

126709

**POLİAMİD MALZEMELERİN SÜRTÜNME VE AŞINMA
KARAKTERİSTİĞİNE SICAKLIĞIN ETKİSİNİN DENEYSEL
OLARAK İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Zeynep PARLAR
(503952018)

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 20 Eylül 2001
Tezin Savunulduğu Tarih : 7 Mart 2002

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Mustafa GEDİKTAŞ
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Selma AKKURT (İ.T.Ü.)
Prof.Dr. Atilla BOZACI (Y.T.Ü.)
Prof.Dr. Abdülkerim KAR (M.Ü.)
Doç.Dr. Sait YÜCENUR (İ.T.Ü.)

Dr. Gediktaş
Selma Akkurt
Atilla Bozacı
Abdülkerim Kar
Sait Yücenur

MART 2002

126709

ÖNSÖZ

Polimer malzemelerin endüstriyel uygulamalarda makine elemanı olarak giderek çok yaygın biçimde kullanılmaya başlanması bu malzemelerin sürtünme ve aşınma davranışlarının bilinmesini zorunlu kılmaktadır. Ayrıca polimeri malzemelerin kullanım alanlarını sınırlayan önemli bir parametre de sıcaklıktır. Yapılan bu çalışmada amaç, farklı polamid türlerinin tribolojik davranışına sıcaklığın etkisinin farklı bir bakış açısından incelenmesidir.

Çalışmalarında bana destek olan danışmanım sayın Prof. Dr. Mustafa GEDİKTAŞ'a, sayın Yard. Doç. Dr. Vedat TEMİZ'e, deney malzemelerini temin eden POLİKİM A. Ş.'ye ve laboratuvar çalışmalarında bana teknik destek veren Yusus Ziya KOCABAL ve Orhan KAMBUROĞLU' a teşekkürü bir borç bilirim.

Mart 2002

Zeynep PARLAR

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
İÇİNDEKİLER	iii
KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	xv
ÖZET	xvi
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Araştırması	3
2. POLİMER MALZEMELER VE GENEL ÖZELLİKLERİ	9
2.1. Temel Bilgiler	9
2.2. Polimerlerin Sınıflandırılması	10
2.2.1. Termoplastiler	10
2.2.2. Termosetler	10
2.2.3. Elastomerler	11
2.3. Takviye Dolgu ve İlave Maddeler	12
2.3.1. Takviyeli polimerler	12
2.3.2. Polimer karışımları ve alaşımları	12
2.4. Polimerlerin Viskoelastik Davranışları	13
2.4.1. Viskoelastisite için matematik modeller	15
2.4.1.1. Sürünme modülü, kompliansı ve gevşeme modülü	19
2.5. Termal Özellikler	20
2.5.1. Erime Sıcaklığı (T_m)	21
2.5.2. Camı Hale Geçiş Sıcaklığı (T_g)	21
2.5.3. Boyut stabilitesi	23
2.5.4. Isıl iletkenlik ve yalıtım	23
2.5.5. Özgül ısı	23
2.5.6. Isıl genleşme katsayısı	24
2.5.7. Bozulma sıcaklığı	24
2.6. Poliamid	24
2.6.1. Sürtünme ve aşınma	25
2.6.2. Nem Alma Özelliği	26
2.6.3. Boyut Kararlılığı	28

2.6.3.1. Poliamid cinsinin etkisi	28
2.6.3.2. Nem ve sıcaklığın etkileri	30
2.6.4. Ticari poliamidler ve uygulama alanları	33
2.6.4.1. Poliamid 66	33
2.6.4.2. Poliamid 6	35
2.6.4.3. Döküm poliamid 6	36
2.6.4.4. Poliamid 4/6	37
3. SÜRTÜNME VE AŞINMA	38
3.1. Yüzeylerin Yapısı	39
3.2. Sürtünme Mekanizmaları	40
3.3. Elastomer Malzemelerin Sürtünmesi	41
3.4. Sıcaklık ve Nemin Sürtünme Üzerindeki Etkisi	44
3.4.1. Sınır p_v değeri	44
3.4.2. Sıcaklık ve nemin etkisi	45
3.5 Polimerlerin Aşınma Mekanizmaları	46
3.5.1. Aşınmanın ölçülmesi	48
3.5.2. Aşınma deneyleri	49
3.5.3. Transfer filmi	50
4. DENEY TESİSATI ve DENEYLER	52
4.1. Deney Tesisatın Tanıtılması	52
4.2. Normal Kuvvetin Kalibrasyonu	54
4.3. Numune Sıcaklığının Ayarı	56
4.4. Sürtünme Kuvvetinin Ölçülmesi	57
4.5. Deney Numuneleri	59
4.6. Deney Şartları	60
4.7. Sürtünme Deneylerinin Yapılışı	61
4.8. Aşınma Deneylerinin Yapılışı	62
5. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME	64
5.1. Sürtünme Deney Sonuçları	64
5.2. Aşınma Deney Sonuçları	65
5.3. Sonuçların Değerlendirilmesi	66
KAYNAKLAR	79
EKLER	83
ÖZGEÇMİŞ	123

KISALTMALAR

PA	: Poliamid
POM	: Polioksimetilen
PEEK	: Polietereterketon
PI	: Poliimid
PAI	: Poliamidimid
PTFE	: Politetrafloretilen
UHMWPE	: Çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen
HDPE	: Yüksek yoğunluklu polietilen
LDPE	: Alçak yoğunluklu polietilen
ABS	: Akrlonitril-butadien-stiren
PP	: Polipropilen
PS	: Polistiren
PET	: Polietilen tereftalat
PMMA	: Polimetil metakrilat
PC	: Polikarbonat
PVC	: Polivinilklorür

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1 Bazı önemli polimerlerin termal özellikleri.....	21
Tablo 2.2 Ticari poliamidler	25
Tablo 2.3 Çeliğe karşı poliamidin sürtünme katsayısı ve <i>p_v</i> limiti.....	26
Tablo 2.4 Poliamidin su alması	28
Tablo 2.5 Doğrusal ısı genleşme katsayısına sıcaklığın etkisi	32
Tablo 2.6 Poliamidlerin ısı genleşme katsayısı	33
Tablo 4.1 Deney numuneleri.....	59
Tablo 4.2 Deney parametrelerinin değişim aralıkları.....	60
Tablo 5.1 Sürtünme deney sonuçları	76
Tablo 5.2 Aşınma deney sonuçları	77

ŞEKİL LİSTESİ

		<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1	Dünyada demir ve çelik, polimer tüketimi.....	2
Şekil 1.2	Londra-New York uçuşu yapan Concorde uçağının, yüzey sıcaklık profili.....	3
Şekil 2.1	Bir monomer molekülünün şematik görünüşü	9
Şekil 2.2	Termoplastik ve termoset malzemelerin erime karakteristikleri.....	11
Şekil 2.3	Elastik ve viskoelastik malzemelerin iki farklı zaman değeri için gerilme-birim uzama karakteristikleri.....	14
Şekil 2.4	Bir polimer malzemenin sürünme davranışı	14
Şekil 2.5	Bir viskoelastik malzemenin gevşeme (relaksasyon) karakteristiği.....	15
Şekil 2.6	Viskoelastik modeller	16
Şekil 2.7	Maxwell elemanının sürünme ve gevşeme cevabı	18
Şekil 2.8	Camsı hale geçiş sıcaklığının termoplastiklerin hacmi ve uzunluğuna etkisi	22
Şekil 2.9	Bazı polimerlerin çeliğe karşı sürtünme durumundaki p_v limiti değerleri	26
Şekil 2.10	Farklı izafi nem oranlarında denge hali nem oranı değişimi.....	27
Şekil 2.11	Farklı metil/amid oranlarında denge hali nem oranı değişimi	28
Şekil 2.12	20°C deki farklı izafi nem oranlarında boyut değişimi.....	29
Şekil 2.13	3,2 mm kalınlığında %33 cam elyafı katkılı PA 66 nın farklı izafi nem oranındaki boyut değişimi	29
Şekil 2.14	3,2 mm kalınlığındaki PA 66 nın %50 izafi nemde ve 23°C de farklı neme maruz kalma sürelerindeki boyut değişimi	30
Şekil 2.15	Boyut değişimine izafi nemin etkisi	30
Şekil 2.16	PA 66 nın farklı kalıp sıcaklıklarında ısı işlem çekmesi.....	31
Şekil 2.17	PA 66 nın farklı nem miktarlarındaki doğrusal boyut değişimleri.....	31
Şekil 2.18	Bazı poliamid türleri için farklı sıcaklıklardaki doğrusal ısı genleşmesi	32
Şekil 3.1	Yüzeylerin yapısı	39
Şekil 3.2	Elastomerin rijit karşı yüzeyle temas durumu	42

Şekil 3.3	Kompleks elastiklik modülü	44
Şekil 3.4	p_v koordinatlarında poliamidin erime sınırı.....	45
Şekil 3.5	Gerçek temas alanı ve kayma mukavemetinin sıcaklıkla değişimi	46
Şekil 3.6	Çeşitli plastikler için sürtünme katsayısının neme bağlı olarak değişimi	46
Şekil 3.7	Aşınma deney makinaları	49
Şekil 4.1	Pim disk deney tesisatının prensip şeması.....	53
Şekil 4.2	Pim disk deney tesisatının genel görünüşü	53
Şekil 4.3	Tahrik sistemi.....	54
Şekil 4.4	Normal kuvvetin ayarlanması	55
Şekil 4.5	Normal kuvvet kalibrasyonu	55
Şekil 4.6	Numune tutucu	56
Şekil 4.7	Moment Transdüseri.....	57
Şekil 4.8	Strain-gage yerleşim şekli.....	58
Şekil 4.9	Veri toplama sistemi.....	58
Şekil 4.10	Moment Transdüseri kalibrasyon eğrisi	59
Şekil 4.11	Aşınma miktarı ve kayma mesafesi arasındaki karakteristik eğriler	62
Şekil 4.12	Deney numunelerinin karakteristik aşınma eğrisi.....	63
Şekil A.1	PA 4/6'nın 40°C de sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi	83
Şekil A.2	PA 4/6'nın 60°C de sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi	83
Şekil A.3	PA 4/6'nın 80°C de sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi	84
Şekil A.4	PA 4/6'nın 100°C de sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi	84
Şekil A.5	PA 4/6'nın farklı sıcaklıklarda sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi.....	84
Şekil A.6	PA 66'nın 40°C de sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi	85
Şekil A.7	PA 66'nın 60°C de sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi	85
Şekil A.8	PA 66'nın 80°C de sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi	85
Şekil A.9	PA 66'nın 100°C de sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi	86

Şekil A.10	PA 66'nın farklı sıcaklıklarda sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi.....	86
Şekil A.11	PA 6'nın 40°C de sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi	87
Şekil A.12	PA 6'nın 60°C de sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi	87
Şekil A.13	PA 6'nın 80°C de sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi	87
Şekil A.14	PA 6'nın 100°C de sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi.....	88
Şekil A.15	PA 6'nın farklı sıcaklıklarda sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi	88
Şekil A.16	MoS ₂ katkılı PA 66'nın 40°C de sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi	89
Şekil A.17	MoS ₂ katkılı PA 66'nın 60°C de sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi	89
Şekil A.18	MoS ₂ katkılı PA 66'nın 80°C de sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi	89
Şekil A.19	MoS ₂ katkılı PA 66'nın 100°C de sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi	90
Şekil A.20	MoS ₂ katkılı PA 66'nın farklı sıcaklıklarda sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi	90
Şekil A.21	MoS ₂ katkılı döküm PA 6'nın 40°C de sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi	91
Şekil A.22	MoS ₂ katkılı döküm PA 6'nın 60°C de sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi	91
Şekil A.23	MoS ₂ katkılı döküm PA 6'nın 80°C de sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi	91
Şekil A.24	MoS ₂ katkılı döküm PA 6'nın 100°C de sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi.....	92
Şekil A.25	MoS ₂ katkılı döküm PA 6'nın farklı sıcaklıklarda sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi	92
Şekil A.26	Döküm PA 6'nın 40°C de sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi	93
Şekil A.27	Döküm PA 6'nın 60°C de sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi	93
Şekil A.28	Döküm PA 6'nın 80°C de sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi	93
Şekil A.29	Döküm PA 6'nın 100°C de sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi	94

Şekil A.30	Döküm PA 6'nın farklı sıcaklıklarda sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi	94
Şekil A.31	Yağ emdirilmiş döküm PA 6'nın 40°C de sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi.....	95
Şekil A.32	Yağ emdirilmiş döküm PA 6'nın 60°C de sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi.....	95
Şekil A.33	Yağ emdirilmiş döküm PA 6'nın 80°C de sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi.....	95
Şekil A.34	Yağ emdirilmiş döküm PA 6'nın 100°C de sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi.....	96
Şekil A.35	Yağ emdirilmiş döküm PA 6'nın farklı sıcaklıklarda sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi	96
Şekil A.36	40°C de $p=0,94$ MPa basınçta sürtünme katsayısının kayma hızı ile değişimi	97
Şekil A.37	40°C de $p=2,1$ MPa basınçta sürtünme katsayısının kayma hızı ile değişimi	97
Şekil A.38	40°C de $p=3,18$ MPa basınçta sürtünme katsayısının kayma hızı ile değişimi	97
Şekil A.39	60°C de $p=0,94$ MPa basınçta sürtünme katsayısının kayma hızı ile değişimi	98
Şekil A.40	60°C de $p=2,1$ MPa basınçta sürtünme katsayısının kayma hızı ile değişimi	98
Şekil A.41	60°C de $p=3,18$ MPa basınçta sürtünme katsayısının kayma hızı ile değişimi	98
Şekil A.42	80°C de $p=0,94$ MPa basınçta sürtünme katsayısının kayma hızı ile değişimi	99
Şekil A.43	80°C de $p=2,1$ MPa basınçta sürtünme katsayısının kayma hızı ile değişimi	99
Şekil A.44	80°C de $p=3,18$ MPa basınçta sürtünme katsayısının kayma hızı ile değişimi	99
Şekil A.45	100°C de $p=0,94$ MPa basınçta sürtünme katsayısının kayma hızı ile değişimi	100
Şekil A.46	100°C de $p=2,1$ MPa basınçta sürtünme katsayısının kayma hızı ile değişimi	100
Şekil A.47	100°C de $p=3,18$ MPa basınçta sürtünme katsayısının kayma hızı ile değişimi	100
Şekil A.48	40°C de $v=0,19$ m/sn hızda sürtünme katsayısının yüzey basıncı ile değişimi	100
Şekil A.49	40°C de $v=0,8$ m/sn hızda sürtünme katsayısının yüzey basıncı ile değişimi	101

Şekil A.50	40°C de $v=1,6$ m/sn hızda sürtünme katsayısının yüzey basıncı ile değişimi	101
Şekil A.51	60°C de $v=0,19$ m/sn hızda sürtünme katsayısının yüzey basıncı ile değişimi	102
Şekil A.52	60°C de $v=0,8$ m/sn hızda sürtünme katsayısının yüzey basıncı ile değişimi	102
Şekil A.53	60°C de $v=1,6$ m/sn hızda sürtünme katsayısının yüzey basıncı ile değişimi	102
Şekil A.54	80°C de $v=0,19$ m/sn hızda sürtünme katsayısının yüzey basıncı ile değişimi	103
Şekil A.55	80°C de $v=0,8$ m/sn hızda sürtünme katsayısının yüzey basıncı ile değişimi	103
Şekil A.56	80°C de $v=1,6$ m/sn hızda sürtünme katsayısının yüzey basıncı ile değişimi	103
Şekil A.57	100°C de $v=0,19$ m/sn hızda sürtünme katsayısının yüzey basıncı ile değişimi	104
Şekil A.58	100°C de $v=0,8$ m/sn hızda sürtünme katsayısının yüzey basıncı ile değişimi	104
Şekil A.59	100°C de $v=1,6$ m/sn hızda sürtünme katsayısının yüzey basıncı ile değişimi	104
Şekil A.60	PA 4/6'nın farklı sıcaklıklarda aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi	105
Şekil A.61	PA 66'nın farklı sıcaklıklarda aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi	105
Şekil A.62	PA 6'nın farklı sıcaklıklarda aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi	105
Şekil A.63	MoS ₂ katkılı PA 66'nın farklı sıcaklıklarda aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi	106
Şekil A.64	MoS ₂ katkılı döküm PA 6'nın farklı sıcaklıklarda aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi	106
Şekil A.65	Döküm PA 6'nın farklı sıcaklıklarda aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi	106
Şekil A.66	Yağ emdirilmiş döküm PA 6'nın farklı sıcaklıklarda aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi	107
Şekil A.67	40°C de farklı poliamid türlerinin aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi	107
Şekil A.68	60°C de farklı poliamid türlerinin aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi	107
Şekil A.69	80°C de farklı poliamid türlerinin aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi	108

Şekil A.70	100°C de farklı poliamid türlerinin aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi	108
Şekil A.71	PA 4/6'nın farklı sıcaklıklarda aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi	108
Şekil A.72	PA 66'nın farklı sıcaklıklarda aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi	109
Şekil A.73	PA 6'nın farklı sıcaklıklarda aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi	109
Şekil A.74	MoS ₂ katkılı PA 66'nın farklı sıcaklıklarda aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi	109
Şekil A.75	MoS ₂ katkılı döküm PA 6'nın farklı sıcaklıklarda aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi	110
Şekil A.76	Döküm PA 6'nın farklı sıcaklıklarda aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi	110
Şekil A.77	Yağ emdirilmiş döküm PA 6'nın farklı sıcaklıklarda aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi	110
Şekil A.78	40°C de farklı poliamid türlerinin aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi	111
Şekil A.79	60°C de farklı poliamid türlerinin aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi	111
Şekil A.80	80°C de farklı poliamid türlerinin aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi	111
Şekil A.81	100°C de farklı poliamid türlerinin aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi	112
Şekil A.82	PA 4/6' nın çalışma şartlarına bağlı olarak aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi	112
Şekil A.83	PA 66' nın çalışma şartlarına bağlı olarak aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi	113
Şekil A.84	PA 6' nın çalışma şartlarına bağlı olarak aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi	113
Şekil A.85	MoS ₂ katkılı PA 6' nın çalışma şartlarına bağlı olarak aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi	114
Şekil A.86	MoS ₂ katkılı döküm PA 66' nın çalışma şartlarına bağlı olarak aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi.....	114
Şekil A.87	Döküm PA 6' nın çalışma şartlarına bağlı olarak aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi	115
Şekil A.88	Yağ emdirilmiş döküm PA 6' nın çalışma şartlarına bağlı olarak aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi.....	115
Şekil A.89	PA 4/6' nın oda sıcaklığı (a) ve yüksek sıcaklıkta (b) aşınmış yüzeylerinin optik mikroskop altındaki görüntüleri.....	116

Şekil A.90	PA 4/6' nın oda sıcaklığı (a) ve yüksek sıcaklıkta (b) aşınmış yüzeylerinin tarayıcı elektron mikroskobu altındaki görüntüşleri.....	116
Şekil A.91	PA 4/6' nın oda sıcaklığı (a) ve yüksek sıcaklıkta (b) aşınmış yüzeylerinin tarayıcı elektron mikroskobu altındaki görüntüşleri.....	116
Şekil A.92	PA 66' nın oda sıcaklığı (a) ve yüksek sıcaklıkta (b) aşınmış yüzeylerinin optik mikroskop altındaki görüntüşleri.....	117
Şekil A.93	PA 66' nın oda sıcaklığı (a) ve yüksek sıcaklıkta (b) aşınmış yüzeylerinin tarayıcı elektron mikroskobu altındaki görüntüşleri.....	117
Şekil A.94	PA 66' nın oda sıcaklığı (a) ve yüksek sıcaklıkta (b) aşınmış yüzeylerinin tarayıcı elektron mikroskobu altındaki görüntüşleri.....	117
Şekil A.95	PA 6' nın oda sıcaklığı (a) ve yüksek sıcaklıkta (b) aşınmış yüzeylerinin optik mikroskop altındaki görüntüşleri.....	118
Şekil A.96	PA 6' nın oda sıcaklığı (a) ve yüksek sıcaklıkta (b) aşınmış yüzeylerinin tarayıcı elektron mikroskobu altındaki görüntüşleri.....	118
Şekil A.97	PA 6' nın oda sıcaklığı (a) ve yüksek sıcaklıkta (b) aşınmış yüzeylerinin tarayıcı elektron mikroskobu altındaki görüntüşleri.....	118
Şekil A.98	MoS ₂ katkılı PA 66' nın oda sıcaklığı (a) ve yüksek sıcaklıkta (b) aşınmış yüzeylerinin optik mikroskop altındaki görüntüşleri.....	119
Şekil A.99	MoS ₂ katkılı PA 66' nın oda sıcaklığı (a) ve yüksek sıcaklıkta (b) aşınmış yüzeylerinin tarayıcı elektron mikroskobu altındaki görüntüşleri	119
Şekil A.100	MoS ₂ katkılı PA 66' nın oda sıcaklığı (a) ve yüksek sıcaklıkta (b) aşınmış yüzeylerinin tarayıcı elektron mikroskobu altındaki görüntüşleri	119
Şekil A.101	MoS ₂ katkılı döküm PA 6' nın oda sıcaklığı (a) ve yüksek sıcaklıkta (b) aşınmış yüzeylerinin optik mikroskop altındaki görüntüşleri.....	120
Şekil A.102	MoS ₂ katkılı döküm PA 6' nın oda sıcaklığı (a) ve yüksek sıcaklıkta (b) aşınmış yüzeylerinin tarayıcı elektron mikroskobu altındaki görüntüşleri.....	120
Şekil A.103	MoS ₂ katkılı döküm PA 6' nın oda sıcaklığı (a) ve yüksek sıcaklıkta (b) aşınmış yüzeylerinin tarayıcı elektron mikroskobu altındaki görüntüşleri.....	120
Şekil A.104	Döküm PA 6' nın oda sıcaklığı (a) ve yüksek sıcaklıkta (b) aşınmış yüzeylerinin optik mikroskop altındaki görüntüşleri.....	121

Şekil A.105	Döküm PA 6' nın oda sıcaklığı (a) ve yüksek sıcaklıkta (b) aşınmış yüzeylerinin tarayıcı elektron mikroskobu altındaki görüşleri.....	121
Şekil A.106	Döküm PA 6' nın oda sıcaklığı (a) ve yüksek sıcaklıkta (b) aşınmış yüzeylerinin tarayıcı elektron mikroskobu altındaki görüşleri.....	121
Şekil A.107	Yağ emdirilmiş döküm PA 6' nın oda sıcaklığı (a) ve yüksek sıcaklıkta (b) aşınmış yüzeylerinin optik mikroskop altındaki görüşleri.....	122
Şekil A.108	Yağ emdirilmiş döküm PA 6' nın oda sıcaklığı (a) ve yüksek sıcaklıkta (b) aşınmış yüzeylerinin tarayıcı elektron mikroskobu altındaki görüşleri.....	122
Şekil A.109	Yağ emdirilmiş döküm PA 6' nın oda sıcaklığı (a) ve yüksek sıcaklıkta (b) aşınmış yüzeylerinin tarayıcı elektron mikroskobu altındaki görüşleri.....	122



SEMBOL LİSTESİ

A	: Temas alanı (mm^2)
E	: Elastisite modülü (N/mm^2)
E^*	: Kompleks elastiklik modülü (N/mm^2)
E_g	: Gevşeme modülü (N/mm^2)
F_N	: Normal kuvvet (N)
F_S	: Sürtünme kuvveti (N)
J	: Sürünme kompliansı (N/mm^2)
p	: Yüzey basıncı (N/mm^2)
T_g	: Camlaşma sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
T_m	: Erime sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
T_d	: Bozulma sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
t	: Zaman (sn)
v	: Kayma hızı (m/sn)
μ	: Sürtünme katsayısı
σ	: Gerilme (N/mm^2)
$\dot{\sigma}$	: Gerilmenin zamana göre türevi
ε	: Birim uzama
$\dot{\varepsilon}$	: Şekil değiştirme hızı
τ	: Kayma Gerilmesi (N/mm^2)
η	: Viskozite (Pa.s)
λ	: Gevşeme zamanı (sn)
λ_c	: Gecikme zamanı (sn)

Alt İndis

A	: Adhezyon
D	: Deformasyon

**POLİAMİD MALZEMELERİN SÜRTÜNME VE AŞINMA
KARAKTERİSTİĞİNE SICAKLIĞIN ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK
İNCELENMESİ**

ÖZET

Polimer malzemeler tüm dünyada gerek araştırma ve geliştirme gerekse uygulama alanı bakımından hızlı bir gelişme göstermektedir. Günümüzde polimer malzemeler metallerin yerini almakta ve yataklar, dişli çarklar, pistonlar, kam, motor gövdesi, türbin kanatları, otomobil gövdeleri, uçak gövdeleri gibi çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır.

Yapılan çalışmada çeşitli poliamid malzemelerin kuru sürtünme halinde sürtünme ve aşınma özelliklerine sıcaklığın etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Bu amaçla geliştirilmiş bir deney tesisatı ile çalışmalar yapılmıştır.

Tezde öncelikle polimer malzemelerin genel özelliklerinden bahsedilip poliamid malzemelerin özellikleri ve kullanım alanları üzerinde durulmuştur. Ayrıca sürtünme ve aşınma teorileri de kısaca açıklanmaya çalışılmıştır.

Teknikte kullanılan polimer malzemelerin çeşitli parametrelere bağlı olarak sürtünme ve aşınma karakteristiklerinin tayini için bir pim disk deney tesisatı geliştirilmiştir. Deney tesisatında değiştirilebilen parametreler normal yük, kayma hızı ve çalışma sıcaklığıdır. Sistemde ölçülebilen büyüklükler sürtünme momenti, sıcaklık ve aşınma miktarıdır. Sistemde tahrik elemanı olarak dönme hızı 0...1500 d/dak. Arasında ayar edilebilen bir DC motor kullanılmıştır. Sistemde normal kuvvet pnömatik bir silindir yardımı ile sağlanmaktadır. Sürtünme momenti disk mili ile tahrik mili arasına yerleştirilmiş bir moment transdüseri ile ölçülmektedir. Aşınma miktarı hassas bir terazi kullanılarak ölçülmüştür. Ayrıca aşınmış numunelerin yüzey filmleri optik mikroskop ve tarayıcı elektron mikroskobu kullanılarak çekilmiştir.

Yapılan çalışmada poliamid malzemelerin sürtünme ve aşınma davranışına sıcaklığın etkisi çeşitli işletme şartlarında incelenmiştir. Deneylerde poliamid 4/6, poliamid 66, poliamid 6, döküm poliamid 6, MoS₂ katkılı poliamid 66, MoS₂ katkılı döküm poliamid 6 ve yağ emdirilmiş döküm poliamid 6 kullanılmıştır. Deney numuneleri 10 mm çapta ve 17 mm uzunlukta hazırlanmıştır. Sürtünme ve aşınma deneyleri 40°, 60°, 80° ve 100°C olmak üzere 4 farklı sıcaklık aralığında yapılmıştır. Sürtünme katsayısına kayma hızı ve yüzey basıncının etkisini görebilmek için her bir sıcaklık kademesinde 0,2 -1,6 m/sn aralığında 10 ayrı hızda ve 1 MPa -3,2 MPa aralığında 9 farklı basınçta sürtünme deneyleri yapılmıştır. Aşınma deneyleri aynı p_v limitinde ($p_v=1$ MPa m/sn) farklı iki kayma hızı ve yüzey basıncı değerinde yapılmıştır. Sonuç olarak sürtünme katsayısının sıcaklıkla pek değişmediği, kayma hızı ve yüzey basıncı ile bir miktar artışı görülmüştür. Aşınma hızı kayma mesafesi ile genel olarak azalan bir karakter göstermekte ve artan sıcaklıkla artmaktadır.

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE EFFECT OF TEMPERATURE ON THE FRICTION AND WEAR CHARACTERISTICS OF POLYAMIDE

SUMMARY

There has been a noteworthy development on the use of polymeric materials in industry in recent years. This caused the scientific researches to focus on the subject. In some industrial applications, such as food and textile, polymeric materials have taken place of metallic materials. Polymeric materials are widely used as sliding bearings, gears, pistons, cams, automobile and plane parts, etc.

In this study, an experimental analysis has been made on the effect of temperature on the friction and wear properties of polyamides. For this reason, a pin on plate apparatus has been developed.

In current study, first, a brief explanation about the mechanical and thermal properties and polymeric materials was given. Furthermore, some theoretical knowledge about friction and wear were presented.

A pin on plate test apparatus has been developed to analyze the friction and wear characteristics of polymeric materials under various operating conditions. Adjustable parameters on the system are normal load (surface pressure), sliding speed and temperature. The coefficient of friction, wear rate and temperature can be recorded during the experiments. The system was driven by a DC Motor having 0...1500 rpm variable speed range. The normal load was applied by a pre calibrated pneumatic cylinder to which the specimen was mounted. The friction torque resulting from the friction between polymeric material and disk was measured with a torque transducer placed between DC Motor and counter face. Mass loss due to wear of polymeric material was measured with a scale having 0,0001 gr accuracy. Furthermore, scanning electron micrograph and optical micrograph of worn surfaces were taken.

Polymer materials used in experiments are polyamide 4/6, polyamide 66, polyamide 6, cast polyamide, MoS₂ reinforced polyamide 66, MoS₂ reinforced cast polyamide 6 and internally lubricated cast polyamide 6. The specimens were machined as cylindrical pins having 10 mm in diameter and 17 mm in length. The counter face was made of X38CrMoV51 steel and machined to $R_a=0,2 \mu\text{m}$ in order to avoid any abrasive wear. The steel counter face has 300 mm in diameter and the diameter which the specimen contacts was adjusted to 144 mm. The friction and wear tests were carried out for four different operating temperatures (40°C, 60°C, 80°C and 100°C). The tests for friction coefficients were made for 10 different sliding speeds (0,2...1,6 m/sec) and 10 different surface pressures (1...3,2 MPa). Wear tests were carried out for 1 MPa.m/sec pv value. Two different surface pressures and sliding speeds were used in experiments. It is concluded that the coefficient of friction does not vary with temperature, whereas it increases with sliding speed and surface pressure. Wear rates generally decreases with sliding distance and increases with temperature.

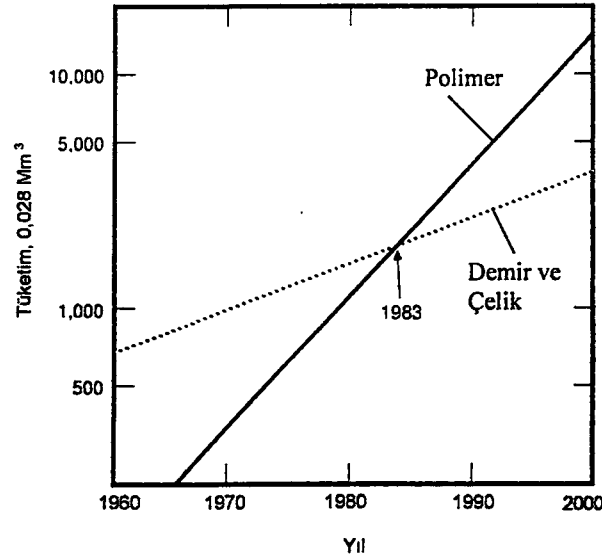
1. GİRİŞ

Bugün yaşadığımız modern dünyayı polimer malzemeler olmadan tasavvur etmek çok güç olurdu. Polimerler günümüzde çeşitli ev ürünlerinden çok komplike bilimsel ve tıbbi cihazlara kadar geniş bir yelpazede hemen hemen herkesin hayatında bir yer tutmaktadır. Son zamanlarda mühendisler ve tasarımcılar diğer alternatif malzemelerde olmayan birçok özelliklerinden dolayı polimerlere doğru bir eğilim göstermektedirler. Polimer malzemelerin en başta gelen avantajları hafiflik, esneklik, korozyona karşı direnç, çeşitli renklerde elde edilebilmesi, saydamlık, işleme kolaylığı vb. olarak sayılabilir. Bu avantajlarının yanında polimerlerin kullanımını termal özellikler, düşük dayanım gibi hususlar sınırlamaktadır.

İlk polimer malzemesi 1868 yılında J. Hyatt tarafından keşfedilen selüloiddir. Ancak modern polimer endüstrisi, L. Baekeland tarafından bakalitin sanayi çapında üretilmesiyle 1909 da başlar. Bunu 1917’de I. Dünya Savaşı esnasında Alman kimyacılar tarafından dimetil butadien’den suni kauçuğun keşfi takip eder. II. Dünya Savaşına kadar düzensiz ve aralıklı olarak gelişen polimer malzemeleri ve bilimi, bu tarihten, bilhassa 1950’den sonra gerek çeşit gerekse bilim bakımından düzenli ve daha sonra üstel bir gelişme göstermiştir.

Son otuz yılda ise polimer malzemelerin önemi dev adımlarla artmıştır. Şekil 1.1’den de görüleceği üzere dünyadaki polimer esaslı malzeme tüketimi 1983 yılından itibaren demir ve çeliği geçmiştir [1]. Polimerler bir çok alanda metallerle serbestçe rekabet edebilen çok önemli mühendislik malzemeleri haline gelmiştir. Günümüzde bir çok makina elemanı dişli çark, kaymalı yatak, rulmanlı yatak kafesleri, takım tezgahlarının kızakları v.b. polimer malzemelerden yapılmaktadır. Polimer malzemelerden imal edilen makina elemanlarının maliyetinin düşüklüğü, bakım masraflarının azlığı, montaj ve demontajlarındaki kolaylık, çok karışık şekilli parçaların kolaylıkla imalatı, dayanım/ağırlık oranlarının daha iyi olması, korozyon ve kimyasal etkilere dirençlerinin çok yüksek olması, çok düşük sürtünme katsayıları, yüksek dielektrik özelliklerinden dolayı büyük güçler iletmeyen, zorlanmaların çok büyük olmadığı, dar bir sıcaklık bölgesinde çalışan sistemlerde giderek yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Polimer malzemelerin endüstriyel

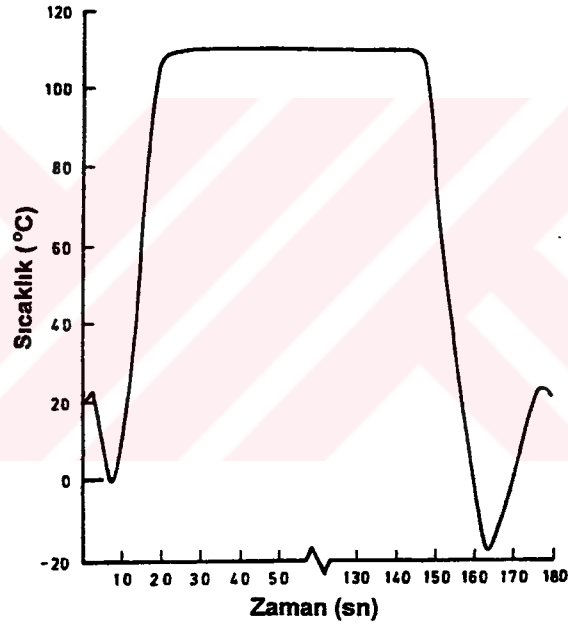
olarak kullanımının giderek artması bunların işletme şartlarındaki davranışlarının araştırılmasını zorunlu kılmaktadır.



Şekil 1.1 Dünyada demir ve çelik, polimer tüketimi

Polimerlerin tarihsel gelişiminde poliamidin icadı özel bir yere sahiptir. Poliamid ile ilgili çalışmalar 1928 yılında Carother ile başlamıştır. Bunu 1930 yılında J.Hill'in polikondansasyonla poliesterin molekül ağırlığını 5000 civarından 25000 mertebesine kadar çıkarmaları izlemektedir. Hill, bu süper polimerlerle soğuk çekme ile elyaf elde edilebildiğini gözlemiştir. Düşük erime noktasına sahip alifatik poliesterler dikkati poliamidlere yönlendirmiştir. Erime noktası 195°C olan poli (9-aminononanoic asit)'in bulunması daha yüksek erime noktasına sahip polimerlerin araştırılmasına neden olmuştur. Böylece DuPont firması tarafından 1935 de ilk PA 66 laboratuvarında elde edilmiştir. Günümüzde poliamid 6, poliamid 66, poliamid 4/6, poliamid 11, poliamid 612 ve döküm poliamid gibi çeşitleri vardır. Kristalin bir polimer olan poliamid kalıplama, ekstrüzyon, çözelti, kaplama ve döküm yoluyla şekillendirilebilir. Poliamid granülleri elyaf takviyeler ve çeşitli dolgu malzemeleri ile mekanik özellikler bakımından iyileştirilebilirler. Genelde bu malzemelerin çok iyi yorulma mukavemeti, iyi sürünme mukavemeti, düşük sürtünme katsayısı ve oldukça iyi darbe mukavemeti, iyi aşınma direnci, iyi kimyasal dirençleri ve elektriksel özellikleri vardır. İyi mekanik ve tribolojik özelliklere sahip poliamid dişli çark, kam, kaymalı yatak, rulmanlı yatak kafesleri, kızak gibi elemanların imalinde kullanılır.

Endüstrinin birçok kolunda özellikle havacılık ve uzay alanında ısı kararlı malzemelere ihtiyaç vardır ve giderek artmaktadır. Son yıllarda tamamen yeni ısı dayanımlı polimerler üretilmemiş bunun yerine , bilinen yapının geliştirilmesine ya da bu yapıların kararlılığını kaybetmeden üretimini kolaylaştıracak modifikasyonlar üzerinde yoğunlaşmıştır. Örnek olarak Şekil 1.2 de süpersonik Concorde uçağının Londra-New York uçuşu sırasında oluşan ısı profili verilmektedir. Uçuşun büyük bölümünde uçağın yüzey sıcaklığı yaklaşık olarak 110°C'dir. Bu nedenle yapı malzemesi uçuş süresince bu sıcaklığa dayanabilecek kapasitede olmalıdır. Bu uygulamada da görüldüğü gibi pratikte kısa süreli de olsa malzemenin çok yüksek sıcaklıklara (yaklaşık 1000°C) maruz kaldığı durumlara rastlanabilmektedir. Bu durumlara en yaygın olarak silah endüstrisi ile uzay endüstrisinde (uzay mekiği zırhı) rastlanmaktadır. Bu nedenle malzemelerin bu sıcaklıklarda kararlılıklarını koruyabilmesi önemlidir [2].



Şekil 1.2 Londra-New York uçuşu yapan Concorde uçağının, yüzey sıcaklık profili

1.1. Literatür Araştırması

Polimerlerin tribolojik özellikleri metallerden oldukça farklıdır. Temel tribolojik kavramalar ve polimerlerin genel özellikleri ile ilgili literatürde pek çok yayın mevcuttur [3-13]. Çok hacim tutacağı için burada sadece tez konusuna en yakın olan çalışmalardan önemli olanlarına değinilecektir.

Polimerlerin kullanım alanlarını sınırlayan önemli bir parametre sıcaklıktır. Bu nedenle yapılan çalışmada önce polimer malzemelerin sürtünme ve aşınma karakteristiğine sıcaklığın etkisi araştırılmıştır. McLAREN, K.G. ve TABOR, D. yaptıkları çalışmada polimer malzemelerin sürtünme özelliklerine kayma hızı, sıcaklık ve yağlayıcının etkilerini incelemişlerdir [14]. RHEE, S. H. ve LUDEMA, K.C. çalışmalarında PA 66, POM, PA 11, UHMWPE nin transfer film oluşumunun mekanizmasını incelemişlerdir. Polimerlerin aşınmasının azaltılmasında transfer film oluşumunun etkisi tartışılmıştır. Pürüzlü yüzeylerde transfer film oluşumunun daha kolay olduğu gösterilmiştir [15]. WU, J. S. ve WALTER, R. yaptıkları çalışmada katkılı ve katkısız PEEK, PI, PAI malzemelerin oda sıcaklığındaki ve 220°C deki sürtünme ve aşınma davranışını incelemişlerdir. Genelde 220°C de düşük sürtünme katsayısı ve daha büyük bir aşınma miktarı ölçmüşlerdir [16]. FRIEDRICH, K., KARGER, J. ve LU, Z. ise dolgulu ve dolgunsuz PEEK' nun sürtünme ve aşınma davranışına sıcaklığın etkisini kuru sürtünme hali için incelemişlerdir. Bu malzemeler için yüzey pürüzlülüğünün aşınma hızını nasıl etkilediğini, farklı deney sıcaklıklarında p_v değeri ile sürtünme katsayısı ve aşınma hızının nasıl değiştiğini araştırmışlardır. Genel olarak deney sıcaklığı arttıkça aşınma hızında bir artma gözlenmiştir. Sürtünme katsayısında ise artan sıcaklıkla önemli bir değişim gözlenmemiştir [17].

TANAKA, K., UCIYAMA, Y. ve TOYOOKA, S. yaptıkları çalışmada hız ve sıcaklığın PTFE nin sürtünme ve aşınma davranışına etkisi incelenmiştir. Aşınma mekanizması deney sonuçlarına ve sürtünme yüzeylerinin elektron mikroskobu görüntülerine dayanarak açıklanmaya çalışılmıştır [18]. UCIYAMA, Y. ve TANAKA, K. çalışmalarında PTFE nin aşınmasına kayma hızı, temas basıncı ve sıcaklığın etkisini kontrol edilen yüzey sıcaklıkları altında incelemişlerdir. Bu malzeme için sıcaklık, kayma hızı ve yüzey basıncının fonksiyonu olarak bir aşınma faktörü tanımlamaya çalışmışlardır [19]. Aynı araştırmacıların PAI, PI, PEEK gibi ısıya dayanıklı polimer malzemelerin polimer/metal kuru sürtünme durumu, farklı disk sıcaklıklarında incelenmiştir. Farklı disk sıcaklıkları için sürtünme katsayısı ve aşınma miktarı hız ve yükün bir fonksiyonu olarak incelenmiştir. Aşınma mekanizmalarını açıklamak için sürtünme yüzeyleri elektron mikroskobu altında incelenmiştir. Yüksek sıcaklıklarda polimerlerin sürtünme ve aşınmasını azaltan ince bir transfer filmi olduğu gözlenmiştir [20]. WATANABE, M., KARSAVO, M. ve MATSUBURA, K. yine PA' in sürtünmesi ile ilgili davranışlarını artan yük ile geniş bir hız aralığında incelemişlerdir. Ayrıca sürtünme katsayısının sıcaklık ile değişimi incelenmiş, düşük hızlarda yüzeyde sürtünme ısısı oluştuğunda maksimum sürtünme katsayısı gözlenmiştir [21]. WATANABE, M. ve YAMAGUCHI, H. PA in sürtünme ve aşınma özelliklerini incelemişlerdir. Sıcaklığın etkisi çeşitli hızlarda test

edilmiştir. Aynı zamanda PA in aşınmasında sıcaklık, hız ve yükün etkisi incelenmiştir. Aşınma ile ilgili minimumlar ve sürtünme ile ilgili maksimumlar eğriler halinde elde edilmiştir. PA in sürtünme mekanizması ile ilgili açıklamalar yapılmıştır [22].

