yeni bir ömür deneyine girişmek ve geride kalanları tarihe bırakmaktır [50].

### 3.2. Aşınmanın Kullanımı

Aşınmanın zararı olduğu gibi yararlı olduğu alanlarda mevcuttur. Bunlar şunlardır; Yüzeylerin meydana getirilmesi: Mamul bir eşyada bir yüzeyin meydana gelmesinin birçok yöntemi, aşınma olgusunu kullanır. Öncelikle, abrasiv süreçler ailesi vardır ki bunlar abrasiv kağıtlar ve eğe sayılabilir [53].

Bir yüzeyin bitmiş halini değiştirmenin faydalı bir yöntemi de kum püskürtmedir. Yazı; bilgi kaydının çeşitli yolları aşınma sürecine dayanır. Yapışkan aşınmanın varolması bir kalemin veya tebeşirin kullanımına bağlıdır. Bir plastik (veya lastik) silgi, yazı kalıntılarını yapışkan bir aşınma mekanizmasıyla kaldırır. Önce, kalemin karbon zerrecikleri yapışkan bir aşınma mekanizmasıyla silginin yüzey kısmına aktarılır ve sonra silginin yüzeyi yapışkan aşınma mekanizmasıyla kağıda geçerken, arkasında da temiz bir yüzey bırakır [53].

Keskin ağız ve kenarların korunması: Kesme işlemlerinde kesici aletin keskin bir ağza sahip olması gereklidir. Kesme esnasında ağız körlenecek olursa kesme işlemi gerçekleşemez. Süreç durdurularak, körleşen ağız yeniden şekillendirilmelidir (bilenecektir). Elektrikli et kıyma ve traş makinesinde, alt yüzeyde boylu boyunca olan yapışkan aşınma, kesme ağızını keskin tutacak şekilde iş görür [53].

Bir ikinci yöntem ise, çok zarif bir şekilde kemirici hayvanlarda (örneğin tavşanlarda) görülür. Bu tavşanların kesici olan ön dişleri, yüzey boyunca dış kavisli bir sert mineyle kaplıken iç tarafı ise yalnız yumuşak dentin vardır. Böylece yumuşak tarafta daha hızlı oluşan yapışkan ve abrasiv aşınma, dişlerin keskinliğini devam edicek şekilde iş görmeye devam eder. Bir grup insan kesici alet yapısını kendini bileyen bu prensibi kullanmış olup bunlara ise örnek vermek gerekirse tungsteni karbür ile kaplanmış bıçaklar ve bazı yerleri sertleştirilmiş saban demirleri verilebilir [53].

### **3.3. Aşınmayı Etkileyen Faktörler**

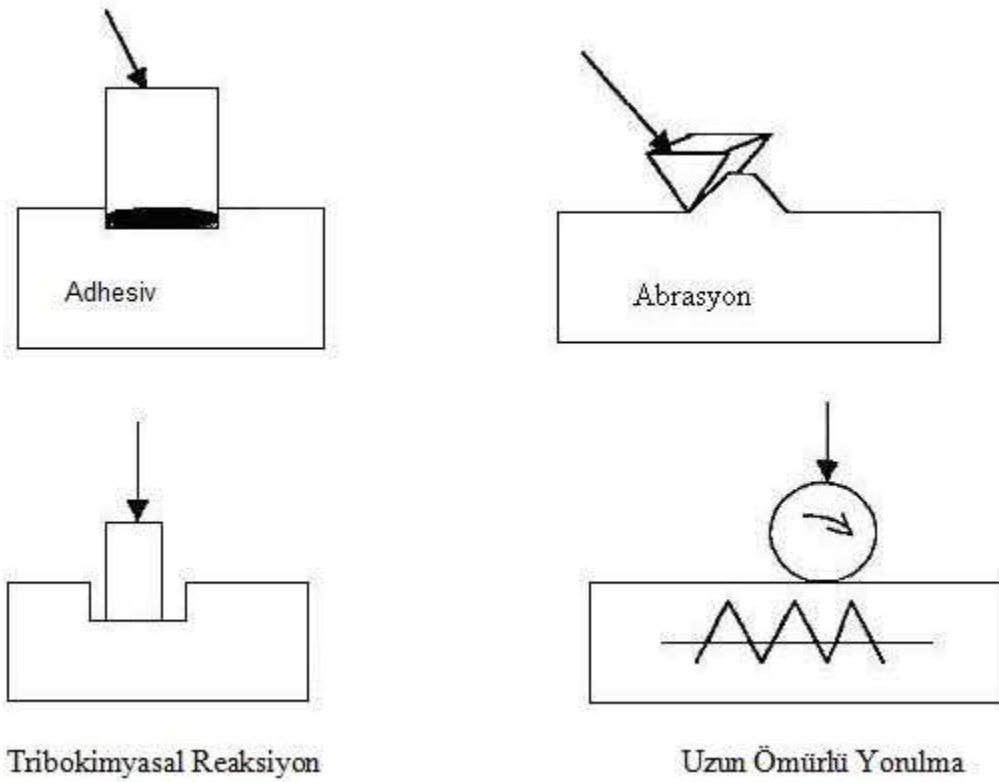
Aşınma sistemindeki en önemli etkenlerden biri de çevre şartlarıdır. Sistem elemanlarının korozif veya nem gibi etkilere maruz kalması aşınmayı hızlandırır. Birbirleriyle temasta olan malzeme yüzeyleri, sert kaplamalar, oksit filmleri ve yağlayıcılar ile korunsalar bile yağlamanın bozulması iki yüzeyin birbiri veya mekanik yüklemeler altında tabakaların doğrudan temasına sebep olabilir. Bu sonuçla oluşacak olan sürtünme, malzemenin çalışma koşullarındaki performansını ve ömrünü sınırlayan bir aşınmaya sebep olur [50].

### **3.4. Aşınma Mekanizmaları**

Endüstride kullanılan malzemelerin aşınma ve yıpranmalara maruz kalması olası bir aşınma mekanizmasının ne olacağının bilinmesi, mühendislik dizaynı, malzeme seçimi, hasar analizi ve aşınma ömrünün tahmin edilebilmesi ve yorumlanması bakımından oldukça önemli ve gereklidir [54].

Şekil 3.2’de dört esas aşınma mekanizmasının şematik olarak gösterimi bulunmaktadır.

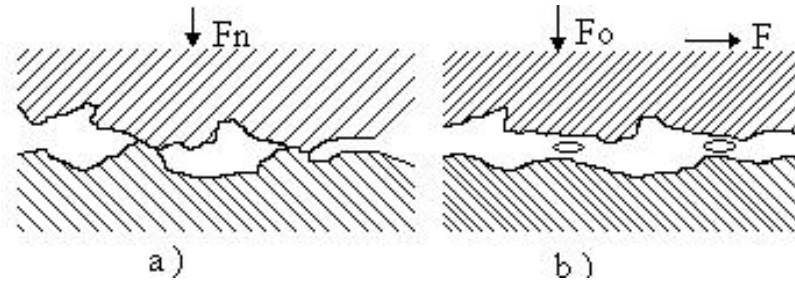




Şekil 3.2. Dört esas aşınma mekanizmasının şematik olarak gösterilmesi [50]

### 3.4.1. Adhesiv aşınma

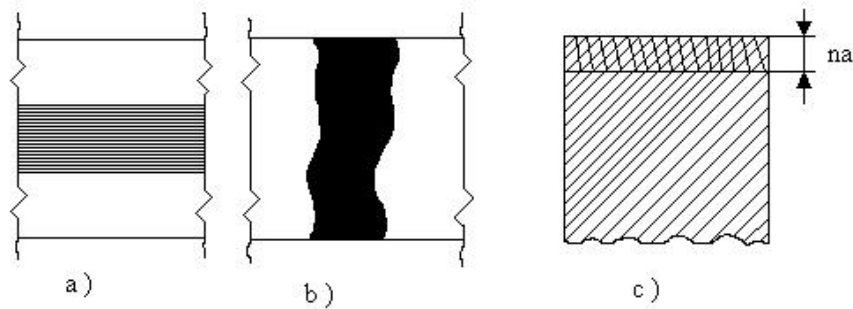
Adhesiv aşınma, özellikle birbirleriyle kayma sürtünmesi yapan metal-metal çiftinde meydana gelen kaynaklaşma olayının bir sonucudur. Birbiri üzerinde kayan yüzeylerin çok az bir kısmı temas halindedir. Yüzeyler arasındaki temas alanının çok küçük olması nedeniyle temas noktaları büyük basınç altında kalır. Yüzeylerdeki bu basınç, çok küçük yüklemelerde bile akma gerilmesi sınırlarına erişir veya bu sınırı geçerler. Yüzeylerde kalmış olan yağ, nem ve oksit tabakaları basınç altında parçalanırlar. İki yüzey arasında adezyon adı verilen bir çekim kuvveti meydana gelir. Bu yüzden bir parçadan diğer malzemeye geçiş sırasında, küçük parçacıkların kesilmesi ve soğuk kaynaklaşma olayı meydana gelir [55,56]. Bu kaynak bağlarının kopması sonucunda meydana gelen malzeme kaybı, adhesiv aşınmayı oluşturur. Bu durum Şekil 3,3'de gösterilmiştir. Temas halinde bulunan bu malzemelerde bu tip aşınmadan kaçınmak ya da korunmak mümkün değildir.



Şekil 3.3. Adhesiv aşınma, a) Kaynak bağlantılarının oluşumu, b) Kaynak bağlantılarının kopması [50].

Adhesiv aşınma, genellikle daha sert ve pürüzlü olan malzeme yüzeylerinin kendisine göre daha yumuşak ve pürüzsüz olan diğer malzeme ile temas halindeyken kayması sırasında meydana gelmektedir. Adhesiv aşınmada yüzeylerin bozulması, yüzeyler arasında giren toz, talaş veya doğrudan eş çalışan malzemelerin yüzeylerinde oksidasyon sonucu oluşan seri parçacıkların etkisi altında oluşur. Bu sert parçacıklar, yüzeyler arasında kazıyıcı bir etki yaparak eğeleme ve taşlamaya benzeyen bir malzeme kaybının oluşmasına sebep olurlar.

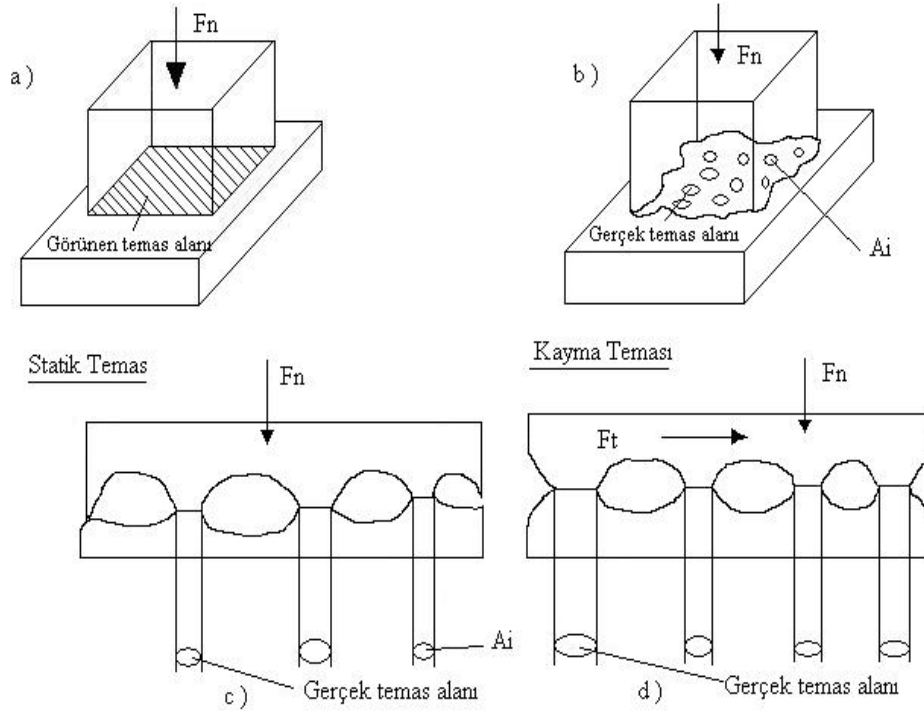
Şekil 3.4'de görüldüğü gibi, adhesiv aşınma, parlatılmış bir yüzey ya da yüzeylerde bir takım çizgiler şeklinde görülmektedir. Bu şekilde yüzeylerden bir tabaka kaldırılmaktadır.



Şekil 3.4. Adhesiv aşınma, a) Yüzeydeki adhezyon çizgileri, b) Yüzeydeki parlak bölge, c) Aşınan tabaka kalınlığı [50].

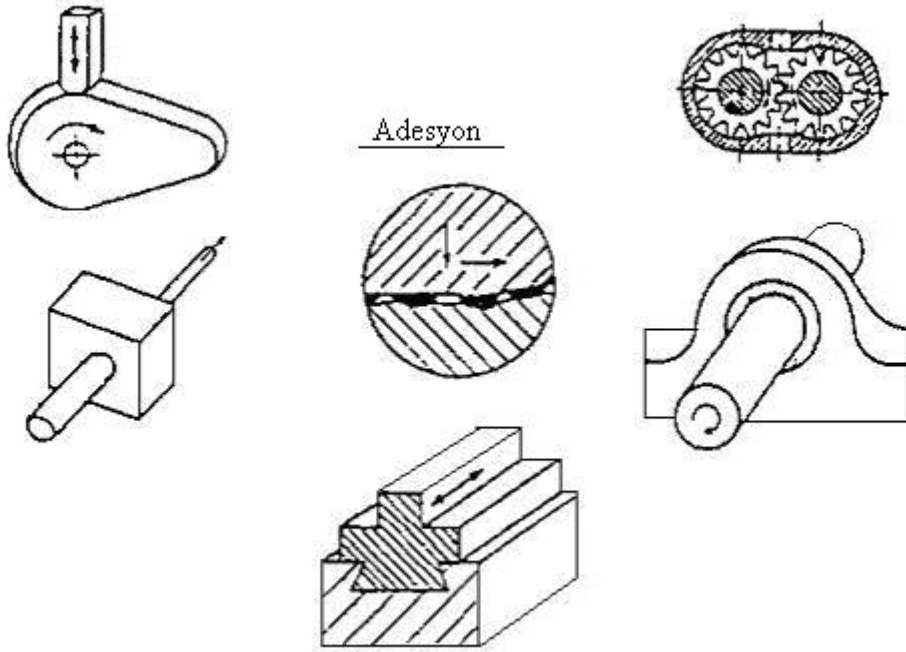
Malzemenin temas eden yüzeyleri ne kadar hassas işlenirse işlensin yüzeyde pürüzlülüğün yani girinti ve çıkıntıların bulunduğu kaçınılmaz bir gerçektir. Bu durum Şekil 3.4' da şematik olarak gösterilmiştir. Temas halinde olan iki yüzey, bu

pürüzler vasıtasıyla temas eder. Bu çıkıntılar arasındaki girintiler ise temas alanının dışında kalır.



Şekil 3.5. a. Görünen temas yüzeyi, b. Gerçek temas alanı, c. Statik temas durumunda gerçek temas alanları, d. Kayma temasında gerçek temas alanları [50]

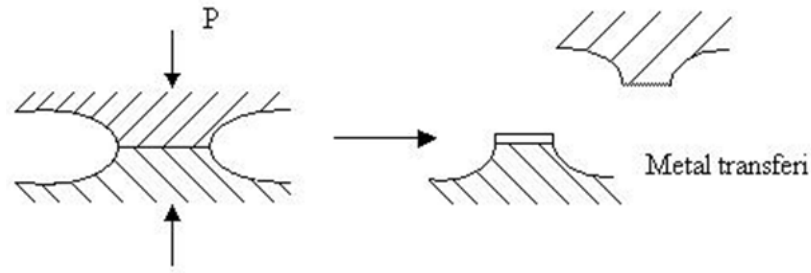
Şekil 3.6'de gösterildiği gibi, adhesiv aşınmaya, otomobillerdeki kam millerinde ve makinelerdeki eksantrik millerde, kalıpta, tel çekmede, torna, freze, planya ve vargel, matkap gibi birbiri ile temas halinde çalışan kızak ve kayaklarda, dalgıç pompa dişlilerinde ve yataklarda rastlamak mümkündür.



Şekil 3.6. Adhesiv aşınmanın olduğu tribolojik sistemler. [50]

Adhesiv aşınmasıyla ilgili yapılan deneyler sonucunda elde edilen bulgular aşağıdaki başlıklar altında toplanabilmektedir;

- 1)Adhesiv aşınma, birbirine benzer veya kolay alaşım yapabilen malzemeler arasında görülmektedir.
- 2)Adhesiv aşınma, yüzeylerin izafi hızına ve normal kuvvete bağlıdır. Nispeten yüksek hızlarda ve yüklerde görülen bir aşınma şeklidir.
- 3)Adhesiv aşınma, sürtünmeyi belirleyen bütün kaynak noktalarında görülmektedir.
- 4)Adhesiv aşınma üzerinde, oksit veya nemden oluşan doğal tabakanın etkisi büyüktür.
- 5)Yüzeylerden birinin sertliği diğerine göre daha büyük ise kaynak bağlarının kopması yumuşak malzemelerde görülür ve yumuşak malzeme sert malzemelerin yüzeyine transfer edilir [57]. Malzemeler arasında meydana gelen transfer mekanizması Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Malzemeler arasında meydana gelen transfer mekanizması [50]

Adhesiv aşınmayı önlemek için gereken tedbirleri aşağıdaki gibi sıralayabiliriz;

- 1) Çelik ile eş çalışan yatak malzemeleri gibi çalışılacak malzemeler birbirine uygun seçilmelidir,
- 2) İyi bir yağlama yöntemi ve uygun yağlayıcı maddeler ile katkıları kullanılmalıdır.

Adhesiv aşınmaya etki eden genel malzeme özellikleri ve etki dereceleri Tablo 3.1' de verilmiştir.

Tablo 3.1. Adhezyona etki eden genel malzeme özellikleri [50]

Malzeme Özellikleri	Adhesiv Aşınma
Yüksek deformasyon sertleşmesi	Çok
Kübik kristal yapı	Çok
Yüksek sertlik	Çok
Yüksek ergime noktası	Çok
Küçük atom yarıçapı	Çok
Yüksek yeniden kristalleşme sıcaklığı	Çok
Yüksek elastiklik modülü	Çok
Hegzagonal yapı	Az
Oksitli yüzey	Az

Adhesiv aşınmayı azaltmak için temas yüzeyine uygulanan basıncın azaltılması veya temas eden malzemelerin yüzey sertliğinin artırılması gerekir. Adhesiv

aşınma için temel sayılabilecek Archard eşitliği yukarıda belirtilen etkileri açıklamaktadır.

$$W = k \cdot \frac{P}{H} \quad [3.1]$$

Burada;

W: Aşınma hızı,

k: Aşınma katsayısı,

P: Temas yüzeyine uygulanan basınç (MPa),

H: Malzemenin sertliği (MPa) dır.

### 3.4.2. Abrasiv aşınma

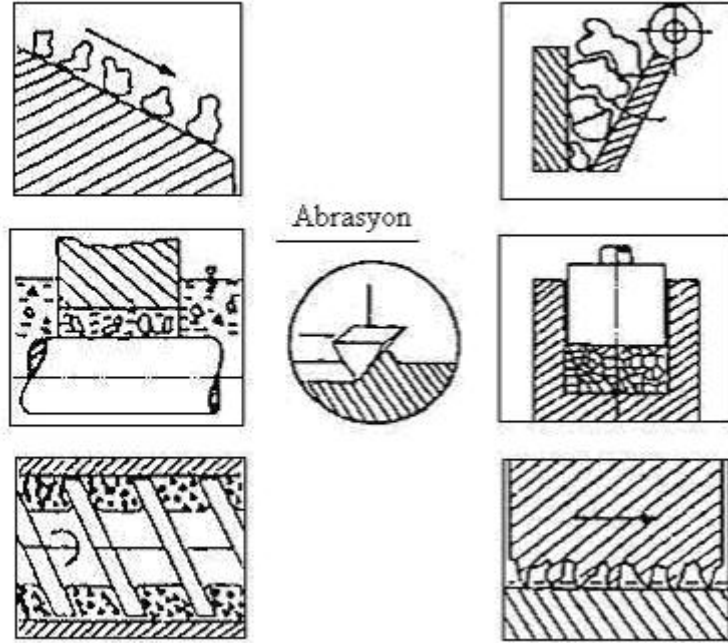
Abrasiv aşınma, uygulanan yük ve hareketin etkisiyle temas eden iki cisimden daha sert olanın, pürüz tepelikleri ya da tanecikleri ile diğer cismi çizerek üzerinden mikron derecede talaş kaldırılmasıdır. Aşınma, çarpma, talaşla çizme, raybalama ve kesme sonucunda meydana gelebilir. Burada katı-katı, katı-sıvı, tanecik-katı gibi pek çok aşınma çiftleri olabilir (Şekil 3.8) [50].

Abrasiv aşınma için kullanılan en yaygın laboratuvar test yöntemleri iki esasa göre yapılır.

