

46212

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BAZI KATKILI VE KATKISIZ POLİMERLERİN ÇOK DÜŞÜK HIZLARDA
SÜRTÜNME VE AŞINMA DEĞERLERİNİN DENEYSEL OLARAK TAYİNİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Esra SEVİNÇ

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih :

11 Nisan 1995

Tezin Savunulduğu Tarih:

26 Nisan 1995

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. M.GEDİKTAŞ

Diğer Jüri Üyeleri:

Prof. Dr. S. AKKURT

Doç. Dr. M. S. YÜCENUR

Anabilim Dalı:

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

Program:

KAYNAK

Y. Gediktaş
S. Akkurt
M. S. Yücenur

OCAK 1995

ÖNSÖZ

Bu tezin hazırlanmasının esas nedeni, günümüzde polimerlerin mühendislikte özellikle makina parçalarında hem daha ucuz olmaları, hem de yapılarının elverişli olmaları sebebi ile çok daha fazla kullanılıyor olmasıdır.

Bu tez konumu seçmemde bana yol gösteren sayın Prof. Dr. Mustafa Gediktaş'a ve çalışmalarında bana çok yardımcı olan sayın Arş. Gör. Y. Müh. Vedat Temiz ile 1993 yılında polimerler hakkında yapmış olduğu çalışmalar doğrultusunda bana yardımcı olan Y. Müh. Ferda Uzuner'e, Makina Elemanları laboratuvarı sorumlusuna ve bu deneylerde kullanmış olduğum polimerleri temin eden Poilikim A.Ş'ye teşekkürü bir borç bilirim.

Yapılan bu tezin bundan sonra da polimerler ile ilgili olarak yapılacak diğer araştırmalarda da yol göstermesini temenni ederim.

OCAK, 1995

Mak. Müh. Esra SEVİNÇ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ÖZET	v
SUMMARY	vii
BÖLÜM 1 GİRİŞ	1
BÖLÜM 2 POLİMERLER	3
2.1 Bazı Önemli Polimerler	7
2.2 Plastiklere Katılan Dolgu Maddeleri	11
2.3 Takviyeli Plastikler	12
BÖLÜM 3 SÜRTÜNME	14
3.1 ELASTOMERLERİN SÜRTÜNMESİ	14
3.1.1 Yüzeylerin yapısı	14
3.1.2 Sürtünmenin Temel Mekanizması	16
3.1.3 Sürtünmenin Klasik Kanunları	17
3.2 GENEL SÜRTÜNME TEORİLERİ	18
3.2.1 Pürüz Takılması Teorisi	18
3.2.2 Moleküler Çekim	19
3.2.3 Elektrosttik Kuvvetler	19
3.2.4 Kaynama-Kesme- Kazıma	19
3.3 METAL-METALE SÜRTÜNME	20
3.3.1 Değme Alanı Büyümesi	22
3.3.2 Pekleşme	24
3.4 POLİMER-METAL SÜRTÜNMESİ	26
3.5 KAYMA SÜRTÜNMESİNDE ISI OLUŞUMU	31
3.6 ADHEZYON	31
3.6.1 Makroskopik Ve Moleküler Kavramlar	31
3.6.2 Mekanik Model Teorileri	34
3.6.2.1 Voigt-Prandtl Modeli	34
3.6.3 Adhezyonun Diğer Teorileri	34
3.6.3.1 Birleştirilmiş Teori	35
3.6.3.2 Adhezyonun Basit Teorisi	38
3.6.4 Bir Temas Problemi Olarak Adhezyon	41
3.7 SÜRTÜNMEYE ETKİ EDEN PARAMETRELER	45
3.7.1 İzafi Kayma Hızı	45
3.7.2 Basınç Veya Yük	46
3.7.3 Sıcaklık	46

3.7.4	Nem	46
3.7.5	Malzeme Çifti	47
3.7.6	Yüzey Pürüzlülüğü	47
BÖLÜM 4	AŞINMA	48
4.1	TEMEL KAVRAMLAR	48
4.2	AŞINMANIN ÖLÇÜLMESİ	49
4.3	AŞINMA MEKANİZMALARI	53
4.4	AŞINMA TEORİLERİ	54
4.4.1	Abraziv Aşınma Teorisi	54
4.4.2	Yorulma Aşınması Teorisi	59
4.5	AŞINMADA YÜKE BAĞIMLILIK	64
4.6	AŞINMAYA ETKİ EDEN PARAMETRELER	66
4.6.1	Kayma Hızı	66
4.6.2	Basınç Veya Yük	66
4.6.3	Sıcaklık	67
4.6.4	Aşınma Mesafesi	67
4.6.5	Diğer Parametreler	67
BÖLÜM 5	DENEYSEL METODLAR	68
5.1	DÖNEN DİSK TERTİBATI	69
5.2	İÇ TAMBUR APARATI	70
5.3	İNTERFEROMETRİK TECHİZAT	71
5.4	AŞINMA VE ABRAZYON MAKİNASI	72
BÖLÜM 6	DENEY TESİSATI	75
6.1	TESİSATIN TANIMI	75
6.2	TESİSATIN KURULMASI	80
6.3	DENEY NUMUNELERİ	83
6.4	DENEY ŞARTLARI	84
BÖLÜM 7	DENEYLERİN YAPILIŞI	86
7.1	SÜRTÜNME DENEYLERİ	86
7.2	AŞINMA DENEYLERİ	87
BÖLÜM 8	DENEY SONUÇLARI	88
BÖLÜM 9	DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	93
LİTERATÜR		97

BAZI KATKILI VE KATKISIZ POLİMERLERİN ÇOK DÜŞÜK HIZLARDA SÜRTÜNME VE AŞINMA PARAMETRELERİNİN DENEYSEL OLARAK TAYİNİ

ÖZET

Günlük hayatımızda önemli yer tutan plastiklerin yapımında kullanılan polimerler çeşitli sınıflara ayrılmaktadırlar. İşletme şartlarına göre termoplastikler ve termosetler olarak, yapılarına göre de amorf, yarı kristalin ve kristalin olmak üzere sınıflandırılan bu polimerler, bünyelerine katılan çeşitli oranlardaki karbon, bronz, cam elyafı ve çelik ile oldukça mukavim bir duruma getirilirler ve makina konstrüksiyonunda, belli işletme şartları altında, emniyetle kullanılabilirler.

Polimerlerin sürtünme ve aşınma karakteristikleri metallerinkinden oldukça farklıdır. Metal-metal sürtünmesinde geçerli olan pek çok kanun, polimerlerin viskoelastik özelliklerinden dolayı, polimer-metal sürtünmesinde geçerli değildir. Polimer-metal sürtünmesinde, sürtünme katsayısı kayma hızına, basınca veya yüke, sıcaklığa, polimerin ve metalin yüzey pürüzlülüğüne ve malzeme çiftine bağlıdır. Sürtünme kuvveti adhezyon ve deformasyon terimlerinin toplanmasından meydana gelir. Adhezyon; bir yüzey etkisi iken, deformasyon bir kütle etkisidir.

Polimerlerin aşınma kanunları da metallerinkinden farklıdır. Polimerlerin aşınma ve abrazyonu, proseslerin kombinasyonuna bağlı olarak mekanik, mekanik kimyayı ve termokimyayı içerecek tarzda kompleks bir olaydır.

Rijid yüzey üzerinde polimer kaydığı zaman değişik aşınma mekanizmaları saptanabilir ve bunlar yüzey pürüzlülüğünün yapısına bağlıdır. Bu mekanizmalar abraziv aşınma, yorulma aşınması ve yuvarlanma aşınmasıdır.

Aşınma ya ağırlık kaybı olarak, ya da hacim değişimi olarak ölçülür. Kayma hızı, basınç veya yük, sıcaklık, yüzey pürüzlülüğü ve malzeme çifti aşınmaya etki eden parametrelerdir.

Sürtünme ve aşınmanın deneysel olarak tayini için değişik metodlar geliştirilmiştir. Bu metodlar Bölüm 5'de ayrıntıları ile incelenmiştir.

Bu çalışmada; dönen disk tertibatı kullanılmış olup yükleme pnömatik olarak sağlanmıştır. 12 değişik tipte polimer, çeşitli hız ve basınç kademelerinde sürtünme ve aşınma deneylerine tabi tutulmuştur. Kullanılan polimer tipleri; Poliamid 6, yüksek yoğunluklu polietilen, düşük yoğunluklu polietilen, polioksimetilen, propilen, politetrafloretilen (PTFE), PTFE + 15% cam elyafı, PTFE + 25% cam elyafı, PTFE + 25% karbon, PTFE + 35% karbon, PTFE + 40% bronz, PTFE + 60% bronzdur. Polimer numuneler 10 mm çapında ve 20 mm boyunda işlenmiştir. Karşı yüzey ise, $R_d = 0.2 \mu\text{m}$ yüzey pürüzlülüğüne sahip X38CrMoV51 takım çeliğinden özel olarak imal edilmiştir. Uygulanan basınç kademeleri sürtünme ve aşınma deneyleri için 0.4 - 1.5 bar arasındadır. Hız değerleri ise, 0.05 - 0.2 m/s arasındadır. Aşınma mesafesi yaklaşık olarak 1000 m alınmış olup, aşınma miktarı ağırlık kaybı olarak hesaplanmıştır.

Sürtünme ve aşınmaya ait değerler, karşılaştırmalı olarak diagramlar halinde son bölümde verilmiştir.

THE EXPERIMENTAL DETERMINATION OF FRICTION AND WEAR PARAMETERS OF SOME FILLED AND UNFILLED POLYMERS

SUMMARY

On the world, plastics are more used these adays, because of their price is lower and their chemical compositions are more easy to change for different type of usages. Properties of the technical plastics have been developed together with technology.

In this study, friction and wear parameters of some filled and unfilled polymers have been investigated under varying conditions. Friction and wear characteristics of polymers differ greatly from metals.

The classic laws of friction as they are evaluated by Da Vinci, Amontons and Coulomb, valid for metal on metal friction. They can not be applied to polymer-metal friction due to viscoelastic properties of polymers. For example; on the metallic friction, the friction coefficient is independent on normal load and appearant contact area. Whereas on polymer-metal friction, the friction coefficient varies with normal load and contact areas.

The Polymers can be seperated in to two groups: Organic and Inorganic. In organic polymers mainly carbon, also hydrojen, nitrogen and some other halojen atoms. In the inorganic polymers at the main chain instead of Carbon atom, Si, Ge, B and P are found.

According to the manufacturing methods, the polymers are divided in to two groups:

1. Termoplastic
2. Termoset.

Termoplastics can be shaped under heat and pressure and then becomes solid after it is cooled. During this shaping period there is no chemical changes occur inside of its structure.

Mainly used thermoplastics are; acrylics, poliamid, polistiren, polietilen, etc.

Thermosets are the plastics, that can be shaped just once with heat treatment. They can not be reshaped with heating method. They are manufactured with polycondensation reaction. Most popular thermoset plastics are; epoxy resins, phenolic plastics, amino resins, polyuretans, silicon plastics, etc.

Two main factors contribute to the friction generated between unlubricated surfaces in relative motion. The first and usually the most important factor is the adhesion, which occurs at the regions real contact, and the second may be described as a deformation term. If we assume no interaction between the two factors, we can write

$F = F_{\text{Adhesion}} + F_{\text{Deformation}}$, where F is the total friction force. Dividing by the load W , the corresponding equation is written in terms of friction coefficients: $f = f_A + f_D$, where the suffixes A and D denote the adhesion and the deformation terms respectively.

By a careful selection of experimental conditions, it is possible to separate the adhesion and deformation terms. Thus, by choosing optically smooth surfaces the roughness features are virtually eliminated so that the contribution of the deformation coefficient is negligible. The total measured friction force is then due to adhesion alone. Whereas on the polymer-metal, the total friction force developed in sliding over a single asperity may be separated into an adhesion and a deformation term. The deformation term is due to a delayed recovery of the elastomer after indentation by a particular asperity and gives rise to what is generally called the hysteresis component of friction. Adhesion is distinctly a surface effectss, whereas hysteresis is a bulk phenomenon dependent on the viscoelastic properties of the polymer.

Relative sliding speed, pressure or load, temperature, humidity, type of material and roughness of surfaces are parameters which affect the friction coefficient.

The wear and abrasion of polymers are complex phenomena depending on a combination of processes including mechanical, mechanochemical and thermochemical. More and more attention must be given to the questions of

what exactly constitutes wear, how it should be measured, what factors affect its magnitude and how it can be minimized and controlled.