BARRETT, T. S., STACHOWIAK, G. W. ve BATCHELOR, A. W. çok yüksek molekül ağırlıklı polietilenin sürtünme ve aşınmasına, kayma hızı ve yüzey pürüzlülüğünün etkisini incelemişlerdir. Yapılan çalışmada disk sıcaklığı kontrol edilerek yüzey sıcaklığının sürtünme ve aşınma davranışını nasıl etkilediği araştırılmıştır. Sıcaklık kritik bir değere ulaştığında aşınmanın, polimerin yumuşayan yüzey tabakasının ani kaybı nedeniyle ani olarak arttığı gözlenmiştir [23]. SHIRETOV, T., GLABBEEK, W. V. ve CUSANO, C. ise Poliimid ve Poliamidimid üzerine yaptıkları çalışmada , bu malzemelerin HCF-134a çevre şartlarında aşınma davranışını farklı hız ve basınç altında incelemişlerdir. Yüzey pürüzlülüğü ve sıcaklıkla sürtünme ve aşınma davranışının nasıl değiştiğini incelemişlerdir. Sıcaklıkla aşınma faktöründe artma, sürtünme katsayısında ise azalma görülmüştür [24]. HANCHI, J. ve EISS, N. S. Jr. yaptıkları çalışmada PEEK/PEI karışımlarının tribolojik ve mekanik özelliklerini 20°C den 232°C ye kadar sıcaklık aralığında incelemişlerdir [25]. Aynı araştırmacılar benzer bir çalışmayı PEEK, termotropik sıvı kristalin polimerler (TLCP) ve PEEK/TLCP karışımları üzerine yapmışlardır [26]. Yine aynı araştırmacılar aynı malzemelerle birlikte PEEK/HX 1000 karışımını da kullanarak sürtünme ve aşınma davranışı ile mekanik davranışlarını incelemişlerdir. Bu çalışmalarda aşınma, bir profilometre kullanılarak yüzeylerin deney öncesinde ve sonrasındaki durumları alınarak hacimsel kayıp hesaplanarak ölçülmektedir. Aşınmış yüzeylerin elektron mikroskobu ile alınan filmleri ve profilometreden alınan veriler kullanılarak aşınma mekanizmaları açıklanmaya çalışılmıştır [27]. Aynı araştırmacılar benzer bir çalışmayı da cam elyaf takviyeli PEEK üzerinde yapmışlardır [28].

UCHIYAMA, Y., UEZI, Y., KUDO, A. ve KIMURA, T. dolgu ve dolgusuz sıvı kristalin polimerleri (LCPs) krom kaplı diske karşı sürtünmesi durumunda adeziv ve abraziv aşınma özelliklerini araştırmışlardır. Ayrıca polimer moleküllerinin yönlerinin, sıcaklığın ve dolguların sürtünme ve aşınma davranışını nasıl etkilediği araştırılmıştır [29]. YANG, E. L., HIRVONEN, J. P. ve TOIVANEN, R. O. PTFE'nin çelikle kayma temas durumu için transfer filmi oluşumuna sıcaklığın etkisini incelemişlerdir. Sıcaklı ve yük artıkça PTFE transferinin de arttığı görülmüştür [30]. PLESKACHEVSKY, Y. M. ve SMURUGOV, V.A. PTFE için temas sıcaklığının sürtünme ve aşınmayı ne yönde etkilediğini incelemişlerdir [31]. FRIEDRICH, K. , LU, Z.ve HAGER, A.M. katkılı ve katkısız PEEK sıcaklığın sürtünme ve aşınma davranışına etkisini incelemişlerdir [32]. Aynı araştırmacıların

farklı bir çalışmada karbon elyaf takviyeli PEEK kompozitlerin tribolojik özellikleri çelik temas durumu için farklı kayma hızları, temas basınçları ve sıcaklıklar altında bir pim disk deney tesisatı kullanılarak incelenmiştir [33]. LU, Z. ve FRIEDRICH, K. Yaptıkları çalışmada farklı moleköl ağırlıklı PEEK ve PTFE/PEEK karışımlarının sürtünme ve aşınma davranışını araştırmışlardır [34]. CHITSAZ-ZADEH, M. R. ve EISS, N.S., Jr. yapıkları çalışmada iki farklı poliimid tipi için sürtünme ve aşınma özelliklerini kayma hızı ve sıcaklığa bağılı olarak incelemişlerdir [35].

Yukarıda bahsedilen çalışmalar incelendiğinde yüksek ısıl dayanıma sahip olan poliamidlerle ilgili yeterli sayıda çalışma yapılmadığı görölmüşür. Poliamidler üzerine yapılan çalışmalar araştırdığında genel olarak oda sıcaklığındaki tribolojik davranışlarının farklı bakış açılarından incelendiğı görölmüşür. CZICHOS, H. yaptığı çalışmada PTFE, POM, PA 66 , PA 6, PI gibi polimer malzemelerin tribolojik davranışlarına adeziv ve abraziv mekanizmaların etkisini araştırmışlardır. Ayrıca Poliamid 6 ve polifinilensülfide değışik oranlarda cam elyafı katılarak takvilendirmenin polimer malzemelerin tribolojik davranışına olan etkisi incelenmiştir [36]. Aynı araştırmacının SANTNER, E. ile yaptıkları bir diğerk çalışmada aralarında PA 6 nın da bulunduğı çok sayıda, geniş uygulama alanı bulan polimerlerin sürtünme ve aşınma davranışlarını kuru sürtünme şartlarında incelemişlerdir. Polimerlerin tribolojik davranışları ve malzeme özellikleri arasındaki ilişki; çeşitli dolgulu polimerlerin aşınma ve sürtünmesinde yüzey pürüzlülüğü, kayma hızı ve temas basıncının etkisi araştırılmıştır [37]. LHYMN, C. yaptığı çalışmada farklı yüzdelerde cam elyafı takviyeli poliamid 66'nın yüzey pürüzlülüğü, normal yük ve kayma hızı ile sürtünme katsayısı ve aşınma hızının değışimini incelemiştir. Genel olarak düşük normal yük altında artan kayma hızı ile aşınma hızının azaldığını ve yüksek yük altında kayma hızı arttığı zaman aşınma hızının hemen hemen sabit kaldığı görölmüşür [38].

MENS, J.W.M. ve GEE, A.W.J. yaptıkları çalışmada hava ve sulu ortamda çelik karşı yüzeyde içlerinde poliamid 66 nın da bulunduğı 18 farklı tip polimerin sürtünme ve aşınma davranışlarını araştırmışlardır. PTFE ve PTFE+cam elyafının dolgu olarak etkisi incelenmiştir. Gözlenen olaylar polimer yapıları, transfer ve aşınma mekanizmaları ile farazi olarak açıklanmaya çalışılmıştır [39]. TANAKA, K. çalışmada farklı kısmi kristalin polimerlerin çelik karşı yüzeyde sınır yağlama durumu için suyun yağlama kabiliyeti açıklanmaya çalışılmıştır. Yağlayıcı olarak su kullanıldığında bu polimerlerin sürtünme ve aşınma karakteristiklerini, aşınma mekanizmalarını araştırmıştır [40]. Aynı araştırmacının yaptığı diğerk çalışmada çelik karşı yüzeyde PA 6 gibi çeşitli kısmikristalin polimerlerin aşınma sırasında transfer film oluşumunu incelemiştir. Sürtünme ve transfer film kalınlığı arasındaki

ilişkinin nasıl olduğu araştırılmıştır. Polimer aşınmasının polimerin izafi hareketi sırasında transfer olan bir polimer tabakası (transfer film) üzerinde olduğu gözlemlenmiştir [41]. Aynı araştırmacı MIYATA, T. ile yaptığı diğer bir çalışmada kısmikristalin polimerlerin transfer film ve sürtünme özelliklerini araştırmışlardır [42]. BOLVARI, A., GLENN, S., JANSSEN, R. ve ELLIS, C. birlikte yaptıkları çalışmada poliamid 66 ya değişik oranlarda aramid elyafı ve PTFE katıldığında sürtünme katsayısı ve aşınma miktarının kayma mesafesi ile değişimini araştırmışlardır. Aramid elyaf oranı arttıkça aşınmanın arttığı gözlenmiştir. Buna karşılık %25 aramid elyafı + %10 PTFE katıldığında PA 66'nın oldukça düşük aşınma ve çok iyi mekanik özellikler gösterdiği görülmüştür [43]. CLERICO, M. de poliamidin çelik karşı yüzey ile temas halinde sürtünme ve aşınma mekanizması konusunda çalışmıştır [44].

VELDE, F. ve BAETS, P.D. PA 6' nın çelik karşı yüzeyde düşük hızlarda ve yüksek basınçlarda sürtünme ve aşınma özelliklerini incelemişlerdir [45]. HOLMERG, K. ve WICKSTRÖM, G. aralarında poliamidin de bulunduğu 22 çeşit polimerin sürtünme katsayıları ve aşınma hızları çeşitli sürtünme ve aşınma deney tesisatlarında ölçülmüştür. Düşük sürtünme katsayısı ve aşınma hızı PTFE ve PE de elde edilmiştir. Grafit, MoS₂ gibi katkıların polimerlerin tribolojik özelliklerini her zaman iyileştirmedikleri tespit edilmiştir. PA' lerin diğer polimerlere nazaran daha yüksek bir sürtünme katsayısına sahip olduğu, aşınma hızlarının da büyük bir aralıkta değişim gösterdiği sonucuna varılmıştır [46]. GAO, J., MAO, S., LIU, J., FENG, D., yine aralarında PA 6 nın da bulunduğu polimerlerin paslanmaz çelikte eş çalışma durumunda tribokimyasal etkileri araştırmışlardır. Sonuçlar sürtünme işlemi boyunca kompleks kimyasal reaksiyonların meydana geldiğini göstermiştir. Bu reaksiyonlar ve polimerlerin yapısal karakteristiklerinin karşı yüzeye polimer sıvanmasına ve tamamıyla transfer film oluşumuna tesir ettiği, bundan dolayı da polimerlerin sürtünme ve aşınma özelliklerinin de etkilendiği belirtilmiştir. [47]. LIU, W., HUANG, C., GAO, L., WANG, J., DANG, H., MoS₂ dolgu PA6 ın sürtünme ve aşınma özelliklerini incelemişlerdir. MoS₂' in dolgu olarak sürtünmenin azaltılmasında etkili olmadığı, aşınmanın ise arttığı tespit edilmiştir. Oluşan transfer filmin sürekli olmadığı belirlenmiştir. MoS₂ in oksitlenerek MoO₃ oluşturduğu ve transfer filmin daha zengin hale gelmediği sonucuna varılmıştır [48]. BELLOW, B. G. ve VISWANATH, N. S. ise pek çok ticari polimerin aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Özellikle aşınma üzerine yüzey pürüzlülüğünün etkisini araştırmışlardır. Yüzey pürüzlülüğü arttıkça sürtünme katsayısının azaldığı ancak aşınma miktarının arttığı gözlenmiştir [49].

AHARONI, S. M. çalışmasında polimer/polimer temas durumu için yuvarlanma (roll-formation) aşınmasının oluşum mekanizmasını incelemiştir. PA 6'nın da yer

aldığı on farklı polimer üzerinde çalışmıştır [50]. ERHARD, G. çalışmasında polimer/polimer temas poliamidin de yer aldığı pek çok polimer için yüzey enerjisine dayalı deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir. Deneysel sonuçların yüzey enerjisi modeline uyduğu bulunmuştur[51]. VAZIRI, M., STOTT, F.H. ve SPURR, R.T. aralarında poliamidin de bulunduğu yedi farklı polimerin sürtünme özelliklerini araştırmışlardır. Polimer-polimer ve polimer-çelik teması halinde statik ve dinamik sürtünme katsayıları ölçülmüştür. Sürtünmenin polimerin kritik yüzey enerjisine uygun olarak arttığı tespit edilmiştir [52]. AKKURT, S. yaptığı çalışmada poliamid 6'nın sürtünme ve aşınma davranışını kuru sürtünme hali için incelemiştir [53]. GEDİKTAŞ, M., TEMİZ, V. yaptıkları çalışmada döküm poliamidin de aralarında bulunduğu on farklı katkılı ve katkısız polimer malzemelerin sulu ortamdaki tribolojik davranışları çeşitli sıcaklıklarda incelenmiştir. Artan su sıcaklığı ile sürtünme katsayısında belirgin bir artış gözlenmiştir [54]. TEMİZ, V., PARLAR, Z. yaptıkları çalışmada döküm poliamide yağ emdirilmesinin malzemenin tribolojik davranışına etkisini incelemişlerdir. Polimer/çelik temas durumunda döküm poliamid 6'ya yağ emdirilmesinin kayda değer bir avantaj sağlamadığını, aksine bazı işletme şartları için dezavantaj olabileceğini belirtmişlerdir [55].

Takdim edilen bu çalışmada amaç, yukarıda özelliklerinden kısaca bahsedilen polimer malzemelerin sürtünme ve aşınma davranışlarına sıcaklığın etkisinin deneysel olarak incelenmesi ve bu konuda bir veri tabanı oluşumuna yardımcı olmaktır. Yapılan literatür araştırmasından da görüldüğü gibi sıcaklığın kontrol edildiği şartlar altında yapılan çalışmalarda genellikle son zamanlarda geliştirilmiş olan yüksek ısı dayanıma sahip polimer malzemeler üzerine çalışılmıştır. Daha önce belirtildiği gibi ilk mühendislik plastiği olan poliamidlerin ise genellikle oda sıcaklığındaki sürtünme ve aşınma davranışlarının incelendiği yüksek sıcaklıklardaki davranışlarının sınırlı olarak incelendiği görülmüştür. Oysa poliamidler, özellikle otomotiv sektöründe yüksek sıcaklığa maruz kalan uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu çalışma ile bu boşluğun doldurulmasına katkıda bulunulmaya çalışılmaktadır.

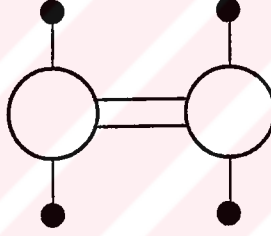
Yapılan çalışmada poliamid malzemelerin sürtünme ve aşınma davranışına sıcaklığın etkisi çeşitli işletme şartlarında incelenmiştir. Deneylerde poliamid 4/6, poliamid 66, poliamid 6, döküm poliamid 6, MoS₂ katkılı poliamid 66, MoS₂ katkılı döküm poliamid 6 ve yağ emdirilmiş döküm poliamid 6 kullanılmıştır. Deneyler bir pim-disk deney tesisatı kullanılarak yapılmıştır. Deney tesisatı normal yük, kayma hızı ve sıcaklığın ayarlanabilmesine, sürtünme momentinin ölçülebilmesine olanak sağlamaktadır. Aşınma miktarı hassas bir terazi kullanılarak ölçülmüştür. Ayrıca aşınmış numunelerin yüzey filmleri optik mikroskop ve tarayıcı elektron mikroskobu kullanılarak çekilmiştir.

2. POLİMER MALZEMELER VE GENEL ÖZELLİKLERİ

2.1. Temel Bilgiler

Bu bölümde genel olarak polimer malzemelerin özelliklerine değinildikten sonra ayrıntılı olarak bu çalışmada kullanılan poliamidlerin özellikleri ve kullanım alanlarından bahsedilecektir.

Polimerler, monomer denilen kimyasal bileşiklerden meydana gelen, yüksek molekül ağırlığına ve zincir şeklinde bir yapıya sahip sentetik malzemelerdir. Şekil 2.1 de şematik olarak gösterilen bir monomer polimerizasyon yoluyla başka monomer molekülleri ile birleşerek tekrarlanan ünitelerden oluşan çok uzun zincir şeklinde bir makromolekül meydana getirmektedir. Bu şekilde bir çok monomerin birleşerek oluşturduğu moleküle polimer denir.



Şekil 2.1 Bir monomer molekülünün şematik görünüşü

Monomerler farklı üretim metotları ile birleştirilerek makro moleküller elde edilirler. Karbon atomlarının karşılıklı çift bağ (doymamış) bulunduğu monomerlerin, yan ürünsüz olarak ve karbonların karşılıklı tek bağ (doymuş) hale gelmesiyle birbirine bağlanması polimerizasyon, farklı türden monomerlerin bu şekilde birleştirilmesi kopolimerizasyon, monomerlerin su, amonyak gibi basit yan ürünler vererek birbirine bağlanması polikondansasyon olarak adlandırılır. Bu reaksiyonları başlatmak için ısı, basınç veya katalizörlerden yararlanılır.

2.2. Polimerlerin Sınıflandırılması

Polimer malzemeler moleküler yapısına ve bağ mekanizmasına bağlı olarak üç ana gruba ayrılabilirler:

1. Termoplastikler,
2. Termosetler,
3. Elastomerler

2.2.1. Termoplastikler

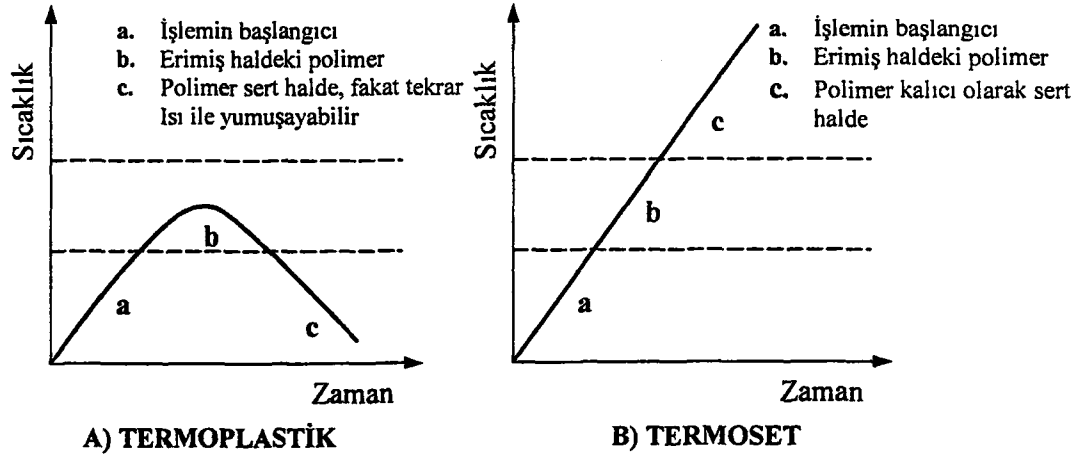
Moleküller arası kuvvetler ile birbirine bağlanmış dallı veya lineer (düzgün) makromolekül zincirlerinin oluşturduğu polimerlere “termoplastik” denir. Moleküller arası çekim kuvvetinin büyüklüğü diğer başka faktörlerin yanında esas olarak zincirdeki dallanmaların şekline ve sayısına bağlıdır

Termoplastikler ısıtıldıklarında moleküller arası kuvvetler zayıflar ve malzeme tekrar şekillendirilebilecek hale kadar yumuşar. Diğer bir deyişle termoplastik bir ürün ısı etkisi ile tekrar başka bir ürün için hammadde haline dönüştürülebilir. Buharlaşma ile bileşim değişmemek şartıyla bu çevrim istenildiği kadar tekrarlanabilir. Uygun çözücülerle de çözünabilirler. Hamur halinde bulunma sıcaklıklarının alt sınırında ekstrüzyon, haddeleme, basma vb. işlemler; üst sırada kaynak; sıvılaşma sıcaklığının üstünde de püskürtme (enjeksiyon) dökümle şekillendirilebilirler. Termoplastik grubunu oluşturan en önemli polimerler: akrilik, poliamid, polistiren, polietilen, karbonflorür, selülozik ve vinillerdir. Polimer malzemelerin içinde en büyük grubu termoplastikler oluşturur.

2.2.2. Termosetler

Bu kategorideki polimerlerde molekül zincirleri düzensiz bir dağılım gösterir. Bu tip yoğun çapraz bağlı molekül zincirlerinin oluşturduğu yapıya “termoset” denir. Bu polimerlerde makro molekülleri bir arada tutan kuvvetler sadece intermoleküler kuvvetler değildir, aynı zamanda atomik bağlarda bir arada tutar. Çoğunlukla polikondansasyon ürünleridir. Termosetlerde polimerizasyon işlemi, malzemeyi içeren monomerlerin bir araya getirildiği reaktörde başlar ve kalıplama işlemi sırasında biter. Reaksiyon sonucunda ağ yapısının tamamlanmasıyla sertleşir ve tekrar ısıtılarak yumuşatılamazlar ve şekillendirilemezler. Sıcaklık çok arttırılırsa özelliklerini kaybeder ve giderek kömürleşirler.

Termoplastik ve termoset polimerler arasındaki farklılığı bir diyagram ile ortaya koymak mümkündür. Şekil 2.2 termoplastik ve termoset malzemelerin erime karakteristiklerini göstermektedir [13].



Şekil 2.2 Termoplastik ve termoset malzemelerin erime karakteristikleri

2.2.3. Elastomerler

Elastomerlerin molekül zincirleri gelişigüzel bir diziliş gösterirler ve düşük oranda çapraz bağ oluştururlar. Polimerlerin bu kategorisi az çapraz bağlı olarak telaffuz edilebilir.

Elastomer içinde bulunan çapraz bağlar molekül zincirlerinin birbirine göre hareketini oldukça önemli oranda engeller. Makromoleküllerdeki atomik bağlar gibi çapraz bağdaki atomik bağlar da ancak çok yüksek sıcaklıklarda parçalanabilir. Ancak sıcaklık düştüğünde tekrar bağ oluşması mümkün olmaz. Bu nedenle elastomerler ne erirler ne de çözünürler. Molekül zincirleri çok az sayıda çapraz bağ ile bağlandığı ve bu nedenle yağ ve benzin molekülleri gibi küçük moleküller zincirler arasındaki boşluklara girebileceği için elastomerler belli bir orana kadar şişme gösterebilirler.

Polimerler yapılarına göre homopolimer ve kopolimer olarak da sınıflandırılabilir. Homopolimer, tek bir monomerin tekrarlanmasıyla elde edilirken, kopolimer iki farklı monomerin polimerizasyonundan elde edilir. Üç cins farklı monomerden oluşanlara terpolimer denir. Örneğin polietilen bir homopolimer, stiren-butadien kauçuğu bir kopolimer ve akrilonitril-butadien-stiren (ABS) bir terpolimerdir. Ayrıca polimerler fiziksel durumlarına göre amorf, kristalin ve kısmikristalin olarak da ayrılabilirler.

2.3 Takviye, Dolgu ve İlave Maddeler

Polimerlerin fiziksel ve mekanik özelliklerini değiştirmek veya iyileştirmek için bir çok madde polimerlere katılabilir. Katkı malzemesi olarak başka polimer reçineleri, cam ve karbon elyafları, dolgu malzemeleri, yumuşatıcılar, stabilizatörler, yağlayıcı, renk verici, yanmayı önleyici ve çapraz bağ oluşturan maddeler kullanılır. Örneğin elyaf takviyeler kullanıldığı takdirde polimerin mekanik özellikleri kayda değer bir oranda iyileşme göstermektedir.

2.3.1. Takviyeli polimerler

Polimerler, çekme, darbe ve ısı mukavemeti, boyut kararlılığı ve maliyet gibi özelliklerini iyileştirmek için başka malzemelerle takviye edilir. Katkı malzemeleri elyaf ve dolgu şeklinde olabilir. Bu iki takviye sisteminin arasında kesin bir sınır olmamasına rağmen şu ayırım yapılabilir. Elyaf takviye sistemi, genellikle polimerlerin yukarıda sıralanan özelliklerini iyileştirmek amacı ile uygulanan pahalı bir sistemdir. Bu nedenle elde edilen iyileştirme, malzemenin fiyat artışını telafi edici seviyede olmalıdır. Dolgu takviye sistemi ise genellikle polimerlerin maliyetini düşürmek amacı ile kullanılmaktadır. Ancak dolgu maddeleri, polimerin ısı iletkenliğini arttırmasına, kalıplama zamanını azaltmasına rağmen mekanik özelliklerini bilhassa çekme mukavemetini azaltır. Bu nedenle polimerlerin mukavemet özelliklerini arttırmak için kuvvetlendirici de denilen elyaf takviye sistemi kullanılmalıdır.

2.3.2. Polimer karışımları ve alaşımları

Alaşımlar genellikle mekanik olarak karıştırılan polimer malzeme kombinasyonlarına verilen isimdir. Bu malzemeler kimyasal bağlara bağımlı değildir, fakat bir çok halde “düzenleyici katkı” kullanımını gerektirir. Polimer alaşımları alaşımı oluşturan her bir bileşenin en iyi karakteristiklerini muhafaza edecek şekilde dizayn edilir. Çoğunlukla bu yöntemle iyileştirilecek özellikler darbe mukavemeti, su ve hava etkilerine karşı direnç, düşük sıcaklıklardaki performans ve yanma direncidir.

Karışım ve alaşım oluşturmaın en temel amacı karışımları her birinin saf haldeki özelliklerden daha gelişmiş özelliklere haiz iki veya daha fazla polimer bulmaktır. İki

veya daha fazla farklı polimeri karıştırma metotları çapraz bağ ve aşılama yöntemleridir.

2.4. Polimerlerin Viskoelastik Davranışı

İdeal elastik (Hooke kanununa uyan) bir malzemede gerilme σ , birim uzama ϵ , ile doğru orantılıdır ve tek eksenli bir zorlanma durumu için bu ilişki aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\sigma = \text{sabit} \times \epsilon \quad (2.1)$$

Burada sabit büyüklüğe malzemenin elastiklik modülü denir.

İdeal viskoz (Newtoniyen) bir sıvıda ise kayma gerilmesi τ , şekil değiştirme hızı (dy/dt) ile doğru orantılıdır ve aralarındaki ilişki aşağıdaki gibidir.

$$\tau = \text{sabit} \times (dy/dt) \quad (2.2)$$

burada sabit büyüklüğe sıvının viskozitesi denir ve η ile gösterilir.

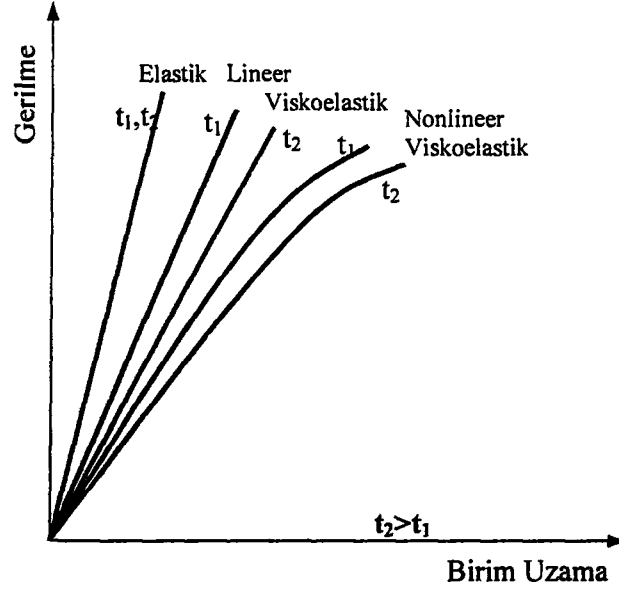
Polimer esaslı malzemeler ise mekanik özellik olarak bu iki ideal durum arasında bir yere konabilir. Yani bu malzemeler hem elastik bir katının hem de viskoz bir sıvının özelliklerini bir arada gösterirler. Bu yüzden bu tip malzemelere viskoelastik denir. Bir viskoelastik malzemede gerilme birim uzama ve zamanın fonksiyonudur. Bu durum t zamanı göstermek üzere aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\sigma = f(\epsilon, t) \quad (2.3)$$

Bu tarz bir davranış nonlinear viskoelastik olarak adlandırılır. Genellikle bu tarz bir malzemede basit hesaplamalarla çözüme ulaşmak çok zordur. Bu yüzden 2.3 denklemini aşağıdaki formda yazılır.

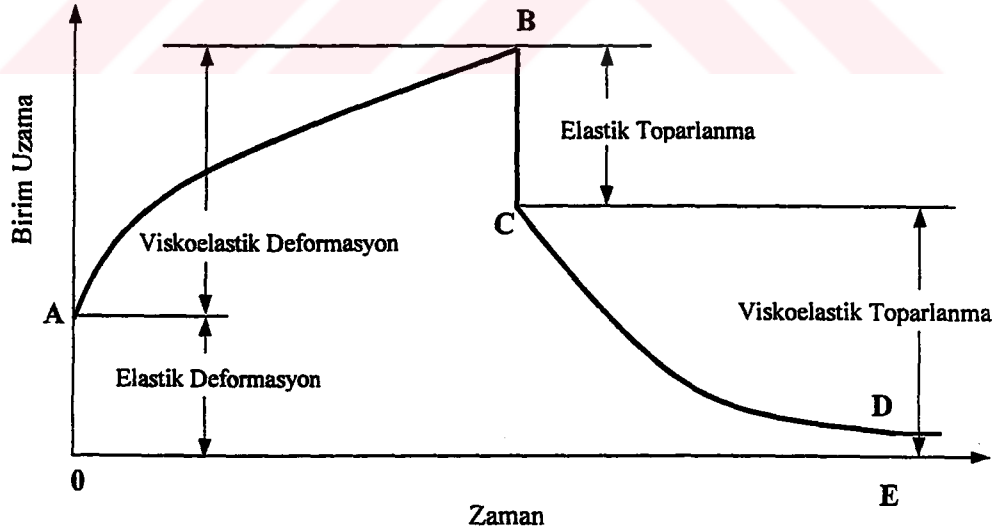
$$\sigma = \epsilon \cdot f(t) \quad (2.4)$$

Bu eşitlik lineer viskoelastisiteyi temsil eder ve basit olarak örneğin bir çekme deneyinde belli bir zaman süresi için gerilmenin birim uzama ile doğru orantılı olduğunu gösterir. Gerilme ve birim uzama arasındaki farklı tarzdaki değişimler Şekil 2.3 de gösterilmiştir.

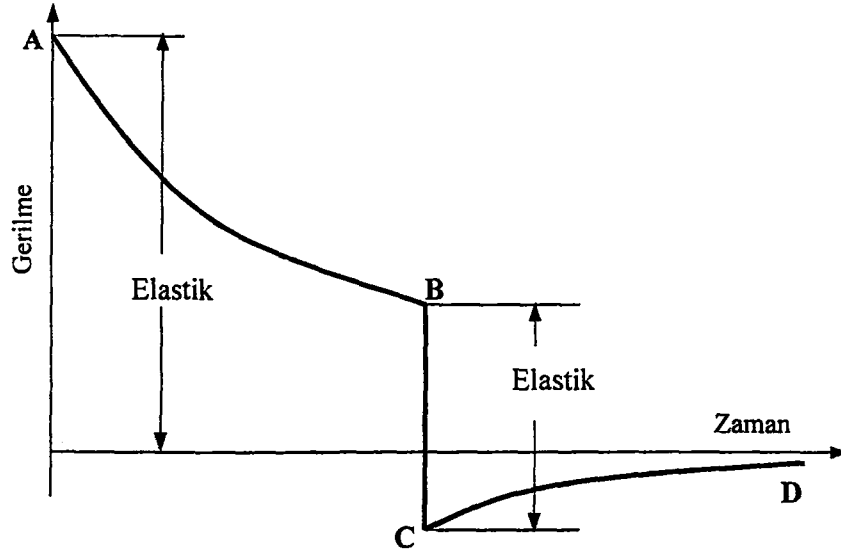


Şekil 2.3 Elastik ve viskoelastik malzemelerin iki farklı zaman değeri için gerilme-birim uzama karakteristikleri

Viskoelastik malzemelerin en karakteristik özelliği uygulanan sabit bir gerilmede zamana bağlı olarak bir birim uzama (**sürünme olayı**) veya öngörülen bir birim uzamada zamana bağlı bir gerilme (**gevşeme olayı**) cevabı vermeleridir (Şekil 2.4-2.5). Bunlara ilave olarak uygulanan gerilme kaldırıldığında bu malzemeler zaman içinde bir toparlanma gösterirler. Benzer özellikler metallerde de gözlenmektedir, ancak aradaki fark metallerde bu olayın yüksek sıcaklıklarda polimerlerde ise oda sıcaklığında meydana gelmesidir.



Şekil 2.4 Bir polimer malzemenin sürünme davranışı



Şekil 2.5 Bir viskoelastik malzemenin gevşeme (relaksasyon) karakteristiği

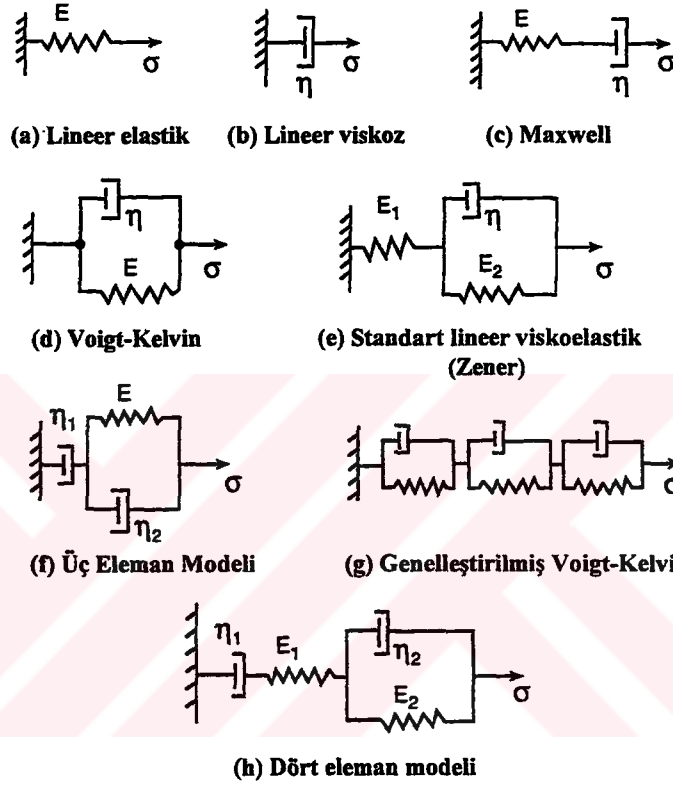
2.4.1. Viskoelastisite için matematik modeller

Polimer malzemelerin viskoelastik davranışı basit fiziksel modeller kullanarak simüle edilebilir. Bu modeldeki elemanlar gibi davranan moleküler yapılar mevcut olmamakla birlikte bunlar polimer malzemelerin davranışını anlamamıza yardımcı olurlar. Bu modellerden en önemli birkaçı bu kısımda incelenecektir.

Klasik mukavemet derslerinden de hatırlanacağı üzere metal gibi mühendislik malzemeleri elastiklik sınırları içinde kullanılırlar. Bu sınırlar içinde gerilme ve birim uzama arasındaki ilişki lineerdir. Bu ilişki Hooke kanunu ($\sigma = E\epsilon$) ile ifade edilir. Bu denklemin mekanik modeli olarak ise bir lineer yay kullanılır. Burada yay sabiti elastiklik modülü (E) ile orantılıdır. Tek eksenli bir gerilme durumu göz önüne alınırsa ani bir yük tatbiki halinde yay anlık olarak (gecikme olmaksızın) son haline kadar uzar.

Ancak, bir metale yeteri kadar yüksek sıcaklıkta aynı yük uzun bir süreyle tatbik edilirse bu malzeme artık bir yay ile modellenemez. Bunun sebebi ise malzemenin son boyuna kuvvetin uygulanmasını müteakip olarak ulaşmaması ve aksine zaman içinde sürünme sonucu kopma meydana gelene kadar şekil değişimine devam etmesidir. Sabit yük altında meydana gelen sürünme olayı daha önce de belirtildiği gibi polimerlerde metallerden çok daha önemlidir. Sonuç olarak polimer (özellikle termoplastikler ve elastomerler) malzemelerin yük etkisindeki davranışını ifade etmek için kullanılması gereken modelde iki veya daha fazla yay ve bir veya daha

fazla viskoz eleman kullanmak daha doğru olacaktır (Şekil 2.6). Viskoz elemanlar şematik olarak damper veya daşpot şeklinde temsil edilirler. Bu elemanlarda gerilme şekil değişim hızı ile orantılıdır ve şekil değişiminin kendinden bağımsızdır. Şekil 2.6 de sürünme, gevşeme ve dinamik sönüm olaylarının açıklanmasında kullanılan üç veya dört elemanlı viskoelastik modellerden önemli olanları toplu olarak gösterilmiştir. Bu modeller ve daha karmaşık olan diğer modeller son yıllarda geniş olarak araştırmalara konu olmaktadır [12].



Şekil 2.6 Viskoelastik modeller

Viskoelastik teori ilk olarak 19. yüzyılda Maxwell, Kelvin ve Boltzmann' ın elektrikli aletlerdeki kumaşın nonlineerliğini ve asfaltın elastik olmayan davranışını incelemeleri ile ortaya çıkmıştır. Bir lineer yay ve viskoz daşpotun seri bağlanması ile Maxwell modeli oluşturulmuştur (Şekil 2.6.c). Bu modelde yay ve daşpot (damper) aynı kuvvete maruz kalmakta, fakat sistemin toplam deformasyonu bu iki elemanın ayrı ayrı deformasyonlarının toplamına eşit olmaktadır. Toplam şekil değişim hızı

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}(\text{yay}) + \dot{\epsilon}(\text{damper})$$

$$\epsilon(t) = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{\sigma}{\eta} \quad (2.5)$$

olacaktır.

Bir sürünme deneyi veya probleminin analizinde gerilme sabittir ve $\sigma(t)$ yerine σ_0 yazılabilir. Bu değer yerine konup integrasyon yapılırsa

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma_0 t}{\eta} + \epsilon_0 \quad (2.6)$$

elde edilir.

Bu bağıntı bir Maxwell elemanının basamak yüke karşı sürünme cevabıdır ve Şekil 2.7.a da gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi daşpot yük uygulandığı sürece uzamaya devam eder. Yük kaldırıldığında yay hemen deformasyonu geri verir, oysa daşpotta bir toparlanma olmaz ve $\sigma_0 t_s / \eta$ ya eşit kalıcı bir deformasyon oluşur. 2.6 denkleminde görüleceği gibi $10\sigma_0$ a eşit bir gerilme t zamanı boyunca uygulandığı takdirde bunun neden olacağı birim uzama $1\sigma_0$ gerilmenin $10t$ süresince uygulanması sonucunda meydana gelecek birim uzama ile aynıdır. Bu durum ideal bir viskoelastik malzemede küçük kuvvetlerin uzun bir zaman içindeki etkisini açık olarak göstermektedir.

Uygulanan gerilme yerine birim uzama sabit tutulursa bu durumda gerilme veya kuvvet zamanla azalır. Bu olaya daha önce kısaca açıklandığı gibi gevşeme denir. Yine Maxwell modelini düşünecek olursak 2.5 denkleminde şekil değişim hızını sıfır olarak koyup gerilme ve zaman arasında eşitlik yeniden düzenlenirse

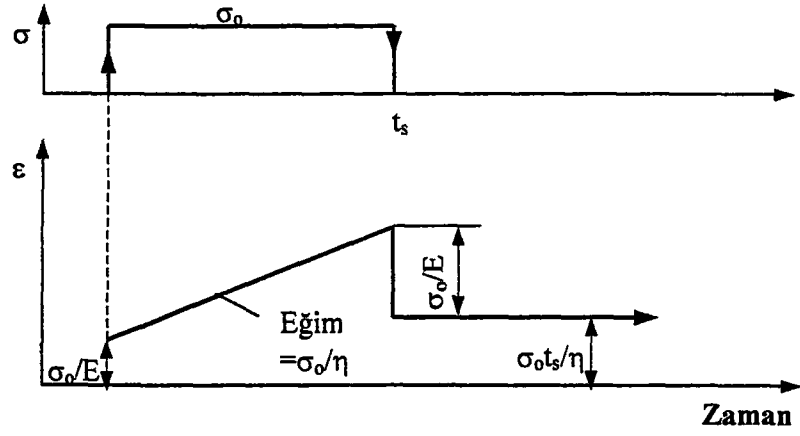
$$\frac{d\sigma}{\sigma} = -\frac{E}{\eta} dt \quad (2.7)$$

elde edilir. $\lambda = \eta/E$ tarifi yapıp integrasyon yapılırsa

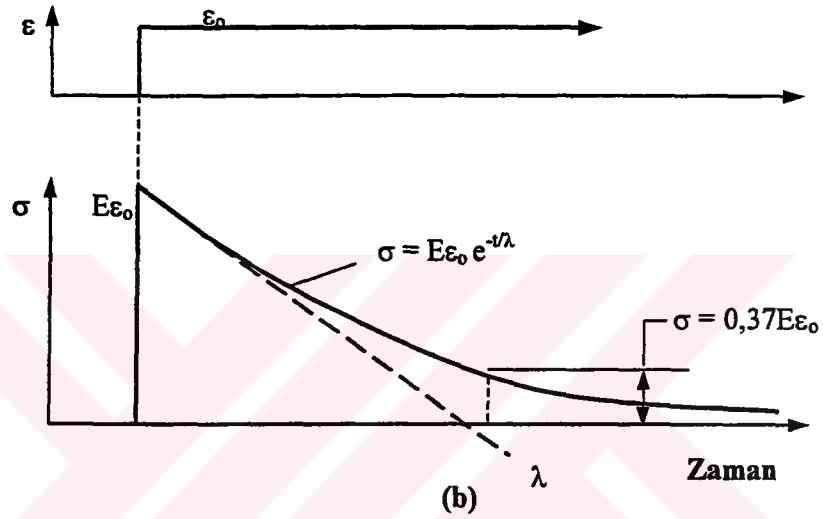
$$\sigma(t) = \sigma_0 e^{-t/\lambda} \quad (2.8)$$

sonucu bulunur.

Burada λ : gevşeme zamanı $\sigma_0 = E\epsilon_0$ başlangıç gerilmesidir. İdeal bir Maxwell elemanının gevşeme karakteristiği Şekil 2.7.b de gösterilmiştir. Gerçek polimerlerde gevşeme karakteristiği Maxwell elemanının karakteristiğine benzer olmakla birlikte tek bir E ve λ değeri için bu eğri tam olarak bu modele uymaz.



(a)



(b)

Şekil 2.7 Maxwell elemanının sürünme ve gevşeme cevabı

Bu aşamada bir modelin daha çözümünü vermek uygun olacaktır. Zener veya Standart lineer viskoelastik model için diferansiyel denklem aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\sigma(E_1 + E_2) + \eta \frac{d\sigma}{dt} = E_1 E_2 \varepsilon + E_1 \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (2.9)$$

Sürünme cevabı için $\sigma = \sigma_0$, ve $d\sigma/dt = 0$ değerleri yerine konur ve 2.9 denklemi çözülürse

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \left[\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \left(1 + \frac{t}{\lambda_c} \right) \right] \quad (2.10)$$

elde edilir. Burada $\lambda_c = \eta/E_2$ dir ve gecikme zamanı olarak tanımlanır.

Gevşeme cevabı için ise 2.9 denkleminde $\epsilon=\epsilon_0$ ve $d\epsilon/dt=0$ konarak çözüm yapılırsa

$$\sigma(t) = \epsilon_0 \left\{ E_1 - \left[\frac{E_1^2}{E_1 + E_2} (1 - e^{-t/\lambda_r}) \right] \right\} \quad (2.11)$$

bulunur. Burada $\lambda_r = \eta / (E_1 + E_2)$ dir ve gevşeme zamanı olarak adlandırılır.

2.4.1.1. Sürünme modülü, kompliansı ve gevşeme modülü

Sürünme modülü birim uzamanın sabit değil, zamana bağlı olduğu durumda elastiklik modülüne verilen isimdir.

Kısaca sürünme modülü $E(t) = \frac{\sigma}{\epsilon(t)}$ şeklinde yazılır. Sürünme kompliansı ise sürünme modülünün tersi olarak ifade edilir. Bu değer ise J ile gösterilir ve

$$J(t) = \frac{\epsilon(t)}{\sigma} \quad (2.12)$$

denklemini ile ifade edilir. Standart lineer viskoelastik model için sürünme kompliansı yazılacak olursa

$$J(t) = \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \left(1 - \frac{t}{\lambda_c} \right) \quad (2.13)$$

şeklini alır. Sürünme modülü sabit gerilme (σ_0) altında yapılan testlere dayanır. Sabit birim uzama (ϵ_0) testlerine dayanan gevşeme modülü ile karıştırılmamalıdır. Gevşeme modülü tarif olarak

$$E_g(t) = \frac{\sigma(t)}{\epsilon_{uygulan}} \quad (2.14)$$

şeklindedir. Gevşeme modülünün standart lineer viskoelastik model için değeri ise

$$E_g(t) = E_1 - \frac{E_1^2}{E_1 + E_2} (1 - e^{-t/\lambda_r}) \quad (2.15)$$

olur. $J(t)$ ve $E_g(t)$ ayrı birer malzeme özelliğidir. Bu iki özelliği birbirinin tersi şeklinde düşünmek yanlış olur.