- 1) Sabitleştirilmiş bir abresiv malzeme üzerinde pim şeklinde hazırlanmış numunenin kayması,
- 2) Dönen bir tekerlek ve ona temas halinde kayan düz bir numune arasına serbest abrasiv partiküllerin sürekli olarak dökülmesidir.

Genellikle bu yöntemlerde abrasiv malzeme olarak abrasiv kağıtlar veya bezler kullanılır. Bu kağıt ve bezler üzerine abrasiv partiküller çok dar aralıklarda serpiştirilmiş durumdadırlar. Yapıştırıcı olarak çok kuvvetli reçineler kullanılır [58]. Bu abrasiv malzemelerde aşınma oranı numunenin aynı iz üzerinden geçmesinin tekrarı ile azalmaktadır. Azalmanın nedeni meydana gelen

birçok değişik fiziksel, kimyasal ve mekanik olaylardır. Bu olayların miktarı ve önemi, malzeme, yük, kayma hızı, atmosfer ve diğer faktörlerle değişiklik göstermektedir [50].



Şekil 3.8. Abrasiv aşınmanın oluşturduğu tribolojik sistemler [50]

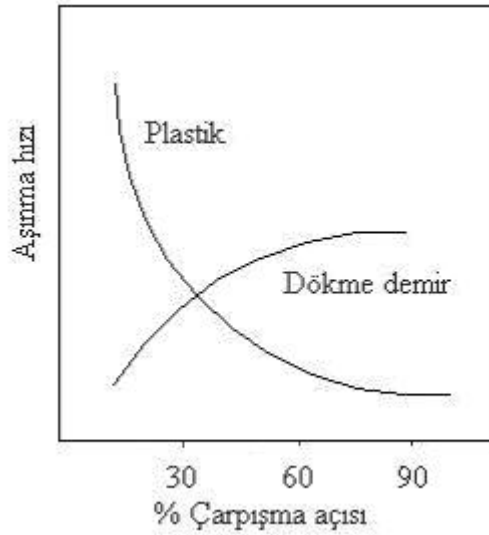
### 3.4.3. Erozyon aşınması

Erozyon aşınması diğer bir adıyla erosiv aşınma, bir gaz veya akışkan sıvı vasıtasıyla taşınan sert partiküllerin malzeme yüzeyine çarpması sonucunda meydana getirdikleri aşınma mekanizmasıdır. Erozyon aşınması, malzeme yüzeyindeki sıvı ya da gaz ortamındaki partikül akışından dolayı temas gerilimlerinin yükselmesiyle oldukça farklı bir yapıya sahip bir tür abrasiv aşınma biçimidir[59]. Erozyon aşınması bazı yönleriyle abrasiv aşınmaya benzemektedir.

Erozyon aşınması, dizel motorları, gaz, buhar ve dizel türbinleri, akışkan yataklar, madencilikteki kum/su, çamur (slurry) taşıma sistemleri, pulverize kömür ısı üretimi ve sentetik yakıt santralleri gibi alanlarda görülmektedir [50].

Aşınma hacmi, aşınma hızı ile doğru orantılıdır. Aşınmış yüzey, ince taneli bir görünümdedir. Bu yüzey gevrek kırılmaya benzer şekildedir. Şekil 3.9'da çarpışma

açısı ve aşınma hızı arasındaki ilişki verilmiştir. Çarpışma açıları küçük olduğu zaman, mevcut kesici aşınma ve aşınmaya dirençli yüzey sertliği kritik bir etken olmaktadır. Büyük açılı durumlarda, aşınma deformasyondan dolayı meydana gelir ve çözünme daha karmaşık bir yapı kazanmaktadır [50].



Şekil 3.9. Çarpışma açısı ve aşınma hızı arasındaki ilişki [50]

#### 3.4.4. Oymalı aşınma

Oymalı aşınma, karşıt yüzeylerden birisinin üzerindeki mikro boyutlu sert pürüzlerin neden olduğu iki elemanlı abrasiv aşınma sisteminde, yüzeyin aşırı deformasyonu olarak tanımlanır [50].

#### 3.4.5. Koroziif aşınma

Koroziif aşınma, kaymanın bir koroziif ortamda gerçekleşmesi halinde meydana gelmektedir. Kayma olmadığı zaman, korozyon ürünleri, yüzeyler üzerinde bir film oluşturur ve bu film korozyonu yavaşlatır, hatta durdurur. Kayma, korozyon atağı devam ettiğinden bu filmi dışlar [60].

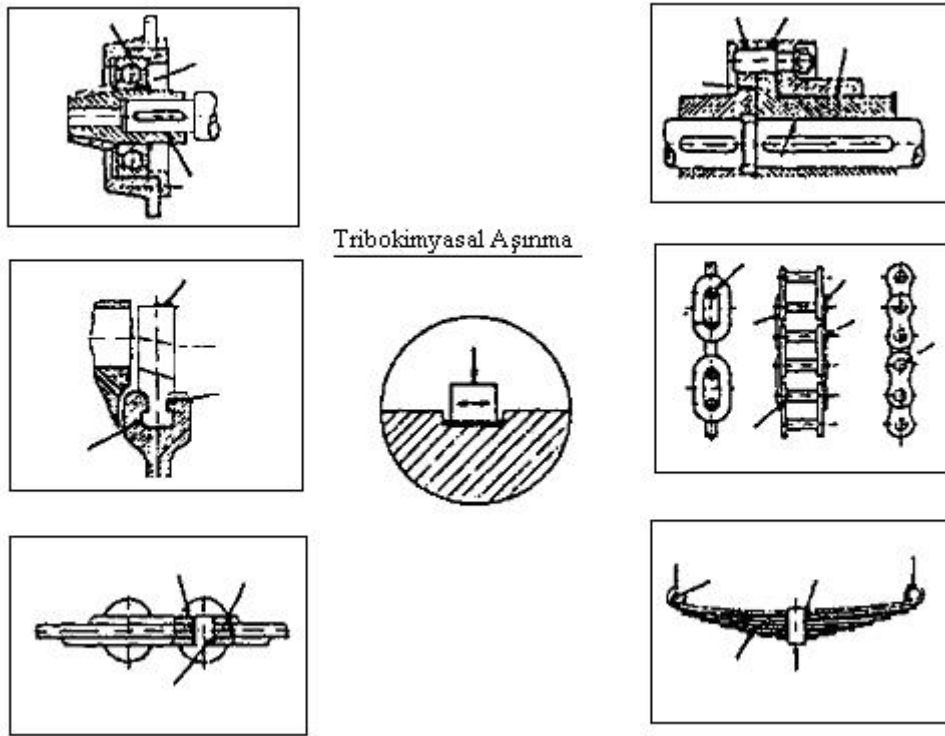


### 3.4.6. Tribokimyasal reaksiyon veya tribokimyasal aşınma

Tribokimyasal aşınma, ortamla reaksiyona giren ve sürtünen yüzeyler arasında oluşur. Korozif ortam gaz veya sıvı olabilir. Temas halindeki yüzeylerden metalik ve kimyasal reaksiyon ürünlerin uzaklaştırılması sonucunda tribokimyasal aşınma oluşur. Tribokimyasal aşınmanın mekanizmaları 4 gruba ayrılmaktadır.

- 1) Yerel yüksek basınçlar veya mikro yorulma sonucunda koruyucu yüzey tabakalarının çatlaması, aşınma taneciklerinin oluşumuna neden olur.
- 2) Metallerin ortamla kimyasal reaksiyonları sonucunda metalle teması sağlayan koruyucu yüzeyler oluşabilir.
- 3) Adezyon nedeniyle metal uzaklaştırılmasına neden olan yüzey pürüzlükleri arasındaki metalsel temas ile oluşan küçük metalik tanecikleri oksitlenebilir.
- 4) Metalik veya metal olmayan aşınma parçacıkları bir abrasiv parçacığı gibi etki eder ve temas yüzeylerinin koruyucu yüzey tabakalarının yeniden oluşumu, yüzeyi daha az pürüzlü hale getirir [50].

Bu aşınma olayı, Şekil 3.10'da gösterildiği gibi, yatak ve şaft gibi sıkı geçmeli yüzeylerde, yuvarlanmalı bilyalar üzerindeki yatak ve yuvasında, konik dişli çarklarda, baklalı zincirlerde, düz yaylarda ve perçinli bağlantılarda gözlenmektedir.



Şekil 3.10. Tribokimyasal aşınma [61]

### 3.4.7. Püskürtme aşınması

Püskürtme aşınmasında, püskürtme açısı büyük önem taşır. Püskürtme aşınması, kayma ve eğik çarpma olarak sınıflandırılır. Püskürtme aşınması, malzemeye ve malzemenin özelliklerine bağlıdır. Püskürtme aşınmasına karşı her malzemenin dayanıklılığı farklıdır. Uygulanan deney şartlarında yumuşak ve deforme olabilen malzemeler, küçük püskürtme açısında (kayma püskürtmesi) büyük aşınma gösterirken, sert ve gevrek malzemelerde büyük püskürtme açılarında (çarpma püskürtmesi) fazla zorlanarak çok fazla aşınma göstermektedir [50].

### 3.4.8. Tabaka aşınması

Tabaka aşınmasında, abrasiv aşınmanın tersine, aşınma yüzeyinde malzemenin sınır yüzeyinin özelliği ve tabaka aşınması önemlidir. Aşınma yüzeyi sınır tabakası, çevredeki gazların ve ara malzemenin etkisiyle meydana gelmektedir. Tabaka şeklinde aşınma parçacığı olarak (yassı çizilme ile) sıyrıldığında, daima yeniden meydana gelir. Bunun için en önemli özellik, aşınma yüzeyinde meydana

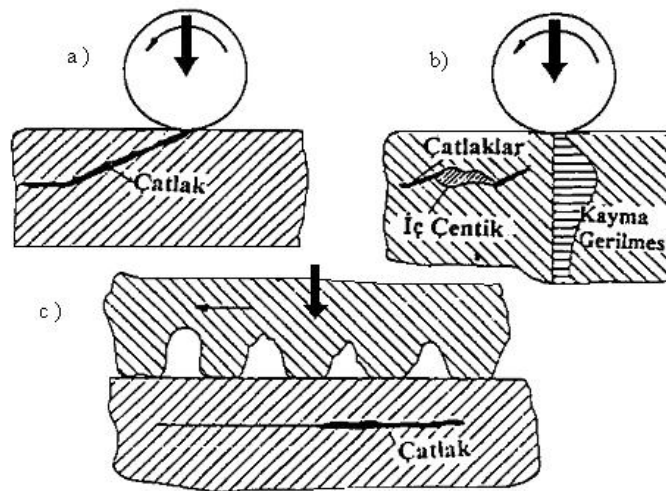
gelen tabaka olup, malzemenin rolü ikinci derecededir. Buna örnek olarak sürtünme oksidasyonunu verilebilir [50].

### 3.4.9. Kaviteasyon aşınması

Kaviteasyon, yüzey yorulma aşınmasına benzer olup dayanıklı malzemeler sert fakat gevrek olmayan malzemelerdir. Bununla birlikte kaviteasyona dayanıklılık için sıvı tarafından korozyon atağına da mukavemet gerekli olmaktadır [50].

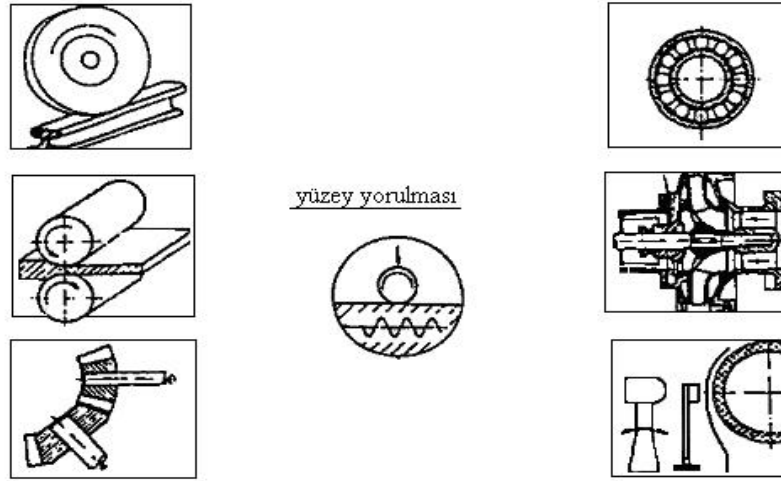
### 3.4.10. Uzun ömürlü yorulma aşınması

Mühendislik malzemelerinde yorulma aşınması, değişken tekrarlı zorlanma altında zamana bağlı olarak meydana gelir ve bu aşınma genelde yüzeyde oluşmaktadır. Yüzey bölgesi, titreşimli değişken zorlanmaya maruz kaldığı takdirde malzeme yüzeyinin hemen altında Şekil 3.11'de gösterildiği gibi mikro çatlaklar oluşur. Bu zorlanmaya örnek olarak tekrarlı yuvarlanma veya kayma teması verilebilir. Mikro çatlakların yüzeye ulaşması sonucunda da yüzeyden pullanma şeklindeki parçacıklar kopar ve yüzeyde çukur ve oyuklar oluşmasını sağlar. Tekrarlı gerilmeler genelde elastik sahada değiştiğinden bu tür yorulma uzun ömürlü yorulma olarak adlandırılır. Bu yorulma aşınmasına, "pitting" de denilmektedir [50].



Şekil 3.11. Uzun ömürlü yüzey yorulmasında çatlak oluşumu ve ilerlemesi [50]

Uzun ömürlü yüzey yorulmasına genellikle, dişli çark mekanizmalarında, araçların kam mili mekanizmalarında, rulmanlı yataklarda, demir yolu raylarında, soğuk ve sıcak haddelemeler de, sirkülasyon pompaları gibi makina elemanlarında rastlamak mümkündür. Şekil 3.12'de uzun ömürlü yüzey yorulma aşınmasının olduğu tribolojik sistemler verilmiştir.



Şekil 3.12. Uzun ömürlü yüzey yorulması aşınmasının olduğu tribolojik sistemler [50]

### 3.4.11. Kayma aşınması

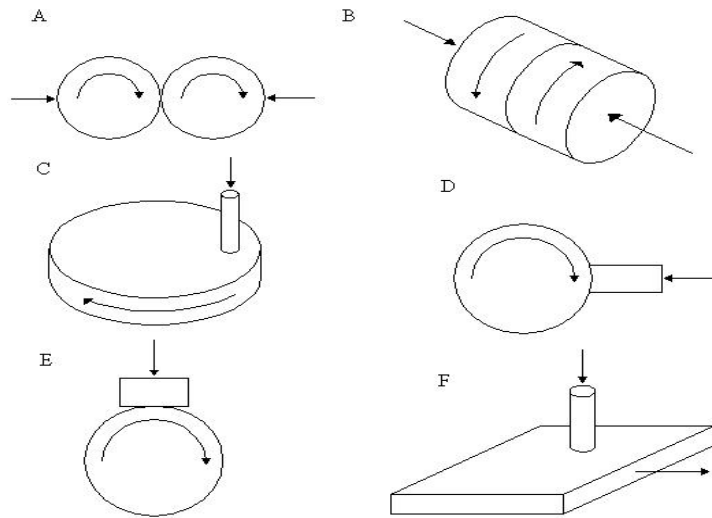
Kayma aşınması çalışmalarında birbirinden farklı deneysel düzenlemeler kullanılmaktadır. Aşınma için yapılan laboratuvar araştırmaları, genellikle oluşan aşınma mekanizmalarının incelenmesini, pratik uygulamaların benzeşiminin yapılması ve aşınma oranları ile sürtünme katsayıları için kullanışlı dizayn bulgularının elde edilmesini sağlamaktadır. Aşınmayı etkileyebilen tüm değişkenlerin kontrol ve ölçümü çok önemlidir. Aşınma oranı ve sürtünmenin çoğu zaman kritik olarak kayma şartlarına bağlı olduğu bilinmektedir. Şartlardaki önemsiz gibi görünen çok küçük değişiklikler, mekanizma içerisinde köklü değişikliklere yol açabilir [50].

## BÖLÜM 4. AŞINMA DENEY YÖNTEMLERİ

### 4.1. Aşınma DeneY Yöntemleri

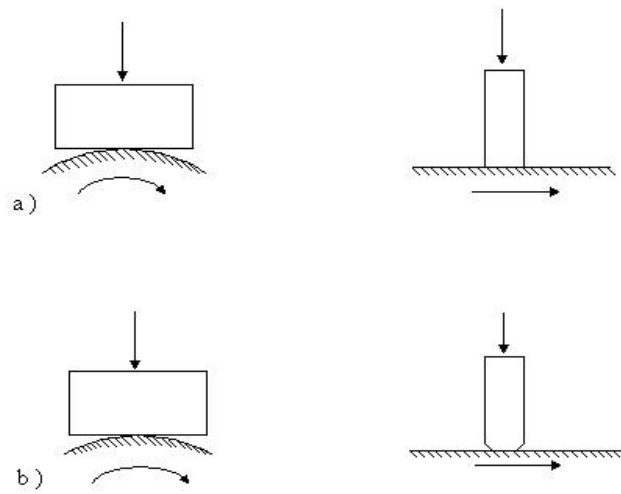
Kayma aşınması çalışmalarında birbirinden farklı deneysel düzenlemeler kullanılmaktadır. Aşınma için yapılan laboratuvar araştırmaları, genellikle oluşan aşınma mekanizmalarının incelenmesini, pratik uygulamaların benzeşiminin yapılması ve aşınma oranları ile sürtünme katsayıları için kullanışlı dizayn bulgularının elde edilmesini sağlamaktadır. Aşınmayı etkileyebilen tüm değişkenlerin kontrol ve ölçümü çok önemlidir. Aşınma oranı ve sürtünmenin çoğu zaman kritik olarak kayma şartlarına bağlı olduğu bilinmektedir. Şartlardaki önemsiz gibi görünen çok küçük değişiklikler, mekanizma içerisinde köklü değişikliklere yol açabilir [62].

Şekil 4.1, en çok kullanılan birkaç tip aşınma ve test aparatlarının geometrik düzenlerini göstermektedir. Şekil 4,1 'deki A ve B düzenleri aşınma çalışmalarında sıklıkla kullanılmaz. Çevreleri boyunca temas halinde olan (A) veya yüzeyleri boyunca temas eden (B) sistemlerinde dönen bilezik veya iki disk bulunur [63].



Şekil 4.1. Kayma aşınması testlerinde kullanılan geometrik düzenler [64]

Çok yaygın kullanılan asimetrik test cihazlarındaki çalışma şekli ise bir pim in dönen bir diske bastırılması esasına dayanmaktadır. Bu pim, diskin ya düz yüzeyi üzerine (C) ya da kenarına (D) bastırılır. Diğer bir yöntem ise, bir bileziğe karşı bastırılan bir blok (E) veya düz bir yüzeyin üzerine bastırılan bir pim (F) şeklindedir. Bu test cihazlarındaki temas şekilleri, belirli bir alan teması, sadece çizgi teması veya bir nokta şeklindedir. Bu temas şekilleri Şekil 4.2’de detaylı olarak gösterilmektedir [63].

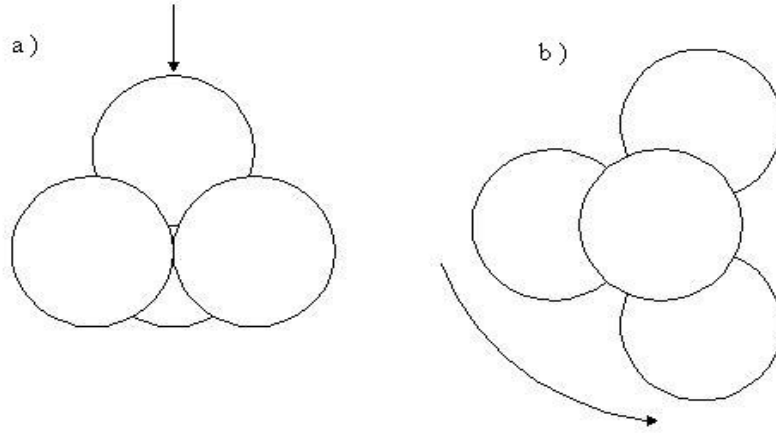


Şekil 4.2. a) Çizgisel temas b) Noktasal temas geometrileri

Şekil 4.3’de diğer bir test geometrisi olan dört top testi görülmektedir. Üst taraftaki topa doğru alt taraftaki üç top bir taşıyıcı içerisinde hep birlikte döner ve birlikte hareket eder. Üstteki top, yerinde sabittir ve aşağıya doğru normal bir yük bastırılmaktadır. Bu test, malzeme davranış çalışmalarının yanı sıra yağlama performansının değerlendirilmesi için kullanılan bir metottür.

Laboratuarda yapılan aşınma testinde, numunelerin boyutları çoğunlukla mm’ler seviyesinden cm’ler seviyelerine kadar uzanır. Asimetrik teste, bloklar ve pimler 25 mm boyutundan daha küçük olmasına rağmen diskler ve bileziklerin boyutları cm’ler civarındadır. Deneyleerde kullanılan yükler, bir newton’dan birkaç kilonewton’a kadar çok geniş bir aralıkta kullanılır. Aşınma ve sürtünmeyi etkileyen ve aşınma

testinde kontrol edilmesi gereken değişkenler, yük ve hız gibi belirli veya numune boyutu gibi daha az belirginde olabilir.