The very existence of adhesion is an indication of irreversibility, which in turn causes some physical degradation of the sliding surfaces, no matter how microscopic or minute. Smooth surfaces contribute a new form of abrasion due to roll formation within the surface layers of the elastomer. It is, of course, exceedingly difficult to show experimentally that the smallest sliding velocities between the smoothest surface produce wear or abrasion.

Wear debris can be measured either weight loss as a change in volume or size of one or both of the rubbing members. Three distinct wear criteria have been proposed:

1. Linear wear rate; K_L : Thickness of layer removed/sliding distance
2. Volumetric wear rate; K_V = Volume of layer removed/Sliding distance $\times$ Apparent area.
3. Energetic wear rate; K_E = Volume of layer removed/Work of friction

Twelve kind of polymers were used in this experimental study. They were Polyamid 6, Polyetylen (two different specimen having two different properties), polypropyhlene, polyoxymethylene, pure polytetraflourethylene (PTFE), PTFE+% 15 glass fibre, PTFE + % 25 glass fibre, PTFE + %25 Carbon, PTFE + %35 Carbon, PTFE + 40 Bronze, PTFE + %60 Bronze, Very High Molecular Weight Polyetilen. These samples were machined 10 mm in diameter and 20 mm in length. Polymers have high melting point, tensile strength and fatigue strength. PTFE has a distinctive importance among of polymers.It has low friction coefficient undeer static load. Furthermore it has corrosion resistance and high dielectrical strength. The friction and wear properties of PTFE may be improved by contribution fillers. Here are te most common used filler types: Glassfibre, carbon, bronze and steel. In general all these fillers increase the friction coefficient of material while reducing the wear rate.

Mainly five test methods can be given for experimental evaluation of the wear and friction coefficient. In this study, pin-on plate experimental aparatus was employed. In this test apparatus, test parameters can be controlled over a wide

For PTFE+25%C and PTFE+35%C, the wear analysis showed that the higher the Carbon percentage, relatively decreased the wear amount. But for PTFE+40% Br and PTFE+60% Br, it was just the opposite. So we can conclude that according to the place that we want to use the polymer, it must be chosen carefully how much additive should be used, at which speed. These factors must be evaluated carefully, then must be decided.

So this experiment guides us to be able to evaluate the polymers according to the different percentage of additives, how the mechanical properties are effected.



BÖLÜM 1. GİRİŞ

Yüzyılımızın başlarından itibaren "Organik Kimya" konusunda hızlı tempoda büyük gelişmeler olurken, sayısız kimyasal maddeler yanında, plastik hammadde veya maddelerine de yönelik birçok sentezler yapılmıştır. Plastik malzeme olarak bilinen suni polimerler, son 40-50 yıl içerisinde büyük gelişme göstererek, günümüzde hacim olarak metallerle eşit oranda kullanılmaya başlanmıştır. Bütün bu gelişmeler sırasında plastik dünyasına açılan ilk önemli pencere Amerikalı bir iş adamının iyi bir bilardo topu yaptırmak istemesi ve buna büyük bir maddi ödül koyması üzerine "Baekeland" tarafından sentezi yapılan Fenol-Formaldehit reçinesi (Bakalit) ileidir. Bundan sonra günümüze kadar büyük miktarlarda para ve emek sarfederek üstün nitelikli plastikler yapılmıştır.

Polimer malzemelerden imal edilen parçaların günlük yaşantı da dahil olmak üzere çok geniş bir kullanım alanı vardır. Bunun yanı sıra teknikte kullanılan plastiklerin, teknoloji geliştikçe özellikleri de gelişmiş ve makina konstrüksiyonunda her geçen gün biraz daha fazla kullanılmaya başlanmıştır. Plastiklerin bu ölçüde geniş kullanımı, bunların statik ve dinamik karakteristiklerinin bilinmesini zorunlu kılmaktadır. Ülkemizde plastik malzemeler üzerinde çalışan bir hayli firma olmasına rağmen sözü geçen karakteristiklerle ilgili araştırmalar çok sınırlıdır. Bu karakteristikleri deneysel olarak tayin edebilmek amacı ile böyle bir deneysel çalışma yapılmıştır.

Teknikte kullanılan polimerlerin en büyük avantajı, metal malzemelerin aksine, ortam şartlarından pek fazla etkilenmemeleri ve çok az bakım gerektirmeleri, kolay işlenebilmeleri, hafif, yüksek kimyasal ve korozyon dirençlerine, yüksek ısı ve elektriksel özelliklerine sahip olmalarıdır. Diğer bir

avantajı ise; maliyetinin oldukça düşük olmasıdır. Buna karşılık en önemli mahzuru, yüksek hız ve basınçlara dayanıklı olmamasıdır. Bu yüzden ancak, belirli şartların sağlandığı işletme koşullarında kullanılabilirler. Yapılan çalışmada, işte bu şartlar ve koşullar altında polimerlerin sürtünme ve aşınma özellikleri incelenmiştir.

Polimerlerin mekanik, elektriksel, ısı ve kimyasal dayanımlarını arttırmak için çeşitli oranlarda katkı malzemeleri kullanılmaktadır. Bunların en fazla uygulananları, PTFE (politetrafloretillen) içine farklı oranlarda katılan karbon, bronz, cam elyafı ve çeliktir. Bu çalışmada, bir kısmı dolgulu (PTFE+%40 ve %60 bronz, PTFE+%25 ve %35 karbon, PTFE+%15 ve %25 cam elyafı) bir kısmı dolgusuz (saf PTFE, poliamid 6, polioksimetilen, propilen, polietilen) oniki değişik polimer malzemenin, aşınma ve sürtünme parametrelerinin dinamik olarak tayini için pim-disk prensibine göre bir deney standı geliştirilmiş olup sistemde yükleme, pnömatik devre ile sağlanmıştır.

Sistem, polimerlerin sulu ve yağlı ortamlarda da test edilmesine izin verecek şekilde dizayn edilmiş olup ileride yapılacak deneyler için bir başlangıç teşkil etmektedir.

Yapılan deneyler sonunda elde edilen değerler sonuç bölümünde grafikler halinde verilmiştir.

BÖLÜM 2. POLİMERLER

Malzemeler genel olarak dört ana grupta toplanabilir:

- 1- Metalik malzemeler
- 2- Organik malzemeler
- 3- Seramik malzemeler
- 4- Kompozit malzemeler

Organik ve seramik malzemeler metaldışı mühendislik malzemeleridirler. Kompozit malzemeler ise metalik veya metal dışı malzemeler olabilmektedir. Organik malzemeler, **polimer** olarak bilinen plastikler, **elastomerler** ve **fiberlerdir**. Bunlar karbonun (C) metal olmayan elementlerle (H, O, Cl, N) meydana getirdiği büyük molekülü organik bileşiklerdir.

Plastikler normal sıcaklıkta genellikle katı halde bulunan, basınç ve sıcaklıkla mekaniksel veya kimyasal yolla şekillendirilebilen ve kalıplanabilen organik polimerik maddeler olarak tanımlanırlar. Polimerden oluşan plastikler, polimerin farklı kimyasal yapısından dolayı da sınıflandırmaya tabi tutulurlar. Isı ve basınç altında şekillendirilebilme ve şekillendirildikten sonra plastiğin gösterdiği özellik plastik maddeyi tanımada kolaylık sağlar.

Polimerler kimyasal bileşenlerine göre organik ve inorganik polimerler olmak üzere iki gruba ayrılmaktadırlar. Organik polimerlerde başta karbon

olmak üzere hidrojen, oksijen, azot ve halojen atomları bulunur. İnorganik polimerlerde ana zincirde C yerine silisyum (Si), germanyum (Ge), bor (B), fosfor (P) gibi elementler bulunur. Ana zincirde bulunan elementlerin bağ enerjileri organik polimerlerde bulunan elementlerin enerjilerinden daha yüksektir.

Organik polimer maddeler, plastikler (termoplastikler ve termosetler), elastomerler ve fiberlerdir. Polimerler, molekül ağırlığı yüksek olan kompleks organik molekül zincirlerdir. Polimerler doğal ve sentetik olarak iki gruba ayrılabilirler. 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 birleştirilmiştir. Endüstriyel uygulamada kullanılan plastikler genellikle sentetik polimerlerdir. Bu şekilde elde edilen polimerler grubu aşağıda gösterilmiştir.

<u>Grubun kimyasal adı</u>	<u>Polimer Adı</u>
Ester	Poliester
Amid	Poliamid
Viniklorür	Poliviniklorür
Tetrafloretilen	Politetrafloretilen

Polimerler yapılarına göre homopolimer, kopolimer ve terpolimer olarak sınıflandırılabilirler. Homopolimer; tek bir monomerin tekrarlanması ile elde edilirken, kopolimer iki değişik monomerin polimerizasyonu ile elde edilir. Üç farklı cins monomerden oluşana terpolimer denir. Polimerlerin sınıflandırılmasında esas, işleme yöntemlerine göre yapılan sınıflandırmadır. Buna göre polimerler;

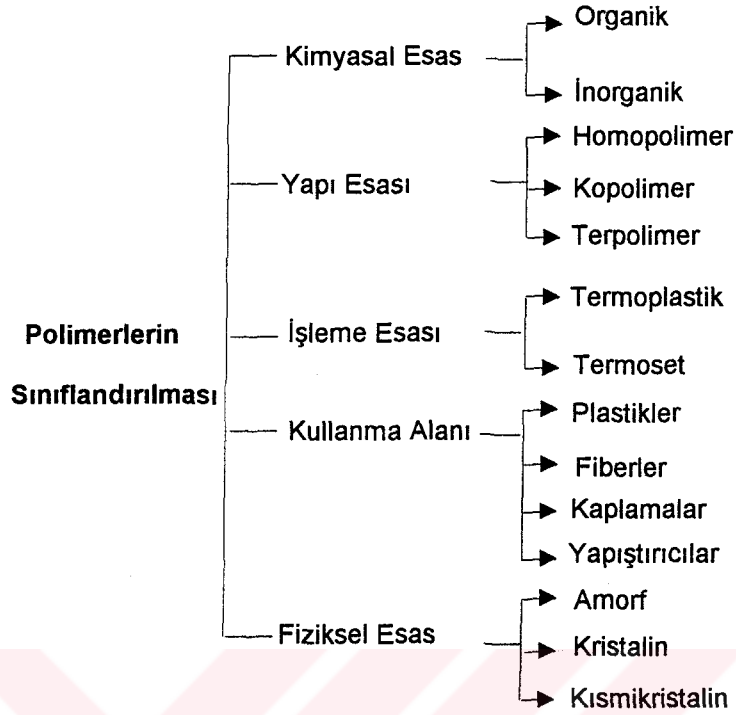
1. Termoplastikler

2. Termosetler

olmak üzere iki büyük gruba ayrılırlar. Termoplastikler ısı ve basınç altında yumuşayan, akan, bu durumda şekil alabilen ve soğutulduğunda sertleşebilen (katı halini alan) plastiklerdir. Bu şekillendirme sırasında hiçbir kimyasal değişikliğe uğramazlar. Genelde polimerler reaktör denilen tesiste polimerizasyon yolu ile elde edilirler. Çoğunlukla yoğunlaşma polimerizasyonu ile elde edilen termoplastiklerin polimerizasyon işlemi, reaktörde tamamen bitmiş olur. Bu işlemin sonucu olarak yan zincir veya gruplar içeren uzun zincir molekülleri meydana gelir.

Termoplastik grubunu oluşturan en önemli plastikler: Akrilikler, poliamid, polistiren, polietilen, karbonflorür, selülozikler ve vinillerdir.

Termosetler, ısı işlemi ile bir defa istenilen şekli alabilen plastiklerdir. Tekrar ısıtılmakla yeniden şekillendirilemezler. Ayrıca bu malzemeler çözünmezler. Termosetler polikondansasyon reaksiyonu ile elde edilirler ve genellikle çapraz bağlı bir yapıya sahiptirler. Bu plastiklerde polimerizasyon işlemi, malzemeyi ihtiva eden monomerlerin bir araya getirildiği reaktörde başlar ve kalıplama işlemi sırasında biter.