Kalitatif olarak açıklamak gerekirse standart lineer viskoelastik modeldeki E_1 yayı makromolekül zincirindeki ana iskeletin (C atomlarının dizildiği) elastik

deformasyonunu temsil eder. Bu bağların uzayıp ksalmasını ve açısal hareketini de kapsar. Daşpot (η) ise zincirlerin dış kuvvet etkisinde birbirine girişimine yeniden düzenlenmeye karşı gösterdikleri direnci karakterize eder. Bu düzenlenme olayları anlık değil moleküler segmentlerin hareketleri sonucu zaman içinde aşamalar halinde gerçekleştiği için modelde daşpot kullanmak (gecikmeli cevap hali) daha doğru olacaktır. Bu modeldeki E_2 yayı ise zincir parçalarının termal titreşiminden kaynaklanan toparlanma kuvvetini (geri döndürme) temsil eder.

Şekil 2.6.h da gösterilen dört eleman modelinde ise standart lineer viskoelastik modele ilave olarak bir daşpot daha bulunmaktadır. Bu model viskoz akışın en önemli etki olduğu erimiş haldeki polimeri temsil etmek için kullanılır. Katı haldeki polimerin incelendiği durumda hesapları basitleştirmek için standart lineer viskoelastik model kullanılır. Dört eleman modelinin sürünme cevabı benzer hesaplamalar yapılarak

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma_o}{E_1} + \frac{\sigma_o}{E_2} (1 - e^{-t/\lambda_c}) + \frac{\sigma_o}{\eta_1} t \quad (2.16)$$

bulunur. Burada $\lambda_c = \eta_2/E_2$ dir. Sürünme deneyinin toparlanma aşamasında, yani $t=t_1$ anında uygulanan yük kaldırıldıktan sonra bu model için birim uzama

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma_o}{E_2} (1 - e^{-t/\lambda_c}) (1 - e^{-(t-t_1)/\lambda_c}) + \frac{\sigma_o}{\eta_1} t_1 \quad (2.17)$$

halini alır. Dört eleman ve standart lineer viskoelastik model arasında bir diğer farklılık ise standart lineer viskoelastik modelde sürünme uzaması zaman içinde tamamen geri verilir, oysa dört eleman modelindeki η_1 bu tam toparlanmayı önler.

Lineer viskoelastik teori sadece küçük deformasyonların söz konusu olduğu hallerde geçerlidir. Bu modelin kullanılabilmesi için sürünme kompliansının $J(t)$ gerilmeden bağımsız olması, başka bir deyişle $J(t)$ ile birim uzama arasında bir grafik çizilirse lineer viskoelastik sınırlar içinde bunun bir doğru olması gerekir. Bahsi geçen lineer bölgenin dışında ise polimer öngörülenden daha az sürünmeye uğrayacaktır.

2.5. Termal Özellikler

Polimerin özellikleri ve üretim yöntemi malzemenin erime sıcaklığı (T_m), camsı hale geçiş sıcaklığı (T_g), boyut stabilitesi, ısı iletkenliği, ısı geçirgenliği, özgül ısı, ısı

genleşme katsayısı ve bozulma (ayrışma) sıcaklığı (T_d) gibi termal özelliklerinden etkilenir. Tablo 2.1. de yukarıda bahsedilen özelliklerin sayısal değerleri bazı önemli polimerler için verilmiştir [13].

Bütün bu termal özellikler üründen istenen özelliklerin yerine getirilebilmesi için üretim tekniği ve parametrelerinin nasıl seçileceği hususunu etkiler.

Tablo 2.1 Bazı önemli polimerlerin termal özellikleri

Malzeme	Yoğunluk (gr/cm^3)	Erime Sıcaklığı (T_m , $^{\circ}\text{C}$)	Camsı hale geçiş sıcaklığı (T_g , $^{\circ}\text{C}$)	Isıl İletkenlik ($10^{-4}\text{cal/s.cm}^{\circ}\text{C}$)	Özgül Isı ($\text{cal/gr}^{\circ}\text{C}$)	Isıl Geç- irgenlik ($10^{-4}\text{cm}^2/\text{s}$)	Isıl genleşme katsayısı ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
PP	0,9	168	5	2,8	0,9	3,5	81
HDPE	0,96	134	-110	12	0,9	13,9	59
PTFE	2,2	330	-115	6	0,3	9,1	70
PA	1,13	260	50	5,8	0,075	6,8	80
PET	1,35	250	70	3,6	0,45	5,9	65
ABS	1,05	105	102	3	0,5	3,8	60
PS	1,05	100	90	3	0,5	5,7	50
PMMA	1,20	95	100	6	0,56	8,9	50
PC	1,20	266	150	4,7	0,5	7,8	68
PVC	1,35	199	90	5	0,6	6,2	50

2.5.1. Erime sıcaklığı (T_m)

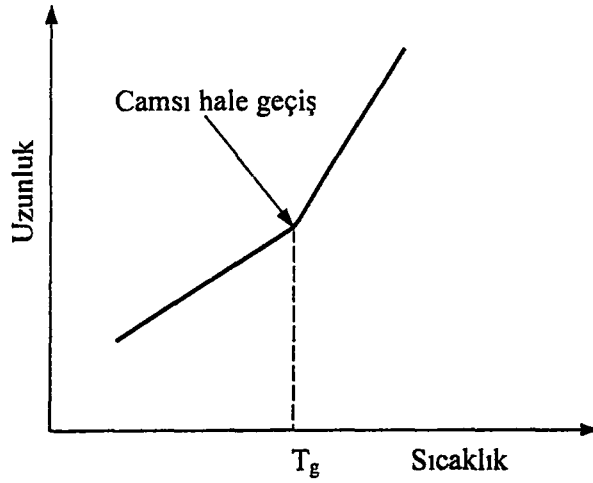
Kısmikristalin malzemelerde erime sıcaklığı belirgin bir değerdedir. Amorf malzemelerde ise belirgin bir erime sıcaklığı değeri yoktur, erime ısınma çevrimi ile birlikte başlar. Gerçekte erime sıcaklığı için tek bir değer yerine bir sıcaklık aralığı vermek daha doğrudur.

Erime sıcaklığı esas olarak üretim işlemi sırasındaki basınca ve sıcaklık altında geçen zamana bağlıdır. Bu durum özellikle nispeten kalın parçaların üretimi sırasında önemlidir. Erime sıcaklığı çok düşük ise erimiş hammaddenin viskozitesi yüksek olacaktır ve üretim işlemi için gerekli güç artacaktır. Viskozite çok yüksek olduğu takdirde işlem sırasında bir bozulma meydana gelecektir.

2.5.2. Camsı hale geçiş sıcaklığı (T_g)

Camsı hale geçiş sıcaklığı bu noktanın altında polimerin cam gibi davrandığı (sağlam ve rijit fakat kırılğan) sıcaklık değeri olarak tariflenir. Bu sıcaklığın üstünde ise polimer ne cam kadar sağlam ve rijit ne de kırılğandır. Bu sıcaklıkta polimerin hacmi

ve boyu artar (Şekil 2.8). Amorf termoplastiklerde bu sıcaklık değeri çok daha belirgindir [13].



Şekil 2.8 Camsı hale geçiş sıcaklığının termoplastiklerin hacmi ve uzunluğuna etkisi

Camsı hale geçiş genellikle küçük bir sıcaklık aralığında meydana gelir ve olay bir sıvının camsı hale katılaşmasına benzer şekildedir, fakat bir faz değişimi değildir. Bu sıcaklık bölgesinde malzemenin sadece sertlik ve kırılma değerlerinde hızlı bir değişim gözlenmez, bunun yanı sıra ısı genleşme katsayısı ve özgül ısı gibi diğer termal özelliklerde de bu değişim görülür.

Camsı hale geçiş sıcaklığı malzemenin elektriksel, mekanik ve diğer fiziksel özelliklerinde gözle görülür bir değişimin meydana geldiği sıcaklık değerini gözlemlemek sureti ile kolaylıkla tespit edilebilir. Buna ilave olarak, bu sıcaklık değeri hangi fiziksel özellik değerinin deneysel olarak gözlemlendiğine bağlı olarak büyük farklılıklar gösterebilir. Bu sebeple gözlemlere dayanan bu değerler tahmini değerlerdir. Bu sıcaklık değerinin nasıl tespit edileceği ilgili standartlarda belirtilmiştir.

Tablo 2.1. den de görüleceği gibi belli bir tip polimer için camsı hale geçiş sıcaklığı her zaman düşük bir sıcaklık olma durumunda değildir. Bu durum polimer malzemelerde gözlediğimiz bazı farklılıkları açıklamaktadır. Örnek vermek gerekirse, polistiren ve akrilik için oda sıcaklığı bunların camsı hale geçiş sıcaklığının altındadır. Bu sebeple biz bu malzemeleri camsı halde gözleriz. Bunun tersi olarak doğal kauçukta oda sıcaklığı camsı hale geçiş sıcaklığının ($T_g = -75^\circ\text{C}$) üzerindedir. Bunun sonucu olarak bu madde oda sıcaklığında oldukça esnektir.

Doğal kauçuk camsı hale geçiş sıcaklığının altında bir sıcaklığa kadar soğutulursa sert ve kırılğan hale gelir.

2.5.3. Boyut stabilitesi

Boyut stabilitesi polimerlerin büyük bir bölümü için oldukça önemli bir termal özelliktir. Polimerler belli bir sıcaklık değerinin üzerinde boyut stabilitelelerini kaybederler. Birçok polimer malzeme için bu sıcaklık değerini tayin eden ana unsur o malzemenin camsı hale geçiş sıcaklığıdır. Sadece yüksek kristaliniteye sahip polimerler için durum farklıdır.

2.5.4. Isıl iletkenlik ve yalıtım

Isıl iletkenlik bir malzemenin uzunluğu veya kalınlığı boyunca ısı enerjisini iletme oranıdır. ASTM standartlarında birim kütleye haiz bir polimerin sıcaklığını 1°C yükseltmek için ne kadar ısı verilmesi gerektiğine ait düzenlemeler vardır. Polimerler bir çok halde ısı yalıtımı amacı ile kullanıldıkları için bu oldukça önemli bir faktördür.

Genel olarak polimerlerin ısı iletkenliği kötüdür ve polimer malzemenin yapısı ısı iletim katsayısının değerini kayda değer bir oranda değiştirmez. Isıl iletkenliği arttırmak için en çok uygulanan yöntem polimer içine metalik dolgu veya cam elyafı katmaktır. Isı iletkenliğini azaltan bir etken ise köpüklenmedir.

2.5.5. Özgöl ısı

Birim kütleye haiz bir malzemenin özgöl ısısı bu malzemenin sıcaklığını 1°C arttırmak için gerekli enerji miktarıdır. Bu değer ya sabit basınçta veya sabit hacimde ölçülebilir. Sabit basınçta elde edilen özgöl ısı değeri sabit hacimde ölçülenden fazla ise bunun nedeni dış basınca karşı hacim değişimi oluşturmak için ilave enerjiye gereksinim duyulmasındandır. Amorf polimerlerin özgöl ısısı camsı hale geçiş sıcaklığının altında ve üstünde sıcaklıkla lineer bir şekilde artar, ancak T_g sıcaklığı civarında eğride bir süreksizlik oluşur. Bu süreksizlik kristalin polimerlerde gözlenmez. Özgöl ısı değerlerinin sıcaklığa duyarlı olması polimerleri diğer mühendislik malzemelerinden ayırır.

2.5.6. Isıl genleşme katsayısı

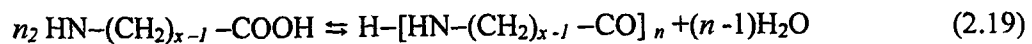
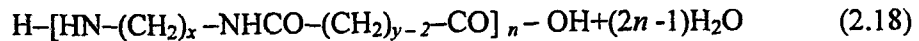
Metallerde olduğu gibi polimerlerde ısıtıldıkları zaman genişler soğutuldukları zaman büzülürler. Belli bir sıcaklık aralığı için termoplastikler metallerden daha fazla boyut değişimine uğrarlar. Tarif olarak ısı genleşme katsayısı sıcaklıktaki bir birim artış için söz konusu malzemenin boyutunda meydana gelen değişim miktarının orijinal boyuta oranıdır. Isıl genleşme katsayısı özellikle birbirine benzemeyen malzemelerden (polimer ve metal gibi) imal edilmiş makina elemanları birbirine monte edilecekse çok önem kazanır. Isıl genleşme katsayısı polimer ve kompozit malzemenin türünden, içine konan katkı maddesinin miktarından ve yönlenmesinden etkilenir.

2.5.7. Bozulma sıcaklığı

Düşük veya orta sıcaklık bölgelerinde çalışan sistemlerde bozulma sıcaklığı çok fazla öneme haiz olan bir parametre değildir. Bununla birlikte polimerden yapılmış makina elemanından yüksek sıcaklıkta boyut stabilitesi isteniyorsa bu değer önem kazanmaktadır. Bir polimerin bozulma sıcaklığı polimer içindeki elementlere ve bunların birbirine olan bağ kuvvetlerine, katkı, dolgu ve takviyelerin termal karakteristiklerine bağlıdır.

2.6. Poliamid

DuPont firması tarafından geliştirilmiş ve ticari ismi naylon olan poliamidler ilk mühendislik plastiğidir. En yaygın olarak kullanılanları Tablo 2.2 de verilmiştir. Tablo da aynı zamanda ilk PA 66 ve PA 6' dan beri geliştirilen yeni birkaç poliamid de görülmektedir. Üretici firmaların geliştirdiği poliamid çeşidi 1500 civarındadır. Tüm poliamid çeşitleri elyaf ve takviye malzemeler ile mekanik özellikler bakımından iyileştirilebilirler. Kristalin bir polimer olan poliamid kalıplama, ekstrüzyon, çözelti, kaplama ve döküm yoluyla imal edilebilir. Bir amin ve bir asidin reaksiyona girmesiyle elde edilen poliamidlerin kimyasal formülü aşağıda verilmiştir [10].



Önemli bir poliamid çeşidi dökülebilen poliamiddir. Polimerlerin bir çoğu ısı etkisi altında ve atmosfer basıncında döküm kalıbını doldurmak için yeterli akıcılığa sahip bir sıvı halini alamazlar. Bu nedenle kalıp boşluğuna yüksek basınç ile zorla sevk edilmeleri gerekir. Bu polimerlere ısı ve yüksek basıncın bir arada bulunduğu ekstrüzyon veya enjeksiyon yöntemleri uygulanır. Ancak poliamidin de aralarında bulunduğu bazı polimerler atmosfer basıncında dökülebilen sıvı kıvamında bulunabilirler. Dökülebilen poliamid, poliamid monomerlerinden elde edilir. Bu monomerlerden karmaşık şekilli ve ağırlıkları yüzlerce kilograma varan parçalar dökülebilir.

Tablo 2.2 Ticari Poliamidler

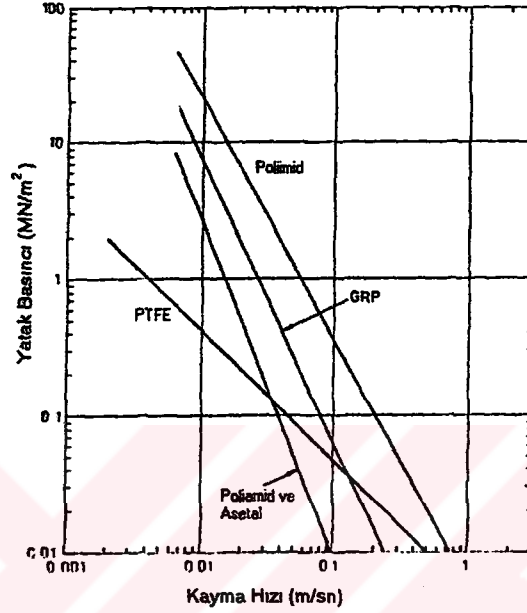
Yaygın ismi	PA
Poli(tetrametilen adipamid)	4/6
Poli(hekzametilen adipamid)	66
Poli(hekzametilen azelamid)	69
Poli(hekzametilen sebakamid)	610
Poli(hekzametilen dodekanoamid)	612
Poli(dodesametilen dodekanoamid)	1212
Poli(m-xylylene adipamid)	MXD6
Polikoprolaktam ya da polikaproamid	6
Poli(11-aminoandesanoamid)	11
polidodekanolaktam ya da polidodekanoamide	12

2.6.1. Sürtünme ve aşınma

Poliamid mükemmel sürtünme ve aşınma karakteristiğine sahiptir ve pek çok uygulamada yağlama yapılmaksızın kullanılır. Uygulanabilme aralığı yağ emdirilerek, elyaf veya dolgu takviyesi ile genişletilebilir. Genel olarak, sürtünme ve aşınma verileri ticari literatürde muhtemelen sürtünme ölçümlerinin zayıf yenilenebilme olasılığı nedeni ile yayınlanmamaktadır. Bu ölçümler donanım, sıcaklık, karşı yüzeyin pürüzlülük ve sertliği, basınç ve hızı kapsayan pek çok değişkene bağlıdır.

Yüzey basıncı ile çevre hızının çarpımı sonucu elde edilen $p \cdot v$ değeri kaymalı yatak malzemesi olarak kullanılacak polimerler için önemli bir parametredir. $p \cdot v$ (Basınç x Hız) limiti, yatak malzemesi için verilen bir hıza göre uygulanabilecek maksimum basıncın saptanması olarak verilir. Uygulanabilecek maksimum basıncı malzemenin dayanımı, maksimum hızı ise sıcaklık artışı sınırlar. Sınır değerlerin belirlenmesinde 100 saatte yüzeyden 25 μm malzemenin aşınma sonucu kaybolması esas alınmıştır

[7]. Şekil 2.18 de bazı polimerler için p_v sınır değerleri görülmektedir [8]. Çalışma şartları belirlenirken bu eğrilerin altında kalınmalıdır. Yatak yağlanırsa yada çalışma aralıklı ise p_v değerleri bu sınırların üzerinde alınabilir. Ayrıca çalışma sıcaklığı da p_v limiti sınırını düşürebilir. Tablo 2.3 de ise polimer/çelik temas durumu için statik ve dinamik sürtünme katsayısı ve p_v sınır değeri birkaç farklı poliamid için verilmiştir. Cam elyafı takviyesi ile sürtünme katsayısı artmakta fakat önemli derecede p_v limiti de artmaktadır [10].



Şekil 2.9 Bazı polimerlerin çeliğe karşı sürtünme durumundaki p_v limiti değerleri

Tablo 2.3 Çeliğe karşı poliamidin sürtünme katsayısı ve p_v limiti

Poliamid	Sürtünme Katsayısı		p_v limiti (0,5 m/sn)
	Statik	Dinamik	
PA 6	0,22	0,26	70
PA 66	0,20	0,28	85
PA 610	0,23	0,31	70
PA 612	0,24	0,31	70
PA 6+%30 Cam Elyafı	0,26	0,32	300
PA 66+%30 Cam Elyafı	0,25	0,31	350
PA 610+%30 Cam Elyafı	0,26	0,34	300
PA 612+%30 Cam Elyafı	0,27	0,33	280

2.6.2. Nem Alma Özelliği

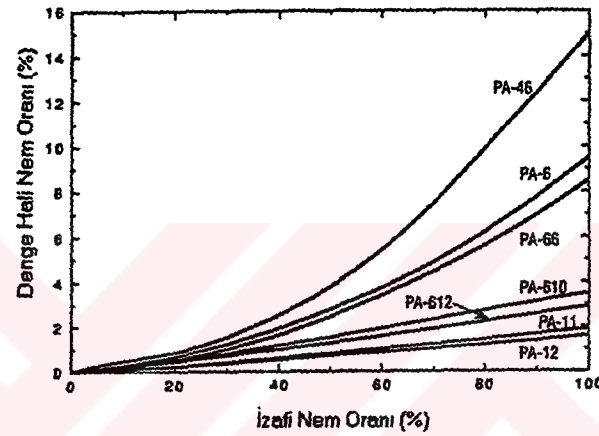
Nem alma özelliği polimerin içine su almasından dolayı ağırlık artış yüzdesi olarak tariflenir. 24 saat su içinde tutmak gibi standart deney teknikleri ilgili standartlarda tarif edilmiştir. Deneyler farklı sıcaklıklarda farklı zaman süreleri için de tatbik

edilebilmektedir. Sıvı olarak su kullanma zorunluluğu da yoktur. Nem alma özelliği polimerin mekanik, elektriksel özelliklerinin yanında boyutlarını da etkileyebileceği için oldukça önemli bir büyüklüktür. Nem alma oranları çok az olan polimerler boyut stabilitesi açısından diğerlerinden daha üstündürler.

Poliamidlerin su alması tersinirdir. Emilen suyun miktarı şunlara bağlıdır:

- İzafi nem oranı ve çevre sıcaklığı,
- Neme maruz kalma süresi,
- Poliamid tipi, kristalinitesi ve takviye veya dolgu maddeleri.

Nem alma hızı poliamidin cinsine, sıcaklığa, poliamidin kristalinitesine ve poliamid kesitinin kalınlığına bağlıdır.



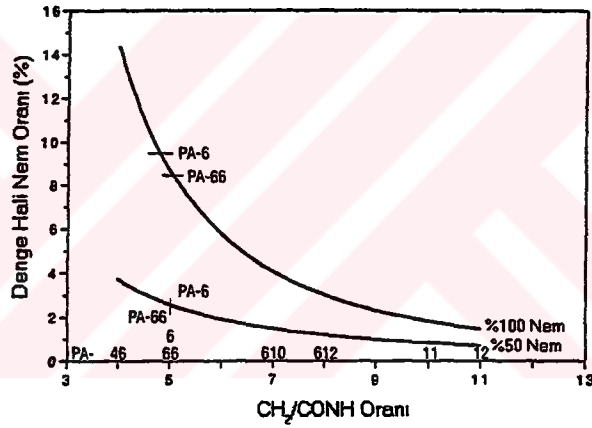
Şekil 2.10 Farklı izafi nem oranlarında denge hali nem oranı değişimi

Şekil 2.10 ve Tablo 2.4 izafi nem oranının bir fonksiyonu olarak farklı poliamid tiplerinin nem almada denge durumunu göstermektedir. Bu ve Şekil 2.11 deki veriler amid konsantrasyonu azaldıkça denge nem içeriğinin de memnun edici şekilde azaldığını göstermektedir. Verilen herhangi bir izafi nem oranı yüzdesine bağlı olarak nem almadaki azalmanın sonucu özellik değişimi daha az ve boyut kararlılığı daha yüksek olmaktadır. Denge nem içeriği, yüksek metil/amid poliamidler PA 11 ve PA 12 dışında sıcaklığa duyarlıdır. Örneğin, PA 11 23°C de % 100 RH (izafi nem oranı) ta %1,9 ve 100°C de %3,0 nem içerir. İlk yaklaşım olarak , dengeye ulaşma zamanı kalınlığın karesi ile doğru orantılıdır ve artan izafi nem oranı ile azalmaktadır. Bu, amidin yüzeye yakın yerlerde bir bariyer gibi davranması sonucu iç kesimlere doğru su hareketini engellemesi ile açıklanmaktadır. Desorpsiyonla (nemin dışarı verilmesi) nemin son kalıntılarının uzaklaştırılması zordur. Bu

durumda, yüzeye yakın yerlerdeki amid gruplarının kurutulması son nem kalıntılarının yüzeye yayılmasına izin verir [10].

Tablo 2.4 Poliamidin su alması

PA	23°C de Su Alma Yüzdesi		100°C
	%50 RH	%100 RH	
4/6	3,8	15,0	
66	2,5	8,5	
6	2,8	9,5	
69	1,8	4,5-5,0	
610	1,4	3,3	
612	1,2	3,0	
11	1,0	1,9	3,0
12	0,8	1,6	>1,6
6/6T	1,9	6,0	
6I/6T/PACMI/PACMT		5,8	
6I		6,0	
TMDT	3,0	7,0	
MXD6	1,9	5,8	



Şekil 2.11 Farklı metil/amid oranlarında denge hali nem oranı değişimi

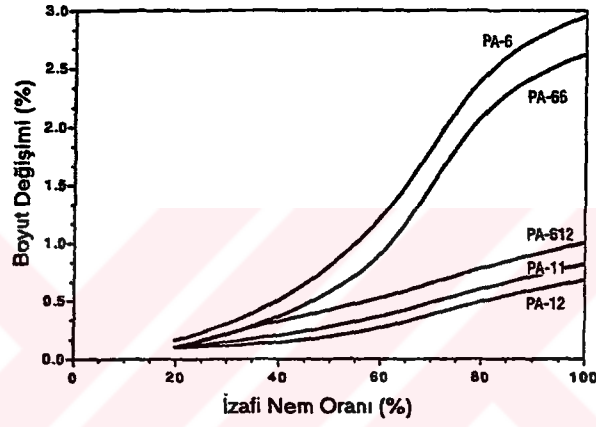
2.6.3. Boyut Kararlılığı

Farklı çevre şartlarına maruz kaldığında (nem oranı, sıcaklık vs. gibi) nem, çözücü emme, gerilme azalması (nem alma ya da sıcaklık nedeniyle) ve ısıl genleşme nedeniyle parçanın boyutlarında bir değişme meydana gelir. Boyut değişiminin miktarı poliamid, nem ve sıcaklığa bağlıdır.

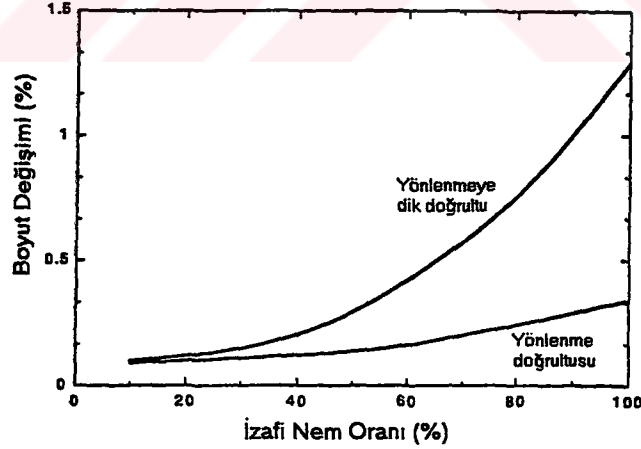
2.6.3.1. Poliamid cinsinin etkisi

Literatürde şartlar tam olarak belirtilmemekle birlikte Şekil 2.12 de muhtemelen ısıl bir işlem ile gerilme gidermesi yapılmış farklı poliamid parçalar için boyut

değişimleri, izafi nem oranının bir fonksiyonu olarak gösterilmektedir. Emilen nemin parçanın tümüne üniform olarak dağıldığı düşünülmektedir. Beklenildiği gibi yüksek metilen/amid oranına sahip poliamidler daha az nem alır ve herhangi bir izafi nem oranında daha az boyutsal değişime uğrar. Mineral dolgular, elyaf takviyesi, güçlendirici olarak hidrokarbon elastomerleri, alevlenme önleyici gibi hidrofobik malzemeler içeren poliamidlerde daha az su alma ve buna bağlı olarak daha az boyut değişimi görülür. Plastikleştirici ilave edilmiş reçinelerin davranışları, plastikleştiricinin suda eriyebilmesine ve maruz kaldığı suyun buhar mı yoksa sıvı mı olduğuna bağlı olarak değişir. Elyaf yönelmesi de bir faktördür. Nem alma sonucu yönelme yönünde olan boyut değişimi dik doğrultuda olana göre daha azdır. Bu farklılıklar % 33 cam elyaf takviyeli PA 66 için Şekil 2.13 de gösterilmiştir [10].



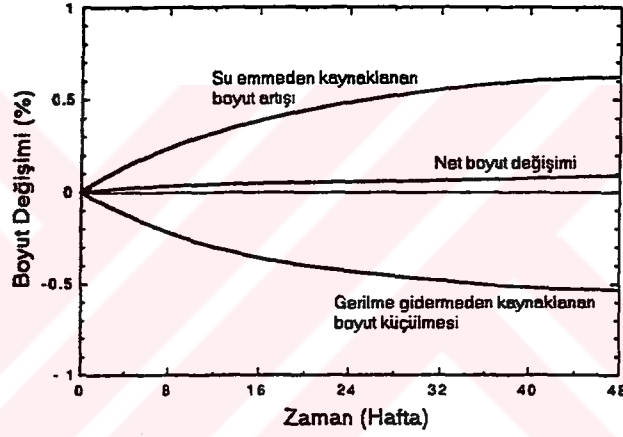
Şekil 2.12 20°C'deki farklı izafi nem oranlarında boyut değişimi



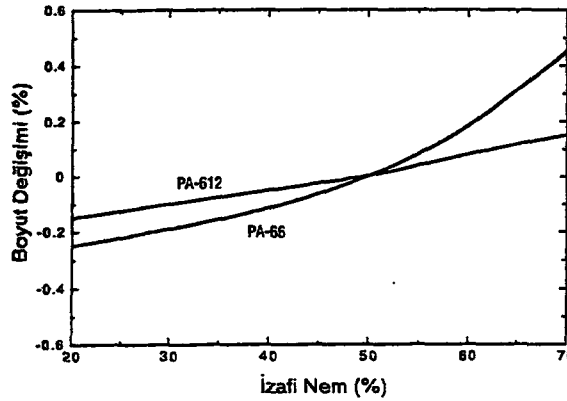
Şekil 2.13 3,2 mm kalınlığında %33 cam elyafı katkılı PA 66'nın farklı izafi nem oranındaki boyut değişimi

2.6.3.2. Nem ve sıcaklığın etkileri

Parçanın kalıplanması sürecinde poliamidin nem alması, gerilme azalmasından ve nem almadan dolayı genişlemesinin sonucu olarak boyut değişimine neden olur. Boyut değişimi parça kalınlığına ve kalıplama şartlarına bağlıdır. Bu iki zıt etki , Şekil 2.14 te PA 66 için gösterildiği gibi boyutta tek bir değişime neden olur. Bu değişim oldukça düşüktür. Örnek olarak 1 yıl boyunca % 50 RH, enjeksiyonla üretilmiş 3,2 mm kalınlığında bir PA 66 parçanın boyutundaki değişim % 0,1 den azdır. Bu örnek poliamidin dişli çark, bobin gibi kritik boyut gerektiren durumlarda neden başarıyla kullanıldığını açıklar. Nemdeki değişime bağlı olarak nem almada ya da nemin dışarı verilmesinde de değişiklik olur. Ancak nem alma/verme oranı (rate) oldukça düşüktür ve sonuç olarak boyuttaki değişimde küçüktür. Örneğin enjeksiyonla üretilmiş PA 66 parça % 50 RH da ($\pm$ % 10RH değişimi) dengeye ulaştığında boyutlarında % 0,4 ten daha az bir değişim olmaktadır (Şekil 2.15).

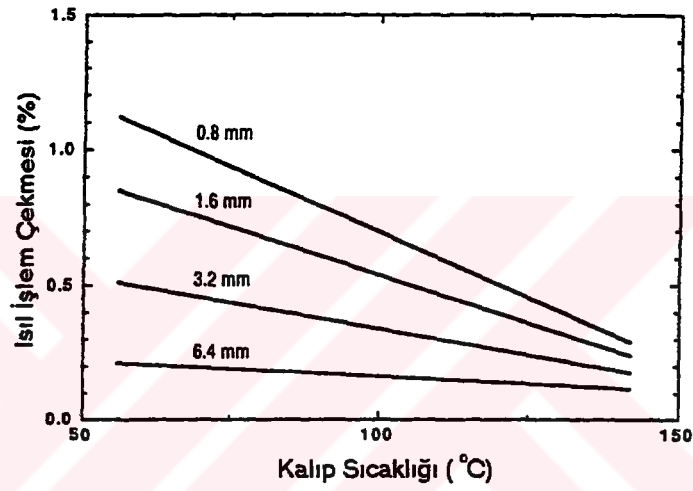


Şekil 2.14 3,2 mm kalınlığındaki PA 66 nın %50 izafi nemde ve 23°C de farklı neme maruz kalma sürelerindeki boyut değişimi

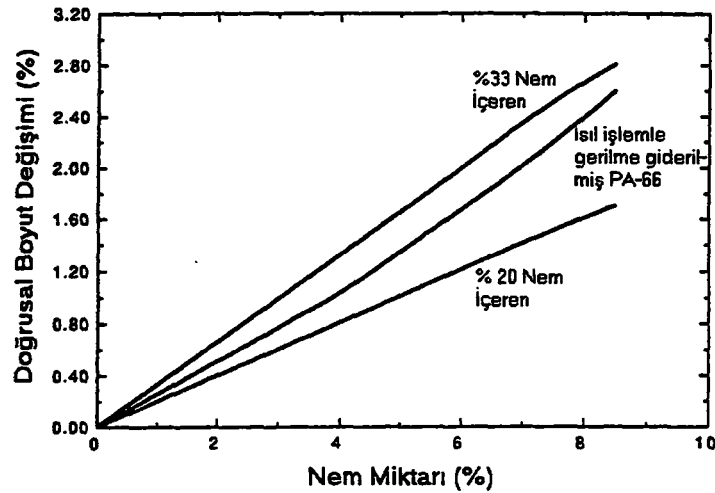


Şekil 2.15 Boyut değişimine izafi nemin etkisi

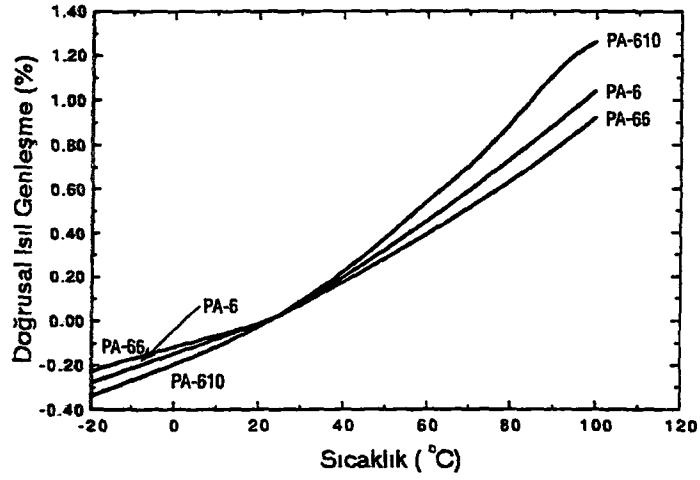
Yüksek sıcaklığa maruz kalan poliamidlerde gerilme azalması ve ısıtma işlemi sonucu çekme olur. Değişimin miktarı parçanın kalınlığına ve enjeksiyon sıcaklığına bağlıdır. Şekil 2.16 ısıtma işleminden kaynaklanan boyut değişimini göstermektedir. Isıtma işlemi görmüş parçalarda nem almadan kaynaklanan boyut değişimi Şekil 2.12 de gösterilmiştir. İlk bakışta, gerilmesiz bir parçada nem alma sonucu boyutlardaki doğrusal değişimin nem almış olan parçanın değişiminin yaklaşık 1/3 olduğu görülmektedir. Şekil 2.17 de hesaplanmış boyut değişimi, y eksenini gerilmesiz bir PA 66 boyutlarındaki gerçek değişimi ve x eksenini ise nem artışını gösteren bir grafik üzerinde verilmiştir. Poliamid parçalardaki boyut değişimi ısıtma genişlemenin bir sonucudur. Farklı poliamidlerin ısıya karşı doğrusal ısıtma genişlemesi Şekil 2.18 de sunulmuştur.



Şekil 2.16 PA 66'nın farklı kalıp sıcaklıklarında ısıtma işlemi çekmesi



Şekil 2.17 PA 66'nın farklı nem miktarlarındaki doğrusal boyut değişimleri



Şekil 2.18 Bazı poliamid türleri için farklı sıcaklıklardaki doğrusal ısı genleşmesi

Tablo 2.5. ve Tablo 2.6. da verilen doğrusal ısı genleşme katsayıları aşağıda belirtilen sonuçları ortaya çıkarmaktadır.

- Doğrusal ısı genleşme katsayıları sıcaklığa bağlıdır. Test numunesindeki nem, poliamidin ısı genleşme katsayısını etkilemektedir. Örneğin PA 66'nın genleşme katsayısı $8,1 \times 10^{-5}/K$ iken bu değer doymuş PA 66 için $11,71 \times 10^{-5}/K$ dir.
- Cam elyaf takviyeli poliamidlerin doğrusal ısı genleşme katsayısı anizotropiktir. Örneğin %30 ile %33 Cam elyaf takviyeli PA 66'nın yönlenme doğrultusundaki katsayısı dik doğrultudaki katsayının yaklaşık 1/3'dür.

Tablo 2.5 Doğrusal ısı genleşme katsayısına sıcaklığın etkisi

Sıcaklık °C	Doğrusal Isıl Genleşme Katsayısı $E^{-5} \times E^{-1}$		
	PA 66	PA 612	PA 11
-40	6.3	7.2	9
0	7.2	8.1	9
23	8.1	9.0	9
50			9
77	9.0	10.8	21
150			21

Tablo 2.6 Poliamidlerin ısı genleşme katsayısı

PA	Cam Elyaf Yüzdesi	Doğrusal Isıl Genleşme Katsayısı E -5 x E ⁻¹	
		Akış Doğrultusu	Dik Doğrultu
4/6	0	8.4	
4/6	30	3.4	6.3
6	0	8.5	
6	30	2.3	6.5
66	0	8.5	
66	30	2.4	7.3
69	0	8.1	
610	0	9.0	
612	0	9.0	
612	33	2.3	
11	0	9	
11	30	3	
12	0	11	
12	30	3	
6I/6T/PACMI/PACMT	0	6.2	
6I	0	6.5	
TMDT	0	6.0	
MXD6	0	5.1	

2.6.4. Ticari poliamidler ve uygulama alanları

Burada sadece çalışmada kullanılan poliamid türlerinin genel olarak özellikleri ve kullanım yerleri üzerinde durulacak, diğer poliamid türleri çok hacim tutacağı için burada verilmeyecektir.

2.6.4.1. Poliamid 66

Ticari olarak bulunabilen tüm poliamid polimerler içinde en dayanıklısı olarak bilinen PA 66 en yüksek erime noktasına sahip olanıdır. 264 °C' de eriyen PA 66'nın sürekli kullanım sıcaklığı 120 °C' dir. Kısmikristalin bir yapıya sahip olması nedeni ile PA 66'dan yapılan parçaların bazı bölümleri kristal bir yapı arz ederken diğer bölümlerinde amorf bir yapı gözlenmektedir. İmalat şartları değiştirilerek kristalinite miktarı arttırılıp azaltılabilir, böylece mekanik özellikleri değiştirilebilir. Poliamid 66 ya PTFE, MoS₂ ve grafit katılarak özellikleri daha da iyileştirilebilir. Su alma özelliğinden dolayı üretim sırasında dikkatli olunması gereklidir; ancak daha sonra bitmiş parçaların su alma sağlanırsa basma dayanımlarının artacağı görülür. Parça, suyu havanın neminden elde edebilir; ancak bu çok yavaş bir prosestir ve genellikle 60°C' deki sıcak suya daldırarak işlem hızlandırılabilir .

PA 66 çok yüksek eğilme ve çekme dayanımına ve yüksek darbe dayanımına, düşük sürtünme katsayısına sahiptir ve yük altında çalışmaya en uygun malzemelerden biridir. Alkalilere ve birçok organik solvante dayanıklı olan PA 66 özellikle yüksek sıcaklıklarda kuvvetli asitlere hiç dayanıklı değildir. PA 66, su buharı haricinde, birçok gazı karşı çok düşük geçirgenliğe sahip olduğu için zaman zaman gaz geçişini engelleme amacıyla da kullanılmaktadır.

80 °C' ta oksijen ortamında tüm poliamidler zaman içinde kırılgan hale gelirler. Aynı etkiye UV ışınları da neden olabilmektedir. Bu problemi gidermek için cam elyafı ya da UV stabilizatörlü tipleri kullanılmaktadır.

Isıya maruz kalan PA 66 parçanın performansı, PA 66 nın reçine kalitesine, parça geometrisine, ısı kaynağının yapısına ve mekanik yükleme durumuna bağlıdır. Sonuç olarak parçanın ısıl deformasyon direnci standartlaştırılmış karşılaştırma deneylerinden tahmin edilemez. Örneğin, ağır silahların mermi kovanının çevresindeki PA 66 1000°C nin üzerindeki ateşleme sıcaklığına maruz kalabilir. Ancak maruz kaldığı süre az olduğu için kesinlikle deforme olmaz. Saf PA 66 elektriksel uygulamalarda geniş ölçüde kullanılır ve aşırı yüklenmeden yada elektrik arkından kaynaklanan kısa süreli sıcaklık değişimlerine dayanabilir.

Sıcaklık ve kimyasal direnç, mukavemet ve işlenebilirlik özellikleri birleşince PA 66 otomotiv sektörü için oldukça iyi bir malzeme olmaktadır. Metal parçaların yerine polimer içeren daha az maliyetli ve daha hafif sistemlerin kullanılma eğilimi hızla artmaktadır. Son yıllarda , radyatör tanklarının çoğunda kullanılan pirinç yerine cam elyaf takviyeli PA 66 kullanılmaya başlanmıştır. Grafit takviyeli PA 66 emme manifoldu ve yakıt yollarında kullanılmaktadır. Ayrıca gaz teli kılavuzlanmasında, vites değiştirme sistemlerindeki kılavuzlamalarda, kilometre göstergelerindeki transmisyon sistemlerinde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlar özellikle aşınmaya maruz kalan parçalar olduğu için çalışmanın ilgi alanına girmektedir.

Özellikle otomotiv sektöründeki uygulamalarda PA 66 parçaların sıcaklığı 70°C kadar yükselebilmektedir. Buda yapılan çalışmanın sıcaklık sınırlarını belirlemede önemli bir parametre olarak düşünülmüştür.

MoS₂ yada PTFE katkılı PA 66 ve cam elyaf takviyeli PA 66 geniş olarak dişli çarklar, makaralar ve avara kasnaklar, düşük sürtünme direnci, eğilme yorulmasına karşı dayanım ve boyut kararlılığı gerektiren yatak burçlarında kullanılır. Saf PA 66

düşük sürtünme istenen, korozyon istenmeyen somunlar, cıvatalar, pimler, demiryolu izolatör yastıkları ve spreyağızlıklarında kullanılır. Takviyelendirilmiş ürünler tokluk rijitlik ve abrazyona karşı direnç istenen kepçeli elevator kovalarında giderek artan şekilde kullanılmaktadır. Ayrıca takviyeli PA 66 da zincir ve konveyör bandı bağlantılarında, fan kanatlarında, pompa çarklarında, sulama fiskiyelerinde, pompa gövdelerinde, boru bağlantılarında, pencere doğraması izolasyonunda ve manometre gövdelerinde yaygın bir kullanım alanı bulmaktadır.

2.6.4.2. Poliamid 6

PA 6 molekül ağırlığı 8.000 ile 100.000 gr/mol arasında değişen yüksek kristaliniteye sahip, nem aktivitesi düşük, döküm yöntemi ile de imal edilebilen sentetik bir termoplastik olup, naylon türlerinin içinde mekanik ve fiziksel özellikleri açısından en iyi olanıdır.

