

175865

**SALINIM HAREKETİ YAPAN RADYAL KAYMALI PLASTİK
YATAKLARIN SÜRTÜNME ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL
OLARAK İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Ferda UZUNER
(503932031)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 7 Mart 2003
Tezin Savunulduğu Tarih : 16 Haziran 2003**

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

Dr. Gediktaş
Akkurt
Abdülkerim
Bozacı
Yücenur

HAZİRAN 2003

ÖNSÖZ

Günümüzde, polimer malzemelerden elde edilen plastiklerin çok geniş bir kullanım alanı olması ve teknolojisi geliştikçe endüstriyel uygulamalarda makina elemanı olarak metallerin yerini almaya başlaması, bunların tribolojik davranış özelliklerinin ve dinamik karakteristiklerinin bilinmesini zorunlu hale getirmektedir.

Bu tez çalışması da, pratikte kullanılan salınım hareketli radyal kaymalı yataklarda metal burçların yerine plastik burçların kullanılmasının uygun olup olmadığının araştırılması ve bu çalışma şartlarındaki plastik burçların sürtünme özellikleri ile ilgili literatürdeki veri tabanına katkıda bulunulması amacıyla yapılmış deneysel bir çalışmadır.

Bu çalışmada bana destek olan danışmanım Sayın Prof.Dr.Mustafa GEDİKTAŞ' a, katkılarından dolayı Sayın Doç.Dr.Sait YÜCENUR' a ve deney malzemelerini temin eden POLİKİM A.Ş.' ye teşekkür ederim.

Haziran 2003

Ferda UZUNER

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	x
ÖZET	xii
SUMMARY	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Kaynak Araştırması	2
1.2. Çalışmanın Amacı ve Önemi	13
2. PLASTİK MALZEMELER	15
2.1. Plastik Malzemelerin Tanıtılması ve Sınıflandırılması	15
2.2. Plastiklerin Genel Özellikleri	16
2.3. Plastiklerin Mekanik Davranışları	17
2.4. Deneylerde Kullanılan Plastikler	19
2.4.1. Ultra Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen (UHMWPE)	19
2.4.2. Döküm Poliamid 6(Cast PA6)	21
2.4.3. Polioksimetilen (POM)	22
3. SÜRTÜNME	24
3.1. Yüzeylerin Yapısı	24
3.2. Sürtünmenin Temel Mekanizması	25
3.3. Plastiklerin Sürtünmesi	26
4. KURU SÜRTÜNMELİ RADYAL KAYMALI YATAKLAR	30
4.1. Temas Parametreleri	30
4.2. Radyal Yatakta Sürtünme Durumu	33
5. DENEYLER	39
5.1. Deney Tesisatının Tanıtılması	39
5.2. Kalibrasyon ve Ölçüm İşlemleri	42
5.2.1. Sürtünme Kuvvetinin Ölçülmesi	44
5.2.2. Yatak Burcunun Temas Bölgesindeki Sıcaklığının Ölçülmesi	46
5.3. Deney Numuneleri ve Deney Şartları	48
5.4. Deneylerin Yapılışı	50
6. DENEY SONUÇLARI	52
6.1. İzafi Yatak Boşluğunun Etkisi	52
6.2. Uygulanan Yükler Sonucu Ortaya Çıkan Basınç Dağılımları	53
6.3. Sürtünme Katsayısı ve Temas Yüzeyi Sıcaklıkları	56
6.3.1. UHMWPE	56
6.3.2. DÖKÜM PA6	59

6.3.3. POM	62
6.3.4. UHMWPE-PA 6-POM Karşılaştırması	65
6.4. PV Değerleri	70
7. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ	79
KAYNAKLAR	82
ÖZGEÇMİŞ	87



KISALTMALAR

UHMWPE	: Ultra High Molecular Weight Polyethylene
PA6	: Polyamide 6
POM	: Polyoximethylene
PTFE	: Polytetrafluoroethylene
HDPE	: High Density Polyethylene
PI	: Polyimid
LDPE	: Low Density Polyethylene
PE	: Polyethylene



TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. UHMWPE' nin özellikleri	20
Tablo 2.2. PA 6' nin özellikleri	21
Tablo 2.3. POM' un özellikleri	23
Tablo 4.1. Gerçek sürtünme katsayısı μ ile tanımlanan sürtünme katsayısı μ_1 arasındaki oran	35
Tablo 4.2. Temas yayı $2\phi_0$ ' ın sürtünme üzerine etkisi	37
Tablo 4.3. Gerçek sürtünme katsayısı μ ile basit modelle elde edilen sürtünme katsayısı μ_1 arasında tırmanmanın ve temas yayının ortak etkisi ile oluşan fark	38
Tablo 5.1. Deneylerde kullanılan plastik yatakların ϕ ap, yatak boşluğu ölçüleri ve izafi yatak boşluğu	49
Tablo 6.1. UHMWPE, döküm PA6 ve POM' dan yapılmış burcun uygulanan yük (W) sonucunda temas açısının ($2\phi_0$), temas alanının (A), max. yüzey basıncının (p_{max})ve ortalama yüzey basıncının (p_o) değerleri	55
Tablo 6.2. UHMWPE, döküm PA 6 ve POM' un sürtünme katsayısı değerleri	70
Tablo 6.3. UHMWPE için deney sayısı, uygulanan hız, ortalama basınç, maksimum basınç, $p_o v$ ve $p_{max} v$ değerleri	73
Tablo 6.4. Döküm PA6 için deney sayısı, uygulanan hız, ortalama basınç, maksimum basınç, $p_o v$ ve $p_{max} v$ değerleri	74
Tablo 6.5. POM için deney sayısı, uygulanan hız, ortalama basınç, maksimum basınç, $p_o v$ ve $p_{max} v$ değerleri	75

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1 :Düz yüzeylerin temasında basınç dağılımı	13
Şekil 1.2 :Eğri yüzeylerin temasında basınç dağılımı	13
Şekil 2.1 :Mühendislikte kullanılan plastiklerin sıcaklığa bağlı gerilme-uzama eğrileri.....	18
Şekil 2.2 :Polietilenin molekül yapısı	19
Şekil 2.3 :Poliamid 6 nın molekül yapısı.....	21
Şekil 2.4 :Polioksimetilenin molekül yapısı	22
Şekil 3.1 :Yüzeylerin yapısı ve temas süresince birbirleriyle etkileşimi	24
Şekil 3.2 :Yük altında plastik ve rijid yüzey profili	26
Şekil 3.3 :Plastik-metal temasında moleküler bağ oluşum modeli	27
Şekil 3.4 :Plastik-çelik temasında molekül zincirleri arasında kayma oluşumu.....	27
Şekil 3.5 :Sürtünmenin histeresis bileşeni için fiziksel model	29
Şekil 3.6 :İzafi hareket halinde pürüz tepesindeki histerezis kuvvetinin durumu	29
Şekil 4.1 :Radyal kaymalı bir yatağın şematik resmi	30
Şekil 4.2 : P_{max}/P_0 oranının ϕ_0 ile değişimi.....	32
Şekil 4.3 :Radyal yataktaki kuvvet durumu için basit model	33
Şekil 4.4 :Sürtünme kuvveti etkisi ile tırmanma ve tırmanmanın kuvvetler üzerine etkisi	33
Şekil 4.5 :Basıncın bir daire yayı üzerine yayılmasının etkisi	35
Şekil 5.1 :Deney milinin teknik resmi.....	39
Şekil 5.2.a :Deney tesisatının şeması	40
Şekil 5.2.b :Deney tesisatının şeması	41
Şekil 5.3 :Yatak zarfı, transdüser ve yay bağlantısı.....	42
Şekil 5.4 :Kalibrasyon eğrisi.....	43
Şekil 5.5 :Sistemin bağlantı şeması	43
Şekil 5.6 :Yatak burcuna ve yatak zarfına gelen dış kuvvetler.....	44
Şekil 5.7 :Yükleme ve ölçme sistemi	45
Şekil 5.8 :Termoelemanların bağlantı şeması	46
Şekil 5.9. :Üç çubuk mekanizması	47
Şekil 5.10 :Üç çubuk mekanizması ile elde edilen hareketlerin açısız hız diyagramları.....	48
Şekil 5.11 :Plastik burçların şematik resimleri ve fotoğrafları.....	49
Şekil 6.1 :İzafi yatak boşluğunun yüzey basıncına etkisi	52
Şekil 6.2 :İzafi yatak boşluğunun sürtünme katsayısına etkisi	53
Şekil 6.3 :Düz ve eğri yüzeylerin temasında ortaya çıkan basınç dağılımları	54
Şekil 6.4 :UHMWPE, döküm PA6 ve POM' dan yapılmış plastik :yataklarda basınç dağılımı ve ortalama basınç eğrileri	54

Şekil 6.5	:Salınım açısı 30° iken UHMWPE yatak-çelik mil temasında sürtünme katsayısının ve temas yüzeyi sıcaklığının kayma hızı ile değişimi.....	56
Şekil 6.6	:Salınım açısı 30° iken UHMWPE yatak-çelik mil temasında sürtünme katsayısının ve temas yüzeyi sıcaklığının ortalama yüzey basıncı ile değişimi.....	56
Şekil 6.7	:Salınım açısı 45° iken UHMWPE yatak-çelik mil temasında sürtünme katsayısının ve temas yüzeyi sıcaklığının kayma hızı ile değişimi.....	57
Şekil 6.8	:Salınım açısı 45° iken UHMWPE yatak-çelik mil temasında sürtünme katsayısının ve temas yüzeyi sıcaklığının ortalama yüzey basıncı ile değişimi.....	57
Şekil 6.9	: $K=30^{\circ}$ ve $K=45^{\circ}$ lik salınım açılarında UHMWPE yatak-çelik mil temasında sürtünme katsayısının salınım frekansı ile değişimi.....	58
Şekil 6.10	: $K=30^{\circ}$ ve $K=45^{\circ}$ lik salınım açılarında UHMWPE yatak-çelik mil temasında sürtünme katsayısının ortalama yüzey basıncı ile değişimi.....	58
Şekil 6.11	:Salınım açısı 30° iken döküm PA6 yatak-çelik mil temasında sürtünme katsayısının ve temas yüzeyi sıcaklığının kayma hızı ile değişimi.....	59
Şekil 6.12	:Salınım açısı 30° iken döküm PA6 yatak-çelik mil temasında sürtünme katsayısının ve temas yüzeyi sıcaklığının ortalama yüzey basıncı ile değişimi.....	60
Şekil 6.13	:Salınım açısı 45° iken döküm PA6 yatak-çelik mil temasında sürtünme katsayısının ve temas yüzeyi sıcaklığının kayma hızı ile değişimi.....	60
Şekil 6.14	:Salınım açısı 45° iken döküm PA6 yatak-çelik mil temasında Sürtünme katsayısının ve temas yüzeyi sıcaklığının ortalama yüzey basıncı ile değişimi.....	61
Şekil 6.15	: $K=30^{\circ}$ ve $K=45^{\circ}$ lik salınım açılarında döküm PA6 yatak-çelik mil temasında sürtünme katsayısının salınım frekansı ile değişimi.....	61
Şekil 6.16	: $K=30^{\circ}$ ve $K=45^{\circ}$ lik salınım açılarında döküm PA6 yatak-çelik mil temasında sürtünme katsayısının ortalama yüzey basıncı ile değişimi.....	62
Şekil 6.17	:Salınım açısı 30° iken POM yatak-çelik mil temasında sürtünme katsayısının ve temas yüzeyi sıcaklığının kayma hızı ile değişimi.....	62
Şekil 6.18	:Salınım açısı 30° iken POM yatak-çelik mil temasında sürtünme katsayısının ve temas yüzeyi sıcaklığının ortalama yüzey basıncı ile değişimi.....	63
Şekil 6.19	:Salınım açısı 45° iken POM yatak-çelik mil temasında sürtünme katsayısının ve temas yüzeyi sıcaklığının kayma hızı ile değişimi.....	63
Şekil 6.20	:Salınım açısı 45° iken POM yatak-çelik mil temasında sürtünme katsayısının ve temas yüzeyi sıcaklığının ortalama yüzey basıncı ile değişimi.....	64
Şekil 6.21	: $K=30^{\circ}$ ve $K=45^{\circ}$ lik salınım açılarında POM yatak-çelik mil temasında sürtünme katsayısının salınım frekansı ile değişimi.....	64
Şekil 6.22	: $K=30^{\circ}$ ve $K=45^{\circ}$ lik salınım açılarında POM yatak-çelik mil temasında sürtünme katsayısının ortalama yüzey basıncı ile değişimi.....	65

Şekil 6.23 :Salınım açısı 30° iken UHMWPE-PA 6-POM yatak-çelik mil temasında sürtünme katsayısının ve temas yüzeyi sıcaklığının kayma hızı ile değişimi	66
Şekil 6.24 :Salınım açısı 30° iken UHMWPE-PA 6-POM yatak-çelik mil temasında sürtünme katsayısının ve temas yüzeyi sıcaklığının ortalama yüzey basıncı ile değişimi	67
Şekil 6.25 :Salınım açısı 45° iken UHMWPE-PA 6-POM yatak-çelik mil temasında sürtünme katsayısının ve temas yüzeyi sıcaklığının kayma hızı ile değişimi	68
Şekil 6.26 :Salınım Açısı 45° iken UHMWPE-PA 6-POM yatak-çelik mil temasında sürtünme katsayısının ve temas yüzeyi sıcaklığının ortalama yüzey basıncı ile değişimi	69
Şekil 6.27 :Basınç ve hız üst sınırı ile sınırlandırılmış pv alanı	70
Şekil 6.28 :Düşük yüklerle yapılan deneylere ait pv değerleri.....	71
Şekil 6.29 :Düzlem yüzeylerin ve eğri yüzeylerin temasında ortaya çıkan ortalama ve maksimum basınçların tavsiye edilen pv limitlerine göre yeri	72
Şekil 6.30 :UHMWPE' den yapılmış burç için p_0 ve $p_{max}v$ değerleri	72
Şekil 6.31 :Döküm PA6' dan yapılmış burç için p_0 ve $p_{max}v$ değerleri	73
Şekil 6.32 :POM' dan yapılmış burç için p_0 ve $p_{max}v$ değerleri	74
Şekil 6.33 :9. deney sonunda UHMWPE' den yapılan burcun ve milin durumu	75
Şekil 6.34 :10. deney sonucunda döküm.PA6' dan yapılan burcun ve milin durumu	76
Şekil 6.35 :15. deney sonucunda POM' dan yapılan burcun ve milin durumu	76
Şekil 6.36 :UHMWPE-döküm PA6-POM' un $p_0=0,32$ MPa basınçta sürtünme katsayısı ve temas yüzeyi sıcaklıklarının kayma hızı ile değişimi.....	77
Şekil 6.37 :UHMWPE-döküm PA6-POM' un $p_0=0,7$ MPa basınçta sürtünme katsayısı ve temas yüzeyi sıcaklıklarının kayma hızı ile değişimi.....	77
Şekil 6.38 :POM' un $p_0=1,02$ MPa basınçta sürtünme katsayısı ve temas yüzeyi sıcaklığının kayma hızı ile değişimi.....	78

SEMBOL LİSTESİ

A	: Temas alanı; parametre
A_i	: i değme noktasındaki temas alanı
A_j	: j değme noktasındaki temas alanı
A_{ger}	: Gerçek temas alanı
A_{gör}	: Görünür temas alanı
a	: 1. kolun uzunluğu
†	: Yarı temas uzunluğu
b	: 2. kolun uzunluğu
B	: Parametre
c	: Radyal boşluk; 3. kolun uzunluğu
C_h	: halkaya ait yaylanma sayısı
C_{yay}	: yaya ait yaylanma sayısı
d	: Motor mili merkezi ile deney mili merkezi arasındaki yatay mesafe
D	: Parametre; yatak çapı
E	: Elastiklik Modülü
E₁; E₂	: yatak ve mil malzemesinin elastiklik modülü
E*	: Kompleks modülü
F	: Toplam sürtünme kuvveti
F_{adz}	: Adezyondan kaynaklanan sürtünme kuvveti
F_{def}	: Deformasyondan kaynaklanan sürtünme kuvveti
F_{his}	: Histerisisten kaynaklanan sürtünme kuvveti
F_i	: i değme noktasındaki adeziv kuvvet
F_{iş}	: Sistemden ölçme elemanına gelen işletme kuvveti
F_n; F_N	: Normal kuvvet
F_{Ni}	: i değme noktasındaki normal kuvvet
F_s	: Sürtünme kuvveti
F_h	: Halkaya gelen kuvvet
F_{ön}	: Öngerilme kuvveti
F_{yay}	: Yaya gelen kuvvet
J_i	: i değme noktasındaki bağlanmış moleküllerin bağ kuvveti
J_M	: Bağların ortalama dayanımı
K₁	: Parametre
L	: Yatak genişliği
L_h	: Halkanın mil eksenine dikey uzaklığı
M	: Pürüz sayısı
M_s	: Sürtünme momenti
n	: Salınım frekansı (motor devir sayısı)
n_i	: i değme noktasındaki bağlanmış molekül sayısı
n	: Her bir değme noktasına eş olarak dağıtılmış ortalama bağ sayısı
N	: Toplam bağ sayısı
P	: Birim genişliğe gelen kuvvet
p_i	: i değme noktasındaki yüzey basıncı
p_j	: j değme noktasındaki yüzey basıncı
p_i, p, p₀	: Ortalama yüzey basıncı
p	: Akma basıncı
p_{dikey}	: Temas basıncının düşey bileşeni

p_{yatay}	: Temas basıncının yatay bileşeni
p_{max}	: Maksimum yüzey basıncı
$p(\varphi)$	: basınç dağılımı
R_a	: Ortalama yüzey pürüzlülüğü
R_2	: Milin yarıçapı
R_1	: Burcun iç yarıçapı
R	: Burcun dış yarıçapı
t	: zaman
T	: Sıcaklık; peryot
T_1	: 1. noktanın sıcaklığı
T_2	: 2. noktanın sıcaklığı
T_g	: Camsı duruma geçiş sıcaklığı
T_m	: Ergime sıcaklığı
v	: Kayma hızı
W	: Yatak yükü
α	: Salınım açısı
φ_0	: Temas açısı
φ	: Herhangi bir andaki temas açısı
ΔL	: Boyca uzama-kısalma miktarı
ε	: Şekil değiştirme oranı
μ	: Sürtünme katsayısı
μ_1	: Ölçümle elde edilen sürtünme katsayısı
$\mu_{adz}; \mu_A$	: Adezyondan kaynaklanan sürtünme katsayısı
μ_D	: Deformasyondan kaynaklanan sürtünme katsayısı
ρ	: Eğrilik; sürtünme açısı
σ	: Gerilme
σ_0	: Orantı sınırı
τ_1	: i değme noktasındaki bağların kayma direnci
$\nu_1; \nu_2$	: Yatak ve mil malzemesinin poisson oranı
B	: İzaflı yatak boşluğu
ω	: Açısal hız
ω_0	: Maksimum açısal hız
ω_{ort}	: Ortalama açısal hız
$\omega(t)$	: Her hangi bir t anındaki açısal hız

SALINIM HAREKETİ YAPAN RADYAL KAYMALI PLASTİK YATAKLARIN SÜRTÜNME ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

ÖZET

Polimer malzemelerden elde edilen plastiklerin günlük yaşantı da dahil olmak üzere çok geniş bir kullanım alanı vardır. Bunun yanı sıra teknikte kullanılan plastiklerin, teknoloji ilerledikçe özellikleri gelişmiş ve böylece teknik alanda dişli çark, kaymalı yatak, rulmanlı yatak kafesleri, çeşitli makina elemanları yapımında, takım tezgahlarının kızak kaplamaları vb. olarak makina konstrüksiyonunda kullanılmaya başlanmıştır. Teknikte kullanılan plastiklerin en büyük avantajı, kuru sürtünme şartlarında uygun pv limitleri ile (p : ortalama yüzey basıncı, v : kayma hızı,) uzun süre çalışabilmeleridir. Bunun yanı sıra , metal malzemelerin aksine, ortam şartlarından pek etkilenmemeleri, demontajındaki kolaylıklar ve çok az bakım gerektirmeleri diğer avantajlarındandır. Bu avantajları nedeniyle büyük güçlerin iletilmediği ve zorlanmaların büyük olmadığı sistemlerde, kullanılması uygun malzemeler haline gelmişlerdir.

Plastiklerin bu denli yaygın kullanımı bu malzemelerin tribolojik davranışlarını bilmeyi zorunlu kılmıştır. Yapılan kaynak taramalarında plastiklerle ilgili bir çok çalışmanın olduğu görülmüştür. Bu çalışmalar genellikle düzlem yüzeylerin temasını esas alan çalışmalar olup malzemelerin, hareketin aynı yönde olması ya da periyodik olarak yön değiştirmesi durumunda, tribolojik davranışlarını konu etmektedir. Düzlem temas durumu ile yatak teması arasında önemli farklar olmasına rağmen ki bunlar, yatak boşluğu, burcun maruz kaldığı basıncın ulaştığı maksimum değer, temas alanındaki büyüme, temas yüzeyi sıcaklığıdır, yatak malzemesi olarak plastikleri konu eden çok az sayıdaki çalışma genellikle çok küçük boyutlu yatakların dizayn parametrelerinin tayini ile ilgilidir. Radyal yatakta olabilecek diğer bir farklılık ise muylunun hareketi ile ilgilidir. Bir çok uygulamada dönme hızı aynı yönde kalır. Bazı uygulamalarda ise hareket salınım hareketidir ve açısal hızda periyodik bir yön değişimi söz konusu olur. Salınım hareketli radyal yataklar bir çok mühendislik uygulamasında karşımıza çıkar. Çubuk mekanizmalarının mafsallarında özellikle krank-biyel mekanizmalarının piston-biyel yatağında, motor külbitörlerinin yataklarında, hidrolik ve pnömatik silindirlerin bağlantı mafsallarında kullanılan yataklarda hareket salınım hareketidir. Bu kullanım yerlerinde hız (salınım frekansı), salınım açısı, yatak yükünün büyüklüğü ve zaman içinde değişimi, yatakta yağlayıcı bir maddenin bulunup bulunmaması gibi hususlarda farklılıklar vardır. Bir çok uygulamada nispeten küçük yükler ve salınım frekansları söz konusudur. Bu gibi yerlerde yağsız çalışabilen plastik yatak malzemeleri de seçenek olarak karşımıza çıkmaktadır.

Yataktaki hareketin aynı yönde kalması yerine periyodik olarak yön değiştirmesinin bu yataklarda kullanılacak plastik yatak malzemelerinin sürtünme davranışlarında bir farklılık yaratıp yaratmadığının araştırılması ve bu çalışma şartlarındaki plastik yatakların sürtünme özellikleri ile ilgili literatürdeki veri tabanına katkıda bulunulması amacıyla bu tez çalışması yapılmıştır. Çalışmada, literatürdeki pv limitleri (0,06 Mpa.m/s) ve numuneleri sağlayan firmanın verdiği pv limitleri (0,5 MPa.m/s) esas

alınarak; ortalama yatak basıncı, kayma hızı, izafi yatak boşluğu ve salınım açısına bağlı olarak plastik burç-çelik mil temasında sürtünme katsayısının değişimi deneysel olarak incelenmiştir.

Bu amaçla, daha önce kurulmuş olan bir deney tesisatı modifiye edilerek, salınım yapan bir mille plastik burç temasında ortaya çıkan sürtünme kuvveti ve burç sıcaklığı, ortalama yatak basıncına, kayma hızına ve salınım açısına bağlı olarak ölçülmüştür. Yapılan ölçümlerde % 3 lük hata payı vardır. Ortalama yatak basıncı önce 0,0378-0,138 MPa arasında beş kademede, sonra 0,32-1,02 MPa arasında üç kademede, salınım frekansı 30-430 d/d arasında beş kademede, salınım açısı ise 30° ve 45° olmak üzere iki kademede değiştirilmiştir. Deneylerde dış çapı 60 mm, iç çapı 50 mm ve yatak genişliği 50 mm olan, çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen (UHMWPE), döküm poliamid 6 (PA6) ve polioksimetilenden (POM) yapılmış plastik burçlar kullanılmıştır.

Elde edilen ölçüm değerlerine dayanılarak plastik malzemelerin sürtünme katsayısı hesaplanmış, kayma hızı, ortalama yatak basıncı ve salınım açısı ile değişimleri grafikler halinde çizilerek yorumlanmıştır. $p_v=0,5$ MPa.m/s limit değerine göre yapılan deneyler sonucunda burçların hasar gördüğü basınç ve hız değerleri baz alınarak her bir malzeme için yeni bir p_v limiti saptanmış, bu değerler her malzeme için tek tek tablolar ve grafikler halinde verilmiş, hasar gören burçların durumları fotoğraflarla izah edilmiştir.

UHMWPE, döküm PA6 ve POM'un sürtünme katsayısının kayma hızı ile arttığı, ortalama yatak basıncı ile azaldığı görülmüştür. 30° lik salınım açısındaki sürtünme katsayısı sıralaması en büyükten en küçüğe UHMWPE, döküm PA6, POM olduğu, 45° lik salınım açısında ise UHMWPE, POM, döküm PA6 olduğu gözlenmiştir. Yüksek yüklerde ise sürtünme katsayısı ve p_v limiti sıralaması yine en büyükten en düşüğe UHMWPE, döküm PA6, POM şeklinde oluşmuş, burçların yüzey sıcaklıkları nedeniyle kullanım dışı kaldığı hız ve basınç değerleri esas alınarak bulunan yeni p_v sınır değerlerinin, firmanın düzlem temas durumu esas alınarak elde ettiği sınır değerden daha düşük çıktığı görülmüştür.

Sonuç olarak, salınım hareketli radyal kaymalı yataklarda, p_v değerlerinin altında kalmak üzere uygulanan basınç ve salınım frekanslarında; bu üç malzeme içinde salınım açısı 30° iken POM' un, salınım açısı 45° iken döküm PA6' nın, literatürdeki p_v limitlerini aşan basınçlarda ($p_0 \approx 1$ Mpa) ise POM' un uygun yatak malzemesi olabileceği izlenimi edinilmiştir.

EXPERIMENTAL STUDY OF FRICTION PROPERTIES OF OSCILLATING RADIAL SLIDING PLASTIC JOURNAL BEARINGS

SUMMARY

Plastics made of polymers are widely used almost everywhere. Properties of the technical plastics have been developed together with technological development. So that they can be used in the mechanical construction as a gear, a sliding bearing, a rolling bearing ring, various machine elements et. Because of their many advantages such as chemical resistance, ability for dry sliding, high damping properties, low friction coefficient, lightness, plastics can be used under the p_v limits with high reliability (p : mean surface pressure, v : sliding speed).

The widely use of plastics has to become necessary to know their tribological behaviors. It is found that there are several studies about plastics in the literature. These studies are generally limited to tribological behaviours of two plane contact with variable or constant sliding speed. Although there are important differences between plane contact and curve (bearing) contact, there are a few studies about radial bearings which they are about design parameters of miniature radial bearings. These differences can be listed as radial clearance, maximum surface pressure, contact area, surface temperature. The other difference between them is movement of the shaft. The rotation speed is the same direction in most applications. In some applications, movement has oscillation movement and direction of angular velocity varies periodically. Oscillating radial bearings are met many engineering applications. Some of them which work without lubricant can be used plastics bearings where loads are light and speeds are low.

The aim of being done this experimental study is whether plastics bearings are suitable these oscillating radial bearings and to contribute to literature about friction properties.

In this experimental study, the test apparatus established for the investigation of tribological properties of dry rubbing sliding bearings under operating conditions is used. Plastic materials are ultrahigh molecular weight polyethylene, polyoxymethylene(acetal) and cast polyamid 6. These polymers are machined as a bearing bush 50 mm in inner diameter, 60 mm in outer diameter and 50 mm in length.

First five different mean bearing pressures which are between 0,0378 and 0,138 MPa, then three different mean bearing pressures which are between 0,32 and 1,02 Mpa, five different oscillation frequencies which are between 30 and 430 rpm and two different oscillation angles which are 30° and 45° are carried out in experiments. Friction force between plastic bearing-steel shaft and temperature of bearing are measured, then being based on these data, friction coefficient, contact area, contact pressure, and contact angle of plastic bearing are calculated. The measuring systems have % 3 errors.

The diagrams obtained as a result of experiments are presented. The variations of friction coefficient and contact temperature with respect to sliding speed and mean surface pressure are given. At the end of this section comments about the results are made.

Friction coefficients of UHMWPE, cast PA6 and POM increase while sliding speed increases and they decrease while mean bearing pressure increases at two angles of oscillation. The friction coefficient and surface temperature of UHMWPE is the highest between them. The friction coefficient of POM is the lowest at 30° oscillation angle and the friction coefficient of cast PA6 is the lowest at 45° oscillation angle. At relatively high pressures which are between 0,32 and 1,02 Mpa, the friction coefficient of POM is the lowest.

As a result, POM can be suitable bearing material between these plastics while oscillation angle is 30° and it can be suitable bearing material pressures ($p_0 \approx 1$ Mpa) which are higher than pv limits in the literature . And then cast PA6 can be suitable bearing material while oscillation angle is 45°.



1. GİRİŞ

Triboloji, birbirine göre hareket eden ya da edebilen ve birbirini etkileyen yüzeylerin bilimi ve teknolojisidir. Teknoloji ağırlıklı bölümüne tribo-teknoloji de denmektedir. Sürtünme, tribolojinin genel çerçevesi içine giren alt konuların en önemlisidir. Cansız varlıkların oluşturduğu doğanın dengesinde çok önemli olan sürtünme, canlı varlıklar için de çok önemli bir role sahiptir.

Teknik sistemler, özellikle makina mühendisliğinin çalışma alanına giren makinalar dikkate alındığında birbirine göre hareket eden yüzeyler yoğun olarak karşımıza çıkar. Mühendislik sistemlerinde de canlılarda olduğu gibi sürtünme direncinin bazı temas yüzeylerinde büyük, diğer bazı yüzeylerde ise küçük olmasının daha uygun olduğu görülecektir. Çoğu zaman sürtünme ile bir arada gözlenen aşınma olayında da farklı istekler söz konusu olur. Birbirine göre hareketli yüzeyler halinde bir diğer olgu mekanik enerjinin sürtünme ile ısıya dönüşmesidir. Yapılan bir inceleme [1] çeşitli kaynaklardan elde edilen toplam enerjinin kabaca $1/3$ ' ünün sürtünme ile kaybedildiği gibi bir sonuç vermiştir. Sürtünme işi sonucunda ortaya çıkan ısının temas bölgesinde gerek mikro gerekse makro seviyede doğurduğu sıcaklık artışlarının çok çeşitli sonuçları olabilir. Bir çok durumda bu sıcaklık artışı tribo-sistemin davranışını da doğrudan etkiler [2].

Özellikle kuru ve sınır sürtünmenin söz konusu olduğu hallerde sürtünme direncinin oluşumunda hareketli yüzeylerin malzemelerinin (tribo-malzemelerin) özellikleri belirleyicidir. Makina mühendisliği uygulamalarında bu malzemelerden biri genellikle çeliktir. Çeliğe karşı çalışan malzemeye de çoğu zaman yatak malzemesi adı verilir. Metal esaslı yatak malzemelerine ek olarak, özellikle geçen yüzyılın ikinci yarısında, mühendislik plastiklerinin de [3] yatak malzemesi olarak kullanımı başlamış ve bu malzemeler bir çok uygulama alanı için oldukça geniş bir kabul görmüştür. Saf plastiklere ek olarak takviyeli plastikler ve plastiklerin yapısında yer aldığı karma (kompozit) malzemelerin de geliştirildiği ve yatak malzemesi olarak daha yaygın bir kullanım alanı bulduğu söylenmelidir.

Plastikten yapılmış yatak malzemelerinin belli başlı avantajları olarak bir çok halde yağsız çalışabilmeleri, korozyona ve diğer kimyasal etkilere karşı dirençleri, imalat

maliyetlerinin düşük oluşu, montaj ve demontajlarının nispeten kolay oluşu, bakım gerektirmemeleri, gerektiğinde elektriksel yalıtım sağlamaları sıralanabilir. Dezavantajları olarak da taşıma kapasitelerinin nispeten sınırlı oluşu, ısı iletkenliklerinin iyi olmayışı söylenebilir [4].

Konstrüktif açıdan bakıldığında, yatak malzemelerinin bilinmesi gereken ana özellikleri olarak aşınma karakteristiği ve harekete karşı gösterdiği dirençtir. Bu amaçla, kontrollü laboratuvar şartlarında belli standart deney numuneleri kullanılarak yapılan sistematik deneylerin sonuçları derlenerek konstrüktörlerin kullanımına sunulur. Yatak malzemesi olarak kullanılan plastikler ve karma malzemeler için bu şekilde elde edilmiş bir çok bilgiye ulaşmak mümkündür.

1.1 Kaynak Araştırması

Literatürde, plastik malzemelerin kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleriyle ilgili bir çok kitap [5-25] ve makale mevcuttur. Burada, tez konusuna en yakın olan çalışmalardan bahsedilecektir. Bu çalışmalardaki deneylerin bir bölümü pim-disk/levha tertibatında yani düzlem yüzeylerin teması halinde yapılmıştır. Diğer çalışmalardaki deneyler ise çok küçük ya da normal boyutlarda olmak üzere radyal yatak şeklinde yani eğri yüzeylerin teması halinde yapılmıştır. Düzlem yüzeylerin teması halinde yapılan çalışmalar polimerler, UHMWPE ve PA6 şeklinde sınıflandırılarak tarih sırasına göre, daha sonra minyatür yataklarla ilgili çalışmalar ve en sonunda da normal boyutlu yataklarla ilgili çalışmalar yine tarih sırasına göre sıralanarak yazılmıştır.