Termoplastik ve termoset plastikler arasında, moleküllerin şekline göre ayırım yapılır. Bu bakımdan; termoplastikler lineer moleküllere, termosetler ise üç boyutlu çapraz bağlı moleküllere sahip malzemelerdir. Lineer moleküllerde, zinciri oluşturan ünitelerin arasında çok kuvvetli kovalent bağ bulunmaktadır. Moleküller (zincirler) arasında ise fiziksel bir bağ bulunmamaktadır. Sadece molekülleri bir arada tutan zayıf elektrostatik çekme kuvvetleri vardır. Bu moleküller arası kuvvet zincirlerin birbirine göre hareketlerini engelleyen, ısıya karşı duyarlı bir kuvvettir. Dolayısı ile, lineer molekül zincirlerinden oluşan bir termoplastik ısıtıldığında moleküller arası kuvvet zayıflar. Molekül zincirleri birbirine göre hareket bakımından sıvılara benzer şekilde serbest hale gelir ve malzemeye bir kalıpta kolayca şekil verilebilir. Malzeme soğutulduğunda moleküller arası kuvvetler büyür ve molekül zincirlerini verilen yeni şekilde dondurur. Ancak çok ısı verilirse, molekül zincirleri kopar ve malzeme özelliklerinde bir yıpranma meydana gelir.

Üç boyutlu çapraz bağlı bir yapıya sahip olan termoset plastiklerin polimerizasyonu reaktörde ve kalıpta olmak üzere iki kademe meydana gelmektedir. Polimerizasyonun birinci kademesinde lineer zincirlerin çoğunluğu oluşturulduktan sonra reaksiyon durdurulur. Bu durumda lineer zincirlerde reaksiyona girmeyen kısımlar mevcuttur. Kalıpta meydana gelen polimerizasyonun ikinci kademesinde, sıcaklığın ve basıncın etkisi altında reaksiyona girmeyen kısımlar sıvı haline gelir ve molekül zincirleri arasında çapraz bağ oluşturan reaksiyon meydana getirirler. Bu şekilde termoplastik malzemenin aksine burada molekül zincirleri arasında kuvvetli kovalent bağlar oluşur. Molekül zincirleri arasında oluşan çapraz bağlar ancak çok yüksek sıcaklıklarda kopabilirler. Bu kopma aynı zamanda malzemenin yıpranmasına neden olan zincirlerin kopması anlamına da gelmektedir. Bu nedenle termoset plastikleri bir kere kalıpta şekillendirildikten sonra, tekrar ısıtılıp yumuşatılamaz ve kalıpta şekillendirilemez veya çözülemez. Genellikle termoset plastikleri yüksek sıcaklığa dayanıklı ve oldukça büyük bir boyut kararlılığına sahip malzemelerdir.

Termoset grubunu oluşturan en önemli plastikler; epoksi reçineleri, fenolik plastikler, amino reçineleri, poliüretanlar, silikon plastikleri, selüloz nitrat ve selüloz triasetatlarıdır.

2.1 BAZI ÖNEMLİ POLİMERLER

Fluorokarbon Polimerleri: Teknoloji ilerledikçe tasarımlarda daha yüksek nitelikli malzemelere duyulan ihtiyacın karşılanması amacı ile ARGE (Araştırma Geliştirme) çalışmalarına hız verilmiş ve çok iyi özelliklere sahip plastikler üretilmiştir. Elektriksel, ısısal, kimyasal ve daha birçok özellikler bakımından sıradan plastıklara göre ayrıcalığı ve üstünlüğü olan bu malzemeler

fluorokarbon polimerleridir. Fluorokarbonlar, flor ve karbon içeren organik maddelerdir. Hidrokarbonlardaki hidrojen atomu yerini flor almış bulunmaktadır.

Parafinik fluorlu polimerler sınıfını oluşturan bu malzemeler, enjeksiyon, ekstrüzyon, basınç kalıplama, sinterleme ve katmanlı malzeme (laminat) şeklinde işlenebilen, rijid, elastomer ve sıvı hallerinde de bulunabilen türler içermektedir. Bu yapıya sahip tetrafloretilen (TFE) ve triflorokloretilen (TFCE) olmak üzere iki polimer ve tetrafloretilen ve hegzaflopropilen (FEP) kopolimeri bulunmaktadır. TFE' nin üstün kimyasal ve termal stabilitesi yanında çok düşük dielektrik sabitesi ve kayıp faktörü vardır. Kimyasal dayanıklılık bakımından çok iyidir ve çok düşük sürtünme katsayısına sahiptir. TFE kablo izolasyonu, matbaa makinaları merdanelerinin kaplanmasında, ekmek fırını makinalarında yatak, dişli, conta, elektriksel sahada terminal blok ve izolasyon işlerinde kullanılır. TFCE conta, vana gövdesi, gözetleme camı, boru, tel ve destek izolasyonu ve elektriksel devrelerin yapımında kullanılır.

FEP yüksek sıcaklık ve kimyasal maddelere dayanıklı tel izolasyonunda kullanıldığı gibi film, boru, çubuk ve özel profillerin yapımında da kullanılır.

Poliamidler: 1928 yıllarında sentez edilen poliamid, öneminin farkına varılmadan 12 yıl kadar literatür yaprakları arasında kalmış, ancak İkinci Dünya Savaşı sırasında ipek kaynaklarının Japonya'nın elinde bulunması dolayısı ile paraşüt yapamayan ABD tarafından çalışmalar canlandırılarak ipeğe alternatif olan ürün, endüstrinin hizmetine verilmiştir. Bir espri olsun diye de ürün Amerikalılarca NYLON (Now you lousy old Nippon) şeklinde adlandırılmıştır. Poliamidlerin ticari adı naylondur. Poliamidler yüksek kristalin yapıya sahip bünyesinde amid grubu bulunduran molekül ağırlığı yüksek olan lineer polimerlerdir. Sert ve dayanıklı olan poliamidlerin bir çok çeşitleri vardır. Poliamid 6, poliamid 66, poliamid 610 bilinen ve en çok kullanılan

poliamidlerdir. Poliamid 6 veya polikapromid, aminakaproik asidin ısıtılması ile elde edilir. Poliamid 66 hegzametilendiamin ve sebasik asidin reaksiyonundan elde edilir. Poliamid 6 veya poliamid 66 yağlara, greslere ve kimyasal çözücülere karşı dayanıklıdır. Çok iyi elektriksel özellikleri ve yalıtkanlıklarından ötürü elektriksel alanda geniş çapta kullanılırlar. Poliamid 610'un boyutsal direnci mükemmeldir. Naylon; zorlanmalara maruz kalan dişli çark, kam, kaymalı yatak, rulman kafesleri, kızak gibi elemanların yapımında, takım tezgahlarının kızaklarında kaplama olarak, endüstriyel ve tarımsal araçların hidrolik, pnömatik ve yağlama yağı boru sistemlerinde kullanılmaktadırlar. Şeffaf poliamidler şeffaf kapaklar, vanalar, akış göstergeleri için gözetleme camları, elektriksel ve elektronik cihazlar için kapak ve gövde, matbaa makinalarında çözücüler için şişe ve kaplar, röntgen cihazları için pencere ve gözetleme camlarının yapımında kullanılır.

Polietilen: Günümüzde plastikler içinde en fazla üretilen polietilen, toplam plastiklerin %40' ı kadar bir tüketim oranına sahiptir. Polietilen, etilenin polimerizasyonu ile elde edilen bir polimerdir. Polietilen, üretim metoduna göre aşağıdaki gibi sınıflandırılır:

1. Yüksek basınç polietileni-alçak yoğunluk polietileni
2. Orta basınç polietileni-orta yoğunluk polietileni
3. Alçak basınç polietileni- yüksek yoğunluk polietileni

Birçok proseslere uygun düşen polietilen granül, film, levha, profil, vb. şekillerde piyasaya sürülen, yurdumuzda da üretilen bir termoplast plastiktir. Polietilenin elektriksel özellikleri genelde çok iyidir ve elektriksel kayıpları çok azdır, kimyasal maddelere karşı dayanıklıdır, suya karşı direnci çok fazladır. Polietilen, film olarak ambalaj sanayiinde, çeşitli malzemelerin saklanması, kırılmaması, su olmaması ve korunması amacı ile, tarım alanında seralar için örtü ve dış etkenlere karşı tarımsal maddelerin korunması için, deterjan ve çeşitli kimyasal maddeler için şişeler ve kaplar, iyi elektriksel özelliklerinden dolayı tel, kablo, telefon kablosu izolasyonunda ve boru tatbikatlarında kullanılır.

Polipropilen: Polipropilen kalıplanabilen, ekstrüzyonla çekilebilen, elyaf ve film haline getirilebilen tek termoplastiktir. İzotaktik ve ataktik olmak üzere iki grupta incelenebilir. Polipropilen, propilenin polimerizasyonu ile elde edilir. Çoğu kimyasal maddeden etkilenmez. Polipropilen tekstil endüstrisinde, elektriksel uygulamalarda, aerosol kapağı ve vanası, ayakkabı topuğu, tarak, oyuncak, şişe, boru, film, elyaf, halı ve halı kaplama işlerinde kullanılır.

Polistiren: Polistiren kristal berraklığında mükemmel termik ve boyutsal stabilitesi, iyi elektriksel özellikleri, yüksek kırılma gücü ve çekme direnci olan bir plastiktir. Polistiren kristal ve antişok olmak üzere sınıflandırılır. Polistiren köpük halinde de kullanılmaktadır. Polistiren köpüğü ambalaj, yüzmeye ve yüzdürme uygulamalarında, yalıtıcı olarak ısı izolasyonunda kullanılır. Kristal polistiren kristal avize, oyuncak, buzdolabı gövdesi, kozmetik ambalajı uygulamalarında şişe kapaklarında, ecza ve yiyecek depolanmasında kullanılır. Antişok polistireni radyo, televizyon kılıfları ve gövdesi, akümülatör gövdesi, teyp gövdesi, ışıklandırma işlemleri, talk pudrası şişeleri, diş fırçası sapı, su bardağı, banyo takımı yapımı gibi uygulamalarda kullanılır.

Polivinilklorür (PVC): PVC' nin monomeri, vinil klorürdür. Çeşitli katkı maddelerinin yardımı ile polimerize olması neticesinde elde edilen bir polimerdir. PVC' ler su şebekesinde boru, cam çerçevesi, tel ve kablo izolasyonunda, mineral su şişelerinde, esnek film ve kaplama için kullanılmaktadır.

Sert, yumuşak, opak ve saydam tipler halinde termoplast bir ürün olarak üretilen PVC, özellikle plastikleştirici ile işlenmiş şekilde yaygın olarak kullanılan bir malzemedir. Hem üretim kolaylığı, hem ucuzluk, hem de çevre koşullarına daha dirençli olmasından dolayı PVC bu sanayi dalındaki yerini almıştır. Günlük yaşamda yaygın şekilde görülen yapay deri eşya ki yakın zamana kadar

kullanılan fakat kalitesiz olan muşambayı piyasadan silmiştir, yer döşeme malzemeleri, yumuşak oyuncaklar, su hortumları ve daha birçok yumuşak plastik eşyanın büyük bir bölümü plastize edilmiş PVC' den yapılmaktadır.

2.2 PLASTİKLERE KATILAN DOLGU MADDELERİ

Pratikte plastikler, saf organik reçine veya bazı özelliklerini iyileştirmek amacı ile başka reçine veya katkı maddeleri ile karıştırılırlar. Birçok plastik kendilerine çeşitli özellikler kazandıran dolgu maddeleri ile işlendikten sonra piyasaya sürülürler. Belirli amaçlara yönelik dolgu maddelerinin en önemlileri şöyle sıralanabilir:

1. Pekiştirici ve dayanım arttırıcılar
2. Renklendiriciler
3. Plastikleştiriciler
4. Kaydırıcı ve işlemeyi kolaylaştırıcılar
5. Antistatikler (Statik elektriklenmeyi önleyiciler)
6. Ultraviyole ışınım dengeleyiciler (UV Stabilizatörler)
7. Oksitlenme önleyiciler
8. Köpük yapıcılar (Genleştiriciler)
9. Diğer dolgu maddeleri: Yataklarda kaymayı arttırıcılar, yanmayı güçleştiriciler ve ısı dengeleyiciler (ısı stabilizatörleri)

Tertipleme yapıldıktan sonra, oluşan bileşime, çeşitli teknolojilerle istenilen şekil verilmektedir.