Şekil 4.3. Genellikle iyi bir yağlama sağlamak için kullanılan dört top testi. a) Perspektif görünüş b) üstten görünüş [63]

Aşınmanın basit bir modelinde, kayan bir kütleden ayrılan malzeme miktarının kayma mesafesi ve temas bölgesinin üzerindeki nominal basınca (normal yük/nominal temas alanı) bağlı olmasını önermektedir. Aşınma ölçümü ya bir elektriksel veya mekanik transdüser kullanarak sürekli olarak ölçülmesi ya da numunenin aralıklı olarak tartılması ve ölçülmesi ile yapılır. Aşınma, numunenin boyutundaki değişimler ile tespit edilir. Çizgisel ve noktasal temas durumlarında oluşan aşınma temas alanının artmasına sebep olur. Bu aşınma miktarı numunenin üzerinde oluşan aşınma boyutunun ölçülmesiyle tespit edilir. Bu yöntem çok sık kullanılan bir aşınma belirleme metodudur.

Bir aşınma testi sırasında sürtünme kuvvetini devamlı olarak ölçmek ve kaydetmek uygundur. Bu, genellikle dönen diğer parça (disk, bilezik vs) üzerinden torkun ölçülmesi ya da numune üzerindeki teğetsel kuvvetin ölçülmesi ile yapılır. Sürtünmenin devamlı olarak kaydedilmesi yalnız nümerik değerlerinin elde edilmesi için değil, aynı zamanda kayma davranışındaki değişimlerin izlenmesini de sağlar. Bu değişimler, yüzey topoğrafyası veya doğallığındaki ya da aşınma mekanizmasındaki değişimlerin habercisidir. Örneğin test cihazı çalışırken yağlayıcı film veya koruyucu oksit tabakasındaki bozulma bu yol ile bulunabilir. Böyle değişimlerin bilinmesi bazen mutlak aşınma oranının ölçülmesinden daha fazla önemlidir. Numune ile karşı eleman arasındaki elektriksel temas direncinin devamlı olarak ölçülmesi bazı

maksatlar için bilgi vericidir. Böyle bir ölçüm oksit tabakasının veya EHL (Elastohidrodinamik yağlama) kalınlığı ile ilgili ortalama bir sonuç verir. Elektriksel kapasite ölçümleri ise, böyle bilgilerin diğer kaynağını verir.

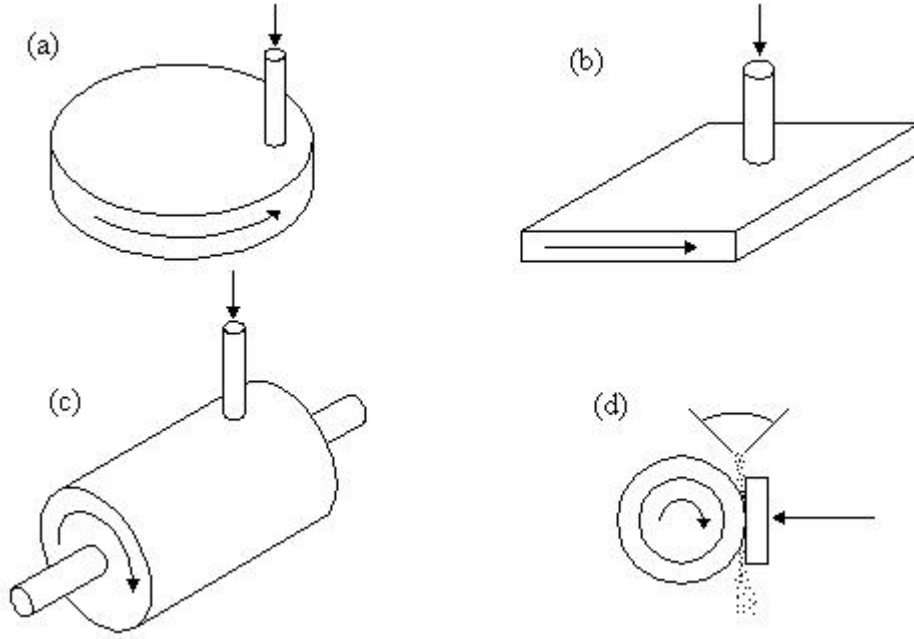
Kayma şartları altındaki aşınma, kayma aralığına etki eden kayma hızı ve test süresinin her ikisinde büyüklüğüne bağlıdır. Kayma hızı sürtünme enerjisinin dağılma oranını ve bundan dolayı iç yüzeydeki sıcaklık oranını etkiler. Kayma hızı değişirken aşınma oranında ve mekanizmasında ani geçişler olabilir. Aşınma ayrıca kayma yüzeylerinin arasındaki nominal temas basıncına da bağlıdır. Temas basıncından hariç olarak numunenin lineer boyutları için de çok önemlidir. Uzun bir numunenin kenarına yakın bir yerdeki aşınma hasarı ile temas bölgesinden geçiş esnasında kısa bir numunedeki aşınma hasarına göre daha fazladır [63].

Normal yük, kayma hızı, temas alanı ve test süresindeki büyük farklılıklardan başka diğer farklı faktörler de aşınma deneylerinde hesaba katılmalı ve izlenmelidir. Test sıcaklığı malzemenin mekanik özellikleri üzerine ve sıcaklığın harekete geçirdiği özellikler üzerine etkisinden dolayı oldukça önemlidir. Test sıcaklığı yağlı sistemlerde yağ viskozitesinin üzerine etkisi önemlidir. Atmosferik bileşenler de önemlidir. Su oksijeni ve buharı gibi reaktif bileşenler tüm malzemelerde aşınma mekanizmasını ve oranını kuvvetli bir şekilde etkiler. Yağlı sistemlerde, yağ filmindeki basınç dağılımı ve yağlayıcı maddenin miktarı ile bunun sonucu olarakta film kalınlığı önemli faktörlerdir. Bu etkilerin geniş listesi, bir uygulamanın laboratuvar benzeşimi kurmanın imkanı olmadığını ve sadece aşınma testinin bir servis deneyi olduğunu akla getirebilir. Fakat ortaya çıkan bu sonuçların benzeşimi yapılan gerçek şartlardan çok uzak olduğu bilinmelidir. Temas gerilmeleri, kayma hızları, termal şartlar ve kimyasal ortam herhangi bir aşınma testinde bunlar çok önemli bileşenlerdir. Sürtünmenin ölçülme işlemi ve test yapıldıktan sonra aşınan yüzeylerin ve aşınma hasarının son kontrolü ile bu önem daha iyi fark edilir. Aşınma mekanizması, servis uygulamaları ve testte de aynıdır. Bir laboratuvar testinden alınan sonuçlar güvenle herhangi bir pratik probleme uygulanabilir [63].



## 4.2. Abrasiv Aşınma Deney Yöntemleri

Abrasiv aşınma için kullanılan en çok laboratuvar test yöntemleri iki kurala göre yapılır: Birinci yöntem, sabitleştirilmiş bir abrasiv malzeme üzerinde pim şeklinde hazırlanmış numunenin kayması, ikinci yöntem ise, dönen bir tekerlek ve ona temas eden kayan düz bir numune ve serbest abrasiv partiküllerin sürekli olarak dökülmesidir. Şekil 4.4 a-c'de verilen yöntemler, birinci kurala göre yapılmış iki kısımlı abrasiv aşınma metotlarıdır. Bu metotlarda genellikle abrasiv malzeme olarak abrasiv bezler veya kağıtlar kullanılır. Bu bez ve kağıtlar üzerine abrasiv partiküller çok dar aralıklarda serpiştirilmiş durumdadırlar. Yapıştırıcı olarak ise çok kuvvetli reçineler kullanılır. Bu abrasiv malzemelerde aşınma oranı numunenin bıraktığı aynı iz üzerinden devamlı geçmesi ile azalır. Şekil 4.4 a'daki disk üzeri pim geometrisinde, disk üzerindeki pimin radyal olarak hareket etmesiyle test yapılmaktadır. Bu sırada diskin üstünde spiral bir iz oluşur. Diğer bir metot ise Şekil 4.4 b'deki bir abrasiv levha üzerinde kayan bir disk ve pimden oluşan geometridir. Üçüncü geometri Şekil 4.4 c'de gösterilen üzerine abrasiv kağıt sarılmış olan dönen bir silindirin üzerindeki pimin aksenal olarak hareket etmesinden oluşan geometridir. Bu testlerin hepsinde pim üzerine sabit bir yük uygulanır. Testten önce ve sonra aşınma miktarının belirlenmesi için pim tartılarak ölçülür. Bu tür dizaynlarda pimin uzunluğu elektriksel transdüserler kullanılarak aşınma oranı ölçülür. Bu yöntemle test esnasında aşınmanın sürekli olarak takip edilmesi ve kaydedilmesi mümkün olabilir.



Şekil 4.4. Malzemenin aşınma miktarını ölçmek için en çok kullanılan dört metodun şematik gösterilmesi, a) abrasiv disk üstü pim, b) abrasiv düzlem üstü pim, c) abrasiv tambur üstü pim, d) lastik tekerlekli abrazyon testi

### 4.3. Çalışma Şartlarının Değiştirilmesi

Çalışma şartlarının değiştirilmesindeki amaç, aşınmanın önlenmesidir. Ancak çalışma koşullarının, sistemin genel amacına yönelik olarak belirlenmesi nedeniyle daha sonra meydana gelecek bir olay için bu şartlarda birtakım farklılıklara gitmek, mümkündür. Ancak, bu durum metodun kullanımını sınırlayan en önemli etkenlerden biridir.

### 4.4. Aşınma ile İlgili Parametreler ve Boyutları

Bir malzemenin başka bir malzemeye karşı kayma sürtünmesi, aşınma hızı, tutma direnci, sürtünme katsayısı veya P.V sınır faktörü gibi bazı terimler ile ifade edilir. Bu terimler çeşitli parametrelere bağlı olup aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir [65].

#### **4.4.1. Yapısal parametreler**

Yapısal parametreler, fizikokimyasal durumu, malzemenin özelliği, yüzey şartları ve son işlemleriyle ilgili olan bütün parametreleri kapsar [65].

#### **4.4.2. Dış parametreler**

Kayma hızı, hareketin özellikleri, uygulanan yük, yüzeylerin birbirine temas tipleri, ortam şartları (nem, sıcaklık) ve kayma yüzeylerindeki yabancı maddeler (aşınma artıkları, yağlar) gibi kayma şartları dış parametreleri oluşturur [65].

### **4.5. Aşınmaya Etki Eden Parametreler**

#### **4.5.1. Kayma hızı**

Cam elyaf katkılı PTFE ile bronz katkılı PTFE'nin hız arttıkça aşınma miktarının azaldığı görülmektedir. Genel olarak hız ile aşınma miktarı artmaktadır [66].

#### **4.5.2. Basınç ve yük**

Briscoe, Tabor ve Pagasion'un yaptığı çalışmalarda kayma hızı ve zamana bağlı olarak politetrafloretillen'in aşınma miktarının uygulanan yükle başlangıçta herhangi bir değişiklik olmadığını, yük arttıkça aşınma miktarında artmaya başladığını belirtmişlerdir. Dolgulu politetrafloretillen'de ise aşınma miktarı fazla değildir. Katkılı polimerlerde yük arttığında aşınma miktarının fazla değişmediği görülmüştür [66].

#### **4.5.3. Sıcaklık**

Sıcaklığa bağlı olarak aşınma, polimer cinsine göre değişiklik gösterir [66].

#### 4.5.4. Aşınma mesafesi

Bütün malzemelerde olduğu gibi aşınma hızı, aşınma mesafesi ile artmasına rağmen genel olarak bu artış polimerin cinsine bağlıdır [66].

#### 4.5.5. Sertlik

Aşınma faktörüne, aşındırıcı sertliğinin etkisi birçok araştırmacı tarafından araştırılmış olup genel olarak aşındırıcı malzemelerin yüksek sertliğe sahip olması, kendinden daha düşük sertliğe sahip malzemelere göre çok daha iyi aşındırıcı bir özellik gösterdiği tespit edilmiştir [55].

Aşamanın oluşabilmesi için aşınan ve aşındırıcı malzemenin sertlikleri ile ilgili bir takım ilişkiler mevcuttur. Aşınan ve aşındırıcı malzemenin sertlikleri birbirine yakın olduğu durumlarda yüzeye batma az olacağından meydana gelen aşınma miktarı da az olacaktır. Aşınan malzeme ile yaklaşık olarak aşındırıcı malzemenin sertliği arasında 1,2 veya daha küçük bir oran olduğunda aşındırıcının, aşınan malzeme karşı yüzeyine batması gerçekleşmeyeceğinden dolayı aşınma hızı düşer. Ancak, böyle bir durumda, malzeme yüzeyinde hasar oluşmaya devam eder. Aşındırılmak istenen malzemenin sertliği, aşındırıcının sertliğinden daha yüksek olduğu durumda, abrasiv aşınma direnci oldukça yüksektir ve böyle durumlarda aşındırıcı partiküller aşınmaya maruz kalırlar [55].

#### 4.5.6. Yüzey pürüzlülüğü

Sürtünme kuvvetini, aşındırıcı malzemenin yüzey pürüzlülüğü yakından ilgilendirdiği için aşınmaya etkisi büyüktür. Pürüzlülüğün çok olduğu yüzeylerde, temas alanı küçük, fakat birim yüzeye etki eden kuvvet büyük olacaktır. Yüzeylerde pürüzlülük az ise temas alanı büyük, birim yüzeye etki eden kuvvet ise küçük olacaktır [55].

#### 4.5.7. Tane boyutu

Tane boyutuna ve aşındırıcı şeklinin durumuna göre, aşınan malzeme yüzeyine verdiği hasar değişir. Keskin ve sert kenarlı yüzeylere sahip aşındırıcı partiküller, malzeme yüzeyinde devamlı yonga gibi ayrılan bir kesilme oluştururken, yuvarlak ve pürüzsüz yüzeyli parçacıklar sünek yüzeyi yararak hasar verirler [55].

Yapılan çalışmalara göre kaba taneli aşındırıcı malzemenin, ince taneli aşındırıcıya göre daha etkili olduğu ve aşındırıcının tane büyüklüğüne bağlı olarak aşınma miktarının arttığı belirlenmiştir. Köşeli taneler ise yuvarlak tanelere göre daha fazla aşındırıcı etki gösterdiği bilinmektedir.

#### 4.5.8. Çalışma ortamının etkisi

Çevre sıcaklığı, ortamda bulunan nem, ortam basıncı aşınma davranışını etkileyen en önemli faktörlerdir. Yüzeyler arasında sürtünme söz konusu olduğu durumlarda sürtünme kuvvetinin bir kısmı sistemde sıcaklık olarak ortaya çıkacaktır. Sistemde özellikle kuru bir sürtünme mevcut ise ortaya çıkan ısının boyutları oldukça yüksek olduğundan, bazı malzemelerin mikroyapıları da değişikliğe sebep olabilmektedir [55].

Yüksek nem oranının sebep olduğu abrasiv aşınma miktarının artması ve su buharının ise diğer yağlayıcılara benzer olarak aşınma etkisini arttırdığı belirlenmiştir. Ancak düşük nem yoğunluğunun aşınma direncine etkili olduğu tespit edilmiştir [55].

#### 4.5.9. İşletme koşulları

Abrasiv aşınmada aşınan malzemenin yüzeyinin maruz kalacağı basıncın büyüklüğü, birim yüzeye uygulanan kuvvetin ve bu yüzden sürtünme kuvvetinin büyümesini sağlayacağından dolayı, aşınmanın artmasına sebep olacaktır. Aşınmanın meydana gelmesinde sürtünme ve kaymanın rolü büyük olmakla

beraber mekanizmayı etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Yapılan çalışmalarda kritik bir yükleme miktarına kadar devam eden yük artışı ile hacimsel aşınmanın benzer bir orantıyla değişim gösterdiği saptanmıştır. Hacimsel aşınma yük ile doğrusal olarak artış göstermektedir. Yükün aşırı miktarda artışı ile birim yük başına düşen aşınma miktarının, belli bir kayma yolundan sonra dengeye geldiği yapılan çalışmalarda tespit edilmiştir. Kayma hızının artması ile hacimsel aşınmanın daha yavaş olarak arttığı gözlemlenmiştir. Yapılan bütün teorik ve uygulamalı çalışmalarda aşınma miktarı ile kayma yolunun orantılı olduğu tespit edilmiştir [55].

## BÖLÜM 5. DENEY MALZEMELERİ VE YAPILAN DENEYLER

### 5.1. DeneYlerde Kullanılan Malzemeler

Aşınma ve sürtünme deneylerinde toplam 9 adet yüksek performanslı mühendislik plastikleri kullanılmıştır. Bu plastiklerin ticari adı, kompozisyonu ve üretici firma bilgileri Tablo 5.1'de gösterilmiştir.

Tablo 5.1: DeneYlerde kullanılan plastiklerin ticari isimleri, kompozisyonu, üretici firma ve üretimi

Sıra No	Numune adı	Kısa Gösterimi	Ticari Adı	Üretici Firma	Üretim Yöntemi	Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )
1	Poliamid-imid	PAI	Torlon 4203	Quatrand Engineering Polymers	Ekstrüzyon	1.39
2	Grafit ve PTFE katkılı Poliamid-imid	PAI+%12grafit+%3PTFE	Torlon 4301	Quatrand Engineering Polymers	Ekstrüzyon	1.44
3	Karbon elyafı Polietereterketone	PEEK+%30CF	Ketron CA30	Quatrand Engineering Polymers	Ekstrüzyon	1.384
4	Cam elyafı Polietereterketone	PEEK+%30GFR	Ketron GF30	Quatrand Engineering Polymers	Ekstrüzyon	1.493
5	Cam elyaf katkılı Polifenilensülfid	PPS+%40GFR	Ryton R-4-02	Chevron Phillips Chemical Company	Enjeksiyon	1.595
6	Cam elyafı Polisülfon	PSU+%20GFR	S-2010G4	BASF	Enjeksiyon	1.376
7	PTFE katkılı Polieterimid	PEI+%15PTFE	Ultem 4001	General Electric Company	Enjeksiyon	1.252
8	Poliketon	PK	Carilon	Shell Chemical Company	Enjeksiyon	1.185
9	Sıvı kristal polimer	LCP	Zenite	DuPont	Enjeksiyon	1.749

## 5.2. Aşınma Analizi

Aşınma cihazı, ana gövde üzerinde bir elektrik motoru, bir yük kolu, bir yük hücresi ve bilgisayar gibi kısımlardan oluşmaktadır.

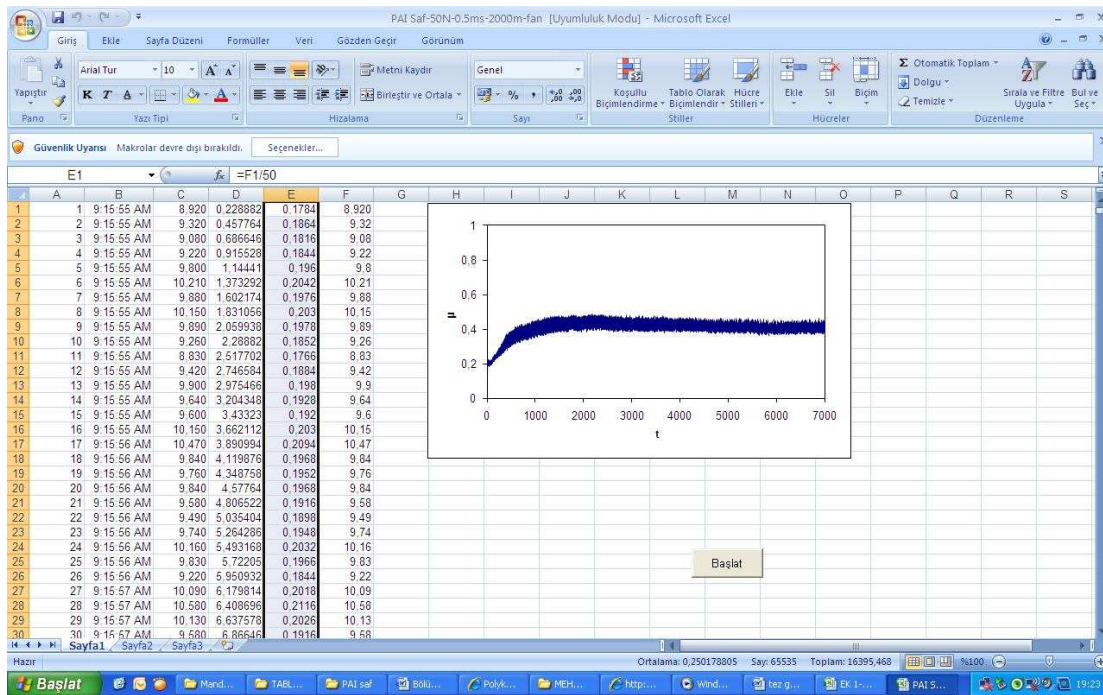
Bu makinada dönen bir disk vardır. Bu disk bir elektrik motorunun tahriği ile dönmektedir. Bu diskin üzerine deneylerde kullanılacak olan disk malzeme bir vida yardımıyla diğer diskin üzerine sabitlenir. Kol üzerinde bulunan bir mekanizma ile 6 mm çapındaki polimer pim malzemeler kola bağlanır. Çelik disk yüzeyi ve pim 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 aparatı da diskin dönme yönüne hareket etmek istemektedir. Bu istek sonucunda kolda bir ileriye doğru bir hareket gerçekleşir. Bu ileriye doğru olan hareket yanal kuvveti vermektedir. Bu yanal kuvvet ise Load cell ile ölçülüp elektronik göstergede değerleri göstermektedir. Aynı zamanda bu veriler direk bilgisayarda Excel programına depolanmaktadır.