LUDEMA, K.C. ve TABOR, D. [26] polimerlerin sürtünme özellikleri ile viskoelastik karakteristikleri arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Bu incelemenin sonucunda , camsı geçiş sıcaklıklarında hem kayma hem de yuvarlanma sürtünmesi ile malzemenin viskoelastik özellikleri arasında iyi bir ilişki kurulabilmesine rağmen, bu sıcaklıkların altında kayma sürtünmesi ile viskoelastik yapı arasında bir ilişkilendirme yapılamamış sadece naylon ve polietilenin kayma sürtünmesinin hıza ve sıcaklığa bağlı olduğu gözlenmiştir. BARTANEV, G.M. ve ELKIN, I. [27] çeşitli karşı yüzey malzemeleri ile çalışan polimerlerin değişik sıcaklık aralıklarında ve kaymanın başladığı durumdaki kayma sürtünmesini incelemişlerdir. Bu durumdaki sürtünme kuvvetinin sıcaklığın rejim haline geldiği bölgedekinden 10-40 kat daha fazla olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca sürtünme kuvvetinin sıcaklıkla arttığını, camsı duruma geçiş sıcaklığından (T_g) sonra bir maksimumdan geçerek düştüğünü ifade

etmişlerdir. POOLEY, C.S. ve TABOR, D. [28] yaptıkları çalışmada, bazı termoplastiklerin sürtünme davranışları ile molekül yapıları arasında bir ilişki olup olmadığını araştırmışlar, politetrafloretilen (PTFE) ile yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) in düşük sürtünme özelliklerinin, molekül yapılarındaki düzgünlükten kaynaklandığını ifade etmişlerdir. TANAKA, K. ve MIYATA, T. [29] silindir şeklindeki PTFE, yüksek yoğunluklu polietilenin HDPE ve UHMWPE' nin cam yüzey üzerinde düşük hızlarda ve sabit yük altında kayması sonucu, moleküler ve morfolojik yapılarının, statik ve dinamik sürtünme katsayısına ve transfer film oluşumuna etkilerini incelemişlerdir. Her üç polimerde de statik sürtünme katsayısının yönlenmeye duyarlı olduğunu, molekül zincirleriyle kayma yönünün paralel olduğu sürtünme katsayısının, molekül zincirleriyle kayma yönünün dik olduğu sürtünme katsayısından daha düşük olduğunu, dinamik sürtünme katsayısının da diğer yarıkristalin polimerlerden daha düşük olduğunu ifade etmişlerdir. PTFE' deki transfer filmi oluşumunun sıkı paketlenmiş morfolojik yapıdan ziyade molekül yapısı tarafından kontrol edildiğini, diğer iki polimerde ise molekül yapı kadar sefirulit yapının da rolü olduğunu söylemişlerdir. UHMWPE' nin sürtünme katsayısının (0,06-0,1) HDPE' ninkinden büyük çıktığını, bunun UHMWP' nin molekül zincirlerinin uzunluğundan kaynaklanabileceğini ifade etmişlerdir. CZICHOS, H. un [30] çalışması ise termoplastik malzemelerin tribolojik davranışlarını etkileyen adeziv ve abrazyon mekanizmalarını konu almıştır. Polimer-polimer temasında sürtünmenin kesinlikle adezyona bağlı olduğunu, artan yüzey pürüzlülüğü ile sürtünmenin önce azaldığını, pürüzlülük değerinin $R_a=0,2-0,4 \mu m$ olduğu durumda bir minimumdan geçtikten sonra tekrar arttığını ifade ederek bunun önce adezyon prosesinin sonra da abrazyon prosesinin devreye girmesinden kaynaklandığını söylemiştir. Polimer-çelik temasında ise pürüzlülüğü $R_a=1 \mu m$ olan çelik yüzeyi ile temasda olan polimerlerin abrazyon aşınması davranışlarını incelemiştir. HOLMGERG, K. ve WICKSTRÖM, G. [31] 22 çeşit polimerin sürtünme ve aşınma özelliklerinin hız, basınç ve ortam sıcaklığına bağlı olarak nasıl değiştiğini deneysel olarak incelemişlerdir. Deneyler sonucunda UHMWPE ve PTFE' nin diğer polimerler arasında en düşük aşınma ve sürtünmeye sahip olduğunu, polimer malzemelerde basınç arttıkça sürtünme katsayısının düştüğünü, hız arttıkça arttığını ve ortam sıcaklığı düştükçe azaldığını ifade etmişlerdir. Sıcaklık azaldıkça sürtünme katsayısının düşmesini polimer yüzeyinin sertliğinin artmasına dolayısıyla gerçek temas alanının düşmesi sonucu sürtünme kuvvetinin azalmasına bağlamışlardır. Hız 0,1 m/s, basınç 1 MPa ve sıcaklık 22 °C iken UHMWPE' nin sürtünme katsayısı 0,18, PA6' nın 0,5 ve POM' un 0,6 olarak ölçülmüştür. VAZIRI, M., STOTT, F.H. ve

SPURR, R.T. [32] yedi adet polimerin, polimer-polimer ve polimer-elik temasında statik ve dinamik sürtünme katsayılarını ölçerek kayma hızı ve sıcaklıkla değişimini incelemişlerdir. Polimer polimer temasında, her polimerde düz yüzeylerdeki statik sürtünme katsayısının silindirik yzeylerinkinin 1,3 katı olduğunu, POM ve HDPE' nin dinamik sürtünme katsayısının zamanla pek değişmediğini, 0,25-0,35 m/s lik bir aralıktta POM' un bir maksimumdan ($\mu=0,6$) geçtiğini ama HDPE' nin çok az bir değişiklik gösterdiğini, PA6' nın ise zamanla keskin bir artış gstediğini ve 0,25-0,35 m/s lik hız aralığında bir maksimumdan ($\mu=1$) geçtiğini ifade etmişlerdir. Polimer elik temasında POM' un zamanla dinamik sürtünme katsayısının arttığını ve polimer polimer temasından daha büyük olduğunu, HDPE' nin sürtünme katsayısının zamanla sabit kaldığını ve polimer polimer temasından daha düşük olduğunu, PA6' nın ise polimer polimer temasındakinden farklı olmadığını söylemişlerdir. Polimerin dinamik sürtünme katsayısının, sıcaklık artışı polimerde bir yumuşamaya neden olacak boyutta olmadığı durumlarda, kayma hızından ve temas yüzeyi sıcaklığından bağımsız olduğunu ve sürtünmenin polimerin yüzey enerjisi ile arttığı sonucuna varmışlardır. MENS, J.W.M. ve DE GEE, A.W.J. [33] 18 değişik polimerin hava ve su ortamında sürtünme katsayıları ve aşınma miktarlarını araştırmışlar, tribolojik özelliklerini genel hatlarıyla incelemişler ve PTFE katkılı polimerlerin hava içinde çalışmada çelikle temasının iyi tribolojik özellikler gösterdiği, sulu ortam şartlarında ise naylon 6,6 ve POM' un iyi bir seçenek olduğu sonucuna varmışlardır. Yük 500 N ($p=5$ MPa) ve hız 0,25 m/s iken hava ortamında POM' un sürtünme katsayısı 0,4, sulu ortamda ise 0,12 olarak ölçülmüştür. UZUNER, F., TEMİZ, V. ve GEDİKTAş, M. nin [34] çalışmaları ise, aralarında bu tez çalışmasında kullanılan polimerlerin de bulunduğu, 12 değişik polimerin sürtünme katsayısı ve aşınma karakteristikleri, evre hızı ve yüzey basıncı değişimine bağlı olarak pim-disk makinasında deneysel olarak incelenmiştir. Saf polimerlerde sürtünme katsayısının kayma hızı ile arttığını, yüzey basıncı ile düştüğünü, dolgulu polimerlerin dolgu oranları arttığı sürtünme katsayısının da arttığını, dolgulu polimerlerin aşınma miktarlarının dolgusuz olanlardan daha az olduğunu ve dolgusuz polimerler içinde en iyi aşınma mukavemetine sahip olanın UHMWPE olduğunu ifade etmişlerdir. $p=2,78$ MPa yüzey basıncında ve 0,2 m/s hızda POM' un sürtünme katsayısı 0,18, PA6' nın 0,2 ve UHMWPE' nin 0,15 ölçülmüştür. HOOKE, C.J., KUKUREKA, S.N., LIAO, P., RAO, M. ve CHEN, Y.K. [35] polimer malzemeden yapılmış dişli çarkların sürtünme ve aşınma davranışlarını incelemişler ve bu durumda eğri yüzeylerin teması söz konusu olduğundan, pim-disk temasından farklı aşınma davranışları saptamışlardır. Kam, dişli ve yuvarlanmalı

yataklarda temas eden yüzeyler polimer olduğu zaman ısı iletimi çok düşük olacağından bu yüzeylerdeki sıcaklığın ana problemlerden biri olduğunu ve sürtünme ısının malzemenin performansını etkileyen ana unsur olduğunu ifade etmişlerdir. POM' un sürtünme katsayısını 0,35 ve Naylon 66' yı da 0,6 civarında ölçmüşlerdir. Yüzey sıcaklığı 80°C yi aştığında naylon yüzeyinde enine çatlaklar oluştuğunu söylemişlerdir. GAO, J., MAO, S., LIU, J. ve FENG, D. [36] yaptıkları sürtünme ve aşınma deneyleri ile polimer-paslanmaz çelik temasını ele almışlardır. Yaptıkları analizler sonucunda, sürtünme prosesi boyunca, yüzeylerde kompleks kimyasal reaksiyonlar meydana geldiğini ve bu reaksiyonların polimerin sürtünme ve aşınma özelliklerini etkilediğini saptamışlardır. Bu reaksiyonların ve polimerlerin karakteristik yapısının polimer transferinden etkilendiğini ve transfer film oluşumunun polimerin sürtünme ve aşınma özelliklerini etkilediğini ifade etmişlerdir. İnceledikleri polimerler içinde yer alan naylon 6' nın, 98 N yük ve 0,42 m/s hızda, sürtünme katsayısının başlangıçta PTFE' den bile küçük olduğunu ($\approx 0,05$) ama 70 dakika sonunda artarak 0,56 seviyesine çıktığını vurgulamışlardır. Başlangıçtaki yani PTFE' de transfer film oluşumu başlamadan önceki sürtünme katsayısının düşük olmasını, naylonun sertliğinin PTFE' den daha büyük olmasına ve bunun sonucu olarak daha küçük temas alanı oluşmasına bağlamışlardır. REHBEIN, P. Ve WALLASCHEK, J. [37] geliştirdikleri bir deney düzeneğinde, yüksek frekanslı yıpratma (fretting) şartlarında polimer-çelik ve alüminyum-alüminyum temasında malzemelerin sürtünme ve aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Deney düzeneğinde hareket doğrusal osilasyonla sağlanmakta olup hareketin frekansı 1-5 Hz arasında uygulanarak sürtünme ısından kaçınıldığı ifade edilmiştir. Uygulanan statik normal yük 9 N dur. Yüksek frekanslı sürtünme katsayısının zamanın bir fonksiyonu olduğunu, yüksek frekanslarda ölçülen sürtünme katsayısının alçak frekansta ölçülen sürtünme katsayısından ya da statik sürtünme katsayısından daha küçük çıktığını, bunun nedeninin de sürtünme mekanizmalarının farklılığından ileri geldiğini ifade ederek PI-100 Cr6 temasında statik sürtünme katsayısı 0,3 iken, yüksek frekanslı osilasyon hareketi esnasında sürtünme katsayısının 0,06 olarak ölçüldüğünü söylemişlerdir. Bunun nedeninin, temas halindeki yüzeylerin arasındaki moment iletiminin temas noktalarındaki pürüzlerin çarpışması sonucu olduğunu ve bu mikroçarpışmaların hem normal hem de teğetsel doğrultuda lokal olarak titreşen numuneler yarattığını, bunun da temas alanını azalttığını iddia etmişlerdir.

WEST, G.H. ve SENIOR, J.M. [38] pim-disk tertibatında, hızı 0,01-10 mm/s olan doğrusal osilasyon hareketinde ve polimer-polimer temasında, polietilenin sürtünme özelliklerine sıcaklığın, anizotropinin, kalıplama şartlarının ve yüzey davranışlarının

etkisini araştırmışlar ve sıcaklığın sürtünme üzerinde en önemli etken olduğunu bulmuşlardır. Bunun nedeni olarak da lokal pürüz kaynamaları ve yüzey enerjisi yorumunu yapmışlardır. Sıcaklık artışıyla yüzey enerjisinin düştüğünü, dolayısıyla sürtünme katsayısının da buna bağlı olarak azaldığını ifade etmişlerdir. Deneylerde artan yük ile sürtünme katsayısının azaldığını bunun nedeni olarak da temiz yüzeylerin temasında sürtünme katsayısının yükün $-0,33$ kuvveti ile orantılı olduğunu söylemişlerdir. TANAKA, K. [39] yaptığı deneysel çalışmada yüksek ve düşük yoğunluklu polietilenin cam yarıküre ile dinamik elastik temas davranışını ve sürtünmesini incelemiştir. LDPE için dinamik temas alanının, W yükü göstermek üzere, $W^{0,78}$ ile, statik temas alanının ise $W^{0,75}$ ile orantılı olduğunu, hız arttıkça dinamik temas alanının azaldığını (sürtünme ısı ihmal edilecek boyutlarda ise) ve adezyonal bağların dayanımının da hızla orantılı olarak arttığını ifade etmiştir. 0,002-1 m/s hız ve LDPE için 2 N, HDPE için 5 N yük altında sürtünme katsayısının hız artarken LDPE’de azaldığını, HDPE’de ise arttığını gözlemlemiştir. Ayrıca HDPE’ nin sürtünme katsayısının ($\mu=0,2-0,3$) LDPE’den küçük olduğunu ($\mu=0,5-1,4$) söylemiştir. Bunun sebebi olarak LDPE’ nin temas alanının HDPE’ nin temas alanından daha büyük olmasını göstermiştir. BARRETT, T.S., STACHOWIAK, G.W. ve BATCHELOR, A.W. [40] pim-disk tertibatı ile 44-82°C sıcaklık, 1,25-10 m/s hız ve 35 N ($p=4,85$ MPa) yük altında, UHMWPE’ nin sürtünme ve aşınma özelliklerinin, yüzey pürüzlülüğü ve kayma hızı ile değişimini araştırmışlar ve aşınmanın yüzey sıcaklığına ve yüzey pürüzlülüğüne bağlı olduğunu, yüksek kayma hızlarında ve yüksek pürüzlülüklerde abraziv aşınmanın meydana geldiğini ve UHMWPE den yapılmış pimin bir miktar eriyerek çelik disk yüzeyine sıvandığını saptamışlardır. $R_a=0,07-0,53$ μm arasındaki yüzey pürüzlülüğü ve 1,25-10 m/s lik hız aralığında sürtünme katsayısının 0,2-0,4 arasında değiştiğini grafikler halinde göstermişlerdir. SPALDING, M.A. ve HYUN, K.S. [41] çeşitli polietilen reçinelerinin dinamik sürtünme katsayılarının, hız, basınç ve sıcaklığın bir fonksiyonu olduğunu deneysel olarak ortaya koymuşlardır. Deneyler 0,69-6,9 MPa yüzey basıncı, 7,6-30,5 cm/s hız ve 20-140°C sıcaklık aralığında gerçekleştirilmiş, bütün reçineler için sürtünme katsayısının hız arttıkça arttığı, basınç arttıkça azaldığı görülmüştür. Sürtünmenin sıcaklığa bağımlılık durumu ise reçine cinsine göre değişiklik göstermiştir. Sürtünme katsayıları 0,1 ile 0,8 arasında yer almıştır. SUH, N.P., MOSLEH, M. ve ARINEZ, J. [42] nin yaptıkları çalışmada, protez olarak kullanılan UHMWPE’ nin aşınmasını azaltmak amacıyla PE içine kayma düzlemine dik doğrultuda koyulacak UHMWPE fiberlerinin meydana getireceği polietilen homokompozitlerinin bu amaca uygun sonuç verdiğini göstermişlerdir. Bu amaçla, silindirik şeklindeki UHMWPE nin ve

homokompozitin düzlem üzerine 760 N ile bastırılması ve bu düzleme 8,6 m/s hızla osilasyon hareketi yaptırılması sonucu meydana gelen sürtünmeyi ve aşınmayı inceleyerek sürtünme katsayısının 0,07-0,185 aralığında olduğunu göstermişlerdir. DONG, H., SHI, W. ve BELL, T. [43] biomedikal araştırmalar doğrultusunda, UHMMWPE nin titanium alaşımı olan Ti6Al4V malzemesi ile sulu temasında, tribolojik performansını geliştirme potansiyelini araştırmışlardır. 0,25 m/s hız ve 5 MPa temas basıncında sürtünme katsayısının 0,1-0-0,112 aralığında olduğunu ifade etmişlerdir. DA SILVA, C.H., TANAKA, D.K. ve SINATORA, A. [44] galvanize edilmiş çelik yüzey ile HDPE arasındaki sürtünme katsayısına, yükün ve izafi nemin etkilerini incelemişlerdir. CZICHOS' un sürtünme katsayısında ortamdaki nem oranının önemli olduğunu söylediğini ve yaptığı bir çalışmada sürtünme katsayısının sadece malzeme özelliği olmadığı aynı zamanda temas eden cisimler, arayüzey, ortam gibi tribolojik sisteme bağlı olduğunu gösterdiğini söylemişlerdir. Bu durumda izafi nemin sistemin sürtünme katsayısına etki etmesi gerektiğini ifade ederek, 0,5-20 N yük aralığında ve 0,03 m/s hız altında sürtünme katsayısının 0,05 ile 0,26 arasında değiştiğini ve yük arttıkça arttığını göstermişlerdir. Ayrıca sürtünme katsayısının düşük yüklerde izafi nemin artmasıyla arttığını, yüksek yüklerde ise nemden etkilenmediğini saptamışlardır. SONG, J., LIU, P., CREMENS, M. ve BONUTTI, P. [45] doğrusal salınım hareketi altında, işlenmiş UHMWPE den yapılmış bir numunenin tribolojik davranışlarına, kesme hızı, paso derinliği ve ilerleme hızının etkilerini incelemişlerdir. İncelemeler sonucunda, sürtünme katsayısı ile paso derinliği ya da kesme hızı arasında anlamlı bir ilişki kurulamadığı, ortalama sürtünme katsayısının başlangıçta 0,12-0,15 arasında olduğu, bir saatlik çalışma sonunda ise 0,17-0,23 mertebelerine çıktığı ifade edilmiştir. KLAPPERICH, C., KOMVOPOULOS, K. ve PRUITT, L. [46] yaptıkları çalışmada, UHMWPE nin, parlatılmış çelikle temasında, hem tribolojik özelliklerini hem de temas süresince mikro yapısında meydana gelen değişimleri incelemişlerdir. Sürtünme katsayısının düşük basınçlarda kayma hızı ile azalırken, daha yüksek basınçlarda kayma hızı ile çok az arttığını ve daha düşük sürtünme katsayısı değerlerinin daha yüksek basınçlarda meydana geldiğini göstermişlerdir. Aşınmanın öncelikli olarak temas basıncına, ikincil olarak da kayma hızına bağlı olduğunu ve düşük basınçlarda UHMWPE'nin kristalin bölgedeki lamellerinin kayma boyunca kayma düzlemine paralel kaldığını ifade etmişlerdir. 10-35 mm/s hız ve 16,2-59,1 MPa temas basıncı aralığında sürtünme katsayısının 0,08-0,23 mertebelerinde bulunduğunu söylemişlerdir.

WATANEBE, M., KARASAWA, M. ve MATSUBARA, K. [47] 1-100 m/s aralıktaki kayma hızlarında, 50-500 N yük aralığında ve oda sıcaklığında, naylon 6'nın sürtünme özelliklerinin yük ile değişimini araştırmışlardır. Sürtünme katsayısı değerlerini 0,4 ile 2 arasında bularak sürtünme kuvvetinin yük ile önce arttığını, camsı duruma geçiş sıcaklığına eriştikten sonra ($T_g=45^\circ$) sabit kaldığını, sürtünme katsayısının ise yük ile önce arttığını, bir maksimumdan geçtikten sonra azaldığını göstermişlerdir. Bu azalmanın nedenini söz konusu sıcaklıklarda naylonun eriyerek ara yüzeyde sıvı gibi davrandığı şeklinde açıklamışlardır. CLERICO, M. [48] naylon 6.6-metal temasında plastik malzemenin sürtünme ve aşınmasını incelemiş, naylonun çelik ile temasında transfer filmi oluştuğunu, bu olayın sürtünme katsayısını düşürdüğünü, bu filmin çok yüksek yüklerde ve sıcaklıklarda eriyerek yüzeyi kapladığını ve sıvı plastik yağlayıcı durumuna geldiğini belirtmiştir. 76,1 cm/s lik hızda ve 30-220 N luk yük aralığında sürtünme katsayısını 0,1 ile 0,6 aralığında bulmuşlardır. WATANEBE, M. ve YAMAGUCHI, H. [49] 0,1-10 mm/s aralığındaki hızlarda ve 49 N yük altında naylonun sürtünmesine sıcaklığın ve kayma hızının etkisi ile sıcaklığın (25°C - 130°C), yükün (196 N) ve hızın aşınmaya etkisini araştırmışlardır. Naylonun viskoelastik özelliğinden dolayı, artan hızla ve sıcaklıkla yüzey akmasına direnç gösterdiğini yani naylonun kesme dayanımının arttığını, kaymanın ara yüzeyde meydana geldiğini ve bu nedenle sürtünme katsayısının da arttığını ifade etmişlerdir. Grafiklerden bu artışın 100°C civarında maksimum değere ulaştığı sonra da naylonun lokal olarak erimeye başlaması ile yağlama etkisi gösterdiği için sürtünme katsayısının düşmeye başladığı görülmektedir. AKKURT, S. [50] yaptığı çalışmada PA6'nın kuru ve sululu ortamda sürtünme özelliklerini incelemiştir. VAN DE VELDE, F. ve DE BAETS, P. [51] literatürde izin verilen pv limitlerinin üzerindeki değerlerde, çok yüksek temas basınçları altında ($P=20, 55, 96$ MPa) ve çok düşük kayma hızlarında ($V=5$ mm/s), çelik üzerinde lineer gidip gelme hareketi ile kayan (strok=240 mm) PA 6'dan yapılmış numunenin sürtünme ve aşınma davranışını incelemiştir. İnceleme sonunda PA 6'nın büyük basınçlara dayanıklı olduğunu ve çelik yüzeyde bir hasar oluşturmada kaymaya izin verdiğini, plastik akmanın (sürtünme) olabileceği bu durumda aşınmanın ortalama değerlerde olduğunu, numuneye ilk hareket verildiğinde ve hareket kesildiğinde düşük sıcaklık aralıklarında stick-slip olayı oluştuğunu, normal ve teğetsel titreşimin sürtünme kuvvetinde azalmaya neden olduğu için stick-slip esnasında sürtünme kuvvetinin düzgün harekettekinden daha düşük çıktığını, PA'nın stick-slip hareketine karşı duyarlı olduğunu, bu hareketin yaratacağı titreşimlerin malzemeye, hatta kullanılan konstrüksiyona hasar verebileceğini saptamışlardır. Sürtünme katsayısının artan

yükle azaldığını ve 0,25 ile 0,5 arasında değiştiğini ifade etmişlerdir. TEMİZ, V. ve PARLAR, Z. [52] ise pim-disk tertibatında, normal ve yağ emdirilmiş döküm PA6' nın tribolojik davranışlarını deneysel olarak incelemişlerdir. İncelemeler sonucunda sürtünme katsayısının kayma hızı ile arttığını, normal numunenin sürtünme katsayısı 0,15 civarında iken yağ emdirilmiş döküm PA6' nın sürtünme katsayısının 0,2 civarında olduğunu, temas yüzeyi sıcaklığının yağsız numuneden daha yükseğe çıktığını saptamışlar ve yağsız numuneye yağ emdirilmesinin, malzemenin tribolojik özelliklerini geliştirmek açısından, avantajlı olmadığı yorumunu getirmişlerdir. ORNDORFF, Jr.R.J. [53] denizcilikte ve pompa endüstrisi gibi sulu ortamlarda kullanılan yataklar için yaptığı araştırmada, UHMWPE ile kauçuktan oluşan yeni bir alaşımı yatak malzemesi olarak sulu ortamda test etmiş ve sürtünme ve aşınma özelliklerini incelemiştir. Mil şeklindeki çelikten yapılmış karşı yüzey 0,001-7 m/s aralığındaki çevre hızlarında dönerken polimer malzemenin 0,276-2,986 MPa aralığında ortalama yüzey basıncı ile karşı yüzeye temas ettirilmesi sonucunda kinetik sürtünme katsayısının ve aşınmanın artan yük ve hızla azaldığını, benzer şartlar altında kauçuk yatakların 10 kat daha fazla aşındığını ve sulu ortamlarda UHMWPE' nin iyi bir malzeme olduğunu ifade etmiştir. Sürtünme katsayısı değerlerinin 0,14 ile 0,26 arasında bulunduğu gözlenmiştir.

Buraya kadar bahsedilen çalışmalar, polimerlerin daha ziyade pim -disk testleri ile çeşitli parametrelere bağlı olarak tribolojik özelliklerini inceleyen çalışmalardır. Aşağıda tarih sırasıyla bahsedilecek olan çalışmalar ise, minyatür boyutlu radyal kaymalı plastik yatakların ya dizayn parametrelerine ya da sürtünme ölçen metodlara yönelik çalışmalardır. DETTER, H. [54] Yaptığı çalışmada, hassas yatakların (ölçme cihazlarında, küçük makinalarda kullanılan küçük boyutlu yataklar $J=0,1-10$ mm) hem kuru hem de sıvı sürtünme şartlarında sürtünme momentini tam olarak ölçecek bir tesisat geliştirmiştir. Hassas yatakların malzeme seçiminde sürtünme ve aşınma önemli rol oynadığından bu gibi yatakların boyutları sürtünme testleriyle tayin edilir yaklaşımı ile iç çapı 1 mm, dış çapı 2 mm ve genişliği 1 mm olan PTFE' den yapılmış radyal kaymalı plastik bir yatağı ele alarak 0,14-0,3 MPa ortalama basınç ve 10-200 mm/s hız aralığında sürtünme durumunu incelemiştir. İncelemeler sonucunda sürtünmenin yük ve hızla arttığını ifade etmiştir. FORNALLAZ, P., GEHRIG, J. ve REGNAULT, G. [55] yaptıkları bu çalışmanın amacının, konstrüktörlere daha güvenilir kriterler sunmak ve yatakların ömür performanslarını önceden saptamak için kuru sürtünme şartlarında çalışan hassas radyal yatakların sürtünme ve aşınma davranışlarını incelemek olduğunu ifade etmişlerdir. Normal işletme şartlarında ve beş ölçüm sonucunda, hassas radyal

yataklardaki ortalama sürtünme kuvvetini, sürtünme kuvvetindeki değişimi (frekans, genlik ve olası stick-slip titreşimleri), mil yüzeyindeki sıcaklığı ve iki yöndeki aşınmayı ölçerek grafikler halinde vermişlerdir. RYMUZA, Z. nin [56], i çapı 2,15 mm, dış çapı 6 mm ve genişliği 2,1 mm olan radyal kaymalı polimer yataklar hakkındaki çalışmasında, yatak aşınmasında yüzey enerjisinin rolü araştırılmıştır. Ortalama basıncının 3 MPa' e ulaştığı yüklerde ve 0,1 m/s' den daha düşük hızlarda yapılan bu araştırmanın sonucunda, aşınma hızı ile polimer malzemenin adeziv-koheziv özellikleri arasında belli bir ilişki olduğunu, adezyonal enerjinin polimerin aşınma prosesinde önemli bir rol oynadığını hem deneysel hem de teorik olarak göstermiştir. RYMUZA, Z. ve KOWALSKI, P. nin [57] birlikte yaptıkları çalışmada ise yine i çapı 2,15 mm, dış çapı 6 mm ve genişliği 2,1 mm olan radyal kaymalı polimer yataklarda, kuru sürtünme halinde temas durumu ve basınç dağılımı, elik mille polimer yatak arasındaki sürtünme de göz önüne alınarak, teorik olarak incelenmiş, elde edilen formüller deneysel olarak teyit edilmiştir. Temas bölgesinde muylu ile yatak burcu arasındaki basınç dağılımının parabolik olduğunu, temas açısı arttıkça sürtünme katsayısının da arttığını, sürtünme katsayısı artarken basınç dağılımının giderek daha asimetrik olduğunu, bu tip yataklarda sürtünme bölgesinde tayin edilen basınç dağılımının, gerçek temas basıncının maksimum değerini, temas açısını ve radyal deformasyon miktarını tayin etmek için kullanılabileceğini ifade etmişlerdir. RYMUZA, Z. nin [58] bir başka çalışmasında ise yine aynı tip polimer yatakların dizaynı için, daha önceki çalışmaların sonuçlarına dayanan kriterler sunulmuştur. Yüzey enerjileri, sürtünme ısısından doğan yüzey sıcaklıkları göz önüne alınarak polimer yatakdaki aşınma miktarı tahmin edilmeye çalışılmıştır. Aynı araştırmacı [59], başka bir çalışmasında, 1-5 mm aralığında çapa sahip olan polimer yatak-elik mil temasında, polimerin adeziv ve koheziv özelliklerinin, nispeten yüksek basınç (7 MPa) ve çok düşük kayma hızlarında (0,0026 m/s) aşınmada önemli bir rolü olduğu hipotezini konu etmiş ve adezyon etkileşiminin etkisi ile aşınma oranı arasında bir ilişki bulunduğunu ve bu ilişkinin sözü edilen hipotezi desteklediğini ifade etmiştir. RYMUZA, Z., KUSZNIEREWICZ, Z. ve MANTURZYK, G. [60] yaptıkları çalışmada, i çapı 3,3 mm, dış çapı 6 mm ve genişliği 6 mm olan minyatür polimer yatakla polimer mil temasında sürtünme momenti ile aşınma hızını salınım hareketini sağlayarak mşlerdir. Bu amaçla yeni bir sistem geliştirdiklerini, bu sistemin kendi başına bilgisayar kontrolünü ve veri analizini yapabildiğini ifade etmişlerdir. RYMUZA, Z., KUSZNIEREWICZ, Z., SOLARSKI, T., KWACZ, M., CHIZHIK, S.A. ve GOLDADE, A.V. [61] bir önceki çalışmada sözü edilen polimer yatakda, başlangıç prosesindeki statik sürtünmeden kinetik

sürtünmeye geçişi ve adezyonu inceleyerek, ölçülen statik sürtünme kuvveti, adezyon kuvveti, hesaplanan sürtünme kuvveti ile zaman arasında bir ilişki kurmuşlardır.

Normal boyutlu polimer yataklar konusunda yapılan çalışmalar ise aşağıdaki gibi özetlenebilir: LEDOCQ, J.H.M. [62] hafif yük altında polimer radyal yatakları test etmek için bir tesisat geliştirmiş olup sürtünme momentinin zamana göre değişimini ölçerek grafikler halinde vermiştir. Uygulanan yük ya da hız çok yüksekse ölçülen sürtünme momentinin de yüksek çıktığını ifade etmişlerdir. ZHANG, Z.Z. , SHEN, W.C., LIU, W.M., XUE, Q.J. ve LI, T.S. nin [63] birlikte yaptıkları araştırmada, yatak malzemesi olarak katkı PTFE nin farklı yağlayıcılar kullanarak çelik mille eş çalışması durumundaki tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Deneylerde iç çapı 36,05 mm, dış çapı 39 mm ve genişliği 14 mm olan PTFE esaslı kompozit yatak kullanılmış, 1960-14700 N luk yük ve 1-4 m/s lik hız aralığında çalıştıklarını ifade etmişlerdir. Deneylerin sonucunda sürtünme katsayısının değerinin 0,0025 ile 0,007 arasında değişerek her yağlayıcı madde için artan yük ve hızla azaldığını, yağlayıcı maddelerin PTFE kompozitinin pv sınır değerlerini 100 kat artırdığını, aynı zamanda karşı yüzeye malzeme transferini ve aşınmayı da azalttığını söylemişlerdir. SRIVASTAVA, V.K. ve PATHAK, J.P. [64] ise grafit katkı kısa cam fiberli epoksi reçinesinden yapılmış iç çapı 35,5 mm, dış çapı 47,2 mm ve genişliği 18 mm olan polimer yatağın sürtünme ve aşınma özelliklerini incelemişlerdir. Deneylerin 0,2-1,2 N luk yük ve 0-6 saat lik zaman aralığında yapıldığını, sürtünmenin kayma zamanı ile arttığını, hem yük hem de grafit partiküllerinin artması ile azaldığını ifade etmişlerdir. TEVRUZ, T. nin [65] çalışmasında, radyal yatak olarak iç çapı 40 mm, dış çapı 50 mm ve genişliği 50 mm olan karbon katkı PTFE yatak kullanılmış olup kayma mesafesi, yatak basıncı ve hızın, sürtünme ve aşınmaya etkisi incelenmiştir. Deneylerin 0,03-0,5 MPa ortalama yüzey basınçları ve 0,11-1,88 m/s hız aralıklarında yapıldığı ve sürtünme katsayısı değerlerinin 0,216 ile 0,312 arasında bulunduğu görülmüştür. Sürtünme katsayısının yük azaldığı, hızla arttığı gözlenmiştir. TEMİZ, V. [66] yaptığı doktora tezi çalışmasında, katkı ve saf halde çeşitli polimer yatakların, hız (0,3-2 m/s) ve yatak yüküne (60-450 N) bağlı olarak, sürtünme ve aşınma özelliklerini incelemiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda, UHMWPE, PA 6 ve POM'un sürtünme katsayısının kayma hızıyla arttığı, düşük kayma hızlarında UHMWPE ve PA6 da sürtünme katsayısının yatak yüküyle pek değişmediği, POM da ise azaldığı, yüksek kayma hızlarında ise PA6 da bir azalma olduğu, katkı PTFE' lerin sürtünme katsayılarının, hem kayma hızıyla hem de yatak yüküyle değişkenlik gösterdiği saptanmıştır. UHMWPE' nin sürtünme katsayısının

0,18-0,26, PA6' nın sürtünme katsayısının 0,13-0,29 ve POM' un sürtünme katsayısının 0,15-0,33 arasında değiştiği gözlenmiştir. TEVRUZ, T. [67] iç çapı 40 mm, dış çapı 50 mm ve genişliği 50 mm olan bronz katkılı PTFE den yapılmış burcun, çelikle eş çalışması durumunda tribolojik davranışlarını incelemiştir. Deneylerin 0,03-0,5 MPa ortalama yüzey basınçları ve 0,11-1,88 m/s hız aralıklarında yapıldığı ve sürtünme katsayısı değerlerinin 0,187 ile 0,305 arasında bulunduğu görülmüştür. Sürtünme katsayısının yük ile azaldığı, hızla arttığı gözlenmiştir

Hareket salınım hareketi olduğu halde yatak malzemesi metal olan yataklarla ilgili yapılan çalışmaların bazıları şu şekilde sıralanabilir:

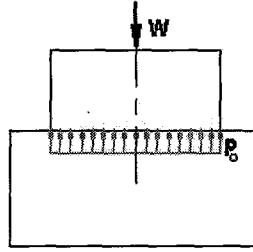
FOGG, A. ve JAKEMAN, C. nin [68] yaptıkları çalışmada, 30° lik salınım açısında, çeşitli yüklerde, değişik sıcaklık ve mil salınım frekanslarında yataktaki sürtünme durumu incelenmiştir. Araştırmacılar sürtünmenin sınır sürtünme olduğunu, sürtünmenin salınım frekansı ile azalırken sıcaklıkla arttığını ileri sürmüşlerdir. BARNELL, F.T., MILNE, A.A. ve WEBBER, J.S. [69] tarafından yapılan deneysel çalışmada, çeşitli yatak malzemeleri denenmiş, kapasitif uzaklık ölçerler ile mil merkezinin hareketi takip edilerek yük taşıyan bir hidrodinamik yağ filmi teşekkül etmediği gözlenmiştir. Sürtünmenin salınım frekansı ile azaldığı, yataktaki aşınmanın yük doğrultusundaki bölgede meydana geldiği ifade edilmiştir. GEDİKTAŞ, M. nin [70] yaptığı deneysel çalışmada, 30° lik salınım açısında yatak yükü, salınım frekansı ve besleme yağ basıncı değiştirilerek sürtünme ve film durumu incelenmiştir. Sürtünme, küçük salınım frekanslarında kuru sürtünme, büyük frekanslarda ise sinüs eğrisi karakteri göstermiştir. Büyük besleme yağı basınçlarında, düşük frekanslarda, sürtünmenin düşük çıktığını, artan frekansın, bu yüksek basıncın doğurduğu hidrostatik filmi bozduğunu, sürtünmenin frekansla azaldığını, sürtünmenin karışık sürtünme olduğunu ifade etmiştir. YÜCENUR, S. [71] yaptığı çalışmada, sabit yüklü radyal kaymalı yatağı teorik ve deneysel açıdan incelemiş, yatakta mili sürekli taşıyabilecek bir hidrodinamik film oluşmadığı, bu nedenle mil-yatak temasında düşük hızlarda sınır sürtünmesinin, yüksek hızlarda ise karma sürtünmesinin söz konusu olduğu ileri sürülmüştür. DİNÇ S. nin [72] aynı konuda yaptığı çalışmada da benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Yukarıda özetlenen çalışmalara bakıldığında, plastik numunelerin karşı yüzeyle eş çalışması durumunda ortaya çıkan sürtünmenin büyük oranda yüzey basıncına, hıza, sıcaklığa ve hareketin şekline bağlı olduğu görülmektedir. Genel bir eğilim olarak, hızın sabit olduğu durumlarda sürtünme katsayısının hızla ve sıcaklıkla

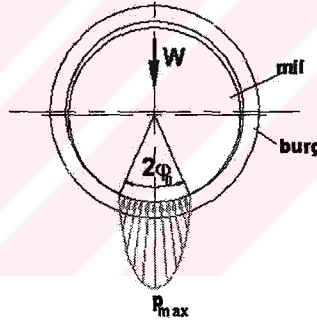
arttığı, basınçla azaldığı, hızın değişken olduğu durumlarda ise sürtünme katsayısının sıcaklıkla artmasına rağmen hızın genliği ve yüzey basıncı ile azaldığı gözlenmektedir.