PA 6 molekül ağırlığı ve yapısından dolayı darbe dayanımı yüksek olup, aşınma ve darbe dayanımının çok yüksek, nem aktivitesinin düşük olması gereken uygulamalarda tercih edilir.

Sistemin sürtünme ve aşınma özellikleri, malzeme çifti, yüzeylerin pürüzlülüğü, temas geometrisi, ara yüzeyde yağlayıcı olup olmaması, yük, hız ve sıcaklık gibi pek çok parametreye bağlıdır. PA 6'nın sürtünme katsayısı ve aşınma miktarını etkileyen ana faktörler, malzeme çiftinin yüzey pürüzlülüğü ve sertlik, uygulanan basınç, temas yolunun uzunluğu, sürtünen yüzeylerin sıcaklığı ve yağlama durumudur. Buna göre PA 6 mamuller yatak, dişli, aşınma plakaları, birleştirme parçaları, silindirler vb. parçaların yapımına uygun olup, pirinç, bronz, çelik, paslanmaz çelik yerine gereken durumlarda tercih edilir.

Düşük ve normal kayma hızlarında, toz, kum ve benzeri bulunan aşındırıcı ortamlarda bu polimerin çalışma ömrü, döküm, demir, bronz ve çelikten 2-10 kat daha fazladır. PA 6 zayıf asidik ve bazik kimyasallara ve organik çözücülere dayanıklıdır.

PA 6 yarı mamul olarak, levha, kütük şeklinde temin edilebilir. Normal tahta, metal tezgahlarda kolaylıkla işlenebilir. Tornada işlenirken yüksek devir kullanılması (minimum 150 m/dak.) ile temiz ve pürüzsüz yüzey elde etmek mümkündür. Bıçaklar keskin ve işleme uygun olmalıdır. Keskin spiral uçları kullanılarak kolaylıkla delinebilir. Uç açısı 115° ve helis açısı 10-20° olan matkap uçlarının

kullanılması tavsiye edilir. Yumuşak metaller için kullanılan standart freze bıçakları PA 6 işlemek için yeterlidir. Özel kesicilerle temiz yüzeyler elde etmek mümkündür. Tüm bıçakların çok keskin olmasına özen gösterilmelidir.

PA 6, sert ve sağlam bir malzeme olması nedeniyle birçok sanayi dalına hizmet vermektedir. Bunlar arasında makina konstrüksiyonu, elle ve mekanik taşıma, inşaat makinaları, paketlenme ve doldurma üniteleri, tekstil makinaları, gemi imalatı, otomotiv sanayii, madencilik, gıda sanayii, tıbbi cihazlar sayılabilir.

Bu sanayi kollarında çeşitli silindirler, ip gericiler, ip olukları, kılavuz ve burçlu kaymalı yataklar, yatak segmanları, sevk yatakları, kayar bloklar ve plakalar, aşınma şeritleri, koruma şeritleri, mil dirsekleri, konik ve alın dişli çarklar, sonsuz vida, vana yatakları, kesme ve basma plakları, seramik ve beton kalıplar ve benzer birçok eleman olarak kullanılırlar .

Elektrik endüstrisinde ise elektrik fişi, açma kapama düğmeleri, bobinler ve iletkenlerde kullanılır. Tokluk, aşınma ve ısı direnci bu alanlarda önemli bir faktördür. Ayrıca çok iyi benzin direnci nedeniyle yakıt tankı olarak kullanılabilmektedir.

2.6.4.3. Döküm poliamid 6

Döküm poliamid 6 yüksek elastiklik modülü, iyi aşınma dayanımı, iyi kimyasal dayanım, iyi hava direnci, yüksek erime sıcaklığı gibi özellikleri nedeni ile çok geniş bir uygulama alanına sahiptir. Mekanik ve kimyasal özelliklerinin yanı sıra üretim tekniği de döküm poliamidin tercih edilme nedeni olarak düşünülebilir. Döküm metodu ile üretilen döküm PA 6 parçaların mekanik mukavemetleri, enjeksiyon ve ekstrüzyon ile üretilen diğer poliamid parçalara göre çok daha üstündür.

Yarı mamul parçaların şekli stoklanacak haldedir. PA 6 ve kopolimerleri standart kesme takımlarıyla planyalama, tornalama, frezeleme, delik delme gibi talaşlı imalat yöntemleri ile işlenebilirler. İşleme sırasında yumuşama ve yüzey pürüzlülüğünün neden olabileceği aşırı ısı yükselmesini engellemek için yağlama yapılmalıdır.

Hafiflik, iyi abrazyon direnci, kavitasyon dayanımı, ses ve titreşim sönümlemesi daha önce belirtilen pek çok nedenle de döküm PA 6 transportta ve endüstri uygulamalarında geniş ölçüde kullanılmaktadır.

Teknelerin itki pervanelerinin kanatlarında, dümenlerinde kullanılmaktadır. Konteyner, mobil vinçlerde kasnak olarak kullanılmaktadır. Döküm PA 6 kasnaklar ölü ağırlığı azaltır, vincin kararlılığını artırır ve daha büyük yüklerin kaldırılmasına olanak sağlar. Kasnakların çapları 250 mm ile 1250 mm arasındadır. Sürünme olayı bu kasnaklar tasarlanırken dikkate alınmalıdır. Ayrıca boru bağlantılarında sızdırmazlık elemanı olarak da kullanılır.

2.6.4.4. Poliamid 4/6

Son yıllarda yüksek ısı ve kimyasal dayanımlı termoplastiklere duyulan ihtiyaç artmaktadır. Bu ihtiyaç poliamid 4/6'nın geliştirilmesine neden olmuştur. PA 4/6'nın erime sıcaklığı 295°C'dir. PA 4/6'nın kristalinite derecesinin yüksekliği ve yüksek sıcaklık dayanımı geniş bir sıcaklık aralığında sertliğini korumasına neden olur. Aynı zamanda iyi bir sürünme dayanımına, diğer poliamidler gibi çok iyi abrazyon direncine ve düşük sürtünme katsayısına da sahiptir. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda diğer polimerlerden daha iyi performans göstermektedir. Bu özellikleri nedeni ile dişli çarklar, yatak kafesleri gibi yerlerde kullanılır. Çalışma sıcaklığının 100°C üzerinde olması istenen yerlerde kullanılır.

Otomotiv sektöründe transmisyonlarda, kavramalarda, emisyon kontrol ünitelerinde, kablo yuvalarında, hidrolik kontrol ünitelerinde, dişli kutularında, conta ve diğer otomatik ve manuel iletim elemanlarında kullanılır.

Elektrik/Elektronik endüstrisinde motorlarda ve devre anahtarlarında kullanılırlar. Aşırı yüklenme ve kısa devre gibi durumlarda devre anahtarlarındaki sıcaklık 150°C'ye çıkmakta ve hatta ani sıcaklık yükselmeleri 300°C kadar olabilmektedir. Yüksek sıcaklık aynı zamanda iletkenler ve rölelerde de oluşabilir. Bu nedenle bobinlerde, ısı kalkanlarında ve buna benzer diğer aygıtlarda kullanılır. Oda sıcaklığındaki darbe dayanımı ve yüksek sıcaklıklardaki sürünme dayanımı bobinler için yaygın bir gerekliliktir. Elektrik motorlarındaki sıcaklık normalde yüksek değildir, fakat yüksek bir ısınma rotorun bloke olduğu durumlarda meydana gelebilir. Isıl dayanımlı PA 4/6 fırça tutucuları, dişli çarklar gibi motor parçalarında kullanılırlar.

3.SÜRTÜNME ve AŞINMA

Sürtünme, aşınma, yağlama konularını ve bunlara bağlı olayları inceleyen bilim dalına triboloji veya triboteknik adı verilir. Yapılan bazı incelemeler dünyada üretilen enerjinin 1/3 nün sürtünme sonunda harcandığını göstermektedir. Yine dünya çapında yapılan istatistiklere göre makina elemanlarının %70'inin işe yaramaz hale gelmesinin nedeni aşınmadır. Almanya'da yayınlanan bir rapora göre sürtünme ve aşınma kayıpları yaklaşık gayri safi milli hasılanın %4,5'una ulaşmıştır. Örneğin, büyük bir entegre çelik tesisinde (yıllık üretim kapasitesi 10-15 milyon ton) çeşitli tip aşınmaların tesis kuruluş maliyetine %10-15 kadar ek bir harcama getirdiği hesaplanmaktadır.

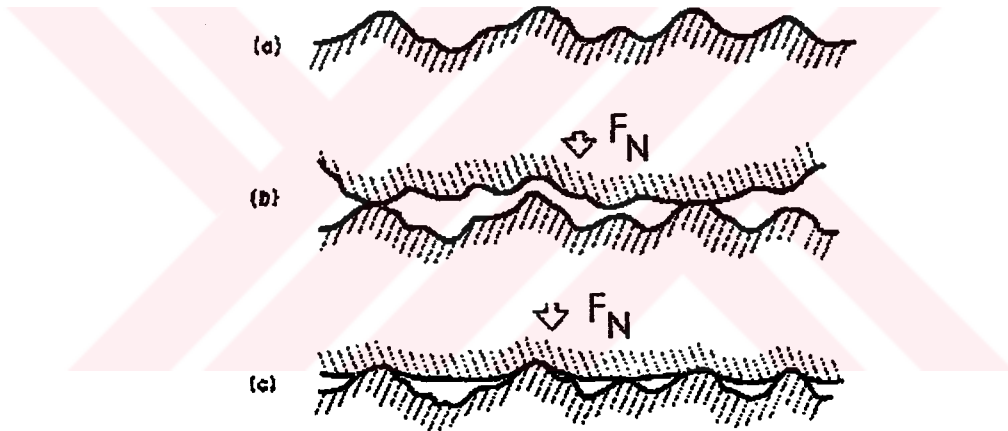
Birbirine temas eden ve birbirine nazaran kayma veya yuvarlanma hareketi yapan iki fonksiyon yüzeyi arasında genel olarak bir sürtünme ve aşınma hali mevcuttur. Şüphesiz ki bunların sayısal değerleri bazen çok küçük olabilir, fakat pratik olarak daima mevcuttur. Sürtünme ve aşınma olayları çok eski tarihlerden itibaren gözlenen ve azaltılmaları için tedbirler aranan konulardır. Sürtünme üzerindeki çalışmalara paralel olarak ve genellikle bundan bağımsız aşınma olayı üzerinde de yoğun çalışmalar yapılmıştır. Ancak yüzey çiftleri arasındaki aşınma pek çok faktöre bağlı karmaşık bir yapıdadır. Çevre ve deney şartlarındaki ufak değişiklikler aşınma mekanizmasında büyük değişiklikler meydana getirecektir. Temas yüzeylerindeki malzeme kaybında kimyasal ve fiziksel etkiler yan yana bulunmaktadır. Aşınma üzerindeki sistematik incelemeler daha ziyade son yıllarda ağırlık kazanmıştır. Artan hızlar ve özgül yükler, makinaların güvenilirlik ve ömür koşullarının dar toleranslara sokulması, aşınmanın sınırlandırılması ve kontrol altında tutulmasını gerektirmektedir. Günümüzde aşınma, sürtünme ve bunlarla ilgili olarak yağlama en önemli boyutlandırma kriter ve parametrelerinin içine girmektedir. Değişik problemler farklı çözümlerin bulunmasını gerektirir. Triboteknik problemlerle karşılaşılmayan hiçbir makina yoktur. Bu nedenle sürtünme-aşınma-yaglama üzerinde daha ayrıntılı olarak durulması ve bunlar arasındaki ilişkilerin bütünleştirici bir görüşle ele alınması büyük bir önem taşımaktadır.

3.1. Yüzeylerin Yapısı

Herhangi bir katı cismin yüzeyi elektron mikroskobu ile incelendiğinde yüzeylerin düz olmadığı, Şekil 3.1.a' da görüldüğü gibi girinti ve çıkıntılardan oluştuğu gözlenebilir. Eğer bu profil işlemeden sonra bir metal parçanın yüzeyini temsil ederse ve ikinci bir metal parça F_N kuvveti altında bununla temas ettirilirse pürüz tepecikleri arasında fiziksel temas en az üç noktada olur. A_i i. Temas noktasında meydana gelen temas alanını göstermek üzere ve p_i temas alanındaki lokal basınç değeri ise, bu takdirde,

$$F_N = \sum_{i=1}^M A_i p_i \quad (3.1)$$

yazılabilir. Burada F_N iki katı cismi birbirine bastıran normal kuvvet olup $M \geq 3$ dir. Bu durum Şekil 3.1.b' de görülmektedir.



Şekil 3.1 Yüzeylerin yapısı

İki metal yüzey arasında temas başladıktan sonra lokal temas noktaları F_N yükünü taşımak için çok küçük kalır ve yüzey basıncı çok büyük değerlere ulaşır. Sonuç olarak, yüksek pürüz tepeciklerindeki basınç hızla artarak yumuşak malzemenin akma sınırı p^* ı geçer. Bu durumda yük, akma sınırının aşıldığı yüksek pürüz tepecikleri ve hala elastik bölgede basınç altında olan nispeten daha küçük pürüz tepecikleri tarafından taşınır. Bu durum aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir:

$$F_N = p^* \sum_{i=1}^{M_1} A_i + \sum_{j=M_1}^{M_2} p_j A_j \quad (3.2)$$

Elastik temas olan bölgelerin alanlarının toplamı plastik temasta bulunan alan toplamına göre oldukça küçük olduğu için ihmal edilebilir, böylece yukarıdaki eşitlik şu şekilde yazılabilir:

$$F_N = p^* \sum_{i=1}^{M_1} A_i = p^* A_{\text{gerçek}} \quad (3.3)$$

Pürüz tepeciklerindeki plastik akma, temas noktalarındaki alanları sıfırdan (noktasal temas) belirli bir değere kadar artırır ve toplam temas alanı $A_{\text{gerçek}}$ uygulanan F_N kuvveti karşılancaya kadar değişir.

F_N kuvveti arttıkça bununla orantılı olarak $A_{\text{gerçek}}$ toplam temas alanı da artacaktır. Aynı zamanda temas halinde bulunan pürüz tepeciklerinin sayısı M de artacaktır; ayrıca bu durumda ortalama temas alanının ($A_{\text{gerçek}}/M$) sabit kaldığı deneysel olarak gösterilmiştir. Bu durum kuvvet arttıkça temasta olmayan bazı küçük pürüz tepeciklerinin de temas haline geçmesi ile açıklanabilir.

Şekil 3.1.a' daki profilin F_N normal kuvveti altında elastomer esaslı bir malzeme ile temas halinde bulunan bir metal yüzey olduğu varsayılırsa Şekil 3.1.c' deki benzer bir temas durumu ortaya çıkar. Elastomer malzeme metal malzemenin pürüz tepecikleri üzerinde şekil değiştirerek bunları kaplar. Bunun sonucunda elastomer ile karşı yüzeyin temas bölgesinde bir basınç alanı oluşur. Elastomer esaslı malzemenin temas halinde bulunduğu rijit pürüz tepelerinin yarı küre şeklinde olduğu farz edilirse Hertz teorisine göre

$$A_{\text{gerçek}} = K_1 F_N^{2/3} \quad (3.4)$$

yazılabilir. Burada K_1 bir sabittir. Böylece elastik temas halinde gerçek temas alanının uygulanan yükün $2/3$. cü kuvveti ile değiştiği, oysa plastik temas halinde bu alanın uygulanan yük ile doğru orantılı olduğu görülür.

3.2. Sürtünme Mekanizmaları

Birbirlerine göre izafi hareket halinde bulunan kuru yüzeyler arasındaki sürtünmeyi iki temel faktör etkiler. Birincisi, genellikle daha önemli olanı, gerçek temas

bölgesinde ortaya çıkan adhezyon, ikincisi ise deformasyondur. Eğer bu iki faktörün birbirini etkilemediği farz edilirse sürtünme kuvvetinin iki farklı bileşenden oluştuğu varsayılarak aşağıdaki bağıntı yazılabilir:

$$F_s = F_{\text{adhezyon}} + F_{\text{deformasyon}} \quad (3.5)$$

Burada F_s sürtünme kuvvetidir. (3.5) denklemini etkileyen normal kuvvete bölünürse, μ sürtünme katsayısını göstermek üzere

$$\mu = \mu_A + \mu_D \quad (3.6)$$

elde edilir. A ve D indeksleri sırası ile adhezyon ve deformasyon terimlerini temsil etmektedir.

Deney koşullarını dikkatlice oluşturarak adhezyon ve deformasyondan kaynaklanan sürtünme dirençlerini büyük bir yaklaşıklıkla ayırmak mümkündür. Optik seviyede düz yüzeylerin elde edilmesi ile pürüzlülük özelliği minimuma indirilebilir bu takdirde deformasyon teriminin sürtünme katsayısına etkisi ihmal edilebilir. Bu durumda ölçülen sürtünme katsayısı büyük ölçüde adhezyondan kaynaklanacaktır. Bunun tersi olarak, birbirine göre izafi hareket eden iki yüzey arasına bir yağlayıcı madde konursa bu da adhezyon teriminin etkisini pratik olarak ortadan kaldırır. Bu durumda ölçülen sürtünme katsayısı ise yaklaşık olarak deformasyondan kaynaklanan sürtünme katsayısıdır. Adhezyon ve deformasyon terimlerini oluşturan fiziksel mekanizma metaller ve elastomerler için oldukça farklıdır [3]. Polimer malzemelerin sürtünme mekanizması için ise polimerin türüne, sıcaklığa bağlı olarak kesin bir ayırım yapmak pek mümkün değildir. Çalışmanın yapıldığı sıcaklıklar söz konusu malzeme için oldukça yüksek değerdedir. Bu sıcaklıklarda malzemenin elastik bir katı cisimden çok bir elastomer gibi davranabileceği de göz önüne alınmalıdır. Bu nedenle bu kısımda elastomer malzemelerin sürtünme mekanizmasından bahsetmek faydalı olacaktır.

3.3. Elastomer Malzemelerin Sürtünmesi

Şekil 3.2 kaba pürüzleri olan bir rijit yüzey ile buna F_N normal kuvveti ile bastırılan bir elastomerin temas durumunu göstermektedir. Genellikle elastomer, rijit malzemenin kaba pürüz tepecikleri üzerinde şekil değiştirerek bunları çevresel olarak

kaplar ve bu temas bölgelerinde bir basınç alanı meydana gelir. Bu temas bölgelerinin toplamının karşıladığı normal kuvvet

$$F_N = \sum_{i=1}^M A_i p_i = \bar{p} A \quad (3.7)$$

şeklinde hesaplanabilir. Burada $\bar{p}$ pürüz tepeciği başına ortalama basınç ve A ise

$$A = KM(\bar{p}/E)^n \quad (3.8)$$

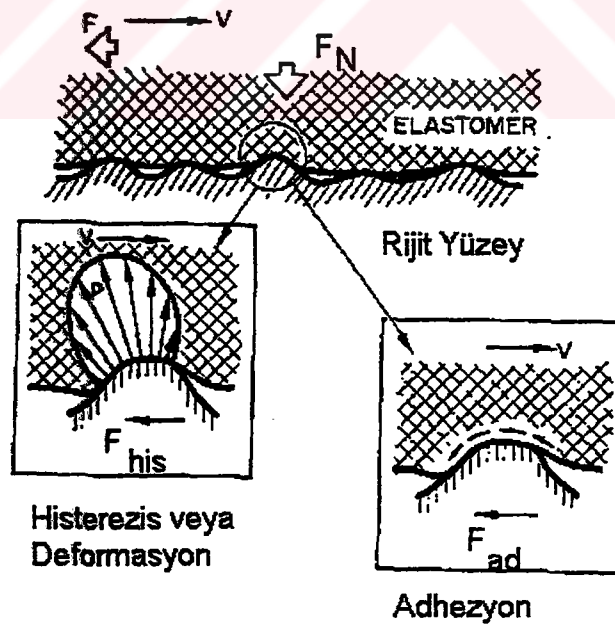
bağıntısı ile verilen gerçek temas alanıdır. 3.8 denklemindeki K bir sabit E ise elastomerin elastiklik modülü M ise temas halinde bulunan pürüz tepeciği sayısıdır. n üssü ise bir çok halde 1 değerini alır.

Eğer üst yüzeye bir teğetsel F kuvveti uygulanırsa temas noktalarında adheziv kuvvetler meydana gelecektir ve yüzeyler arasında izafi bir hareket meydana gelmezse, denge denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$F_{\text{Uygulanan kuvvet}} = \sum_{i=1}^M F_i \quad (3.9)$$

Adheziv-direnç-kuvvetleri

F kuvvetini yüzeyler arasında bir v izafi hızı oluşana kadar arttıralım. Bu durumda direnç kuvveti, adhezyon ve deformasyon terimlerinin toplamına eşit olur.



Şekil 3.2 Elastomerin rijit karşı yüzeyle temas durumu

Elastomer ve karşı yüzey arasındaki temas alanı Şekil 3.2' de gösterildiği gibi karşı yüzeyin pürüz tepecikleri üzerine elastomerin şekil değiştirerek oturması ile karakterize edilir. Sürtünmenin adhezyon bileşeni hareket esnasında meydana gelen gerilip uzama, kopma ve relaksasyon çevrimi esnasında meydana gelen moleküler bağlarla açıklanabilir. Şekil 3.2 bir pürüz tepeciği etrafında sürtünme kuvvetinin nasıl oluştuğunu ve ne şekilde adhezyon ve deformasyon bileşenlerine ayrılabilirliğini göstermektedir. Deformasyon bileşeni elastomerin bir pürüz tepesi etrafında şekil değiştirdikten sonra belli bir süre içinde eski haline gelmesi sonucu ortaya çıkar. Şekil 3.2 de, şekildeki hareket yönüne göre, pürüz tepesinin sol tarafında kalan bölümlerde elastomerde sıkışma, pürüz tepesinin sağında kalan bölümde ise daha önce sıkışan malzemede gevşeme meydana gelmektedir. Malzemenin elastiklikle birlikte viskoz bir davranış da göstermesi dikkate alındığında asimetrik bir basınç dağılımı ortaya çıkar. Buna genellikle sürtünmenin histerezis bileşeni denir. Bu yüzden

$$F_{\text{deformasyon}} = F_{\text{his}} \quad (3.10)$$

$$F = F_{\text{adhezyon}} + F_{\text{his}} \quad (3.11)$$

şeklinde yazmak mümkündür. Adhezyon Şekil 3.2' de gösterildiği gibi bir yüzey etkisi olmasına karşın histerezis, elastomerin viskoelastik özelliklerine bağlı olan bir hacimsel olaydır.

Makroskopik seviyede hem histerezis hem de adhezyon elastomer esaslı malzemenin viskoelastik özelliklerine bağlıdır. Viskoelastik karakterdeki bir malzemede gerilme ve uzama arasındaki ilişki

$$\sigma = E^* \varepsilon \quad (3.12)$$

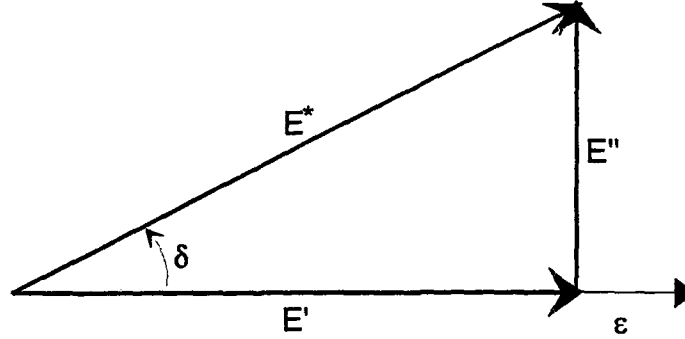
şeklindedir. Burada σ ; uygulanan gerilme, ε bu gerilme altında elastomer esaslı malzemede meydana gelen birim uzama ve E^* ise

$$E^* = E' + iE'' \quad (3.13)$$

şeklinde yazılan kompleks elastiklik modülüdür. Modülün reel kısmı viskoelastik malzemenin yay(elastik) ile ilgili elastiklik modülünü, imajiner kısmı ise enerji yutma (viskoz) kısmı ile ilgili kayıp modülünü oluşturur. Reel ve imajiner modüller arasında 90° lik bir faz farkı mevcuttur (Şekil 3.3). Yutulan enerjinin biriktirilen

enerjiye oranı ise sönüm faktörü veya tanjant modülü adını alır ve aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\tan \delta = \frac{E''}{E'} \quad (3.14)$$



Şekil 3.3 Kompleks elastiklik modülü

3.4. Sıcaklık ve Nemin Sürtünme Üzerindeki Etkisi

3.4.1. Sınır pv değeri

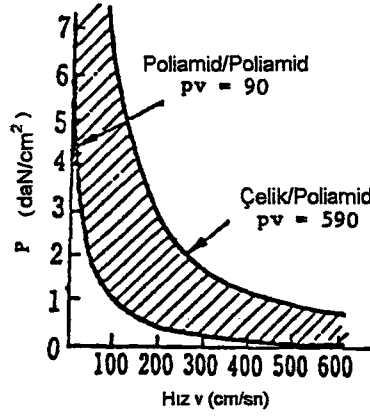
Birbiri ile temas halinde bulunan izafi hareketli iki katı cisim söz konusu olduğunda doğal olarak bir sürtünme ısı meydana gelir. Bu durumda açığı çıkan ısı $pv\mu A$ (p : Yüzey basıncı, v : Kayma hızı, μ : Sürtünme katsayısı, A : Temas alanı) olduğundan temas basıncı p ve kayma hızı v ne kadar artarsa oluşan sıcaklık da o kadar yüksek olacaktır. Polimer malzemelerin dayanabilecekleri sıcaklık değeri metallere göre çok çok düşük olduğundan temasta bulunan bir polimerin izafi hareketi sıcaklık yükselmesi durumunda sürekli devam edemez. Polimerin normal kayma hareketini devam ettiremeyeceği minimum pv değeri “sınır pv değeri” veya “ pv limiti” olarak adlandırılır. Bu pv değerinin üzerinde polimerin sürekli olarak bir kayma hareketine devam etmesi mümkün değildir. Bu limit farklı polimerler için çok farklı değerler almaktadır. Şekil 3.4 de PA/PA ve PA/çelik temas durumu için örnek eğriler verilmiştir [5]. Bu eğrilerin karakterine bakıldığında aşağıdaki tarzda bir değişim gösterdiği söylenebilir.

$$pv^\gamma = K \quad (3.15)$$

γ ve K malzemeye bağlı sabitlerdir. Şekildeki durum için değerleri aşağıda verilmiştir.

$\gamma=1,1$, $K=9$ MPa (PA/PA Temas durumu için)

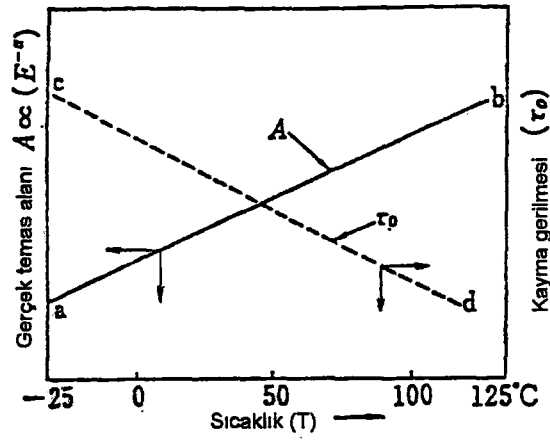
$\gamma= 1,1$, $K=58$ MPa (PA/Çelik Temas durumu için)



Şekil 3.4 pv koordinatlarında poliamidin erime sınırı

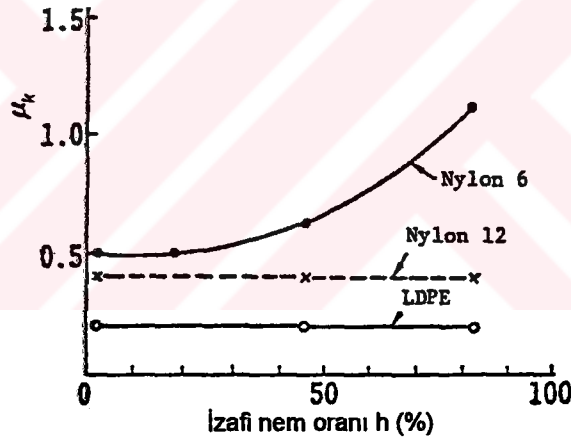
3.4.2. Sıcaklık ve nemin etkisi

Daha önce açıklandığı gibi polimerlerin sürtünme direnci gerçek temas alanına ve polimer malzemenin kayma dayanımına bağlıdır. Gerçek temas alanı A denklem (3.8) de izah edildiği gibi E^{-n} ile orantılıdır ($n=2/3$). Genel olarak kabul gören görüşe göre sıcaklıktaki bir artış sonucunda elastiklik modülü (E) düşer ve gerçek temas alanı artar, bunun neticesinde de sürtünme direnci artar. Bu durum Şekil 3.5 de ab doğrusu ile gösterilmiştir. Buna karşılık artan sıcaklık ile polimerin kayma mukavemetinin düşmesi sonucu sürtünme direnci de düşebilir [5]. Bu Şekil 3.5 de cd doğrusu ile gösterilmiştir. Bu yüzden polimerlerin sürtünme katsayılarının sıcaklığa bağlılığı artan sıcaklık ile kayma dayanımındaki düşüş ve elastiklik modülünün azalması sonucunda gerçek temas alanındaki artışın etkisi ile birlikte değerlendirilmelidir. Bununla birlikte elastiklik modülü ve sıcaklık, kayma dayanımı ve sıcaklık arasındaki ilişkiler şekilde gösterildiği gibi lineer değildir. Erime sıcaklığı ve camsı hale geçiş sıcaklığı bölgelerinde bu değişimler daha karmaşık ve süreksiz yapıdadır. Genel olarak polimerlerin camsı hale geçiş sıcaklıkları -120°C ve 150°C gibi çok geniş bir aralığı kapsadığından polimerin türüne bağlı olarak çok farklı etkiler gösterebilir. Bu komplikasyonlar sebebi ile polimer malzemeler için sürtünme katsayısının sıcaklıkla değişimi konusunda basit ve tanımlayıcı denklem ortaya koymak mümkün değildir.



Şekil 3.5 Gerçek temas alanı ve kayma mukavemetinin sıcaklıkla değişimi

Sürtünme katsayısının neme bağlılığı konusunda kesin bir teorik düşünce henüz mevcut değildir. Bu konuda genellikle sistematik deneylerden elde edilen sonuçlar kullanılmaktadır. Şekil 3.6 da bunlara ait bir örnek verilmiştir [5]. Şekil 3.6 dan da görüleceği gibi PA 6 nın sürtünme katsayısı artan nem ile artmakta fakat PA 12 ve LDPE bir değişim gözlenmemektedir.



Şekil 3.6 Çeşitli polimerler için sürtünme katsayısının neme bağlı olarak değişimi

3.5 Polimerlerin Aşınma Mekanizmaları

Aşınma, birbirine nazaran hareket eden temas halindeki yüzeylerde ilerleyen malzeme kaybı ve yüzeylerin bozulması ile meydana gelir. Aşınma türlerini tanımlamak için literatürde çok farklı terimler kullanılmaktadır. En genel olarak aşınma türleri:

- **Adheziv ve transfer aşınma (kayma aşınması):** Yüzeyler arasında temas bölgesinde hiçbir aşındırıcının bulunmadığı durumda meydana gelen aşınmadır.
- **Abraziv aşınma:** Polimerin temasta bulunduğu sert karşı yüzeyde sivri pürüz tepeciklerinin bulunması polimerin abrazyona uğramasına ve yırtılarak kopmasına sebep olur.
- **Yorulma aşınması:** Eğer karşı yüzeyde sivri pürüz tepecikleri yerine dalgalı bir yüzey yapısı hakimse elastomer yüzeyi tekrar eden deformasyonlara maruz kalır ve bunun sonucunda yorulma hasarı oluşur.
- **Yuvarlanma oluşumu(Roll Formation):** Bu çok fazla elastik olan malzemelere ait bir aşınma mekanizmasıdır. Dar bir aralığa deforme olarak sıkışan elastomerde bir kat oluşur ve malzeme bu kat yerinden ayrılır.
- **Termal aşınma**
- **Korozyon aşınması**
- **Diğerleri**

olarak sınıflandırılabilir. Son yıllarda polimerlerin aşınması koheziv ve ara yüzey aşınması olmak üzere iki sınıfa ayrılarak ta incelenmiştir [56]. Koheziv aşınma ara yüzeydeki nispeten büyük hareketlerinden meydana gelmektedir. Polimerlerin koheziv mukavemet değerleri ile kontrol edilen abraziv ve yorulma aşınması bu gruba girer. Ara yüzey aşınması daha ince bölgelerde meydana gelir, klasik adheziv aşınması da bu gruba girer.

Genel olarak aşınma, dış etkiler altında, temas yüzeylerinde oluşan fiziksel ve kimyasal değişimlerin sonucudur. Polimer malzemelerde, dış etkilerin, fiziksel ve kimyasal değişikliklerin çokluğu nedeniyle, pratikte bir aşınma hali değil birçok aşınma hali söz konusudur, yani çoğu zaman aşınma mekanizmaları üst üste gelir. Polimerlerin belirli bir aşınma durumundaki tepkileri fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerine bağlı ve çok dinamiktir. Aşınmayı etkileyen temel parametreler kayma hızı, yüzey basıncı, sürtünme katsayısı, yüzeyin yapısı, ergime noktası, ısı iletkenlik, elastisite modülü, malzemenin mukavemeti ve yorulma dayanımıdır.

3.5.1. Aşınmanın ölçülmesi

Aşınma ya ağırlık kaybı olarak ya da hacim değişimi olarak ölçülebilir. Birçok mühendislik makinalarında ise aşınma derecesi nispeten küçüktür. Örneğin tipik bir değer olarak yılda birkaç mikron boy değişimi olabilir. Laboratuvar deneylerinde kullanılan aletlerle aşınma hızlandırılarak sonuçlar daha çabuk alınır.

Aşağıda aşınma ölçülmesinde kullanılan kriterler verilmektedir [3].

1. Lineer aşınma hızı

$$K_L = \frac{\text{Aşınan Tabakanın Kalınlığı}}{\text{Kayma Mesafesi}} = \frac{h}{L}$$

2. Hacimsel aşınma hızı

$$K_V = \frac{\text{Aşınan Tabakanın Hacmi}}{\text{Kayma Mesafesi x Görünür Alan}} = \frac{\Delta V}{L \cdot A_g}$$

3. Enerji esaslı aşınma hızı

$$K_E = \frac{\text{Aşınan Tabakanın Hacmi}}{\text{Sürtünme İşİ}} = \frac{\Delta V}{F \cdot L}$$

4. Gravimetrik (kütleli) aşınma hızı

$$K_W = \frac{\text{Aşınan Tabakanın Ağırlığı}}{\text{Kayma mesafesi x Görünür alan}} = \frac{\Delta W}{L \cdot A_g}$$

5. Abrazyona yatkınlık

$$\gamma = \frac{\text{Abrazyonla Aşınan Hacim}}{\text{Sürtünme İşİ}} = \frac{\Delta V}{F \cdot L} = \frac{\Delta V}{\mu \cdot W \cdot L} = \frac{(\Delta V / WL)}{\mu} = \frac{A'}{\mu}$$

6. Abrazyon direnç katsayısı

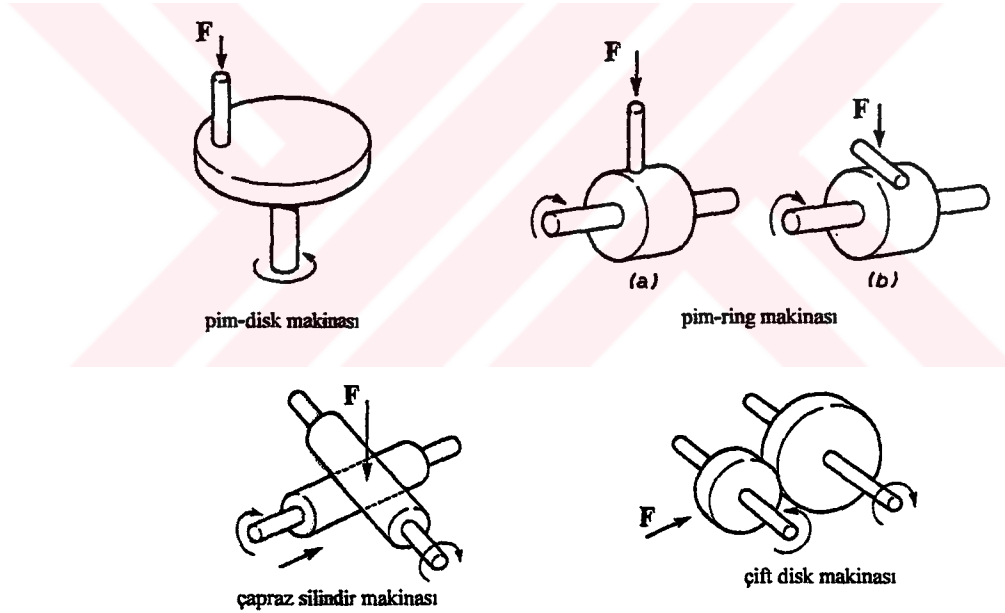
$$\beta = \frac{\text{Sürtünme İşİ}}{\text{Abrazyonla Aşınan Hacim}} = \frac{1}{\gamma} = \frac{1}{K_E} = \frac{\mu}{A'}$$

Burada, L kayma mesafesi, F sürtünme kuvveti, μ sürtünme katsayısı ve A' abrazyon faktörüdür. Enerji esaslı aşınma hızı ve abrazyona yatkınlık her biri abrazyon direnç

katsayısına karşılıklı eşit olamaya başladığında hemen hemen aynı olduğu görülmektedir. Bu nedenle $K_w = \rho K_v$ yazılabilir. Burada ρ aşınan malzemenin yoğunluğudur.

3.5.2. Aşınma deneyleri

Aşınma deneyleri için en doğru yöntem parçanın kullanılacağı işletme şartlarında test edilmesidir. Ancak bu tarz deneyler hem çok pahalı hem de birçok belirsizlik içeren değişkenler için içinde olduğundan pek tercih edilmemektedir. Bu nedenle gerçek şartları mümkün olduğu kadar simüle edebilen bu arada bir çok parametreyi belirli sınırlar içinde kontrol edebilen nispeten daha basit test düzenekleri gerçekleştirilmiştir. Bunların bazıları birbirleri ile mukayese edilebilecek aşınma değerlerini gerçekleştirebilen deney tesisatlarıdır. Bazıları ise bazı özel aşınma problemlerine cevap vermek üzere tasarlanmış daha zor şartlar altında çalışan sistemlerdir. Genel olarak aşınma çalışmaları için geliştirilmiş makinalar şematik olarak Şekil 3.7 de verilmiştir.



Şekil 3.7 Aşınma deney makinaları

Bu deneyler çok küçük değme alanlarına büyük yükler uygulanarak hızlandırılmış sonuçlar verir. En yaygın olarak kullanılanı *Pim-disk* makinasıdır. Burada sabit bir pim öngörülen bir basınç değerinde dönen karşı diske bastırmaktadır. *Pim-ring* deney tesisatı ise tesisat olarak imalatı nispeten basit fakat temas geometrisi açısından bazı

problemler yaratabilmektedir. *Çapraz silindirler* ise genelde yüksek hız ve yüksek basınçlarda yenme olayını incelenmesi amacı ile tercih edilmektedir. *Çift diskli makineler* hem yuvarlanma hem kayma hem de kaymalı yuvarlanma hareketi için kullanılan deney tesisatlarıdır. Genellikle dişli çarkların çalışma şartlarını simüle etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tür değme geometrileri atmosfer şartlarında incelenebileceği gibi kapalı odalarda kontrol edilmiş ortamlar içinde de yapılabilir.

3.5.3. Transfer filmi

Kuru sürtünmeli radyal kaymalı yataklarda aşınma mekanizması, muylu yüzeyinin pratik olarak çok düzgün ve kayma hızlarının düşük olması sebebi ile adeziv karakterdedir. Çelik muylu ve polimer yatak burcu arasında bir yağlayıcının bulunması durumunda, aşınma miktarında kuru hale göre gözlenen çok büyük miktardaki azalmalar bu görüşü doğrulamaktadır. Polimer malzemenin, çelik karşı yüzeye sıvanması POM, PTFE ve Poliamid gibi saf polimerlerde çok karşılaşılan bir durumdur.

Polimer esaslı malzemelerde aşınma miktarı, kayma hızı, uygulanan kuvvet ve sıcaklık ile oldukça önemli miktarda değişir. Polimer-metal teması durumunda polimer, metal karşı yüzeye monomoleküler bir film oluşturarak sıvanır. Bunun sebebi polimer malzemedeki molekülleri bir arada tutan koheziv bağların temas bölgesindeki adeziv bağdan daha zayıf olmasıdır. Polimer malzemenin karşı yüzeye sıvanmasından sonra polimer/çelik teması yerine polimer/polimer teması ortaya çıkmaktadır. Bu, hareketin devamında kinetik sürtünme katsayısında meydana gelen azalmayı da açıklamaktadır. Bu konuda yapılan ilk çalışmalarda, PTFE nin bir cam yüzey üzerinde düşük hızlarda kayması halinde (0,1 m/sn) hareketin başlangıcında sürtünme katsayısının yüksek olduğu gözlenmiştir (0,1-0,16). Hareketin devamında ise sürtünme katsayısı 0,07 den daha düşük değerlere düşmüştür. Daha sonra yapılan gözlemlerde PTFE nin karşı yüzeye yapışarak yaklaşık 100-400 Å kalınlığında bir film oluşturduğu saptanmıştır. Yapılan bu çalışmalardan sonra aşağıdaki sonuçlara varılmıştır[57].

1. Polimer ile rijit bir karşı yüzeyin teması durumunda, hareketin başlangıcında, polimer ve karşı yüzey arasındaki adezyon, polimer

malzemedeki moleküler bağların kopmasına ve büyük (bir kaç mikron) parçaların matristen ayrılmasına neden olacak kadar büyüktür.

2. Kayma hareketinin devamı ile bu büyük parçalar karşı yüzey üzerinde ince bir transfer filmi oluşturacak şekilde deforme olurlar. Bunun devamında polimer-polimer temas durumu ortaya çıkar.

Polimer malzeme ile temas halinde bulunan rijit karşı yüzeyin pürüzlülüğü arttırılırsa pürüzlülüğün belli bir sınır değerden büyük olması durumunda abraziv aşınma etkili olmaya başlar. Bu sınır değer farklı polimer malzemeler için bir çok parametreye bağlı olarak değişir. Polioksimetilen, poliamid 6, poliamid 66, politetrafloetilen ve yüksek yoğunluklu polietilen gibi malzemelerde yapılan çalışmalar sonucu 0,8...1 µm maksimum pürüz yüksekliği değerinden sonra abraziv aşınmanın etken olduğu gözlenmiştir [36].