Deneylerde dakikada 1000 veri alacak şekilde ayarlanmıştır. Deney süresince yaklaşık olarak ortalama 65.000 veri 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 5.1, bilgisayarda elde edilen Excel program formatının şeklini göstermektedir. Aşınma deney numuneleri ve disk için daha önceden tasarlanmış plastik enjeksiyon kalıbı kullanılmıştır.

%15 teflon katkılı PEI, %40 cam elyaf takviyeli PPS, %20 cam elyaf takviyeli PSU ve katkısız sıvı kristal polimer malzemelerden aşınma deneyleri için 6 mm çapında ve 50 mm boyunda olacak şekilde pim malzemeler enjeksiyonda üretilmiştir. Katkısız PAI, %12 grafit ile %3 teflon katkılı PAI, %30 karbon elyaf takviyeli PEEK, %30 cam elyaf takviyeli PEEK malzemeler ise ekstrüzyonla üretilmiş olup üretici



firmadan 6,5 mm çapında ve 1000 mm boyunda temin edilmişlerdir. Deney için revolver torna kullanarak pimler  $\text{Ø}6 \times 50 \text{ mm}$  olacak şekilde tornalanmıştır. Ayrıca karşı disk malzeme olarak 100 mm çapında ve 5 mm kalınlığında AISI 316L paslanmaz çelik malzeme kullanılmıştır. Disklerin yüzeyleri önce taşlanmış, her deney sonucunda 1000 nolu zımpara ile parlatılmış ve yüzey aseton ile temizlenmiştir. Deneyde kullanılan disklerin deney öncesi yüzey profilometresi, yüzey pürüzlülüğün bilinmesi amacıyla alınmıştır. Çelik disk malzemenin ortalama yüzey pürüzlülüğü  $Ra=0,36$  olarak ölçülmüştür.



Şekil 5.1 Aşınma deneyin de excel formatında elde edilen sürtünme katsayısı değerleri ve grafiği gösterilmiştir.

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

$$\mu = \frac{F_S}{F_N}$$

[5.1]

Yukarıdaki formülde  $\mu$  : Sürtünme katsayısını,  $F_S$ : Yanal sürtünme kuvveti (N) ve  $F_N$  ise Normal kuvveti (N) ifade eder.

Aşınma süresinin bitiminde, önce kol kaldırılarak aşınma programı durdurulur. Daha sonra diski döndüren motorun stop düğmesine basılarak disk durdurulmuştur. Pim bağlı olduğu yerden çıkarılır, varsa üzerindeki aşınma partikülleri ve çapakları alınır, son ağırlık ölçümü için dijital terazide tartılır. Deneylede kullanılan hassas terazi Precisa marka olup 0.0001g hassasiyetindedir. Polimer malzemenin rutubeti alındıktan sonra ilk ağırlık ile son ağırlık arasındaki farkı hesaplanarak belirlenen şartlar için numunenin aşınma kaybı değeri bulunur. Numunelerin aşınma oranının hesaplanmasında aşağıdaki formül kullanılır.

$$W_a = \frac{\Delta m}{S \times \rho \times F_N} \quad [5.2]$$

Yukarıdaki spesifik aşınma oranı formülündeki  $W_a$ : spesifik aşınma oranını,  $\Delta m$ : aşınma miktarını,  $S$ : kayma yolunu,  $\rho$  : test numunesinin yoğunluğunu,  $F$  ise normal kuvveti ifade eder.

Yüksek performanslı mühendislik polimerlerinin aşınma deneyleri, Sakarya Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi laboratuvarında bulunan ve Şekil 5.2'de şekli verilen pim-disk aşınma cihazında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.2. Aşınma test cihazı

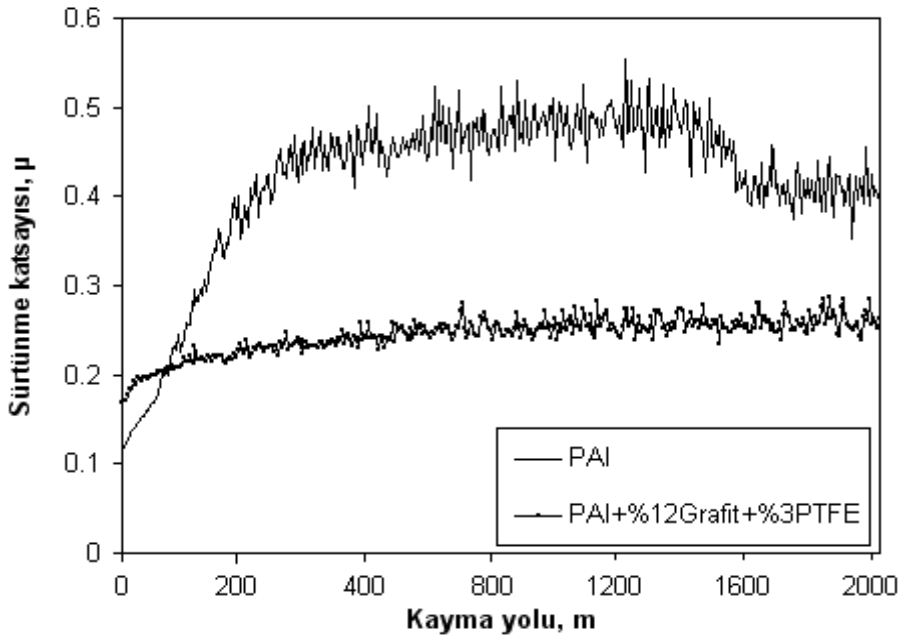
## BÖLÜM 6. DENEYSEL BULGULAR

### 6.1. Yapılan Çalışmaların Aşınma ve Sürtünme Analizleri

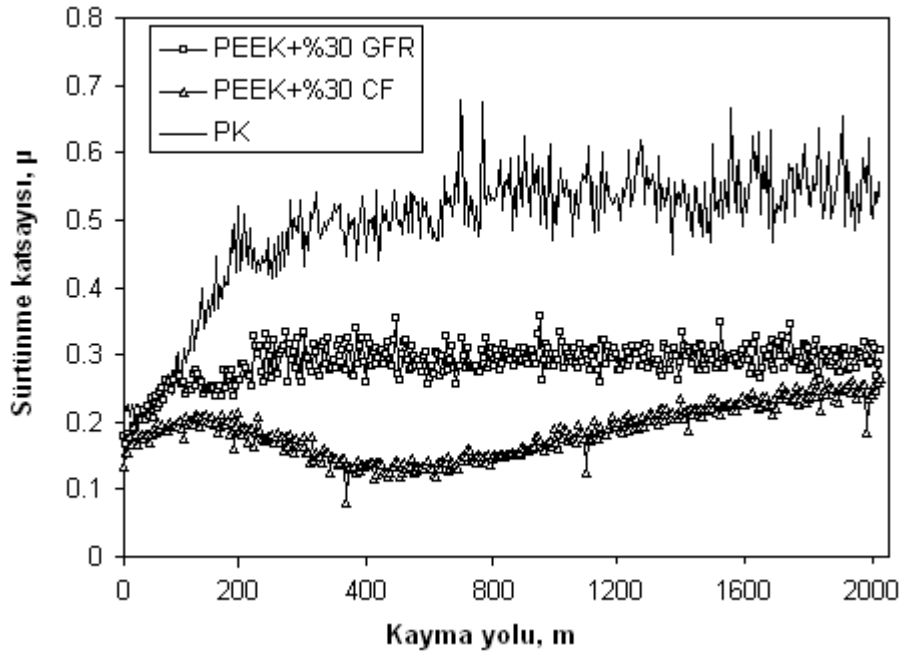
#### 6.1.1. Aşınma ve sürtünme sonuçlarına uygulanan yük, hız ve sıcaklığın etkisi

Deneylerde kullanılan polimer ve polimer esaslı kompozit malzemelerin AISI 316L paslanmaz çelik diske karşı aşınma analizleri;

Şekil 6,1'de 50N yük altında 0.5m/s kayma hızında saf PAI ve PAI+%12grafit+%3PTFE katkıli kompozitin sürtünme katsayısı-kayma yolu ilişkisini göstermektedir. Şekilden de görüldüğü gibi katkısiz PAI'in sürtünme katsayısı 0,40 ile 0,48 gibi geniş bir aralıkta seyretmektedir. Bununla birlikte PAI+%12grafit+%3PTFE katkıli kompozitin sürtünme katsayısı ise 0.22 ile 0.25 arasında değişmektedir.



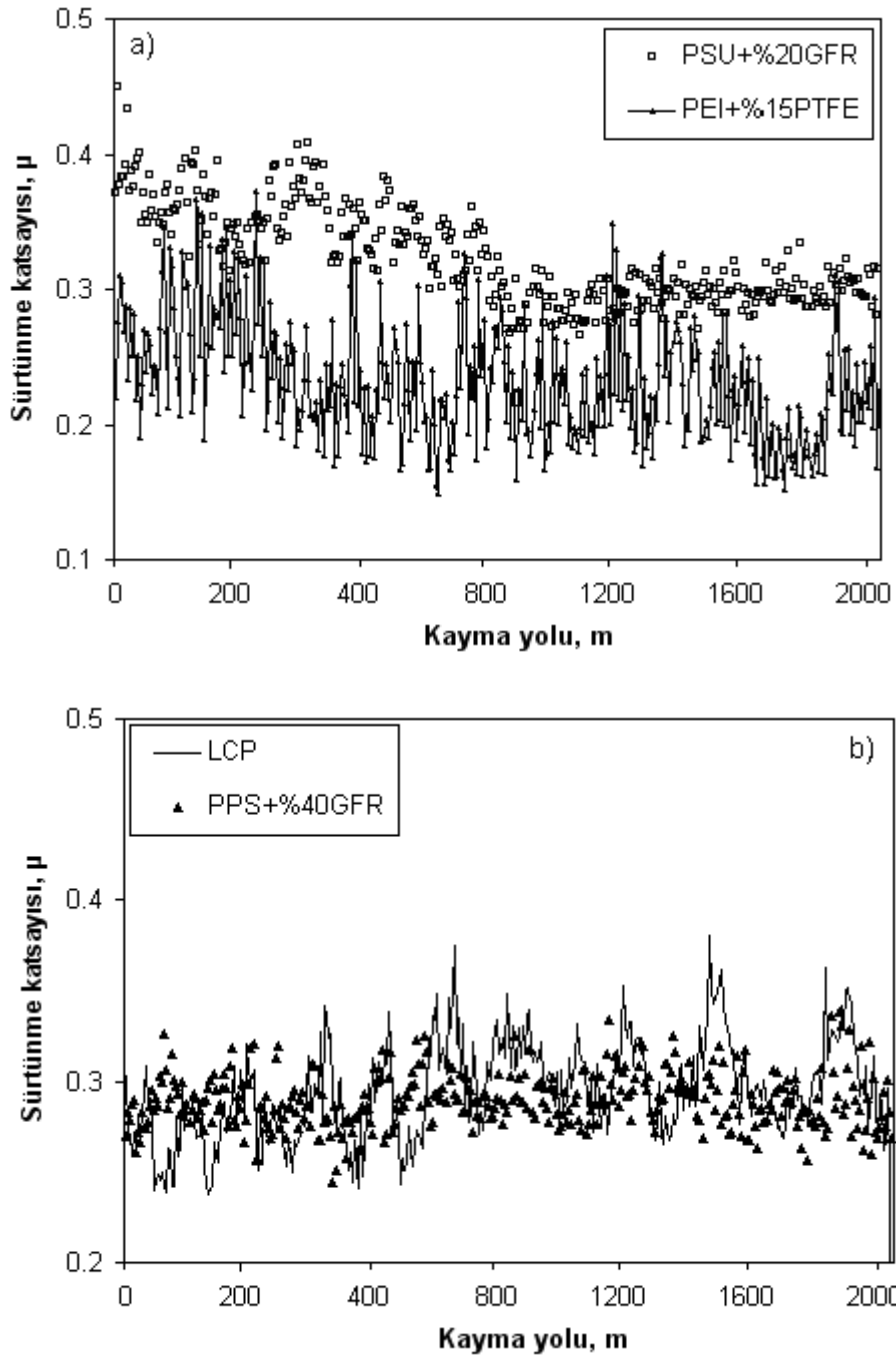
Şekil 6.1. Saf PAI ve PAI+%12grafit+%3PTFE katkıli kompozitin sürtünme katsayısı-kayma yolu ilişkisi (Kayma hızı: 0,5m/s, Uygulanan yük: 50N)



Şekil 6.2. Saf PK, PEEK+%30CF, PEEK+%30GFR kompozitlerin sürtünme katsayısı-kayma yolu ilişkisi (Kayma hızı: 0,5m/s, Uygulanan yük: 50N)

% 30 karbon fiber katkılı PEEK, % 30 cam elyaf katkılı PEEK kompozitlerinin ve saf PK polimerinin 50N yük altında 0.5m/s kayma hızındaki sürtünme katsayısı-kayma yolu ilişkisi Şekil 6.2' de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi PEEK+%30 karbon fiber katkılı kompozit malzemenin sürtünme katsayısı 0,12 ile 0,25 aralığında değişmekte iken % 30 cam elyaf katkılı PEEK kompozitin sürtünme katsayısı 0.22 ile 0.25 gibi dar bir aralıkta değişmekte, PK polimerinin sürtünme katsayısı ise 0,44 ile 0,65 arasında geniş bir aralıkta değişmektedir.

50N yük altında, 0.5m/s kayma hızında PPS+%40GFR, PEI+%15PTFE, PSU+%20GFR kompozit malzemelerinin ve saf sıvı kristal polimerlerinin sürtünme katsayısı-kayma yolu ilişkisi Şekil 6,3 a ve b' de verilmektedir. PPS+%40GFR kompozit malzemenin sürtünme katsayısı 0,25 ile 0,32 bir aralığında iken PEI+%15PTFE kompozit malzemenin sürtünme katsayısı 0.16 ile 0.29 arasında, PSU+%20GFR kompozit malzemesinin ise 0.27 ile 0.33 aralığında seyrettiği gözlenmiştir. Saf sıvı kristal polimerinin sürtünme katsayısı ise 0.27 ile 0.39 arasında geniş bir aralıkta değişme göstermektedir.



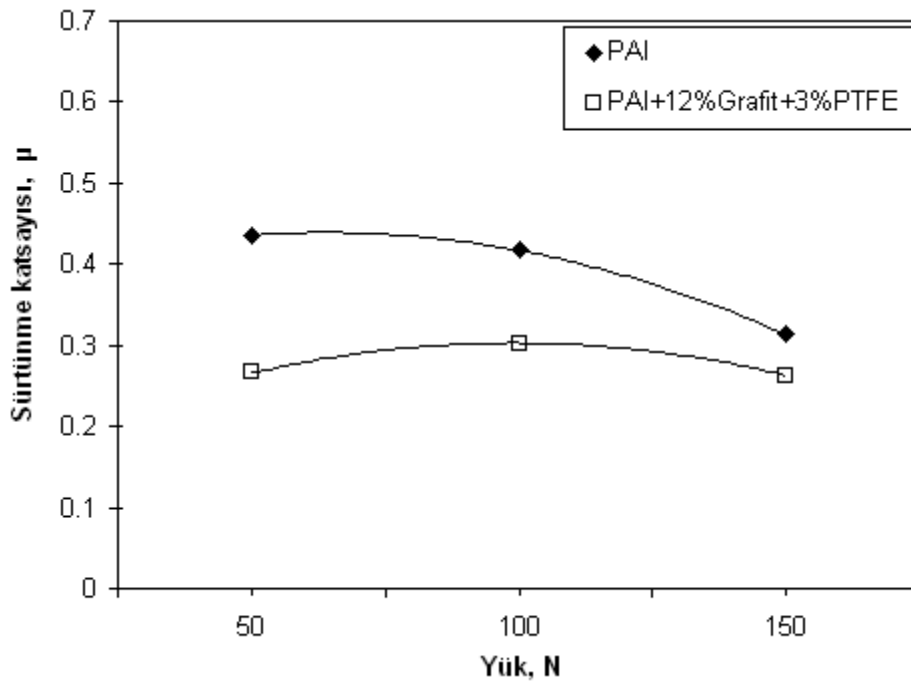
Şekil 6.3 a) PEI+%15PTFE ve PSU+%20GFR kompozitlerin ve b) saf sıvı kristal polimer ile PPS+%40GFR kompozitinin, sürtünme katsayısı-kayma yolu ilişkisi (Kayma hızı: 0,5m/s, yük: 50N)

Çalışmada kullanılan polimer ve polimer kompozitlerinin sürtünme katsayısı, iki aşamalı olarak gerçekleşmiştir. Birinci aşama olan başlangıç aşamasında, sürtünme katsayıları hızlı bir şekilde artmıştır. İkinci aşama olan kararlı hal aşamasında ise sürtünme katsayısı sabit kalmıştır. Bunun sebebi, başlangıç aşamasında, polimer

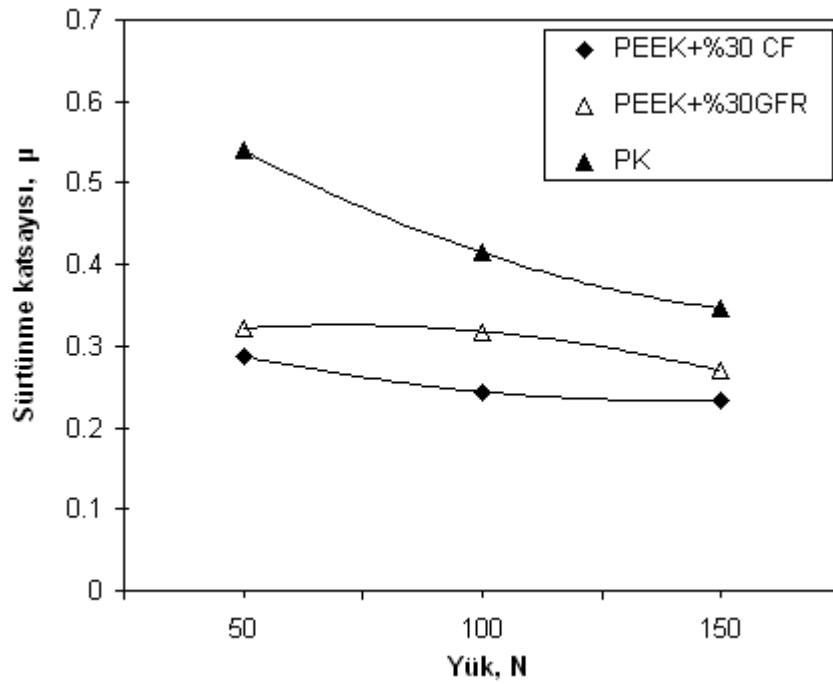
malzemenin yüzeyindeki pürüzlü tepelerin şekillenmesi, ve ikinci aşamada ise bu pürüzlü tepelerin kaybolması ve aşınma partiküllerinin yüzeyi örtmüş olmasıdır [5].

#### 6.1.1.1. Sürtünme sonuçlarına uygulanan yükün etkisi

Şekil 6.4’de saf PAI ve PAI+%12grafit+%3PTFE katkıli kompozitin 0,5m/s kayma hızındaki sürtünme katsayısı-yük ilişkisi verilmiştir. Şekilden de açıkça görüldüğü gibi yük 50N’dan 100N’a %100 oranında artırıldığında katkısız PAI’in sürtünme katsayısında %4 oranında düşme gözlenirken PAI+%12grafit+%3PTFE katkıli kompozit malzemede ise hafif artış gözlenmiştir. Bu artış %13 oranında olmuştur. Yükün 100N’dan 150N’a çıkarılması ile sürtünme katsayısında her iki malzemede azalma gözlenmiştir. Bu azalma katkısız PAI ve PAI+%12grafit+%3PTFE katkıli kompozit malzemeleri için sırasıyla % 25 ve % 13 oranında olduğu tespit edilmiştir. Benzer sonuçlar, Ünal ve arkadaşlarının farklı polimer ve katkıli polimer kompozitlerini kullanarak yaptıkları çalışmada da elde edilmiştir [6].