1.2 Çalışmanın Amacı ve Önemi

Düzlemsel yüzeye sahip iki parça arasındaki basınç dağılımı ile radyal bir yataktaki basınç dağılımı arasındaki önemli fark Şekil 1.1 ve Şekil 1.2 de görülebilir.



Şekil 1.1. Düz yüzeylerin temasında basınç dağılımı



Şekil 1.2. Eğri yüzeylerin temasında basınç dağılımı

Düzlem iki yüzey arasında düzgün basınç dağılımı olduğu varsayılır ki bu durum plastik yatak malzemelerinin standart deney numuneleri olarak denendiği laboratuvar şartlarına karşılık gelir. Radyal yatakta ise gerçek temas alanı ve buna bağlı olarak basınç dağılımı, yatak boşluğu, yatağın şekil ve boyutları gibi bazı konstrüktif parametrelere ve özellikle yatak malzemesinin bazı mekanik özelliklerine bağlıdır ve basit yollarla belirlenemez. Düzlemsel hale karşılık gelen deneylerle elde edilmiş sonuçların radyal yatak için doğrudan kullanılabilirliği tartışılması gereken bir husustur.

Basınç dağılımına ek olarak radyal yatakta olabilecek diğer bir farklılık ise muylunun hareketi ile ilgilidir. Bir çok uygulamada dönme hızı aynı yönde kalır. Bazı uygulamalarda ise hareket salınım hareketidir ve açısal hızda periyodik bir yön değişimi söz konusu olur. Salınım hareketli radyal yataklar bir çok mühendislik

uygulamasında karşımıza çıkar. Çubuk mekanizmalarının mafsallarında özellikle krank-biyel mekanizmalarının piston-biyel yatağında, motor külbitörlerinin yataklarında, hidrolik ve pnömatik silindirlerin bağlantı mafsallarında kullanılan yataklarda hareket salınım hareketidir. Bu kullanım yerlerinde hız (salınım frekansı), salınım açısı, yatak yükünün büyüklüğü ve zaman içinde değişimi, yatakta yağlayıcı bir maddenin bulunup bulunmaması gibi hususlarda farklılıklar söz konusudur. Bir çok uygulamada nispeten küçük yükler ve salınım frekansları söz konusudur. Bu gibi yerlerde yağsız çalışabilen plastik yatak malzemeleri de seçenek olarak söz konusudur.

İlginç bir durum olarak şu da belirtilmelidir ki, canlı varlıkların iskeletlerinin mafsallarındaki hareketler de salınım hareketidir. Bu mafsallar da birer salınım hareketli yatak olarak düşünülebilir.

Yataktaki hareketin aynı yönde kalması yerine periyodik olarak yön değiştirmesinin bu yataklarda kullanılacak plastik yatak malzemelerinin sürtünme ve aşınma davranışlarında bir farklılık yaratıp yaratmadığı da sorulması gereken bir sorudur.

Bu nedenle, pratikte kullanılan salınım hareketli radyal kaymalı metal yatakların yerine, çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen (UHMWPE), döküm poliamid 6 (PA6), ve polioksimetilen (POM) den yapılmış plastik yatakların kullanılmasının uygun olup olmadığı konusunda bir fikir edinilmesi, belirlenen çalışma şartlarında denenen bu malzemeler içinde hangisinin daha verimli olduğunun saptanması ve söz konusu plastik yatakların sürtünme özellikleri ile ilgili literatüre katkıda bulunulması amacıyla bu tez çalışması yapılmıştır.

2. PLASTİK MALZEMELER

2.1. Plastik Malzemelerin Tanıtılması ve Sınıflandırılması

Malzemeler genelde 4 ana gruba ayrılırlar. Bunlar; metaller, organikler, seramikler ve kompozitlerdir. Polimerler bu grubun içindeki organiklerden olup karbonun metal olmayan elementlerle (H, F, Cl, N) meydana getirdiği büyük molekülü organik bileşiklerdir. Organik malzemeler; polimerler, elastomerler ve fiberlerdir [3].

Polimerler molekül ağırlığı yüksek olan kompleks organik molekül zincirleridir. Polimerler doğal ve yapay olarak iki gruba ayrılırlar. Plastikler adı verilen yapay polimerler genellikle, çok sayıda tekrarlanan “monomer” veya kısaca “mer” denilen basit ünitelerden oluşur. Bunların adlandırılmasında çok sayıda anlamına gelen “poli” sözcüğü ile “mer” sözcüğü birleştirilir. Kimyasal bakımdan polimerler başka elementlerin atomları ile bağlanmış karbon atomlarından meydana gelirler. Bu elementler hidrojen, azot, flor, oksijen, silisyum, kükürt ve klordur. Bu monomerlerin ağırlığı ve sayısı oluşturdukları zincirin uzunluğunu ve molekül ağırlığını tayin eder. Zincir uzadıkça polimerin tokluğu, sürünme mukavemeti, ergime sıcaklığı, viskozitesi artar.

Endüstriyel uygulamada kullanılan plastikler genellikle yapay polimerlerdir. Bunlar arasında polyester, polietilen, politetrafloretlen, polioksimetilen, poliamid, polivinilklorür, poliüretan v.b. sayılabilir. Yapay polimerler gibi tekrarlanan ünitelerden oluşan doğal polimerlere örnek olarak ise selüloz, nişasta ve doğal kauçuk verilebilir. Bazı doğal polimerler ise yapıları farklı olan değişik ünitelerin bir araya gelmesiyle oluşur ve biopolimer olarak adlandırılırlar. Bunlara örnek olarak proteinler, nükleid asitler ve enzimler gösterilebilir.

Polimerleri kimyasal yapılarına göre de sınıflandırmak mümkündür. Polimerlerin bünyesinde karbonun yanı sıra hidrojen, oksijen, azot ve halojen atomları da bulunur. Ana zincir üzerinde bulunan atom iki değerlikli olmak zorundadır. Ayrıca ana zinciri oluşturan bu iki değerlikli atomları birarada tutan bağ (kovalent) enerjisi de yeteri kadar büyük olmalıdır. Karbon atomları arasındaki bağ enerjisi daha büyük olduğu

için bir çok organik polimerde ana zincir karbon atomlarından oluşmaktadırdır. İnorganik polimerlerde ise karbon atomları yerine silisyum, germanium, bor, fosfor gibi elementlerin atomları bulunur. Bu polimerlerin baē enerjileri organik olanlardan daha yüksektir. Dolayısıyla bu malzemeler daha yüksek ısı ve mekanik dayanıklılıēa sahiptirler.

Polimerler homopolimer ve kopolimer olarak da sınıflandırılırlar. Homopolimerler tek bir monomerin tekrarlanması ile elde edilir. Kopolimerler ise iki deēiřik momomerin polimerisasyonu ile elde edilirler. Üç farklı monomerin kullanılması durumunda malzeme terpolimer adını almaktadır.

Polimerler işleme yöntemlerine göre sınıflandırıldıklarında ki en çok kullanılan sınıflandırma şekli budur, iki önemli gruba ayrılırlar:

- A. Termoplastikler
- B. Termosetler

Termoplastikler ısı ve basıncın altında yumuşayan, akan, bu durumda şekil alabilen ve soēutulduēunda sertleēebilen plastiklerdir. Tekrar ısıtıldıēında; yumuşama, akma, şekillendirme ve soēutulma sonucu sertleēme kabiliyetini yeniden kazanabilmektedirler.

Termosetler, ısı işlemi ile bir defada istenilen şekli alabilen plastiklerdir. Tekrar ısıtılmakla şekillendirilemezler. Ayrıca bu malzemeler zlmezler. Polikondansasyon reaksiyonu ile elde edilirler ve genellikle çapraz baēlı bir yapıya sahiptirler. Bu plastiklerde polimerizasyon işlemi, malzemeyi ihtiva eden monomerlerin bir araya getirildiēi reaktörde başlar ve kalıplama işlemi sırasında biter.

2.2. Plastiklerin Genel zellikleri

Görünüş: Plastiklerin oēu renksizdir. Bu nedenle istenilen rengi elde etmek için renk verici maddeler kullanılır. Pigmentlerle opak görünüş elde edilebildiēi gibi, çözünür organik malzemelerle şeffaf bir görünüş de elde edilebilir.

Yüzey Sertliēi: Cam, seramik ve metallerden daha az sert olup yüzeyleri yumuşak ve çizilmeye elverişlidir. Termoplastiklerin sertliēi, sıcaklık ve katılan plastifiyan miktarının artmasıyla azalır.

Yoğunluk: Plastik malzemeler, ahşap hariç, diğer bütün malzemelere göre ağırlık bakımından hafiftirler. Bu da onlara ağırlığın önemli olduğu yerlerde üstünlük sağlar. Plastiklerin yoğunluğu 0.9-2.5 g/cm³ arasındadır.

Isıl Özellikler: Genel olarak ısı iletkenlikleri kötüdür. Metallerin ısı iletkenlikleri 200-10000 cal/cm.s.°C.10⁴ arasında iken plastiklerinki 2-8 cal/cm.s.°C.10⁴ arasındadır. Plastiklerin ısı iletkenliklerinin düşük olmasından dolayı, sürtünme ve tekrarlanan gerilmelerin sebep olduğu sıcaklık artması, malzeme içerisinde ısı birikmesine neden olur. Bu olay ısı yorulmaya yol açar. Bu nedenle çalışma aralıklarını tayin ederken malzemenin pv limitlerini aşmamak gerekir. Başka bir ısıl özellik ısı genleşmedir. Plastik malzemelerin işlenmesinde ve yatak malzemesi olarak kullanılmasında önemli bir problem olan ısı genleşme katsayısı metallere göre çok büyük olup 2-20.10⁵ cm/cm.°C arasında değişir. Genellikle termoplastikler, viskoelastik özelliklerinden dolayı, kendi ağırlıkları altında, 65-120°C de, bazı çeşitleri ise 260°C gibi yüksek sıcaklıklarda bozulurlar. Bu nedenle çalışma aralıklarını tayin ederken bu sıcaklıkların altında kalmaya özen gösterilmesi gerekir.

Kimyasal Özellikler: Plastikler, metallere göre, kimyasal ajanlara daha dayanıklıdır. Genellikle termoplastikler, zayıf asit, alkali ve tuzların sulu çözeltilerinden etkilenmezler. Bu nedenle asit depolama imalinde kullanılabilirler. Diğer taraftan termoplastiklerin çoğu organik solventlerin etkisi altında çözünme veya şişme gösterirler ve kuvvetli asit veya alkalilerden kimyasal olarak etkilenirler.

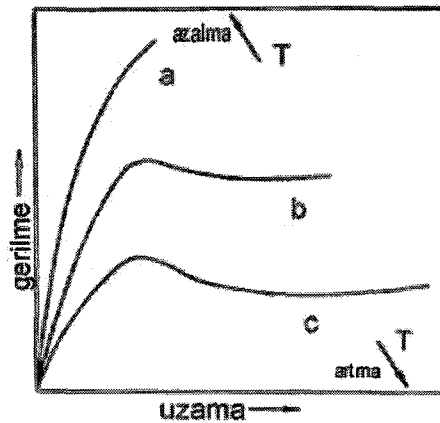
Elektriksel Özellikler: Elektriksel özellik bakımından en önemli faktör elektriksel iletkenlik olup genelde plastiklerin elektrik iletkenlikleri zayıftır. Elektrik iletkenliğini ifade etmek için bunun tersi olan elektrik direnç terimi de kullanılmaktadır. Plastiklerin hacim elektrik dirençleri 10⁷ –10¹⁸ ohm. m arasında değişir.

2.3. Plastiklerin Mekanik Davranışları

Bir malzemenin mekanik davranışı, o malzemenin yük altında bünyesinde meydana gelen gerilmeleri ve şekil değiştirmeleri izah eden genel bir kavramdır. Plastiklerde yapı (amorf, yarı kristalin , kristalin) ve fiziksel hal (katı, lastik gibi, viskoz sıvı) değişikliği malzemenin mekanik davranışlarını doğrudan etkilemektedir. Söz konusu davranışlar temel olarak malzemenin molekül ağırlığına, molekül zincirlerinin bağlanma durumuna (lineer, dallanmış, çapraz) ve stereodüzenine (izotaktik, syndiotaktik, ataktik) bağlıdır. Zincir uzunluğu ile doğrudan ilişkili olan molekül

ağırlığı, malzemenin moleküller arası bağ kuvvetlerini dolayısıyla mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Polimerisasyon sırasında polimer zincirleri çeşitli uzunluklarda büyüyerek farklı molekül ağırlıklarına sahip makromoleküllerin karışımından oluşan bir malzeme meydana getirmektedirler. Malzemenin rijitliği ve esnekliği, zinciri oluşturan molekül ünitelerinin dönme hareketine, dolayısıyla camsı duruma geçiş sıcaklığına ve kristalleşmeye bağlıdır. Amorf polimerlerde, bu sıcaklığın altında hareket tamamen durduğu için malzeme sert, üstündeki sıcaklıklarda harekete bağlı olarak bağlar arası kuvvetler zayıfladığı için zincirlerin birbirlerinden uzaklaşmaları sonucu malzeme yumuşak olur. Kristalin polimerlerde ise zincirler birbirlerine çok yakın olduklarından üniteler hareket edememekte, bu da malzemenin sert olmasına neden olmaktadır. Bunun yanısıra kristalinite derecesi arttıkça sertlik artmakta, azaldıkça ünitelerin dönme hareketi de başladığı için malzeme sertliğini kaybetmeye başlamaktadır. Yarı kristalin yapılarda ise, camsı duruma geçiş sıcaklıklarında amorf kısımdaki üniteler dönme hareketine başladığında bu hareketi zincirin tüm uzunluğu boyunca değil, kristalin yapının izin vermemesi sonucu sadece amorf kısmın zincir segmanlarında yapabilmektedirler. Bu da malzemenin yumuşamasını önlemektedir.

Plastiklerin elastik şekil değiştirmesi molekül zincirlerinin uzama kabiliyetine bağlıdır. Küçük gerilmelerde bu şekil değiştirme, uygulanan gerilme ile orantılı olup malzemeye **elastik malzeme** adı verilir ve Hooke bağıntısına uyar ($\sigma = \epsilon \cdot E$). Bu durumda elastiklik modülü 2000-6000 MPa arasında değişir. T_g nin üstündeki sıcaklıklarda ise bu polimerler, küçük gerilmelerde dahi çok büyük şekil değişikliklerine uğrarlar. Bu durumdaki malzemeye de **lastik gibi malzeme** adı verilir. Şekil 2.1 de çeşitli sıcaklıklarda tipik bir polimerin gerilme-uzama diyagramı görülmektedir.



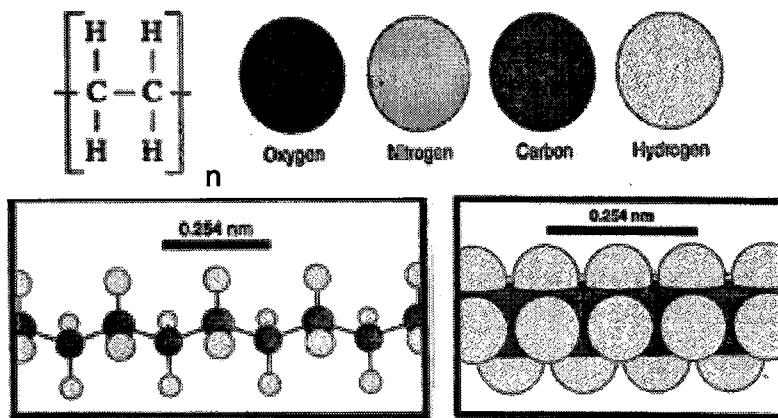
Şekil 2.1. Mühendislikte kullanılan plastiklerin sıcaklığa bağlı gerilme-uzama eğrileri
a) T_g nin çok altında, b) oda sıcaklığında, c) T_g veya T_m nin üzerinde

Kismikristalin plastiklerin gerilme-uzama diyagramı şekil olarak metalik sünek malzemelerinkine benzer. Yani burada da elastik bölge, üst ve alt akma sınırı ve kopmadan önce büyük şekil değişiklikleri vardır. Ancak şekil değiştirme özelliğindeki benzerlik sadece küçük gerilmelere karşılık gelen küçük şekil değiştirme bölgesindedir. Kismikristalin malzemeler kritik gerilme sınırının altında elastik, üstünde viskoelastik şekil değiştirmeler gösterirler. Dolayısıyla bu malzemelerle amorf yapıda cam halinde bulunan malzemelerin davranışları arasında benzerlikler vardır. Ancak kismikristalin malzemelerde elastik bölgede şekil değiştirmeler daha az olup elastiklik modülü daha yüksektir.

2.4. Deneylerde Kullanılan Plastikler

2.4.1. Ultra Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen (UHMWPE)

Mer gaz etilendir. Düşük ve orta molekül ağırlıklı (max. 100000) PE grubuna giren alçak yoğunluklu ve yüksek yoğunluklu PE den başka yüksek molekül ağırlıklı (300000-4000000 ve daha fazla) polietilenler de vardır. Bunlar da kendi aralarında yüksek molekül ağırlıklı (300000-500000) ve ultra yüksek molekül ağırlıklı (4000000 ve daha fazla) polietilen olarak ikiye ayrılırlar. Birinci gruba göre önemli derecede üstün özelliklere sahip sanayi plastikleridir. Üretim metodları ve kullanım alanları tamamen farklıdır. Mekanik özellikleri molekül ağırlığı arttıkça iyileşir [14]. Şekil 2.2 de polietilenin molekül yapısı görülmektedir .



Şekil 2.2. Polietilenin molekül yapısı

Ultra Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen'in (Ultra High Molecular Weight Polyethylene-UHMWPE) molekül ağırlığı 4 milyon civarındadır. Bu, malzemeye çok yüksek aşınma ve darbe dayanımı kazandırır. Ayrıca çok yüksek kimyasal dayanıma sahip olup iklim koşullarına dayanıklıdır. Sıcaklıkta geniş bir kullanım

aralığı (-269°C - +90°C) vardır. Mekanik olarak işlenmesi kolaydır. Basınçlı kalıplama teknikleri modifiye edilerek UHMWPE nin üretiminde kullanılmaktadır. Hızlı kalıplama metodları, vidalı enjeksiyon kalıplama ve basınçlı kalıplama veya transfer kalıplama ile kombine edilmiştir [4, 13].

UHMWPE' nin özellikleri Tablo 2.1. de verilmiştir.

Tablo 2.1. UHMWPE' nin özellikleri

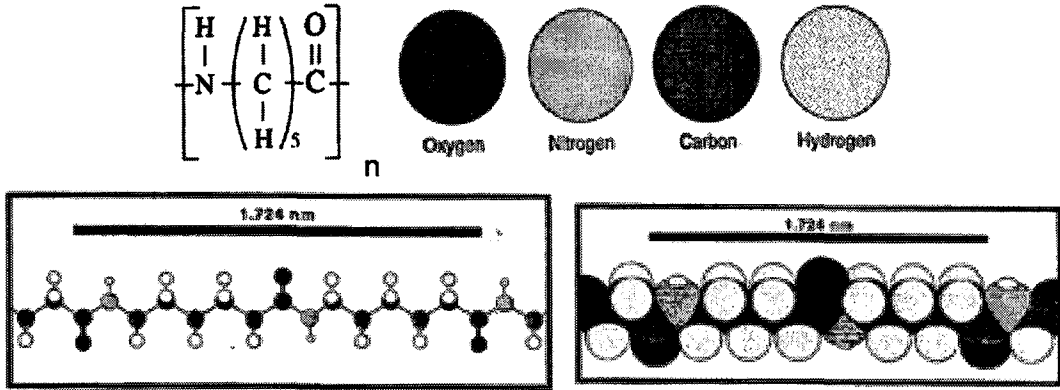
Yoğunluk (g/cm ³)	0. 94
Molekül ağırlığı (g/mol)	>4. 000. 000
Elastiklik modülü (MPa)	690
Akma basıncı (MPa)	20
Yumuşama sıcaklığı (°C)	136
Camsı duruma geçiş sıcaklığı (°C)	-20, -130
Ergime sıcaklığı (°C)	207
Kullanım sıcaklığı (°C)	-269- +90
Isıl genleşme katsayısı (10 ⁻⁶ /°C)	250
Isı iletgenliği (W/mK)	0. 52
Su Emme (%)	<0. 01

Kullanıldığı Yerler

Makina sanayiinde (kayıcı elemanlar, yataklar, sualtı yatakları, asansörlerde yönlendirici rulo ve kızaklar, zincir yatakları, aşınma plakaları, dişliler, dişli çarklar, pompa parçaları ve pompalar) , kimya endüstrisinde (filtre plakaları, sıyırıcılar, kayıcı plakalar, contalar, vana ringleri, körükler) , elektro kaplama tesislerinde, tekstil sanayiinde (silindir, mekik, masura, darbe çubukları, çekiç kutuları, dişli, burç, bant) , ağaç işleme endüstrisinde (hızar ve bıçkı kızaklarında, zincirli konveyörlerde kayıcı profiller) , tıp alanında (diz kapağı, dirsek, protez, takma ayak ve kol, destekleyici) , iskele ve limanlarda, zımbalama işlerinde, buz pisti yapımında, kayak tabanlarında, kar temizleme araçlarında, bowling pistlerinde, damperli kamyon kasalarında, iş makinaları kepçelerinde, filtrasyon endüstrisinde, soğutma sanayiinde , nükleer endüstrisinde, radarlarda, inşaat endüstrisinde, tarım makinalarında, kağıt sanayiinde, kömür ve madencilik alanlarında, gıda sanayiinde, şişeleme ve ambalajlama sanayiinde olmak üzere geniş bir kullanım alanı vardır.

2.4.2. Döküm Poliamid 6(Cast PA6)

Molekül iskeletinde karbondan başka atomlara sahip olduğundan, diğer polimerlerden farklıdır. Temel olarak moleküller amid gruplarıyla (NH. CO) beraber bağlanmış normal etilen grupları (CH₂) içerir. Şekil 2.3 de polyamid 6 nın molekül yapısı görülmektedir.



Şekil 2.3. Poliamid 6 nın molekül yapısı

Naylonların çok iyi yorulma mukavemetleri, yüksek aşınma dayanımları, çok yüksek basma dayanımları, sertlikleri, darbe dayanımları ve geniş sıcaklık aralığında kullanım alanları vardır. Ayrıca kimyasal dirençleri ve iyi elektriksel özellikleri bulunmaktadır. Tok malzeme yapısından dolayı darbelere dayanıklıdır. Naylonun (PA6) en büyük dezavantajı çok fazla nem absorbe etmesidir. Bu da boyut değişikliğine yol açmaktadır [4, 13].

Poliamid 6' nın (PA 6) özellikleri Tablo 2.2 de verilmiştir.

Tablo 2.2. PA 6' nın özellikleri

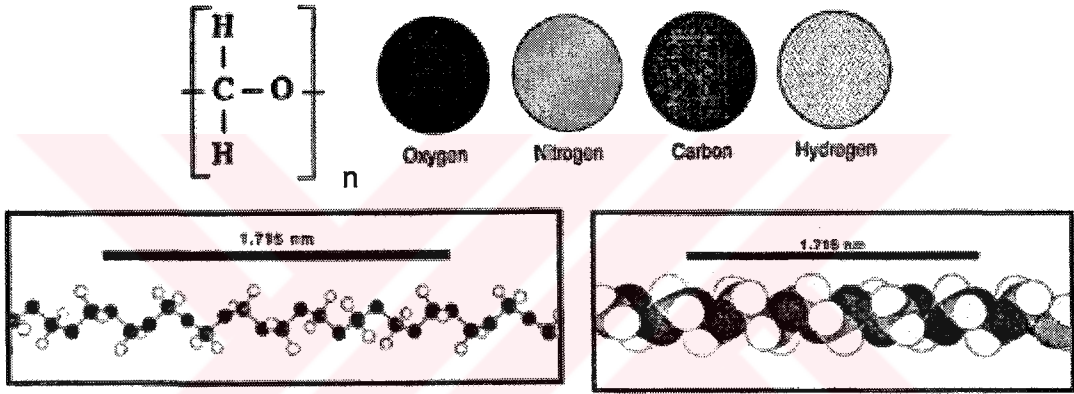
Yoğunluk (g/cm ³)	1. 12-1. 24
Molekül ağırlığı (g/mol)	113. 16
Elastiklik modülü (MPa)	2600
Akma basıncı (MPa)	100
Isıl genleşme katsayısı (10 ⁻⁶ /°C)	80
Isı iletkenliği (W/mK)	0. 43
Camsı duruma geçiş sıcaklığı (°C)	50
Ergime sıcaklığı (°C)	220
Kullanım sıcaklığı (°C)	-30+100
Su Emme (%)	2

Kullanıldığı Yerler

Naylonlar; makina sanayiinde (dişli çark, kam, kaymalı yatak, rulman kafesleri, kızak, takım tezgahlarının kızaklarında kaplama, boru, silindir, makara) , tekstil sanayinde, gıda sanayinde, ambalaj makinalarında, matbaa makinalarında, kimya sanayinde, kağıt sanayinde kullanılırlar.

2.4.3. Polioksimetilen (POM)

Asetaller (POM), dayanıklı mühendislik termoplastiklerindendir. Görünüş olarak naylonu andırmalarına rağmen özellikleri benzemez. Şekil 2.4 de polioksimetilenin molekül yapısı görülmektedir.



Şekil 2.4. Polioksimetilenin molekül yapısı

En önemli özellikleri kristalin yapılarıdır. Tüm termoplastikler içinde en yüksek kristaliniteye sahip gruptur. Güçlü oksitlendiricilere karşı duyarlıdırlar. Bu plastikler dayanıklı ve rijittirler. Rijitliğini yüksek sıcaklıklarda bile korur. Neme, ısıya ve kimyasal maddelere dirençleri iyidir. Yorulma, çekme ve eğilme mukavemetleri yüksektir. Yalıtkanlıkları iyidir. Elektrik özellikleri yüksek neme ve su içinde kalmaya dayanır. Yüksek ergime sıcaklığı (176°C) ile sert, tok bir malzemedir. Düz ve sert yüzeyi ile aşınmaya mukavimdir [13].

Kullanıldığı Yerler

Asetaller, çim biçme makinalarında, iş makinalarında, otomobillerin kapı kolları ve dişli yapımında kullanılırlar.

Polioksimetilenin (POM) özellikleri Tablo 2.3 de verilmiştir.

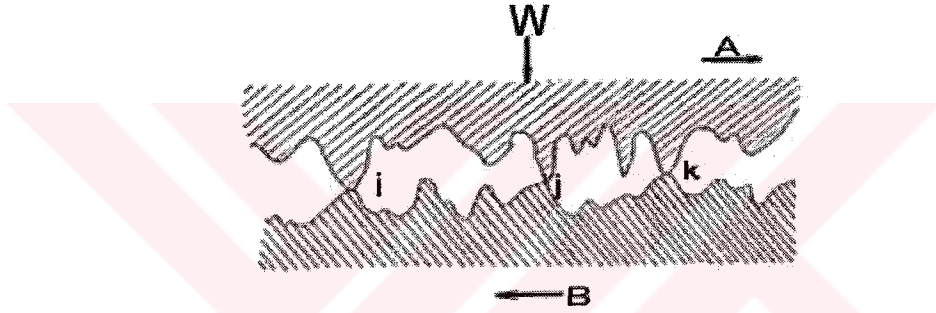
Tablo 2.3. POM' un özellikleri

Yoğunluk (g/cm ³)	1. 41-1. 43
Molekük ağırlığı (g/mol)	30. 03
Akma basıncı (MPa)	70
Elastiklik modülü (MPa)	3600
Isıl genişleme katsayısı (10 ⁻⁶ /°C)	110
Isı iletkenliği (W/mK)	0. 292
Camsı duruma geçiş sıcaklığı (°C)	-50
Ergime sıcaklığı (°C)	181
Kullanım sıcaklığı (°C)	-60+90
Su Emme (%)	0. 20

3. SÜRTÜNME

3.1. Yüzeylerin Yapısı

Teknikte kullanılan yüzeyler ne kadar temiz işlenirse işlensin, yüzeylerde mikron mertebesinde bile olsa, pürüzler kalır [73]. Şekil 3.1 de yüzeylerin yapısı ve temas süresince birbirleriyle etkileşimleri görülmektedir.



Şekil 3.1. Yüzeylerin yapısı ve temas süresince birbirleriyle etkileşimi

İşlenmiş iki yüzey W yükü altında birbirleriyle temas ettirildiğinde, her iki yüzeyin en büyük pürüz tepesi arasındaki fiziksel temas, denge nedeniyle, en az üç noktada oluşur. Bunların elastik ya da plastik deforme olmaları ile, yükün durumuna bağlı olarak, diğer tepeliklerde de değmeler başlayacak ve bir denge konumuna gelene kadar bu değmeler devam edecektir. A_i, i. bölgedeki belirli bir temas noktasının alanı ve p_i, temas sonucu oluşan basınç olduğu takdirde, uygulanan yük:

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

olur. İki metal yüzey arasında ilk temas oluştuğunda, her bir temas alanının toplamı sınırlı basıncı ve yükü taşıması için çok küçüktür. Sonuç olarak büyük tepeliklerdeki basınç, yumuşak yüzeyin akma sınırına veya plastik akmaya doğru hızla artar. Bu nedenle yük, basıncın p*'a ulaştığı büyük pürüzler tarafından ve basıncın hala elastik olduğu küçük pürüzler tarafından taşınır hale gelir. Bu durumda denklem aşağıdaki gibi gösterilir:

$$W = p^* \sum_{i=1}^{M_1} A_i + \sum_{j=M_1}^{M_2} P_j A_j \quad (3. 2)$$

Elastik temasın oluştuğu alanların toplamı (küçük pürüzler), plastik olanlarla (büyük pürüzler) mukayese edildiği takdirde ihmal edilebilir ve denklemin 2. terimi gözönüne alınmayabilir. Böylece denklem;

$$W = p^* \sum_{i=1}^{M_1} A_i = p^* A_{ger} \quad (3. 2. a)$$

halini alır. Bu nedenle pürüz tepelerindeki plastik akma oluşumu, sıfırdan belli değerlere kadar tek tek temas alanlarının boyutlarını artırır ve toplam temas alanı A_{ger} , (3. 2. a) denklemi gereği W yükünü kaldıracak şekilde kendi kendisini ayarlar. W artarken A_{ger} de de orantılı bir artışın olduğu açıktır. Aynı zamanda temas halindeki pürüzlerin sayısı da (M) artar. Ortalama temas alanının (A_{ger}/M) gerçekte sabit kaldığı deneysel olarak gösterilmiştir. Mevcut temas alanlarının sürekli artmaya başlaması, sıfır alanlı (noktasal temas) yeni temas noktalarının oluşumuna neden olur. Temas eden pürüz tepelerinde plastik akmanın oluşmasıyla metal yüzeyler bu bölgelerde birbirlerine kaynarlar. Elastik temasda, temas halindeki pürüz tepeciklerinin yarı küre şeklinde olduğu farzedilirse, Hertz teorisine göre normal kuvvet-alan arasındaki ilişki şu şekilde gösterilir:

$$A_{ger} = K_1 \cdot W^{2/3} \quad (3. 3)$$

(K_1 : parametre). Böylece elastik temasda gerçek temas alanı yükün $2/3$ oranındaki üssü ile değişir. Oysaki plastik temas için gerçek temas alanı (3. 2. a) denklemine göre yükün birinci kuvveti ile doğru orantılıdır. Metal metale uygulamalarda temas noktalarının genel durumu elasto-plastik olarak tarif edilebilir. Bu durumda yük üssü $2/3$ ile 1 arasındadır.

3.2. Sürtünmenin Temel Mekanizması

Kuru yüzeyler arasında izafi kayma hareketi ile oluşan sürtünmeyi iki temel faktör açıklar: adezyon ve deformasyon. İki faktörün birbirini etkilemediği farzedilirse şöyle yazılabilir:

$$F = F_{\text{adhezyon}} + F_{\text{deformasyon}} \quad (3.4)$$

F toplam sürtünme kuvvetidir. (3. 4) denklemi yük ile bölüldüğünde buna karşılık gelen denklem, sürtünme katsayısı cinsinden şöyle yazılabilir:

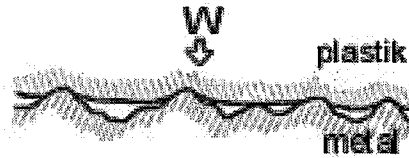
$$\mu = \mu_A + \mu_D \quad (3.5)$$

A ve D indisleri sırasıyla adezyon ve deformasyon terimlerini belirtir.