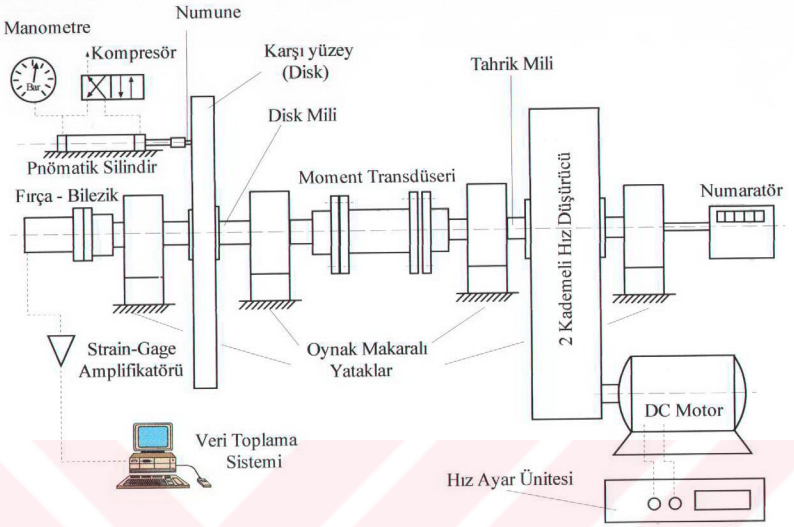


4. DENEY TESİSATI ve DENEYLER

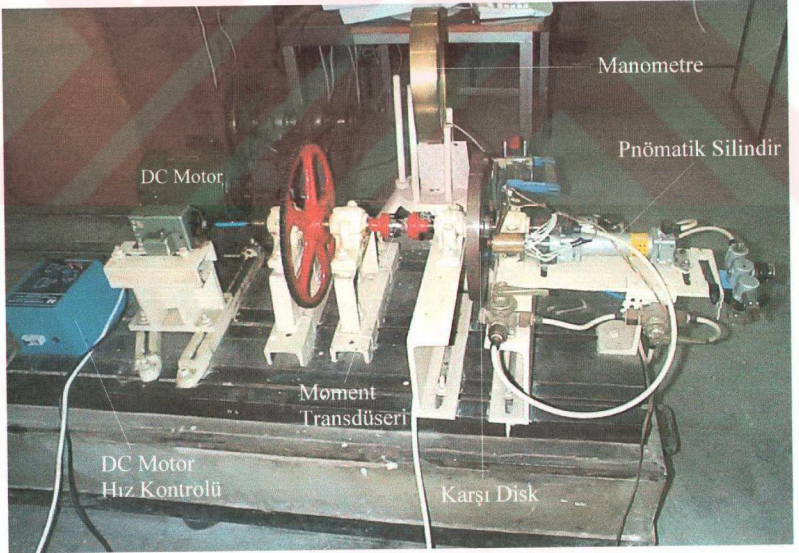
4.1. Deney Tesisatın Tanıtılması

Teknikte kullanılan polimer malzemelerin çeşitli parametrelere bağlı olarak sürtünme ve aşınma karakteristiklerinin tayini için bir pim disk deney tesisatı geliştirilmiştir. Deney tesisatının prensip şeması Şekil 4.1’de ve genel görünüşü Şekil 4.2’de verilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi normal kuvvetin temini için klasik pim disk tertibatındaki mekanik yükleme yerine pnömatik bir sistem kullanılmıştır. Bu sistemin kullanılma sebebi montaj kolaylığı ve pnömatik silindir içindeki hava basıncının dar bir aralıkta arzu edildiği gibi ayar imkanının bulunmasıdır. Bunun yanı sıra, pnömatik sistemin sönümlleme özelliği de deney sonuçlarının daha sağlıklı olmasını sağlamaktadır. Disk, gerek montaj kolaylığı ve gerekse daha sonra yapılacak modifikasyonlara olanak sağlaması açısından düşey olarak yerleştirilmiştir. Sistemde tahrik elemanı olarak dönme hızı 0...1500 d/dak arasında ayar edilebilen 0.75 KW gücünde bir DC motor kullanılmıştır. Düşük devir sayılarında mildeki döndürme momentini arttırmak ve polimer malzemelerin kullanıldığı hız bölgesine ulaşmak için motorla mil arasına iki kademeli bir redüksiyon konulmuştur. Redüksiyonun toplam çevrim oranı 30,4 tür (Şekil 4.3). Diskin takılı olduğu milin devir sayısı disk üzerinden bir optik takometre ile ölçülmektedir.

Sürtünme momentinin ölçümü bir moment transdüseri vasıtasıyla yapılmaktadır. Moment transdüseri bu deney sistemi için tasarlanıp alüminyumdan imal edilen flanşlı bir borudur. Transdüserle ilgili ayrıntılı bilgi ilerleyen kısımlarda verilecektir. Transdüserden alınan sinyaller strain-gage amplifikatöründen okunmaktadır. Sürtünme kuvvetinin değişimi bir veri toplama kartı yardımıyla bilgisayar ortamında sürekli olarak kaydedilmektedir.



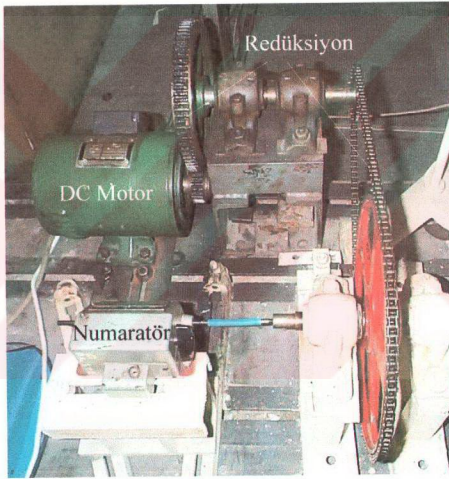
Şekil 4.1 Pim disk deney tesisatının prensip şeması



Şekil 4.2 Pim disk deney tesisatının genel görünüşü

Numuneler pnömatik silindirin ucuna monte edilen bir tutucu ile hem ısıtılmakta hem de diske basmaktadır. Tutucu içerisine yerleştirilen 6 adet rezistans ile numune istenilen sıcaklığa ısıtılabilir. Sıcaklık kontrolü bir termostat yardımı ile yapılmaktadır. Sistemde oda sıcaklığından 200°C sıcaklığa kadar sıcaklık ayarı yapmak mümkündür. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda disk yüzeyinden ortama doğru oluşan ısı kaybını önlemek için disk yakınına da bir rezistans yerleştirilmiştir. Böylece hem numune hem de disk ısıtılarak istenen çalışma sıcaklığı iyi bir hassasiyetle sağlanmaktadır.

Deney numunelerindeki aşınma miktarını bulmak içinde 0.0001 gr hassasiyetinde bir terazi kullanılmıştır. Kayma mesafesi ise diskin monte edildiği mile takılı bir numarator ile saptanmıştır.



Şekil 4.3 Tahrir sistemi

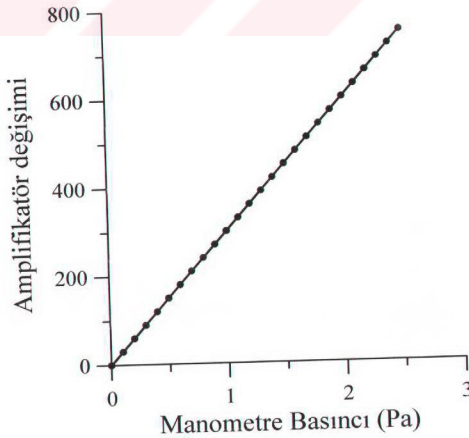
4.2. Normal Kuvvetin Kalibrasyonu

Sistemde normal kuvvet daha önceden bahsedildiği gibi bir pnömatik silindir vasıtasıyla uygulanmaktadır. Bunun için pnömatik silindir, basınç ayar valfi, hassas manometre ve valflerden oluşan pnömatik bir devre kullanılmaktadır (Şekil 4.4). Devre 15 bar basınca kadar hava basabilen bir kompresörden beslenmektedir. Silindir içindeki hava basıncının ne kadar bir normal kuvvete karşılık geldiği bir kuvvet transdüseri kullanılarak kalibre edilmiştir. Önce kuvvet transdüseri bilinen

yüklerle statik olarak yüklenerek amplifikatörde okunan değerler kaydedilmiştir. Daha sonra transdüserle pnömatik silindir aracılığı ile basınç uygulanarak 0,02 bar hassasiyetli manometrede okunan basınç değerlerinin amplifikatördeki karşılıkları kaydedilerek hangi basınç değerlerinin hangi yüke karşılık geldiği bulunmuştur. Böylece sürtünme katsayısını ölçmek için gerekli parametrelerden normal kuvvet deney şartlarına uygun olarak ayar edilebilmektedir. Bu şekilde yapılan kalibrasyon ile pnömatik silindir içindeki sızdırmazlık elemanlarından kaynaklanan hatalar da göz önüne alınmaktadır. Kalibrasyon eğrisi Şekil 4.5 de görülmektedir.



Şekil 4.4 Normal kuvvetin ayarlanması

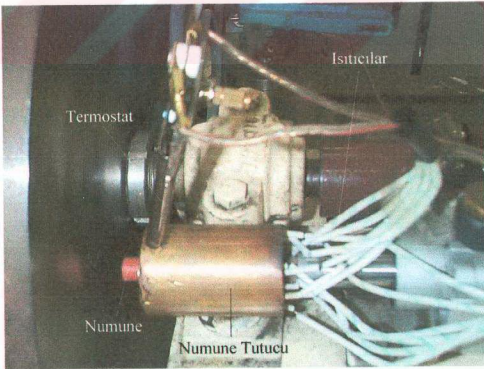
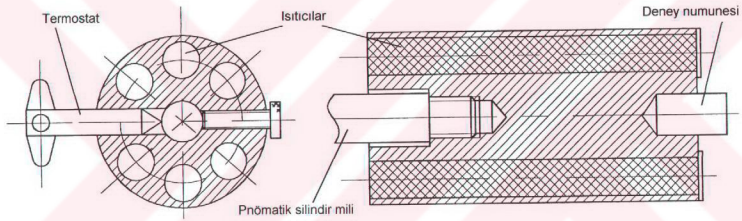


Şekil 4.5 Normal kuvvet kalibrasyonu

4.3. Numune Sıcaklığının Ayarı

Deney numuneleri, pnömomatik silindir ucuna bağlı bir tutucuya monte edilmektedir. Tutucu hem parçaları taşıma, hem de içine monte edilen 6 adet rezistans vasıtasıyla istenen çalışma sıcaklığını sağlama görevlerini yerine getirmektedir. Tutucu içindeki 6 adet rezistans birbirlerine paralel olarak bağlanmış ve sıcaklığı istenen değerde sabit tutabilmek için ise 200⁰C lik bir termostat rezistanslara seri bağlanarak devre tamamlanmıştır (Şekil 4.6).

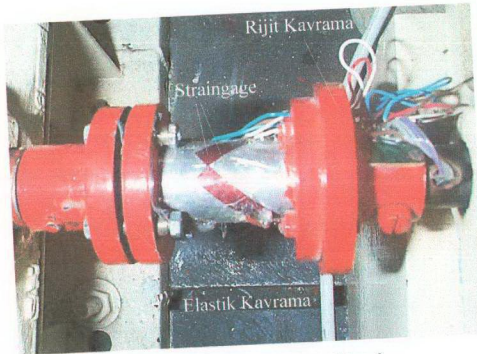
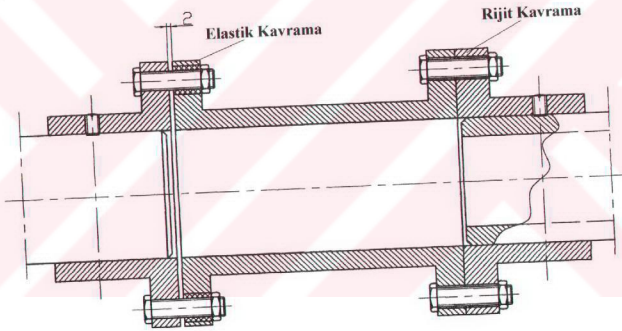
Düşük sıcaklıklarda sadece numuneleri ısıtarak çalışma sıcaklığını sağlamak mümkündür. Ancak yüksek sıcaklıklarda disk yüzeyinden oluşan ısı kaybı nedeni ile deney numuneleri ön görülen sıcaklık değerlerine ulaşamamaktadır. Bu nedenle disk yüzeyine yakın bölgeye yerleştirilen diğer bir rezistans ile disk de ısıtarak istenen çalışma sıcaklığı $\pm 5^{\circ}\text{C}$ hassasiyetle elde edilmiştir.



Şekil 4.6 Numune tutucu

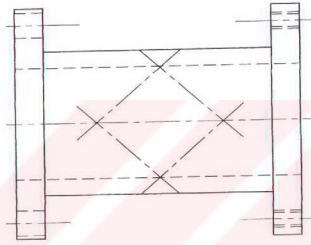
4.4. Sürtünme Kuvvetinin Ölçülmesi

Sürtünme kuvveti deney numunesinin karşı diskle teması neticesinde oluşan sürtünme momentinin ölçülmesi suretiyle elde edilmektedir. Bu amaçla bu sistem için tasarlanıp imal edilen moment transdüseri disk mili ile tahrik mili arasında yerleştirilmiştir. Şekil 4.7'de moment transdüseri ve millere bağlantı şekli görülmektedir. Transdüser, disk miline rijit, tahrik miline ise elastik kavrama ile bağlanmıştır. Böylece karşı diskte sürtünme kuvvetinin oluşturduğu burulma momenti diğer bozucu etkilerden arınmış olarak transdüsera aktarılmaktadır. Tahrik miline elastik kavrama ile bağlantı yapıldığı ve transdüser ile mil arasında 2 mm lik bir boşluk bırakıldığı için sistemde oluşabilecek bir eğilme etkisi en aza indirgenmiştir. Transdüser alüminyumdan içi boş olarak şekillendirildiği için çok küçük bir zorlanma etkisinde dahi şekil değişimi oluşabilmekte ve transdüserden kayda değer bir sinyal alınabilmektedir.

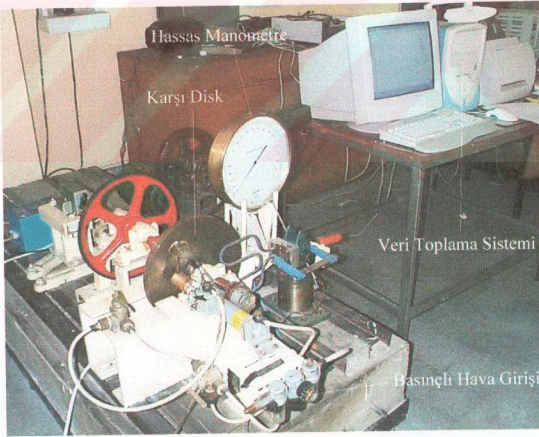


Şekil 4.7 Moment Transdüseri

Bilindiği gibi sadece burulma zorlanması halinde asal gerilmeler mil eksenine ile 45° açı yapan eksen doğrultusunda meydana gelmektedir. Bu nedenle bu doğrultulara yerleştirilen tam köprü (4 adet) bir strain gage devresi ile oluşan burulma momenti ölçülmektedir (Şekil 4.8). Sistem hareketli olduğu için disk milinin ucuna yerleştirilen bu tarz ölçümler için tasarlanmış gümüş alaşımli bir fırça bilezik yardımı ile alınan sinyaller 5 kHz taşıyıcı frekanslı bir strain gage amplifikatörüne oradan da veri toplama kartına aktararak bilgisayar ortamında bu değişimler kolaylıkla izlenebilmektedir (Şekil 4.9).



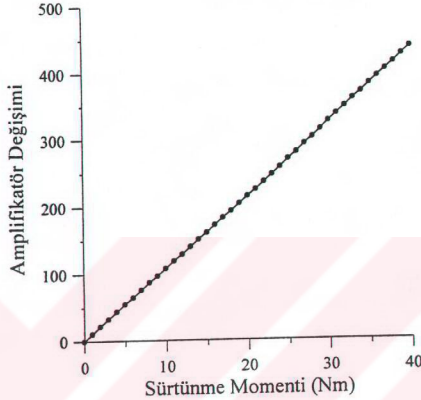
Şekil 4.8 Strain-gage yerleşim şekli



Şekil 4.9 Veri toplama sistemi

Moment transdüserinin kalibrasyonu, diskin bağlı olduğu milin ucuna sistem hareketsiz halde iken takılan bir manivela kolu yardımı ile yapılmaktadır. Manivela koluna bilinen ağırlıklar asılarak milde (dolayısıyla moment transdüserinde) burulma

meydana getirilmekte ve buna karşılık amplifikatörde oluşan sinyaller kaydedilmektedir (Şekil 4.10). Böylece deneyler sırasında ölçülen sinyallerin ne kadar bir sürtünme momentine karşılık geldiği bulunabilmektedir. Bu değerlerin sürtünme yarıçapına (sistemde 72 mm) bölünmesi ile de sürtünme kuvveti bulunmaktadır. Belirsizlik analizi uygulanarak sürtünme katsayısının $\pm 0,005$ hata payı ile hesaplandığı belirlenmiştir [58].



Şekil 4.10 Moment Transdüseri kalibrasyon eğrisi

4.5. Deney Numuneleri

Yapılan sürtünme ve aşınma deneylerinde 7 farklı poliamid türü kullanılmıştır. Bu poliamidlerin genel özellikleri daha önce Bölüm 2.6 da ayrıntılı olarak incelenmiştir. Çalışmada incelenen numuneler Tablo 4.1 de görülmektedir.

Tablo 4.1 Deney numuneleri

Polimeri	Yoğunluk (gr/cm ³)	Erime Sıcaklığı (°C)
Poliamid 46	1,18	295
Poliamid 66	1,14	255
Poliamid 6	1,14	220
MoS ₂ Katkılı Poliamid 66	1,15	255
MoS ₂ Katkılı Döküm Poliamid 6	1,16	220
Döküm Poliamid 6	1,15	220
Yağ Emdirilmiş Döküm Poliamid 6	1,15	220

Numunelerin her biri 17 mm uzunlukta ve 10 mm çapta işlenmiştir. Numunelerin temas halinde bulunduğu karşı yüzey X38CrMoV51 takım çeliğinden özel olarak imal edilmiş olup yüzey pürüzlülüğü meydana gelebilecek herhangi bir abraziv etkiden kurtulmak için $R_a=0,2 \mu\text{m}$ 'a düşürülmüştür. Diskin çapı 300 mm olup çalışmada sürtünme çapı 144 mm olarak ayarlanmıştır.

4.6. Deney Şartları

Deneyler 18°-20°C ortam sıcaklığı ve yaklaşık %60 nem oranındaki laboratuvar şartlarında gerçekleştirilmiştir.

Sürtünme ve aşınma deneyleri 40°, 60°, 80° ve 100°C olmak üzere 4 farklı sıcaklık aralığında yapılmıştır. Her çalışma sıcaklığı için 3 numune hazırlanmıştır. Buna göre hem sürtünme deneyleri için 74 adet hem de aşınma deneyleri için 74 adet numune ayrı ayrı denenmiştir.

Sürtünme katsayısına kayma hızı ve yüzey basıncının etkisini görebilmek için her bir sıcaklık kademesinde 0,2-1,6 m/sn aralığında 10 ayrı hızda ve 1 - 3,2 MPa aralığında 9 farklı basınçta sürtünme deneyleri yapılmıştır. Buna göre deney parametrelerinin değişim aralıkları toplu olarak Tablo 4.2 de görülmektedir.

Tablo 4.2 Deney parametrelerinin değişim aralıkları

Sürtünme Deneyleri		
Sıcaklık T°C	Kayma hızı v (m/sn)	Yüzey basıncı p (MPa)
40	0,19	0,94
60	0,32	1,25
80	0,48	1,55
100	0,64	1,83
	0,8	2,1
	0,96	2,4
	1,12	2,66
	1,28	2,9
	1,44	3,18
	1,6	
Aşınma deneyleri		
pv=1 MPa m/sn	p ₁ =3 MPa	p ₁ =2 MPa
	v ₁ =0,33 m/sn	v ₁ =0,5 m/sn

Polimer malzemelerin çalışma sınırlarını belirleyen en önemli parametre p_v limiti yani “basınç x kayma hızı” limitidir. Bu nedenle deneyler söz konusu malzemeler için uygun p_v limiti esas alınarak yapılmıştır. Bu çalışmada aşınma deneyleri için yapılan literatür çalışmaları da referans alınarak $p_v=1$ MPa m/sn değeri seçilmiştir. Aşınma deneyleri aynı p_v limitinde farklı iki kayma hızı ve yüzey basıncı değerinde yapılmıştır. Böylece kayma hızının ve yüzey basıncının aşınmaya etkisi izlenmeye çalışılmıştır.

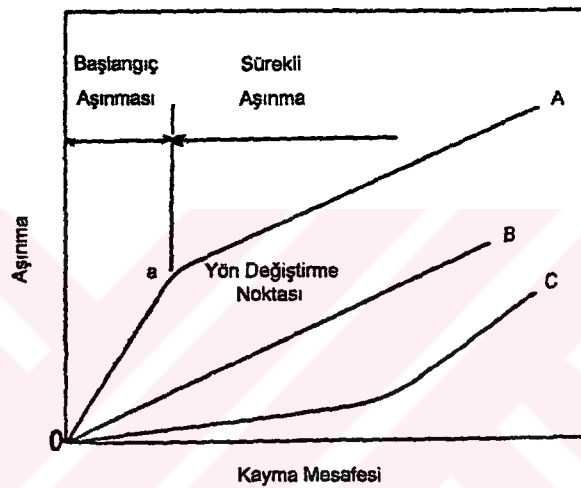
4.7. Sürtünme Deneylerinin Yapılışı

Deneylere başlamadan önce deney tesisatı boşa çalıştırılarak yatak sürtünme kuvvetlerinin oluşturduğu etkiler çeşitli hızlarda ölçülmüştür. Sürtünme katsayısı hesap edilirken bu değerler ölçülen değerlerden çıkarılarak sadece sürtünme dirençleri göz önüne alınmıştır. Numuneler dairesel kesitli olduğundan hep aynı konumda tesisata takılabilmesi ve aynı zamanda sıcaklığın da takip edilebilmesi için numune yüzeyinin 1 mm atında bir delik açılmıştır. Bütün numuneler deneylere başlamadan alıştırma aşınmasına tabi tutulmuştur. Böylece her iki yüzeyin birbirine tam olarak temas etmesi sağlanmıştır. Her deney öncesinde disk yüzeyi ve numune asetonla temizlenerek teknik olarak kuru bir yüzey elde edilmiştir.

Numune pim tutucuya yerleştirildikten sonra çalışma sıcaklığına kadar ısıtılmıştır. Daha önce anlatıldığı gibi pnömatik silindirden uygulanabilecek minimum normal kuvvet, basınç ayar valfi ile hassas manometreden takip edilerek ayarlanmıştır. Deney tesisatı çalıştırılıp en düşük hız kademesi ile deneye başlanmıştır. Optik takometre karşı disk üzerine tutularak dönme hızı d/dak olarak ölçülmüştür. Daha sonra kademeli olarak hız ayar ünitesi yardımı ile kayma hızı attırılmıştır. Her hız kademesinde amplifikatörden alınan sinyaller veri toplama kartı ile bilgisayar ortamına aktarılarak takip edilmiştir. Bu veriler daha önce açıklandığı gibi sürtünme katsayısının hesaplanmasında kullanılmıştır. Böylece belirli bir sıcaklık ve yükleme durumu için sürtünme katsayısının hıza bağlı olarak değişimi elde edilmiştir. Aynı deneyler basınç değeri kademeli bir şekilde arttırılarak tekrarlanmıştır.

4.8. Aşınma Deneylerinin Yapılışı

Genel olarak polimer malzemelerin tribolojik özelliklerinin incelendiği çalışmalarda aşınma miktarı ve kayma mesafesi arasında Şekil 4.11’de verilen tipik eğriler görülmektedir [5]. Şekilden de görüleceği gibi eğri iki kısımdan oluşmaktadır. Eğrinin ilk kısmı ilk çalışma aşınmasını (başlangıç aşınması, alışma aşınması), ikinci kısmı ise esas çalışma aşınmasını (sürekli aşınmayı, kararlı aşınmayı) gösterir. Aşınma hızları ise aşınma bölgelerine göre ayrı ayrı hesap edilir. Başlangıç aşınma hızı W_1 , sürekli aşınma hızı W_2 olarak düşünülürse W_1/ W_2 oranı genellikle birden büyüktür. Aşınma hızlarından bahsedilirken aksi belirtilmediği sürece sürekli aşınma bölgesinin hızı anlaşılmalıdır.

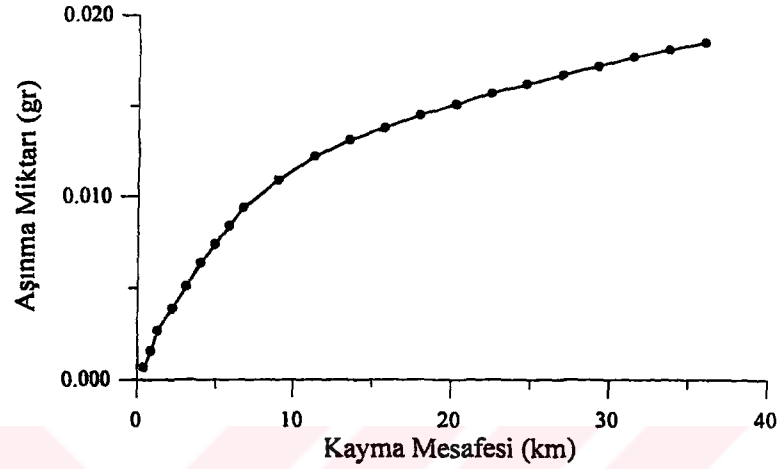


Şekil 4.11 Aşınma miktarı ve kayma mesafesi arasındaki karakteristik eğriler

Aşınma deneylerine başlamadan önce çalışmada kullanılan numuneler belirlenen çalışma şartlarında denenerek aşınma miktarı değişiminin literatüre olan paralelliği incelenmiştir. Şekil 4.12 de deney numunelerinin kayma mesafesi ile aşınma miktarının değişimi görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi numuneler Şekil 4.11 de A eğrisine uyan bir karakteristik göstermektedir. Buna göre yön değiştirme 12 km civarında gerçekleşmektedir.

Aşınma deneyleri için hazırlanan numuneler, bu eğriler de dikkate alınarak önce 15 km alıştırma aşınmasına tabi tutulmuştur. Böylece yukarıda bahsedildiği gibi hem ilk aşınma bölgesi geçilerek sürekli aşınma bölgesinde kalınmış hem de yüzeylerin birbirine tam olarak oturması sağlanmıştır. Her sıcaklık için ayrı ayrı numuneler

hazırlanmıştır. Deneylere sürtünme deneylerinde olduğu gibi teknik kuru yüzeyler elde edilerek başlanmıştır. Daha önce belirtildiği gibi aşınma deneyleri $p_v=1$ MPa m/sn şartı sağlanacak şekilde basınç ve hız değerleri ayarlanarak yapılmıştır. İlk önce yaklaşık olarak $p=3$ MPa yüzey basıncını sağlayacak şekilde pnömatik silindirden uygulanacak normal kuvvet ($F_N=235$ N) ayarlanmıştır. Kayma hızı yaklaşık $v=0,33$ m/sn ($n=39,8$ d/dak.) olarak belirlenmiştir. Aşınma deneyleri 15 km boyunca yapılmış ve her 1,5 km de ölçüm alınmıştır.



Şekil 4.12 Deney numunelerinin karakteristik aşınma eğrisi

Deneylere başlanmadan önce numune tartılarak deney tesisatına takılmış ve çalışma sıcaklığına kadar ısınması beklenmiştir. Her bir ölçüm noktasında 40°C ve 60°C sıcaklıklar için fırında kurutma yapıp tekrar tartılarak ağırlık kaybı hesaplanmıştır. Böylece poliamidin nem alma özelliğinden kaynaklanabilecek hatalar önlenmeye çalışılmıştır. 80°C ve 100°C çalışma sıcaklıklarında kurutma işlemine ihtiyaç duyulmamıştır. Aşınma hızı, Bölüm 3.5.1'de verilen enerji esaslı aşınma hızı kriteri kullanılarak hesaplanmıştır. Sonuçlar aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi olarak elde edilmiştir. Aynı deneyler yaklaşık olarak $p=2$ MPa yüzey basıncı ($F_N=157$ N) ve $v=0,5$ m/sn ($n=66,3$ d/dak.) hız için tekrarlanmıştır. Böylece hızı ve basıncın aşınma karakteristiğini ne yönde etkilediği incelenmiştir.

Numunelerin aşınmış yüzeyleri altın kaplama yapıp taramalı elektron mikroskobu ve optik mikroskop kullanılarak yüzey filmleri alınmıştır. Yüzey filmleri gerek oda sıcaklığında ve gerekse yüksek sıcaklıkta aşınmış numunelerden çekilmiştir. Böylece sıcaklığın aşınma üzerinde nasıl bir etki yaptığı araştırılmıştır.

5. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

5.1. Sürtünme Deney Sonuçları

Genel olarak polimer malzemeler metallerden farklı sürtünme ve aşınma özellikleri göstermektedir. Aynı zamanda kullanım alanlarını da işletme sıcaklığı önemli ölçüde sınırlamaktadır. Takdim edilen çalışmada farklı sıcaklıklar için sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimleri üç boyutlu grafiklerle verilmiştir. Artan çalışma sıcaklığı ile sürtünme katsayısının değişimi ise klasik iki boyutlu eğrilerle minimum ve maksimum çalışma şartlarında verilmiştir. Ayrıca her bir sıcaklık için malzemeleri karşılaştırmak amacıyla sürtünme katsayısının değişimleri toplu olarak verilmiştir.

Şekil A.1, A.2, A.3 ve A.4’de sırasıyla poliamid 4/6’nın 40°C, 60°C, 80°C ve 100°C’deki sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi üç boyutlu grafik üzerinde görülmektedir. Şekil A.5’de ise farklı çalışma sıcaklıkları için poliamid 4/6’nın sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile nasıl değiştiği verilmektedir. Benzer eğriler poliamid 66 için Şekil A.6, A.7, A.8, A.9 ve A.10’da, poliamid 6 için Şekil A.11, A.12, A.13, A.14 ve A.15’de, MoS₂ katkılı poliamid 6 için Şekil A.16, A.17, A.18, A.19 ve A.20’de, MoS₂ katkılı döküm poliamid 6 için Şekil A.21, A.22, A.23, A.24 ve A.25’de, döküm poliamid 6 için Şekil A.26, A.27, A.28, A.29 ve A.30’da, yağ emdirilmiş döküm poliamid 6 için Şekil A.31, A.32, A.33, A.34 ve A.35’de benzer eğriler görülmektedir.

Şekil A.36, A.37, ve A.38’de çalışmada kullanılan tüm poliamid numunelerinin 40°C de sırasıyla $p=0,94$ MPa, $p=2,1$ MPa ve $p=3,18$ MPa yüzey basıncında sürtünme katsayısının kayma hızı ile değişimi görülmektedir. Benzer şekilde 60°C’deki değişimler Şekil A.39, A.40, ve A.41’de, 80°C’deki değişimler Şekil A.42, A.43, ve A.44’de, 100°C’deki değişimler de Şekil A.45, A.46, ve A.47’de görülmektedir.

Şekil A.48, A.49, ve A.50’de çalışmada kullanılan tüm poliamid numunelerinin 40°C de sırasıyla $v=0,19$ m/sn, $v=0,8$ m/sn ve $v=1,6$ m/sn kayma hızlarında sürtünme

katsayısının yüzey basıncı ile değişimi görülmektedir. Benzer şekilde 60°C' deki değişimler Şekil A.51, A.52, ve A.53'de, 80°C' deki değişimler Şekil A.54, A.55, ve A.56'de, 100°C' deki değişimler de Şekil A.57, A.58, ve A.59'da görülmektedir.

5.2. Aşınma Deney Sonuçları

Aşınma deneyleri daha öncede bahsedildiği gibi aynı $p \cdot v$ limitinde farklı yükleme durumlarında yapılmıştır.

Farklı çalışma sıcaklıklarında poliamid 4/6'nın yüzey basıncı $p=3$ MPa ($F_N=235$ N) ve kayma hızı $v=0,33$ m/sn için aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimleri Şekil A.60'da, poliamid 66 için Şekil A.61'de, poliamid 6 için Şekil A.62'de, MoS₂ katkılı poliamid 6 için Şekil A.63'de, MoS₂ katkılı döküm poliamid 6 için Şekil A.64'de, döküm poliamid 6 için Şekil A.65'de ve yağ emdirilmiş döküm poliamid 6 için Şekil A.66'da görülmektedir. Her bir çalışma sıcaklığı için incelenen poliamidlerin aşınma hızları toplu olarak Şekil A.67, A.68, A.69 ve A.70 de görülmektedir.

Farklı çalışma sıcaklıklarında poliamid 4/6'nın yüzey basıncı $p=2$ MPa ($F_N=157$ N) ve kayma hızı $v=0,5$ m/sn için aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimleri Şekil A.71'da, poliamid 66 için Şekil A.72'de, poliamid 6 için Şekil A.73'de, MoS₂ katkılı poliamid 6 için Şekil A.74'de, MoS₂ katkılı döküm poliamid 6 için Şekil A.75'de, döküm poliamid 6 için Şekil A.76'de ve yağ emdirilmiş döküm poliamid 6 için Şekil A.77'de görülmektedir. Her bir çalışma sıcaklığı için incelenen poliamidlerin aşınma hızları toplu olarak Şekil A.78, A.79, A.80 ve A.81'de görülmektedir.

Poliamid 4/6'nın her iki kayma hızı ve yüzey basıncında aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi her bir çalışma sıcaklığı için Şekil A.82'de, poliamid 66 için Şekil A.83'de, poliamid 6 için Şekil A.84'de, MoS₂ katkılı poliamid 6 için Şekil A.85'de, MoS₂ katkılı döküm poliamid 6 için Şekil A.86'de, döküm poliamid 6 için Şekil A.87'de ve yağ emdirilmiş döküm poliamid 6 için Şekil A.88'de verilmiştir.

Aşınmış yüzey filmleri poliamid 4/6 için Şekil A.89, A.90, A.91'de, poliamid 66 için Şekil A.92, A.93, A.94'de, poliamid 6 için Şekil A.95, A.96, A.97'de, MoS₂ katkılı poliamid 6 için Şekil A.98, A.99, A.100'de, MoS₂ katkılı döküm poliamid 6 için Şekil A.101, A.102, A.103'de, döküm poliamid 6 için Şekil A.104, A.105, A.106'da ve yağ emdirilmiş döküm poliamid 6 için Şekil A.107, A.108, A.109'da görülmektedir.

5.3. Sonuçların Değerlendirilmesi

Şekil A.1-A4' deki değişimler incelendiğinde poliamid 4/6'nın sürtünme katsayısının bütün çalışma sıcaklıkları için artan kayma hızı ile arttığı görülmektedir. Benzer bir değişim yüzey basıncı ile sürtünme katsayısı arasında da mevcuttur. Ancak çalışma sıcaklığı 100°C olduğunda bu değişim çok küçük genliklerde kalmaktadır. Şekil A.5' deki toplu değişimler incelendiğinde en düşük sürtünme katsayısı değerlerinin 40°C' deki çalışma sıcaklığında en yüksek sürtünme katsayılarının ise 60°C' deki çalışma sıcaklığında olduğu görülebilir. Poliamid 4/6' nın sürtünme katsayısı 0,2-0,35 aralığında değişmektedir.

Poliamid 66' nın Şekil A.6-A.9'da verilen üç boyutlu grafikleri incelendiğinde genel olarak poliamid 4/6'a benzer bir değişim görülmesine karşın yüzey basıncının sürtünme katsayısı üzerinde etkisinin yok denecek kadar az olduğu söylenebilir. Beklenildiği şekilde artan kayma hızı ile sürtünme katsayısı da artmaktadır. Bu artışın karakteri bütün çalışma sıcaklıkları için oldukça benzerdir. Poliamid 66 bütün çalışma sıcaklıkları aralıklarında 0,17-0,25 civarı sürtünme katsayısı değerleri vermektedir. Artan sıcaklık sürtünme katsayısının bir miktar artışına sebep olmaktadır.

Şekil A.11-A.15'de poliamid 6' nın sürtünme katsayısının hız, sıcaklık ve yüzey basıncı ile değişimi değerlendirildiğinde artan kayma hızı ve yüzey basıncı ile sürtünme katsayısının arttığı ancak yüzey basıncının sürtünme katsayısına etkisinin kayma hızına göre oldukça az olduğu görülmektedir. Artan sıcaklık sürtünme katsayısı değerlerinin çok az bir oranda artmasına sebep olmaktadır. Sürtünme katsayısının sayısal değerleri incelendiğinde 0,2-0,4 arasında olduğu saptanabilir.

Şekil A.16-A.20 arasında MoS₂ katkılı poliamid 66' nın üç boyutlu grafikleri verilmiştir. Bu grafiklerde yukarıda izah edilenlere benzer değişimler görülmekte, tek farklılık olarak yüzey basıncının sürtünme katsayısına etkisi belirgin bir şekilde ortaya çıktığı söylenebilir. Sıcaklık artışının sürtünme katsayısı üzerinde söz konusu sıcaklık aralıkları için kayda değer bir etkisi olmadığı ifade edilebilir. Sürtünme katsayısı çalışma şartlarında 0,15-0,3 arasında bir değişim göstermektedir.

Şekil A.21-A.25' de MoS₂ katkılı döküm poliamid 6' nın sürtünme katsayısının kayma hızı, yüzey basıncı ve çalışma sıcaklığı ile değişimleri görülmektedir. Bu değişimler incelendiğinde diğer numunelere benzer şekilde artan kayma hızı ile

sürtünme katsayısının arttığı, artan yüzey basıncı ile ise bu artışın pek belirgin olmadığı ifade edilebilir. Diğer bütün grafiklerde olduğu gibi en yüksek sürtünme katsayısı değerlerine grafiklerde kırmızı ile gösterilen (hız ve basıncın en yüksek değerini aldığı) bölgelerde ulaşılmaktadır. Artan sıcaklığın sürtünme katsayısını çok az bir miktarda arttırdığı söylenebilir. Deneylerde elde edilen sürtünme katsayısı değerleri 0,2-0,33 arasındadır.

Şekil A.26-A.30'da yukarıda bahsedilen eğriler döküm poliamid 6 için verilmiştir. Düşük yüzey basınçlarında ($< 2\text{MPa}$) basıncın sürtünme katsayısına etkisi hemen hemen yok gibidir. Ancak yüzey basıncı arttıkça sürtünme katsayısı da belirgin bir şekilde artmaktadır. Artan kayma hızı ise sürtünme katsayısında bir artışa neden olmakla birlikte bu artış diğer numunelerdeki kadar büyük değildir. Döküm poliamidin çeliğe karşı sürtünme katsayısı üzerinde sıcaklığın etkisi yok denecek kadar azdır. Deneylerde elde edilen sürtünme katsayısı değerleri diğerlerine göre daha düşük ve 0,11-0,25 arasındadır.

Şekil A.31-A.35' de yağ emdirilmiş döküm poliamidin çeliğe karşı sürtünme katsayısının yüzey basıncı, kayma hızı ve sıcaklıkla değişimine bakıldığında buraya kadar anlatılan değişimlerden çok büyük bir farklılık göze çarpmamakta, ancak yüzey basıncının sürtünme katsayısına etkisinin kayma hızının etkisinden daha büyük olduğu ilginç bir nokta olarak tespit edilmektedir. En düşük sürtünme katsayıları 40°C çalışma sıcaklığında elde edilmekte artan sıcaklık ise sürtünme katsayısını bir miktar arttırmaktadır. Deney koşullarında yağ emdirilmiş döküm poliamid 6 0,15-0,25 arasında sürtünme katsayısı değerleri vermektedir.

Şekil A.36' da 40°C çalışma sıcaklığında ve $p=0,94\text{ MPa}$ yüzey basıncı için kayma hızı ile sürtünme katsayısının değişimi çalışmada kullanılan poliamidler için toplu olarak görülmektedir. En düşük sürtünme katsayısını bu çalışma şartları için döküm poliamid 6 göstermektedir. Kayma hızı arttıkça döküm poliamid 6'nın sürtünme katsayısı da artmakta ve yüksek hızlarda, yağ emdirilmiş döküm poliamid 6 ve poliamid 66 ile hemen hemen aynı düzeye ulaşmaktadır. En yüksek sürtünme katsayısını ise poliamid 6 göstermektedir. Ancak düşük kayma hızları için poliamid 4/6, poliamid 6 ve MoS_2 katkılı poliamid 66 birbirine oldukça yakın bir değer vermektedir. Eğrilerden görüleceği üzere bütün malzemeler için sürtünme katsayısı çok küçük bir aralıkta değişmektedir.

Şekil A.37' de toplu olarak 40°C çalışma sıcaklığında ve $p=2,1$ MPa yüzey basıncı için kayma hızı ile sürtünme katsayısının değişimi görülmektedir. Kayma hızı ile pek bir değişim göstermeyen poliamid 66 yine en düşük sürtünme katsayısını vermektedir. Ancak düşük kayma hızlarında döküm poliamid 6 ile poliamid 66 hemen hemen aynı değerlerdedir. Kayma hızı arttıkça döküm poliamid 6'nın sürtünme katsayısı artma göstermektedir. En yüksek sürtünme katsayısını ise yine poliamid 6 göstermektedir.

Şekil A.38' de 40°C çalışma sıcaklığında ve $p=3,18$ MPa yüzey basıncı için kayma hızı ile sürtünme katsayısının değişimi çalışmada kullanılan tüm poliamidler için görülmektedir. Eğriden görüleceği üzere döküm poliamid 6 ile poliamid 66 birbirine oldukça yakın bir değişim göstermekle birlikte poliamid 66 biraz daha düşük bir sürtünme katsayısı vermektedir. Poliamid 6 ve MoS₂ katkılı poliamid 66 ise hemen hemen aynı değişimi daha yüksek sürtünme katsayısı değerleri için göstermektedir. Genel olarak poliamid 66'a MoS₂ katkısı ile sürtünme katsayısında belirgin bir artış görülmektedir. Benzer şekilde döküm poliamide yağ emdirilmesi ve MoS₂ katkısında sürtünme katsayısını artırıcı yönde bir etki yaptığı söylenebilir. Poliamid 4/6'nın ise poliamid 6'dan bir miktar düşük sürtünme katsayısı göstermesine karşın diğer numunelerden yüksek bir değişim verdiği söylenebilir.

Şekil A.39' da 60°C çalışma sıcaklığında kayma hızı ile sürtünme katsayısının değişimi $p=0,94$ MPa yüzey basıncı için çalışmada kullanılan tüm numuneler için görülmektedir. En düşük sürtünme katsayısını döküm poliamid 6 göstermektedir. Poliamid 66 da benzer bir değişimi çok az bir artışla göstermektedir. Poliamid 4/6, MoS₂ katkılı poliamid 66 ve MoS₂ katkılı döküm poliamid 6 birbirine çok yakın bir değişim göstermektedir. Bu çalışma şartları için yine poliamid 6 en yüksek sürtünme katsayısını vermektedir.

Şekil A.40'da benzer bir eğri 60°C çalışma sıcaklığı ve $p=2,1$ MPa yüzey basıncı için görülmektedir. Poliamid 66 ile döküm poliamid 6 en düşük sürtünme katsayısının hemen hemen aynı bir değişim ile göstermektedir. Poliamid 4/6 ile poliamid 6 en yüksek sürtünme katsayısını göstermektedirler. Düşük kayma hızlarında MoS₂ katkılı poliamid 66 bunlardan biraz düşük bir sürtünme katsayısı gösterirken kayma hızı ile artan sürtünme katsayısı aynı düzeye ulaşmaktadır. MoS₂ katkılı döküm poliamid 6 ve yağ emdirilmiş döküm poliamid 6 birbirlerine çok yakın bir değişim göstermektedir. Bunlar poliamid 66 ve döküm poliamid 6' dan

oldukça yüksek bir sürtünme katsayısı gösterirken diğer numunelerden daha düşük bir değerde kalmaktadır.