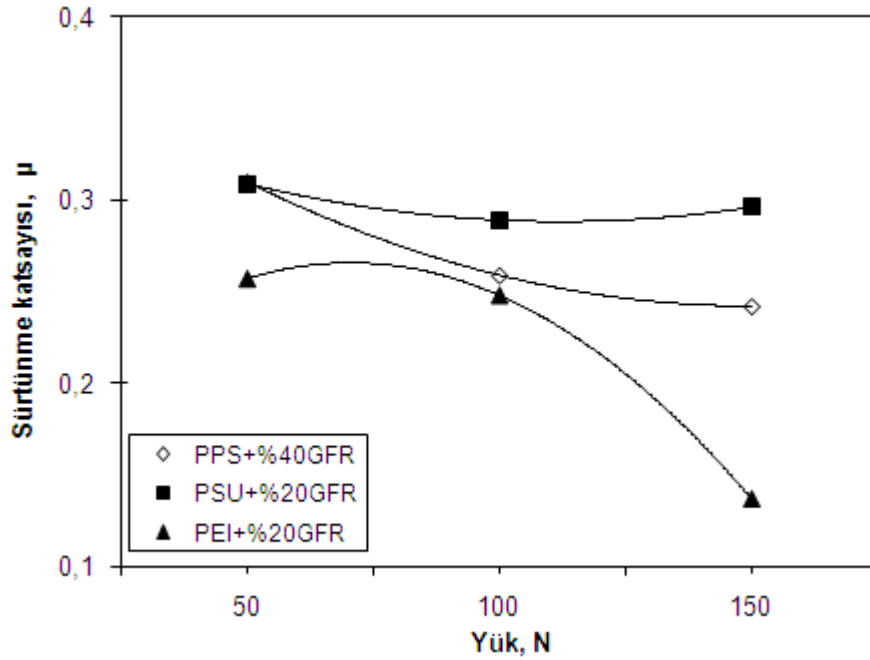
Şekil 6.4. Saf PAI ve PAI+%12grafit+%3PTFE katkıli kompozitin sürtünme katsayısı-yük ilişkisi (Kayma hızı: 0,5m/s)



Şekil 6.5. PEEK+%30CF, PEEK+%30GFR katkılı kompozitin ve PK polimerinin sürtünme katsayısı-yük ilişkisi (Kayma hızı: 0,5m/s)

Şekil 6.5’de PEEK+%30CF, PEEK+%30GFR katkılı kompozitler ile saf PK polimerinin 0,5m/s kayma hızındaki sürtünme katsayısı-yük ilişkisi verilmiştir. Şekil 6.5’de görüldüğü gibi uygulanan yük 50N’dan 150N’a çıkarıldığında hem PK hem de PEEK+30CF ve PEEK+%30GFR katkılı kompozitlerin sürtünme katsayısında düşme gözlenmiştir. Bu düşüş PK polimeri için, PEEK+30CF ve PEEK+%30GFR katkılı kompozitleri için sırasıyla % 35 % 19 ve % 16 oranında olmuştur.

Şekil 6.6’ da PPS+%40GFR, PEI+%15PTFE ve PSU+%20GFR kompozit malzemelerinin 0,5m/s kayma hızındaki sürtünme katsayısı-yük ilişkisi verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi yük 50N’dan 150N’a %200 oranında artırıldığında deneylerde kullanılan tüm kompozit malzemelerin sürtünme katsayıları uygulanan yük ile azalma göstermiştir. Bu azalma oranı en az PSU+%20GFR kompozitinde görülürken, PPS+%40GFR ve PEI+%15PTFE kompozit malzemelerinde sırasıyla gözlenmiştir. Bu azalma oranları PSU+%20GFR, PPS+%40GFR ve PEI+%15PTFE kompozit malzemelerinde sırasıyla % 0.4, % 22 ve % 47 oranında olmuştur.



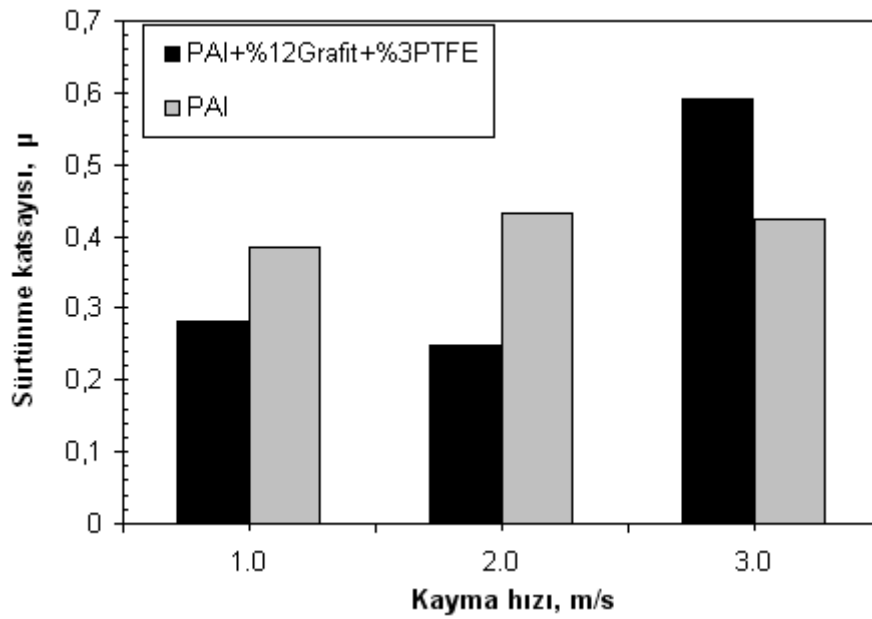
Şekil 6.6. PPS+%40GFR, PEI+%15PTFE ve PSU+%20GFR kompozit malzemelerinin sürtünme katsayısı-yük ilişkisi (Kayma hızı: 0,5m/s, Uygulanan yük 50N-100N-150N)

Uygulanan yükün artması ile birlikte sürtünme katsayısındaki azalma polimerlerin viskoelastik ve sıcaklık özellikleri ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. İki malzemenin teması sonucunda, pürüzlü yüzeylerde oluşan ısı ve bu iki malzeme arasındaki sürtünme yüzeylerinde artan sıcaklık, malzemenin viskoelastik özelliklerini, yapışma ve transfer davranışlarını etkiler [4,5].

#### 6.1.1.2. Sürtünme sonuçlarına kayma hızının etkisi

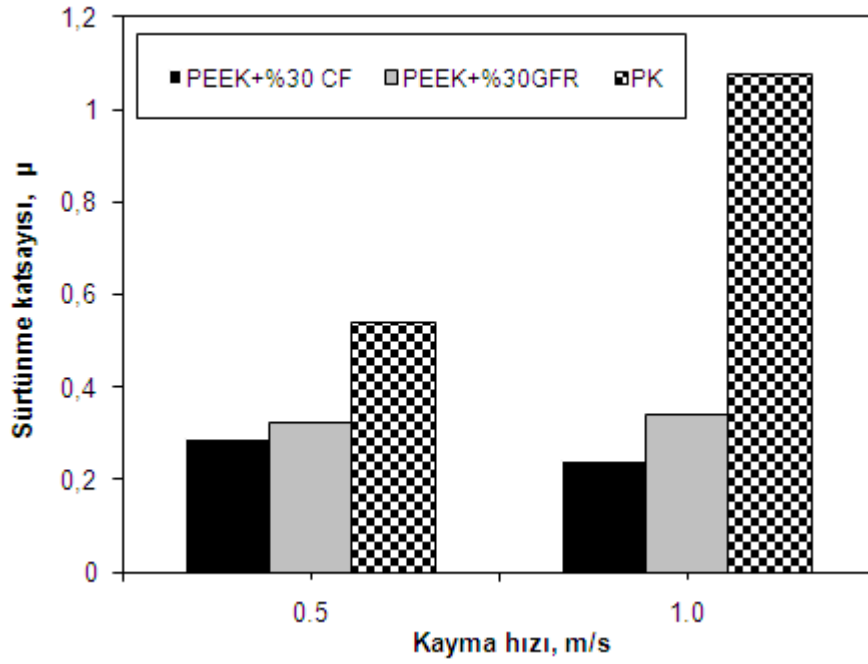
Saf PAI ve PAI+%12grafit+%3PTFE katkılı kompozitin 50N yük altındaki sürtünme katsayısı-kayma hızı ilişkisi Şekil 6.7’de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi kayma hızının 1.0m/s’den 3.0 m/s’ye artırılması ile saf PAI polimerinin sürtünme katsayısında hafif artış gözlenmiştir. PAI+%12grafit+%3PTFE kompozit malzemesi için 1.0m/s ile 2.0 m/s kayma hızı arasında sürtünme katsayısında azalma gözlenirken, 2.0 ile 3.0m/s arasında ise belirgin bir artış gözlenmiştir. Bu artış yaklaşık olarak %139 oranında olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebi hızın artması ile PAI polimeri bünyesindeki grafit katkıların kolay bir şekilde bünyeden ayrılması olarak ifade edilebilir.





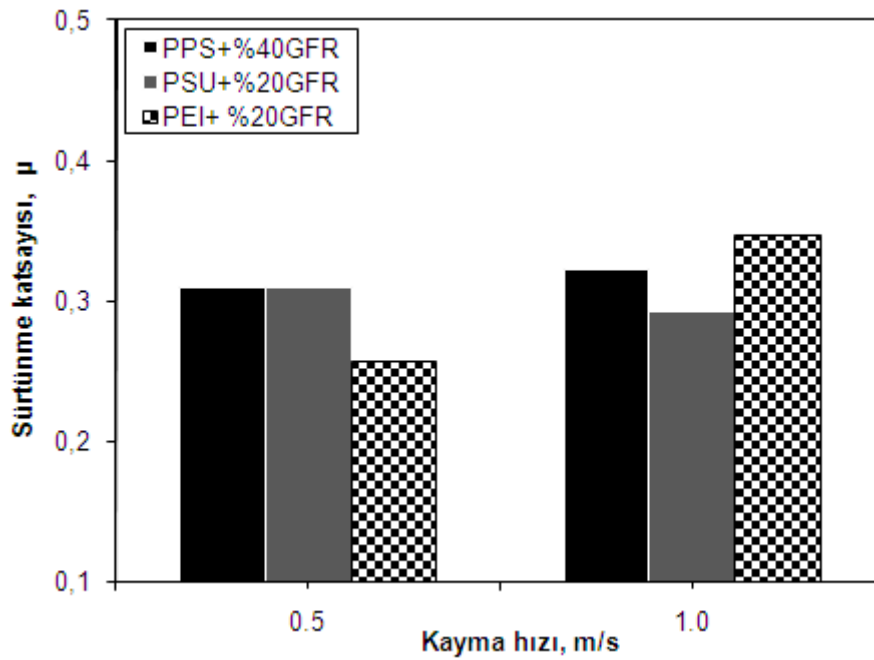
Şekil 6.7. Saf PAI ve PAI+%12grafit+%3PTFE katkıli kompozitin 50N yük altında sürtünme katsayısı-kayma hızı ilişkisi

PEEK+%30CF, PEEK+%30GFR katkıli kompozitin ve katkısiz PK polimerinin 50N yük altındaki sürtünme katsayısı-kayma hızı ilişkisi Şekil 6.8’de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi kayma hızının 0.5 m/s’den 1.0 m/s’ye artırılması ile PEEK+%30GFR katkıli kompozitin sürtünme katsayısında bir değişme gözlenmezken PK polimerinin sürtünme katsayısında ani bir artış gözlenmiştir. Karbon fiber katkıli PEEK kompozit malzemesinin sürtünme katsayısı da artan kayma hızından düşme yönünde çok az etkilenmiştir. PEEK+%30GFR katkıli kompozit için 0.5 m/s ile 1.0 m/s kayma hızı arasında sürtünme katsayısında artış % 0.5 olurken, PK polimerinde ise bu artış % 100 olarak gözlenmiştir. PEEK+%30CF polimerinde ise sürtünme katsayısındaki azalma % 16 oranında olduğu tespit edilmiştir. Kayma hızına bağlı olarak sürtünme katsayısındaki artış veya azalma Dickens ve Sullivan [25] tarafından yapılan çalışma ile benzerlik göstermiştir. Kayma hızının artmasıyla sürtünme katsayısının PPO ve PEEK polimerlerinde azaldığını, PTFE polimerinde ise arttığını belirlemişlerdir.



Şekil 6.8. PEEK+%30CF, PEEK+%30GFR katkılı kompozitin ve PK polimerinin 50 N yük altında sürtünme katsayısı-kayma hızı ilişkisi

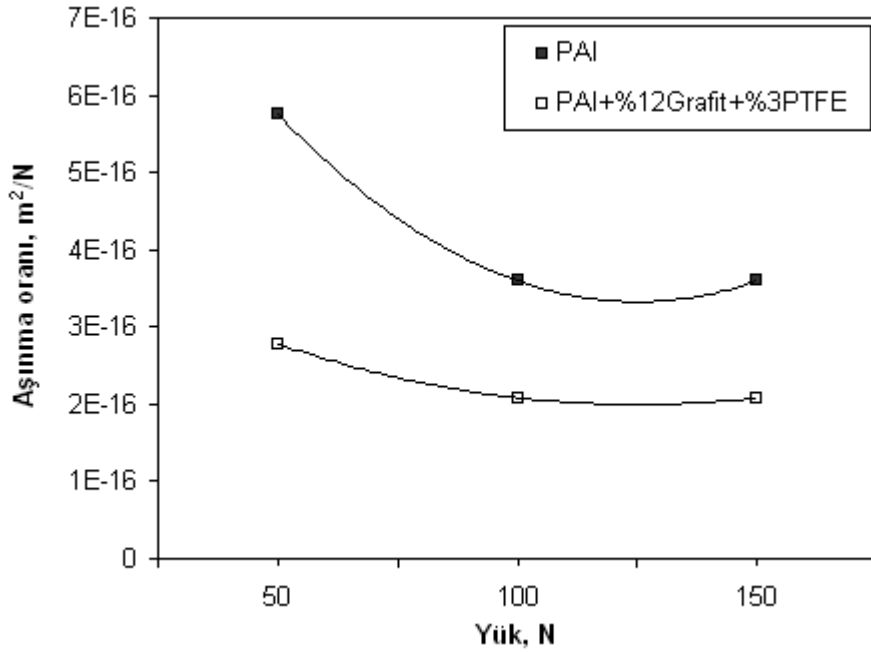
PPS+%40GFR, PEI+%15PTFE ve PSU+%20GFR kompozit malzemelerinin 50N yük altındaki sürtünme katsayısı-kayma hızı ilişkisi Şekil 6.9’da verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi kayma hızının 0.5 m/s’den 1.0 m/s’ye çıkartılması ile PEI+%15PTFE kompozit malzemesinin sürtünme katsayısında artış gözlenmiştir. Bu artış yaklaşık olarak % 35 civarında olmuştur. PPS+%40GFR polimerinin sürtünme katsayısında belirgin bir değişme gözlenmez iken PSU+%20GFR kompozit malzemesinde hafif bir düşme gözlenmiştir.



Şekil 6.9 PEI+%15PTFE, PPS+%40GFR ve PSU+%20GFR kompozit malzemelerinin 50N yük altındaki sürtünme katsayısı-kayma hızı ilişkisi

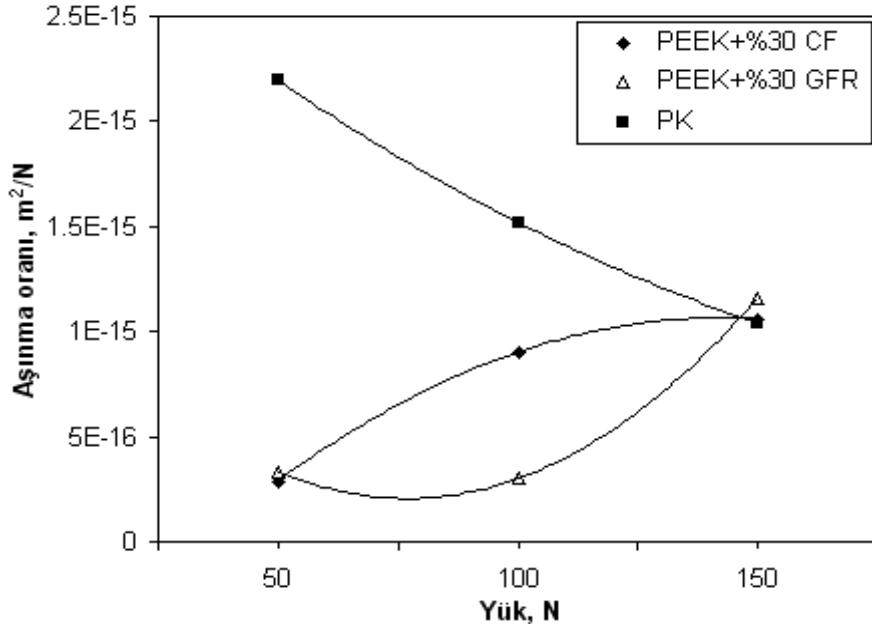
### 6.1.1.3. Aşınma sonuçlarına uygulanan yükün etkisi

Katkısız PAI polimeri ile grafit ve teflon katkılı PAI kompozitinin AISI 316L paslanmaz çelik malzemesine karşı oda sıcaklığında çalışması durumundaki aşınma oranı-yük ilişkisi Şekil 6.10'da verilmiştir. Uygulanan yükün artırılması ile birlikte her iki PAI deney malzemesi için aşınma oranlarında azalma tespit edilmiştir. Katkısız PAI'in aşınma oranı, grafit ve teflon katkılı PAI kompozitine göre daha fazla olmuştur. Yük 50N'dan 150N'a artırılması ile aşınma oranındaki azalma, saf PAI ve PAI+%12grafit+%3PTFE katkılı kompoziti için sırasıyla %37 ve %25 oranında olmuştur. Aşınma oranı, her iki malzeme için de  $10^{-16}$  m<sup>2</sup>/N değerlerinde elde edilmiştir.

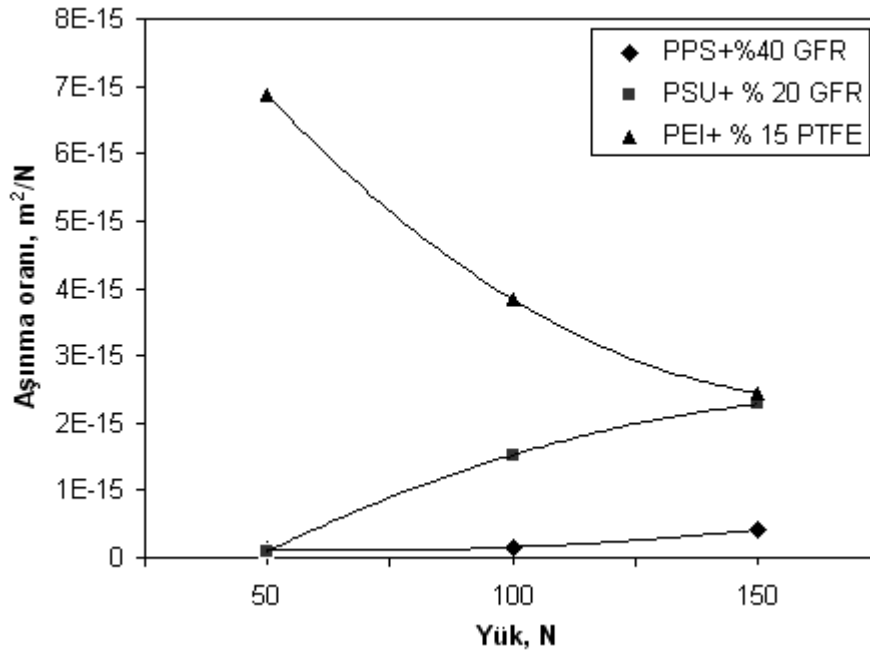


Şekil 6.10. Saf PAI polimeri ile PAI+%12grafit+%3PTFE katkılı kompozitin aşınma oranı-yük ilişkisi (Kayma hızı: 0,5 m/s)

PEEK+%30CF, PEEK+%30GFR katkılı kompozitin ve PK polimerinin AISI 316L paslanmaz çelik malzemesine karşı çalışması durumunda ve 0,5 m/s kayma hızındaki aşınma oranı-yük ilişkisi Şekil 6.11’de verilmiştir. PEEK+%30CF, PEEK+%30GFR katkılı kompozit malzemeler için uygulanan yükün artırılması ile birlikte aşınma oranlarında artış tespit edilmiştir. Katkısız PK polimerinin aşınma oranı ise uygulanan yükün artırılması ile azalmıştır. 50N ile 150N yük aralığında en az aşınan malzemenin PEEK+%30GFR kompozit malzemesinin olduğu tespit edilmiştir. PEEK+%30GFR’in aşınma oranındaki artış PEEK+%30CF kompozitine göre daha fazla olmuştur. Yük 50N’dan 150N artırılması ile PEEK+%30CF, PEEK+%30GFR katkılı kompozitin aşınma oranındaki artış sırasıyla %24 ve %26 oranında olmuştur. PK polimerindeki aşınma oranındaki azalma ise %38 olarak tespit edilmiştir. Benzer sonuçlar, Ünal ve arkadaşlarının [6] yaptığı çalışma sonucunda da elde edilmiştir.