Deney şartlarının dikkatli bir şekilde seçimi ile adezyonla deformasyonu birbirinden ayırmak mümkündür. Optik olarak düz yüzeyler seçilerek pürüzlülük özellikleri hemen hemen yok edilir. Böylece deformasyon katsayısının katkısı ihmal edilir. Bu durumda ölçülen toplam sürtünme kuvveti sadece adezyondan kaynaklanır. Diğer bir yöntem ise, izafi hareket eden kaba pürüzlü iki yüzey arasında yağlayıcı kullanmaktır. Bu yağlayıcı pürüzlerin metalik temasını keserek adezyonu elimine etmekte ve böylece toplam sürtünme kuvveti deformasyondan kaynaklanır hale gelmektedir. Kaba pürüzlü yüzeyler arasında yağlama yapılmadığı takdirde adezyonun sürtünme katsayısına katkısı, deformasyon katkısının hemen hemen iki katıdır.

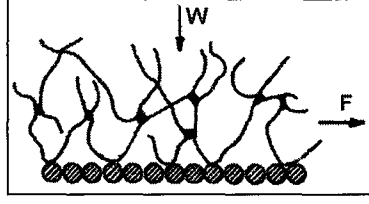
3.3. Plastiklerin Sürtünmesi

Plastikler arasındaki veya plastikle metal arasındaki temas genellikle elastiktir [14]. Şekil 3.2 yük altındaki plastik ve rijid yüzey profilini göstermektedir.



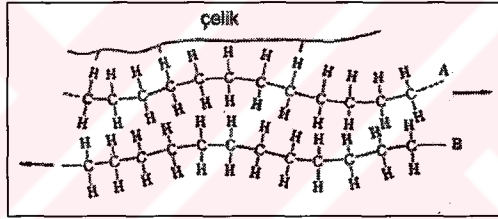
Şekil 3.2. Yük altında plastik ve rijid yüzey profili

Sürtünme katsayısı kayma hızı, yük ve sıcaklıkla değişir. Plastik sürtünmesinin, metallerdeki gibi, iki kaynaktan oluştuğu söylenebilir. Bunlar deformasyon ve adezyondur. Sürtünmenin adezyon bileşeni yüzeyin birkaç °A (Angstrom) kalınlıktaki tabakasında meydana gelen bir yüzey etkisi olup malzemenin yüzey enerjisi ile direk ilişkilidir ve ısıyla harekete geçirilmiş moleküler stick-slip hareketi olarak yorumlanabilir.



Şekil 3.3. Plastik-metal temasında moleküler bağ oluşum modeli

Plastikle metal arasındaki izafi kayma esnasında plastiğin yüzey tabakasındaki ucu serbest zincirler karşı yüzeydeki moleküller ile bağ kurmaya çalışırlar (Şekil 3.3). Oluşan lokal bağlar, kayma hareketi ile gerilmeye, kırılmaya ve gevşemeye maruz kalırlar. Kopan bağlar yeni denge pozisyonlarında yeniden bağlar oluşturmak için moleküler bir mesafe kaydederler ve bu kayma süresinde bu şekilde devam eder (Şekil 3.4). Kısaca özelenecek olursa, adezyon, eş çalışan iki yüzey arasında bağların oluşması ve izafi kayma hareketi sonucu bu bağların gerilmesi, uzaması ve kopması esasına dayanır.



Şekil 3.4. Plastik-çelik temasında molekül zincirleri arasında kayma oluşumu

Bilimsel teorilerde adezyon moleküler bağ oluşumu ile açıklanırken mühendislik problemlerinde adezyon bağı daha çok makroskopik bir görüşle ele alınır [73]. Bu tümleştirici görüşte olay bir sürekli ortam yapısı modelinde açıklanmaya çalışılır. Bu halde toplam adezyon kuvveti:

$$F_{adz} = \sum_{i=1}^M F_i = \sum_{i=1}^M A_i \cdot \tau_i \quad (3.6)$$

Burada τ_i değme noktasındaki kayma direnci, A_i temas alanı' dır. Buna karşılık her bir i noktasındaki moleküler seviyedeki adeziv kuvvet (F_i):

$$F_i = n_i \cdot j_i \quad (3.7)$$

şeklinde yazılabilir. Burada n_i i . Değme noktasındaki bağlanmış molekül sayısını, j_i bu moleküllerin bağ kuvvetini göstermektedir. O halde:

$$\tau_i = \frac{n_i}{A_i} \cdot j_i \quad (3.8)$$

olacaktır. Formülden de görüleceği gibi değme noktasındaki kayma direnci τ_i , moleküler bağ kuvveti j_i nin bir fonksiyonudur. Bu ifadelere göre adezyonal sürtünme katsayısı:

$$\mu = \frac{F_{adz}}{F_N} = \frac{1}{F_N} \sum_{i=1}^M F_i = \frac{1}{F_N} \sum_{i=1}^M n_i \cdot j_i = \frac{N \cdot J_M}{F_N} \quad (3.9)$$

olacaktır. Burada $N = \sum_{i=1}^M n_i = M \cdot \bar{n}$ olup N ile toplam bağ sayısı belirtilmiştir. $\bar{n}$ ise her bir değme noktasına eş olarak dağıtılmış ortalama bağ sayısını belirtmektedir. J_M ise ortalama bağ direncini göstermektedir.

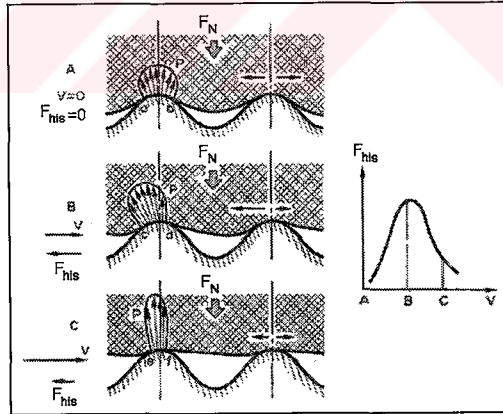
Sürtünmenin deformasyon bileşeni ise, viskoelastik malzemenin sürtünme davranışının karakteristik özelliği olup pürüzlü yüzeylerde ($R_a > 1 \mu m$) plastiğin bir pürüz etrafında yığılması ve onu aşmaya çalışması durumudur. Yapılan araştırmalar, bu yığılma ve pürüzü aşma esnasında bir enerji harcandığını, plastiğin eski haline dönmesiyle bu enerjinin bir kısmının geri verildiğini, bir kısmının ise ısıya dönüşerek kaybolduğunu göstermiştir. Bu olay histeresis olarak adlandırılmıştır.

Plastiklerin sürtünme mekanizmasındaki adezyonal ve histeritik ayırımı yapabilmek için öncelikle grafik ve fiziksel olarak olayı anlamak gerekir. Sürtünme kuvvetinin histerisiden kaynaklanması için, plastikte temasda olan karşı yüzeyin pürüzlerinin makroskopik ölçekde olması gerekir. Bu durumda plastik malzeme pürüz üzerinden akmaya gayret eder. Şöyleki: plastikte temas eden simetrik tek bir pürüz ele alındığında; hareketin olmadığı zamanda iki cisimden birine yükleme yapıldığında pürüz etrafındaki plastik içinde meydana gelen basınç dağılımı simetrik olup bu basınç dağılımı yatay ve düşey bileşenlerine ayrıldığında yatay kuvvetlerin toplamının sıfır, düşey kuvvetlerin toplamının uygulanan yüke eşit olduğu görülür (Şekil 3.5).

İzafi hareket yok (Simetrik basınç dağılımı)		Net Sürtünme Kuvveti Yok
İzafi hareket (Asimetrik basınç dağılımı)		Net Sürtünme Kuvveti Mevcut

Şekil 3.5. Sürtünmenin histeresis bileşeni için fiziksel model

Ancak, izafi hareket söz konusu olduğu zaman plastik, pürüz etrafında yığılır ve pürüzü tırmanır. Bu durumda pürüzün plastikte temasının kesilmesi daha yüksek bir noktada olur ve temas yayı izafi hareket doğrultusunda hareket ederek asimetrik bir basınç dağılımı yaratır ve bu basınç dağılımı tepeye daha yakın ve daha küçük boyutta meydana gelir. Bu asimetrik etki, plastiğin aniden karşısına çıkan engeli aşmaya çalışması esnasındaki gecikmeden kaynaklanmaktadır. Bu durumda yatay kuvvetlerin toplamı, hareket doğrultusuna ters yönde oluşan histeritik sürtünme kuvvetini verir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. İzafi hareket halinde pürüz tepesindeki histerezis kuvvetinin durumu

Karşı yüzeyin $R_a < 1 \mu\text{m}$ pürüzlülüğüne sahip olması durumunda, sürtünmeyi yaratan adezyon bağları çok daha güçlü olduğu için deformasyon ihmal edilmektedir. Sonuç olarak adezyon, karşı yüzeyin fiziksel-kimyasal yapısına bağlı moleküler seviyede bir yüzey etkisiyken, deformasyon karşı yüzeyin pürüzlülüğüne bağlı ve plastiğin viskoelastik özelliklerinden kaynaklanan bir kütle etkisidir.

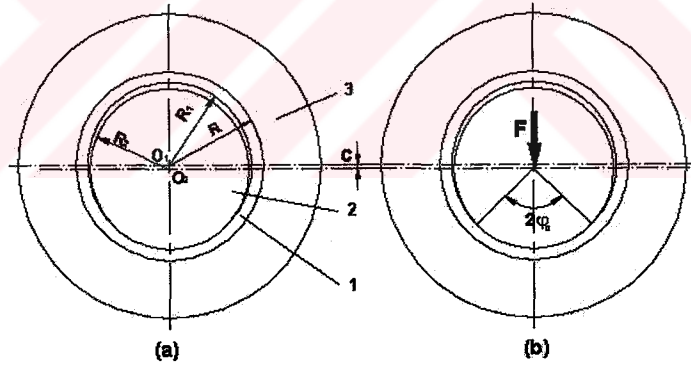
4. KURU SÜRTÜNMELİ RADYAL KAYMALI YATAKLAR

4.1. Temas Parametreleri:

Kragelski'nin Friction, Wear, Lubrication isimli triboloji el kitabında [9], kuru sürtünmeli radyal kaymalı yatakların temas parametreleri olarak temas açısı, temas bölgesindeki basınç dağılımı ve maksimum temas basıncı ele alınarak bu parametrelerin hesabında kullanılan bağıntılar gösterilmiştir.

Kuru sürtünmeli radyal kaymalı bir yatakda temas parametreleri şunlardır (Şekil 4.1):

- | | |
|--|-------------|
| a) Mil ve burç arasındaki temas yayı (temas açısı olarak ifade edilir) | : $2P_0$ |
| b) Temas bölgesindeki basınç dağılımı | : $p(P)$ |
| c) Maksimum temas basıncı: | : p_{max} |



Şekil 4.1. Radyal kaymalı bir yatağın şematik resmi
a) yük uygulanmadan önce, b) yük uygulandıktan sonra
(1. burç, 2. mil, 3. yatak zarfı)

Bu temas parametreleri, iki silindirin içten teması durumunda, aşağıdaki şartların sağlanması halinde, Hertz tarafından elde edilen bağıntılar ile hesaplanabilir:

1. Temas eden yüzeylerin boyutları elemanın diğer boyutlarından küçüktür,
2. Deformasyonlar $\epsilon = \sigma/E$ denkleminin uyar ve elastik gerilme sınırı orantı sınırının altındadır, (ϵ : şekil değiştirme oranı, σ : gerilme, E : elastiklik modülü),
3. Mil ve yatak zarfı deforme edilemez,
4. Burç elastik olarak şekil değiştirir,
5. Burç malzemesi izotrop ve homojendir,

6. Temas yüzeylerinde, sürtünme nedeniyle oluşan diğer gerilmeler yanında kayma gerilmeleri ihmal edilebilecek boyutlardadır.

1. şartı sağlayan bağıntı aşağıdaki gibidir:

$$\frac{W}{E_1 c L} \left[(1 - \nu_1^2) + (1 - \nu_2^2) \frac{E_1}{E_2} \right] \leq 0.092 \quad (4. 1)$$

Burada;

W = Yatak yükü, L = Yatak genişliği, c= Radyal boşluk ($R_1 - R_2$), R = Burcun dış çapı, R_1 = Burcun iç yarıçapı, R_2 = Milin yarıçapı, ν = Poisson oranı; E= Elastiklik (Young) modülüdür (1 ve 2 indisleri sırasıyla burç ve mil malzemelerini göstermektedir).

Bu bağıntı, Hertz' in iki silindirin teması durumunda, t yarı temas uzunluğunu

göstermek üzere, $t = \sqrt{\frac{8}{\pi} \frac{P}{E \sum \rho}}$ eşitliğinden yola çıkılarak formüle edilmiştir.

Burada $P = \frac{W}{L}$: birim genişliğe gelen kuvvet, $\sum \rho = \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}$: eğrilik (içten

temas durumunda) ve $\frac{1}{E} = \frac{1}{2} \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)$ dir [74]. Bağıntının eşit ya da küçük

olmasının istendiği sayısal değer, 20° lik yarı temas açısına eşittir. Yani $P_0 \leq 20^\circ$ olduğu takdirde aşağıdaki bağıntılar kullanılabilir.

Temas Açısı

Kaymalı yataklarda R_1 ve R_2 yarıçapları birbirlerinden önemli ölçüde farklı değillerse temas açısı hesabında aşağıdaki bağıntı kullanılabilir:

$$\sin \phi_0 = \sqrt{\frac{4}{\pi} \left[(1 - \nu_1^2) + (1 - \nu_2^2) \frac{E_1}{E_2} \right] \frac{W}{E_1 c L}} \quad (4. 2)$$

Temas Basıncı

Temas bölgesindeki basınç dağılımı ise şu bağıntıyla hesaplanabilir:

$$p(\varphi) = p_{\max} \left[1 - \left(\frac{\varphi}{\varphi_0} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.3)$$

Temas bölgesinin merkezinde oluşan maksimum basınçla ilgili bağıntı ise aşağıdaki gibidir:

$$p_{\max} = \frac{2W}{\pi R_1 \sin \varphi_0 L} \quad (4.4)$$

Temas bölgesindeki ortalama basınç :

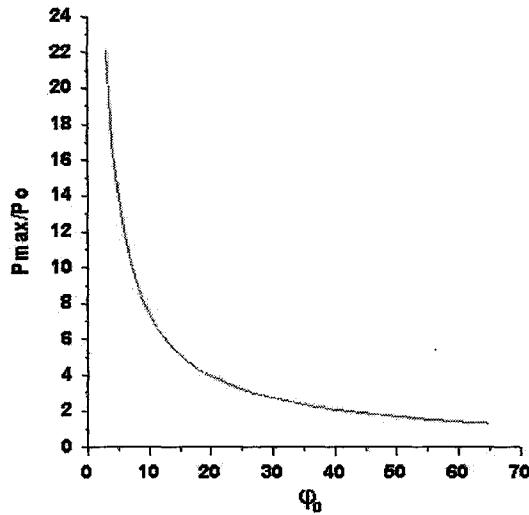
$$\bar{p} = \frac{W}{2R_1 L \varphi_0} \quad (4.5)$$

bağıntısıyla hesaplanabilir.

Temas açısının 40° den büyük olması durumunda, Rymuza ve Kowalski' nin [57] küçük boyutlu yataklar için geliştirdikleri bağıntılardan yola çıkarak elde ettikleri

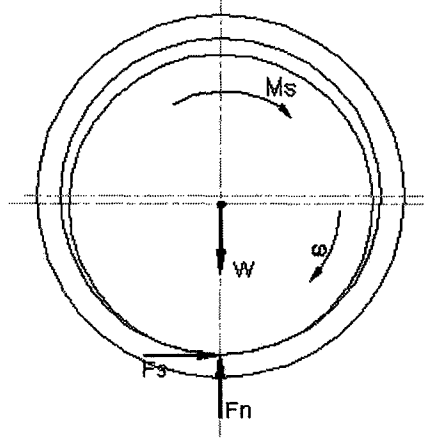
$\frac{p_{\max}}{p_0} = 60 \cdot \varphi_0^{-0,91}$ bağıntısı ile buna uygun olan grafik kullanılabilir (Şekil 4.2). Bu

grafik hem 40° den küçük hem de 40° den büyük açılar için uygun sonuçlar vermektedir.



Şekil 4.2. $P_{\max}/P_0$ oranının φ_0 ile değişimi

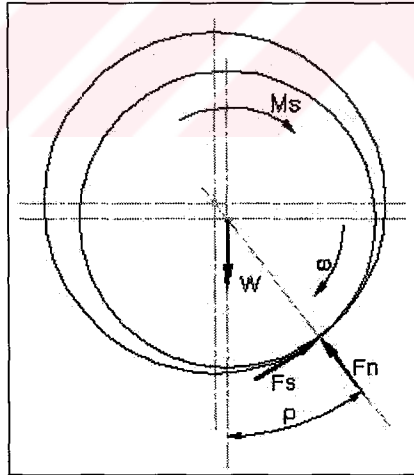
4.2. Radyal Yatakta Sürtünme Durumu:



Şekil 4.3. Radyal yataktaki kuvvet durumu için basit model

Radyal yataklara sürtünme açısından bakıldığında, düzlemsel iki parça arasındaki durumdan farklı olarak milin tırmanması ve temasın $2\phi_0$ lık bir daire yayına yayılmış olduğu görülür. Şekil 4.3 de kuvvet durumu için basit model görülmektedir.

Sürtünme Sonucu Tırmanma ve Tanımlanan Sürtünme Katsayısı ile Gerçek Sürtünme Katsayısı Arasındaki Fark:



Şekil 4.4. Sürtünme kuvveti etkisi ile tırmanma ve tırmanmanın kuvvetler üzerine etkisi

Şekil 4.4 de milin sürtünme kuvveti etkisi ile tırmanması ve bu tırmanmanın kuvvetlere etkisi ile oluşan gerçek kuvvet durumunu göstermektedir. Şekillerde;

W: Uygulanan yatak yükü

F_n : Rijit mil ve yatak varsayımı ile temas noktasındaki normal kuvvet

M_s : Sürtünme momenti (ölçülen)

F_s : Sürtünme kuvveti

Tırmanma sonucu meydana gelen gerçek sürtünme katsayısı ile yük doğrultusunda W yüküne ters yönde bir tekil normal yük varsayımı ile hesaplanan sürtünme katsayısı arasındaki farkı bulmak için, mile etkiyen kuvvetlerin dengesinden;

Düşey bileşenler için:

$$W = F_n \cdot \cos \rho + F_s \cdot \sin \rho = F_n \cdot \cos \rho + F_n \cdot \mu \cdot \sin \rho = F_n (\cos \rho + \mu \cdot \sin \rho) \quad (4.6)$$

yazılır. Yatak yükü W olduğunda temas bölgesindeki kuvvet tekil bir normal kuvvetle temsil edildiğinde bu kuvvet:

$$F_n = \frac{W}{\cos \rho + \mu \cdot \sin \rho} \quad (4.7)$$

olacaktır. Yatay bileşenler olarak:

$$F_n \cdot \sin \rho - F_s \cdot \cos \rho = 0 \quad (4.8)$$

yazıldığında sonuç olarak tırmanma açısının sürtünme açısına eşit olduğu görülecektir. Yani;

$$\frac{F_s}{F_n} = \mu = \frac{\sin \rho}{\cos \rho} = \tan \rho \quad (4.9)$$

elde edilecektir. Burada μ gerçek sürtünme katsayısıdır. Ölçme ile elde edilen sürtünme momentinden hareketle $F_s = M_s / R$ (R: milin yarıçapı) şeklinde sürtünme kuvveti elde edilir. Basit modele göre sürtünme katsayısı $F_n = W$ varsayıldığında $\mu_1 = F_s / W$ olacaktır. Normal kuvvet için (4.7) bağıntısından hareketle gerçek sürtünme katsayısı için:

$$\mu = \frac{F_s}{F_n} = \frac{F_s}{W / (\cos \rho + \mu \cdot \sin \rho)} = \frac{F_s}{W} (\cos \rho + \mu \cdot \sin \rho)$$

$$\mu = \mu_1 (\cos \rho + \mu \cdot \sin \rho) \quad (4.10)$$

elde edilir. μ_1 / μ oranı:

$$\frac{\mu_1}{\mu} = \frac{1}{(\cos \rho + \mu \cdot \sin \rho)} = A \quad (4.11)$$

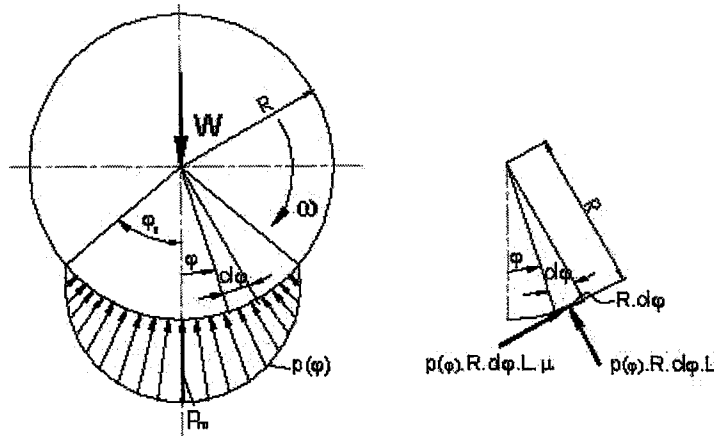
şeklinde bulunur. $\rho = \arctan \mu$ olduğu dikkate alınırsa μ_1 ' in çeşitli değerleri için μ sürtünme katsayısı ve μ_1/μ oranları Tablo 4.1 de verilmiştir.

Tablo 4.1 Gerçek sürtünme katsayısı μ ile tanımlanan sürtünme katsayısı μ_1 arasındaki oran

μ	μ_1	$\mu_1 / \mu = A$
0.01	0.0099	0.9999
0.05	0.0499	0.998
0.10	0.0995	0.995
0.15	0.148	0.988
0.20	0.196	0.979
0.25	0.242	0.968

Muylu ile Yatak Burcu Arasındaki Kuvvetin $2\varphi_0$ lık Bir Daire Yayına Yayılmış Sürtünme Direncine Etkisi:

Radyal yataklarda, yükün etkisi ile, temas alanı boyunca bir basınç dağılımı ortaya çıkar. Temas yayı boyunca basınç ve harekete ters yöndeki sürtünme direnci, açının konumuna göre değişir. Bu değişimi incelemek için $d\varphi$ kadar sonsuz küçük bir açı ele alınacak olursa (Şekil 4.5); $d\varphi$ açısının gördüğü sonsuz küçük daire yayına gelen kuvvetler göz önüne alındığında,



Şekil 4.5. Basıncın bir daire yayı üzerine yayılmasının etkisi

bu yaya etkiyen dW yükü;

$$dW = p(\varphi) \cdot R \cdot d\varphi \cdot \cos \varphi \cdot L \quad (4.12)$$

olur. Temas açısı boyunca integre edildiğinde, W yükünü dengeleyen kuvveti verecektir.

$$W = 2.R.L \int_0^{\varphi_0} p(\varphi). \cos \varphi. d\varphi \quad (4.13)$$

Temas yayına yayılmış kuvvetlerden dolayı oluşacak sürtünme momenti için

$$dM_s = p(\varphi).R.d\varphi.L.\mu.R \quad (4.14)$$

yazılabilir. μ , φ ' den bağımsız varsayılırsa,

$$M_s = 2.R^2.L.\mu \int_0^{\varphi_0} p(\varphi).d\varphi \quad (4.15)$$

olacaktır. (4.3) ve (4.4) bağıntıları dikkate alındığında ve yeniden düzenlendiğinde;

$$M_s = \frac{4.R.\mu.W}{\pi.\sin \varphi_0} \int_0^{\varphi_0} \left[1 - \left(\frac{\varphi}{\varphi_0} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} .d\varphi \quad (4.16)$$

D

durumuna gelir. Buradaki μ temas yüzeyindeki gerçek sürtünme katsayısıdır. Basit model kurularak tekil yük varsayımı ile $W=F_n$ alındığı takdirde (Şekil 4.3), $M_s=F_s.R=\mu_1.W.R$ olduğu dikkate alındığında basit modelle elde edilen sürtünme katsayısı ile gerçek sürtünme katsayısı arasında yükün $2\varphi_0$ lık bir daire yayına dağılması sonucu oluşan farkla ilgili olarak,

$$\mu_1 = \frac{4.\mu}{\pi.\sin \varphi_0} .D \quad (4.17)$$

bağıntısı bulunur. Bu durum için μ_1/μ oranı;

$$\frac{\mu_1}{\mu} = \frac{4.}{\pi.\sin \varphi_0} .D = B \quad (4.18)$$

yazılabilir. Sonuç olarak $\mu < \mu_1$ dir. Tablo 4.2 de yükün dağılmasının bu oran üzerindeki etkisi temas açısının birkaç değeri için verilmiştir.

Tablo 4.2 Temas yayı φ_0 ' ın sürtünme üzerine etkisi

φ_0 (°)	$\mu_1/\mu=B$
5	1.001
10	1.005
20	1.020
30	1.047
40	1.086
50	1.139
60	1.209
70	1.300
80	1.417
90	1.570

Tırmanmanın ve Temas Yayının Sürtünme Üzerine Ortak Etkisi

Basit modelle elde edilen sürtünme katsayısı μ_1 , tırmanma nedeniyle gerçek sürtünme katsayısı μ den bir miktar küçüktür. Diğer taraftan aynı sürtünme katsayısı, kuvvetin $2\varphi_0$ lık bir temas yayına yayılması sonucu da gerçek sürtünme katsayısı μ den farklıdır. A tırmanmaya, B ise temas açısına bağlı olarak, her iki etkiyi birden dikkate alarak gerçek sürtünme katsayısı ile basit modelle elde edilen ve μ_1 ile gösterilen sürtünme katsayısı arasında aşağıdaki ilişki yazılabilir:

$$\mu = \frac{\mu_1}{A.B} \quad (4.19)$$

Tablo 4.3 de bu farkın ne mertebede olduğunu gösteren bir kaç örnek verilmiştir.

Tablo 4.3 Gerçek sürtünme katsayısı μ ile basit modelle elde edilen sürtünme katsayısı μ_1 arasında tırmanmanın ve temas yayının ortak etkisi ile oluşan fark

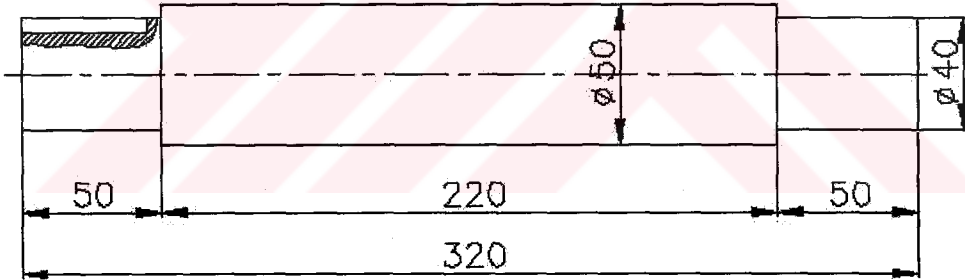
μ_1	φ_0	μ
0,1	10°	0,1
	20°	0,098
	30°	0,096
	40°	0,092
0.15	10°	0,1509
	20°	0,148
	30°	0,145
	40°	0,139
0.2	10°	0,203
	20°	0,2
	30°	0,195
	40°	0,188

5. DENEYLER

5.1 Deney Tesisatının Tanıtılması

Değişken yüke maruz salınım hareketli plastik yataklar için, daha önce aynı laboratuvar da yapılan araştırmaların deney tesisatından ve ölçme sistemlerinden yararlanılmıştır [66, 71].

Şekil 5.1 de teknik resmi görülen deney mili 50 mm nominal çapta olup, $Ra=0,2 \mu m$ yüzey pürüzlülüğü elde edilecek şekilde hassas olarak işlenmiştir. Mil iki ucundan hassas bilyalı, sıfır boşluklu, özel olarak imal edilmiş rulmanlarla yataklanarak çalışma sırasında mil ekseninin yer değiştirmesi önlenmiştir.



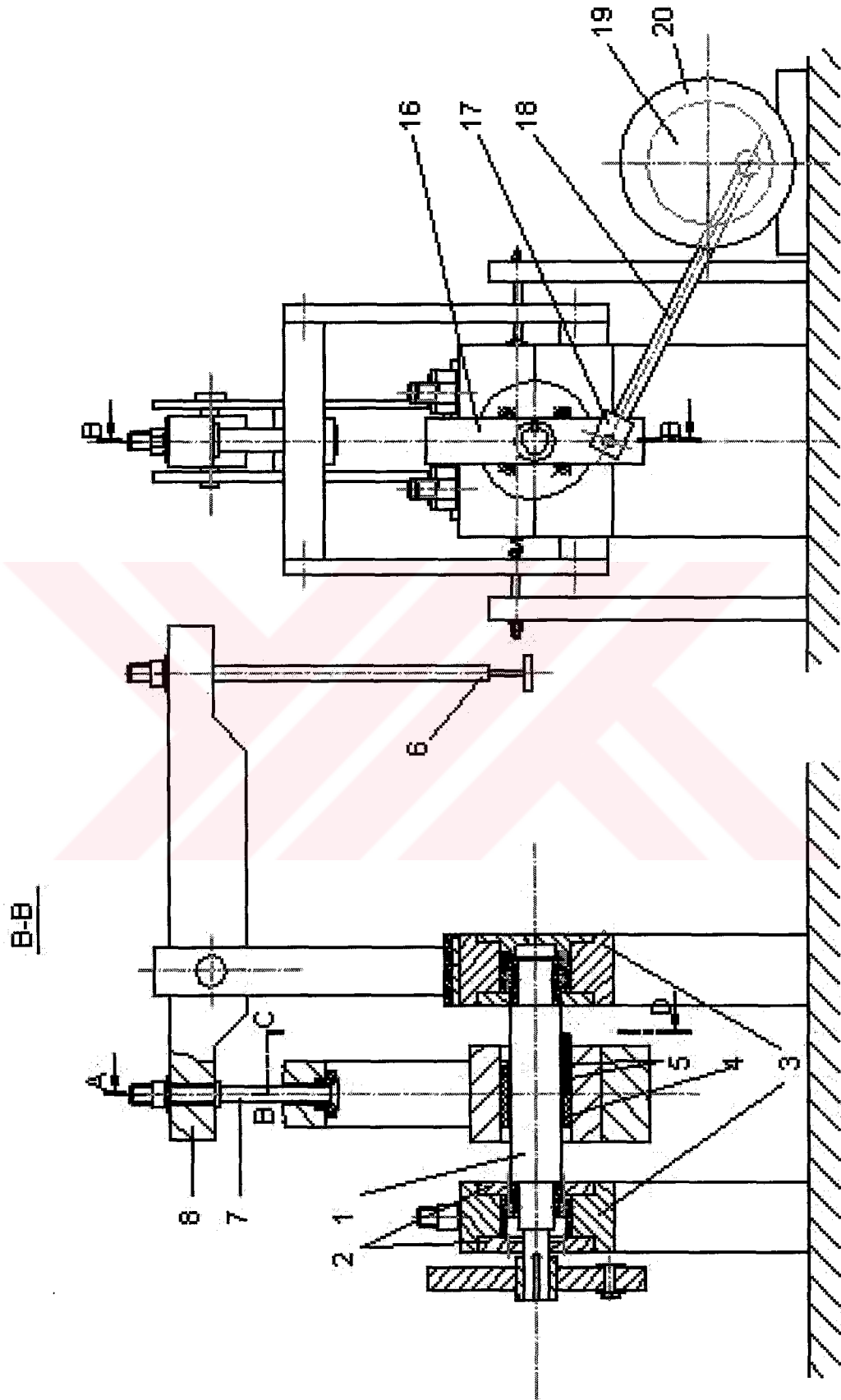
Şekil 5.1. Deney milinin teknik resmi

Deney tesisatının şematik resmi Şekil 5.2.a ve 5.2.b de görülmektedir.

Yatak burçları 50 mm nominal iç çapa sahip olup inceleme konusu plastik malzemelerden yapılmışlardır. Bu malzemeler POM, UHMWPE ve döküm PA 6 dır.

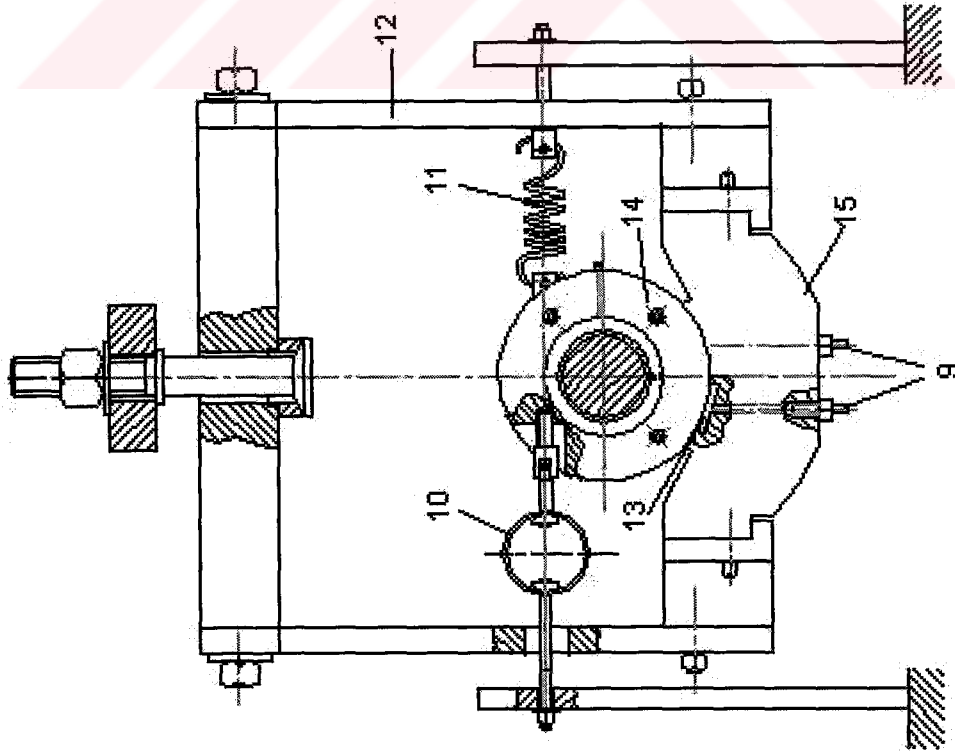
Burçların iç çapı komparatör yardımıyla takılmadan önce ve sonra, temasın olduğu band boyunca ölçülerek izafi yatak boşluğu hesaplanmıştır. Yatak boşluğunun tayininde son ölçü esas alınmıştır. Genişlik/çap oranı $L/d=1$ olarak alınmıştır.