Şekil A.41’de benzer bir eğri 60°C çalışma sıcaklığı ve $p=3,18$ MPa yüzey basıncı için görülmektedir. Poliamid 66 en düşük sürtünme katsayısını verirken döküm poliamid 6 bundan biraz yüksek bir değer vermektedir. Yine en yüksek sürtünme katsayısını poliamid 4/6 ile poliamid 6 göstermektedirler. Diğer numuneler bunlardan biraz düşük bir değişim göstermektedirler. Bu çalışma şartları içinde döküm poliamid 6 ile poliamid 66’a yapılan katkılar bir avantaj getirmemiş ve sürtünme katsayısını artırıcı yönde etki yapmıştır.

Şekil A.42’ de 80°C çalışma sıcaklığı için $p=0,94$ MPa yüzey basıncında sürtünme katsayısının kayma hızı ile değişimi tüm numuneler için görülmektedir. Bekleneceği gibi en düşük sürtünme katsayısını döküm poliamid 6 göstermektedir. Ancak yağ emdirilmiş döküm poliamid 6 ve poliamid 66, buna oldukça yakın bir değer göstermektedirler. Şimdiye kadarki değişimlerde daha yüksek sürtünme katsayısı gösteren poliamid 4/6 bu çalışma şartları için poliamid 66 ile hemen hemen aynı değerleri göstermektedir. Poliamid 6, MoS₂ katkılı döküm poliamid 6 ve MoS₂ katkılı poliamid 66 birbirine çok yakın ve daha yüksek bir sürtünme katsayısı göstermektedir.

Numunelerin sürtünme katsayısının 80°C çalışma sıcaklığı ve $p=2,1$ MPa yüzey basıncı için kayma hızı ile değişimi toplu olarak Şekil A.43’de görülmektedir. En düşük sürtünme katsayısını poliamid 66 ile döküm poliamid 6 göstermektedir. Diğer numuneler birbirine çok yakın ve daha yüksek bir değer göstermektedir. Ancak poliamid 6 orta hızlara kadar bu numunelerle aynı karakteristiği gösterirken bu hızlardan sonra kayda değer bir oranda artmaktadır.

Numunelerin sürtünme katsayısının 80°C çalışma sıcaklığı ve $p=3,18$ MPa yüzey basıncı için kayma hızı ile değişimi toplu olarak Şekil A.44’de görülmektedir. Genel olarak benzer bir değişim eğriler incelendiğinde görülmektedir. Poliamid 66 en düşük sürtünme katsayısını vermektedir. Poliamid 6 ve MoS₂ katkılı poliamid 66 birbirine çok yakın ve daha yüksek bir sürtünme katsayısı değişimi göstermektedir. Poliamid 66’a MoS₂ katkısı belirgin olarak sürtünme katsayısını yükseltmiştir.

Şekil A.45’de 100°C çalışma sıcaklığı ve $p=0,94$ MPa yüzey basıncı için kayma hızı ile sürtünme katsayısının değişimi tüm numuneler için toplu olarak görülmektedir.

Döküm poliamid 6 en düşük sürtünme katsayısını göstermektedir. Yağ emdirilmiş döküm poliamid 6 ile poliamid 66 birbirlerine oldukça yakın ve döküm poliamid 6' dan biraz yüksek bir sürtünme katsayısı vermektedir. Düşük kayma hızlarında MoS₂ katkılı poliamid 66 'nın sürtünme katsayısı yağ emdirilmiş döküm poliamid ve poliamid 66' oldukça yakın bir değerdedir. Ancak kayma hızı arttıkça sürtünme katsayısı daha büyük bir değere ulaşmaktadır. Poliamid 4/6 ile MoS₂ katkılı döküm poliamid 6 buna yakın bir değerdedir. Aynı şekilde poliamid 6 en yüksek sürtünme katsayısını göstermektedir.

Şekil A.46'da 100°C çalışma sıcaklığı ve p=2,1 MPa yüzey basıncı için kayma hızı ile sürtünme katsayısının değişimi tüm numuneler için toplu olarak görülmektedir. Eğrilerden görüleceği gibi döküm poliamid 6 ile poliamid 66 hemen hemen üst üste ve en düşük sürtünme katsayısı vermektedir. Poliamid 4/6, yağ emdirilmiş döküm poliamid 6, MoS₂ katkılı döküm poliamid 6 ve MoS₂ katkılı poliamid 66 düşük hızlarda birbirlerine çok yakın değerlerde salınmaktadırlar. Kayma hızı arttıkça MoS₂ katkılı döküm poliamid 6 'nın sürtünme katsayısı daha hızlı artarak diğerlerinden biraz yükselmekte ve hemen hemen poliamid 6'nın değişimine yaklaşmaktadır. Yine en yüksek sürtünme katsayısı değişimin poliamid 6 vermiştir.

Şekil A.47'de 100°C çalışma sıcaklığı ve p=3,18 MPa yüzey basıncında benzer eğriler görülmektedir. Burada da döküm poliamid 6 ile poliamid 66 hemen hemen üst üste ve en düşük sürtünme katsayısını vermektedir. Yine düşük hızlarda poliamid 4/6, yağ emdirilmiş döküm poliamid 6, MoS₂ katkılı döküm poliamid 6 ve poliamid 6 birbirlerine çok yakın değerlerde salınmaktadırlar. Kayma hızı arttıkça poliamid 4/6 ve yağ emdirilmiş döküm poliamid 6 daha düşük bir yükselme gösterirken poliamid 6 ve MoS₂ katkılı döküm poliamid 6 daha yüksek bir değişim göstermektedirler. Bu çalışma şartlarında diğerlerinden farklı olarak MoS₂ katkılı poliamid 66 en yüksek sürtünme katsayısı değişimini göstermektedir.

Şekil A.48-A.50'de 40°C çalışma sıcaklığı ve sırasıyla v=0,19 m/sn, v=0,8 m/sn, v=1,6 m/sn kayma hızlarında sürtünme katsayısının yüzey basıncı ile değişimi tüm numuneler için toplu olarak görülmektedir. Genel olarak düşük yüzey basınçlarında döküm poliamid 6 avantajlı iken yüzey basıncı attıkça daha düşük bir salınım yapan poliamid 66 avantajlı olmaktadır. Düşük ve orta hızlarda poliamid 6, poliamid 4/6 ve MoS₂ katkılı poliamid 66 sürtünme katsayısı yüzey basıncının değişimi birbirine yakın ve daha yüksek olmaktadır. v=1,6 m/sn kayma hızı için düşük yüzey

basınçlarında poliamid 4/6 hemen hemen poliamid 66 seviyesinde bir sürtünme katsayısı gösterirken artan yüzey basıncı ile bir miktar artmaktadır. Ancak bu kayma hızında poliamid 6, 2 MPa' dan düşük yüzey basınçlarında en yüksek sürtünme katsayısını gösterirken artan yüzey basıncı ile bir miktar düşme gözlenmektedir. Döküm poliamide yağ emdirilmesi ve MoS₂ katılması sürtünme katsayısını düşürücü yönde etki yapmamıştır. Aynı şekilde Poliamid 66'a MoS₂ katılması da bir avantaj getirmemiştir.

Şekil A.51-A.53'de 60°C çalışma sıcaklığı ve sırasıyla $v=0,19$ m/sn, $v=0,8$ m/sn, $v=1,6$ m/sn kayma hızlarında sürtünme katsayısının yüzey basıncı ile değişimi tüm numuneler için toplu olarak görülmektedir. Benzer şekilde poliamid 66 ve döküm poliamid 6'nın sürtünme katsayısına artan yüzey basıncı pek etki etmemekte aynı zamanda da düşük bir değer göstermektedir. Diğer numunelerde artan yüzey basıncı ile sürtünme katsayısının 2 MPa yüzey basıncı civarına kadar arttığı daha sonra belli bir değer etrafında kaldığı görülmektedir. Özellikle poliamid 4/6 artan yüzey basıncı ile belirgin bir değişim göstermektedir. Poliamid 6 ise yüksek bir sürtünme katsayısı vermesine karşılık yüzey basıncının artmasından pek etkilenmemektedir. Benzer şekilde bu katkıların pek bir avantaj getirmediği yine görülmektedir.

Şekil A.54-A.56'da 80°C çalışma sıcaklığı ve sırasıyla $v=0,19$ m/sn, $v=0,8$ m/sn, $v=1,6$ m/sn kayma hızlarında sürtünme katsayısının yüzey basıncı ile değişimi tüm numuneler için toplu olarak görülmektedir. Beklenildiği gibi poliamid 66 ve döküm poliamid 6 en düşük sürtünme katsayısını gösterirken yüzey basıncı pek etkili olmamaktadır. Diğer numuneler birbirine oldukça yakın ve daha yüksek bir değişim göstermektedirler. Bu çalışma şartlarında genel olarak yüzey basıncının sürtünme katsayısına pek etkisi olmadığı söylenebilir. Ancak $v=1,6$ m/sn kayma hızı için poliamid 6'nın sürtünme katsayısı artan yüzey basıncı ile bir dalgalanma göstermektedir.

Şekil A.57-A.59'da 100°C çalışma sıcaklığı ve sırasıyla $v=0,19$ m/sn, $v=0,8$ m/sn, $v=1,6$ m/sn kayma hızlarında sürtünme katsayısının yüzey basıncı ile değişimi tüm numuneler için toplu olarak görülmektedir. Döküm poliamid 6 düşük sürtünme katsayısına rağmen yüzey basıncı artışı ile bir dalgalanma göstermektedir. Poliamid 66 aynı seviyede bir sürtünme katsayısı gösterirken yüzey basıncı artışından daha az etkilenmektedir. Poliamid 6 dışındaki diğer numuneler birbirlerine oldukça yakın ve benzer karakterde bir değişim göstermektedirler. Poliamid 6 ise $v=0,19$ m/sn kayma

hızında diğer numunelere benzer bir değişim gösterirken diğer kayma hızlarında düşük yüzey basınçlarında daha yüksek bir sürtünme katsayısı gösterirken artan basınçla çok az bir azalma göstermektedir.

Şekil A.60' da poliamid 4/6'nın $p=3$ MPa yüzey basıncı ve $v=0,33$ m/sn kayma hızında farklı çalışma sıcaklıkları için aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi verilmektedir. Genel olarak her çalışma sıcaklığı için aşınma hızının kayma mesafesi ile azaldığı görülmektedir. 40°C çalışma sıcaklığı için oldukça düşük bir aşınma hızı değişimi gösterirken 60°C ' de buna oranla oldukça yüksek bir aşınma hızı göstermektedir. Diğer sıcaklıklarda 60°C 'e yakın fakat daha düşük bir aşınma hızı gözlenmektedir.

Şekil A.61' de poliamid 66'nın $p=3$ MPa yüzey basıncı ve $v=0,33$ m/sn kayma hızında farklı çalışma sıcaklıkları için aşınma hızının değişimi görülmektedir. Burada yukarıdakinden farklı olarak 40°C ve 60°C 'de birbirine yakın ve düşük bir aşınma hızı görülmektedir. Çalışma sıcaklığı arttıkça aşınma hızının değeri de bariz bir oranda artmaktadır. Ancak kayma mesafesi ile azalan bir karakteristik göstermektedir.

Şekil A.62' de poliamid 6'nın $p=3$ MPa yüzey basıncı ve $v=0,33$ m/sn kayma hızında farklı çalışma sıcaklıkları için aşınma hızının değişimi görülmektedir. Benzer bir değişim bu numune içinde geçerlidir. Ancak 60°C ' de diğerlerinden farklı olarak aşınma hızı kayma mesafesi ile artan bir karakteristik göstermektedir.

Şekil A.63' de MoS_2 katkılı poliamid 66'nın $p=3$ MPa yüzey basıncı ve $v=0,33$ m/sn kayma hızında farklı çalışma sıcaklıkları için aşınma hızının değişimi görülmektedir. 40°C çalışma sıcaklığında aşınma hızı oldukça düşük ve kayma mesafesi ile çok az artma göstermektedir. Yüksek çalışma sıcaklığında daha büyük bir aşınma hızı görülmektedir. Ancak kayma mesafesi ile aşınma hızında belirgin bir azalma söz konusudur.

Şekil A.64' de MoS_2 katkılı döküm poliamid 6'nın $p=3$ MPa yüzey basıncı ve $v=0,33$ m/sn kayma hızında farklı çalışma sıcaklıkları için aşınma hızının değişimi görülmektedir. 100°C çalışma sıcaklığı için daha fazla bir aşınma hızı göstermesine karşın diğer sıcaklıklarda birbirlerine oldukça yakın bir değişim göstermektedir. Bu numunede kayma mesafesi ile azalan bir aşınma hızı karakteristiği vermektedir.

Şekil A.65' de döküm poliamid 6'nın $p=3$ MPa yüzey basıncı ve $v=0,33$ m/sn kayma hızında farklı çalışma sıcaklıkları için aşınma hızının değişimi görülmektedir. 40°C hemen hemen kayma mesafesi ile sabit bir aşınma hızı gözlenmektedir. 60°C ve 80°C ' de birbirine çok yakın bir aşınma hızı kayma mesafesi ile oldukça düşük oranda azalarak görülmektedir. 100°C ' de ise diğer çalışma sıcaklıklarına oranla oldukça yüksek bir aşınma hızı yine kayma mesafesi ile azalan karakterde görülmektedir.

Şekil A.66' de yağ emdirilmiş döküm poliamid 6'nın $p=3$ MPa yüzey basıncı ve $v=0,33$ m/sn kayma hızında farklı çalışma sıcaklıkları için aşınma hızının değişimi görülmektedir. 40°C ' de kayma mesafesi ile aşınma hızının değişimi hemen hemen aynı kalmaktadır. Diğer numunelere benzer şekilde çalışma sıcaklığının artması aşınma hızı arttırmaktadır. 100°C ' de diğer sıcaklıklara oranla çok daha fazla bir aşınma görülürken kayma mesafesi ile azalan bir karakteristiktir.

Şekil A.67-A70' de dört farklı çalışma sıcaklığı için çalışmada kullanılan bütün numunelerin aşınma hızları kayma mesafesine bağlı olarak verilmiştir. Bu eğrilerde göze çarpan ilk husus poliamid 4/6' nın diğerlerine göre daha fazla aşınmaya maruz kaldığıdır. Bunun yanı sıra aşınma bakımından en tatminkar sonuçlara döküm poliamid 6 da rastlanmıştır. Bir iki istisna dışında aşınma hızı kayma mesafesi arttıkça azalmaktadır. 100°C çalışma sıcaklığında tüm malzemelerin aşınma eğrileri diğer sıcaklıklardan farklı olarak birbirlerine çok yaklaşılmaktadır. Bu sıcaklık değerinde, düşük sıcaklıklarda aşınma bakımından mukavim olan malzemeler bu özelliklerini nispeten kaybetmektedirler. Döküm poliamid 6'a yağ emdirme ve MoS_2 ilavesi gibi katkıların düşük sıcaklıklarda tribolojik özelliklerde belirgin bir iyileşme sağlanmadığı gözlenmektedir. Buna karşılık 100°C çalışma sıcaklıklarında MoS_2 ilavesinin aşınma mukavemetini önemli ölçüde arttırdığı söylenebilir. Poliamid 66'a MoS_2 ilavesi ise düşük sıcaklıklarda aşınma hızını düşürücü bir etki yapmaktadır. Ancak 100°C deki değişim incelendiğinde poliamid 66 ile MoS_2 katkılı poliamid 66 birbirine oldukça yakın bir değişim gösterdiği söylenebilir.

Şekil A.71-A.77'de söz konusu numunelerin farklı çalışma sıcaklıklarında $p=2$ MPa yüzey basıncı ve $v=0,5$ m/sn kayma hızı için aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi görülmektedir. Daha önceki çalışma şartlarına benzer şekilde tüm numunelerde kayma mesafesi ile aşınma hızının azaldığı söylenebilir. Yine benzer

şekilde 40°C çalışma sıcaklığında daha düşük aşınma hızları gözlenirken yüksek çalışma sıcaklığında daha büyük aşınma hızları görülmektedir.

Şekil A.78-A81' de dört farklı çalışma sıcaklığı ve $p=2$ Mpa ve $v=0,5$ m/sn için çalışmada kullanılan bütün numunelerin aşınma hızları kayma mesafesine bağlı olarak verilmiştir. 40°C çalışma sıcaklığında yağ emdirilmiş döküm poliamid 6'nın aşınma bakımından daha mukavim olduğu görülmektedir . Fakat çalışma sıcaklığı arttıkça döküm poliamid 6 ile hemen hemen aynı aşınma hızına ulaşmaktadır. Aynı şekilde 40°C çalışma sıcaklığında diğer numunelerden daha fazla aşınma gösteren poliamid 6 artan sıcaklıkla bu dezavantajını kaybetmektedir. Düşük çalışma sıcaklıklarında yağ emdirme ve MoS_2 gibi katkıların aşınma hızını azaltıcı bir etki yaptığı söylenebilir. Ancak sıcaklık arttıkça fazla bir avantaj sağlamadığı hatta yüksek çalışma sıcaklığında aşınma hızını arttırdığı söylenebilir.

Şekil A.82'de poliamid 4/6'nın aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi iki farklı çalışma şartı için görülmektedir. 40°C çalışma sıcaklığında yüzey basıncı ve kayma hızının değişimi aşınma hızının karakteristiğine pek etki etmemektedir. Ancak sıcaklık arttıkça $p=2$ Mpa yüzey basıncı ve $v=0,5$ m/sn kayma hızı şartlarında daha az bir aşınma görülmektedir.

Şekil A.83'de benzer eğriler poliamid 66 için verilmiştir. Aynı pv değerinde farklı yüzey basıncı ve kayma hızlarında çalışmak bu numunenin aşınma karakteristiğini pek değiştirmemiştir. Aşınma hızının değeri genel olarak yüksek kayma hızı ve düşük yüzey basıncında biraz daha düşük bir değer vermiştir.

Şekil A.84' de poliamid 6'nın farklı çalışma şartlarındaki aşınma hızı ile kayma mesafesinin değişimi görülmektedir. 40°C çalışma sıcaklığında yüksek basınç ve düşük kayma hızı şartlarında aşınmaya daha mukavim davranmaktadır. 60°C ve 80°C çalışma sıcaklıklarında çalışma şartlarından aşınma hızının pek etkilenmediği söylenebilir. Yüksek çalışma sıcaklığında ise düşük basınç ve yüksek hızda daha iyi bir aşınma davranışı göstermektedir.

Şekil A.85' de MoS_2 katkılı poliamid 66'nın farklı çalışma şartlarındaki aşınma hızı ile kayma mesafesinin değişimi görülmektedir. Eğriler incelendiğinde çalışma şartlarındaki değişimin aşınma karakteristiğini bu numune için değiştirmediğini söylenebilir.

Şekil A.86' da MoS₂ katkılı döküm poliamid 6'nın farklı çalışma şartlarındaki aşınma hızı ile kayma mesafesinin değişimi görülmektedir. Düşük sıcaklıklarda aşınma karakteristiğini çalışma şartlarının pek etkilemediği görülmektedir. Ancak yüksek sıcaklıklarda yüksek kayma hızı ve düşük yüzey basıncı şartlarında daha fazla aşındığı söylenebilir.

Şekil A.87' de döküm poliamid 6'nın farklı çalışma şartlarındaki aşınma hızı ile kayma mesafesinin değişimi görülmektedir. Eğriler incelendiğinde çalışma şartlarındaki değişimin aşınma karakteristiğini bu numune için değiştirmedeğini söylenebilir. Ancak yüksek çalışma sıcaklığında düşük yüzey basıncı ve yüksek kayma hızı için aşınmaya daha mukavim olduğu ve kayma mesafesi ile aşınma hızının pek değişmediği söylenebilir.

Şekil A.88' de yağ emdirilmiş döküm poliamid 6'nın farklı çalışma şartlarındaki aşınma hızı ile kayma mesafesinin değişimi görülmektedir. Eğriler incelendiğinde çalışma şartlarındaki değişimin aşınma karakteristiğini bu numune için değiştirmedeğini söylenebilir.

Şekil A.89-A.109'da sırasıyla poliamid 4/6, poliamid 66, poliamid 6, MoS₂ katkılı poliamid 6, MoS₂ katkılı döküm poliamid 6, döküm poliamid 6 ve yağ emdirilmiş döküm poliamid 6'nın oda sıcaklığında ve 100°C' deki aşınmış yüzeylerinin farklı büyütme oranlarındaki filmleri verilmektedir.

Poliamid 4/6 da oda sıcaklığında belirgin bir aşınma izi görülmemektedir. Yüksek sıcaklıkta ise aşınma izlerinde belirli bir artma ve derinleşme görülmektedir. Kayma yönü kağıt düzleminde sağdan sola doğrudur. Poliamid 66 için oda sıcaklığında kayma yönüne paralel yoğun aşınma izleri görülmektedir. Yüksek sıcaklıkta ise kayma doğrultusunda belirgin şekilde malzemenin yumuşayarak yönlendiği söylenebilir. MoS₂ katkılı poliamid 66' da da benzer bir durumun olduğu gözlenmektedir.

Poliamid 6'da özellikle yüksek bir aşınma hızı vermesine karşılık oda sıcaklığında belirgin bir aşınma izi görülmemektedir. Ancak yüksek sıcaklıkta biraz daha belirgin aşınma izlerine rastlanmaktadır. MoS₂ katkılı döküm poliamid 6'nın yüzey filmleri incelendiğinde oda sıcaklığında belirgin bir aşınma izine rastlanmamaktadır. Ancak sıcaklık arttığında aşınma izlerinde bir yoğunlaşma ve derinleşme görülmektedir. Döküm poliamid 6 için oda sıcaklığında yoğun aşınma izleri görülmektedir. Yüksek

sıcaklıktaki yüzey filmleri incelendiğinde ise kayma doğrultusunda malzemede belirgin bir yönlenmenin olduğu görülmektedir. Yağ emdirilmiş döküm poliamid 6'da döküm poliamid 6 ile benzer bir davranış göstermektedir.

Tablo 5.1'de sürtünme deney sonuçları ve Tablo 5.2'de aşınma deney sonuçları toplu olarak görülmektedir.

Tablo 5.1 Sürtünme deney sonuçları

Numune	Sürtünme katsayısının kayma hızı, yüzey basıncı ve sıcaklıkla değişimi	Sürtünme katsayısının değişim aralığı
Poliamid 4/6	$v \uparrow, \mu \uparrow$ $p \uparrow, \mu \uparrow$ $T \uparrow, \mu \uparrow \rightarrow$	0,20-0,35
Poliamid 66	$v \uparrow, \mu \uparrow$ $p \uparrow, \mu \rightarrow$ $T \uparrow, \mu \uparrow \rightarrow$	0,17-0,25
Poliamid 6	$v \uparrow, \mu \uparrow$ $p \uparrow, \mu \uparrow \rightarrow$ $T \uparrow, \mu \uparrow \rightarrow$	0,20-0,40
MoS ₂ katkılı poliamid 6	$v \uparrow, \mu \uparrow$ $p \uparrow, \mu \uparrow$ $T \uparrow, \mu \uparrow \rightarrow$	0,15-0,30
MoS ₂ katkılı döküm poliamid 6	$v \uparrow, \mu \uparrow$ $p \uparrow, \mu \rightarrow$ $T \uparrow, \mu \uparrow \rightarrow$	0,20-0,33
Döküm poliamid 6	$v \uparrow, \mu \uparrow$ $p \uparrow, \mu \uparrow \rightarrow$ $T \uparrow, \mu \uparrow \rightarrow$	0,11-0,25
Yağ emdirilmiş döküm poliamid 6	$v \uparrow, \mu \uparrow$ $p \uparrow, \mu \uparrow$ $T \uparrow, \mu \uparrow \rightarrow$	0,15-0,25

Sıcaklık arttıkça özellikle camlaşma sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda (PA 6 için 40-50°C) elastiklik modülü ve kayma gerilmesinde bir azalma olur. Buna bağlı olarak gerçek temas alanında bir artma meydana gelir. Bu durum, deneyler sırasında gözlenen tutma –kayma (stick-slip) olayı ile kendini göstermektedir. Artan kayma hızı ile adhezyonun artması sürtünme katsayısında da bir artışa neden olur. Yine aynı nedenle yüzey basıncı ile sürtünme katsayısı bir artma göstermekle birlikte kayma hızı kadar belirgin değildir. Çalışma sıcaklığı arttıkça sürtünme katsayısında bariz bir artışın görülmemesi ise yumuşayan malzemenin yağlayıcı etki yapması olarak açıklanabilir [21,44].

Tablo 5.2 Aşınma deney sonuçları

Numune	$p_1=3$ MPa $v_1=0,33$ m/sn	Aşınma Hızı (gr/Nm.m)x10 ⁻⁸		Malzeme Kaybı μm/100 saat	
		40°C	100°C	40°C	100°C
Poliamid 4/6	Genel olarak aşınma hızında, kayma mesafesi ile azalan, çalışma sıcaklığının yükselmesi ile de artan bir karakteristik gözlenmektedir. 40°C çalışma sıcaklığında, döküm PA 6'nın aşınma hızı en düşüktür. Çalışma sıcaklığı arttıkça katkı poliamidler daha iyi bir aşınma direnci göstermektedirler. 100°C çalışma sıcaklığı için en düşük aşınma hızını MoS ₂ katkı döküm PA 6 vermektedir.	5,2	11	7	17
Poliamid 66		7,8	15	10	18,7
Poliamid 6		4,8	12	7,2	24
MoS ₂ katkı poliamid 6		4,4	13,5	12,5	26,6
MoS ₂ katkı döküm poliamid 6		4	9,3	5,8	17,2
Döküm poliamid 6		2,7	14,6	6	20,5
Yağ emdirilmiş döküm poliamid 6		3,7	12	6,5	23
	$p_2=2$ MPa $v_2=0,5$ m/sn				
Poliamid 4/6	Benzer bir aşınma karakteristiği bu çalışma şartları içinde gözlenmektedir. Tüm çalışma sıcaklıklarında yağ emdirilmiş döküm PA 6 ile döküm PA 6 en düşük aşınma hızını göstermiştir. MoS ₂ katkısının ise pek avantaj getirmediği görülmüştür.	9,2	11	8,5	24,7
Poliamid 66		5,9	12,8	5	11
Poliamid 6		9,3	11,8	9,2	14,4
MoS ₂ katkı poliamid 6		4,7	13,3	5,5	11,5
MoS ₂ katkı döküm poliamid 6		7,2	16	8	14,8
Döküm poliamid 6		5,3	11	5,2	12
Yağ emdirilmiş döküm poliamid 6		4,2	9,3	5	10

Polimer malzemelerin akma gerilmesi sıcaklığa ve zamana bağlıdır. Artan sıcaklıkla akma gerilmesinde de bir azalma görülmektedir. Bu nedenle yüksek sıcaklıklarda ısı yumuşamadan dolayı bir malzeme akışı ve daha yüksek bir aşınma hızı gözlenmektedir. Aynı zamanda bölgesel olarak eriyen malzeme yağlayıcı etki yaparak aşınma hızının kayma mesafesi ile azalmasına neden olmaktadır [15,19].

MoS₂'nin çeliğe karşı sürtünme katsayısı 0,2-0,26 arasında değişmektedir[3]. Yapılan çalışmada MoS₂ katkılı numuneler kayma hızı ve yüzey basıncına bağlı olarak 0,2-0,3 arasında bir sürtünme katsayısı vermektedirler. Buna göre bu malzemeler için aradaki temasın MoS₂/çelik teması ağırlıklı olduğu ve katkılı poliamid türlerinin daha yüksek sürtünme katsayısı göstermelerinin bundan kaynaklandığı söylenebilir. Daha önce Bölüm 1.1 de literatür araştırmasında incelenen çalışmalarda da MoS₂ katkısının her çalışma şartında avantaj sağlamadığı görülmüştür [46, 48].

Günümüzde kuru sürtünme ve sınır sürtünme bölgesinde çalışan triboeleman çiftlerinin sürtünme ve aşınma karakteristiklerinin belirlenmesinde analitik veya sayısal yaklaşımlar bulunmasına karşın, bunlar içerdikleri malzeme ve ortam özelliklerine bağlı çok fazla sayıda parametre nedeni ile pratikte kullanılabilir durumda değildirler. Bu nedenle söz konusu karakteristiklerinin belirlenmesindeki en güvenilir yol laboratuvar şartlarında yapılan kontrollü sistematik deneylerdir. Takdim edilen çalışmanın da amacı polimer malzemelerin sürtünme ve aşınma karakteristiğine sıcaklığın etkisi konusunda literatürdeki veri tabanına katkıda bulunmaktır.

Takdim edilen çalışmada aşınma deneyleri seçilen p_v limiti değerinde farklı iki kayma hız ve yüzey basıncı değerlerinde yapılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde aynı p_v limiti için farklı kayma hızı ve yüzey basıncı için aşınma karakteristiğinin pek değişmediği görülmüştür. Farklı çalışma sıcaklıkları için p_v limiti değiştirilerek aşınma hızının değişiminin incelenmesi ve bu sonuçlar yardımı ile aşınma faktörünün tanımlanabilmesi bu çalışmanın devamı olarak düşünülebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Progelhof, R. C., Throne, J. L.** 1993. *Polymer Engineering Principles*, Hanser Publisher, Munich.
- [2] **Critchley, J. P., Knight, G. J and Wright, 1983. W. W.**, *Heat-Resistant Polymers*. Plenum Press, New York and London.
- [3] **Moore, D. F.**, 1975. *Principles and Applications of Tribology*, Pergamon Press, Oxford.
- [4] **Bartanev, G. M., Lavrentev, V. V.**, 1981. *Friction and Wear of Polymers*. Elsevier Sc. Pub.,Amsterdam..
- [5] **Yamaguchi, Y.**, 1990. *Tribology of Plastic Materials*. Elsevier Sc. Pub., Amsterdam.
- [6] **Uetz, H. und Wiedermeyer, J.**, 1984. *Tribologie der Polymere*. Carl Hanser Verlag, München.
- [7] **Neale, M. J.**, 1973. *Tribology Handbook*, Butterworths, London.
- [8] **Crawford, R. J.**, 1987. *Plastic Engineering*. Pergamon Press, Oxford.
- [9] **Luise, R. R.**, 1997. *Applications of High Temperature Polymers*. CRC Press, Florida.
- [10] **Kohan, M. L.**, 1995. *Nylon Plastics Handbook*. Carl Hanser Verlag, Munich
- [11] **Akkurt, S.**, 1991. *Plastik Malzeme Bilgisi*. Birsen Yayınevi, Istanbul.
- [12] **Belofsky, H.**, 1995. *Plastics: Product Design and Process Engineering*. Carl Hanser Verlag, Munich.
- [13] **Rosata, D. V., Mattia, D. P., Rosata, D. V.**, 1991. *Designing with Plastics and Composites: A Handbook*
- [14] **Mc Laren, K.G., Tabor, D.**, 1964. Friction of polymers at engineering speeds: Influence of speed, Temperature of Lubricants, *Wear*, 8, 79-83.
- [15] **Rhee, S.H., Ludema, K.C.**, 1978. Mechanisms of formation of polymeric transfer films, *Wear*, 46, 231-240.
- [16] **Wu, J.S., Walter, R.**, Untersuchungen zum gleitverschlis von polymeren und Verbundwerkstoffen bei erhöhten Temperaturen, Q. Guo, *Shanghai Institute of Materials, Shanghai, PR. China*
- [17] **Friedrich, K., Karger-Kocsis, J., Lu, Z.**, 1991. Effects of steel counterface roughness and temperature on the friction and wear of PE(E)K composites under dry sliding conditions, *Wear*, 148, 235-247.

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

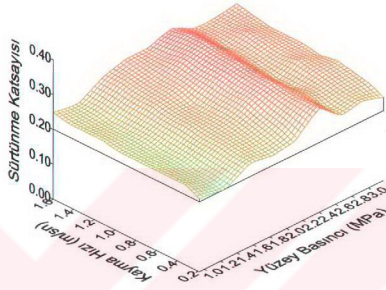
- [18] Tanaka, K., Uchiyama, Y., Toyooka, S., 1973. The mechanism of wear of polytetrafluoroethylene, *Wear*, 23, 153-172.
- [19] Uchiyama, Y., Tanaka, K., 1980. Wear laws for polytetrafluoroethylene, *Wear*, 58, 223-235.
- [20] Tanaka, K., Yamada, Y., 1985. Effect of temperature on the friction and wear of some heat-resistant polymers, *American Chemical Society*, 104-128.
- [21] Watanabe, M., Karasawa, M., Matsubara, K., 1968. The frictional properties of nylon, *Wear*, 12, 183-191.
- [22] Watanabe, M., Yamaguchi, H., 1986. The friction and wear properties of nylon, *Wear*, 110, 379-388.
- [23] Barrett, T. S., Stachowiak, G. W., Batchelor, A. W., 1992. Effect of roughness and sliding speed on the wear and friction of ultra-high molecular weight polyethylene, *Wear*, 153, 331-350
- [24] Sheiretov, T., Glabbeek, W.V., Cusano, C., 1995. Evaluation of the tribological properties of polyimide and poly(amide-imide) polymers in a refrigerant environment, *Tribology trans.*, 38, 914-922.
- [25] Hanchi, J., Eiss, N. S., 1994. The tribological behavior of blends of polyethereetherketone (PEEK) and polyetherimide (PEI) at elevated temperatures, *Tribology Trans.*37, 494-504.
- [26] Hanchi, J., Eiss, N. S., 1995. Preliminary study of the elevated temperature tribological bahavior of poly (ether-ether-ketone)-based in situ composites under unlubricated sliding conditions, *Tribology Trans.*,38, 305-310.
- [27] Hanchi, J., Eiss, N. S., 1996. Tribological behavior of polyetheretherketone, a thermotropic liquid crystalline polymer and in situ composites based on their blends under dry sliding conditions at elevated temperatures, *Wear*, 200, 105-121.
- [28] Hanchi, J., Eiss, N. S., 1997. Dry sliding friction and wear of short carbon – fiber-reinforced polyetheretherketone (PEEK) at elevated temperatures, *Wear*, 203-204, 380-386.
- [29] Uchiyama,Y.; Uezi,Y., Kudo, A., Kimura, T., 1993. Effect of temperature on the wear of unfilled and filled liquid crystal polymers, *Wear*, 162-164, 656-661.
- [30] Yang, E.L., Hirvonen, J.P., Toivanen, R.O., 1991. Effect of temperature on the transfer film formation in sliding contact of PTFE with stainless steel, *Wear*, 146, 367-376.
- [31] Pleskachevsky,Yu. M., Smurugov, V.A., 1997. Thermal fluctuations at PTFE friction and transfer, *Wear*, 209, 123-127.

- [32] Friedrich, K., LU, Z., Hager, A. M., 1995. Recent advances in polymer composites tribology, *Wear*, **190**, 139-144.
- [33] Flök, J., Friedrich, K., Yuan, Q., 1999. On the friction and wear behaviour of PAN and pitch-carbon fiber reinforced PEEK composites, *Wear*, **225-229**, 304-311.
- [34] Lu, Z. P., Friedrich, K., 1995. On sliding friction and wear of PEEK and its composites, *Wear*, **181-183**, 624-631.
- [35] Chitsaz-Zadeh, M. R., Eiss, N.S., Jr. 1986. Friction and wear of polyimide thin film, *Wear*, **110**, 359-368.
- [36] Czichos, H., 1983. Influence of adhesive and abrasive mechanisms on the tribological behaviour of thermoplastic polymers, *Wear*, **88**, 27-43.
- [37] Santner, E., Czichos, H., 1989. Tribology of polymers, *Tribology int.*, 103-109.
- [38] Lhymn, C., 1987. Effect of normal load on the specific wear rate of fibrous composite, *Wear*, **120**, 1-27.
- [39] Mens, J. W. M., Gee, A. W. J., 1991. Friction and wear behaviour of 18 polymers in contact with steel in environment of air and water, *Wear*, **149**, 255-268.
- [40] Tanaka, K., 1980. Friction and wear of semicrystalline polymers sliding against steel under water lubrication, *Transactions of ASME*, **102**, 526-533.
- [41] Tanaka, K., 1982. Transfer of semicrystalline polymers sliding against steel a smooth steel surface, *Wear*, **27**, 183-199.
- [42] Tanaka, K., Miyata, T., 1977. Studies on the friction and transfer of semi-crystalline polymers, *Wear*, **41**, 383-398.
- [43] Bolvari, A., Glenn, S., Janssen, R., Ellis, C., 1997. Wear and friction of aramid fiber and polytetrafluoroethylene filled composite, *Wear*, **203-204**, 697-702.
- [44] Clerico, M., 1969. A Study of the friction and wear of nylon against metal, *Wear*, **13**, 183-197.
- [45] De Valde, F., De Baets, P., 1997. The friction and wear behaviour of polyamide 6 sliding against steel at low velocity under high contact pressures, *Wear*, **209**, 106-114.
- [46] Holmberg, K., Wickström, G., 1987. Friction and wear tests of polymers, *Wear*, **115**, 95-105.
- [47] Gao, J., Mao, S., Liu, J., Feng, D., 1997. tribochemical effects of some polymers/stainless steel, *Wear*, **212**, 238-243.

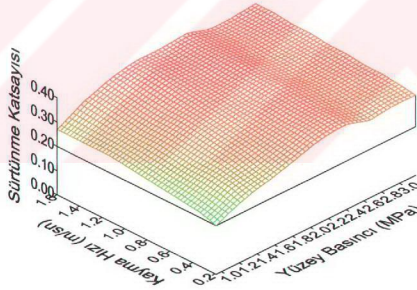
- [48] **Liu, W., Huang, C., Gao, L., Wang, J., Dang, H.,** 1991. Study of the friction and wear properties of MoS₂-filled nylon 6, *Wear*, **151**, 111-118.
- [49] **Bellow, D. G., Viswanath, N. S.,** 1993. An analysis of the wear of polymers, *Wear*, **162-164**, 1048-1053 .
- [50] **Aharoni, S.M.,** 1973. Wear of polymers by roll-formation, *Wear*, **25**, 309-327.
- [51] **Erhard, G.,** 1983. Sliding friction behaviour of polymer – polymer material combinations, *Wear*, **84**, 167-181.
- [52] **Vaziri, M., Stott, F. H., Spurr, R. T.,** 1998. Studies of the friction of polymeric materials, *Wear*, **122**, 313-327.
- [53] **Akkurt, S.,** 1994. The Frictional and Wear Behavior of Nylon 6, *Tr. Journal of Engineering and Environ. Sciences*, Tübitak, **18**, 375.
- [54] **Gediktaş, M., Temiz, V.,** 1999. Tribologische eigenschaften der gleitlagerbüchsen aus polymerwerkstoffen in wässriger umgebung, *Gedenkkolloquium Wolfgang Beitz*, Springer- Verlag, pp. 277-290
- [55] **Temiz, V., Parlar, Z.,** 1999. An experimental study on the tribological properties of internally lubricated and unlubricated poliamid 6, *Int. Conf. on Lubrication Techniques*, Istanbul, Türkiye, October 1999, pp. 126-133.
- [56] **Briscoe, B.J.,** 1981. Wear of polymers: an essay on fundamental aspects, *Tribology International*, **14**, 231-243.
- [57] **Biswas, S.K., Vijayan, K.,** 1992. Friction and wear of PTFE – a review, *Wear*, **158**, 193-211.
- [58] **Holman, J. P.,** 1994. Experimental Methods for Engineers, McGraw-Hill, New York.