2.3 TAKVİYELİ PLASTİKLER

Plastiklerin çekme, darbe ve ısı mukavemeti, boyut kararlılığı vb. özelliklerini iyileştirmek için başka malzemelerle takviye edilir. Katkı malzemeleri elyaf (fiber) ve dolgu (filler) şeklinde olabilir. Bu iki takviye sistemlerinin arasında kesin bir sınır olmamasına rağmen şu ayırım yapılabilir:

Elyaf takviye sistemi genellikle plastiklerin yukarıda sıralanan özelliklerini iyileştirmek amacı ile uygulanan pahalı bir sistemdir. Bu nedenle elde edilen iyileştirme, malzemenin fiyat artışını telafi edici seviyede olmalıdır.

Dolgu takviye sistemi ise genellikle plastiklerin maliyetini düşürmek amacı ile kullanılır. Ancak mika, kil veya CaCO_3 , gibi mineral dolgu maddeleri, oluşan malzemenin ısı iletkenliğini artırır, soğutma sırasında şekil değiştirmeleri azaltır ve kalıplama zamanını düşürür. Bununla beraber genellikle dolgu malzemeleri, oluşan malzemenin mekanik özelliklerini bilhassa çekme mukavemetini azaltır. Bu azalma, dolgu miktarının artması ile hızlanır. Bu nedenle plastiklerin mukavemet özelliklerini arttırmak için kuvvetlendirici denilen elyaf takviye sistemi kullanılmalıdır.

Kuvvetlendirici (elyaf) ile dolgu sistemi arasındaki ikinci fark takviye malzemenin cinsine ve yapısına bağlıdır. Kuvvetlendirici olarak genellikle elyaf şeklinde cam, karbon ve aramid gibi bileşikler kullanılmaktadır. Dolgu maddeleri ise, lifli olan asbest, kağıt ve lifli olmayan mika, talk, kil, silikatlar, CaCO_3 gibi bileşiklerdir. Dolgu malzemenin en iyi sonuç vermesi için mutlaka reçine içinde homogen olarak dağılması gerekir. Bu da bu malzemelerin tane büyüklüğünün çok küçük olmasına bağlıdır.

Elyafın kuvvetlendirici olarak kullanılmasında aşağıdaki üç faktörün dikkate alınması gerekir: Elyafın matris tarafından iyi ıslanma kabiliyeti, matris ile elyafın temas yüzeyinde kimyasal reaksiyonun olmaması ve elyafın iyi yüzey karakteristiklerine sahip olmasıdır. Termoplastiklerin kuvvetlendirilmesinde genellikle cam, mineral, karbon ve aramid elyafı ile yapılmaktadır.



BÖLÜM 3. SÜRTÜNME

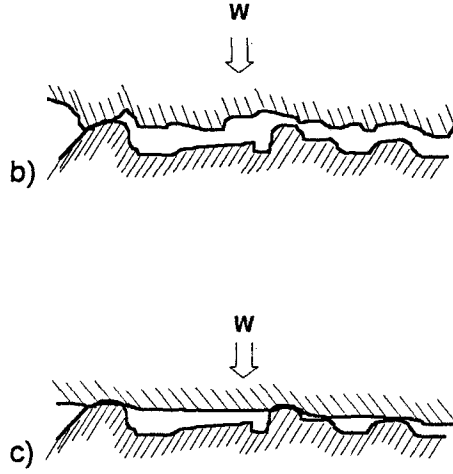
3.1 ELASTOMERLERİN SÜRTÜNMESİ

Ariano [1] klasik kurallardan da bekleneceği gibi, kuru sürtünmenin; artan kayma hızı ile arttığını bulmuştur. Gözlemleri, daha sonra Derieux tarafından 1934' de ve Roth tarafından 1942'de ispat edilmiştir. Roth, geniş laboratuvar tecrübeleri yapmış ve yükle kayma katsayısında azalma ve yüzey pürüzlülüğünde de artmayı gözlemiştir. Ayrıca yüzey pürüzlülüğünün ve kirliliğinin adını duyurmuştur. Thirion [2] yük ile kuru sürtünme katsayısı, buna bağlı olarak sürtünme katsayısı ve basınç arasındaki ampirik ilişkiyi ispat etmiştir. Şimdi sürtünme, sürtünen yüzeyler ve buna bağlı olarak basınç ile ilişkilerini inceleyelim.

3.1.1 YÜZEYLERİN YAPISI

Elektron mikroskopu ile bakıldığında katı maddelerin yüzeyinin düzgün olmadığı ve Şekil 3.1 de şematik olarak gösterildiği gibi profildeki değişikliğin rastgele bir düzenleme ile girinti ve çıkıntılardan oluştuğu görülür.





Şekil 3.1 Yüzeylerin yapısı ve temas süresince birbirleri ile etkileşimi

Eğer bu profil işlenmiş parça yüzeyinin son halini gösteriyorsa ve eğer ikinci bir yüzey W yükü altında birinci yüzeyle temas halindeyse, her iki yüzeyin en büyük pürüz tepcikleri arasındaki fiziksel temas en azından üç noktada oluşur. Eğer A_i , i .bölgedeki belirli bir temas noktasının alanını gösteriyorsa ve P_i temas sonucu oluşan basınçsa, bu takdirde;

$$W = \sum_{i=1}^M A_i P_i \quad 3.1$$

Bu durum şekil 3.1 b 'de gösterilmiştir. İki metal yüzey arasında ilk temas oluştuğunda herbir temas alanının toplamı, sınırlı basıncı ve yükü taşıması için küçüktür. Sonuç olarak büyük tepciklerdeki basınç, yumuşak yüzeyin akma sınırına veya plastik akmaya doğru hızla artar. Bu yüzden yük, basıncın P 'e ulaştığı tepelerde daha büyük pürüzler tarafından ve basıncın hala elastik olduğu daha küçük pürüzler tarafından taşınır. Bu durumda denklem aşağıdaki gibi gösterilir:

$$W = P \cdot \sum_{i=1}^{M_1} A_i + \sum_{j=M_1}^{M_2} P_j A_j \quad 3.2$$

Elastik temasın olduğu alanların toplamı, plastik olanlarla mukayese edildiği takdirde ihmal edilebilir ve denklemin 2. terimi gözönüne alınmayabilir. Böylece denklem;

$$W = P \cdot \sum_{i=1}^{M_1} A_i = P \cdot A_{ger} \quad 3.2.1$$

halini alır. Bu nedenle pürüz tepelerindeki plastik akma oluşumu sıfırdan belli değerlere kadar tek tek temas alanlarının boyutlarına yükselir ve toplam temas alanı A_{ger} , 3.2.1 denklemi gereği $P \cdot A_{ger}$ çarpımı W yüküne eşit olacak şekilde kendi kendisini ayarlar. W yükü 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 nokta alanlarının sürekli artmaya başlaması, sıfır alanlı (noktasal temas) yeni temas noktalarının oluşumuna neden olur. Temas eden pürüz tepelerinde plastik akışın oluşması ile metal yüzeyler bu bölgelerde birbirlerine kaynarlar.

Eğer şekil 3.1.a daki orijinal profil yük altında bastırılmış elastomer üzerinde kaba bir destek gibi düşünülürse şekil 3.1.c deki durum ortaya çıkar. Elastomer, karşı yüzeyin çok sayıdaki pürüzleri etrafında fiziksel olarak kıvrımlar oluşturur ve temas alanı üzerinde elastomerde elastik basınç oluşur. Temas halindeki pürüz tepeciklerinin yarı küre şeklinde olduğu farzedilirse, yük-alan arasındaki ilişki şu şekilde gösterilir:

$$A_{ger} = K_1 W \quad A_{ger} = K_1 W^{2/3} \quad \text{Hertz Denklemleri} \quad 3.3$$

K_1 elastisite sabitidir. Böylece elastik temas için gerçek temas alanı yükün $2/3$ oranındaki üssü ile değişir. Oysaki plastik temas için gerçek temas alanı (3.2.1) denklemine göre yükün birinci kuvveti ile doğru orantılıdır. Metal-metal uygulamalarda temas noktalarının genel durumu elasto-plastik olarak tarif edilebilir. Bu durumda yük üssü $2/3$ ve 1 arasındadır. Şekil 3.1.c de gösterildiği gibi metal metale temasda ortaya çıkan kaynak olayının tersine kaba yüzey üzerindeki elastomerin statik teması, birbirine bağlanan mekanizma fikrini doğrular.

3.1.2 SÜRTÜNMENİN TEMEL MEKANİZMASI

Yağlanmamış yüzeyler arasında izafi kayma hareketi ile oluşan sürtünmeyi iki temel faktör açıklar. Genellikle daha önemli olan birinci faktör, gerçek temas bölgesinde oluşan adhezyondur. İkincisi ise deformasyondur. İki faktörün birbirini etkilemediğini farzederek şöyle yazabiliriz:

$$F = F_{\text{Adhezyon}} + F_{\text{Deformasyon}} \quad 3.4$$

F toplam sürtünme kuvvetidir. 3.4 denklemi yük ile bölüldüğünde buna karşılık gelen denklem, sürtünme katsayısı cinsinden şöyle yazılabilir:

$$f = f_A + f_D \quad 3.5$$

A ve D indisleri; sırası ile adhezyon ve deformasyon terimlerini belirtir.

Deney şartlarının dikkatli bir şekilde seçimi ile adhezyonla deformasyonu birbirinden ayırmak mümkündür. Şöyle ki, optik olarak düz yüzeyleri seçerek pürüzlülük özellikleri hemen hemen yok farz edilir. Öyle ki deformasyon katsayısının katkısı ihmal edilebilir. Bu durumda ölçülen toplam sürtünme kuvvetinin sebebi sadece adhezyondur. Başka bir yol ise, izafi hareket eden kaba pürüzlü iki yüzey arasında yağlayıcı kullanmaktır. Bu yağlayıcı adhezyonu elimine etmekte ve böylece toplam sürtünme kuvveti deformasyon bileşenine bağlı olmaktadır. Kaba pürüzlü yüzeyler arasında yağlama yapılmadığı takdirde adhezyonun sürtünme katsayısına katkısı, deformasyon katkısının hemen hemen iki katı büyüklüktedir. Daha sonra görüleceği gibi, adhezyon ve deformasyon terimlerini doğuran fiziksel mekanizma metaller ve elastomerler için farklıdır.

3.1.3 SÜRTÜNMENİN KLASİK KANUNLARI

Vinci, Amontons ve Coulomb' un çalışmaları ile geliştirilen kanunlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

1. Sürtünme kuvveti yük ile orantılıdır.
2. Sürtünme katsayısı görünür ve temas alanından bağımsızdır.
3. Statik sürtünme katsayısı kinetik sürtünme katsayısından daha büyüktür.
4. Sürtünme katsayısı kayma hızından bağımsızdır.

Klasik kanunlar önemli bir değişiklik olmadan yıllardır süre gelmiştir ve genellikle geçerli oldukları farzedilebilir. Ancak, son zamanlardaki araştırmaların ışığında bunların bir çoğunun doğru olmadığı anlaşılmıştır. Aynı zamanda daha önce çalışanların mevcut olanakları düşünülürse, klasik kanunların, kuru sürtünme mekanizmasındaki geniş kapsamlı görüşü yansıttığı ve bunların daha sonraki kesin araştırmalara yol gösterdiği bir gerçektir.

Birinci kanun, yüksek basınçta olmaması kaydı ile, asıl temas alanı, büyüklük olarak görünür alana yaklaştığı zaman doğrudur. Geri kalan kanunlar bu takdirde birer birer değerlendirilmelidir. Böylece ikinci kanunun, metallerde olduğu gibi sınırlı bir akma noktasına sahip olan malzemeler için geçerli olduğu gözükür. Bu nedenle elastik ve viskoelastik malzemelere uygulanmaz. Üçüncü kanuna da hiçbir viskoelastik malzeme uymaz. Gerçekten günümüzde viskoelastik malzemelerde herhangi bir statik sürtünme katsayısının olup olmadığı şeklinde bir tartışma vardır. Dördüncü kanuna gelince, hiçbir malzeme için geçerli değildir ve elastomer sürtünmesinin farklı viskoelastik özellikler gösterdiği saptanmıştır. Beşinci bir kanun ise sürtünme katsayısının malzemeye bağlı olduğunu belirtir. Ancak bu, önceki araştırmacılar tarafından ayrı bir kanundan ziyade bir gözlem olarak kabul edilmekte ve bu nedenle orijinal klasik kanunlar arasında özellikle yer almaz. [3]

3.2 GENEL SÜRTÜNME TEORİLERİ

Kuru sürtünmenin yapısını açıklamak için önerilen genel sürtünme teorilerinin bazıları aşağıda özetlenmiştir.