Bu burçlar, çelik malzemeden, içten ve dıştan hassas taşlanarak yapılmış olan yatak gövdesine ara geçme toleransı ile yerleştirilerek yatak zafı dışından takılan bir civata ile sıkıştırılmış ve yatak içinde dönmeleri önlenmiştir. Deney yatağı gövdesi iki cepli bir hidrostatik yatak bloğu üzerine yerleştirilmiş, çalışma esnasında yatak bloğundaki



Şekil 5.2.a. Deney tesisatının şeması

ABCD



20	Motor
19	Küçük Kol
18	Biyel Kolu
17	Bağlantı Parçası
16	Sarkaç Kolu (levha)
15	Yatak Bloğu
14	Yatak Zarfı
13	Yağ Haznesi
12	Çerçeve
11	Ön Yükleme Yayı
10	Kuvvet Transdüseri
9	Yağ Girişi
8	Yükleme Manivelası
7	Küresel Başlı Yükleme Cıvatası
6	Yükleme Kolu
5	Termo Eleman
4	Plastik Burç
3	Mesnetler
2	Yan Kapaklar
1	Deney Mili

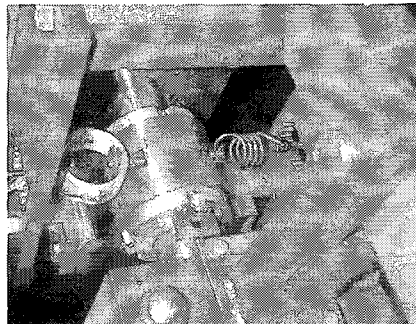
Şekil 5.2.b. Deney tesisatının şeması

ceplerin içine bir pompa yardımıyla yağ basılarak bu iki malzeme arasındaki sürtünmenin ortadan kaldırılması sağlanmıştır. Yatağın yüklenmesi bu bloğa bağlı bir çerçeve üzerinden, bir tarafına ağırlık asılan manivela kolu ile yapılmıştır. Çerçeve ile manivela kolunun bağlantısı, küresel bir yuva içinde oynayabilen baş kısmı küresel olarak işlenmiş bir civata ile sağlanmış, küresel yüzeyin çerçeveye verdiği üç dönme serbestliği yatakta yan oturmaya önlemiştir.

5.2 Kalibrasyon ve Ölçüm İşlemleri

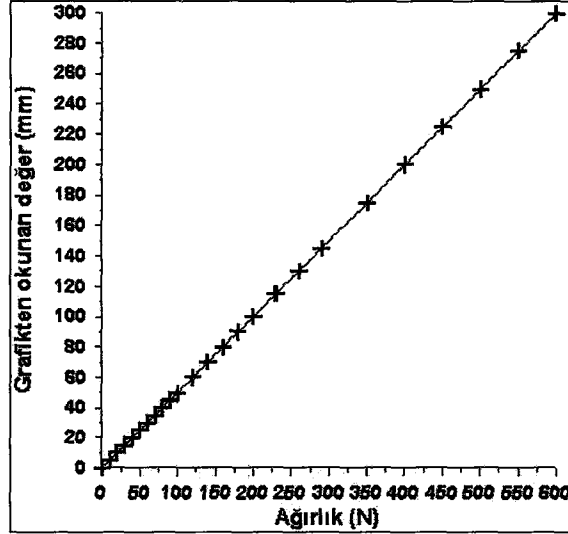
İzafi hareket sırasında, plastik burç ile çelik mil arasındaki sürtünme kuvvetini ölçmek için kullanılan kuvvet transdüseri, tahmini maksimum kuvvete göre, deneysel gerilme analizi hesapları kullanılarak alüminyum malzemeden imal edilmiştir. İç ve dış kısmına karşılıklı olarak dört adet strain-gage yapıştırılarak tam köprü bağlantısı ile hem sistemin duyarlılığı artırılmış hem de sıcaklık kompenzasyonu sağlanmıştır. Transdüserin bağlandığı strain-gage amplifikatörünün 50 kHz modülasyon frekansı olduğundan deney frekanslarında doğrusal bir karakteristiğe ve çeşitli kademelerde ölçüm hassasiyetine sahiptir.

Deneylerden önce, kuvvet transdüseri rijit bir gövdeye asılarak bilinen ağırlıklarla kalibre edilmiştir. Bunun için önce amplifikatör ve kaydedici, çalışılacak aralıklarda ayarlanarak sıfır konumuna getirilmiş, transdüser 5 N, 10 N, 20 N, 50 N ve 100 N. luk ağırlıklar yüklenerek bu ağırlıklara karşılık gelen kaydedicideki grafik değerleri okunarak grafik değeri-ağırlık kalibrasyon eğrisi çizilmiştir. Daha sonra transdüser ve bir yay karşılıklı olarak bir taraflarından ön gerilme verilerek yatak zarfına diğer taraflarından yere kaynak edilmiş profil demirlerine civatalarla bağlanmış, böylece gövdenin dönme serbestliği önlenmeden, deney esnasında halkaya gelen yükün milin salınım periyodu içinde hep aynı yönde kalması sağlanmıştır. Transdüserin ve yayın yatak zarfına bağlanma şekli Şekil 5.3 de görülmektedir.



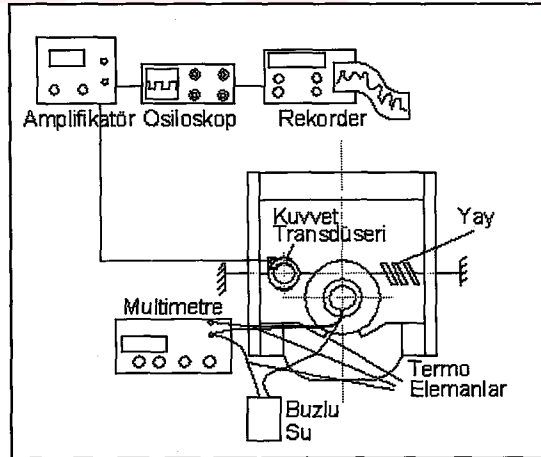
Şekil 5.3. Yatak zarfı, transdüser ve yay bağlantısı

Bu kalibrasyon işlemleri, burçlar takılırken ve çıkarılırken ayarların bozulabileceği düşünülerek, her yatak numunesi için tekrarlanmıştır. Şekil 5.4 de, kalibrasyon eğrisi görülmektedir.



Şekil 5.4. Kalibrasyon eğrisi

Osiloskop ve kaydedici kapasiteleri de göz önüne alınarak, amplifikatördeki orta hassasiyet derecesinde çalışılmıştır. Yapılan hata analizi sonucu, [75] ölçümlerin %3 hata payı sınırları içinde olduğu görülmüştür. Şekil 5.5 de sistemin bağlantı şeması görülmektedir.

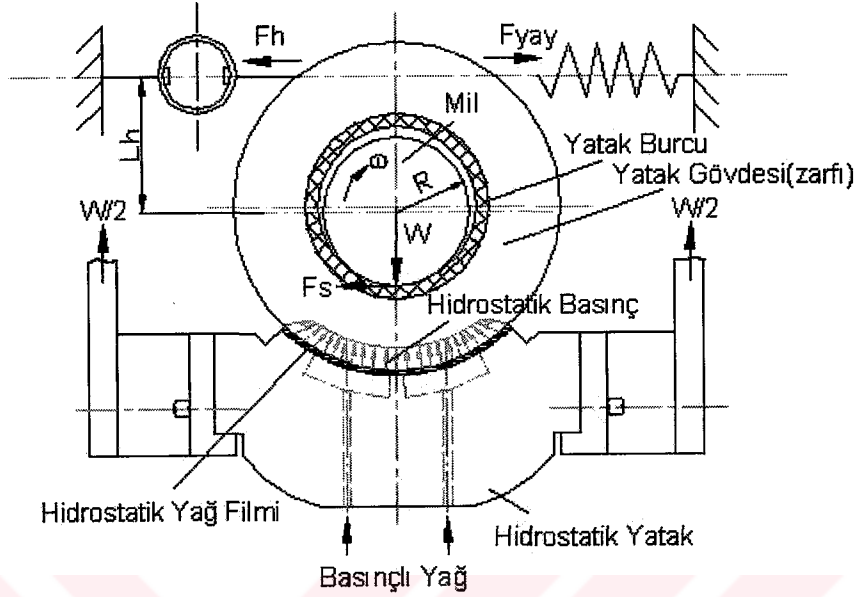


Şekil 5.5. Sistemin bağlantı şeması

5.2.1. Sürtünme Kuvvetinin Ölçülmesi

Şekil 5.6 da yatak burcu ve bu burcu içinde bulunduran yatak zarfına belirli bir anda gelen dış kuvvetler gösterilmiştir. Bu kuvvetler W (normal kuvvet), F_s (sürtünme

kuvveti), F_h (halkaya gelen kuvvet) ve F_{yay} (yaya gelen kuvvet) kuvvetleri ile hidrostatik yataktaki basınç kuvvetleridir.



Şekil 5.6. Yatak burcuna ve yatak zarfına gelen dış kuvvetler

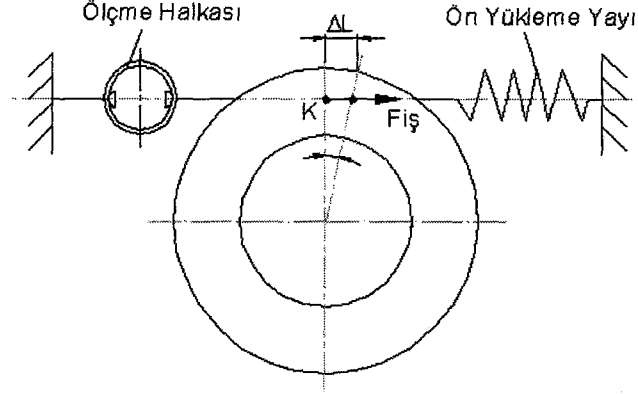
Yatak burcu herhangi bir hareket yapmadığından bu dış kuvvetlerin etkisi altında statik denge söz konusu olacaktır. Yükleme bloğu (hidrostatik yatak) ile yatak zarfı arasında ince bir yağ filmi oluşturulduğundan ve bu parçalar birbirine göre dönmediğinden bunlar arasında moment etkisi yaratacak bir viskoz sürtünme kuvveti söz konusu değildir. Moment dengesi için mil (yatak) merkezine göre moment alındığında:

$$F_s \cdot R + (F_{yay} - F_h) \cdot L_h = 0 \quad (5.1)$$

yazılabilir. $F_h - F_{yay} = F_{i\dot{s}}$ olarak gösterilirse ki bu kuvvet sistemden ölçme elemanına gelen işletme kuvvetidir, $F_s \cdot R - F_{i\dot{s}} \cdot L_h = 0$ eşitliğinden;

$$F_s = F_{i\dot{s}} \frac{L_h}{R} \quad (5.2)$$

bağıntısı elde edilir. Sürtünme kuvvetinin elde edilebilmesi için $F_{i\dot{s}}$ kuvvetinin ölçülmesi yeterlidir.



Şekil 5.7. Yükleme ve ölçme sistemi

Yücenur S. [71] tarafından geliştirilen yükleme ve ölçme sisteminde (Şekil 5.7) yaya ait yaylanma sayısı C_{yay} , rijit bir yay gibi düşünülebilecek olan ölçme halkasına ait yaylanma sayısı C_h ile gösterilsin. Önceden bir $F_{ön}$ kuvveti (öngerilme kuvveti) ile gerdirilerek yüklenen bu parçalardan oluşan sisteme deney yatağındaki sürtünmeden kaynaklanan $F_{ış}$ kuvveti K noktasında gelecektir. Ve bu noktada yatak zarfındaki küçük bir dönmenin sonucu olarak ΔL yer değiştirmesi ortaya çıkacaktır. Bu, halkada ΔL kadar ek uzamaya, yayda ise önceki uzamadan ΔL kadar azalmaya neden olacaktır. Bu durumda yaydaki ve halkadaki yeni kuvvetler;

$$F_{yay} = F_{ön} - \Delta L \cdot C_{yay} = F_{ön} - \Delta F_{yay} \quad (5.3)$$

ve

$$F_h = F_{ön} + \Delta L \cdot C_h = F_{ön} + \Delta F_h \quad (5.4)$$

olacaktır. Böylece $F_{ış}$ için;

$$F_{ış} = F_h - F_{yay} = \Delta F_{yay} + \Delta F_h \quad (5.5)$$

yazılabilir. $\Delta L = \Delta F_h / C_h$ ve $\Delta F_{yay} = \Delta L \cdot C_{yay}$ yazılır, (5.5) bağıntısına taşınır ve yeniden düzenlenirse;

$$\Delta F_h = F_{ış} \frac{1}{1 + \frac{C_{yay}}{C_h}} \quad (5.6)$$

elde edilir. Halkanın ve yayın yaylanma sayıları, bu parçaların statik yükler altındaki şekil değişimleri ölçülerek tespit edilmiştir. $C_{\text{yay}}/C_h=0,006$ olarak bulunmuştur. Bu durumda $F_{\text{iş}}$ kuvveti $F_{\text{iş}}=1,006\Delta F_h$ şeklinde elde edilir. (5.2) bağıntısı dikkate alındığında;

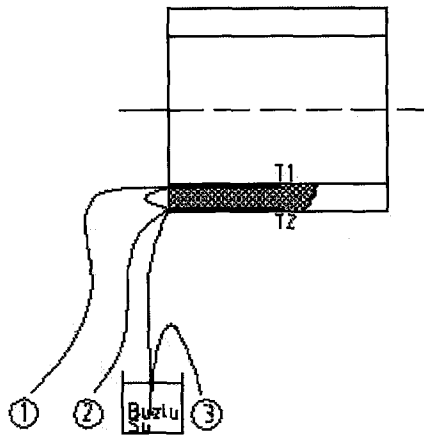
$$F_s = F_{\text{iş}} \frac{L_h}{R} = 1,006 \frac{\Delta F_h \cdot L_h}{R} \quad (5.7)$$

şeklinde bulunur. Üzerine uzama telleri (strain-gage' ler) yapıştırılmış olan halka yardımıyla ΔF_h kuvveti ölçüldüğü takdirde sürtünme kuvveti de bulunabilecektir.

Yeteri kadar büyük bir ön gerilme kuvveti olduğu takdirde, $F_{\text{iş}}$ kuvvetinin yönü değiştiğinde de (dönme yönü değiştiğinde de) halkadaki kuvvet hep çeki kuvveti olarak kalacak, ΔL yer değiştirmesi de çok küçük olduğundan alttaki hidrostatik filmde dikkate alınacak bir viskoz sürtünme kuvveti oluşmayacaktır.

5.2.2. Yatak Burcunun Temas Bölgesindeki Sıcaklığının Ölçülmesi

Yatak burcu ile milin teması sonucu ortaya çıkan sürtünme işinden dolayı oluşan sıcaklığı ölçmek için, her biri 0,2 mm çapında biri bakır diğeri nikel, üzerleri özel korumayla kaplanmış iki telin sarımıyla elde edilen iki termoeleman çifti kullanılmıştır. Burç iki noktadan aksenel yönde delinerek termoelemanların birer ucu temas yüzeyine paralel olarak bu deliklere sokulmuş (Şekil 5.8), 3. cü uç ise 0 °C deki buzlu su karışımına sokularak ortam sıcaklığının değişkenliğinden sakınılmıştır. Potansiyometre yardımıyla mV olarak ölçülen değerler bir dönüşüme tabi tutularak [76] T1 ve T2 ile gösterilen noktalardaki sıcaklıklar elde edilmiştir.



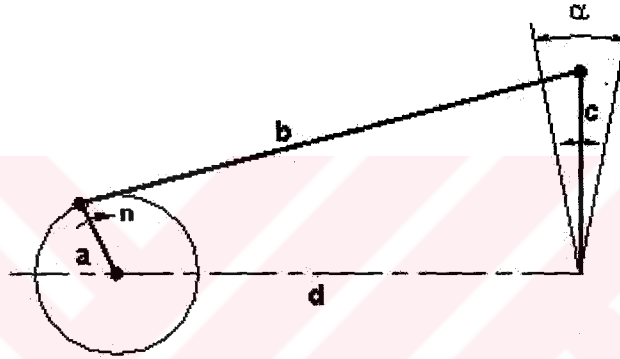
Şekil 5.8. Termoelemanların bağlantı şeması

Salınım Hareketini Elde Etmek için Kullanılan Üç Çubuk Mekanizmasının Kinematiği:

Deney miline verilen salınım hareketi, bir "santrik üç çubuk" mekanizması ile elde edilmiştir (Şekil 5.9). Deneylerde 30° ve 45° lik salınım açıları ile çalışılmış ve bu hareketi sağlayan çubuk boyları hesaplanarak imal ettirilmiştir.

Mekanizmada kullanılan çubuk boyları aşağıdaki gibidir:

$\alpha=30^\circ$ için	$a=23$ mm	$b=428$ mm	$c=150$ mm	$d=400$ mm
$\alpha=45^\circ$ için	$a=34$ mm	$b=430$ mm	$c=150$ mm	$d=400$ mm



Şekil 5.9. Üç çubuk mekanizması

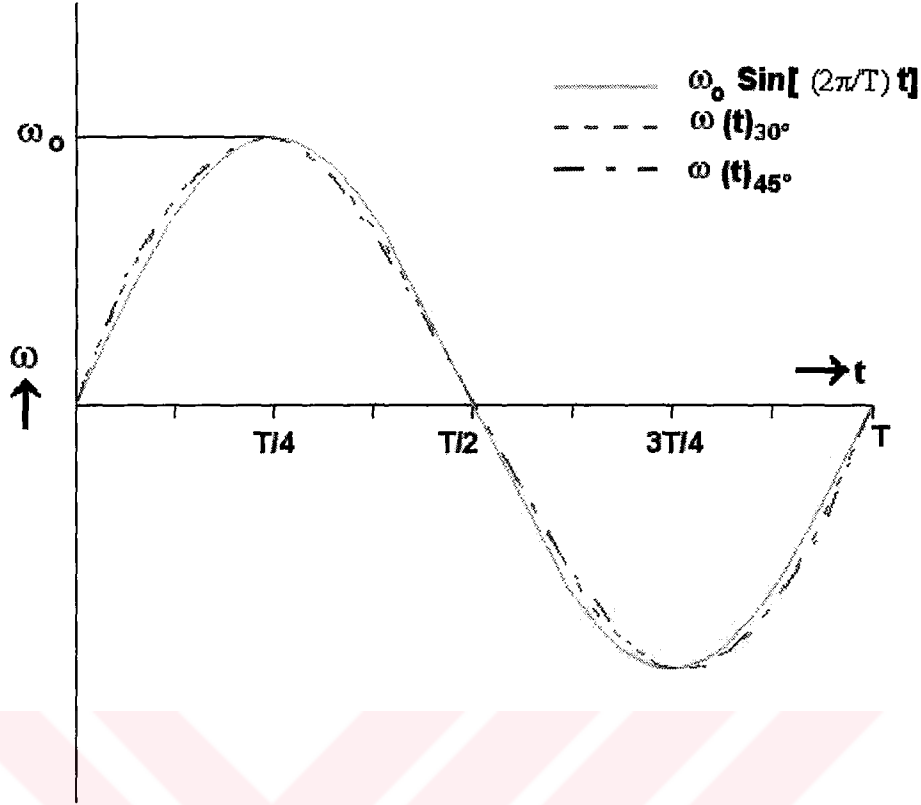
Salınım hareketinin düzgün harmonik hareket olduğu kabul edildiği takdirde;

$$\omega = \omega_0 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} t\right) \quad (5.8)$$

olur. Burada ω_0 açısal hızın en büyük değeri, T ise hareketin periyodudur. Salınım hareketinin frekansı, üç çubuk mekanizması (Şekil 3.5) için motor devir sayısıdır (n). Bu durumda $T=60/n$ olur. α salınım açısı olmak üzere, ortalama açısal hız $\omega_{ort}=2\alpha/T$ olacaktır. Bu durumda harmonik harekette açısal hızın maksimum değeri $\omega_0=\pi \cdot \alpha \cdot n/60$ olur. Sonuç olarak;

$$\omega = \frac{\alpha \cdot \pi \cdot n}{60} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot n}{30} \cdot t\right) \quad (5.9)$$

elde edilir. Şekil 5.10 da bu mekanizmadan elde edilen salınım hareketlerinin açısal hız diyagramları kıyaslamak amacı ile bir sinüs eğrisi ile birlikte görülmektedir.



Şekil 5.10. Üç çubuk mekanizması ile elde edilen hareketlerin açısal hız diyagramları

Salınım hareketinin hızı, kaydediciden elde edilen sürtünme eğrileri üzerinde bir periyodluk dilim ve kağıt hızı dikkate alınarak hesaplanmıştır.

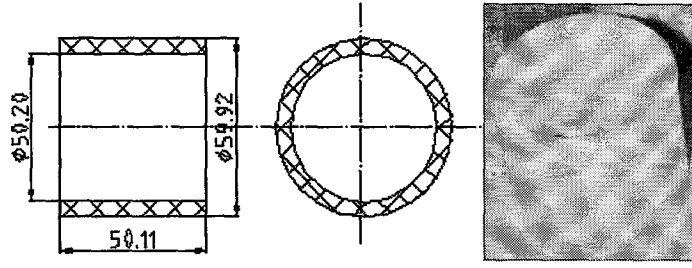
Mekanizmada mafsal boşluklarının ve sürtünmenin mümkün olduğu kadar küçük olmasına dikkat edilmiştir. Mil, üç çubuk mekanizması üzerinden bir Ward-Leonard grubu ile tahrik edilmiştir. Kullanılan doğru akım motorunun devir sayısı 10-3000 d/dak arasında kademesiz olarak değiştirilebilmektedir.

5.3 Deney Numuneleri ve Deney Şartları

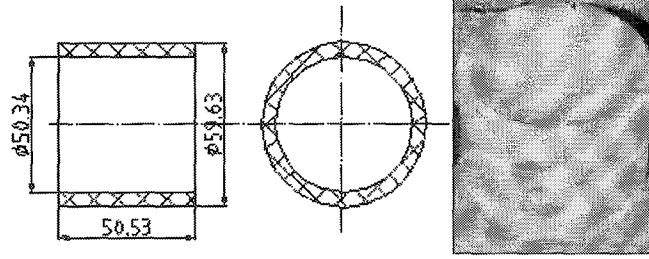
Deneyler 18-22° C ortam sıcaklığı ve 60% nem oranındaki laboratuvar şartlarında gerçekleştirilmiştir.

Sürtünme katsayısının tayini için yapılan deneylerde üç değişik plastik malzemeden yapılmış burç kullanılmıştır. Plastik malzemeler UHMWPE, PA 6 (döküm) ve POM olup, burçların teknik resimleri ve fotoğrafları Şekil 5.11 de gösterilmiştir.

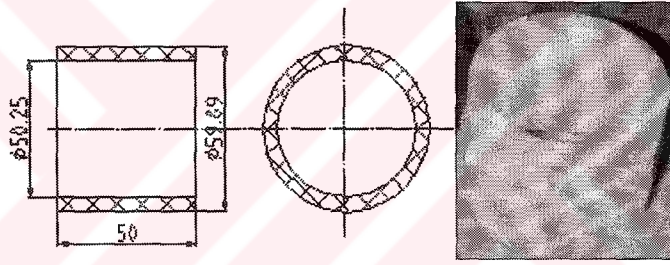
Yatakların çapları, yatak boşlukları ve izafi yatak boşlukları ile ilgili bilgiler Tablo 5.1 de verilmiştir.



a) UHMWPE



b) döküm PA 6



c) POM

Şekil 5.11. Plastik burçların şematik resimleri ve fotoğrafları

Tablo 5.1 Deneylerde kullanılan plastik yatakların çap, yatak boşluğu ölçüleri ve izafi yatak boşluğu

Burç Malzemesi	Yatak Çapı D (mm)	Yatak Boşluğu c (mm)	İzafi Yatak Boşluğu (%)
UHMWPE	50,20	0,20	0,4
PA6	50,34	0,34	0,6
POM	50,25	0,25	0,5

Kayma hızı 0,02 (0,03) m/s-0,3 (0,44) m/s arasında 5 kademedeki, yük düşük pv değerlerinde, 94,5 N (0,038 MPa)-346,5 N (0,138 MPa) arasında 5 kademedeki, yüksek pv değerlerinde 800 N (0,32 MPa)-2550 N (1,02 MPa) arasında 3 kademedeki ve salınım açısı 30° ve 45° olmak üzere iki kademedeki ele alınmıştır.

Her deney, burçlar rejim sıcaklığına ulaşana kadar devam etmiş, potansiyometrenin gösterdiği değerin artık değişmediği görüldüğünde ölçüm değerleri kaydedilmiştir.

Sürtünme kuvveti kuvvet transdüseri yardımıyla, sıcaklık burç içine yerleştirilen iki termo eleman çiftiyle ve motor mili devri dijital takometre vasıtasıyla ölçülmüştür.

5.4 Deneylerin Yapılışı

Deneylere başlamadan önce, 45° lik salınım açısı esas alınarak sistemin titreşimsiz çalışabildiği en yüksek motor devir sayısı saptanarak milin maksimum kayma hızı hesaplanmış, buna göre kalan dört kademedeki motor devir sayıları belirlenerek diğer kayma hızları bulunmuştur. En düşük pv limitine göre ortalama yüzey basıncının değeri saptanarak bu değere karşılık gelen normal kuvvet, kuru sürtünmeli kaymalı yatak hesapları kullanılarak bulunmuş, buna bağlı olarak manivela koluna asılacak maksimum ağırlık saptanmıştır. Diğer kademelere ait manivela kolu ağırlıkları ve bunlara karşılık gelen yatak yükleri belirlendikten sonra deney yapma aşamasına geçilmiştir. Deney mili ve yatak burçlarının içleri her deney başlangıcında, teknik kuru yüzey elde etmek için, saf aseton ile temizlenerek burç, yatak gövdesine kayar geçme toleransı ile takıldıktan sonra yatak zarfı üzerinden takılı bir civata ile sıkıştırılmış ve içine deney mili yerleştirilmiştir. Milin iki ucuna rulmanlı yataklar çakıldıktan sonra bir ucuna salınım hareketini sağlayan levha hem kama hem de civata takılarak sabitlenmiş ve hepsi birlikte mesnet blokları içine monte edilmiştir. Bilinen ağırlıklarla daha önceden kalibrasyonu yapılmış olan kuvvet transdüserinin bir ucu deney yatağı zarfına, bir ucu da kaynak edilmiş profil demire bağlanmıştır. Yatak zarfının diğer tarafına, kuvvetin aynı yönde kalmasını ve gövdenin kendi başına dönmesini engellemek amacıyla, bir yay monte edilmiştir. Bu yay yaklaşık 450 N luk ön gerilme ile kaynak edilmiş başka bir demir profiline bağlanmıştır. Burçlar belli bir alıştırmaya devresinden sonra deneye hazır hale getirildiğinde amplifikatör, amplifikatöre bağlı osiloskop, kaydedici ve plastik burcun iki noktadan sıcaklığını mV cinsinden ölçen potansiyometre sıfıra ayarlanmıştır. Yükleme, manivela koluna ağırlık asılmak suretiyle gerçekleştirildikten sonra motor devreye sokulmuştur. Rejim sıcaklığına (yüksek yüklerde malzemelerin kullanım dışı kaldığı sıcaklığa) ulaşıldığı zaman yatak zarfı altındaki ceplere yağ basılmış ve kaydediciden milimetrik kağıda çizilmiş grafik çıktıları alınmıştır. Plastik burçdaki iki noktadan alınan mV cinsinden sıcaklık değerleri ile dijital termometreyle ölçülen oda sıcaklığı değerleri kaydedilmiştir.

Daha önceden çıkarılan ağırlık-kaydedici kalibrasyon eğrisinden, transdüserin bağlı olduğu noktadaki kuvvetin değeri okunarak sürtünme kuvveti hesaplanmış, normal kuvvete bölünerek sürtünme katsayısı bulunmuştur.

Bütün bu işlemler, 30° ve 45° lik iki salınım açısında, her plastik burç için her devir ve her yük kademesinde üçer kez tekrarlanmıştır. Her malzeme için sürtünme katsayısı değeri olarak, bu üç deneyde elde edilen sürtünme katsayılarının ortalaması alınmıştır.



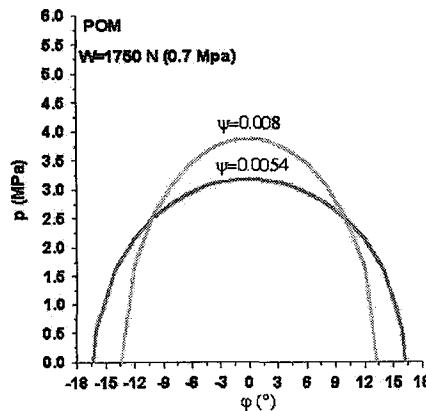
6. DENEY SONUÇLARI

Bu bölümde UHMWPE, PA 6 VE POM' dan yapılmış üç plastik burcun çelik mille temasında, izafi yatak boşluğunun yüzey basıncına ve sürtünme katsayısına etkisi grafikler halinde, temas açısı, ortalama basınç, maksimum basınç ve temas alanının yatak yükü ile değişimleri tablo olarak, yatak basınçları ise yine grafikler halinde gösterilmektedir. Her iki salınım açısında, $PV=0,06$ MPa.m/s [77] ve $PV=0,5$ MPa.m/s [4] değerleri gözönüne alınarak temas yüzeyi sıcaklıklarının ve sürtünme katsayılarının milin kayma hızı ve ortalama yüzey basıncı ile değişimleri grafikler halinde verilmektedir. Deney sonuçlarına ait kısa bir özet ve nedenlerine ait yaklaşımlar "Sonuçların Değerlendirilmesi" başlığı altında yer almaktadır.

6.1. İzafi Yatak Boşluğunun Etkisi:

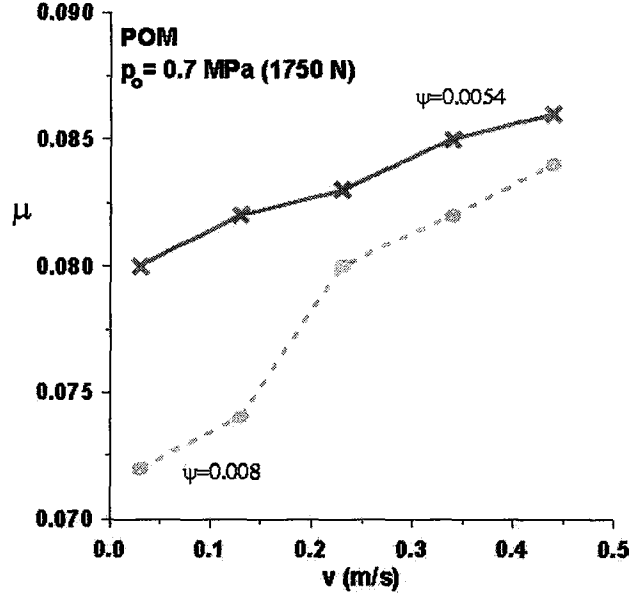
Burçların imalinde yatak boşluğunun tayini önemli rol oynamaktadır. Maksimum yüzey basıncının, pv limitinin belirlenmesinde kullanılan ortalama yüzey basıncından çok büyük olmaması için yatak boşluğunun küçük alınması, yani temasın daha büyük bir temas yayına yayılması istenir. Diğer taraftan küçük yatak boşluğu ısı iletkenlikleri kötü olan plastik burçların sürtünme ısısından dolayı genişerek boyutlarının değişmesine hatta mile sarmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle plastik burçlardaki izafi yatak boşluğunun montajdan sonra 0,006-0,01 aralığında alınması önerilmektedir [78].

Yüzey Basıncına Etkisi:



Şekil 6.1. İzafi yatak boşluğunun yüzey basıncına etkisi

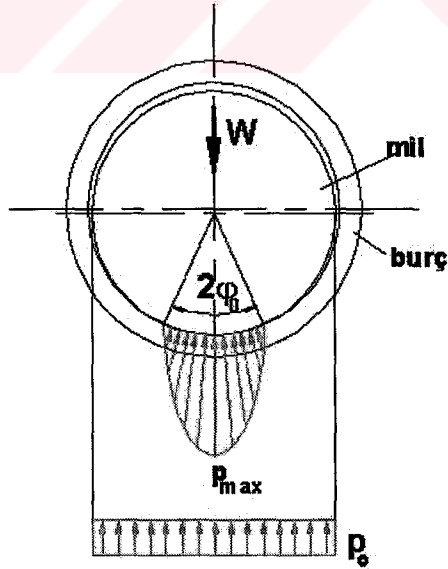
Sürtünme Katsayısına Etkisi:



Şekil 6.2. İzafi yatak boşluğunun sürtünme katsayısına etkisi

6.2. Uygulanan Yükler Sonucu Ortaya Çıkan Basınç Dağılımları

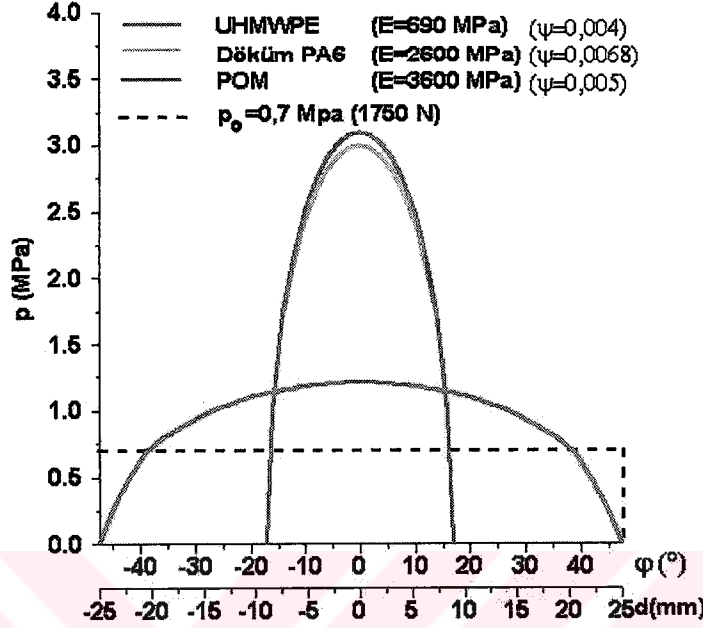
Şekil 6.3 de uygulanan yükler sonucu düz yüzeylerin temasında ortaya çıkan basınç dağılımı ile radyal yatak temasında ortaya çıkan basınç dağılımı şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 6.3. Düz ve eğri yüzeylerin temasında ortaya çıkan basınç dağılımları

Düz yüzeylerde ortalama basınç normal kuvvetin temas alanına bölünmesi ile hesaplanırken radyal yatak temasında temas alanı iki eğri yüzeyin temas alanı olarak yatağın diğer boyutlarına göre nispeten küçük kaldığından Hertz bağıntıları ile

hesaplanmaktadır [9]. Şekil 6.4 de aynı yük için normal kuvvetin projeksiyon alanına bölünmesiyle bulunan ortalama basınç dağılımı ile Hertz bağıntıları ile bulunan basınç dağılımı görülmektedir.