EK A

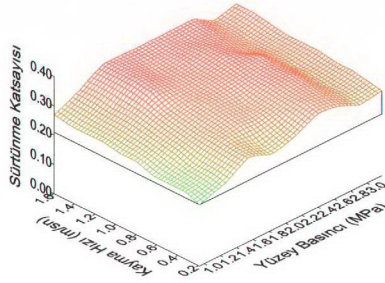
SONUÇ BÖLÜMÜNE AİT ŞEKİLLER



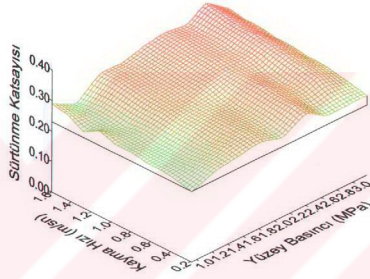
Şekil A.1 PA 4/6'nın 40°C de sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi



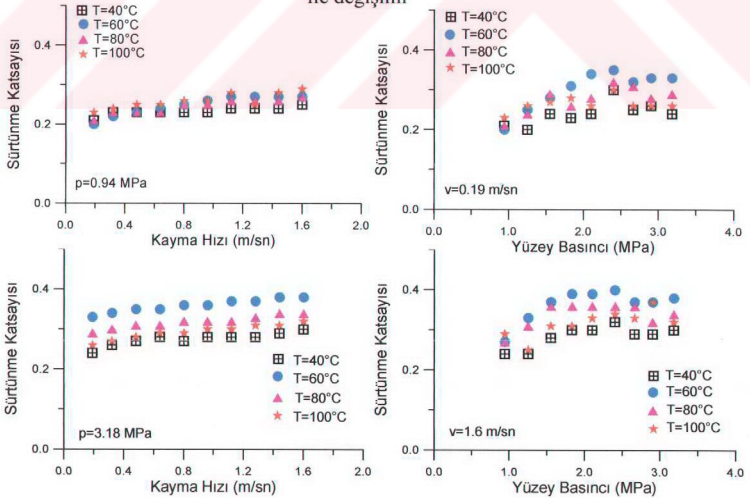
Şekil A.2 PA 4/6'nın 60°C de sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi



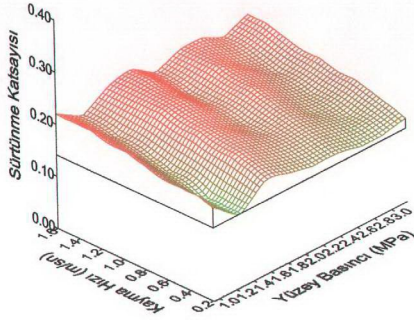
Şekil A.3 PA 4/6'nın 80°C de sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi



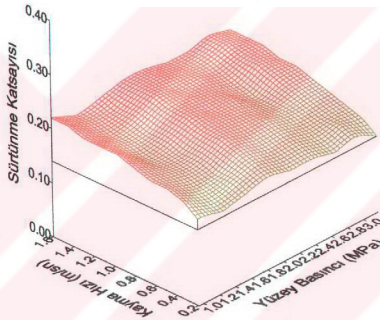
Şekil A.4 PA 4/6'nın 100°C de sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi



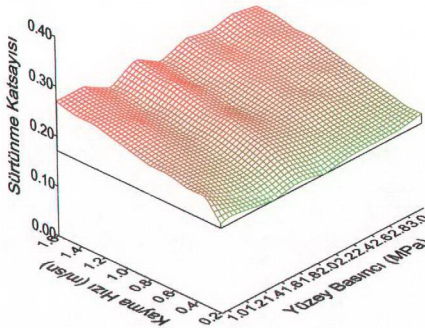
Şekil A.5 PA 4/6'nın farklı sıcaklıklarda sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi



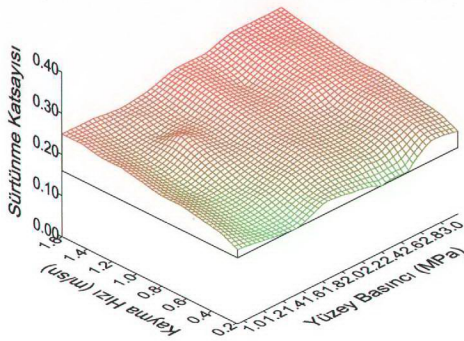
Şekil A.6 PA 66'nın 40°C de sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi



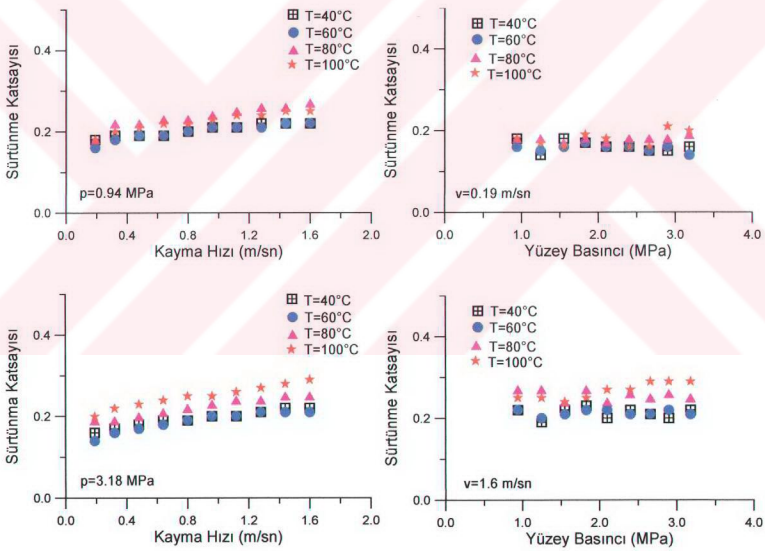
Şekil A.7 PA 66'nın 60°C de sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi



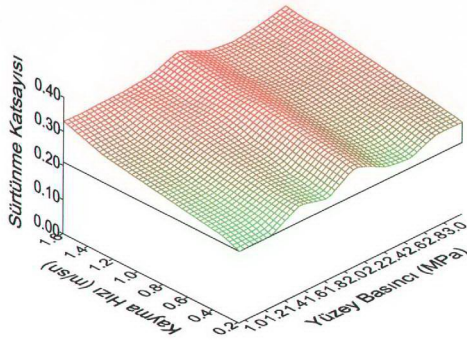
Şekil A.8 PA 66'nın 80°C de sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi



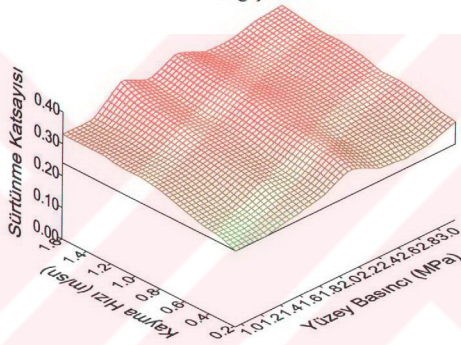
Şekil A.9 PA 66'nın 100°C de sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi



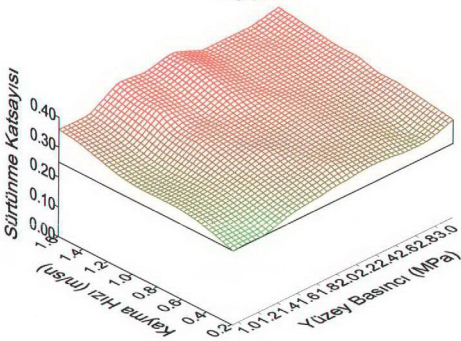
Şekil A.10 PA 66'nın farklı sıcaklıklarda sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi



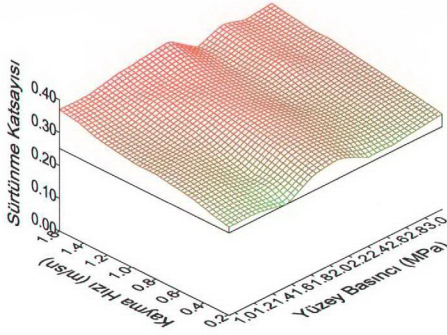
Şekil A.11 PA 6'nın 40°C de sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi



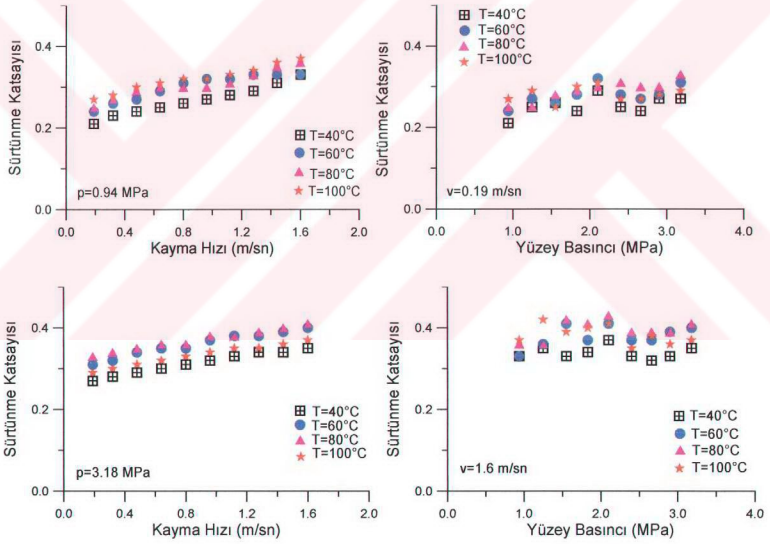
Şekil A.12 PA 6'nın 60°C de sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi



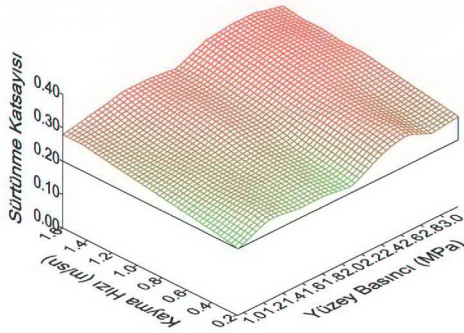
Şekil A.13 PA 6'nın 80°C de sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi



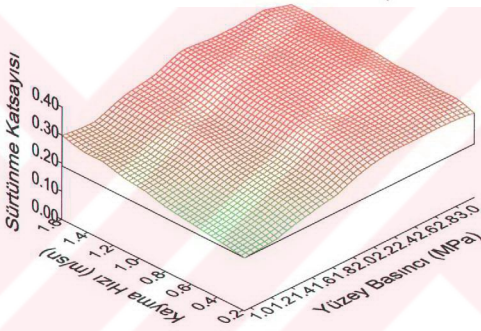
Şekil A.14 PA 6'nın 100°C de sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi



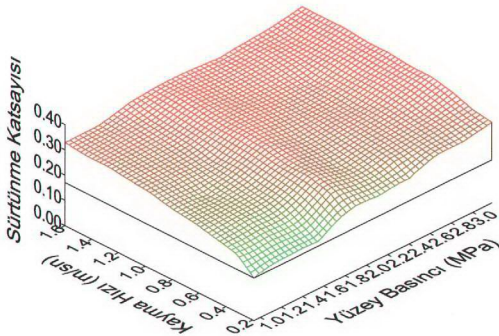
Şekil A.15 PA 6'nın farklı sıcaklıklarda sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi



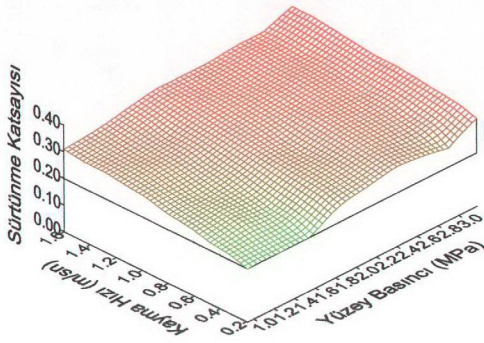
Şekil A.16 MoS₂ katkılı PA 66'nın 40°C de sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi



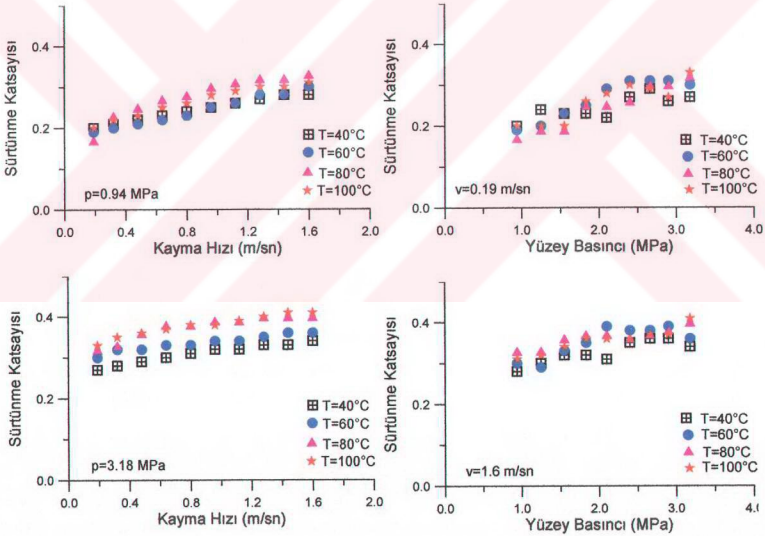
Şekil A.17 MoS₂ katkılı PA 66'nın 60°C de sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi



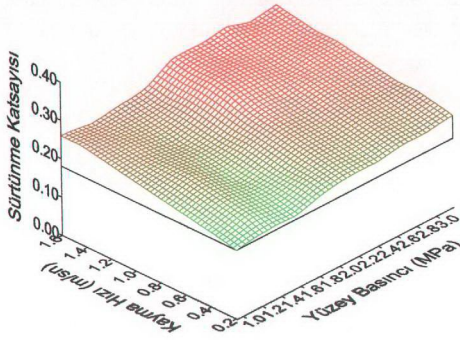
Şekil A.18 MoS₂ katkılı PA 66'nın 80°C de sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi



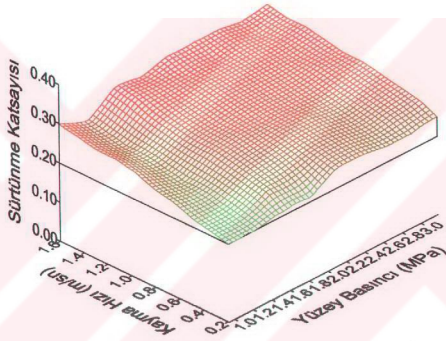
Şekil A.19 MoS₂ katkılı PA 66'nın 100°C de sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi



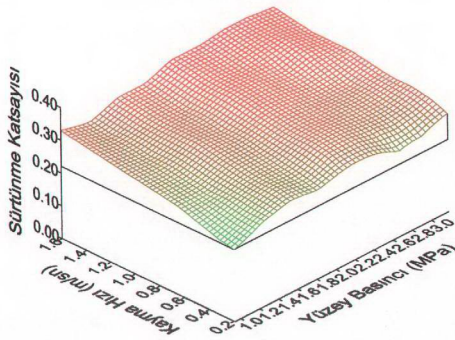
Şekil A.20 MoS₂ katkılı PA 66'nın farklı sıcaklıklarda sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi



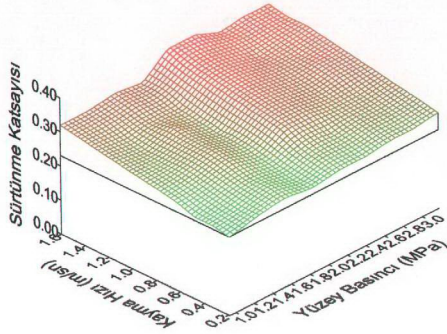
Şekil A.21 MoS₂ katkılı döküm PA 6'nın 40°C de sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi



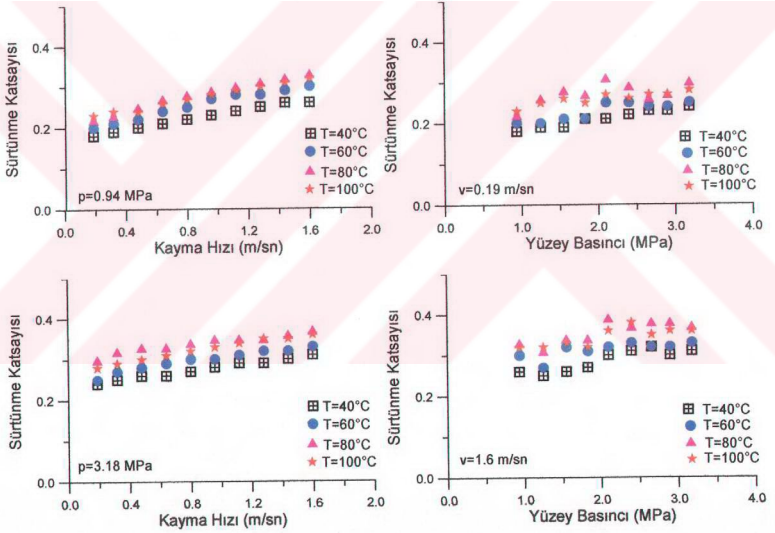
Şekil A.22 MoS₂ katkılı döküm PA 6'nın 60°C de sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi



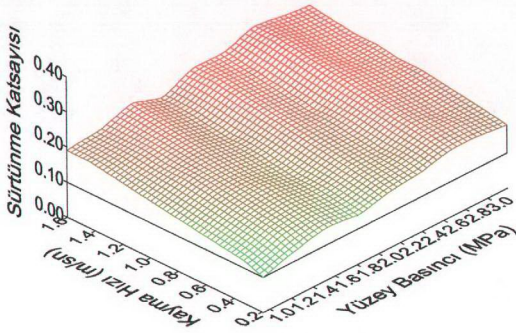
Şekil A.23 MoS₂ katkılı döküm PA 6'nın 80°C de sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi



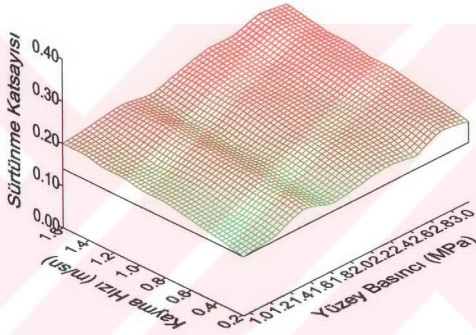
Şekil A.24 MoS₂ katkılı döküm PA 6'nın 100°C de sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi



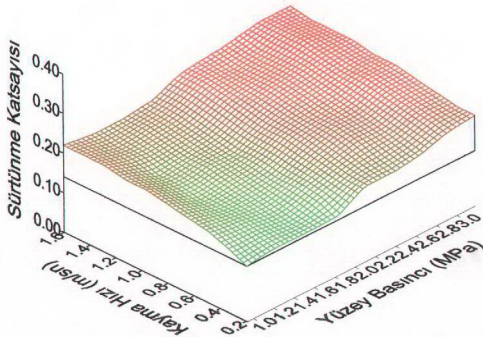
Şekil A.25 MoS₂ katkılı döküm PA 6'nın farklı sıcaklıklarda sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi



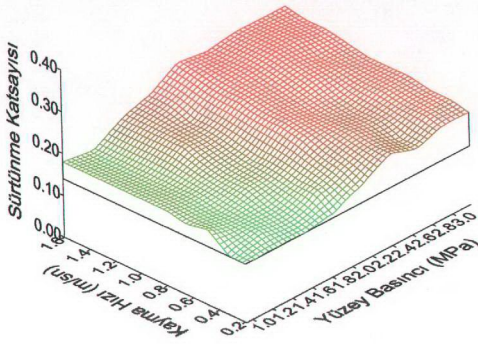
Şekil A.26 Döküm PA 6'nın 40°C de sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi



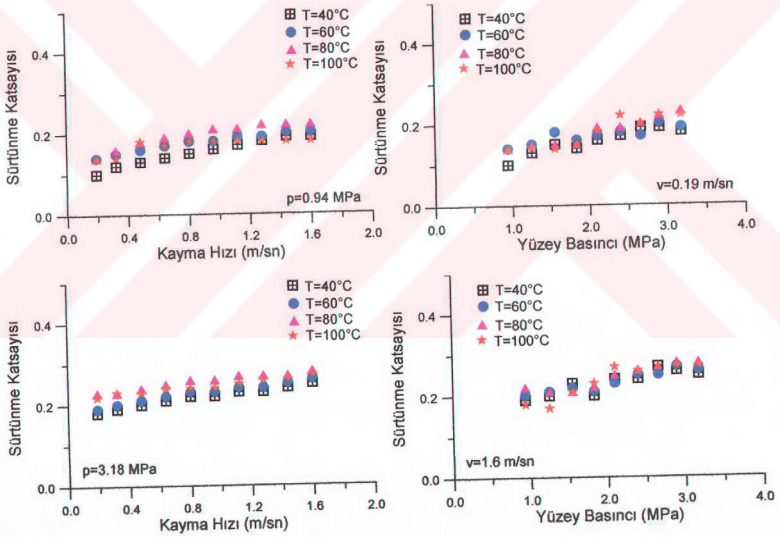
Şekil A.27 Döküm PA 6'nın 60°C de sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi



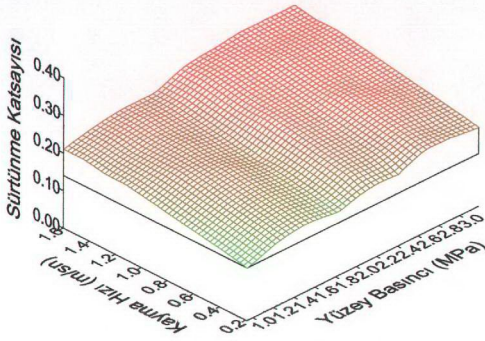
Şekil A.28 Döküm PA 6'nın 80°C de sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi



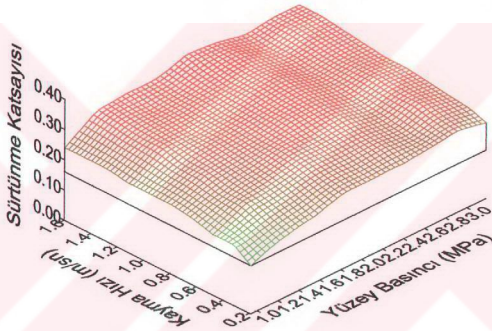
Şekil A.29 Döküm PA 6'nın 100°C de sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi



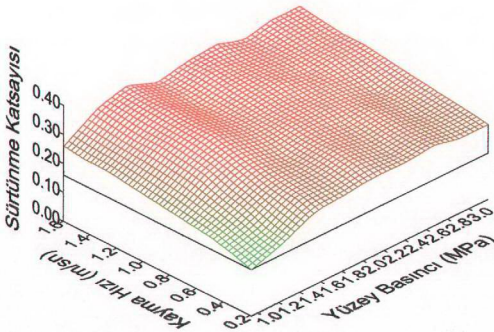
Şekil A.30 Döküm PA 6'nın farklı sıcaklıklarda sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi



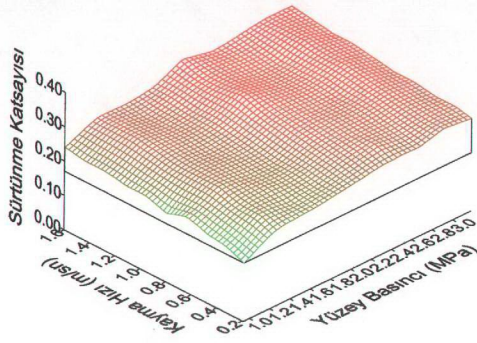
Şekil A.31 Yağ emdirilmiş döküm PA 6'nın 40°C de sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi



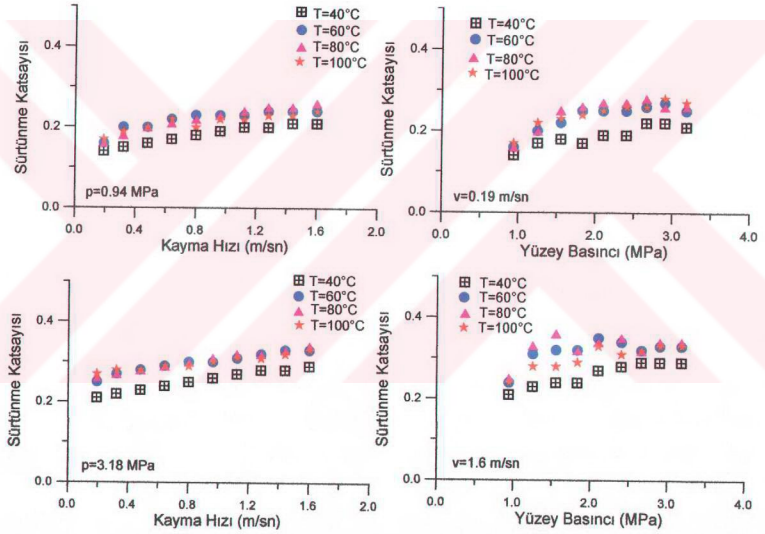
Şekil A.32 Yağ emdirilmiş döküm PA 6'nın 60°C de sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi



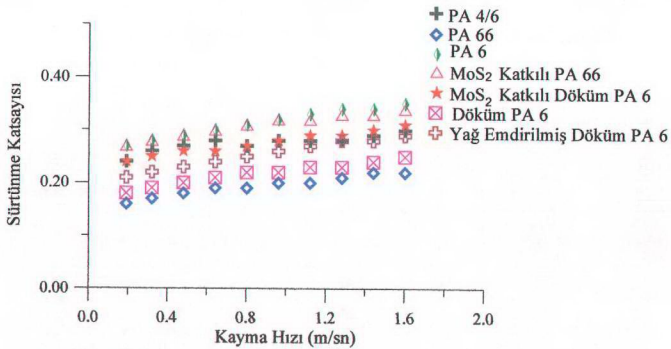
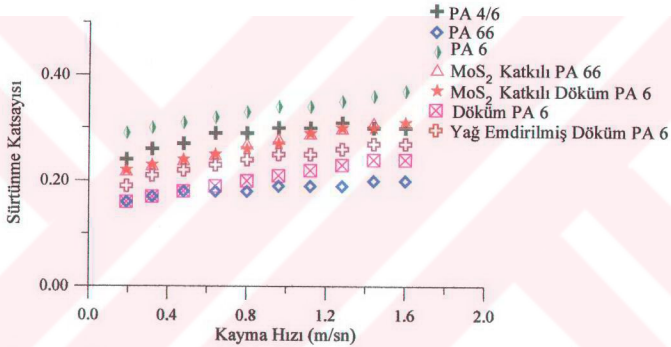
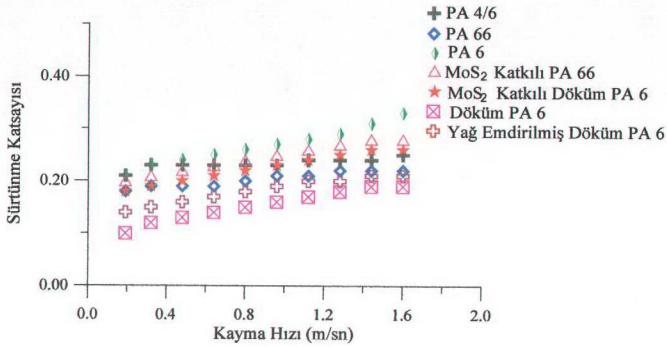
Şekil A.33 Yağ emdirilmiş döküm PA 6'nın 80°C de sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi

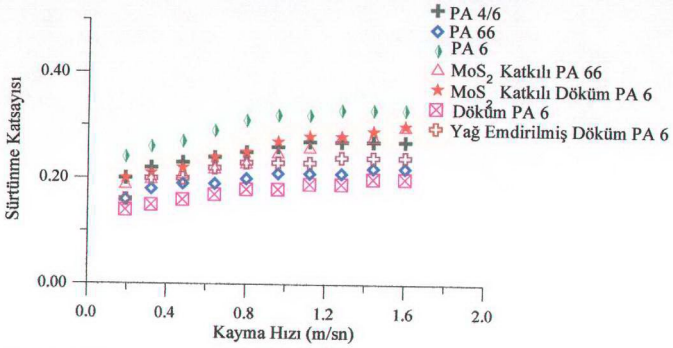


Şekil A.34 Yağ emdirilmiş döküm PA 6'nın 100°C de sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi

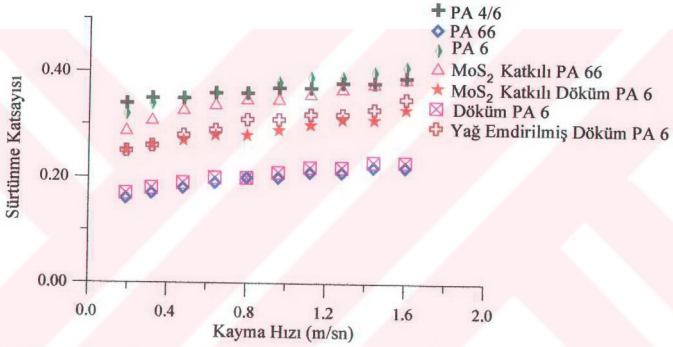


Şekil A.35 Yağ emdirilmiş döküm PA 6'nın farklı sıcaklıklarda sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi

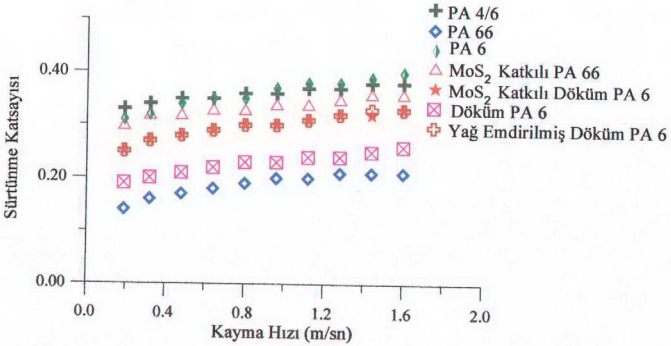




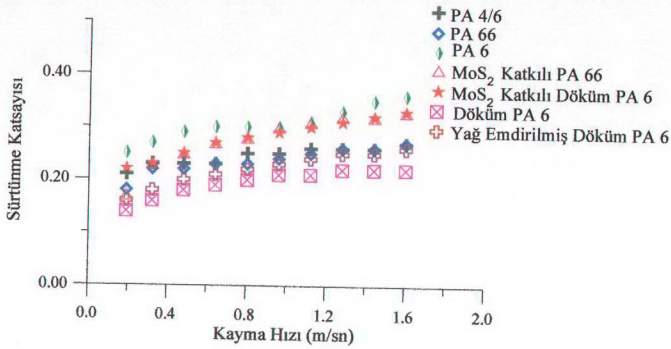
Şekil A.39 60°C de $p=0,94$ MPa basınçta sürtünme katsayısının kayma hızı ile değişimi



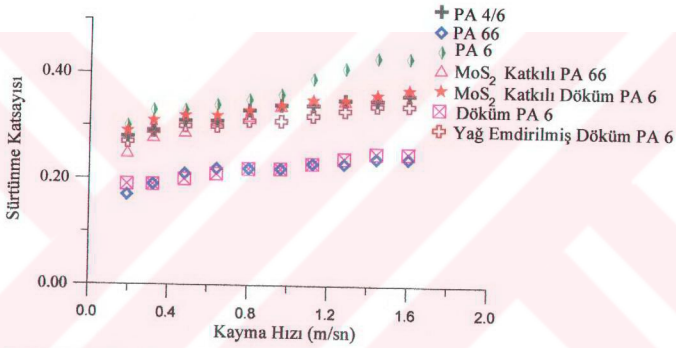
Şekil A.40 60°C de $p=2,1$ MPa basınçta sürtünme katsayısının kayma hızı ile değişimi



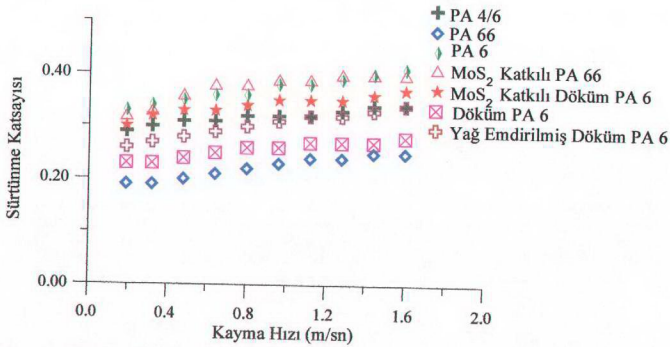
Şekil A.41 60°C de $p=3,18$ MPa basınçta sürtünme katsayısının kayma hızı ile değişimi



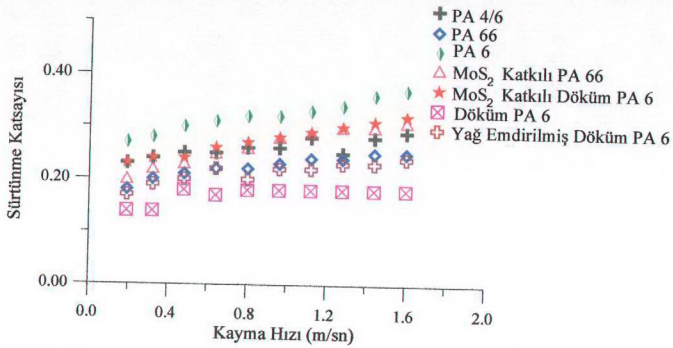
Şekil A.42 80°C de $p=0,94$ MPa basınçta sürtünme katsayısının kayma hızı ile değişimi



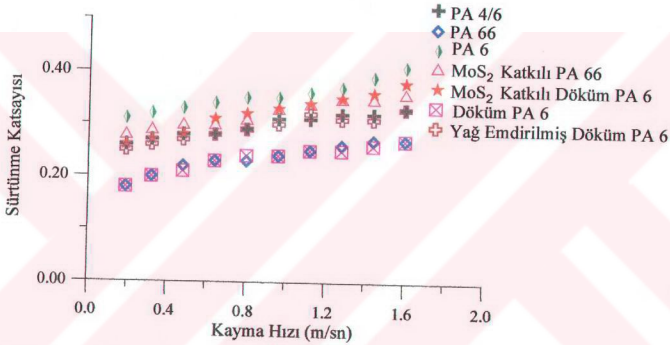
Şekil A.43 80°C de $p=2,1$ MPa basınçta sürtünme katsayısının kayma hızı ile değişimi



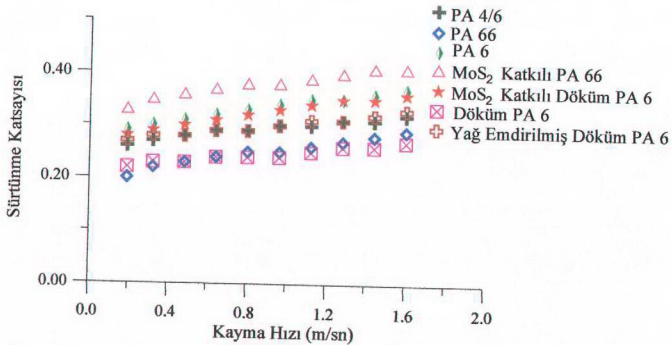
Şekil A.44 80°C de $p=3,18$ MPa basınçta sürtünme katsayısının kayma hızı ile değişimi



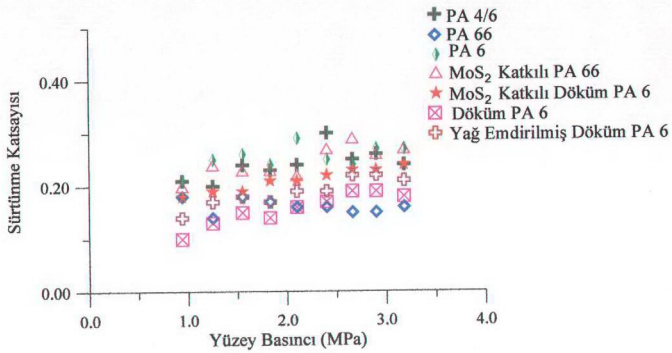
Şekil A.45 100°C de $p=0,94$ MPa basınçta sürtünme katsayısının kayma hızı ile değişimi



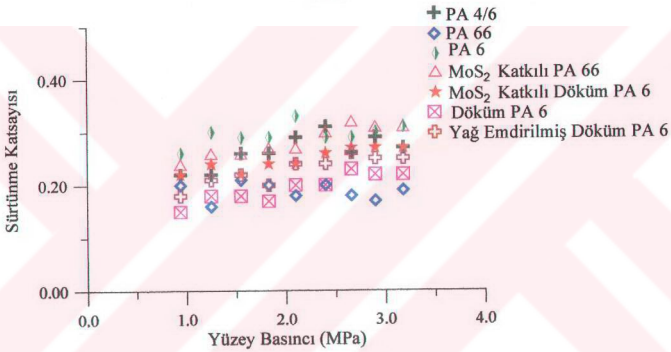
Şekil A.46 100°C de $p=2,1$ MPa basınçta sürtünme katsayısının kayma hızı ile değişimi



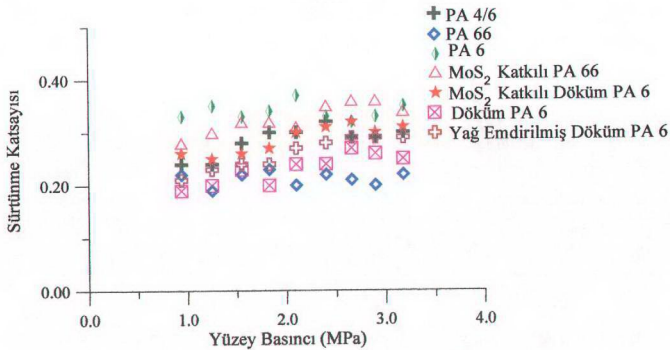
Şekil A.47 100°C de $p=3,18$ MPa basınçta sürtünme katsayısının kayma hızı ile değişimi



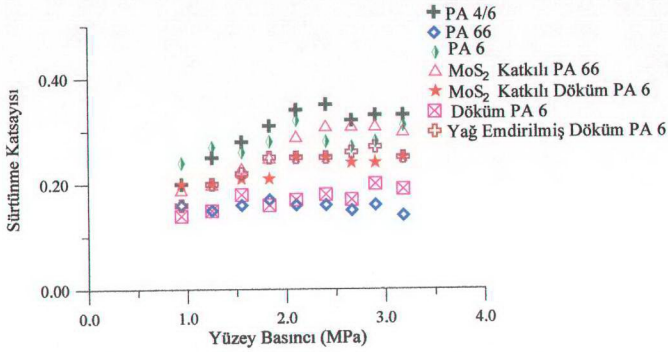
Şekil A.48 40°C de $v=0.19$ m/sn hızda sürtünme katsayısının yüzey basıncı ile değişimi



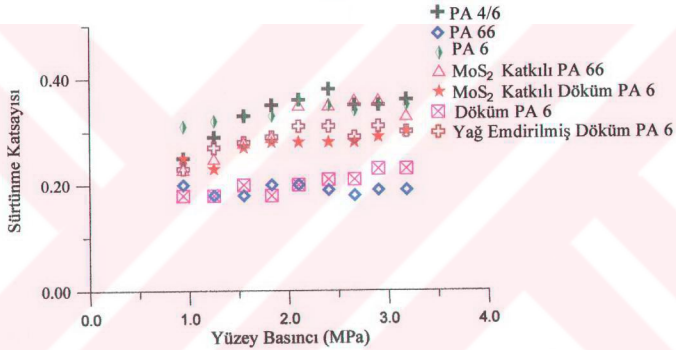
Şekil A.49 40°C de $v=0.8$ m/sn hızda sürtünme katsayısının yüzey basıncı ile değişimi



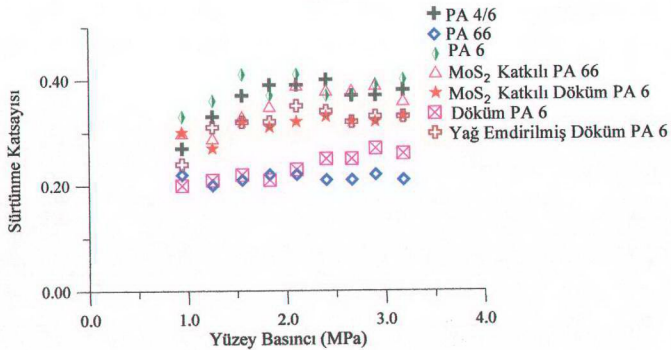
Şekil A.50 40°C de $v=1.6$ m/sn hızda sürtünme katsayısının yüzey basıncı ile değişimi



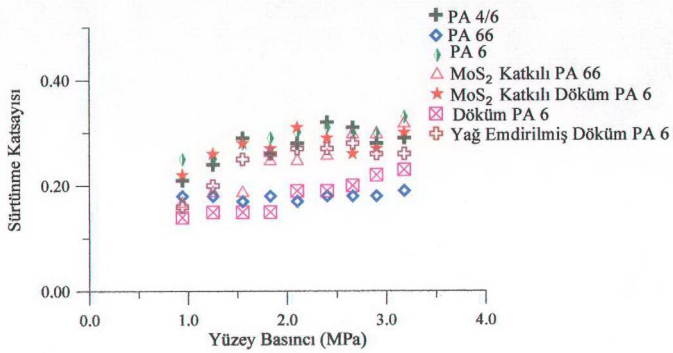
Şekil A.51 60°C de $v=0.19$ m/sn hızda sürtünme katsayısının yüzey basıncı ile değişimi



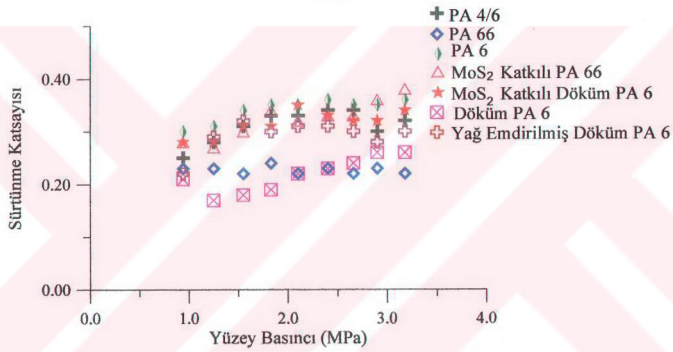
Şekil A.52 60°C de $v=0.8$ m/sn hızda sürtünme katsayısının yüzey basıncı ile değişimi



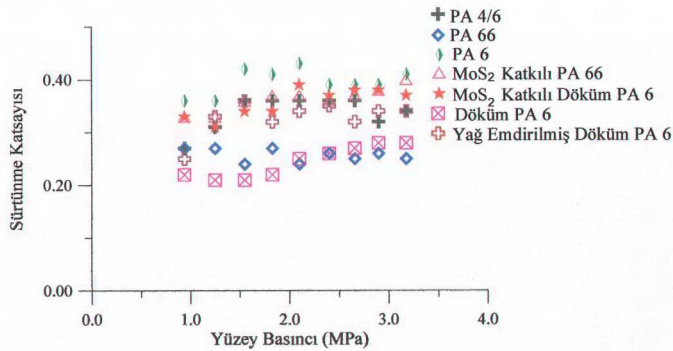
Şekil A.53 60°C de $v=1.6$ m/sn hızda sürtünme katsayısının yüzey basıncı ile değişimi



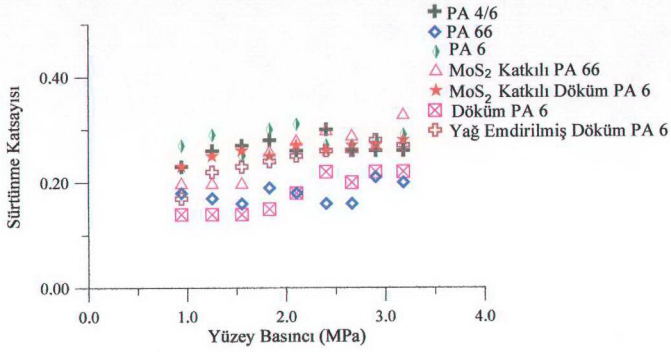
Şekil A.54 80°C de $v=0,19$ m/sn hızda sürtünme katsayısının yüzey basıncı ile değişimi



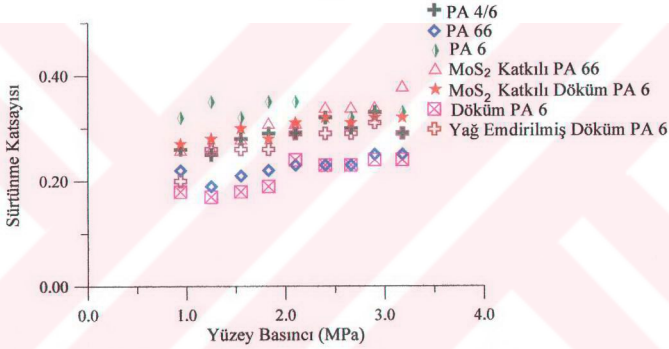
Şekil A.55 80°C de $v=0,8$ m/sn hızda sürtünme katsayısının yüzey basıncı ile değişimi



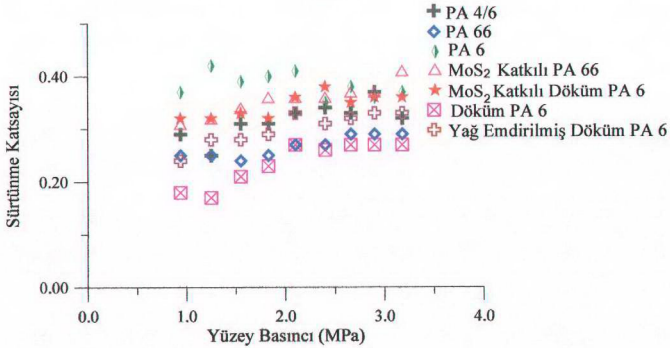
Şekil A.56 80°C de $v=1,6$ m/sn hızda sürtünme katsayısının yüzey basıncı ile değişimi



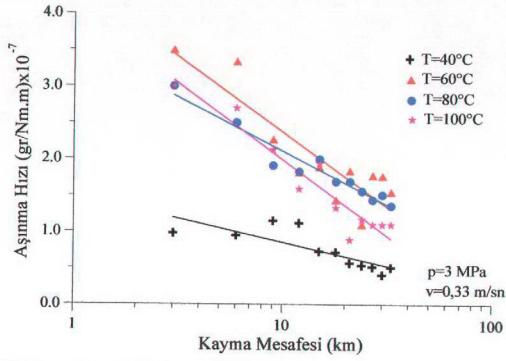
Şekil A.57 100°C de $v=0.19$ m/sn hızda sürtünme katsayısının yüzey basıncı ile değişimi



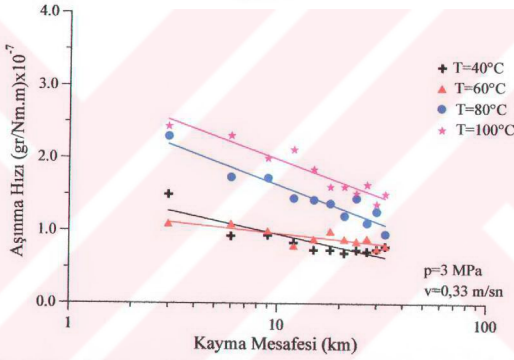
Şekil A.58 100°C de $v=0.8$ m/sn hızda sürtünme katsayısının yüzey basıncı ile değişimi



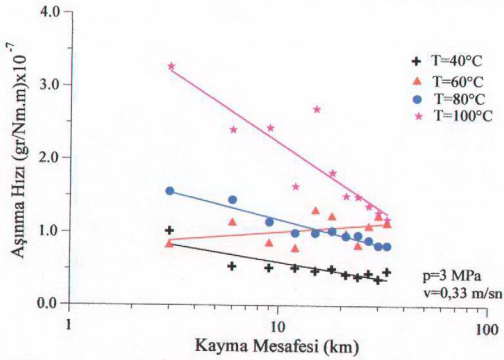
Şekil A.59 100°C de $v=1.6$ m/sn hızda sürtünme katsayısının yüzey basıncı ile değişimi