3.2.1 PÜRÜZ TAKILMASI TEORİSİ

Amontons ve De La Hire 1699' da metalik sürtünmenin, tek tek yüzey pürüzlerinin birbirlerine takılıp mekanik kilitlemesi sonucu olduğunu öne sürdüler. Bu mekanizma, sürtünmede statik sürtünme katsayısının varlığına bir açıklama getirir ve ayrıca alt yüzey üzerinden üst yüzeyin pürüzlerini kaldırmak için gerekli kuvvet olarak dinamik sürtünmeyi de açıklar.

3.2.2 MOLEKÜLER ÇEKİM

1929' da Tomkinson ve 1936' da Hardy bir malzemenin atomlarının, eş çalışan karşı yüzeydeki diğer atomların atomsal çekim alanının dışına çıkarıldığı zaman oluşan sürtünme kuvvetlerini enerji kaybına bağladılar. Sonraki çalışma, adhezyon sürtünmesini, gerilme, kırılma, yüzey ve yan yüzey moleküllerinin birbirine yaklaşması çevrimleri ile enerjinin kaybedildiği moleküler-kinetik bağ kopmasına bağlar.

3.2.3 ELEKTROSTATİK KUVVETLER

1961' e kadar, önerilen bu teoriye göre, sürtünen metal yüzeyler arasındaki stick-slip olayı, ara yüzeyde zıt kutuplu elektron akışının başlaması ile açıklanabilir. Bu yüklerin elektrostatik çekim ile yüzeyleri birarada tuttuğu varsayılır.

3.2.4 KAYNAMA-KESME-KAZIMA

1950' de Bourden tarafından önerilen bu son teori, şimdilerde metal sürtünmesi için yaygın olarak kabul edilir. Herbir temas tepesinde gelişen yüksek basınç lokal kaynamaya sebep olur ve böylece oluşan birleşme yerleri, yüzeylerin izafi kayması sonucu kesilirler. Daha yumuşak malzemenin ana kütesine doğru daha sert yüzeyin pürüzleri tarafından yapılan kazıma, daha sonra gösterildiği gibi, sürtünmenin deformasyonun bileşenine dahil olur.

Kayma işleminde, bir yüzeydeki pürüzlerin diğer yüzeydeki pürüzler üzerinde yükselmesi ve alçalması enerji sarfı gerektirmediğinden mekanik kilitleme teorisi gözönüne alınmayabilir ve sürtünme kesinlikle bir kayıp mekanizmasıdır. Benzer şekilde, henüz gözlemleri yapılmamış elektrostatik

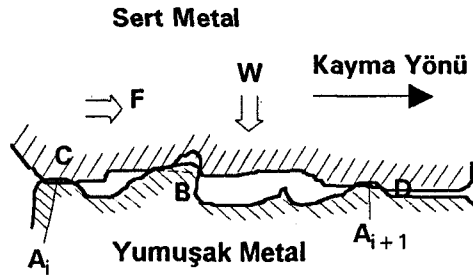
teori, daha düşük sürtünme katsayısı olan ara düzlemden, uzun zaman aralıkları boyunca elektron sızıntısı olduğunu öne sürer.

Makroskopik seviyede metalik sürtünme için en tatmin edici fiziksel açıklamayı kaynama-kesme teorisi yapar. Oysaki elastomerlerin durumunda bugün en yeni moleküler çekim teorilerinin geçerli olduğu gözükür.

Sürtünmenin klasik kanunları, 10 yıllık period boyunca yürütülmüş deneylerin bir sonucu olarak formüle edilmişlerdir. İşletme şartları için gözlenen sürtünme karakteristiklerinin yapısını teorik olarak açıklamak amacı ile yukarıda tanımlanmış bu teoriler gözönüne alınmalıdır. Deneyler için daha kesin kontrol ve ölçüm metodlarının gelişmesi ile ve ayrıca yeni araştırma verilerinin çoğalması ile ancak birkaç makul teorinin yeni yapılacak araştırma ve ek çalışmalardan çıkacak sonuçlarla doğrulanabileceği ortaya çıkmıştır.

3.3 METAL-METALE SÜRTÜNME

İki metal yüzey yük altında temas ettiğinde yüzeylerin pürüz tepelerinde, toplam A_{ger} alanı uygulanan W yükü karşılayana kadar lokal kaynamalar oluşur. Şekil 3.2 'de gösterildiği gibi, yüzeyin üst kısmına F teğetsel kuvveti uygulanırsa ve sadece kaynak noktaları kesilirse yüzeyler arasında izafi bir kaymanın oluşacağı açıktır.



Şekil 3.2 Kaynama, kesme ve kazıma mekanizması

Bu kesme hareketi sürtünmenin adhezyon bileşenine sebep olur. Kesilen toplam alan A ve birleşme noktalarındaki ortalama kesme dayanımı τ ise;

$$F_{\text{Adhezyon}} = A \cdot \tau \quad 3.6$$

yazabiliriz. Yine de C ve D deki kaynak noktalarında kesme noktalarında kesme meydana geldiğinde, birbirleri üzerinde kayma için yüzeyler tam anlamı ile serbest değildir. Eğer üstteki yüzey alttaki yüzeyden daha sert bir malzemeden yapılmışsa, şekil 3.2 de gösterildiği gibi, sert malzemeli yüzey diğerinin üzerinde yiv açar veya onu kazır. Bu kazıma etkisi metal-metalde sürtünmede deformasyon teriminin oluşmasına sebep olur ve

$$F_{\text{deformasyon}} = F_{\text{kazıma}} \quad 3.7$$

yazılabilir. Bu sebeple metaller için 3.4 denklemini yeniden yazılırsa,

$$F = A \cdot \tau + F_{\text{kazıma}} \quad 3.8$$

haline gelir. Pekçok durumda kazıma terimi önemsiz olup 3.6 denklemini tüm harekete karşı olan F direncine katkı olarak incelenebilir. Bu denklemin her iki tarafını da W ile bölersek f kayma sürtünmesi için,

$$f = \frac{F}{W} = \frac{A \cdot \tau}{A_{\text{ger}} p^*} \quad 3.9$$

ifadesini elde ederiz. Burada W yerine 3.2.1 denkleminin sağ tarafı konulmuştur. Bu aşamada A kesme alanının A_{ger} plastik akma alanından farklı olduğunu düşündüren bir sebep yoktur. Böylece alan etkisi 3.9 denklemin sağ tarafında gözükmez.

$$f = \frac{\tau}{p^*} \quad 3.10$$

Bu bağıntı, Bowden ve Tabor'un önerdiği gibi, metaller için adhezyonun basit bir teorisini tanımlar.

İlginç bir gözlem şudur ki, eğer metallerde kayda değer bir pekleşme yoksa ara yüzeyin kesme dayanımı τ , metalin kritik kesme gerilmesi τ' ya yaklaşık olarak eşittir. Akma veya akma basıncı $p^* 5\tau$ civarındadır. Böylece 3.10 denkleminde $f=0.2$ bulunur. Pratikte havada birçok metal $f=1.0$ verir. Bu çelişki değme alanı büyümesi ve pekleşme olayları ile açıklanabilir.

3.3.1 DEĞME ALANI BÜYÜMESİ

1957 de Courtney-Pratt ve Eisner deneysel olarak düz bir yüzey ve yarı küre arasındaki teması incelediler ve temas alanının tek bir dairesel bölge olduğunu gösterdiler. Daha sonra büyük miktarda kayma oluşana kadar yavaşça artan bir teğetsel kuvvet uyguladılar ve temas alanının kaymadan önceki alanın üç dört katı kadar arttığını buldular. Bunun sebebi,

$$p^2 + a^2 t^2 = p^{*2}$$

3.11

kriterine göre değme alanının plastik akması normal ve teğetsel gerilmelerin (p ve t) birlikte etkileri ile kontrol edilmesindendir. Burada a nın değeri 10 civarında bir sabittir. İlk olarak normal yük uygulandığında pürüz tepelerindeki lokal basınç, daha önce tanımlandığı gibi, hızlı bir şekilde akma değeri p^* a yaklaşır ve özel bir bölgede temas alanı A_i şöyle ifade edilir:

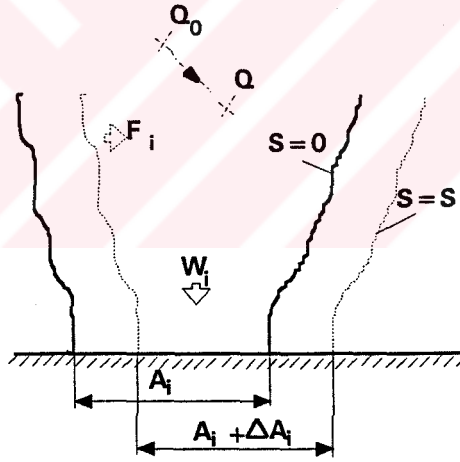
$$A_i = \frac{W_i}{p^*}$$

3.12

Teğetsel kuvvet F_i nin sonraki uygulaması küçük bir t teğetsel gerilmesini için içine katar ve 3.12 denklemini, p^* 'dan sonra p_i ye düşerse doğrulanabilir. (p_i : elastik basınç). Böylece temas alanı A_i nin;

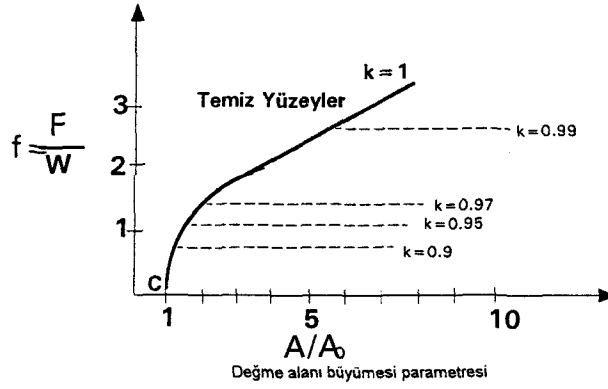
$$A_i + \Delta A_i = \frac{W_i}{p_i} \quad 3.13$$

değerine yükselmesi gerekir. p_i bu durumda elastik olduğundan 3.13 denkleminde göre; değme alanı büyümesi p_i 'nin p^* değerinin altına düştüğü zaman, gözönüne alınmayabilir. Yine de toplam basınç $\sqrt{(p^2 + \alpha^2 \tau)}$ plastik akma durumuna karşılık geldiğinden malzeme hala plastik davranışı gösterir ve değme alanı büyümesi devam eder. Eğer yüzeyler çok temizse kopma oluşmadan önce ΔA_i 'nin A_i nin 9 kat değerine ulaşabilmesi mümkündür.



Şekil 3.3 Değme Alanının Büyümesi

Şekil 3.3, temas eden metal yüzeylerden birinin mükemmel düzgünlükte olduğu zaman değme alanı büyümesi olayını şematik olarak gösterir. Şekil 3.4 deki grafik, kesilmeden önce yüzey kirliliğinin değme alanı büyümesinin büyüklüğüne etkisini gösterir. Temizlik faktörü k' yı, burada gösterildiği gibi, $k=t/t'$ olarak tanımlarsak (τ : pisliğin olduğu ara yüzeydeki kesme dayanımı ve τ' : metalin kritik kesme dayanımı) daha temiz yüzeyler için kesme, sürtünmenin daha yüksek değerlerinde meydana gelir.



Şekil 3.4 Yüzey temizliğinin fonksiyonu olarak değme alanı büyümesi

Değme alanı büyüme parametresi, sıfır teğetsel kuvvet için toplam temas alanına, sonlu teğetsel kuvvet için toplam gerçek temas alanının oranı olarak ifade edilir. Tek bir değme alanına göre;

$$A = \sum_{i=1}^M (A_i + \Delta A_i) \quad 3.14$$

$$A_0 = \sum_{i=1}^M A_i$$

olur. C noktasının sıfır büyümeye karşılık geldiği ve bu durum için $f=0$ olduğu görülür. Ayrıca kirlenmiş ara yüzeyin, t kesme dayanımı tarafından, sınırlı hale gelene kadar değme alanı büyümesinin ilerlediği görülür. Böylece $k=1$ veya $k=0$ kirlenme için değme alanı büyümesi sürekli devam eder. Oysa ki $f= 1.0$ katsayısı $k= 0.95'$ e karşılık gelir ve temas alanındaki 3 kat artışa denktir.