Şekil 6.11. PEEK+%30CF, PEEK+%30GFR katkıli kompozitin ve PK polimerinin aşınma oranı-yük ilişkisi (Kayma hızı: 0.5m/s)



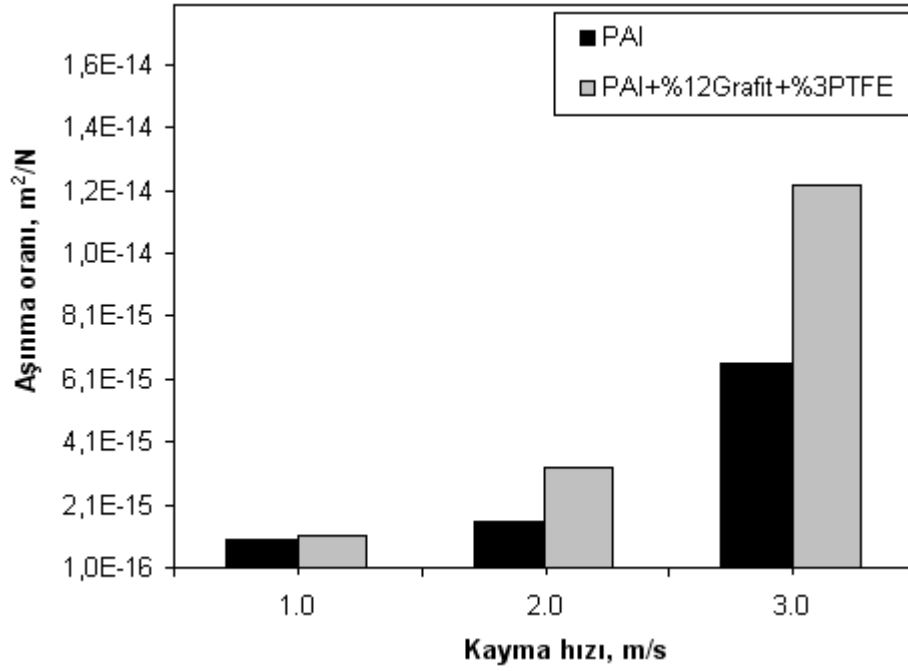
Şekil 6.12. PEI+%15PTFE, PSU+%20GFR ve PPS+%40GFR kompozit malzemelerinin aşınma oranı-yük ilişkisi (Kayma hızı: 0.5m/s)

PPS+%40GFR, PEI+%15PTFE ve PSU+%20GFR kompozit malzemelerinin AISI 316L paslanmaz çelik malzemesine karşı çalışması durumundaki aşınma oranı-yük ilişkisi Şekil 6.12'de verilmiştir. PSU+%20GFR ve PPS+%40GFR kompozit malzemeleri için uygulanan yük 50N'dan 150N'a artırılması ile birlikte aşınma

oranlarında artış gözlenmiştir. Bu artış sırasıyla %81 ile %22 oranında olmuştur. Bununla birlikte PEI+%15PTFE kompozit malzemesinin aşınma oranında da büyük oranda azalma gözlenmiştir. Uygulanan yükün artması ile aşınma oranının arttığı, Srinath [24] ve Ünal [10] tarafından yapılan çalışmalar sonucunda da elde edilmiştir. Uygulanan yüke bağlı olarak aşınma oranındaki azalma ve artma yönündeki değişimlerin, karşı diskte oluşan film tabakası ve bu film tabakasının kalınlığı ile ilişkili olabileceği düşünülmektedir. Oluşan film tabakası, polimer ve karşı disk yüzey arasında yağlayıcı görevi görerek iki malzemenin sürtünmesini ve dolayısıyla aşınma miktarını etkilemiş olabilir.

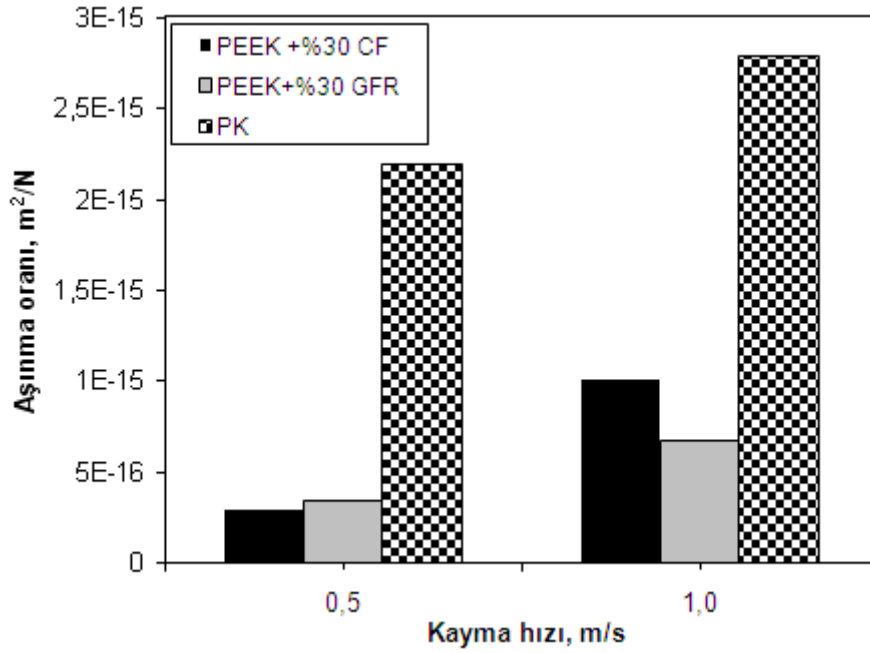
#### **6.1.1.4. Aşınma ve sonuçlarına kayma hızının etkisi**

Şekil 6.13'de saf PAI ve PAI+%12grafit+%3PTFE katkılı kompozitin 50N yük altındaki ve oda sıcaklığındaki aşınma oranı-kayma hızı ilişkisi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi kayma hızının 1.0 m/s'den 3.0 m/s'ye %100 oranında artırılması ile hem saf PAI polimerinin hem de grafit ve teflon katkılı PAI kompozit malzemesinin aşınma oranlarında artış gözlenmiştir. Bu artış sırasıyla katkısız PAI için %55 oranında, PAI+%12grafit+%3PTFE kompozit malzemesi için ise %106 oranında artış gözlenmiştir. Şekilde görüldüğü gibi saf PAI grafit ve teflon katkılı PAI'e göre daha az aşınmıştır.



Şekil 6.13. Saf PAI ve PAI+%12grafıt+%3PTFE katkıli kompozitin 50N yük altında aşınma oranı-kayma hızı ilişkisi

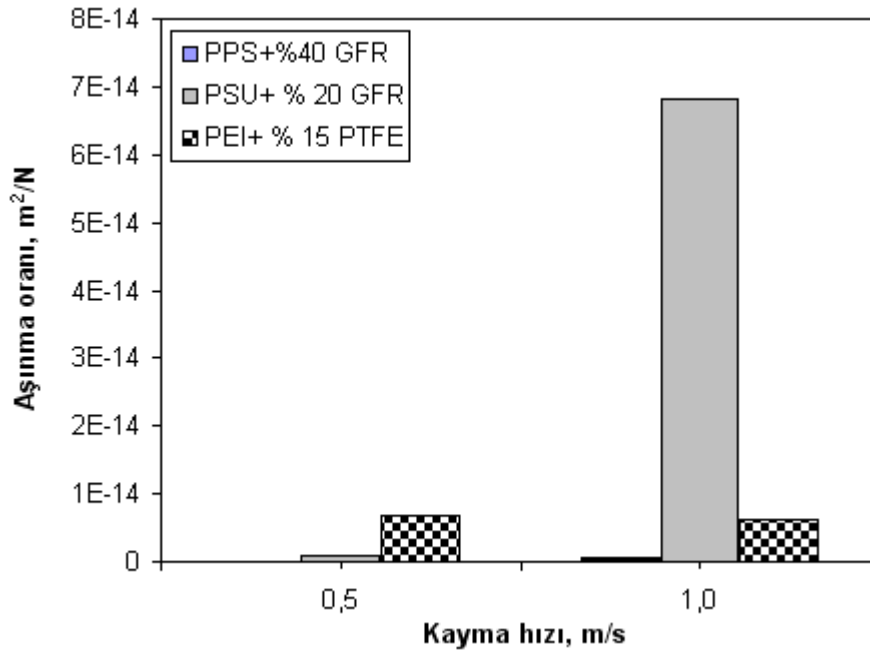
Şekil 6.14'de %30 karbon fiber katkıli PEEK, %30 cam elyaf katkıli PEEK kompozitin ve katkısiz PK polimerinin 50N yük altındaki aşınma oranı-kayma hızı ilişkisi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi kayma hızının 0.5 m/s'den 1.0 m/s'ye artırılması ile PEEK+%30CF, PEEK+%30GFR katkıli kompozitin ve PK polimer malzemelerinde aşınma oranlarında artış gözlenmiştir. PEEK+%30CF, PEEK+%30GFR katkıli kompozitin ve PK polimer malzemesinin aşınma oranları sırasıyla %20, %10 ve %27 olarak görülmüştür. Dickens ve Sullivan [25] yaptıkları çalışma sonucunda artan kayma hızı ile birlikte aşınma oranının arttığını belirlemişlerdir.



Şekil 6.14. PEEK+%30CF, PEEK+%30GFR katkıli kompozitin ve PK polimerinin 50N yük altında aşınma oranı-kayma hızı ilişkisi

Şekil 6.15’de PPS+%40GFR, PEI+%15PTFE ve PSU+%20GFR kompozit malzemelerinin 50N yük altındaki aşınma oranı-kayma hızı ilişkisi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi kayma hızının 0,5 m/s’den 1,0 m/s’ye %100 oranında artırılması ile PPS+%40GFR kompozit malzemesinin aşınma oranında hafif bir artış ve PSU+%20GFR kompozit malzemesinde ise çok yüksek bir artış gözlenirken, PEI+%15PTFE kompozit malzemesinde ise hafif azalma gözlenmiştir. Cam elyaf ve PTFE katkıli polimerler kullanılarak yapılan çalışmalarda da artan kayma hızına bağlı olarak aşınma oranının azaldığı belirlenmiştir [6, 23].





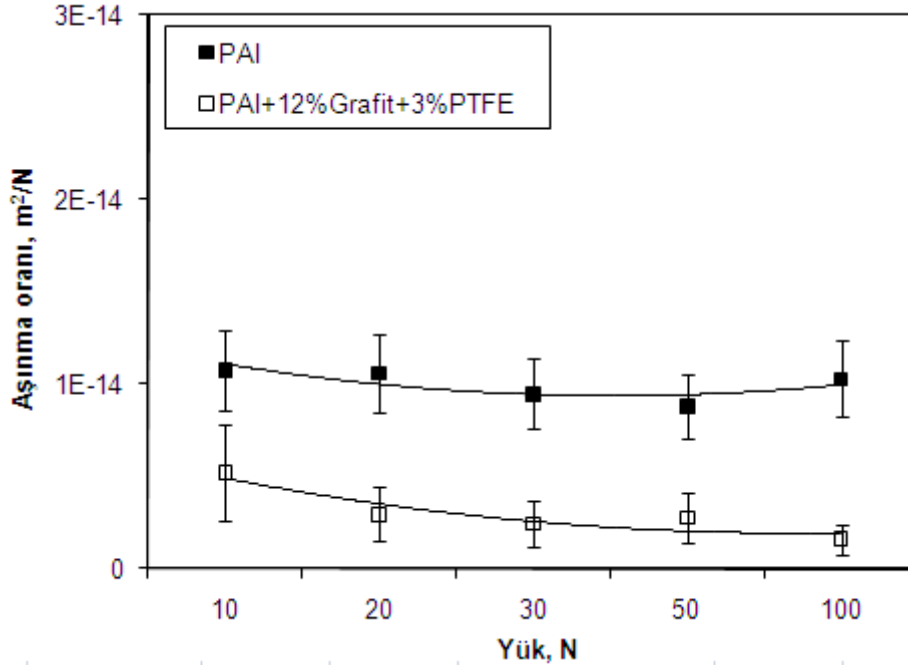
Şekil 6.15. PPS+%40GFR, PEI+%15PTFE ve PSU+%20GFR kompozit malzemelerinin 50N yük altında aşınma oranı-kayma hızı ilişkisi

#### 6.1.1.5. Aşınma ve sürtünme sonuçlarına yük ve ortam sıcaklığının etkisi

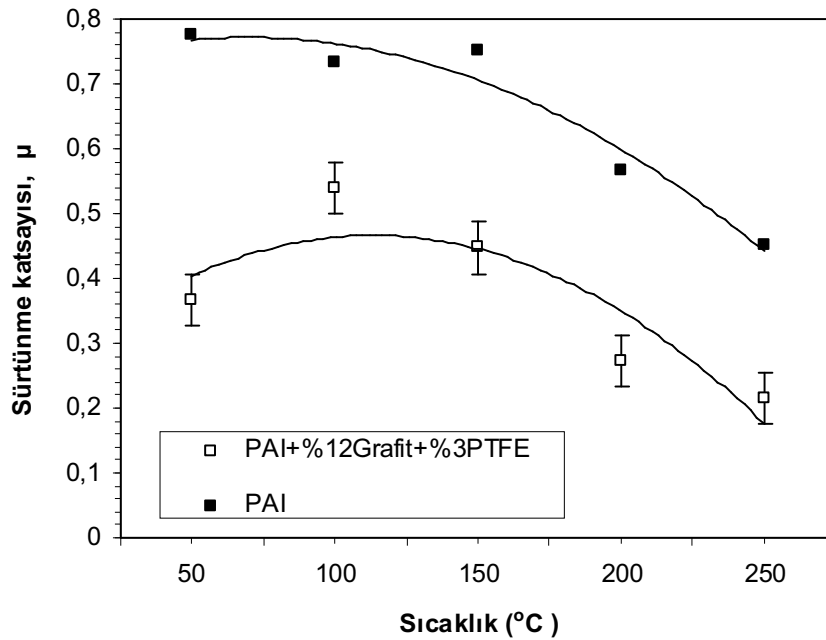
Katkısız PAI polimeri ile grafit ve teflon katkılı PAI kompozitinin AISI 316L paslanmaz çelik malzemesine karşı 250°C sıcaklıkta 10N, 20N, 30N, 50N, 100N yükler altında çalışması durumundaki aşınma oranı-yük ilişkisi Şekil 6.16'da verilmiştir. Katkısız PAI polimeri ile grafit ve teflon katkılı PAI kompozitinin yükleri 10N'dan 100N'a çıkarıldığında aşınma oranlarında düşme görülmektedir. Ancak bu düşüş grafit ve teflon katkılı PAI kompozitinde daha belirgin iken katkısız PAI polimerinde ise çok az azalma tespit edilmiştir.

Saf PAI ve PAI+%12grafit+%3PTFE katkılı kompozitin 10N yük altındaki sürtünme katsayısı-ortam sıcaklığı ilişkisi Şekil 6.17'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi ortam sıcaklığı oda sıcaklığından 250°C'ye çıkartılması ile saf PAI ve PAI+%12grafit+%3PTFE katkılı kompozitin sürtünme katsayılarında azalma tespit edilmiştir. Sadece PAI+%12grafit+%3PTFE kompozit malzemesi için 50°C ile 100°C arasında sürtünme katsayısında artış gözlenirken, 100°C ile 250°C arasında ise belirgin bir düşüş gözlenmiştir. Bu düşüş 100°C ile 250°C arasında yaklaşık olarak

%60 oranında olduğu tespit edilmiştir. Saf PAI polimerinde ise 100 °C ile 250 °C arasında azalma ise % 38 oranında olduğu tespit edilmiştir.

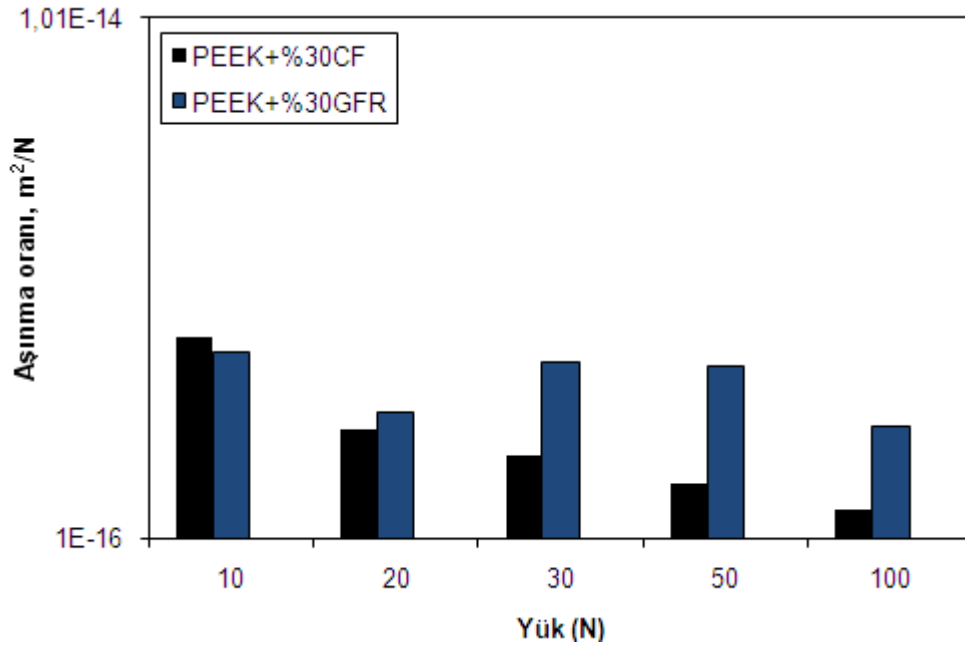


Şekil 6.16. Saf PAI ve PAI+%12grafit+%3PTFE katkıli kompozitin aşınma oranı-yük ilişkisi (Kayma hızı: 1.0 m/s, Ortam sıcaklığı= 250 °C)



Şekil 6.17. Saf PAI ve PAI+%12grafit+%3PTFE katkıli kompozitin sürtünme katsayısı-sıcaklık ilişkisi (Kayma Hızı 1.0 m/s, Uygulanan yük: 10N)

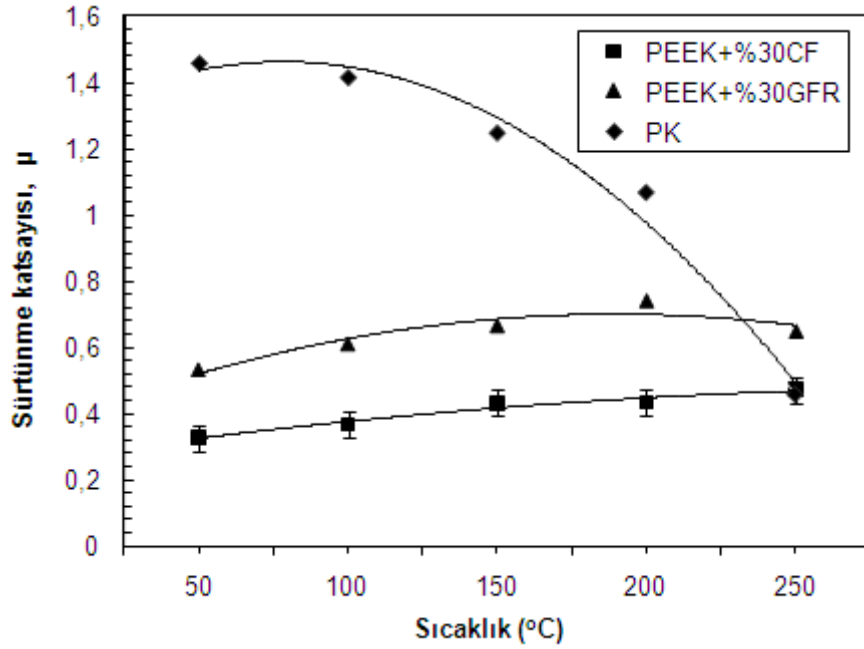
PEEK+%30CF ve PEEK+%30GFR kompozitlerinin AISI 316L paslanmaz çelik malzemesine karşı 250°C ortam sıcaklığındaki 10N-20N-30N-50N-100N ağırlıklarındaki çalışması durumundaki aşınma oranı-yük ilişkisi Şekil 6.18’ de verilmiştir. PEEK+%30CF, PEEK+%30GFR kompozit malzemelerinin yükün artmasıyla aşınma oranlarında hafif bir düşüş görülmüştür. PK polimer malzemesinin PEEK+%30CF, PEEK+%30GFR kompozit malzemelerine göre aşınma oranı oldukça yüksek seviyede olduğu görülmüştür. PK polimerinin 30N yük altındaki aşınma oranı  $5,79 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{N}$  iken PEEK+%30CF ve PEEK+%30GFR kompozit malzemelerinin aşınma oranları aynı şartlarda sırasıyla  $1,6810^{-15} \text{ m}^2/\text{N}$  ve  $3,4610^{-15} \text{ m}^2/\text{N}$  olarak tespit edilmiştir.