Şekil 6.4. UHMWPE, döküm PA6 ve POM' dan yapılmış plastik yataklarda basınç dağılımı ve ortalama basınç eğrileri

Şekilden de görüldüğü gibi, ortalama basınç ile yatakta meydana gelen basınçlar arasında önemli farklar vardır. Bu nedenle düz yüzeylerin temasında ortaya çıkan sürtünme durumu ile yatak-mil temasında ortaya çıkan sürtünme durumu da farklı olmaktadır. Düz yüzeylerde basınç sadece temas eden cismin boyutlarına bağlıyken yataklarda hem milin (yatağın) çapına, yatak genişliğine ve burcun et kalınlığına hem de elastiklik modülü başta olmak üzere malzemenin bazı mekanik özelliklerine bağlıdır. Ortalama basınç ile maksimum basınç arasındaki fark, malzemenin dayanımı ve izafi yatak boşluğu arttıkça artmaktadır. UHMWPE' nin hem dayanımı hem de yatak boşluğu diğerlerinden küçük olduğundan temas alanı büyük olmakta dolayısıyla basınç küçülmektedir. POM' un dayanımı PA6' ya göre daha büyük olmasına rağmen PA6' dan yapılan burcun yatak boşluğu daha fazla olduğundan temas alanları ve basınçları birbirine yakın çıkmaktadır.

Tablo 6.1 de her üç malzemedan yapılmış plastik burçların yatak yüküne, yatak malzemelerinin mekanik özelliklerine ve izafi yatak boşluğuna bağlı olarak temas açıları, temas alanları, ortalama basınçları ve maksimum basınç değerleri görülmektedir. Buradan elastiklik modülü daha düşük olan UHMWPE' nin, temas alanları, beklenebileceği gibi, daha yüksek olduğundan, diğer iki malzemeye göre daha küçük basınçlara maruz kaldığı anlaşılmaktadır.

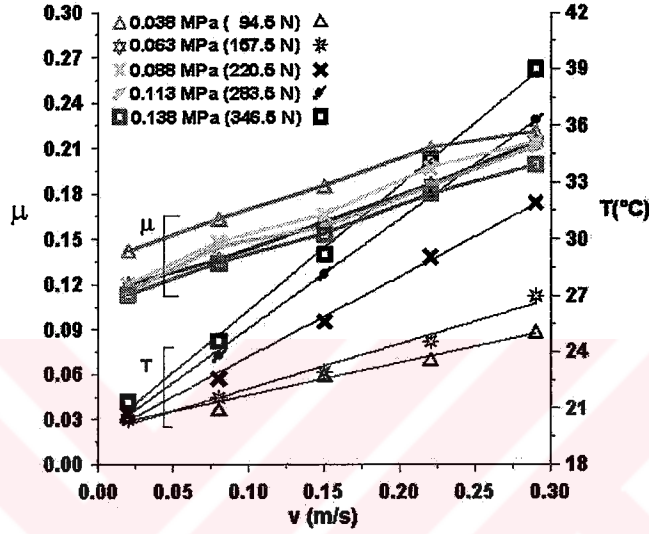
Tablo 6.1. UHMWPE, döküm PA6 ve POM' dan yapılmış burcun uygulanan yük (W) sonucunda temas açısının ($2\phi_0$), temas alanının (A), max. yüzey basıncının (p_{max})ve ortalama yüzey basıncının (p_0) değerleri

		UHMWPE ($\psi=0,004$)			DÖKÜM PA6($\psi=0,0068$)		
W (N)	p_0 (MPa)	p_{max} (MPa)	A (mm ²)	2ϕ (°)	p_{max} (MPa)	A (mm ²)	2ϕ (°)
94,5	0,038	0,28	428	19,7	0,7	170	7,87
157,5	0,063	0,36	552	25,5	0,9	219	10,5
220,5	0,088	0,43	654	30,3	1,	259	11,9
283,5	0,113	0,48	741	34,5	1,2	293	13,6
346,5	0,138	0,53	820	38,3	1,3	324	15
800	0,32	0,81	1246	59,8	2	492	22,9
1750	0,7	1,2	1842	94,9	3	728	33,9
2550	1,02	1,45	2224	125,6	3,6	879	41,2
POM($\psi=0,005$)							
94,5	0,038	0,71	169	7,74			
157,5	0,063	0,92	218	10			
220,5	0,088	1,1	258	11,48			
283,5	0,113	1,231	292	13,44			
346,5	0,138	1,361	323	14,88			
800	0,32	2,1	491	22,7			
1750	0,7	3,1	727	33,8			
2550	1,02	3,7	878	40,96			

6.3. Sürtünme Katsayısı ve Temas Yüzeyi Sıcaklıkları

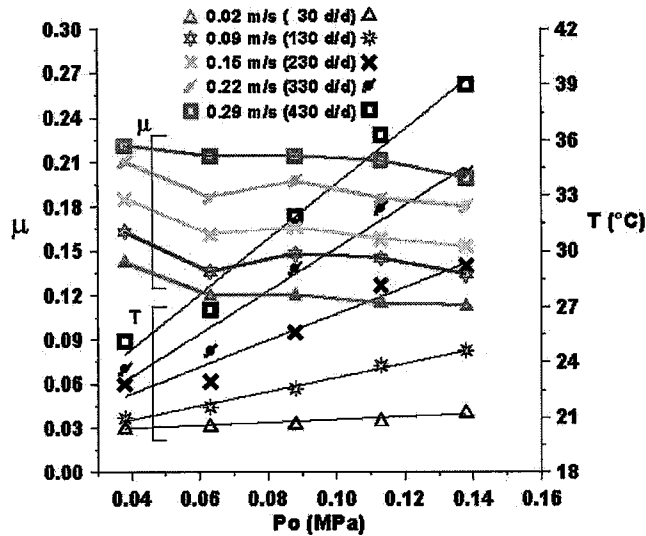
6.3.1. UHMWPE ($\psi = 0,004$)

Şekil 6.5 de, 30° lik salınım açısında UHMWPE' nin sürtünme katsayısının ve temas yüzeyi sıcaklığının kayma hızı ile değişimi görülmektedir.



Şekil 6.5. Salınım açısı 30° iken UHMWPE yatak-çelik mil temasında sürtünme katsayısının ve temas yüzeyi sıcaklığının kayma hızı ile değişimi

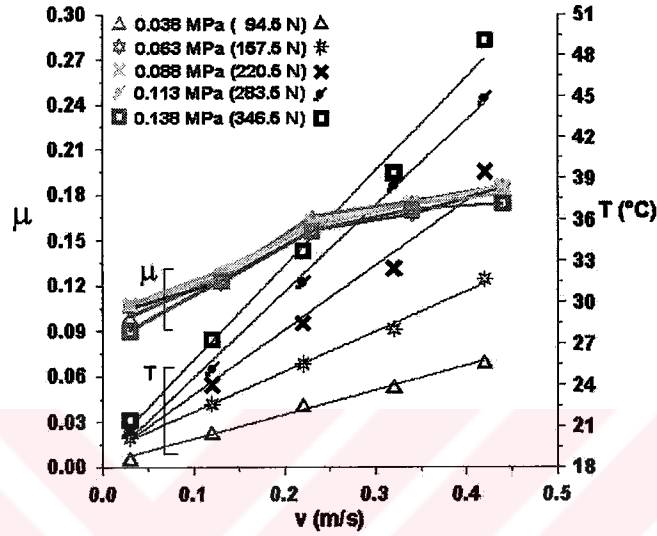
Temas yüzeyi sıcaklığı ve sürtünme katsayısı, bütün yük kademelerinde kayma hızı ile artmaktadır.



Şekil 6.6. Salınım açısı 30° iken UHMWPE yatak-çelik mil temasında sürtünme katsayısının ve temas yüzeyi sıcaklığının ortalama yüzey basıncı ile değişimi

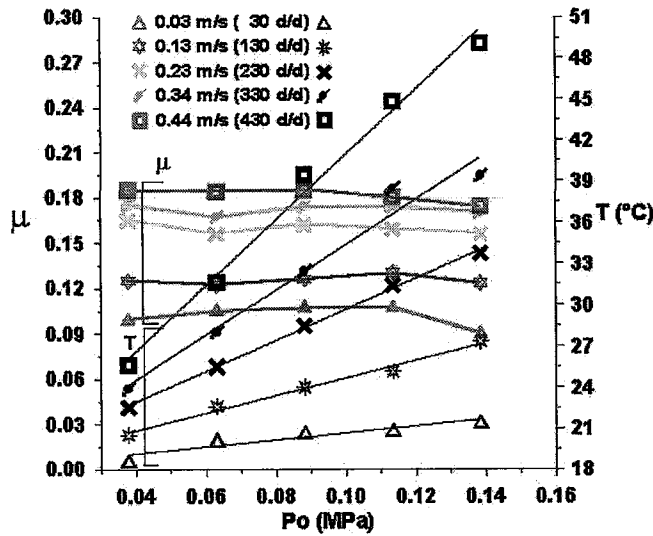
Şekil 6.6 da, 30° lik salınım açısında UHMWPE' nin sürtünme katsayısının ve temas yüzeyi sıcaklığının ortalama basınç ile değişimi görülmektedir. Temas yüzeyi sıcaklığı artarken sürtünme katsayısı basınçla çok hafif bir düşme göstermektedir.

Şekil 6.7 de, 45° lik salınım açısında UHMWPE' nin sürtünme katsayısının ve temas yüzeyi sıcaklığının kayma hızı ile değişimi görülmektedir.



Şekil 6.7. Salınım açısı 45° iken UHMWPE yatak-çelik mil temasında sürtünme katsayısının ve temas yüzeyi sıcaklığının kayma hızı ile değişimi

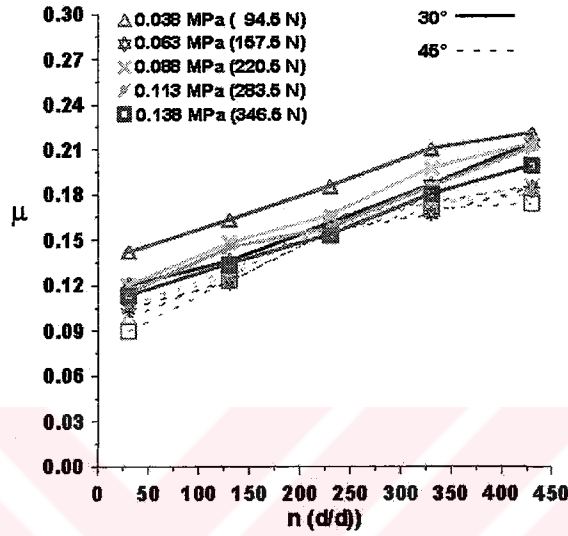
Temas yüzeyi sıcaklığı ve sürtünme katsayısı, bütün yük kademelerinde kayma hızı ile artmaktadır.



Şekil 6.8. Salınım açısı 45° iken UHMWPE yatak-çelik mil temasında sürtünme katsayısının ve temas yüzeyi sıcaklığının ortalama yüzey basıncı ile değişimi

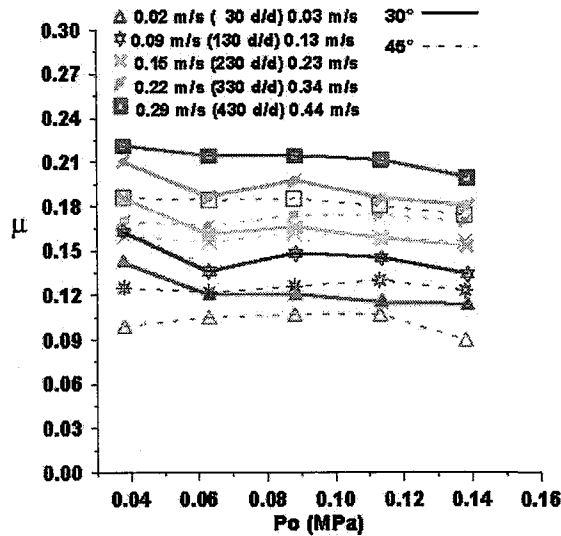
Şekil 6.8 de, 45° lik salınım açısında UHMWPE' nin sürtünme katsayısının ve temas yüzeyi sıcaklığının ortalama basınç ile değişimi görülmektedir. Temas yüzeyi sıcaklığı artarken sürtünme katsayısı basınçla pek değişmemektedir.

Şekil 6.9 da, $K=30^\circ$ ve $K=45^\circ$ lik salınım açılarında UHMWPE' nin sürtünme katsayısının Salınım frekansı ile değişimi görülmektedir.



Şekil 6.9. $K=30^\circ$ ve $K=45^\circ$ lik salınım açılarındaki UHMWPE yatak-çelik mil temasında sürtünme katsayısının salınım frekansı ile değişimi

Sürtünme katsayısı, 30° lik salınım açısında 45° lik salınım açısından daha yüksektir.



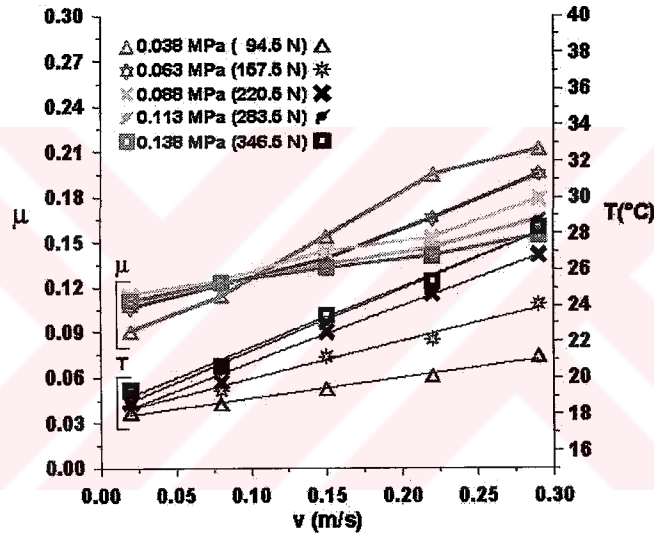
Şekil 6.10. $K=30^\circ$ ve $K=45^\circ$ lik salınım açılarındaki UHMWPE yatak-çelik mil temasında sürtünme katsayısının ortalama yüzey basıncı ile değişimi

Şekil 6.10 da, $K=30^\circ$ ve $K=45^\circ$ lik salınım açılarındaki, sürtünme katsayısının basınç ile değişimi görülmektedir. UHMWPE' nin 30° lik salınım açısındaki sürtünme katsayısı değerleri, 45° lik salınım açısındakinden büyük çıkmaktadır.

Sonuç olarak 45° lik salınım açısındaki sürtünme katsayısı değerleri hem kayma hızına hem de basınca bağlı olarak, 30° lik salınım açısındaki değerlerden daha düşük çıkmaktadır.

6.3.2. DÖKÜM PA6 ($\psi=0,0068$)

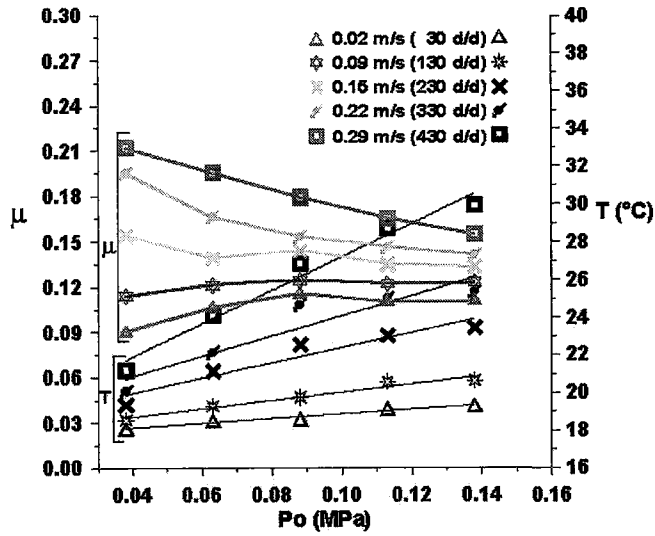
Şekil 6.11 de, 30° lik salınım açısında Döküm PA6' nın sürtünme katsayısının ve temas yüzeyi sıcaklığının kayma hızı ile değişimi görülmektedir.



Şekil 6.11. Salınım açısı 30° iken döküm PA6 yatak-çelik mil temasında sürtünme katsayısının ve temas yüzeyi sıcaklığının kayma hızı ile değişimi

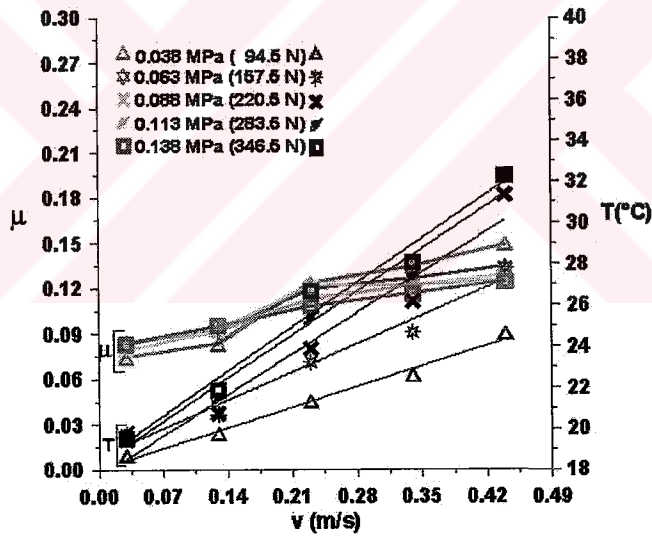
Temas yüzeyi sıcaklığı ve sürtünme katsayısı, bütün yük kademelerinde kayma hızı ile artmaktadır.

Şekil 6.12 de, 30° lik salınım açısında Döküm PA6' nın sürtünme katsayısının e yüzey sıcaklığının basınç ile değişimi görülmektedir. Temas yüzeyi sıcaklığı basınçla artarken sürtünme katsayısının genel olarak düştüğü görülmektedir.



Şekil 6.12. Salınım açısı 30° iken döküm PA6 yatak-çelik mil temasında sürtünme katsayısının ve temas yüzeyi sıcaklığının ortalama yüzey basıncı ile değişimi

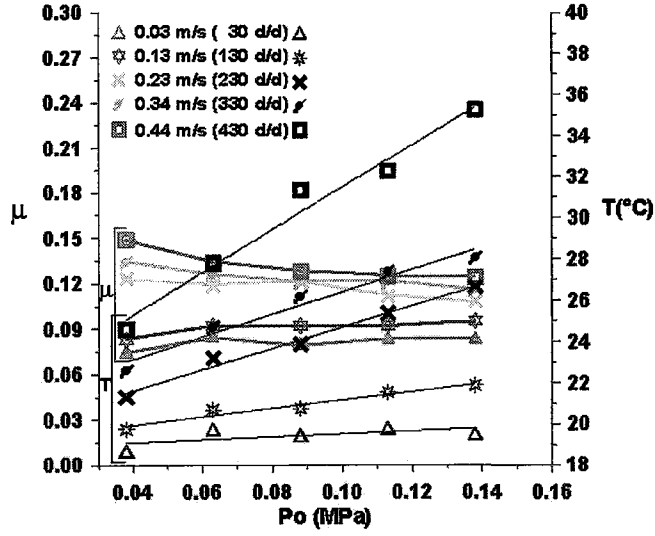
Şekil 6.13 de, 45° lik salınım açısında Döküm PA6' nın sürtünme katsayısının ve yüzey sıcaklığının kayma hızı ile değişimi görülmektedir.



Şekil 6.13. Salınım açısı 45° iken döküm PA6 yatak-çelik mil temasında sürtünme katsayısının ve temas yüzeyi sıcaklığının kayma hızı ile değişimi

Hem sürtünme katsayısı hem de sıcaklık kayma hızı artarken artmaktadır.

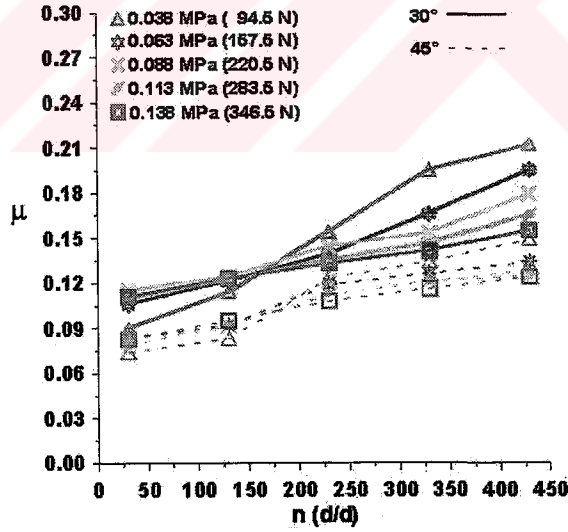
Şekil 6.14 de, 45° lik salınım açısında Döküm PA6' nın sürtünme katsayısının ve yüzey sıcaklığının basınçla değişimi görülmektedir.



Şekil 6.14. Salınım açısı 45° iken döküm PA6 yatak-çelik mil temasında Sürtünme katsayısının ve temas yüzeyi sıcaklığının ortalama yüzey basıncı ile değişimi

Temas yüzeyi sıcaklığı basınçla artarken sürtünme katsayısı genel olarak düşme eğilimi göstermektedir.

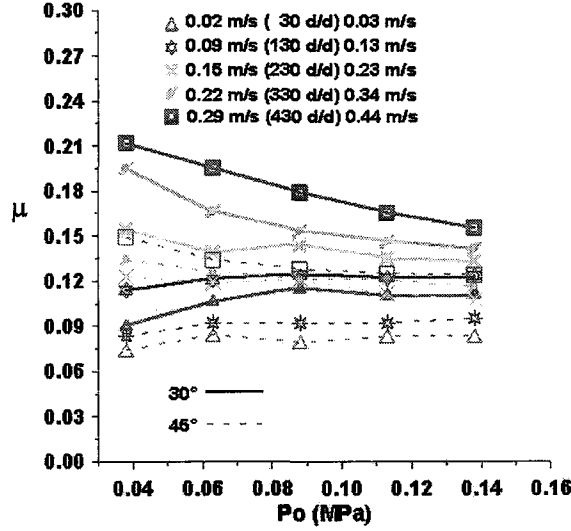
Şekil 6.15 de, $K=30^\circ$ ve $K=45^\circ$ lik salınım açılarında Döküm PA6' nın sürtünme katsayısının Salınım frekansı ile değişimi görülmektedir.



Şekil 6.15. $K=30^\circ$ ve $K=45^\circ$ lik salınım açılarında döküm PA6 yatak-çelik mil temasında sürtünme katsayısının salınım frekansı ile değişimi

Sürtünme katsayısı, 30° lik salınım açısında 45° lik salınım açısından daha yüksektir.

Şekil 6.16 da, $K=30^\circ$ ve $K=45^\circ$ lik salınım açılarında Döküm PA6' nın sürtünme katsayısının basınçla değişimi görülmektedir.

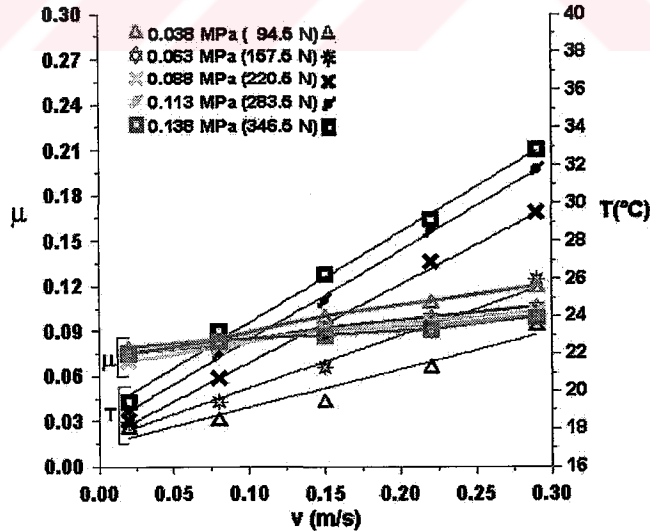


Şekil 6.16. $K=30^\circ$ ve $K=45^\circ$ lik salınım açılarında döküm PA6 yatak-çelik mil temasında sürtünme katsayısının ortalama yüzey basıncı ile değişimi

Sürtünme katsayısı, 30° lik salınım açısında 45° lik salınım açısından daha yüksektir.

6.3.3. POM ($\psi=0,005$)

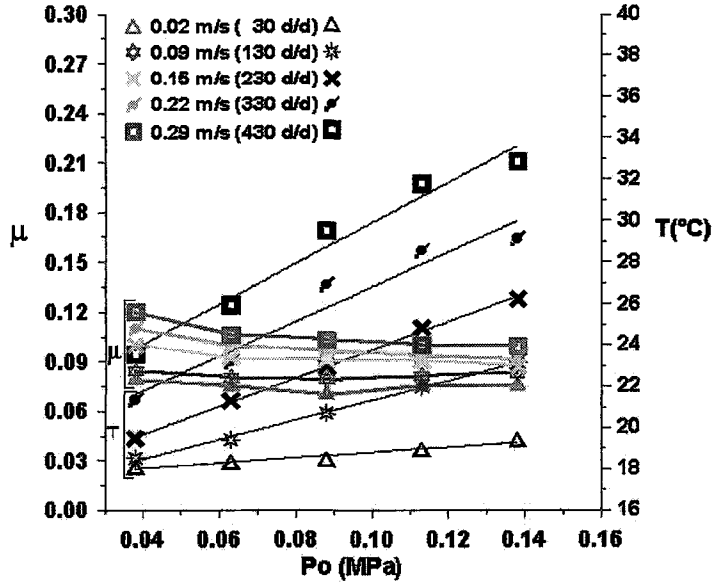
Şekil 6.17 de, 30° lik salınım açısında POM' un sürtünme katsayısının ve temas yüzeyi sıcaklığının kayma hızı ile değişimi görülmektedir.



Şekil 6.17. Salınım açısı 30° iken POM yatak-çelik mil temasında sürtünme katsayısının ve temas yüzeyi sıcaklığının kayma hızı ile değişimi

Temas yüzeyi sıcaklığı ve sürtünme katsayısı, bütün yük kademelerinde kayma hızı ile artmaktadır.

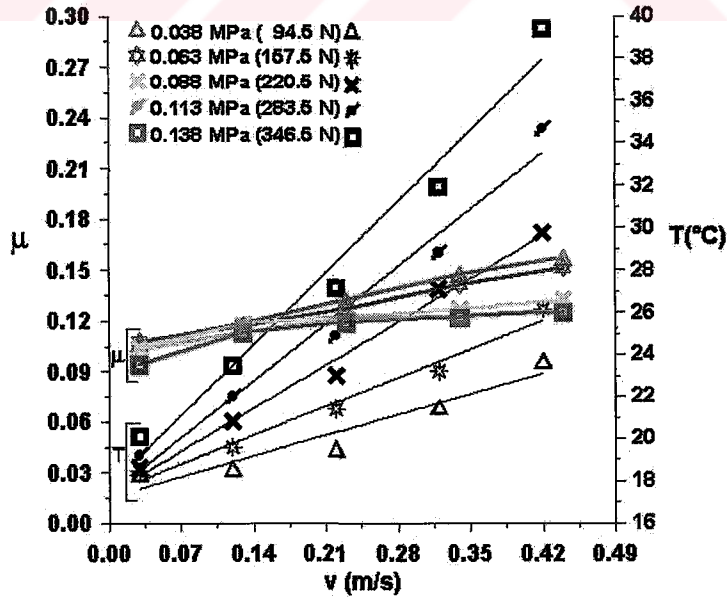
Şekil 6.18 de, 30° lik salınım açısında POM' un sürtünme katsayısının ve temas yüzeyi sıcaklığının basınçla değişimi görülmektedir.



Şekil 6.18. Salınım açısı 30° iken POM yatak-çelik mil temasında sürtünme katsayısının ve temas yüzeyi sıcaklığının ortalama yüzey basıncı ile değişimi

Temas yüzeyi sıcaklığı artarken sürtünme katsayısı hafifçe düşmektedir.

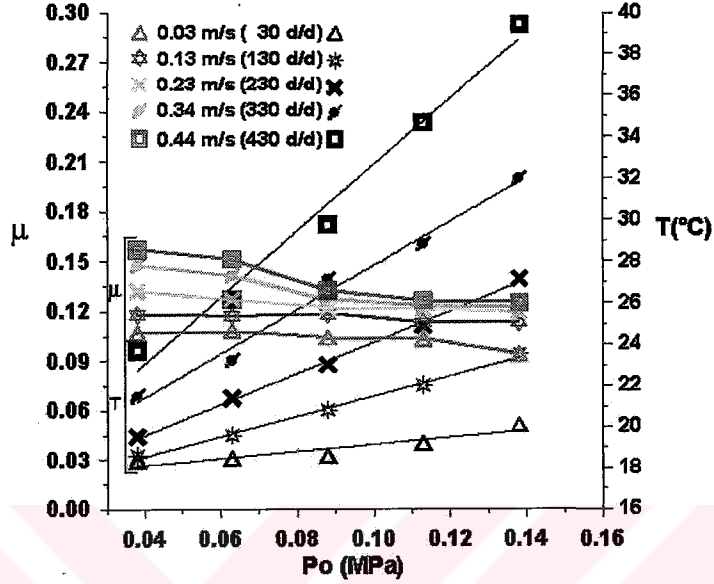
Şekil 6.19 da, 45° lik salınım açısında POM' un sürtünme katsayısının ve temas yüzeyi sıcaklığının kayma hızı ile değişimi görülmektedir.



Şekil 6.19. Salınım açısı 45° iken POM yatak-çelik mil temasında sürtünme katsayısının ve temas yüzeyi sıcaklığının kayma hızı ile değişimi

Temas yüzeyi sıcaklığı ve sürtünme katsayısı kayma hızı ile artmaktadır.

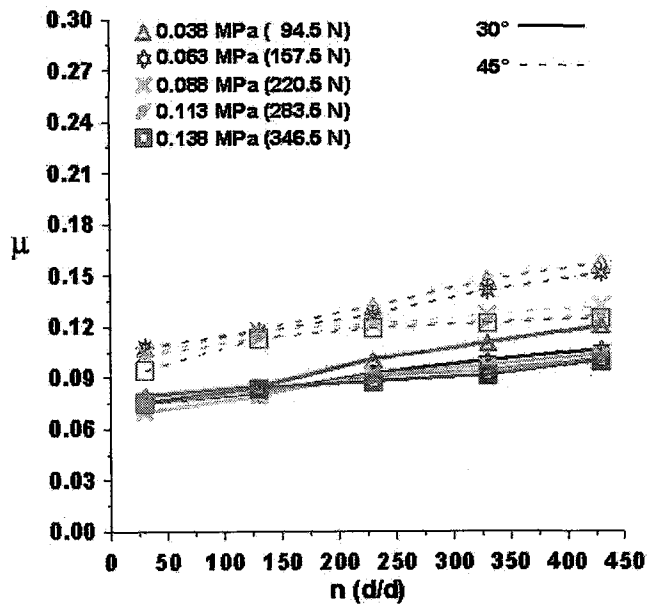
Şekil 6.20 de, 45° lik salınım açısında POM' un sürtünme katsayısının ve temas yüzeyi sıcaklığının basınçla değişimi görülmektedir.



Şekil 6.20. Salınım açısı 45° iken POM yatak-çelik mil temasında sürtünme katsayısının ve temas yüzeyi sıcaklığının ortalama yüzey basıncı ile değişimi

Temas yüzeyi sıcaklığı asınca artaren sürtünme katsayısı düşme göstermektedir.

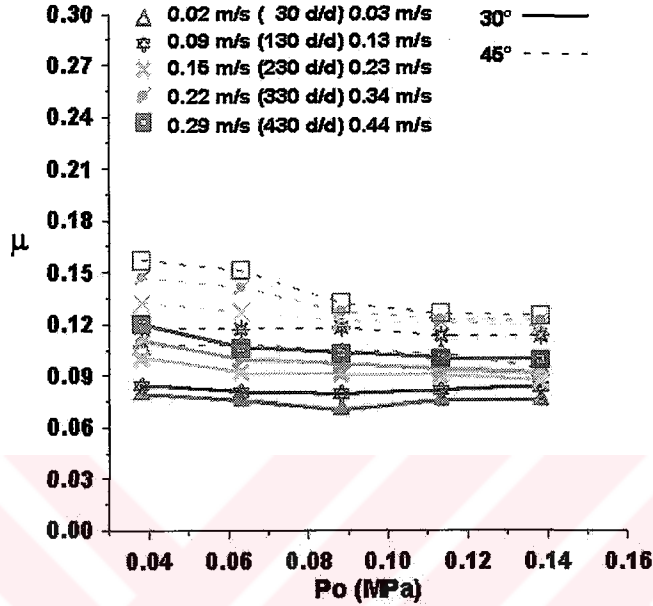
Şekil 6.21 de, $K=30^\circ$ ve $K=45^\circ$ lik salınım açılarında POM' un sürtünme katsayısının Salınım frekansı ile değişimi görülmektedir.



Şekil 6.21. $K=30^\circ$ ve $K=45^\circ$ lik salınım açılarında POM yatak-çelik mil temasında sürtünme katsayısının salınım frekansı ile değişimi

Sürtünme katsayısı, 30° lik salınım açısında 45° lik salınım açısından daha düşüktür.

Şekil 6.22 de, K=30° ve K=45° lik salınım açılarında POM' un sürtünme katsayısının ortalama yüzey basıncıyla değişimi görülmektedir.