3.3.2 PEKLEŞME

Birçok metal, plastik akma oluştuğunda kayda değer bir şekilde pekleşir ve kaynak noktalarının dayanımı bu nedenle yumuşak metalinkinden daha büyüktür. Yüzeyler arasındaki izafi hareketi sağlayan gerekli kesme olayı bu nedenle bir düzlem boyunca meydana gelebilir ki

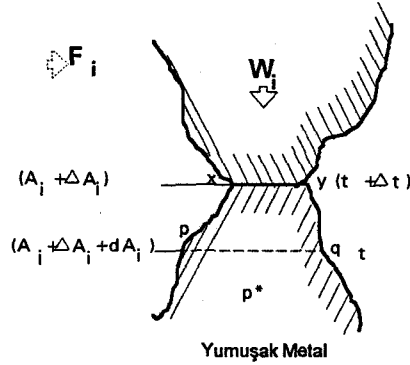
bu düzlem, lokal kaynama ile ifade edildiğinden farklıdır. Kritik kesme gerilmesi τ , $(\tau+\delta\tau)$ ' ya yükseltilir. $\delta\tau=0.2\delta p^*$; izafi hareketin meydana gelebileceği iki olası kayma düzlemini (xy ve pq) gösterir. Bu hasar oluşumu kriteri bir eşitsizlik ile ifade edilir:

$$(A_i+\delta A_i)\tau \leq (A_i+\delta A_i) (\tau+\delta\tau)$$

Basitleştirirsek;

$$\left[\frac{\delta A_i}{A_i + \Delta A_i} \right] \leq \left(\frac{\Delta P^*}{P^*} \right) \quad 3.15$$

Burada δA_i , orijinal ara yüzey xy ile karşılaştırılan, daha yumuşak malzemenin ana kütlesi içinde bulunan kesit alanındaki artıştır ve ΔA_i , değme alanı büyümesinden dolayı meydana gelen sonraki kesidin artışıdır. (3.15) denklemindeki eşitsizliğin sol tarafı sağ tarafındakinden daha küçük olduğu zaman, pq boyunca, büyük olduğu zaman xy boyunca, kesme yüzünden hasar meydana gelecektir. Eşitlik işareti, xy veya pq boyunca hasar meydana gelme olasılığının eşit olduğunu gösterir.



Şekil 3.6 Metallerde pekleşme etkileri

F_i ve W_i için şöyle yazabiliriz;

$$F_i = (A_i + \Delta A_i + \delta A_i) \cdot \sigma \quad 3.16$$

$$W_i = A_i (p^* + \Delta p^*) \quad 3.17$$

Bu eşitlikleri kullanırsak ve $(\Delta p^*/p^*)$ oranı için 3.15 denkleminde yerine koyarsak, M birleşme noktaları için şunları buluruz:

$$f = \frac{\sum F_i}{\sum W_i} \leq \frac{\tau}{p^*} \left[1 + \left(\frac{\sum \Delta A_i}{\sum A_i} \right) \right] \quad 3.18$$

Bu, genel olarak (3.10) denklemi ile ifade edilen basit adhezyon teorisi ile mukayese edildiğinde sürtünme katsayısındaki artışı gösterir. Pekleşme olmaksızın değme alanı büyümesi gözönüne alınırsa;

$$F_i = (A_i + \Delta A_i) \tau \quad 3.19$$

$$W_i = A_i p^* \quad 3.20$$

Böylece;

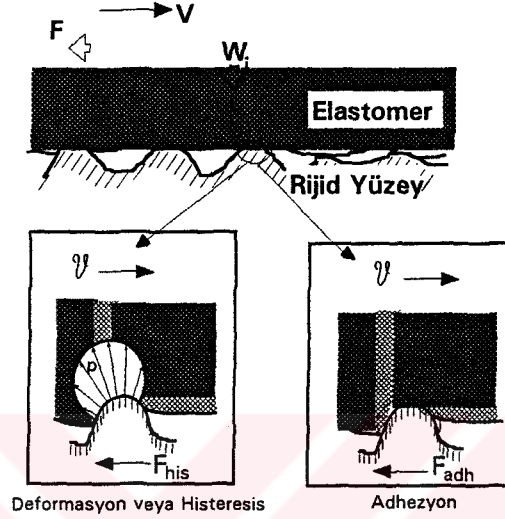
$$f = \frac{\sum F_i}{\sum W_i} = \frac{\tau}{p^*} \left[1 + \left(\frac{\sum \Delta A_i}{\sum A_i} \right) \right] \quad 3.21$$

olur. Bu denklem, 3.18'deki eşitlik işaretinin ya pekleşmenin olmadığı ve şekil 3.6'da xy boyunca kesme meydana geldiği zaman ya da pekleşme etkisi xy veya pq boyunca eşit bir kesilme olasılığı yarattığı zaman uygulanabilir olduğunu gösterir. Herhangi bir olayda, değme alanı büyümesinin tersine, sonrakinde bir artış üretilmemesine rağmen, pekleşme sürtünme katsayısına etki edebilir. [4]

3.4 POLİMER-METAL SÜRTÜNMESİ

Şekil 3.1.b'de gösterildiği gibi, elastomer ve karşı yüzey arasındaki temas alanı, rijid yüzeydeki her bir pürüz civarında elastomerin deforme

olması ile karakterize edilir. Sürtünme kuvvetinin adhezyon bileşenine olayların gerilme, kırılma ve gevşeme çevrimlerine göre, her iki yüzeyde açığa çıkmış yüzey atomlarının moleküler bağı sebep olur. [5]



Şekil 3.7 Elastomerik sürtünmenin ana bileşenleri

Şekil 3.7 tek bir pürüz üzerindeki kaymada oluşan toplam sürtünme kuvvetinin nasıl bir adhezyon ve bir deformasyon terimine ayrılabilirliğini gösterir. Deformasyon terimi, elastomerin belli bir pürüz tarafından deforme edildikten sonra eski haline dönmesindeki gecikmeden dolayıdır ve bu sürtünmenin histeresis denilen bileşeninin oluşmasına sebep olur. Bu nedenle 3.4 ve 3.7 denklemlerinin yerine aşağıdaki denklemleri yazabiliriz:

$$F_{\text{deformasyon}} = F_{\text{hist}} \quad 3.22$$

$$F_{\text{adhezyon}} = F_{\text{hist}} \quad 3.23$$

Şekil 3.7 de gösterildiği gibi, adhezyon belirgin olarak bir yüzey etkisidir. Oysa ki histeresis elastomerin viskoelastik özelliklerine bağlı kütleli bir olaydır.

Verilmiş hız ve sıcaklık aralığında, modern adhezyon teorileri adhezyonu, ısı ile harekete geçirilen etkilenmiş moleküler stick-slip prosesi olarak tanımlar. Sert bir malzemedan farklı olarak elastomer yapı, ısı hareketin sabit halde olduğu elastik zincirlerden oluşur. Bir elastomerle sert bir yüzey arasındaki izafi kayma esnasında yüzey tabakasındaki ayrı zincirler sert yüzeydeki moleküller ile bağ kurmaya meyillidirler. Böylece lokal bağ noktaları oluşur. Kayma hareketi bu bağların, yeni bağlar oluşmadan önce, gerilmesine, kırılmasına ve gevşemesine neden olur. Öyleki elastomer molekülleri yeni denge pozisyonlarına doğru moleküler bir mesafe katederler. Böylece moleküler seviyedeki stick-slip prosesi adhezyonun esas sebebidir ve bu olayı açıklamak için birkaç teori mevcuttur.

Makroskopik seviyede hem adhezyon hem de histeresis elastomerin viskoelastik özelliklerine tabidir. Eğer viskoelastik cisim için kompleks modül E^* 'yi, gerilmenin uzamaya oranı olarak ifade edersek;

$$E^* = E' + j E'' \quad 3.24$$

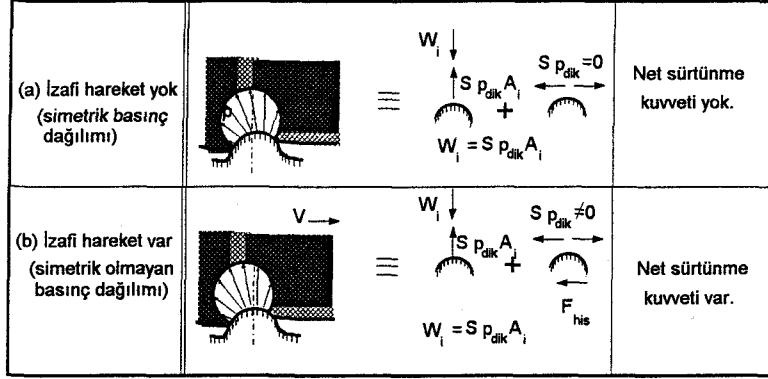
olduğu viskoelastik teoriden gösterilebilir. E' ; storage modülü veya gerilme - uzama oranıdır (gerilmenin uygulandığı durumdaki birim uzama bileşeni için) ve E'' ; 90° lik faz farkındaki birim uzama bileşeni için gerilme-uzama oranıdır. Tangant modülü; çevrim başına, kaybolan enerjinin (moleküler adhezyon modelinde ya oluşan bağların gerilme ve kopma çevriminde ya da deformasyon ve eski hale dönme çevriminde histeresisle beraber) depolanan enerjiye oranı olarak ifade edilir.

$$\tan \delta = \frac{E''}{E'} \quad 3.25$$

Verilen elastomer ve yüzey kombinasyonu için, sürtünme katsayısının adhezyon bileşeni şu bağıntı ile verilmiştir:

$$f_A = k_2 \frac{E'}{p'} \tan \delta \quad 3.26$$

p ; nominal basınç, r , değeri 0.2 civarında bir üs ve k_2 ; belli bir kayma kombinasyonuna bağlı bir sabittir. Bu eşitlik, moleküler-kinetik stick-slip prosesine rağmen, adhezyonun elastomerin viskoelastik özellikleri ile de ilişkili olduğunu açıkça gösterir.[6]



Şekil 3.8 Sürtünmenin histeresis bileşeninin fiziksel açıklaması

Sürtünmenin histeresis bileşeni Şekil 3.8 de görülmektedir. Bu şekil izafi kayma varken (a) ve yokken (b) tek tek yüzey pürüzü civarında basınç dağılımını gösterir.

İzafi hareketin olmaması elastomerin pürüz civarında simetrik olarak deforme olmasına sebep olur. Eğer pürüzlerin sınırlarına dik durumdaki basınç dağılımı dikey ve yatay bileşenler için yeniden çözülürse, toplam dikey basınçların W_i yükü ile dengede olması gerektiği ve yatay bileşenlerin ise birbirini götürmesi gerektiği görülür. Eğer yine de elastomer, karşı yüzey ile izafi olarak belli bir v hızı ile hareket ediyorsa pürüzün ilk temas yüzeyinde birikmeye ve aşağıya doğru olan eğimde daha üst noktada teması kesmeye çalışır. Böylece temas yayı statik durumla mukayese edildiğinde ileri doğru hareket eder ve bu etki kayma hareketine karşı koyan net F_{his} kuvvetine sebebiyet veren yatay basınç bileşenlerinin bulunduğu yerde simetrik olmayan bir basınç dağılımı yaratır.

Aşağıdaki eşitliğin elastomer sürtünmesinin histeresis bileşeni için geçerli olduğu gözükür:

$$f_H = K_3 \left(\frac{p}{E'} \right)^n \tan \delta \quad [n \geq 1] \quad 3.27$$

p ; nominal basınç, K_3 ; bir sabittir. f_H ve f_A 'nın direkt olarak tangant modülüne bağlı olduğu açıktır. Bu nedenle sürtünmenin her iki bileşeni aynı temel viskoelastik mekanizmaya tabidir. (3.26) ve (3.27) denklemleri birleştirilirse;

$$f = K_2 \left[\frac{E'}{p'} + K_4 \left(\frac{p}{E'} \right)^n \right] \tan \delta \quad 3.28$$

olduğu görülür. Buradan $K_3 = K_2 \cdot K_4$ dır. (3.28) denklemi pratik tasarım probleminde basınç ayarlamasının, adhezyon ve histeresis bileşenlerinin büyüklükleri arasında bir uyum gerektirdiğini ve optimum basıncın saptanmasında özellikle yüzey pürüzlülüğüne ve yüzeyler arasında yağlayıcının bulunup bulunmadığına bağlı olduğunu gösterir.