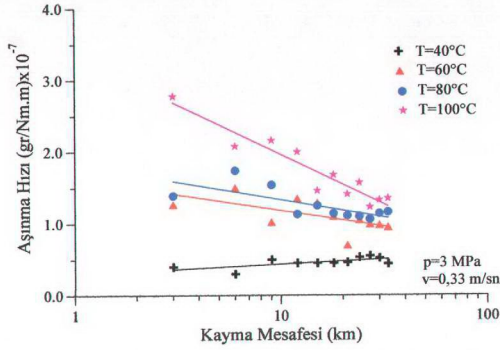
Şekil A.60 PA 4/6'nın farklı sıcaklıklarda aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi



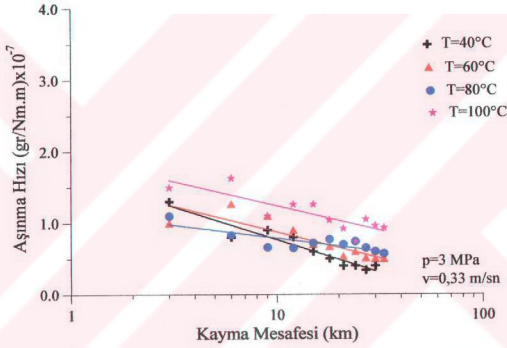
Şekil A.61 PA 66'nın farklı sıcaklıklarda aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi



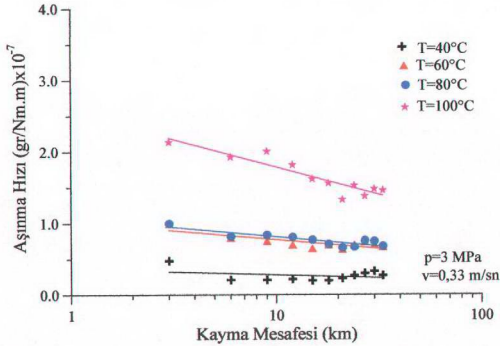
Şekil A.62 PA 6'nın farklı sıcaklıklarda aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi



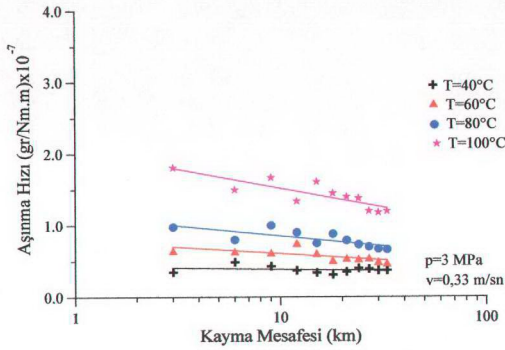
Şekil A.63 MoS₂ katkılı PA 66'nın farklı sıcaklıklarda aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi



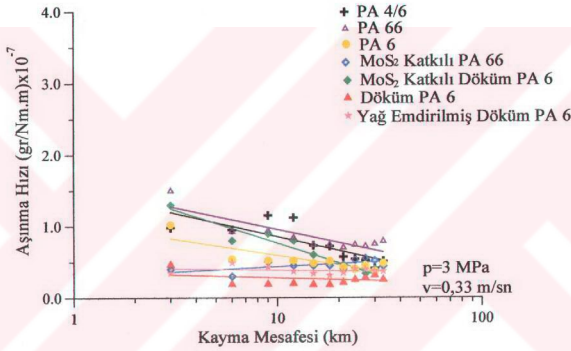
Şekil A.64 MoS₂ katkılı döküm PA 6'nın farklı sıcaklıklarda aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi



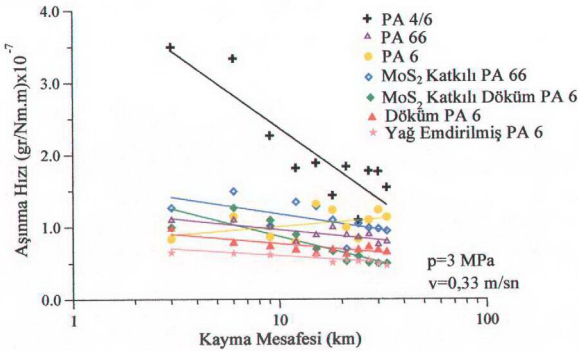
Şekil A.65 Döküm PA 6'nın farklı sıcaklıklarda aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi



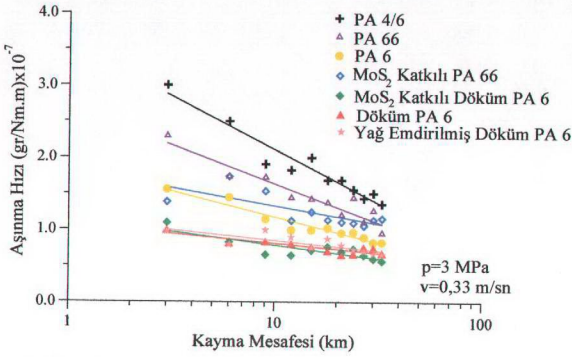
Şekil A.66 Yağ emdirilmiş döküm PA 6'nın farklı sıcaklıklarda aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi



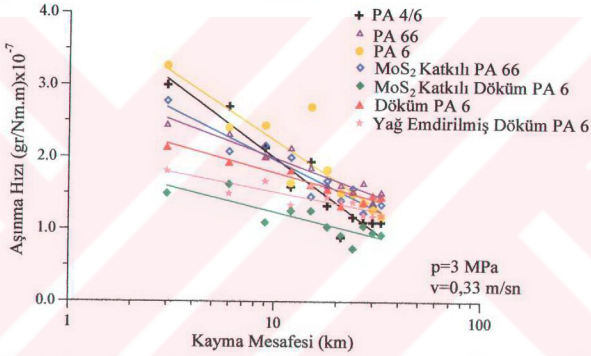
Şekil A.67 40°C de farklı poliamid türlerinin aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi



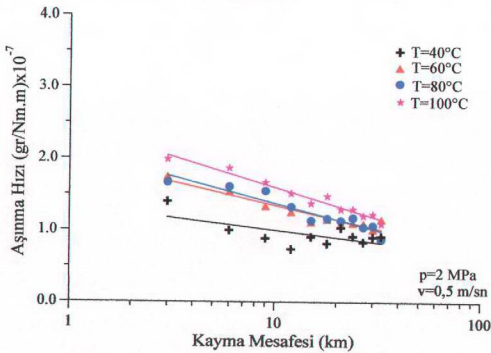
Şekil A.68 60°C de farklı poliamid türlerinin aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi



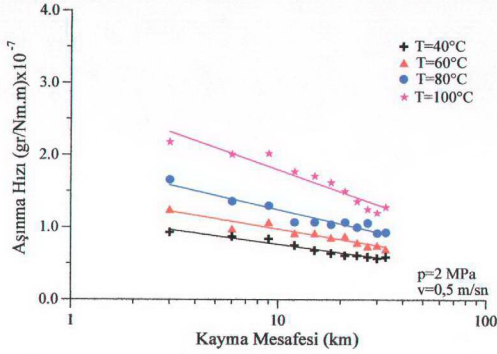
Şekil A.69 80°C de farklı poliamid türlerinin aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi



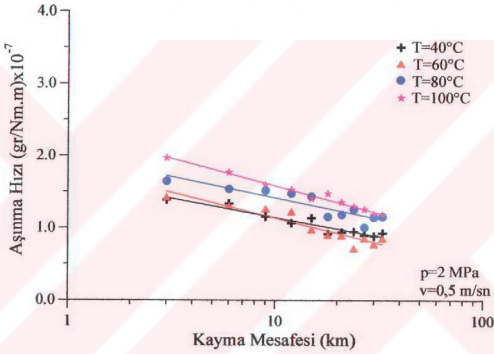
Şekil A.70 100°C de farklı poliamid türlerinin aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi



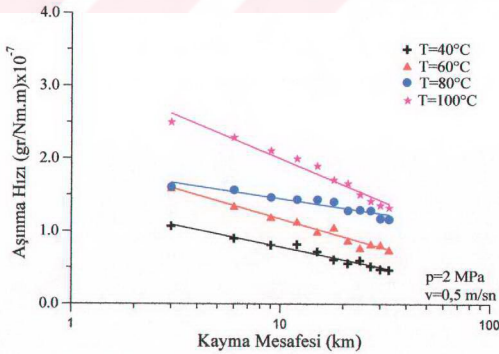
Şekil A.71 PA 4/6'nın farklı sıcaklıklarda aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi



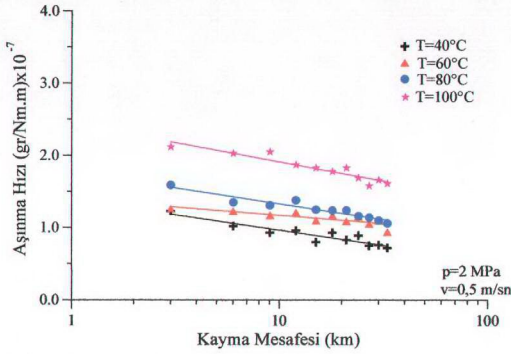
Şekil A.72 PA 66'nın farklı sıcaklıklarda aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi



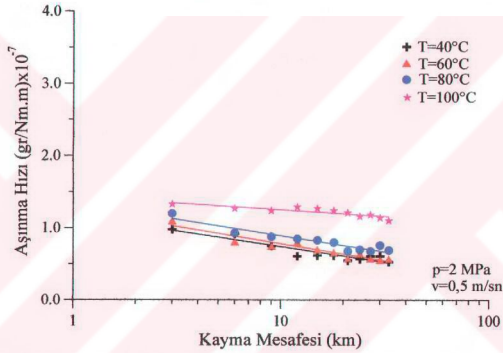
Şekil A.73 PA 6'nın farklı sıcaklıklarda aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi



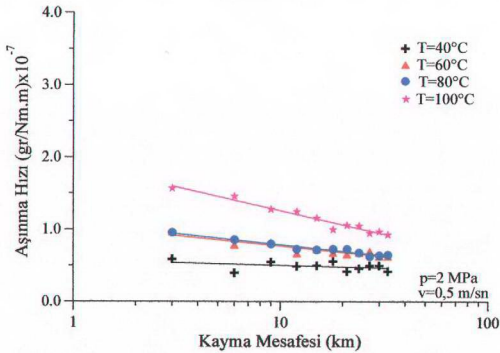
Şekil A.74 MoS₂ katkılı PA 66'nın farklı sıcaklıklarda aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi



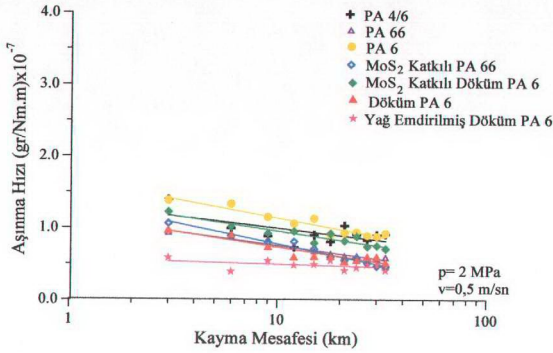
Şekil A.75 MoS₂ katkılı döküm PA 6'nın farklı sıcaklıklarda aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi



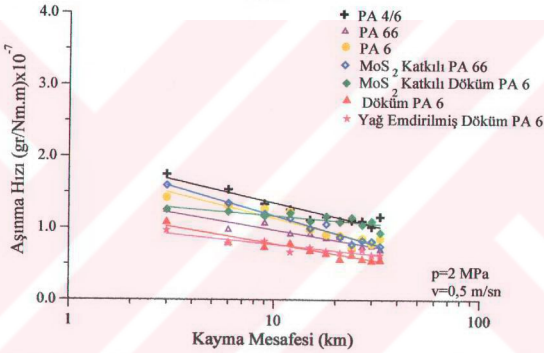
Şekil A.76 Döküm PA 6'nın farklı sıcaklıklarda aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi



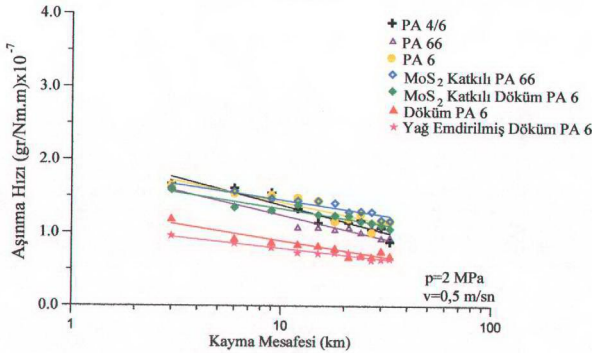
Şekil A.77 Yağ emdirilmiş döküm PA 6'nın farklı sıcaklıklarda aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi



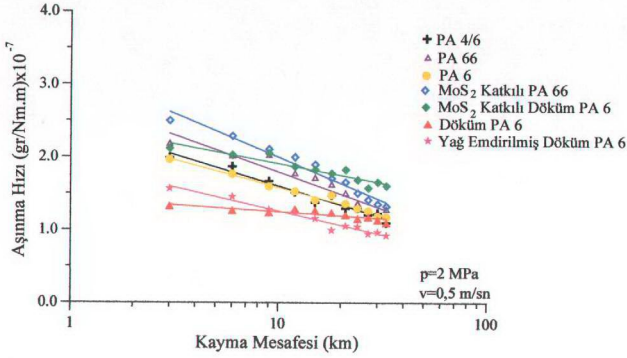
Şekil A.78 40°C de farklı poliamid türlerinin aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi



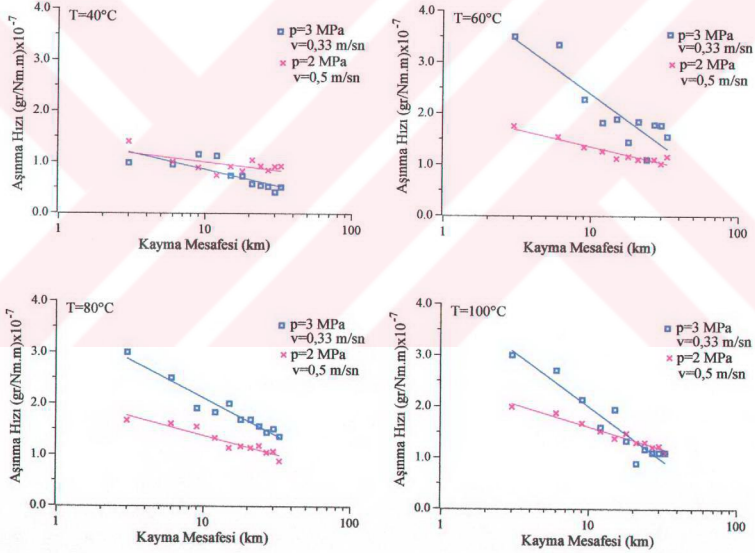
Şekil A.79 60°C de farklı poliamid türlerinin aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi



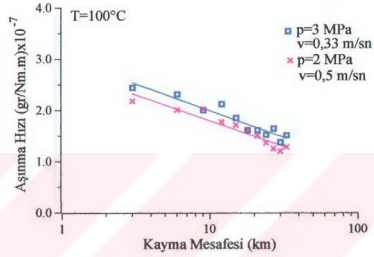
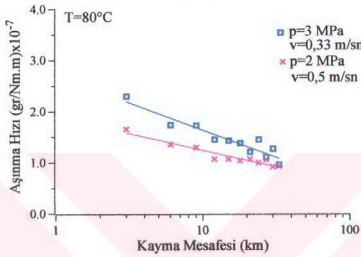
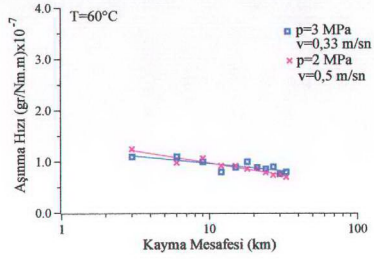
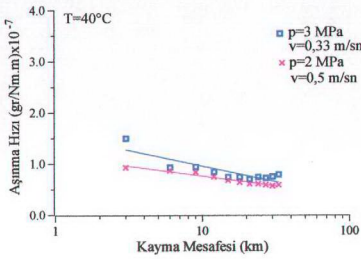
Şekil A.80 80°C de farklı poliamid türlerinin aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi



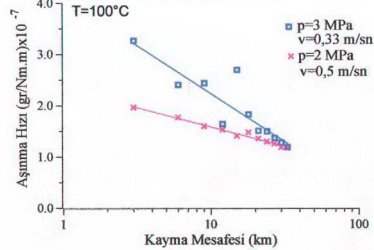
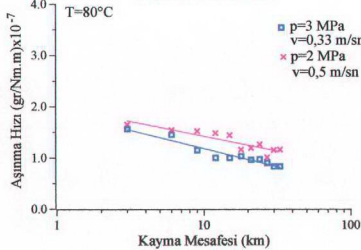
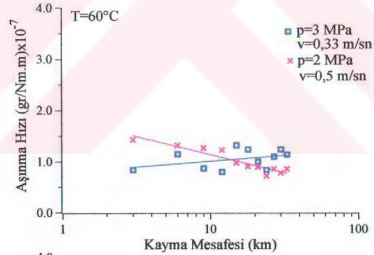
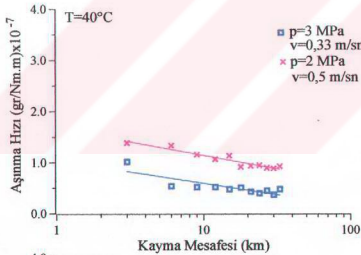
Şekil A.81 100°C de farklı poliamid türlerinin aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi



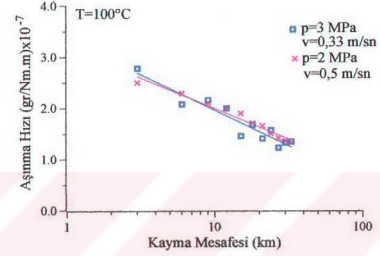
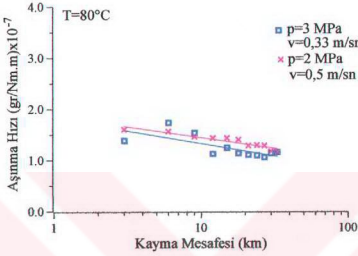
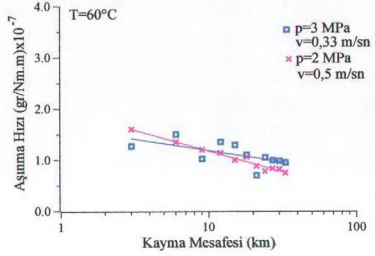
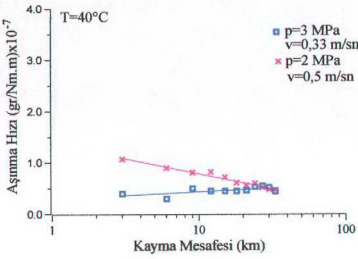
Şekil A.82 PA 4/6' nın çalışma şartlarına bağlı olarak aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi



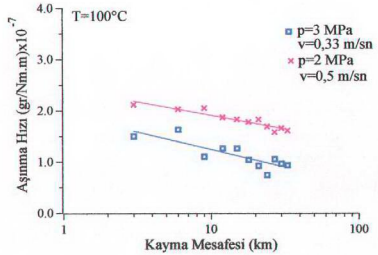
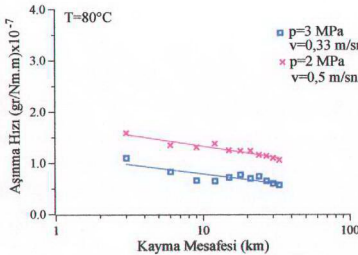
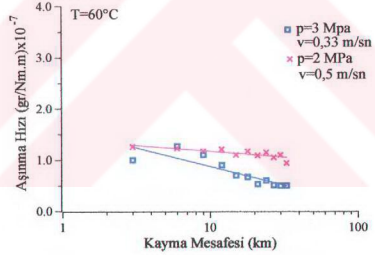
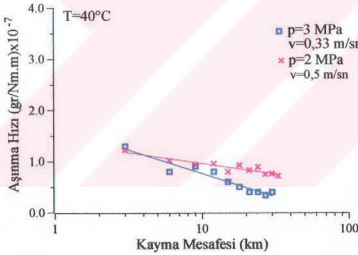
Şekil A.83 PA 66' nın çalışma şartlarına bağlı olarak aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi



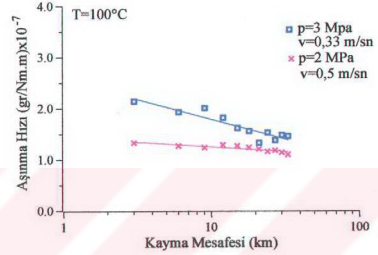
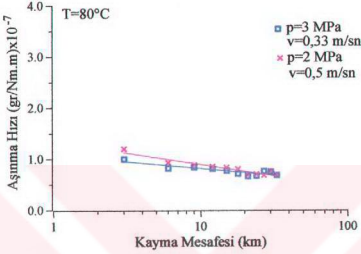
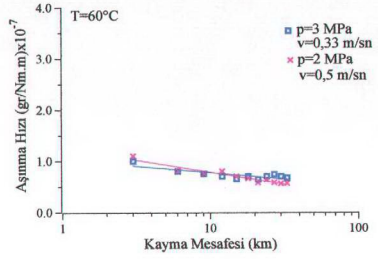
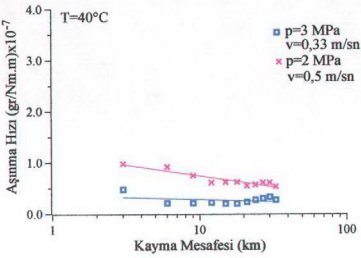
Şekil A.84 PA 6' nın çalışma şartlarına bağlı olarak aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi



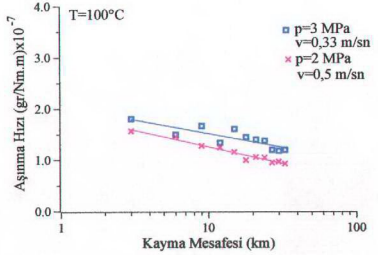
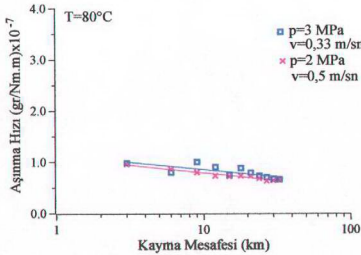
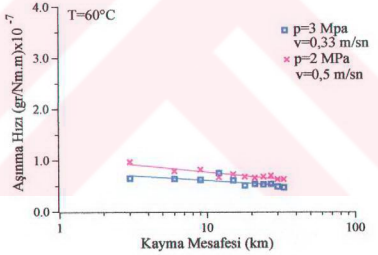
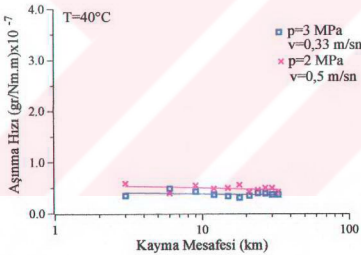
Şekil A.85 MoS₂ katkılı PA 66' nın çalışma şartlarına bağlı olarak aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi



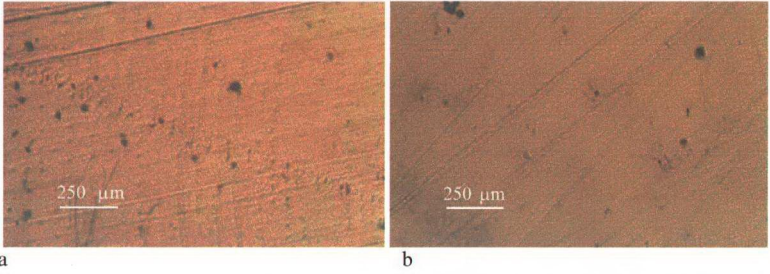
Şekil A.86 MoS₂ katkılı döküm PA 6' nın çalışma şartlarına bağlı olarak aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi



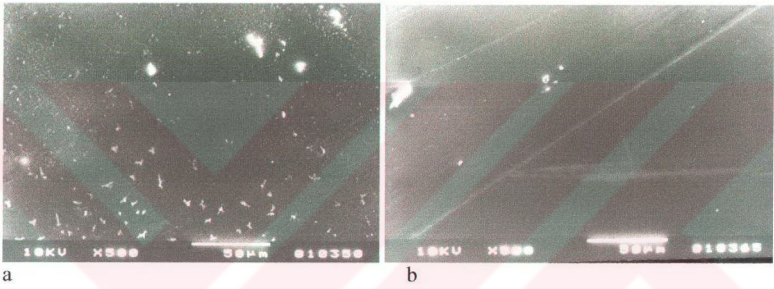
Şekil A.87 Döküm PA 6' nın çalışma şartlarına bağlı olarak aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi



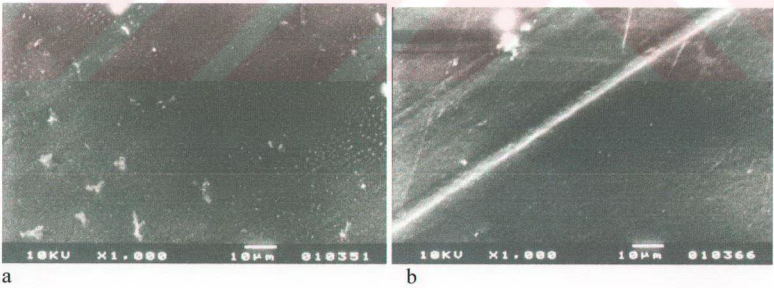
Şekil A.88 Yağ emdirilmiş döküm PA 6' nın çalışma şartlarına bağlı olarak aşınma hızının kayma mesafesi ile değişimi



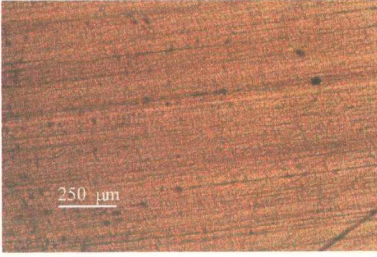
Şekil A.89 PA 4/6* nın oda sıcaklığı (a) ve yüksek sıcaklıkta (b) aşınmış yüzeylerinin optik mikroskop altındaki görüntüşleri



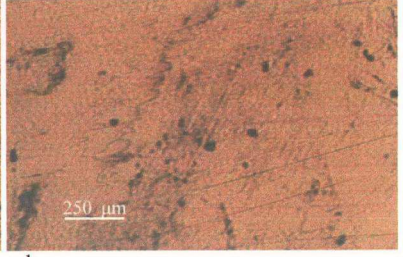
Şekil A.90 PA 4/6* nın oda sıcaklığı (a) ve yüksek sıcaklıkta (b) aşınmış yüzeylerinin tarayıcı elektron mikroskobu altındaki görüntüşleri



Şekil A.91 PA 4/6* nın oda sıcaklığı (a) ve yüksek sıcaklıkta (b) aşınmış yüzeylerinin tarayıcı elektron mikroskobu altındaki görüntüşleri

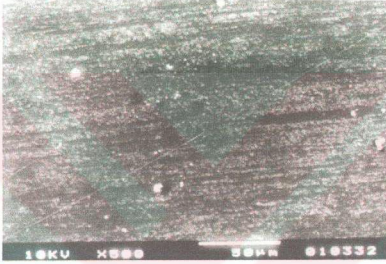


a

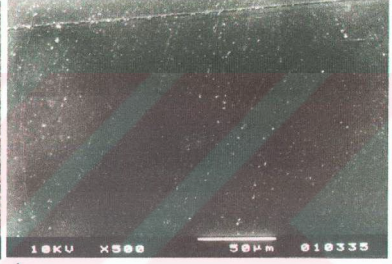


b

Şekil A.92 PA 66' nın oda sıcaklığı (a) ve yüksek sıcaklıkta (b) aşınmış yüzeylerinin optik mikroskop altındaki görüntüşleri

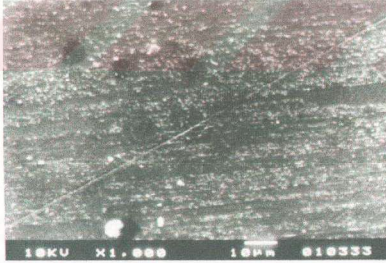


a

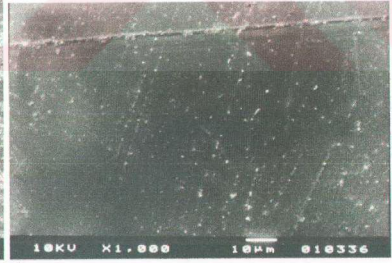


b

Şekil A.93 PA 66' nın oda sıcaklığı (a) ve yüksek sıcaklıkta (b) aşınmış yüzeylerinin tarayıcı elektron mikroskobu altındaki görüntüşleri

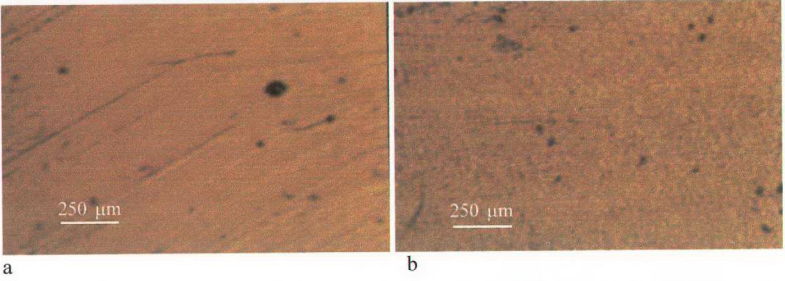


a

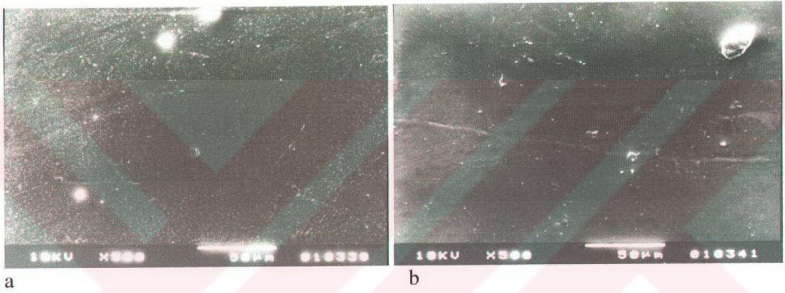


b

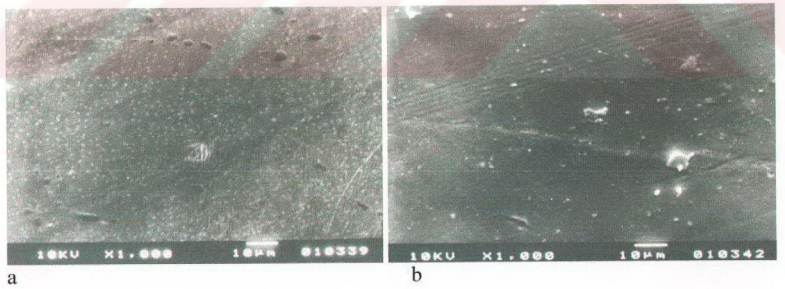
Şekil A.94 PA 66' nın oda sıcaklığı (a) ve yüksek sıcaklıkta (b) aşınmış yüzeylerinin tarayıcı elektron mikroskobu altındaki görüntüşleri



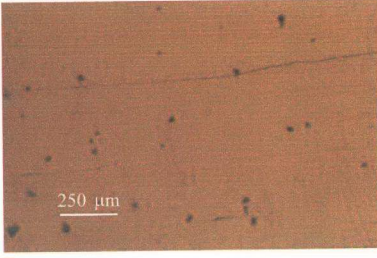
Şekil A.95 PA 6' nın oda sıcaklığı (a) ve yüksek sıcaklıkta (b) aşınmış yüzeylerinin optik mikroskop altındaki görünüşleri



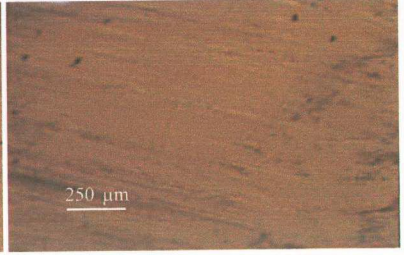
Şekil A.96 PA 6' nın oda sıcaklığı (a) ve yüksek sıcaklıkta (b) aşınmış yüzeylerinin tarayıcı elektron mikroskobu altındaki görünüşleri



Şekil A.97 PA 6' nın oda sıcaklığı (a) ve yüksek sıcaklıkta (b) aşınmış yüzeylerinin tarayıcı elektron mikroskobu altındaki görünüşleri

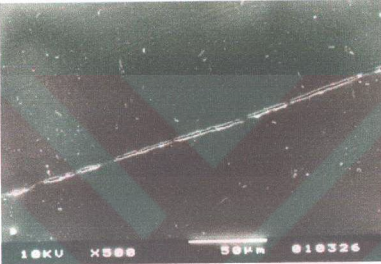


a

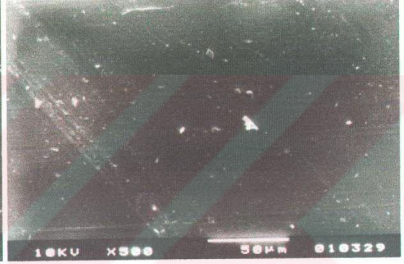


b

Şekil A.98 MoS₂ katkılı PA 66' nın oda sıcaklığı (a) ve yüksek sıcaklıkta (b) aşınmış yüzeylerinin optik mikroskop altındaki görüntüşleri

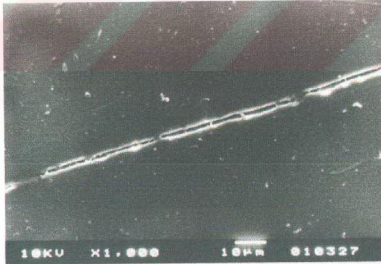


a



b

Şekil A.99 MoS₂ katkılı PA 66' nın oda sıcaklığı (a) ve yüksek sıcaklıkta (b) aşınmış yüzeylerinin tarayıcı elektron mikroskobu altındaki görüntüşleri

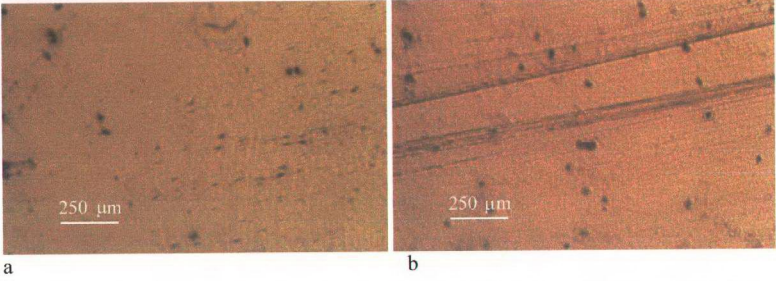


a

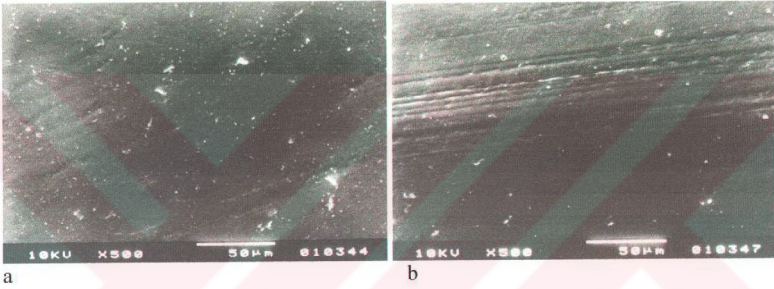


b

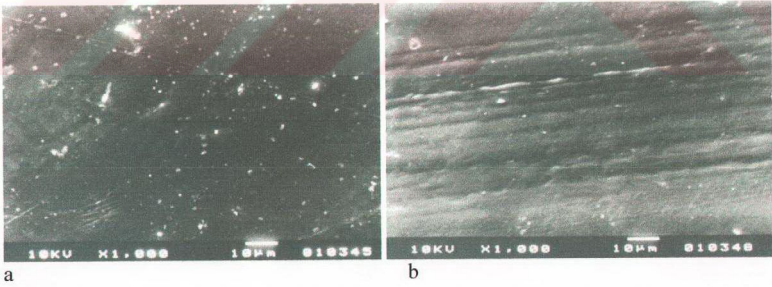
Şekil A.100 MoS₂ katkılı PA 66' nın oda sıcaklığı (a) ve yüksek sıcaklıkta (b) aşınmış yüzeylerinin tarayıcı elektron mikroskobu altındaki görüntüşleri



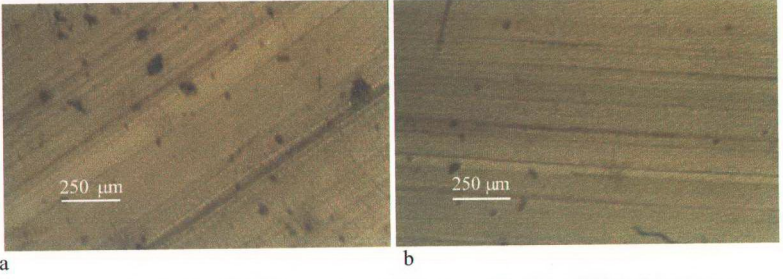
Şekil A.101 MoS₂ katkılı döküm PA 6' nın oda sıcaklığı (a) ve yüksek sıcaklıkta (b) aşınmış yüzeylerinin optik mikroskop altındaki görünüşleri



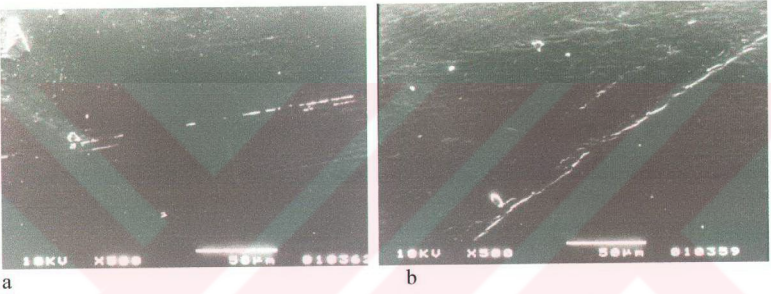
Şekil A.102 MoS₂ katkılı döküm PA 6' nın oda sıcaklığı (a) ve yüksek sıcaklıkta (b) aşınmış yüzeylerinin tarayıcı elektron mikroskobu altındaki görünüşleri



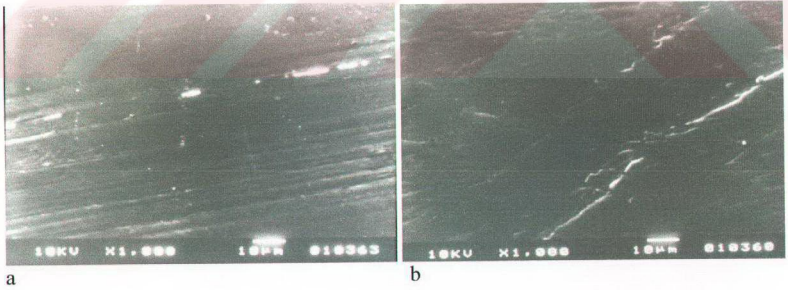
Şekil A.103 MoS₂ katkılı döküm PA 6' nın oda sıcaklığı (a) ve yüksek sıcaklıkta (b) aşınmış yüzeylerinin tarayıcı elektron mikroskobu altındaki görünüşleri



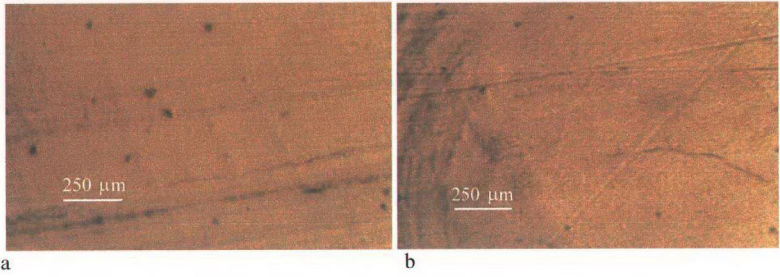
Şekil A.104 Döküm PA 6' nın oda sıcaklığı (a) ve yüksek sıcaklıkta (b) aşınmış yüzeylerinin optik mikroskop altındaki görüntüleri



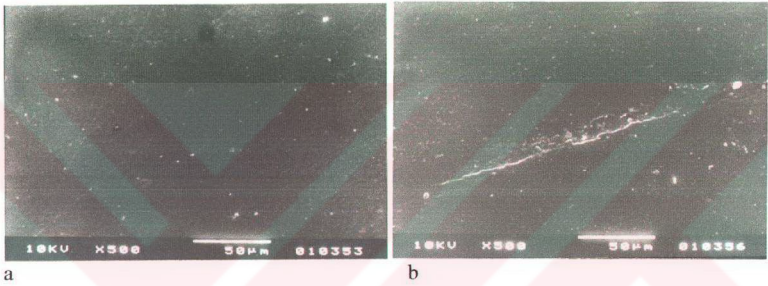
Şekil A.105 Döküm PA 6' nın oda sıcaklığı (a) ve yüksek sıcaklıkta (b) aşınmış yüzeylerinin tarayıcı elektron mikroskobu altındaki görüntüleri



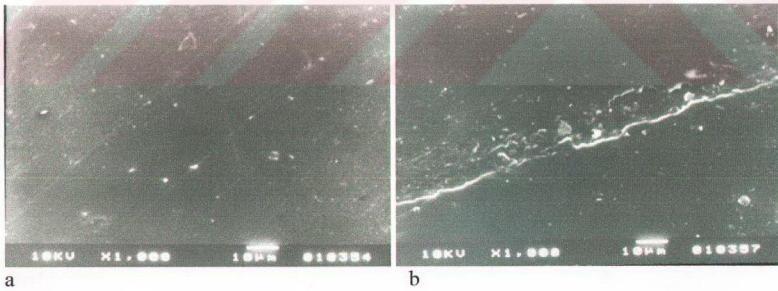
Şekil A.106 Döküm PA 6' nın oda sıcaklığı (a) ve yüksek sıcaklıkta (b) aşınmış yüzeylerinin tarayıcı elektron mikroskobu altındaki görüntüleri



Şekil A.107 Yağ emdirilmiş döküm PA 6' nın oda sıcaklığı (a) ve yüksek sıcaklıkta (b) aşınmış yüzeylerinin optik mikroskop altındaki görüntüleri



Şekil A.108 Yağ emdirilmiş döküm PA 6' nın oda sıcaklığı (a) ve yüksek sıcaklıkta (b) aşınmış yüzeylerinin tarayıcı elektron mikroskobu altındaki görüntüleri



Şekil A.109 Yağ emdirilmiş döküm PA 6' nın oda sıcaklığı (a) ve yüksek sıcaklıkta (b) aşınmış yüzeylerinin tarayıcı elektron mikroskobu altındaki görüntüleri

ÖZGEÇMİŞ

1969 yılında Malatya’da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Şirinevler ilkokulu ve ortaokulu’nda tamamlayıp lisede Zeytinburnu Endüstri Meslek Lisesi Makine Ressamlığı bölümünden mezun oldu. 1986 yılında İ.T.Ü. Makine Fakültesi Makine Mühendisliği bölümüne girdi ve 1990 yılında mezun oldu. 1993 yılında Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Anabilim Dalı Konstrüksiyon ve İmalat Programında Yüksek Lisans Eğitimine Başladı. 1995 yılında bu eğitimi tamamlayarak Doktora başladı. Aynı yıl İ.T.Ü. Makine Fakültesi Konstrüksiyon Anabilim Dalı’nda Araştırma Görevlisi oldu. Halen bu görevini sürdürmektedir. Evli ve bir çocuk annesidir.

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**