Şekil 6.18. PEEK+%30 CF, PEEK+%30 GFR kompozitlerinin 250°C ortam sıcaklığındaki aşınma oranı-yük ilişkisi (Kayma hızı: 1.0 m/s)

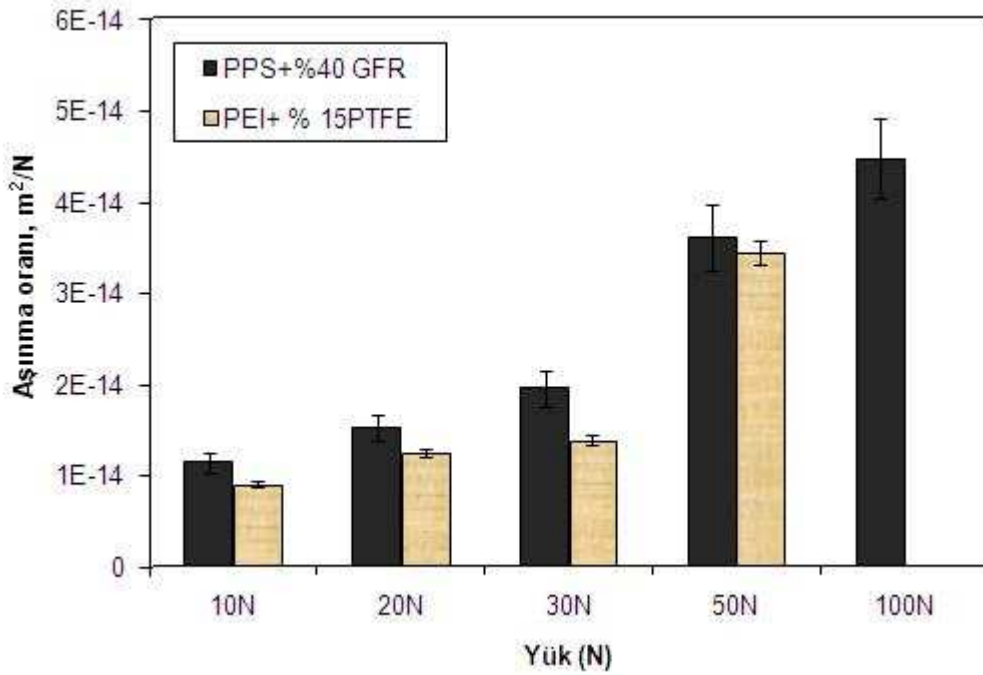
PEEK+%30CF, PEEK+%30GFR polimer kompozitleri ile katkısız PK polimer malzemesinin 10N yük altındaki ve farklı ortam sıcaklıklarındaki sürtünme katsayısı-sıcaklık ilişkisi Şekil 6.19’da verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi sıcaklık 50°C’den 250°C’ye artırılması ile PEEK+%30CF, PEEK+%30GFR kompozitlerinin aşınma oranında artış gözlenmiştir. PEEK+%30CF, PEEK+%30GFR kompozit malzemeleri için aşınma oranlarında sırasıyla %44 ile %22 oranında azalma gözlenmiştir.

Katkısız PK polimer malzemesinde ise sıcaklığın artması ile belirgin bir düşüş gözlenmiştir.



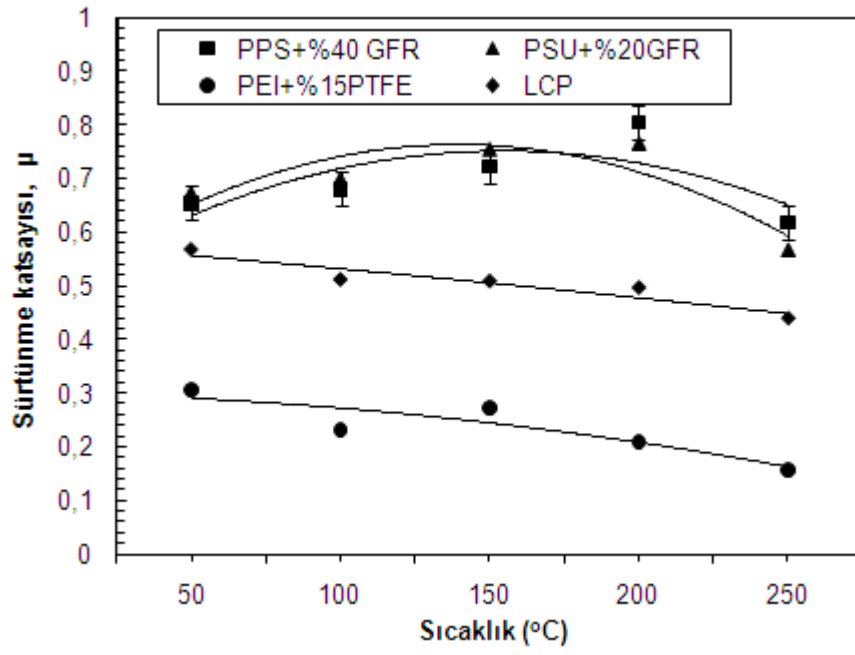
Şekil 6.19. PEEK+%30 CF, PEEK+%30 GFR kompozitlerinin ve PK polimer malzemenin 1.0 m/s kayma hızında ve 10N yük altındaki sürtünme katsayısı-sıcaklık ilişkisi

PPS+%40GFR ve PEI+%15PTFE kompozit malzemelerinin AISI 316L paslanmaz çelik malzemesine karşı 250°C ortam sıcaklığında 10N, 20N, 30N, 50N, 100N yüklerde ve 1.0m/s kayma hızında çalışması durumundaki aşınma oranı-yük ilişkisi Şekil 6.20'de verilmiştir. Deneyleerde kullanılan PPS+%40GFR ve PEI+%15PTFE kompozit malzemelerinin aşınma oranlarında genel olarak yükün artması ile birlikte bir artış gözlenmiştir. PSU+%20GFR kompozit malzemesi ve LCP polimerleri en fazla 10N yükte çalışılmıştır ve aşınma oranları çok yüksek değerler elde edilmiştir. Bu sebeple bu iki malzemeye bu grafikte yer verilmemiştir. Yani 10N yük ve 250°C sıcaklık PSU+%20GFR kompozit malzemesi ve sıvı kristal polimer malzemeleri için oldukça büyük yük ve sıcaklıklar olduğu tespit edilmiştir. Bu sebeple LCP, 10N yük ve 250°C gibi yüksek sıcaklıklarda çalışmadığından PAI ve grafit ve teflon katkılı poli-amid-imid ile cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli PEEK gibi kompozit malzemelerin yerine alternatif olamayacağı tespit edilmiştir.



Şekil 6.20. PPS+%40GFR, PEI+%15PTFE kompozit malzemelerinin 1.0 m/s kayma hızında ve 250°C ortam sıcaklığındaki aşınma oranı-yük ilişkisi

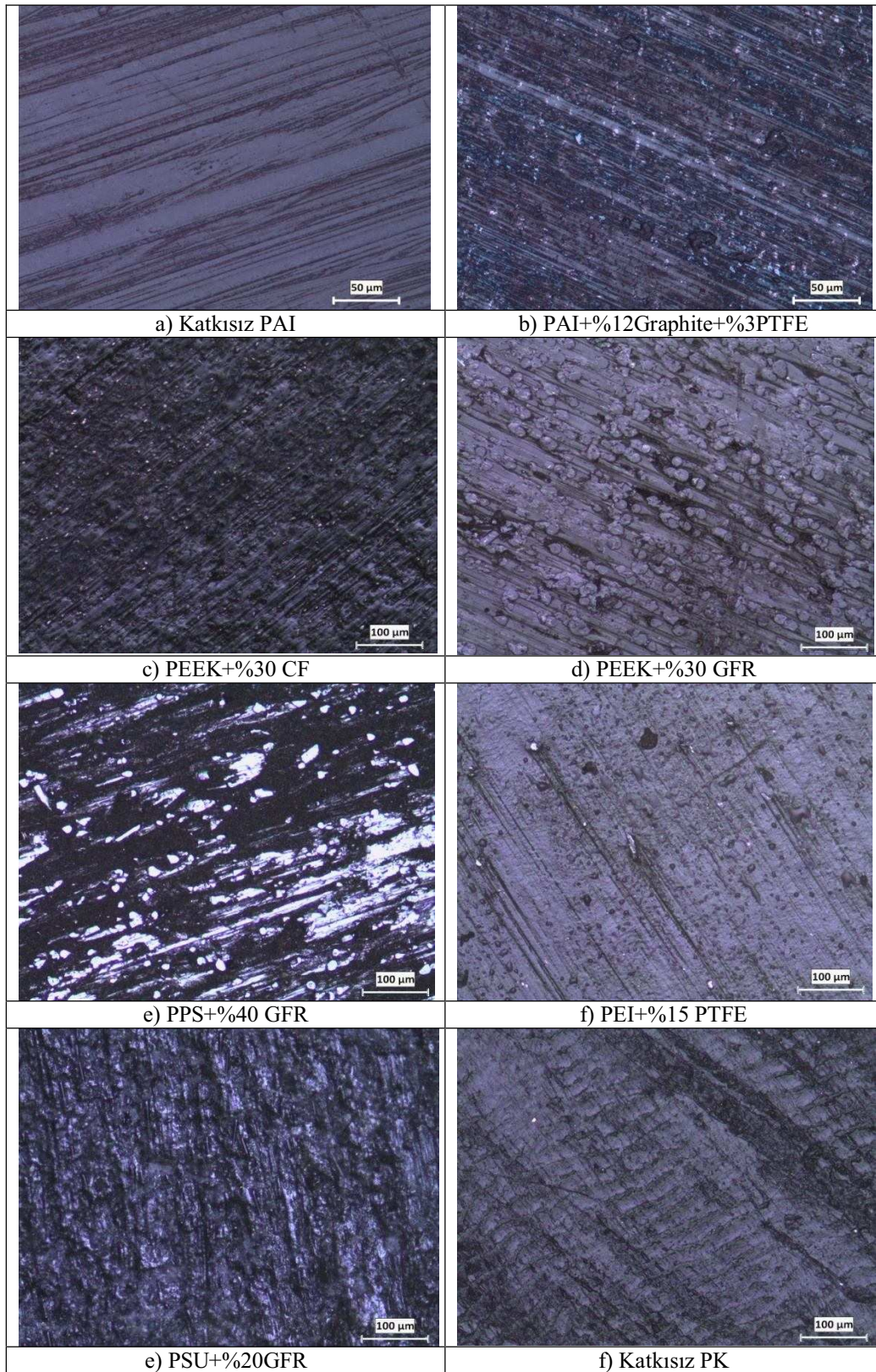
PPS+%40GFR, PEI+%15PTFE, PSU+%20GFR kompozit malzemeleri ile LCP malzemenin 10N yük altındaki 1.0m/s kayma hızındaki sürtünme katsayısı-ortam sıcaklığı ilişkisi Şekil 6.21’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi sıcaklık 50°C’den 250°C’ye artırılması ile LCP polimerin sürtünme katsayısında yaklaşık olarak %22 oranında düşüş gözlenmiştir. PEI+%15PTFE kompozit malzemesi için ise aynı şartlar altında sürtünme katsayısında yaklaşık olarak %48 oranında azalma gözlenmiştir. PPS+%40GFR ve PSU+%20GFR kompozit malzemelerinde ise ortam sıcaklığı 50°C’den 150°C’ye çıkarıldığında aşınma oranı yükselirken 150°C’den 250°C’ye çıkarıldığında sürtünme katsayısında sırasıyla %23 ile %25 oranında düşme tespit edilmiştir. Sıcaklığın artması polimer malzemelerin yumuşamasını sağlamış ve polimerden karşı diske daha fazla malzeme kaybı gerçekleşmiştir. Oluşan bu malzeme kaybı karşı disk yüzeyinde film tabakası oluşturarak sürtünme katsayısının azalmasına katkı sağladığı düşünülmektedir.



Şekil 6.21. PPS+%40GFR, PEI+%15PTFE, PSU+%20GFR kompozit malzemeleri ile ve sıvı kristal polimer malzemesinin sürtünme katsayısı-sıcaklık ilişkisi (Kayma Hızı 1.0m/s Uygulanan yük: 10N)



### 6.1.2. Mikroyapı İncelemeleri

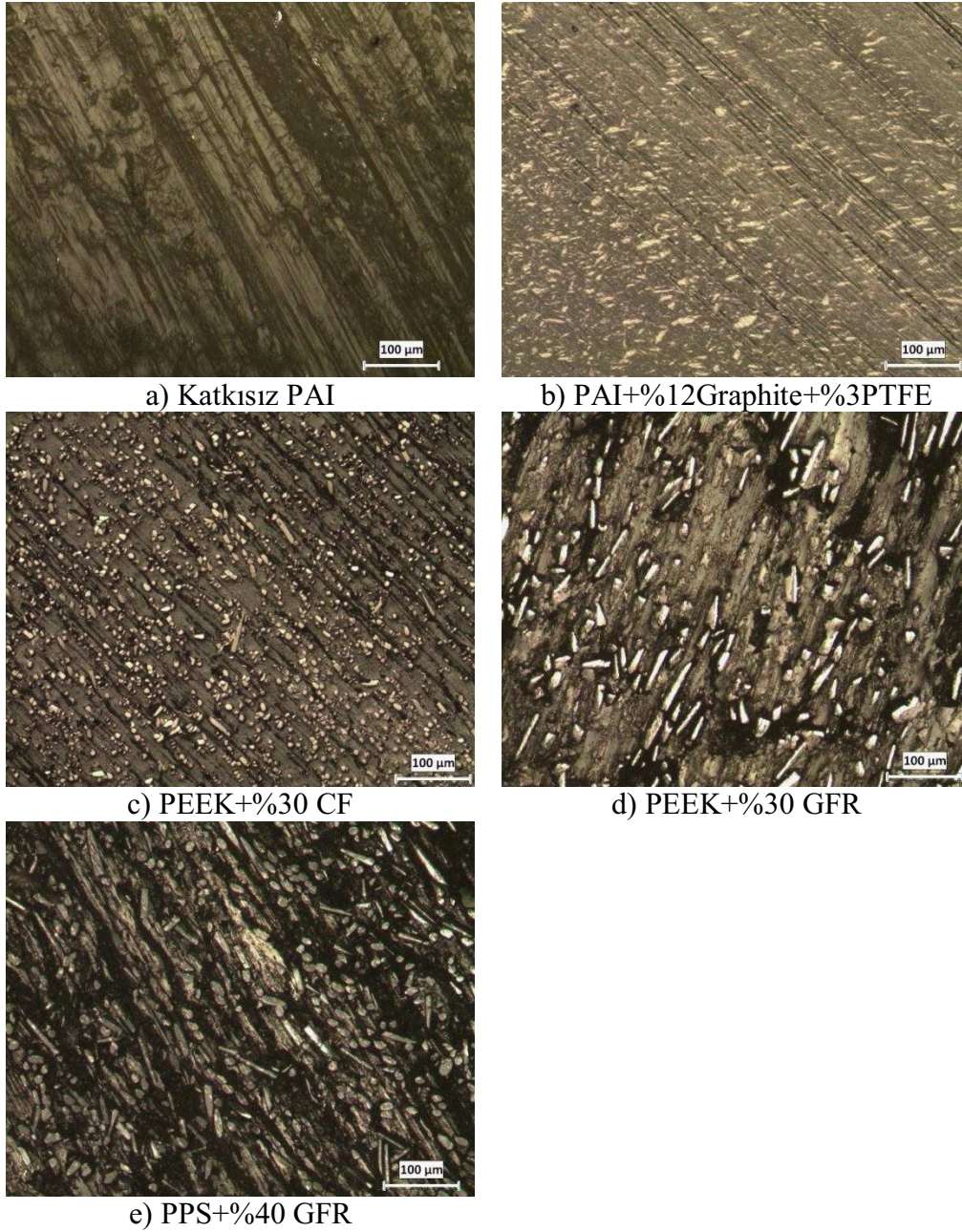


Şekil 6.22 Deneylerde kullanılan tüm test numunelerinin kuru kayma şartları altındaki optik mikroskop mikroyapı görüntüleri ( Ortam sıcaklığı:  $22\pm 2^{\circ}\text{C}$ , Kayma hızı:  $1.0\text{m/s}$ , Uygulanan yük:  $100\text{N}$ )

Şekil 6.22'de oda sıcaklığında kuru kayma şartları altında 100N yük ve 1.0m/s kayma hızında AISI 316L çelik disk malzemesine karşı gerçekleştirilen aşınma deneyleri sonucunda elde edilen aşınmış pim numunelerinin optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Optik görüntüler dikkatli bir şekilde incelendiğinde katkısız PAI, %12 grafit ve %3 teflon katkılı PAI kompoziti, %15 teflon katkılı PEI kompoziti ve %30 karbon fiber katkılı PEEK polimer kompoziti 100N yük altındaki ve 1.0m/s kayma hızındaki aşınma yüzeylerinin daha düzgün olduğu yani abrasiv aşınmanın az olduğu gözlenmiştir. Bununla birlikte %20 cam elyafı PSU kompoziti, %40 cam elyaf katkılı PPS kompoziti ile %30 cam elyaf katkılı PEEK kompozit malzemelerinin abrasiv aşınmaya maruz kaldığı görülmektedir. Bunun sebebi ise malzemelerin bünyesinde bulunan cam elyaf katkıların uygulanan yük ve hıza bağlı olarak kırılması ve ana matris malzemenin sert abrasiv malzemelerden dolayı aşınması olarak düşünülmektedir.

Şekil 6.23 ise deneylerde kullanılan bir katkısız PAI ve dört katkılı PAI+%12 grafit+%3 PTFE, PEEK+%30 CF, PEEK+%30 GFR ve PPS+%40 GFR kompozit malzemenin  $250\pm 3^{\circ}\text{C}$  ortam sıcaklığında, 1.0m/s kayma hızında ve 100N yük altındaki altındaki optik mikroskop mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Deneylerde bu şartlarda kullanılan 5 malzemenin, PEEK+%30 GFR, PPS+%40 GFR kompozitleri ile katkısız PAI polimer yüzeylerinde abrasiv aşınma çeşidi gözlenmiştir. PAI+%12 grafit+%3 PTFE ve PEEK+%30 CF polimer kompozit yüzeylerinde ise aşınma yine abrasiv aşınma şeklinde görülmekte fakat diğer üç polimer malzemeye göre aşınma izleri daha az ve yüzeyler daha düzgün olduğu gözlenmiştir.

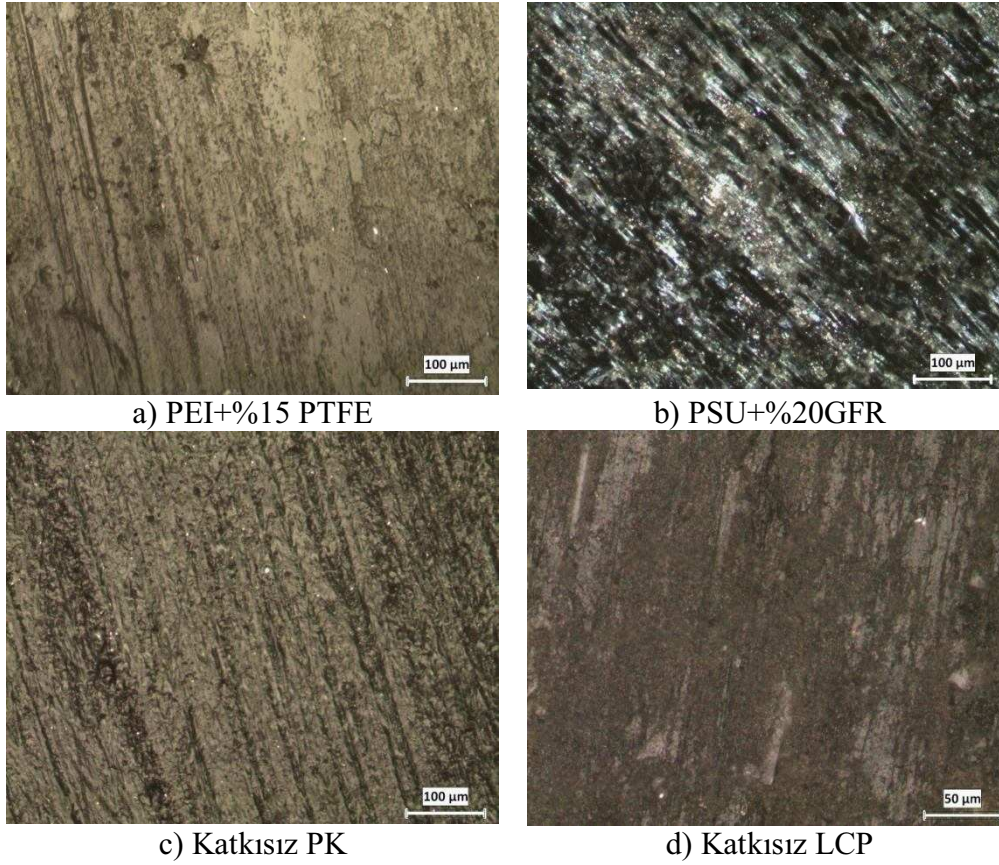




Şekil 6.23 Katkısız PAI polimeri ile PAI+%12graphite+%3PTFE, PEEK+%30CF, PEEK+%30GFR ve PPS+%40GFR kompozit malzemelerinin kuru kayma şartları altındaki optik mikroskop mikroyapı görüntüleri (Ortam sıcaklığı:  $250\pm 3^{\circ}\text{C}$ , Kayma hızı: 1.0m/s, Uygulanan yük: 100N)

Katkısız PK, katkısız sıvı kristal polimerleri ile %20 cam elyaf katkılı PSU ve %15 teflon katkılı PEI kompozit malzemelerinin 1.0m/s kayma hızında, 10N yük altındaki  $250\pm 3^{\circ}\text{C}$  ortam sıcaklığındaki optik mikroskop mikroyapı görüntüleri Şekil 6.24'de verilmiştir. Deneylerde kullanılan bu dört polimer malzeme ortalama  $250^{\circ}\text{C}$  ortam sıcaklığında 10N ile 30N yük aralığında çalıştırılabılmışlardır. Daha yüksek yüklerde yüksek sıcaklıklara dayanıklılık gösterememişlerdir. Bu sebeple bu optik mikroskop

görüntüleri bu malzemeler için 10N yük altında alınmıştır. PSU+%20GFR kompozit malzemesi hariç diğer katkısız sıvı kristal polimer, katkısız poliketon polimerleri ile PEI+%15PTFE kompozit malzemesinde daha düzgün aşınma yüzey görüntüleri elde edilmiştir.