Şekil 6.22. K=30° ve K=45° lik salınım açılarında POM yatak-çelik mil temasında sürtünme katsayısının ortalama yüzey basıncı ile değişimi

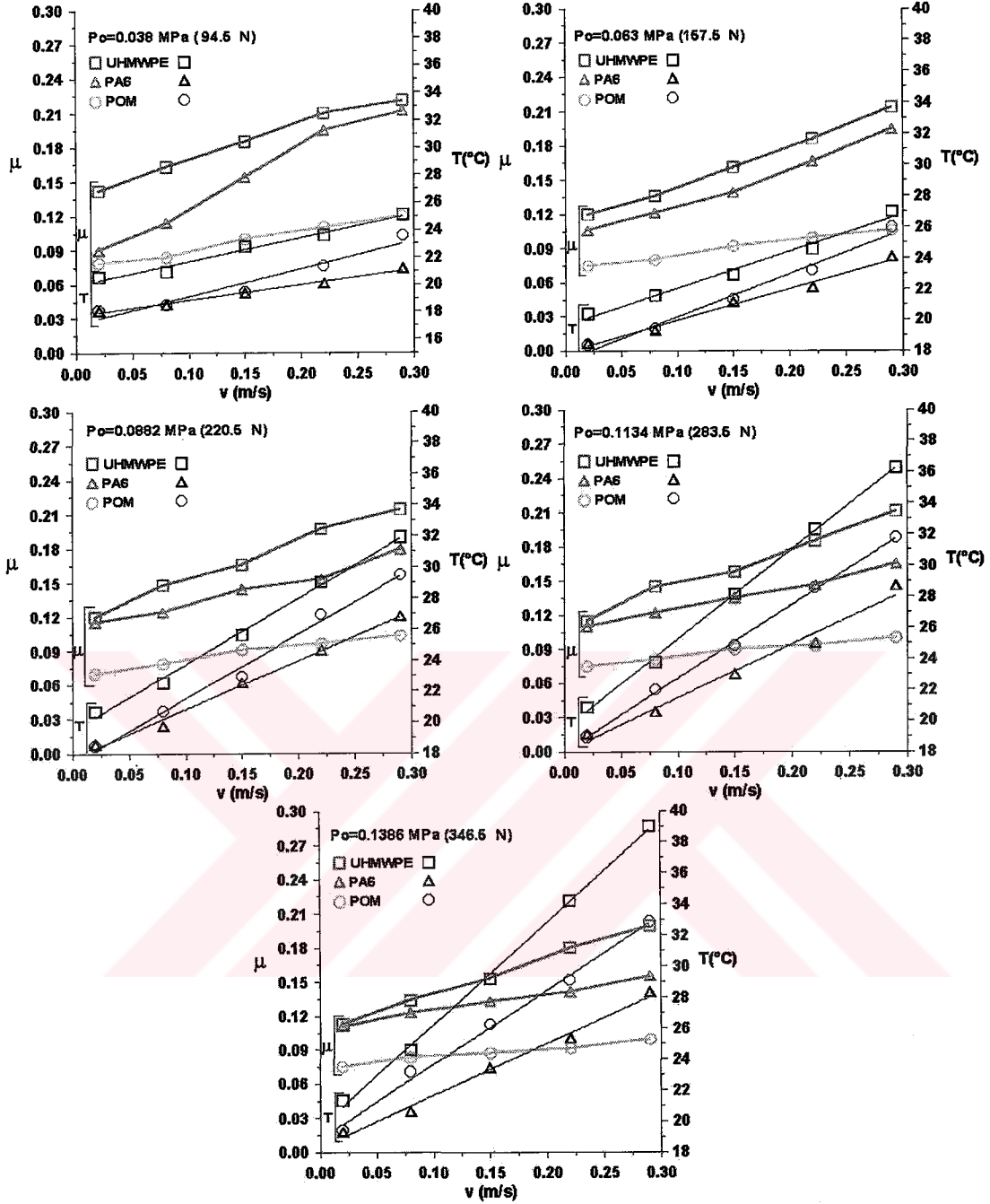
Sürtünme katsayısı, 30° lik salınım açısında 45° lik salınım açısından daha düşüktür.

6.3.4. UHMWPE-DÖKÜM PA 6-POM KARŞILAŞTIRMASI

Şekil 6.23 de, yatak malzemesi durumundaki UHMWPE, döküm PA6 ve POM' un çeşitli yük kademelerindeki sürtünme katsayılarının ve temas yüzeyi sıcaklıklarının kayma hızı ile değişimleri görülmektedir.

Bütün yük kademelerinde her üç malzemenin de hem sürtünme katsayılarının hem de yüzey sıcaklıklarının kayma hızı ile arttığı gözlenmektedir.

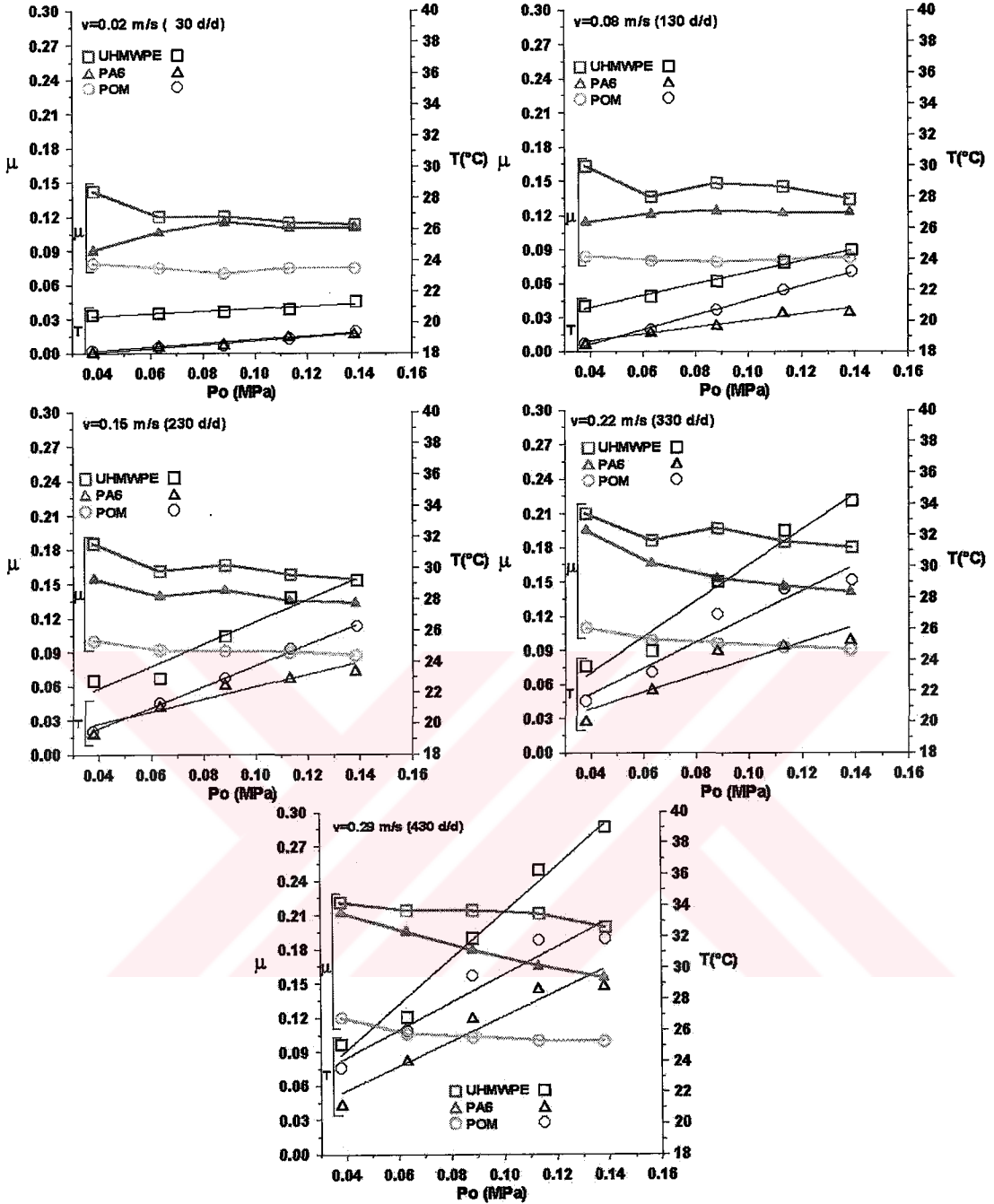
Her yük kademesinde POM' un sürtünme katsayısı değerlerinin diğer iki malzemeye göre daha düşük, UHMWPE' nin ise daha yüksek çıktığı, bunun yanısıra yüzey sıcaklığının UHMWPE' de en fazla, döküm PA6' de en az çıktığı söylenebilir.



Şekil 6.23. Salınım açısı 30° iken UHMWPE-PA 6-POM yatak-çelik mil temasında sürtünme katsayısının ve temas yüzeyi sıcaklığının kayma hızı ile değişimi

Şekil 6.24 de, yatak malzemesi durumundaki UHMWPE, döküm PA6 ve POM' un çeşitli hız kademelerindeki sürtünme katsayılarının ve temas yüzeyi sıcaklıklarının ortalama yüzey basıncı ile değişimleri görülmektedir.

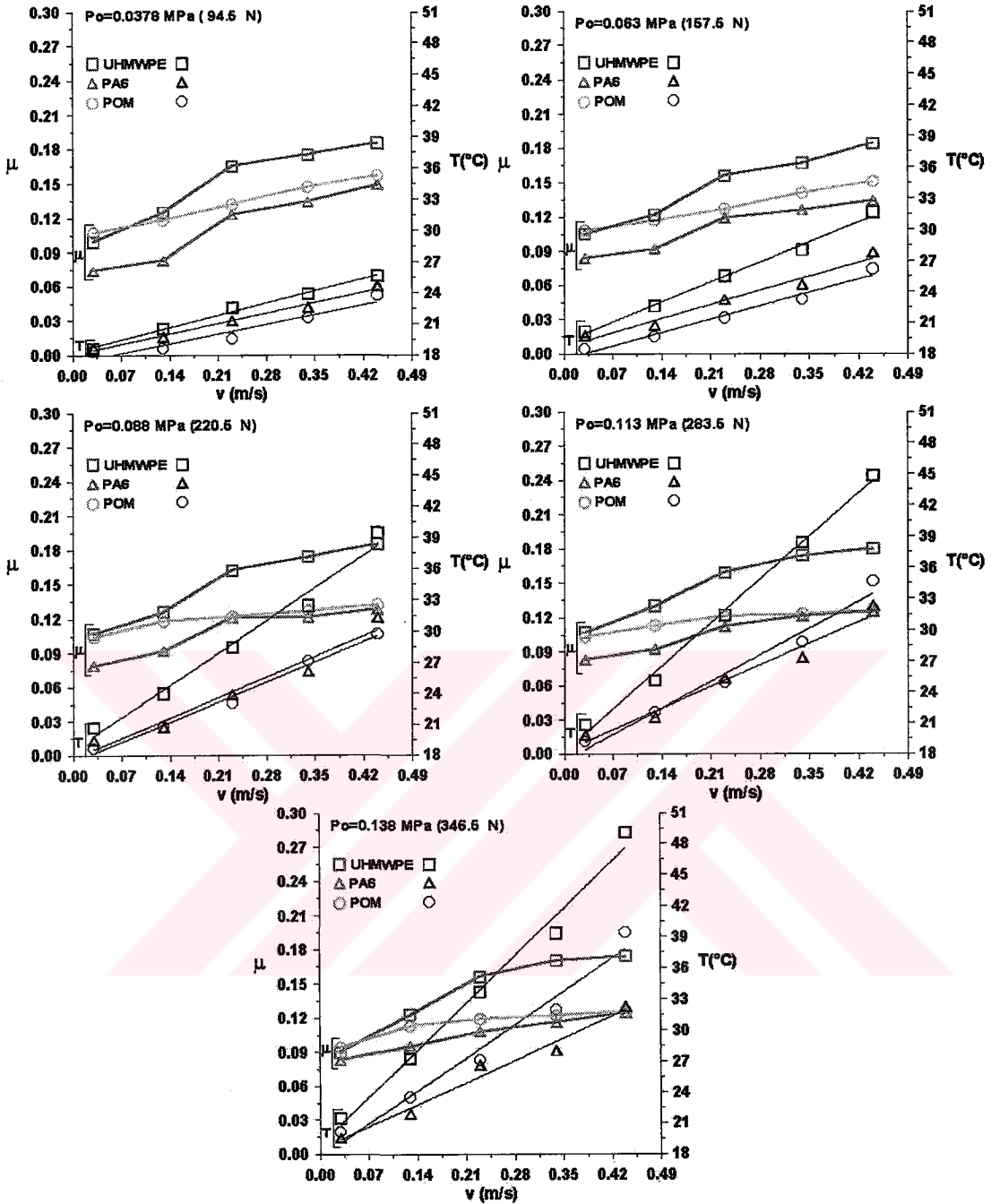
Her üç malzemenin de temas yüzeyi sıcaklıkları basınçla artarken sürtünme katsayıları genel bir düşme eğilimi göstermektedir.



Şekil 6.24. Salınım açısı 30° iken UHMWPE-PA 6-POM yatak-çelik mil temasında sürtünme katsayısının ve temas yüzeyi sıcaklığının ortalama yüzey basıncı ile değişimi

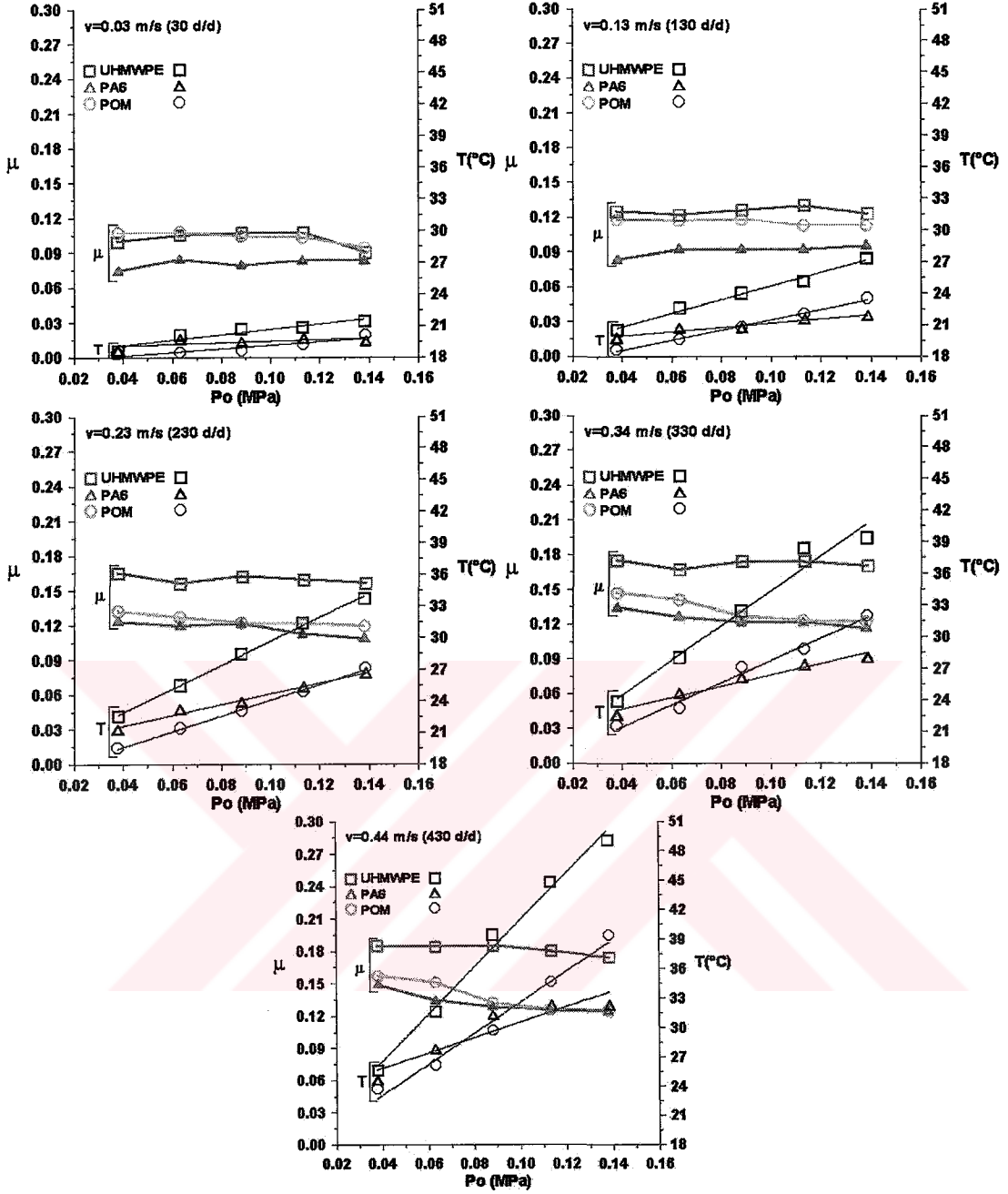
Her hız kademesinde POM' un sürtünme katsayısı değerleri diğer iki malzemeye göre daha düşük, UHMWPE' nin ise daha yüksek çıkmaktadır. Yüzey sıcaklıkları ise yine UHMWPE' de en yüksek çıkarken, döküm PA6' da en düşük çıkmaktadır.

Şekil 6.25 de, UHMWPE, döküm PA6 ve POM' un çeşitli yük kademelerindeki sürtünme katsayılarının ve temas yüzeyi sıcaklıklarının kayma hızı ile değişimleri görülmektedir.



Şekil 6.25. Salınım açısı 45° iken UHMWPE-PA 6-POM yatak-çelik mil temasında sürtünme katsayısının ve temas yüzeyi sıcaklığının kayma hızı ile değişimi

Bu salınım açısında da, bütün yük kademelerinde her üç malzemenin de hem sürtünme katsayılarının hem de yüzey sıcaklıklarının kayma hızı ile arttığı gözlenmektedir. Genel olarak döküm PA6' nın sürtünme katsayısının UHMWPE' ye ve POM' a göre daha küçük, UHMWPE' nin ise her iki malzemeye göre daha büyük çıktığı, bunun yanısıra yüzey sıcaklığının UHMWPE' de en fazla, düşük basınçlarda POM' da, daha yüksek basınçlarda döküm PA6' da daha düşük çıktığı görülmektedir.



Şekil 6.26. Salınım Açısı 45° iken UHMWPE-PA 6-POM yatak-çelik mil temasında sürtünme katsayısının ve temas yüzeyi sıcaklığının ortalama yüzey basıncı ile değişimi

Şekil 6.26 da, UHMWPE, döküm PA6 ve POM' un çeşitli hız kademelerindeki sürtünme katsayılarının ve temas yüzeyi sıcaklıklarının ortalama yüzey basıncı ile değişimleri görülmektedir. Temas yüzeyi sıcaklıkları artarken sürtünme katsayıları düşme eğilimi göstermektedir. Döküm PA6' nın sürtünme katsayısı UHMWPE' ye ve POM' a göre daha küçük, UHMWPE' nin ise her iki malzemeye göre daha büyük çıktığı gözlenmektedir.

Tablo 6.1' de, UHMWPE, PA 6 ve POM' dan yapılmış yatağın, iki salınım açısındaki sürtünme katsayılarının değerleri, sabit hareketli radyal kaymalı plastik yataklarla

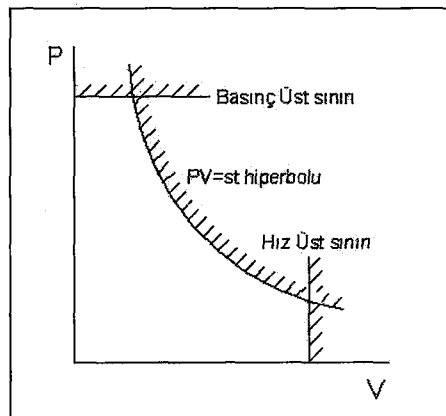
ilgili iki çalışmanın sürtünme katsayısı değerleri [14, 65] ve plastik numunelerin pim-disk deney tesisatından (düzlem temas durumu) elde edilen sürtünme katsayısı değerleri [34] en küçük ve en büyük değer olarak karşılaştırma amacıyla verilmiştir.

Tablo 6.2. UHMWPE, döküm PA 6 ve POM' un sürtünme katsayısı değerleri

	μ				
	$\alpha=30^\circ$	$\alpha=45^\circ$	[65]	[14]	[34]
UHMWPE	0,1-0,22	0,1-0,18	0,18-0,25	-	0,15-0,32
D. PA 6	0,09-0,21	0,07-0,15	0,14-0,26	0,04-0,18	0,2-0,52
POM	0,08-0,12	0,1-0,16	0,15-0,3	0,03-0,19	0,18-0,48

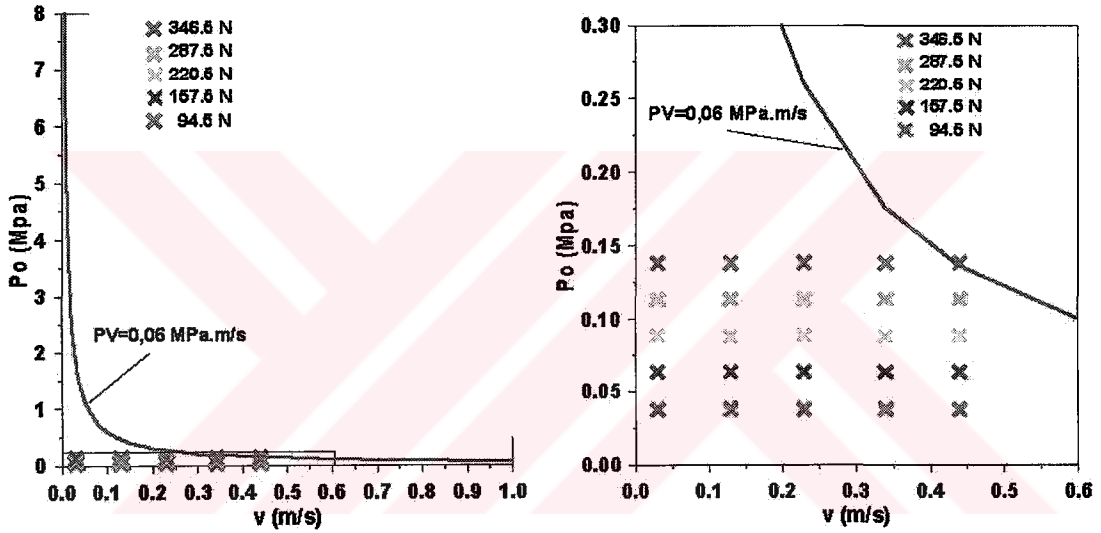
6.4. PV Değerleri

Kuru ve sınır sürtünme bölgesinde çalışan yatakların boyutlandırılmasında iki önemli konstrüksiyon parametresi olan ortalama basınç ve kayma hızı esas alınır. Yeterli deneysel veri varsa bazen bunlara yatak sıcaklığı da katılır. Yapılan deneysel gözlemler yataktaki (yatak malzemesindeki) aşınma hızının küçük ve orta büyüklükte basınçlar ve hızlar için bu iki büyüklüğün çarpımı ile elde edilecek değere bağlı olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, bu tür yatakların boyutlandırılmasında pv değerinin bir sınır değer altında tutulması gibi bir yol izlenir. Ek olarak basınç değerine malzeme mukavemeti ile ilgili olarak bir üst sınır getirilebilir. Kayma hızı için de sürtünme sonucu oluşan sıcaklıktan ve bunun sonuçlarından hareketle bir sınırlama getirilebilir. Özellikle plastik esaslı yatak malzemelerinde sıcaklık etkisiyle oluşacak yumuşama, hatta erime, dikkate alındığında kayma hızına getirilen sınırlama diğer malzemelere göre daha anlamlıdır. Bu hususlar dikkate alındığında basınç-hız düzleminde, Şekil 6.27 deki gibi sınırlanmış bir alan konstrüktif uygulamalar için kalmış olur.



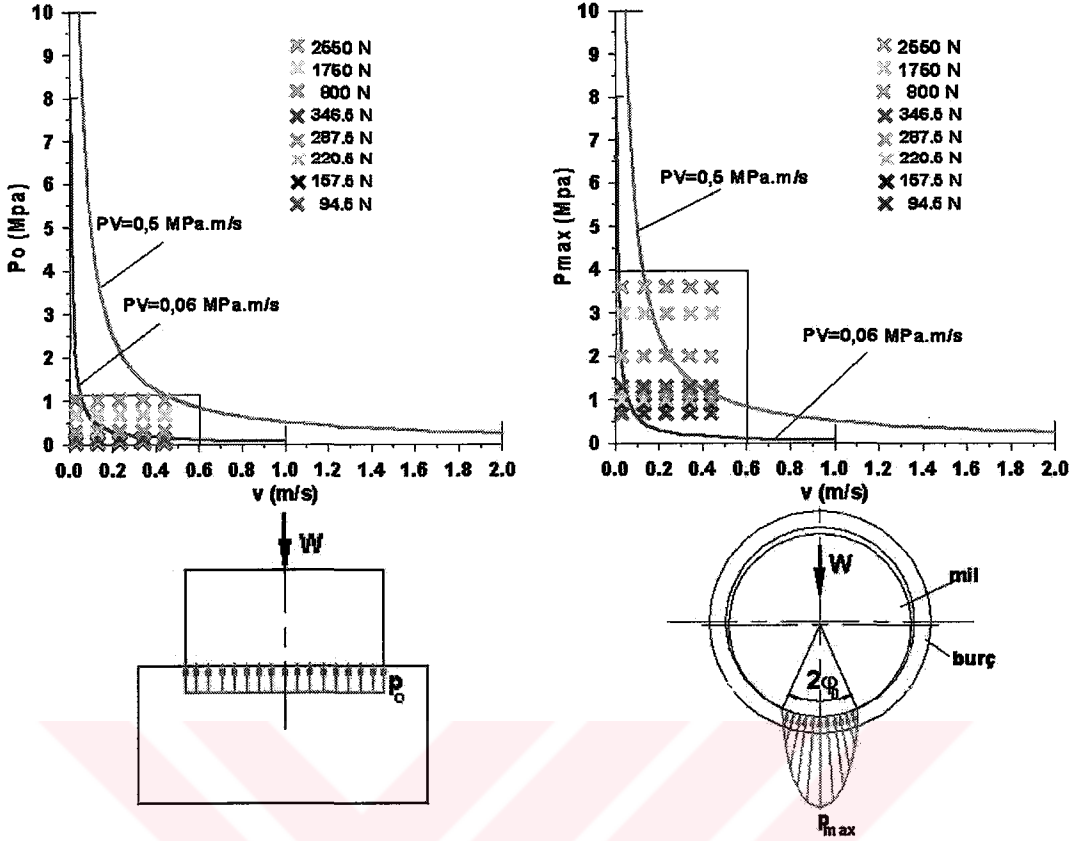
Şekil 6.27. Basınç ve hız üst sınırı ile sınırlandırılmış PV alanı

Bu tez çalışmasında düşük yüklerdeki deneylerde, malzemeler arasında hıza ve basınca bağlı olarak sürtünme katsayısı ve temas yüzeyi sıcaklıkları açısından kıyaslama yapmak amacıyla literatürdeki UHMWPE için öngörülen $p_v=0,06$ MPa.m/s değeri esas alınarak hız ve basınç değerleri saptanmıştır. Döküm PA6 ve POM için verilen sınır değer ise $p_v= 0,14$ Mpa.m/s dir [22]. Yapılan deneylerin sonucunda malzemelerden herhangi birinde bir bozulma olmamıştır. Ulaşılan maksimum sıcaklık 49 °C olup (UHMWPE) bu sıcaklık her üç malzeme için de camsı geçiş sıcaklığının altında kalmıştır. Şekil 6.27 de bu deneylere ait p_v değerlerinin literatürde verilen sınır değerlerin altında kaldığı görülmektedir.

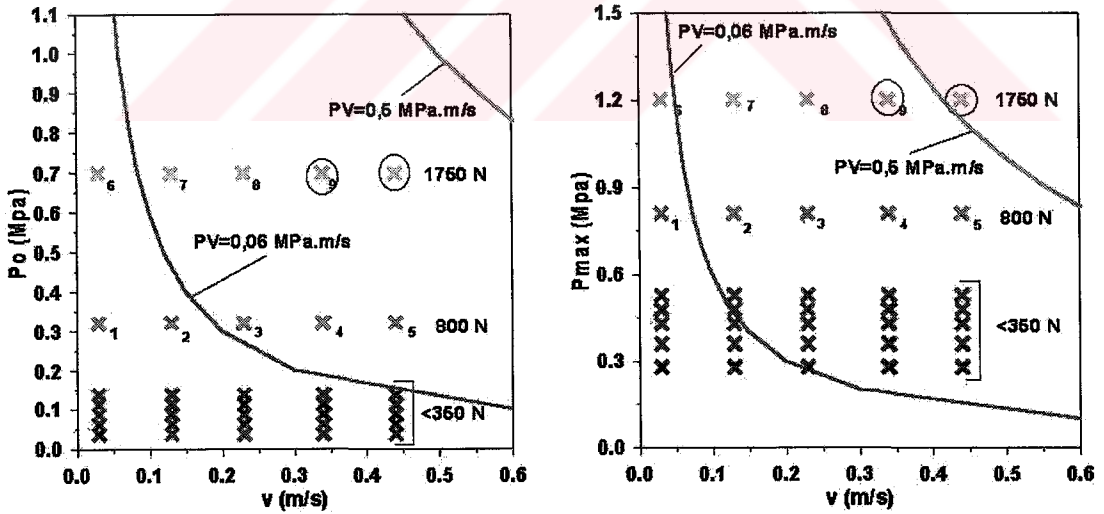


Şekil 6.28. Düşük yüklerle yapılan deneylere ait PV değerleri.

Bu deneylerden sonra numuneleri sağlayan firmanın tavsiye ettiği $p_v=0,5$ MPa.m/s lik sınırın altında kalmak üzere, yeni deneyler yapılmış, bu deneylerin sonunda, düzlemsel uygulamalar için ve aşınma göz önüne alınarak bulunan değerlerin, eğri yüzeylerin temasının söz konusu olduğu radyal yataklar için uygun olmadığı gözlenmiştir. Deneylerin sonucunda yatakların kullanım sıcaklıklarının dışına çıkıldığı ya da hasar gördüğü basınç ve hız değerleri esas alınarak yeni bir p_v limiti oluşturulmuştur. Şekil 6.29 da düzlem ve eğri yüzeylerin temasında ortaya çıkan ortalama ve maksimum basınçların literatürde tavsiye edilen p_v sınır değerlerine göre yerleri görülmektedir.



Şekil 6.29. Düzlem yüzeylerin ve eğri yüzeylerin temasında ortaya çıkan ortalama ve maksimum basınçların tavsiye edilen pv limitlerine göre yeri



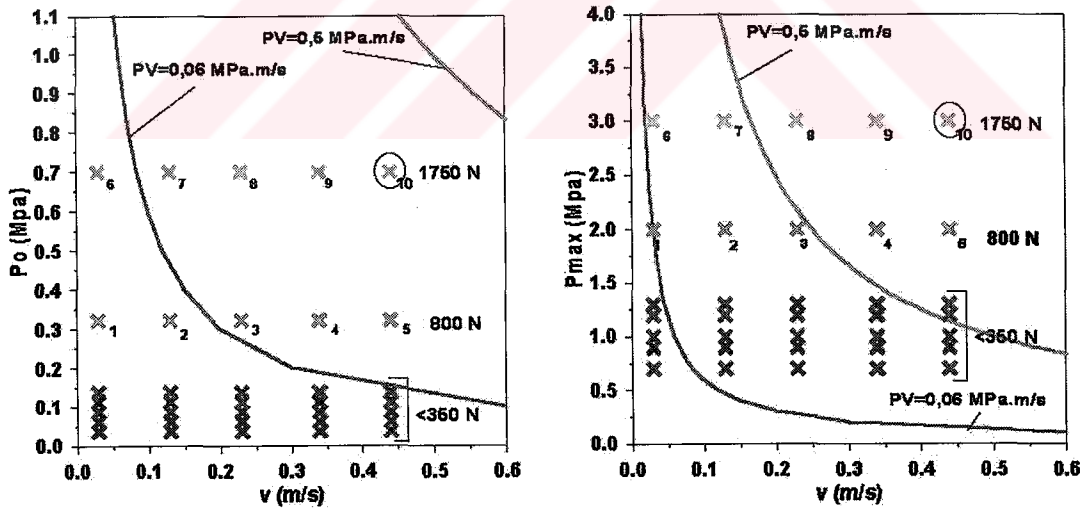
Şekil 6.30. UHMWPE' den yapılmış burç için $p_o v$ ve $p_{max} v$ değerleri

Şekil 6.30 da ve Tablo 6.3 de, UHMWPE' den yapılmış yatak malzemesinin, $p_o v$ ve $p_{max} v$ değerlerinin, literatürde tavsiye edilen $p_v=0,06 \text{ MPa.m/s}$ ve firmadan tavsiye edilen $p_v=0,5 \text{ MPa.m/s}$ limitlerine göre hangi alanda yer aldığı görülmektedir.

Tablo 6.3. UHMWPE için deney sayısı, uygulanan hız, ortalama basınç, maksimum basınç, $p_o v$ ve $p_{max} v$ değerleri

Deney No	v (m/s)	p ₀ (MPa)	p ₀ v değerleri (MPa. m/s)	p _{max} (MPa)	p _{max} v değerleri (MPa. m/s)
1	0,03	0,32	9,6.10 ⁻³	0,81	0,0243
2	0,13	0,32	0,0416	0,81	0,1053
3	0,23	0,32	0,076	0,81	0,1863
4	0,34	0,32	0,1088	0,81	0,2754
5	0,44	0,32	0,1408	0,81	0,3564
6	0,03	0,7	0,021	1,2	0,036
7	0,13	0,7	0,091	1,2	0,156
8	0,23	0,7	0,161	1,2	0,276
9	0,34	0,7	0,238	1,2	0,4

Şekil 6.31 de ve Tablo 6.4 de döküm PA6' dan yapılmış yatak malzemesinin p₀v ve p_{max}v değerlerinin, literatürde tavsiye edilen pv=0,06 MPa.m/s ve firmadan tavsiye edilen pv=0,5 MPa.m/s limitlerine göre hangi alanda yer aldığı görülmektedir.

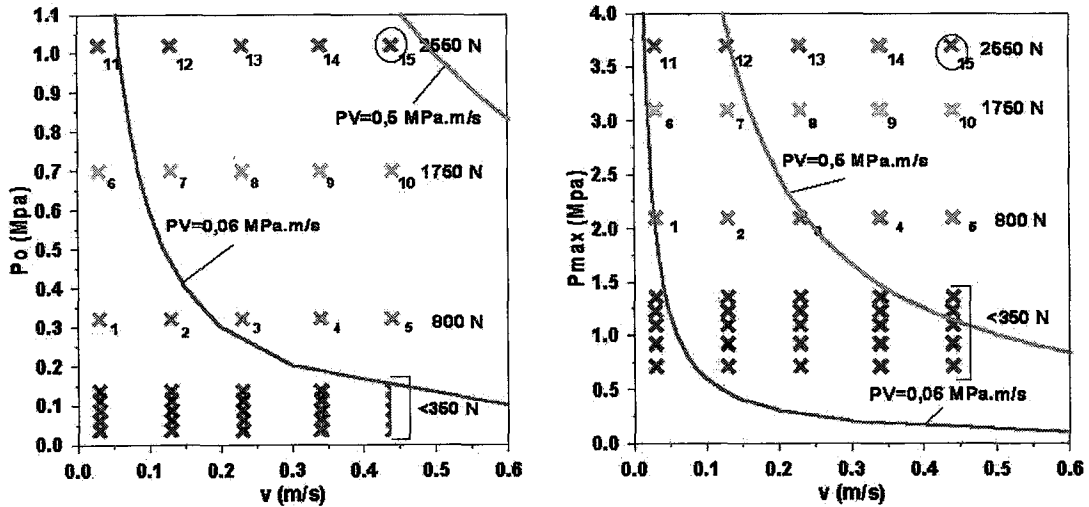


Şekil 6.31. Döküm PA6' dan yapılmış burç için p₀v ve p_{max}v değerleri

Tablo 6.4. Döküm PA6 için deney sayısı, uygulanan hız, ortalama basınç, maksimum basınç, p₀v ve p_{max}v değerleri

Deney No	v (m/s)	p _o (MPa)	P _o V Değerleri (MPa. m/s)	p _{max} (MPa)	P _{max} V Değerleri (MPa. m/s)
1	0,03	0,32	9,6.10 ⁻³	2	0,06
2	0,13	0,32	0,0416	2	0,26
3	0,23	0,32	0,076	2	0,46
4	0,34	0,32	0,1088	2	0,68
5	0,44	0,32	0,1408	2	0,88
6	0,03	0,7	0,021	3	0,09
7	0,13	0,7	0,091	3	0,39
8	0,23	0,7	0,161	3	0,69
9	0,34	0,7	0,238	3	1,02
10	0,44	0,7	0,308	3	1,32

Şekil 6.32 ve Tablo 6.5 de POM' dan yapılmış yatak malzemesinin p_ov ve p_{max}v değerlerinin, literatürde tavsiye edilen pv=0,06 MPa.m/s ve firmadan tavsiye edilen pv=0,5 MPa.m/s limitlerine göre hangi alanda yer aldığı görülmektedir.