Yüksek sürtünme kuvvetinin sonucu aşınma veya abrazyondur. Bu; elastomerler söz konusu ise; yüzeyin tekstür yapısına bağlı olarak üç ayrı aşınma mekanizması ile ifade edilebilir. Çok keskin yüzeyler için abraziv aşınma, elastomer yüzeyinde (yüksek sürtünme katsayısına denk gelen) şiddetli bozulmalar meydana getirir. Yüzey pürüzleri biraz yuvarlatıldığında yorulma aşınması öne çıkar ve bu, yüzey bozulmasının izafi olarak daha yumuşak bir formda olmasını sağlar. Düz yüzeylerde yuvarlanma formasyonu ile oluşan aşınmanın, elastomerin yüzeyinde meydana geldiği ve bunu yüksek sürtünme katsayısının takip ettiği kanıtlanmıştır. Beton yol üzerinde pnömomatik tekerlerin kayması şeklinde verilmiş bir uygulamada, aşınmanın bu üç formu da aynı anda bulunabilir. Aşınmanın belki de en yaygın indeksi abraziv olarak aşınabilirliktir. γ şu şekilde tanımlanabilir:

$$\gamma = \frac{A'}{f} \quad 3.29$$

A' abrazyon faktörü ve f kayma sürtünme katsayısıdır.

3.5 KAYMA SÜRTÜNMESİNDE ISI OLUŞUMU

Birbirine göre izafi hareket eden cisimler arasında sürtünme kuvvetinin oluşumu esas olarak enerji kaybı mekanizmasıdır ve kayma yüzeyinde ısınma etkilerine sebep olur. Kaymanın daimi rejim şartları altında sıcaklık artışı için yaklaşık ifade basit bir boyut analizi uygulamasından çıkartılabilir. Belirli bir anda ve 1. bölgede temas durumunda iki pürüz düşünüldüğünde bağımsız değişkenlerden oluşan fonksiyonun bulunduğu yüzeyde sıcaklık artışı ΔT olsun;

$$\Delta T = \phi(f, W_i, V, \bar{k}, A) \quad 3.30$$

şeklinde. f ; kayma durumundaki sürtünme katsayısı (F_i/W_i), W_i ; yük, v ; kayma hızı, $\bar{k}$; ortalama ısı iletim katsayısı ve A ; gerçek temas alanıdır.

3.6. ADHEZYON

3.6.1. Makroskopik ve Moleküler Kavramlar

Birbirine göre izafi hareket eden yüzeyler arasında meydana gelen sürtünme kuvveti adhezyon ve deformasyon terimlerinden oluşur. Adhezyon terimi bir yüzey etkisidir ve moleküler boyutları aşmayan her iki yüzeydeki derinliklerde olduğu gözönüne alınabilir. Oysaki deformasyon terimi bir kütle olayıdır. Adhezyonun tam yapısı, moleküler seviyedeki bağların ortaya çıkmasından ve kopmasından olduğu kabul edilmesine rağmen, belli değildir. Metal-metal sürtünmesinde bağların oluşması ve kırılması izafi kayma boyunca makroskopik bir seviyede meydana gelir. Fakat bu olaylar esas olarak adhezyonun sebebinden ziyade etkisini gösterdiği şekilde ele alınabilir. Elastomerler için benzer şekilde, adhezyonu bir sonuç (makroskopik) veya bir sebep (moleküler) mekanizması olarak düşünmek mümkündür. Makroskopik görüşten, $F_{adhezyon}$ toplam sürtünme kuvveti için şunu yazabiliriz :

$$F_{adz} = \sum_{i=1}^M F_i = \sum_{i=1}^M A_i \cdot \tau_i \quad (3.31)$$

A_i ; kaba rijid yüzey ile elastomer arasındaki lokal makroskopik temas alanı, τ_i ; ara yüzeyin lokal kesme dayanımıdır. Moleküler seviyede Kummer teorisini uygulayarak her bir i bölgesi için şöyle yazılabilir :

$$F_i = n_i \cdot J_i \quad (3.32)$$

n_i ; 1.bölgede elastomer ve karşı yüzey arasındaki moleküler bağların sayısı ve J_i ; efektif bağ dayanımıdır. (3.31) ve (3.32) denklemlerinden;

$$\tau_i = \left(\frac{n_i}{A_i} \right) \cdot J_i \quad (3.33)$$

yazılabilir. Öyleki makroskopik modelin lokal kesme dayanımı moleküler bağ dayanımının bir fonksiyonudur.

Son 20 yılda elastomerlerin düz ve pürüzlü karşı yüzey üzerinde, yavaş bir kayma hızındaki performansını açıklayacak ancak birkaç adhezyon teorisi üretilmiştir. Bu teorilerin bazıları birbirine göre izafi hareket eden çiftin moleküllerinin moleküler-kinetik davranışı ile ilgilidir. Geri kalan teorilerin çoğu olayın görünüşü ile ilgili yaklaşımlardır ve bunlar elastomeri yay daşpot mekanik modeline dayanarak incelemişlerdir. Bu yaklaşım esas olarak elastomerin makroskopik davranışıyla ifade edilir ve elastomerin viskoelastik özellikleri ile açıklanır. Hem makroskopik hem de moleküler görüşler bu nedenle bugünkü teorilerde tekrar kullanılmışlardır.

Adhezyonun sebebi olan moleküler bağ mekanizması hakkında tam bir kesinlik olmamasına rağmen özellikleri oldukça iyi bilinir. Böylece adhezyonun belirli viskoelastik özellikleri olduğu hakkında genel bir anlaşma vardır ve oda sıcaklığında 0-3 cm/sn hız sınırları içinde adheziv sürtünme katsayısının bir maksimum değere çıktığı bulunmuştur. (3.4) denkleminde görüldüğü gibi deformasyon ve adhezyon terimlerini içeren sürtünme kuvvetinin tanımı bu aşamada tüm sürtünme mekanizmalarının fiziksel yorumu olarak bu ayrımın çok yararlı olduğu konusunda daha fazla

çalışma gerektirir. Aksi halde adhezyon ve deformasyon terimleri arasındaki ayırım çok kesin çizgilerle olmayacaktır. Hem adhezyonun hem de deformasyonun viskoelastik bir olay olduğu ve bu yüzden en azından bir dereceye kadar aynı moleküler kinetik davranışı göstermeleri gerektiği doğrulanmıştır. Üstelik deformasyon terimi elastomerin ara kayma yüzeyinden dışarıya doğru distorsiyonu sebebi ile oluşur. Ancak sürtünme kuvvetine nihai etkisi ara yüzeyde meydana gelir. Bu yüzden sürtünmeyi iki ayrı sebebe (yüzey ve kütle etkisi) ayırmada bir gelişigüzellik vardır. Gerçekten de son yapılan araştırmalar bunların ayrı olmadığını göstermiştir. Toplam sürtünmenin nedeni olan bu iki ayrı mekanizma kavramı (3.4) denklemine göre yazılmalıdır.

Toplam sürtünme kuvvetinin hesaplanmasında bazı çalışmalar adhezyona ve deformasyona ek olarak diğer iki terimi de gözönüne almışlardır. Böylece F :

$$F = F_{adz}^I + F_{def}^I + F_{kohezyon} + F_{viskoz} \quad (3.34)$$

şeklinde yazılmıştır. Burada $F_{kohezyon}$; kütle kayıplarına aşınmanın katkısı ve F_{viskoz} ; nemli şartlarda viskozite etkisidir. Gerçekte, etkin yüzey kuvveti $F_{kohezyon}$ ve F_{viskoz} 'un, etkin kütle kuvveti ise F_{def} ve $F_{kohezyon}$ 'un toplamıdır. Öyleki (3.4) denklemindeki basitleştirilmiş bağıntı geçerli olmaktadır. Hangi notasyonun benimseneceği aslında bir tercih meselesidir. Ancak kütle aşınma etkisinin (3.34) denkleminde bulunmayan yüzey aşınma bileşenine katkısı o kadar kesin değildir. Ayrıca (3.4) denklemindeki F_{adz} terimi verilen şartlar için ölçülen toplam yüzey kuvvetidir. Oysa nemli şartlar altında (3.34) denklemindeki F_{adz} teriminin fiziksel olarak pek bir anlamı yoktur. Mevcut bütün etkilerin gözönüne alındığı veya daha önce belirtilen etkilerin bağımsız veya birbirinden ayrı olduğu kesin olmadığı zaman (3.34) denklemindeki sürtünme kuvveti F^I bu terimlerin toplanması ile ifade etmenin pek fazla bir anlamı yoktur.

3.6.2. Mekanik Model Teorileri

Mekanik modellerin kullanımı ile adhezyon sürtünmesinin simülasyonu, yapılan deneylerle uyum halinde olan, beklenen sonuçları vermiştir. Adhezyon davranışının bu gibi makroskopik modelleri, kısmen basitliğinden kısmen de temel nedenlerden ziyade ölçülebilen büyüklüklerle ilgili olduğundan molekülerkinetik teorilerden daha fazla dikkat çekmişlerdir. Yine de bunların katkısı adhezyonun daha iyi anlaşılması için gerekli ve önemlidir. Bu nedenle Prandtl'in daha önceki çalışması dikkate değerdir.

3.6.2.1 Voigt-Prandtl Modeli

Prandtl düz bir yüzey boyunca rijid cismin kayma hareketini incelemiş ve sürtünme kuvvetinin mertebesini bulmak için basit bir mekanik model önermiştir. Yörüngenin yüzeyinde kayma hareketi yapan cisimdeki çapraz bağları çeken sinüsoidal olarak dağılmış bir kuvvet alanı oluşturduğu varsayılır. Rieger bu fikri kayma hareketi yapan bir kauçuk bloğa uygulamış ve Prandtl'in daha önceki çalışmalarını geliştirmiştir. Kauçuk zincirleri, kauçuğun ana kütlesini çapraz bağlarla bağlayan yaylarla simüle edilmişlerdir.

3.6.3 Adhezyonun Diğer Teorileri

Kummer'in birleştirilmiş teorisi esasen adhezyonu anlamaya yönelik moleküler bir yaklaşımdır. Ludema ve Tabor'un ikinci teorisi alanın basitleştirilmiş süperpozisyonunu ve polimer sürtünmesinin beklenen viskoelastik tepe karakteristiğini veren, kesme dayanımı fonksiyonlarıdır.

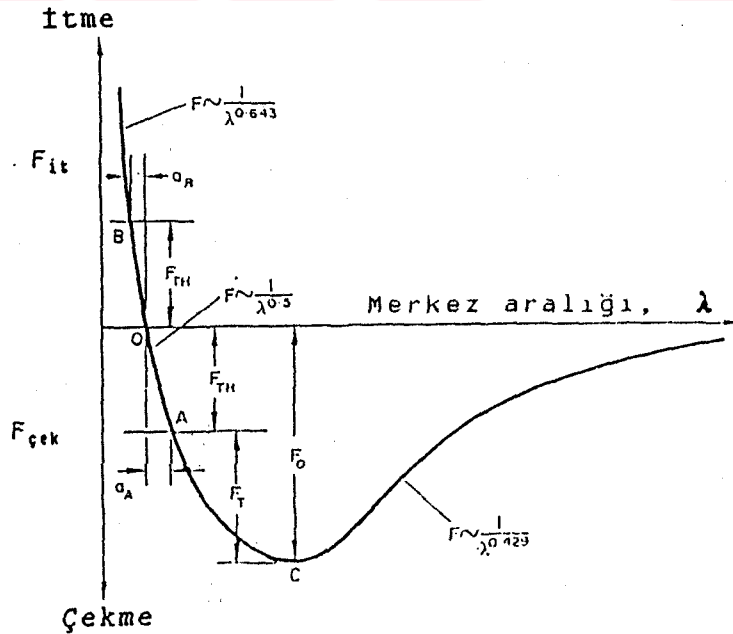
3.6.3.1 Birleştirilmiş Teori

(3.2) denkleminde adheziv sürtünme katsayısı f_A için şunu yazabiliriz :

$$f_A = \sum_{i=1}^M F_i / W = \sum_{i=2}^M n_i J_i / W = N_j / W \quad (3.35)$$

$$N = \sum_{i=1}^M n_i = M.n$$

Burada M makroskopik bölgelerin toplam sayısı, n her alan başına moleküler bağ sayısı ve N ortalama bağ dayanımı j nin toplam sayısıdır. Bu safhada N ve j ifadelerini çıkarmak gerekir. İlk karakteristik olarak 3.9. de gösterildiği gibi, atomların ve moleküllerin arasında bunların merkez mesafelerinin fonksiyonu (λ) olarak itme ve çekme eğrilerini düşünelim.