Şekil 6.24 Katkısız PK, katkısız Sıvı kristal polimeri ile PSU+%20GFR ve PEI+%15PTFE kompozit malzemelerinin kuru kayma şartları altındaki optik mikroskop mikroyapı görüntüleri (Ortam sıcaklığı:  $250\pm 3^{\circ}\text{C}$ , Kayma hızı: 1.0m/s, Uygulanan yük: 10N)

## BÖLÜM 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

### 7.1. Sonuçlar

Yapılan aşınma ve sürtünme deneyleri sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

1. Uygulanan yükün 50N'dan 150N çıkarılması sonucunda katkısız PAI, PK polimerleri ile PEEK+%30GFR, PEEK+%30CF, PPS+%40GFR PSU+%20GFR, PEI+%15PTFE kompozitlerinin sürtünme katsayılarında azalma tespit edilirken PAI+%12grafit+%3PTFE kompozit malzemesinde değişim gözlenmemiştir.
2. Kayma hızının 0,5m/s'den 3,0m/s'ye çıkarılması sonucunda hem katkısız PAI, hem de PAI+%12grafit+%3PTFE kompozit malzemesinin sürtünme katsayılarında artış tespit edilmiştir.
3. Katkısız PAI ve PAI+%12grafit+%3PTFE kompozit malzemeleri 50N ve 150N yükler aralığında ve 0.5-4.0m/s kayma hızları aralığında başarı ile çalışılabilmektedir.
4. Katkısız PAI polimeri ve PAI+%12grafit+%3PTFE kompozit malzemesi 250°C ortam sıcaklığında ve 10N-100N yükler aralığında aşınma ve sürtünme deneyleri gerçekleştirilmiş ve deney yapılan şartları diğer kullanılan yüksek performanslı plastiklere göre başarı ile geçmiştir. Kullanılan tüm polimer ve kompozit malzemeler içerisinde yüke, hıza ve yüksek sıcaklığa en dayanıklı malzeme olarak tespit edilmişlerdir.
5. Katkısız PK, PEEK+%30GFR, PEEK+%30CF, PPS+%40GFR PSU+%20GFR ve PEI+%15PTFE kompozitleri 0,5m/s ve 1,0m/s kayma hızlarında ve 50N yük altında çalışılabilmektedir. 1.0m/s kayma hızının üzerindeki hızlarda polimer malzemelerde meydana gelen deformasyon dolayısıyla çalışılmamıştır. Bunun sonucunda kayma hızının artmasıyla

6. Katkısız PK polimeri ve PEI+%15PTFE kompozitlerinin sürtünme katsayılarında artış tespit edilirken PSU+%20GFR, PPS+%40GFR, PEEK+%30GFR, PEEK+%30CF kompozit malzemelerinde dikkate değer bir değişim gözlenmemiştir.
7. Uygulanan yükün %200 oranında artırılmasıyla katkısız PAI, PAI+%12grafit+%3PTFE, PEI+%15PTFE ile katkısız PK polimerlerinin aşınma oranları azalırken, PEEK+%30GFR, PEEK+%30CF, PPS+%40GFR, PSU+%20GFR kompozitlerinin arttığı tespit edilmiştir.
8. Kayma hızının 0,5m/s'den 3,0m/s'ye çıkarılması sonucunda hem katkısız PAI, hem de PAI+%12grafit+%3PTFE kompozit malzemesinin aşınma oranlarında ciddi bir artış tespit edilmiştir.
9. Kayma hızının 0,5m/s'den 1,0m/s'ye çıkarılması sonucunda katkısız PK polimeri, PEEK+%30GFR, PEEK+%30CF, PSU+%20GFR kompozit malzemelerinin aşınma oranları kayma hızının artması ile artış gösterirken PEI+%20GFR, PPS+%40GFR kompozit malzemelerinin aşınma oranlarında ise değişim gözlenmemiştir.
10. 10N ile 100N yük aralığında ve 1.0m/s kayma hızında 250°C ortam sıcaklığında yapılan deneylerde katkısız PK polimeri, katkısız PAI, PAI+%12grafit+%3PTFE, PEEK+%30GFR, PEEK+%30CF kompozit malzemelerinin aşınma oranları yükün artışı ile birlikte azalma gözlenmiştir. Sürtünme katsayılarında ise PEEK+%30GFR ve PEEK+%30CF kompozit malzemeleri için sürtünme katsayısı sıcaklığın artışı ile artarken katkısız PAI, PAI+%12grafit+%3PTFE ve PK polimeri için ise azalma tespit edilmiştir.
11. 10-150N yük aralığı, 23-250°C ortam sıcaklıklarında ve 0.5-4.0m/s kayma hızlarında çalışılabilecek en iyi yüksek performanslı plastikler sırasıyla PAI+%12grafit+%3PTFE, PEEK+%30CF kompozitleri ile katkısız PAI polimerleri olarak tespit edilmiştir.
12. Sıvı kristal polimerlerin polimeri sadece 50N gibi düşük yükte 0.5m/s hızında çalışılabilmektedir. 50N'dan daha büyük yüklere dayanamamış ve 1.0 m/s kayma hızında da çalışılamamıştır.

## 7.2. Öneriler

1. Yüksek performanslı mühendislik polimerlerine uygulanan maksimum hız 4.0 m/s olmuştur. Bu hız ve yük değerleri artırılarak aşınma ve sürtünme deneyleri yapılabilir.
2. Yüksek performanslı polimerlerin sıcaklıkta yapılan deneyleri 23°C ile 250°C arasındaki sıcaklıklarda yapılmıştır. Daha yüksek sıcaklıklarda bu deneyler gerçekleştirilebilir.
3. Deneylerde kullanılan yükler 10N-150N arasında yükler kullanılmıştır. Yükler daha da fazla artırılarak yüksek performanslı polimerlerin dayanım haritası çıkarılabilir.
4. Yapılan aşınma deneylerinde disk olarak 316L paslanmaz çelik kullanılmıştır. Farklı disk malzemeler kullanılarak (çelik/polimer/seramik, kaplama) mühendislik polimerlerin aşınma oranları ve sürtünme deneyleri yapılabilir.
5. Deneyler farklı ortam şartlarında da gerçekleştirilebilir.



## KAYNAKLAR

- [1] PAULO, D., CARDOSO, J., Effect of The Reinforcement (Carbon or Glass Fibres) on Friction and Wear Behaviour of the PEEK Against Steel Surface At long Dry Sliding, *Wear*, Cilt 266, Sayfa 795–799, 2009.
- [2] SUMER, M, ÜNAL, H, MİMAROĞLU, A., Evaluation of Tribological Behaviour of PEEK and Glass Fibre Reinforced PEEK Composite Under Dry Sliding and Water Lubricated Conditions, *Wear*, Cilt 265, Sayfa1061-1065, 2008.
- [3] LU, Z. P., And FRIEDRICH, K., On Sliding Friction and Wear of PEEK and Its Composites, *Wear*, Cilt 181–183, Sayfa 624–631, 1995.
- [4] MİMAROĞLU, A., ÜNAL , H., ARDA, T., Friction and Wear Performance of Pure and Glass Fibre Reinforced Poly-Ether-imide on Polymer and Steel Counterface Materials, *Wear*, Cilt 262, Sayfa1407-1413, 2007.
- [5] ÜNAL, H., MİMAROĞLU, A., SERDAR, V., Dry Sliding Performance of Thermoplastics Against Reinforced Unsaturated Polyester (BMC): In use in Electrical Contact Breakers Components, *EAR*, Cilt 261, Sayfa 841-847,2006.
- [6] ÜNAL,H., ŞEN, U., MİMAROĞLU, A., Dry Sliding Wear Characteristics of Some Industrial Polymers Against Steel Counterface, *Tribology International*, Cilt 37, Sayfa 727-732 , 2004.
- [7] LI, D. X., DENG, X., WANG, J., YANG, J., LI X., Mechanical and Tribological Properties of Polyamide 6-Polyurethane Block Copolymer Reinforced with Short Glass Fibers, *Wear*, Cilt 269, Sayfa 262-268, 2010.
- [8] ÜNAL, H., ŞEN, U., MİMAROĞLU, A., Study of Abrasive Wear Volume Map for PTFE and PTFE Composites, *Applied Composite Materials*, Cilt 4, Sayfa 287-306, 2007.
- [9] MİMAROĞLU, A., ÜNAL, H., ARDA, T., Friction and Wear Performance of Some Thermoplastic Polymer and Polymer Composites Against Unsaturated Polyester, *Applied Surface Science*, Cilt 252, Sayfa 8139-8146, 2006.
- [10] ÜNAL, H., MİMAROĞLU, A., SERDAR, V., Dry Sliding (BMC): In use

- in Electrical Contact Breakers Components, WEAR, Cilt 261, Sayfa 841-847, 2006
- [11] ÜNAL, H., MİMAROĞLU, A., Friction and Wear Behaviour of Unfilled Engineering Thermoplastics, Materials and Design, Cilt 24, Sayfa 183-187, 2003.
- [12] ELLIOTT, D.M., FISHER J., CLARK, D.T., Effect of Counterface Surface Roughness and its Evolution on the Wear and Friction of PEEK and PEEK-bonded Carbon Fibre Composites on Stainless Steel, Wear, Sayfa 288-296, 1998.
- [13] CHANG LI., ZHANG Z., LIN, Y., FRIEDRICH K., Tribological Properties of High Temperature Resistant Polymer Composites with Fine Particles, Tribology International, Cilt 40, Sayfa 1170-1178, 2007.
- [14] WANG, Q., ZHANG, X., PEI X., Study on the Synergistic Effect of Carbon Fiber, Graphite and Nanoparticle on the Friction and Wear Behavior of Polyimide Composites, Materials and Design, Cilt 31, Sayfa 3761–3768, 2010.
- [15] KOÇ, R., ÜNAL H., ELDOĞAN, O., Poli-Oksi-Metilen ve Kompozitlerinin Sürtünme ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Teknoloji dergisi, Cilt 10, Sayı 3, Sayfa 143–152, 2007.
- [16] HU, X., Tribological Behaviour of Modified Polyacetal Against MC Nylon Without Lubrication, Tribology Letters, Cilt 5, Sayfa 313-317, 1998.
- [17] KAPOOR, A., BAHADUR, A., Transfer Film Bonding and Wear Studies On CuS-Nylon Composite Sliding Against Steel, Tribology International, Vol.27, Cilt.5, Sayfa 323-329, 1994.
- [18] BAHADUR, S., KAPOOR, A., The Effect ZnF<sub>2</sub>, ZnS And PbS Fillers On The Tribological Behavior of Nylon 11, Wear, Cilt 155, Sayfa 49-61, 1992.
- [19] LIU, C.Z., REN L.Q., TONG. J., GREEN S.M., ARNELL R.D., Effects Of Operating Parameters on the Lubricated Wear Behavior of a PA-6/UHMWPE Blend: A Statistical Analysis, Wear Cilt 253, Sayfa 878–884, 2000.
- [20] BAHADUR, S., GONG D., The Role of Cooper Compounds As Fillers in the Transfer and Wear Behavior Of Polyetheretherketone, Wear, Cilt 154, Sayfa 151-165, 1992.
- [21] BAHADUR, S., GONG, D., ANDEREGG, J.W., Tribomechanical Studies By XPS Analysis of the Transfer Film of Nylon 11 and its Composite, Wear, Cilt 160, Sayfa 131-138, 1983.

- [22] BAHADUR, S., GONG D., The Transfer and Wear of Nylon and CuS-Nylon Composites: Filler Proportions and Counterface Characteristics, *Wear*, Cilt 162–164, Sayfa 397–406, 1993.
- [23] FRANKLIN, S.E., Wear Experiments with Selected Engineering Polymers and Polymer Composites Under Dry Reciprocating Sliding Conditions, *Wear*, Cilt 251, Sayfa 1591–1598, 2001.
- [24] SRINATH, R.G., Gnanamoorthy, Sliding Wear Performance of Polyamide 6/clay Nanocomposites in Water, *Composites Science and Technology*, Cilt 67, Sayfa 399–405, 2007.
- [25] DICKENS P.M., SULLIVAN J.L., Speed Effects on the Dry and Lubricated Wear of Polymers, *Wear*, Cilt 112, Sayfa 273–289, 1986.
- [26] ANDERSON, J.C., High Density Ultra-High Molecular Weight Polymers and Their Wear Properties and Bearing Applications, *Tribology International*, Cilt 15, Sayfa 43-47, 1982.
- [27] Y.Q. WANG., LI, J., Sliding Wear Behaviors and Mechanism of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene, *Materials Science and Engineering*, Cilt 266, Sayfa 155–160, 1999.
- [28] BOSE, S., MAHANWAR, P. A., Influence of Particle Size and Particle Size Distribution on Mica Filled Nylon 6 Composite, *Journal of Materials Science*, Cilt 40, Sayfa 6423-6428, 2005.
- [29] SULLIAN, J.L., *J. Phys., DAppl. Phys.*, Cilt 19, Sayfa 1999-2011, 1986.
- [30] TEMİZ, V., Çeşitli Katkılı ve Katkısız Polimer Yataklarının Sürtünme ve Aşınma Karakteristiklerinin Deneysel Tayini, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 1998.
- [31] REID, J.V., SCHEY, J.A., The Effect of Surface Hardness on Friction, *Wear*, Cilt 118, Sayfa 113-125, 1987.
- [32] POGGIE, R.A., WERT, J.J., HARRIS, LA., The Effects of Surface Oxidation and Segregation on the Adhesional Wear Behavior of Aluminum-Bronze Alloys, *Adhesion Sci. Technology*, Cilt 8, Sayfa 11-28, 1994.
- [33] SAYLAN, T., PA 6 Kompozitlerinin Termal, Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi, Y.Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, 2010.
- [34] EKŞİ, O., Plastik Esaslı Malzemelerin Isıl Şekil Verme Özelliklerinin İncelenmesi, Y. Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, 2007.
- [35] EZDEŞİR, A., ERBAY, E., TAŞKIRAN, I., YAGCI, M. A., COBEK, M., BILGIC, T, *Polimerler I*, PAGEV Yayınları, İstanbul, Sayfa 17–167, 1999



- [36] ÖLCAY, E., Plastik Esaslı Kompozit Malzemelerde Takviye Türü ve Oranına Bağlı Olarak Çeşitli Ortam Kosullarında Elektrik Özelliklerinin İncelenmesi, Y. Lisans Tezi, Trakya Üniv., 2007.
- [37] YAŞAR, H., Plastikler Dünyası, Makine Mühendisleri Odası Yayınları, Ankara, 2. Baskı, 2011.
- [38] CAĞLARER, E., Plastik Esaslı Malzemelerin Isıl Şekil Verme Özelliklerinin İncelenmesi, Y. Lisans Tezi, Trakya Üni., 2004.
- [39] KOÇ, R., Trenlerdeki Vagon Boji Bağalarına Alternatif Polimer Malzemeler, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, 2004.
- [40] [http://www.yildiz.edu.tr/~akdogan/lessons/plastikmalzeme/Belgeler/Plastiklerin\\_Genel\\_kullanimlari.pdf](http://www.yildiz.edu.tr/~akdogan/lessons/plastikmalzeme/Belgeler/Plastiklerin_Genel_kullanimlari.pdf), Nisan 2011
- [41] YILMAZ, T., PEEK (Poliethereterketon) ve Kompozitlerinde Kısa Fiber Takviyesi ve MikroYapının Tribolojik Özelliklere Etkisi, Y.Lisans Tezi, Kocaeli Üniv., 2002.
- [42] <http://www.plastikenjeksiyon.in/termoplastik-poliamid.html>, Nisan 2011
- [43] <http://www.polimernedir.com/kutuphane/poliketon/>, Nisan 2011
- [44] PARLAR, Z., Poliamid Malzemelerin Sürtünme ve Aşınma Karakteristiğine Sıcaklığın Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniv, 2002.
- [45] TARLAN, H., Isıl İşlemin Poli-fenilen-Süfit Malzemenin Tribolojik Özelliklerine Etkisi, Y.Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, 1997.
- [46] YAŞAR, H., Plastikler Dünyası, Makine Mühendisleri Odası Yayını, Ankara, 2001
- [47] <http://www.plast-form.com/main/urunler/p/66-pei>, Nisan 2011
- [48] <http://www.fatihbeler.com/>, Mayıs 2011
- [49] TEKİN, E., Mühendisler için Çelik Seçimi, Makine Mühendisleri Odası Yayını, Ankara, 1986.
- [50] ARAN, A., Takviyeli Karma Malzemeler, İTÜ Makine Fakültesi, Sayfa 13, 1990.
- [51] FINDIK, F., Malzeme Seçimi Ders Notları, Sakarya Üniversitesi Basımevi, 1998.
- [52] ODABAS, D., Ötektoidalı Çeliklerin Kayma Sürtünmesi Aşınmasında

- Adhesiv Aşınma Katsayısının Araş.,Y.Lisans Tezi, Erciyes Üni.,1987.
- [53] SEVİM, I., Çeliklerin Abrasiv Asınmasında Aşındırıcı Tane Büyüklüğünün Aşınma Direncine Etkisi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 1996.
- [54] ÇINAR, S., Parçacık Takviyeli Alüminyum-Silisyum Esaslı Metal Matriks Kompozit Malzemelerin Aşınma Özellikleri, Y. Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, 1995.
- [55] UZUNER, H., Polimerlerin Sürtünme ve Aşınma Davranışları, Y.Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, 2001.
- [56] DEMİRCİ, H., Ötektoid Altı Alasımsız Çeliklerin Yeni imal Edilen Bir Sürtünme Aşınma Deney Standında. Isıl işlemlere Bağlı Olarak Aşınma Davranışlarının incelenmesi ve Optimizasyonu, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, 1982.
- [57] ÖZSARAÇ, U., Endüstriyel Yatak Alasımlarının Aşınma Davranışlarının Karakterizasyonu, Y. Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, 1999.
- [58] KARAMIŞ, M. B., Toprak İşleme Aletlerinde İş Organının Aşınmasının Etüdü, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, 1985.
- [59] TEVRUZ, T., Tribological Behaviours of Bronze Filled PTFE at Dry journal Bearing, Wear, Cilt 230, Sayfa 61-69, 1999.
- [60] DEMİRKESEN, E., Kompozit Malzemeler, İTÜ Kimya–Metalurji Fak. Yayını, Yayın no:3, 1991.
- [61] GÜNDOĞDU, S., POM Polimerinin Aşınma Davranışlarının Deneysel İncelenmesi, Bitirme Tezi, Sakarya Üniversitesi, 2004.
- [62] KARABAŞOĞLU, M., Aşınma Deney Cihazı Tasarımı ve İmalatı, Sakarya Üniversitesi, Y. Lisans Tezi, 2008.
- [63] ÖZSARAÇ, U., DURMAN, M., Aşınma Deney Yöntemleri, Makine Magazin, Sayı 40-46, 2000.
- [64] HUTCHING I.M., Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials Science and Metallurgy, University of Cambridge, Sayfa 76-82, 1992.
- [65] KAŞTAN, A., Grafit Katkılı PA-6'nın Aşınma Davranışlarının Deneysel İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, 2005.
- [66] SEVINÇ, E., Bazı Katkılı ve Katkısız Polimerlerin Çok Düşük Hızlarda Sürtünme ve Aşınma Değerlerinin Deneysel Olarak Tayini, Y.Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 1995.

## ÖZGEÇMİŞ

Mehmet KURT, 01.02.1980 de Urfa' da doğdu. İlk ve ortaokul eğitimini Üsküdar da tamamladı. 1997 yılında Haydarpaşa Endüstri Meslek Lisesi Kalıpcılık Bölümünden mezun oldu. 2003 yılında başladığı Marmara Üniversitesi Makine bölümünde önlisans programından 2005 yılında Makine Teknikeri olarak mezun oldu. 2006 yılında Dikey Geçiş sınavıyla Marmara Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Öğretmenliği bölümünü kazandı ve 2009 yılında Lisans öğrenimini tamamladı. Aynı yıl Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Bölümünde Yüksek Lisans Eğitimine başladı. 2000–2003 yıllarında Ünsped Gümrük Müşavirliğide İthalat Sorumlusu olarak, 2004–2005 ve 2008–2010 yılları arasında Yavuz Plastik Display Teşhir Sis. Dek. İnş. San. Tic. Ltd. Şti.'nde İmalat Müdürü olarak çalıştı. 2011 yılından beri Halla Otomotiv İklimlendirme Sistemleri Üretim Sanayi ve Ticaret A.Ş.'de Lojistik Sorumlusu olarak çalışmaktadır.