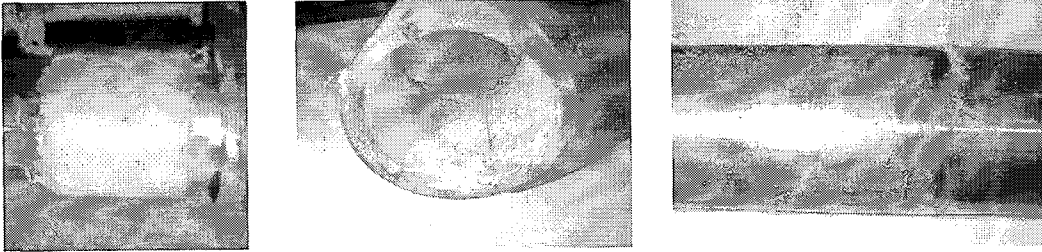
Şekil 6.32. POM' dan yapılmış burç için p_ov ve p_{max}v değerleri

Tablo 6.5. POM için deney sayısı, uygulanan hız, ortalama basınç, maksimum basınç, p_ov ve p_{max}v değerleri

Deney No	v (m/s)	p ₀ (MPa)	P ₀ V Değerleri (MPa. m/s)	P _{max} (MPa)	P _{max} V Değerleri (MPa. m/s)
1	0,03	0,32	9,6.10 ⁻³	2,1	0,063
2	0,13	0,32	0,0416	2,1	0,273
3	0,23	0,32	0,076	2,1	0,483
4	0,34	0,32	0,1088	2,1	0,714
5	0,44	0,32	0,1408	2,1	0,924
6	0,03	0,7	0,021	3,1	0,093
7	0,13	0,7	0,091	3,1	0,403
8	0,23	0,7	0,161	3,1	0,713
9	0,34	0,7	0,238	3,1	1,054
10	0,44	0,7	0,308	3,1	1,364
11	0,03	1,02	0,0306	3,7	0,111
12	0,13	1,02	0,1326	3,7	0,481
13	0,23	1,02	0,2346	3,7	0,851
14	0,34	1,02	0,357	3,7	1,258
15	0,44	1,02	0,4488	3,7	1,364

UHMWPE:

9. deneyde UHMWPE' den yapılan burç 90 dakikanın sonunda kullanım sıcaklığını aşarak 128°C ye ulaşmıştır. Deney sonunda genişmeden dolayı yatağın mile sardığı gözlenmiştir. Burç milden kesilerek çıkarılabilmektedir. Plastik malzemenin pul pul kalktığı ve mil yüzeyine yapıştığı görülmüştür (Şekil 6.33).

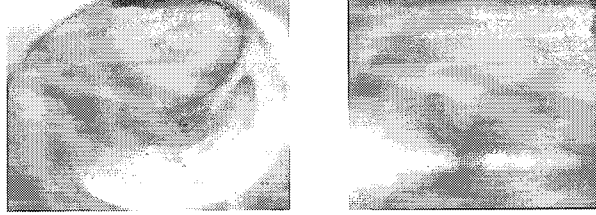


Şekil 6.33. 9. deney sonunda UHMWPE' den yapılan burcun ve milin durumu

8. deneydeki basınç ve hız değerleri gözönüne alınarak bulunan yeni sınır değer $p_v=0,161$ MPa.m/s olarak hesaplanmıştır.

D.PA6:

10. deneyde, döküm PA6' dan yapılan burçun yüzey sıcaklığı, 160 dakikanın sonunda kullanım sıcaklığını aşarak 129 °C ye çıkmıştır. Deney bittiğinde malzemenin lokal olarak yandığı ve mil yüzeyine yapıştığı gözlenmiştir (Şekil 6.34).

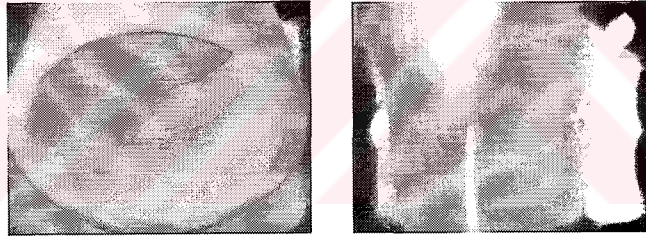


Şekil 6.34. 10. deney sonucunda döküm.PA6' dan yapılan burcun ve milin durumu

10. deneydeki basınç ve hız değerleri gözönüne alınarak bulunan yeni sınır değer $p_v=0,238 \text{ MPa.m/s}$ olmuştur

POM:

Şekil 6.35 de 15. deneyin sonucunda POM' dan yapılan burcun durumu görülmektedir.

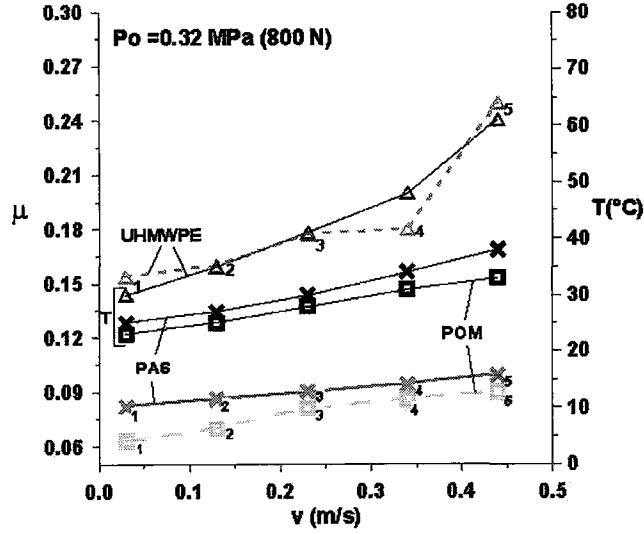


Şekil 6.35. 15. deney sonucunda POM' dan yapılan burcun ve milin durumu

15. deneyde POM' dan yapılan burç 270 dakika sonunda kullanım sıcaklığını aşarak 114 °C ye çıkmıştır. Deney sonunda malzemenin lokal olarak yandığı ve mil yüzeyine yapıştığı görülmüştür. Bu durumda POM için yeni sınır değer $p_v=0,357 \text{ MPa.m/s}$ olmuştur

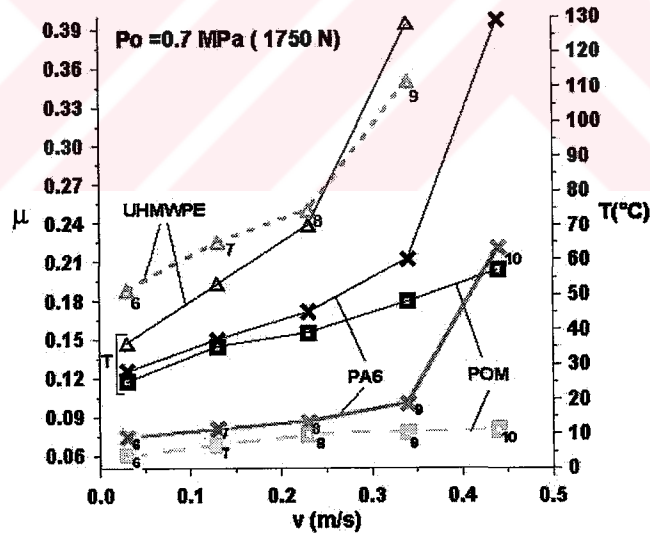
Sürtünme Katsayısı ve Temas Yüzeyi Sıcaklıklarının Kayma Hızı ile Değişimi

PV=0,5 MPa.m/s limitine göre yapılan sürtünme deneylerinde elde edilen sürtünme katsayısı ve temas yüzeyi sıcaklıklarının kayma hızı ile değişimleri her üç malzeme için toplu olarak grafikler halinde aşağıda verilmiştir. Şekil 6.36 da 0,32 MPa ortalama yüzey basıncını oluşturan 800 N luk yükleme sonucunda üç malzemenin sürtünme katsayısındaki ve yüzey sıcaklığındaki değişimler görülmektedir.



Şekil 6.36. UHMWPE-döküm PA6-POM' un $p_0=0,32$ MPa basınçta sürtünme katsayısı ve temas yüzeyi sıcaklıklarının kayma hızı ile değişimi

Diğer deneylerde olduğu gibi burada da en yüksek sürtünme katsayısı ve yüzey sıcaklığı değerlerine sahip olan malzeme UHMWPE' dir. POM' un değerleri döküm PA6' dan daha düşüktür. Hız arttıkça sürtünme katsayısının ve sıcaklığın arttığı gözlenmektedir.

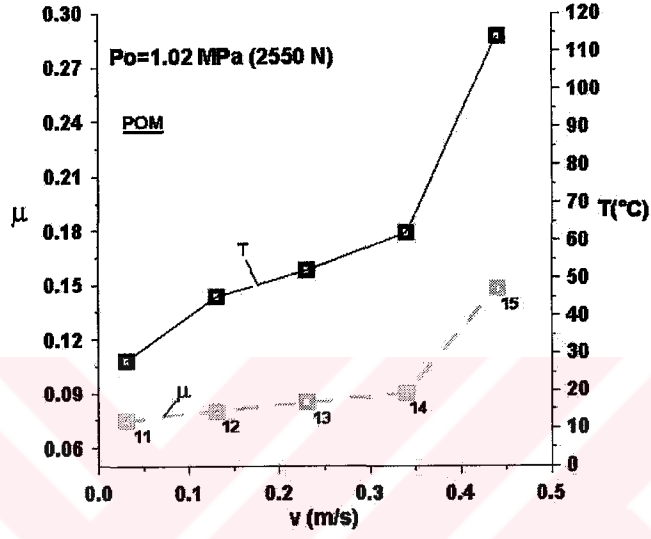


Şekil 6.37. UHMWPE-döküm PA6-POM' un $p_0=0,7$ MPa basınçta sürtünme katsayısı ve temas yüzeyi sıcaklıklarının kayma hızı ile değişimi

Şekil 6.37 de 0,7 MPa ortalama basınca karşılık gelen 1750 N luk yükleme sonucundaki değişimler görülmektedir. UHMWPE' nin 0,34 m/s hızın uygulandığı 9. deneyde hem sıcaklığının hem de sürtünme katsayısının ani bir artışa maruz kaldığı gözlenmektedir. Yine aynı şekilde döküm PA6' nın da 0,44 m/s hızın uygulandığı 10. deneyde sıcaklığının ve sürtünme katsayısının ani artışı görülmektedir. POM' un

sürtünme katsayısı ve yüzey sıcaklığı ise bu yük kademesinde hızla fazla bir artış göstermemiştir.

Şekil 6.38 de POM' un 1,02 MPa ortalama yüzey basıncına denk gelen 2550 N luk yükleme sonucundaki sürtünme katsayısı ve yüzey sıcaklığı değişimleri görülmektedir. 0,44 m/s hızın uygulandığı 15. deney sonucunda POM' un sürtünme katsayısında ve yüzey sıcaklığında ani artışlar gözlenmektedir.



Şekil 6.38. POM' un $p_o=1,02$ MPa basınçta sürtünme katsayısı ve temas yüzeyi sıcaklığının kayma hızı ile değişimi

7. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde salınım hareketli radyal kaymalı yataklarda UHMWPE, döküm PA 6 ve POM' dan yapılmış üç plastik burcun çelik mille temasına ait deney sonuçlarının kısa bir özeti ve nedenlerine ait yorumları yer almaktadır.

Yapılan sürtünme deneyleri sonunda aşağıdaki veriler elde edilmiştir:

1. İzafi yatak boşluğu küçük olan yatağın maksimum basıncı daha küçük, sürtünme katsayısı ise daha büyük çıkmaktadır.

Yatak konstrüksiyonunda, yatak boşluğu azaldıkça temas açısı ve temas alanı artmakta, yatağın temas alanında maruz kaldığı basınç ise düşmektedir. Temas alanındaki büyüme sürtünme kuvvetini arttıracığından [5] sürtünme katsayısı da artmaktadır.

2. UHMWPE' nin maksimum basıncı diğerlerinden daha düşük olup, POM ve döküm PA6' nın maksimum basınç değerleri birbirine yakın çıkmaktadır.

Yatak konstrüksiyonunda, malzeme çalışma esnasında ortalama basınçtan daha yüksek değerlerdeki basınçlara maruz kalmaktadır. Ortalama yüzey basıncı sadece temas eden yüzeylerin geometrisine bağlıyken maksimum basınç yatak malzemelerinin mekanik özelliklerine, yatak boşluğuna, yatağın genişliğine ve mil çapına bağlıdır [9]. UHMWPE' nin hem dayanımı hem de yatak boşluğu diğerlerinden küçük olduğundan temas alanı büyük olmakta dolayısıyla basınç küçülmektedir. POM' un dayanımı PA6' ya göre daha büyük olmasına rağmen PA6' dan yapılan burcun yatak boşluğu daha fazla olduğundan temas alanları ve basınçları birbirine yakın çıkmaktadır.

3. $p_v=0,06$ MPa.m/s limitine göre yapılan sürtünme deneylerinde; her iki salınım açısında da, üç malzemenin sürtünme katsayısı ve temas yüzeyi sıcaklığı kayma hızı ile artmaktadır.

Sürtünme katsayısının sabit yüklerde kayma hızı ile artışı, sıcaklık artışı ile ilişkilendirilebilir. Yapılan araştırmalara göre, sıcaklığın artması ısı genleşme katsayısı yüksek olan malzemelerde genleşmeye neden olmakta ve yatak boşluğunu daraltmaktadır [77, 78]. Bu da temas alanında artışa neden olmakta ve sürtünme katsayısını arttırmaktadır [10, 39, 48, 49].

4. Üç malzemenin de, sürtünme katsayısı ve temas yüzeyi sıcaklığının ortalama yüzey basıncı ile değişimi her iki salınım açısı için benzerlik göstermektedir. Sürtünme katsayısı her üç malzemede ortalama basınç ile hafifçe düşmektedir.

Yatak geometrisinde yük arttıkça hem görünür alan, buna bağlı olarak gerçek temas alanı, hem de yatak basıncı artmaktadır [9]. Bir görüşe göre gerçek temas alanı görünür alana yaklaştığında sürtünme kuvveti sabit kalırken basınç artmaya devam ettiğinden sürtünme katsayısında düşmeler görülmektedir [5, 47]. Bir diğer görüş ise, gerçek temas alanı görünür alanın küçük bir parçası olduğundan (polimerlerde $A_{ger}/A_{gör}=\%5$) basınçlardaki artış temas alanının artışından daha fazla olacak ve sürtünme katsayısı düşecektir [5, 63].

5. 30° lik salınım açısında POM' un sürtünme katsayısı diğer malzemelerden düşük, UHMWPE' nin ise en yüksek çıkmaktadır. Sıcaklık değerleri en yüksekten en düşüğe sırasıyla UHMWPE, POM ve döküm PA6 olmaktadır.

Elastiklik modülü UHMWPE ve döküm PA6' dan daha büyük olan POM' un temas alanı diğerlerinden daha az, gerçek yüzey basıncı ise daha yüksek olacağından sürtünme katsayısı da daha düşük çıkmaktadır. Aynı yaklaşımla, en düşük elastiklik modülüne sahip olan UHMWPE sürtünme katsayısı en yüksek malzeme olmaktadır.

6. 45° lik salınım açısında ise, yine her hız ve yük kademesinde UHMWPE en yüksek sürtünme katsayısına sahip olup, döküm PA6, POM' dan daha düşük değerlerde çıkmaktadır. Sıcaklık değerleri 30° deki sırayla seyretmekte ancak daha yüksek seviyelere ulaşmaktadır. 45° lik salınım açısında, hem UHMWPE' nin hem de PA 6' nın sürtünme katsayısı, 30° dekinden düşük çıkmakta, POM' da ise yüksek çıkmaktadır.

7. $p_v=0,5$ MPa.m/s limitine göre yapılan sürtünme deneylerinde, UHMWPE' den yapılan burç, 9. deneyde 90 dakikanın sonunda kullanım sıcaklığını aşarak 128°C ye ulaşmıştır. Deney sonunda genleşmeden dolayı yatağın mile sardığı gözlenmiştir. Burç milden kesilerek çıkarılabilmektedir. Plastik malzemenin pul pul kalktığı ve mil yüzeyine yapıştığı görülmüştür. 8. deneydeki basınç ve hız değerleri gözönüne alınarak bulunan yeni sınır değer $p_v=0,161$ MPa.m/s olmuştur. Döküm PA6' dan yapılan burç, 10. deneyde 160 dakikanın sonunda kullanım sıcaklığını aşarak 129 °C ye çıkmıştır. Deney bittiğinde malzemenin lokal olarak yandığı ve mil yüzeyine

yapıştığı gözlenmiştir. Bu durumda bu malzeme için $p_v=0,238$ MPa.m/s olmuştur. POM' dan yapılan burç ise 15. deneyde 270 dakika sonunda kullanım sıcaklığını aşarak $114\text{ }^{\circ}\text{C}$ ye çıkmıştır. Deney sonunda malzemenin lokal olarak yandığı ve mil yüzeyine yapıştığı görülmüştür. Bu durumda bu malzeme için $p_v=0,3468$ MPa.m/s olmuştur. Yüksek yüklerde yapılan deneylerin sonucunda UHMWPE' nin sürtünme katsayısı ve temas yüzeyi sıcaklığı en yüksek, p_v limiti en düşük, POM' un ise sürtünme katsayısı ve temas yüzeyi sıcaklığı en düşük, p_v limiti ise en yüksek çıkmıştır.

Literatürde tavsiye edilen p_v sınır değerleri düzlem yüzeylerin teması sonucu ortaya çıkan ortalama basınçlar esas alınarak belirlenmektedir. Oysaki yatak konstrüksiyonunda yatak malzemesi çalışma esnasında ortalama basınçtan daha büyük yüzey basınçlarına maruz kalmaktadır. Bunun yanısıra özellikle plastikler gibi ısı iletimi çok kötü olan malzemelerin sürtünme ısısı nedeniyle yüksek yüzey sıcaklıkları ile karşı karşıya kalması malzemenin beklenenden daha çabuk kullanım dışı kalmasına yol açmaktadır.

Sonuç olarak salınım hareketli radyal kaymalı yataklarda, p_v değerlerinin altında kalmak üzere uygulanan basınç ve salınım frekanslarında; bu üç malzeme içinde salınım açısı 30° iken POM' un, salınım açısı 45° iken döküm PA6' nın, literatürdeki p_v limitlerini aşan yüzey basınçların da ($p_0 \approx 1$ Mpa) ise POM' un uygun yatak malzemesi olduğu izlenimi edinilmiştir.

Salınım hareketli radyal kaymalı plastik yatakların aşınma özelliklerinin incelenerek, sürtünmeyi ne şekilde etkilediğinin araştırılması, yatak malzemesinde ortaya çıkan yüzey gerilmelerinin, ilgili bilgisayar programları ile modellenip teorik yatak hesaplarına uygunluğunun araştırılması bu çalışmanın devamı olarak düşünülebilir.

KAYNAKLAR

- [1]. **Seireg, A.A.**, 1998. Friction and Lubrication in Mechanical Design, Marcel Dekker, Inc., New York, Basel, Hong Kong.
- [2]. **Williams, J.A.**, 2000. Engineering Tribology, Oxford University Press, Oxford.
- [3]. **Akkurt, S.**, 1991. Plastik Malzeme Bilgisi, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [4]. **Polikim Polimer Kimya ve Sanayi A.Ş.**, 1997, Firma Kataloğu, İstanbul.
- [5]. **Bowden, E.P. and Tabor, D.**, 1954. The Friction and Lubrication of Solids, Oxford University Press, London.
- [6]. **Nielsen, L.E.**, 1962. Mechanical Properties of Polymers, Reinhold Publishing Corporation, New York.
- [7]. **Fred, W. and Billmeyer, J.R.**, 1970. Textbook of Polymer Science, John Wiley & Sons, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore.
- [8]. **Moore, D.F.**, 1975. Principles and Applications of Tribology, Pergamon Press, Oxford.
- [9]. **Kragelsky, IV.**, 1981. Friction, Wear, Lubrication, Tribology Handbook, Mir Publishers, Moscow.
- [10]. **Bartenev, G.M. and Lavrentev, V.V.**, 1981. Friction and Wear of Polymers, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, Oxford, New York.
- [11]. **Crawford, R.J.**, 1985. Plastics and Rubbers: Engineering Design and Applications, Mech. Eng. Pub. Ltd., London.
- [12]. **Chanda, M. and Roy, S.K.**, 1987. Plastics Technology Handbook, New York and Basel.
- [13]. **Fish, F.A.**, 1988, Design Approach for Engineering Plastics, Engineered Materials Handbook, Volume 2, ASM International, USA.
- [14]. **Yamaguchi, Y.**, 1990. Tribology of Plastic Materials, Elsevier, Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo.
- [15]. **Hutchings, I.M.**, 1992. Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials, Edward Arnold, A division of Hodder & Stoughton, London, Melbourne, Auckland.
- [16]. **Tong, H.M., Kowalczyk, S.P., Saraf, R. and Chou, J.**, 1992. Characterization of Polymers, Butterworth Heinemann, Boston, London, Oxford, Singapore, Sydney, Toronto, Wellington.

- [17]. **Mills, N.J.**, 1993. *Plastics Microstructure Engineering Applications*, Edward Arnold, A member of the Hodder Headline Group, London, Melbourne, Auckland.
- [18]. **Progelhof, R.C. and Throne, J.L.**, 1993. *Polymer Engineering Principles*, Hanser Publishers, Munich, Vienna, New York, Barcelona.
- [19]. **Domininghaus, H.**, 1993. *Plastics for Engineers, Materials, Properties, Applications*, Hanser Publishers,
- [20]. **Nielsen, L.E. and Landel R.F.**, 1994. *Mechanical Properties of Polymers and Composites*, Marcel Dekker, Inc. New York, Basel.
- [21]. **Askeland, D.R.**, 1994. *The Science and Engineering of Materials*, PWS Pub. Company, Boston.
- [22]. **Plastics Design Library**, 1995. *Fatigue and Tribological Properties of Plastics and Elastomers*, Newyork.
- [23]. **Mark, J. E.**, 1996. *Physical Properties of Polymers Handbook*, Woodbury, New York.
- [24]. **Shah, V.**, 1998. *Handbook of Plastics Testing Technology*, A Wiley Interscience Publication, New York, Chichester, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto.
- [25]. **Garbasi, F., Morra, M. and Occhiello, E.**, 1998. *Polymer Surfaces, From Physics to Technology*, John Wiley & Sons, Chichester, New York, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto.
- [26]. **Ludema, K.C. and Tabor, D.**, 1966. The Friction and Visco-Elastic Properties of Polymeric Solids, *Wear*, 9, 329-348.
- [27]. **Bartanev, G.M. and Elkin, I.**, 1968. The Friction of Polymers at The Inial Stage of Sliding in Various Temperature Ranges, *Wear*, 11, 393-403.
- [28]. **Pooley, C.S. and Tabor, D.**, 1972. Friction and Molecular Structure:the behaviour of some thermoplastics, *Proc.R.Soc.Lond.*, A.329, 251-274.
- [29]. **Tanaka, K. and Miyata, T.**, 1977. Studies on The Friction and Transfer of Semicrystalline Polymers, *Wear*, 41, 383-398.
- [30]. **Czichos, H.**, 1983.,Influence of Adhesive and Abrasive Mechanisms on The Tribological Behaviour of Thermoplastic Polymers, *Wear*, 88, 27-43.
- [31]. **Holmgerg, K. and Wickström, G.**, 1987. Friction and Wear Tests of Polymers, *Wear*, 115, 95-105.
- [32]. **Vaziri, M., Stott, F.H. and Spurr, R.T.**, 1988. Studies of The Friction of Polymeric Materials, *Wear*, 122, 313-327.
- [33]. **Mens, J.W.M. and de Gee, A.W.J.**, 1991. Friction and Wear Behaviour of 18 Polymers in Contact with Steel in Environments of Air and Water, *Wear*, 149, 262-276.

- [34]. **Uzuner, F., Temiz, V. and Gediktaş, M.**, 1994. Çeşitli Katkılı ve Katkısız Polimerlerin Polimer/Çelik Temas Durumunda Sürtünme ve Aşınma Özelliklerinin Deneysel Tayini, 6. Uluslararası Makina Tasarım ve İmalat Kongresi, ODTÜ, Ankara, 21-23 Eylül, 285-294.
- [35]. **Hooke, C.J., Kukureka, S.N., Liao, P., Rao, M. and Chen, Y.K.**, 1996. The Friction and Wear of Polymers in Non-Conformal Contacts, *Wear*, 200, 83-94.
- [36]. **Gao, J., Mao, S., Liu, J. and Feng, D.**, 1997. Tribochemical Effects of Some Polymers/Stainless Steel, *Wear*, 212, 238-243.
- [37]. **Rehbein, P. and Wallaschek, J.**, 1998. Friction and Wear Behaviour of Polymer/Steel and Alumina/ Alumina Under High-Frequency Fretting Conditions, *Wear*, 216, 97-105.
- [38]. **West, G.H. and Senior, J.M.**, 1972. Frictional Properties of Polyethylene, *Wear*, 19, 37-52.
- [39]. **Tanaka, K.**, 1984. Kinetic Friction and Dynamic Elastic Contact Behaviour of Polymers, *Wear*, 100, 243-262.
- [40]. **Barrett, T.S., Stachowiak, G.W. and 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.
- [41]. **Spalding, M.A. and Hyun, K.S.**, 1995. Coefficients of Dynamic Friction as A Function of Temperature, Pressure and Velocity For Several Polyethylene Resins, *Polymer Engineering and Science*, 35, 557-562.
- [42]. **Suh, N.P., Mosleh, M. and Arinez, J.**, 1998. Tribology of Polyethylene Homocomposites, *Wear*, 214, 231-236.
- [43]. **Dong, H., Shi, W. and Bell, T.**, 1999. Potential of Improving Tribological Performance of UHMWPE by Engineering The Ti6Al4V Counterfaces, *Wear*, 225-229, 146-153.
- [44]. **Da Silva, C.H., Tanaka, D.K. and Sinatora, A.**, 1999. The Effects of Load and Relative Humidity on Friction Coefficient Between High Density Polyethylene on Galvanized Steel-Preliminary Results, *Wear*, 225-229, 339-342.
- [45]. **Song, J., Lin, P., Cremens, M. and Bonutti, P.**, 1999. Effects of Machining on Tribological Behaviour of Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) Under Dry Reciprocating Sliding, *Wear*, 225-229, 716-723.
- [46]. **Klapperich, C., Komvopoulos, K. and Pruitt, I.**, 1999. Tribological Properties and Microstructure Evolution of ultra high molecular weight polyethylene, *Transaction of The ASME*, 121, 394-402.
- [47]. **Watanabe, M., Karasawa, M. and Matsubara, K.**, 1968. The Frictional Properties of Nylon, *Wear*, 12, 185-191.

- [48]. **Clerico, M.**, 1969. A Study of Friction and Wear of Nylon Against Metal, *Wear*, 13, 183-197.
- [49]. **Watanebe, M. and Yamaguchi, H.**, 1986. The Friction and Wear Properties of Nylon, *Wear*, 110, 379-388.
- [50]. **Akkurt, S.**, 1994. The Friction and Wear Behavior of Nylon 6, *Tr. J. of Engineering and Enviromental Sciences*, 18, 375 - 381.
- [51]. **Van de Welde, F. and de Baets, P.**, 1997. The Friction and Wear Behaviour of Polyamide 6 Sliding Against Steel at Low Velocity Under Very High Contact Pressure, *Wear*, 209, 106-114.
- [52]. **Temiz, V. and Parlar, Z.**, 1999. An Experimental Study on The Tribological Properties of Internally Lubricated and Unlubricated Cast Polyamide 6, *International Conference on Lubrication Techniques*, BU, Istanbul, 27-28 October, 127-133.
- [53]. **Orndorff, Jr.R.J.**, 2000. New UHMWPE/ Rubber Bearing Alloy, *Journal of Tribology*, 122, 367-373.
- [54]. **Detter, H.**, 1973. A Study of The Operating Behavior of Precision Pivot Bearings, *Wear*, 26, 121-132.
- [55]. **Fornallaz, P., Gehrig, J. and Regnault G.**, 1977. Test Rig For The Automatic Analysis of Friction and Wear in Journal Bearings Under Unlubricated Friction Conditions, *Wear*, 41, 63-69.
- [56]. **Rymuza Z.**, 1985. The Role of Interfacial Energy in The Wear of Polymeric Journal Bearings, *Wear*, 104, 66-75.
- [57]. **Rymuza, Z. and Kowalski, P.**, 1987. The Contact Pressure Distribution in The Friction Region of Miniature Journal Bearings, *Wear*, 116, 89-106.
- [58]. **Rymuza Z.**, 1990. Designing Miniature Plastic Bearings, *Journal of Tribology*, 112, 135-140.
- [59]. **Rymuza Z.**, 1991. Adhesion and Wear in Miniature Plastic Journal Bearings, *Wear*, 174, 185-193.
- [60]. **Rymuza Z., Kuszczewicz, Z. and Mánturzyk, G.**, 1994. Testing Miniature, in particular polymer-polymer, *Journal Bearings, Wear*, 174, 39-46.
- [61]. **Rymuza Z., Kuszczewicz, Z., Solarski, T., Kwacz, M., Chizhik, S.A. and Goldade, A.V.**, 2000. Static Friction and Adhesion in Polymer-Polymer Microbearings, *Wear*, 238, 56-69.
- [62]. **Ledocq, J.H.M.**, 1973. A Test Rig For Journal Bearings-Results With Polymer Bushings, *Wear*, 26, 133-142.
- [63]. **Zhang, Z.Z., Shen, W.C., Lin, W.M., Xue, Q.J. and Li, T.S.**, 1996. Tribological Properties of Polytetrafluoropolyethylene Based Composite in Different Lubricant Media, *Wear*, 196, 164-170.

- [64]. **Srivastava, V.K. and Pathak, J.P.**, 1996. Friction and Wear Properties of Bushing Bearing of Graphite Filled Short Glass Fibre Composites in Dry Sliding, *Wear*, 197, 145-150.
- [65]. **Tevruz, T.**, 1997. Kuru Sürtünme ile Çalışan Karbon Dolgulu Politetrafloretillen (PTFE) Radyal Yatakların Tribolojik Davranışları, 7. Denizli Malzeme Sempozyumu, Denizli, 2-3-4 Nisan, 238-248.
- [66]. **Temiz, V.**, 1998. Çeşitli Katkılı ve Katkısız Polimer Yatakların Sürtünme ve Aşınma Karakteristiklerinin Deneysel Tayini, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [67]. **Tevruz, T.**, 1999. Tribological Behaviours of Bronze-Filled Polytetrafluoroethylene Dry Journal Bearings, *Wear*, 230, 61-69.
- [68]. **Fogg, A. ve Jakeman, C.**, 1938. The Friction of an Oscillating Bearing, *Engineering*, 146, 170.
- [69]. **Barnell, F.T., Milne, A.A. ve Webber, J.S.**, 1955. Some Experiments on Oscillating Bearings, *Trans. Inst. Engrs. Shipbuilders Scot.*, 98.
- [70]. **Gediktaş, M.**, 1972, Über die Reibung und Schmierung der Schwenkbeweglichen Radial-Gleitlager, İ.T.Ü. Makina Fakültesi Motorlor Enst. Yayınları, 45.
- [71]. **Yücenur, M.S.**, 1979. Salınım Hareketli Radyal Kaymalı Yatakta Sürtünme ve Film Durumu, *Doktora Tezi*, İTÜ Makina Fakültesi Ofset Atölyesi, İstanbul.
- [72]. **Dinç, S.**, 1985. Değişken Yüklü Salınım Hareketi Yapan Kaymalı Yatakta Sürtünme ve Film Durumu, *Doktora Tezi*, İTÜ Makina Fakültesi Ofset Atölyesi, İstanbul.
- [73]. **Moore, D.F.**, 1972. The Friction and Lubrication of Elastomers, Pergamon Press, Oxford.
- [74]. **Houpert, L.**, 2001. An Engineering Approach to Hertzian Contact Elasticity-Part I, *Journal of Tribology*, 123, 582-588,
- [75]. **Holmen, J.P.**, 1994. Experimental Methods For Engineers, Mc Graw Hill Inc., p:49-62.
- [76]. **Omega Engineering, Inc.**, 1992. Omega Complete Temperature Measurement Handbook and Encyclopedia, V 28, Printed in USA,
- [77]. **Neale, M.J.**, 1973, Tribology Handbook, Butterworths Pub., London.
- [78]. **Hoechst Plastics**, 1985, Designing of Friction Bearings, Germany.
- [79]. **Soom, A. and Kim, C.**, 1983. Interactions Between Dynamic Normal and Frictional Forces During Unlubricated Sliding, *Journal of Lubrication Technology*, 105, 221-229.

ÖZGEÇMİŞ

1958 yılında doğdu. İlk ve orta okulu Ankara'da, liseyi Samsun'da bitirdi. 1982 de şimdiki adı Yıldız Teknik Üniversitesi olan İstanbul Devlet Mühendislik ve Mimarlık Akademisi Makina Fakültesinden mezun oldu. Aynı yıl, İ.T.Ü Makina Fakültesi Transport Tekniği ve Teknik Resim Birimi'nde Mühendis olarak göreve başladı. 1993 yılında İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Anabilim Dalı Konstrüksiyon ve imalat programını bitirerek Y.Mühendis ünvanını aldı. Halen aynı birimde görevini sürdürmektedir.

Evli ve iki çocuk annesidir.