Şekil 3.9 Moleküler çekme ve itme

0 noktası mutlak sıfır sıcaklığında bir çift molekülün denge pozisyonuna karşılık gelir. T sonlu sıcaklık için moleküller ısı enerjilerinin sonucu olarak bu nokta etrafında titreşirler ve aynı şekilde herhangi bir titreşim dairesinde moleküller arası en yakın mesafedeki moleküler çift arasındaki maksimum itme kuvveti, tam olarak moleküller arası en büyük mesafedeki maksimum çekme kuvvetine eşittir. (Bu hareket çekme esnasında itmeye nazaran maksimum kuvvet seviyesinde daha büyük hareket genliği gerektirir. Şekilden de görüldüğü gibi mesela $a_A > a_R$ dir). Titreşim genliği sıcaklıkla artar ve C noktasında sıcaklık her bir molekülü komşu molekülün çekim alanından kurtaracak kadar büyüktür. Yine de A noktasındaki T sıcaklığı kurtulmayı sağlayacak olan F_f direnç kuvvetini yenecek kadar fazla değildir. F_f için şunu yazabiliriz:

$$F_f = F_0 - F_{\text{direnç kuv.}} \quad 3.36$$

F_0 mutlak sıfır sıcaklığında yenilmesi gereken direnç kuvveti ve $F_{\text{direnç kuv.}}$ T sıcaklığında ısı hareket tarafından aşılacak direnç kuvvetidir. Titreşim molekülün ortalama kinetik enerjisinin molekülün termal enerjisine eşitliğini şöyle yazabiliriz:

$$V = \sqrt{2 \cdot C_p \cdot T} \quad 3.37$$

C_p , T sıcaklığında molekülün özgül ısıdır. Eğer yatay pozisyona göre çekim eğrisinin OA parçasına C dersek;

$$F_{\text{direnç kuv.}} = C \cdot a_1 \quad 3.38$$

ve de

$$v = w \cdot a_4 \quad 3.39$$

yazabiliriz. w titreşim frekansıdır (10^{13} civarında). (3.38) deki $F_{\text{direnç kuv.}}$ ni (3.36) da yerine koyarsak, (3.39) daki a_4 ve (3.37) deki v yi kullanırsak F_T ifadesi;

$$F_T = F_0 - \left(\frac{C}{w}\right) \cdot \sqrt{2 \cdot C_p \cdot T} \quad 3.40$$

haline gelir. Direnç kuvveti F_T bir molekülün λ mesafesindeki komşusundan ayrılabilmesi için aşılması gereken bir elektriksel engel olarak gözönünde tutulabilir. F_T/λ oranına, sürtünme bileşeni histeresisini kontrol eden mekanik pürüzlülük etkileri ile benzeşiminden dolayı, **elektriksel pürüzlülük** adı verilmiştir. Şekil 3.9 daki eğrinin elektrostatik çekme ve itme ile ilgili olmasına ve bu nedenle eğrinin 20° 'ü aşan moleküler mesafeler için hiçbir geçerliliği olmamasına rağmen ve sürtünme yüzeyinin karşısındaki en yakın olası molekül mesafesi hemen hemen 100° olmasına rağmen bağın periyodik oluşumunu ve kopmasını sağlamak için sürtünme yüzeyleri arasında bu yapının mekanizmasının etkin olması gerektiği gözönünde tutulmalıdır. Bu teoride, tek tek bağlantılar için bağ oluşum ve kopma mekanizmalarına hiçbir neden olmadığı iddia edilmiştir.

Bağ dayanımı j , moleküler mesafe λ nin oluşum, gerilme, kopma ve gevşeme çevrimi boyunca elastomerin sebep olduğu enerji kaybına bölünmesi şeklinde tanımlanır. Böylece;

$$j = E.a/\lambda \quad (3.41)$$

olur. Elastomer zincirlerinin gerilmesinin bir yüzey değerine göre izafi kayma yaparken karşılıklı çekim yüzünden olduğu iddia edilir. (Şekil 3.9). Gerilme, direnç kuvveti F_T yi yenmek için yeterli olduğu takdirde bağ kopması meydana gelir ve kırılma çevrimi yeni bir bölgede tekrarlanır. Enerji kaybı çevrimi E_d nin $\delta_o^2 \cdot \tan \delta$ çarpımı ile (δ_o bir evvelki kopmada zincirin maksimum uzamasıdır) orantılı olması gerektiğinden ve bu durumda δ_o in da F_T ile orantılı olmasından (3.41) denklemi için şunu yazabiliriz.

$$j = C_1 \cdot F_T^2 \cdot \tan \delta / \lambda \quad (3.42)$$

C_1 bir sabittir. Gerçekten (3.42) de (3.40) yi yerine koyarsak sürtünme kuvveti F için bir ifade de sıcaklık ve hızın j ye bağıllığını verecektir. Fakat Kummer teorisinde bu aşamayı gözönüne almamıştır. Bağ sayısı N için de bir ifade çıkarılmıştır ama (3.35) de tekrar yerine konmamıştır. Eğer N , görünür alan $A_{g\ddot{o}r}$ ile birtakım yollarla orantılı ve $W = A_{g\ddot{o}r} \cdot p$ ise 3.42 için şöyle yazabiliriz :

$$f_A = C_2 \cdot \left(\frac{F_T^2}{\lambda \cdot p} \right) \cdot \tan \delta \quad 3.43$$

Aynı yazar tarafından yapılan sonraki çalışmada f_A için şöyle bir ifade verilmiştir :

$$f_A = C_3 \cdot \left(\frac{N}{N_o} \right) \cdot \left(\frac{F_T}{\lambda} \right)^2 \cdot \frac{E'}{p'} \cdot \tan \delta \quad 3.44$$

C_3 bir sabittir. $s > 1$ olup izafi kayma hareketi yapan malzeme çiftine bağlı bir üs ve $r < 1$ olup basınca bağlı bir üstür (N/N_o) oranı olası moleküler bağların ve E' Young modulünün küçük bir parçasıdır. (3.44) denklemi, daha sonra görüleceği gibi, diğer araştırmacıların sonuçları ile uyuşmaktadır. Fakat bu teorinin önemi asıl adhezyon ve histerisis mekanizmalarının sürtünme için geliştirilmesindedir.

3.6.3.2 Adhezyonun Basit Teorisi

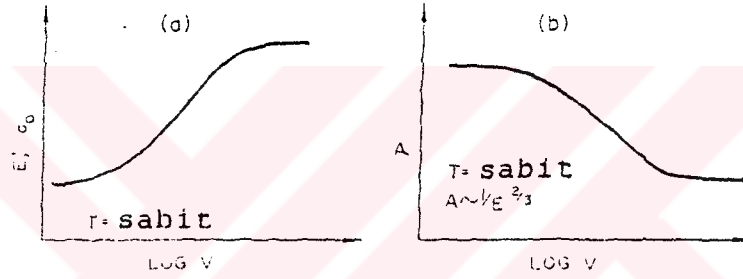
Ludema ve Tabor'a göre adhezyonun basit teorisi, viskoelastik malzemeler halindeki katı cisimler için temel adhezyon denkleminin ikna edici uygulamasını ve ustalığını gösterir. İzafi kayma hareketi yapan yüzeyler arasındaki sürtünme kuvveti, basit bir bağıntı olan $F = A \cdot \tau$ ye göre gerçek temas alanının ve etkin kesme dayanımının çarpımı ile orantılıdır..

$$F = A \cdot \tau \quad 3.45$$

Elastomer yüzeyi üzerinde rijid kürenin yavaş hızda kayması için temas alanının Hertz teorisine göre $E^{-2/3}$ ile orantılı olduğu gösterilebilir. E veya E' daha önce tarif edilmiştir. E' nin w frekansı veya v hızı ile değişimi viskoelastik teoriden bilinmektedir ve bu daha yüksek deformasyon frekanslarında (Şekil 3.10.a) elastomerin etkin sertleşmesi olarak yorumlanabilir. Bunu, temas alanı A' nın (Şekil 3.10.b) E' eğrisine doğru

azalan bir grafik çizmesi takip eder. Halaunbrenner, Kubisz ve Moore tarafından yapılan ayrı ayrı çalışmalar, kauçuk üzerindeki silindirler ve küreler için artan kayma hızı ile A' daki azalmanın tam yapısını doğrular.

Kayma hızı v ile etkin kesme gerilimi τ' nin değişiminin tahmini, benzer bir mantıkla elde edilir. Önerilen teoride τ' nun, çekme gerilmesi σ_0 olarak kopma noktasında hıza aynı şekilde bağlı olduğu farzedilmiştir.



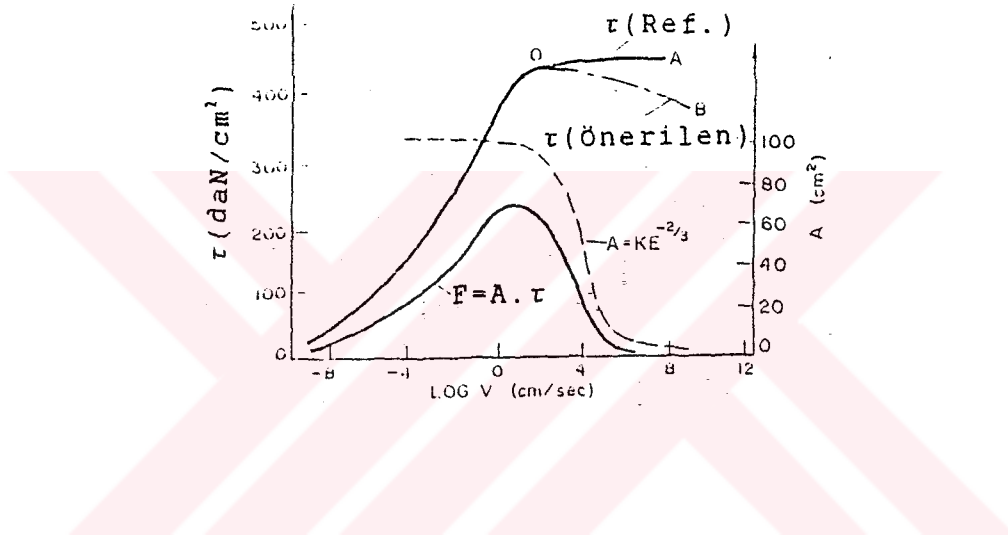
Şekil 3.10 E' , s ve A nın kayma hızı ile değişimi

Bu eğri deneysel sonuçlardan çıkarılmış olan şekil 3.10.a' da gösterilmiştir. Böylece A ve τ , $A \cdot \tau$ çarpımının Şekil 3.11 de gösterilen viskoelastik davranışın karakteristik noktasını ortaya çıkardığı durumda kayma hızı v ile değişirler. Elastomerin yükleme hızı r_L , kayma hızının (1 cm/s civarında) temas çapına (yaklaşık 1 nmm) bölünmesidir ve bu 10/s i verir. Diğer bir deyişle, eğer biz elastomerin çok ince bir tabakasında (100 Å° veya 10^{-6} cm civarında) kesmenin meydana geldiğini farzederek 1 cm/s lik kayma hızında kesme hızı r_s yaklaşık olarak $10^6/s$ dir. Böylece;

$$r_s / r_L = 10^5$$

olup τ -eğrisi A-eğrisine göre 5 birim sola gider. Bu, $A \cdot \tau$ çarpımının viskoelastik tepeyi verdiğini gösterir. Çünkü aksi takdirde $A \cdot \tau$ çarpımının makul bir doğru karakteristiğini göstermesi gerekirdi.

Bu basit teori, Şekil 3.11 deki τ -v eğrisinin şeklini tahmin etmek için, diğer kaynaklardan çıkarılmış σ_0 -v çizimine dayanmak yerine viskoelastik kesme hızı denklemini kullanarak geliştirilebilir.



Şekil 3.11 F'nin basit üretim ile viskoelastik yapının açıklaması

Bu teori, özellikle çok basit bir şekilde, adhezyonun sebeplerinden ziyade etkilerini açıklar. Yine de bu basitlik hızın fonksiyonu olarak viskoelastik malzemelerde kayma işleminin açık bir şekilde anlaşılmasını sağlar. Orijinal teoride τ' nin ilk tahmini değeri, diğer kaynaklardan w değerinin kullanılmasıyla bulundu. Sürtünme kuvveti $F = A \cdot \tau$ nin sonucu gözlenen sürtünmeden 10 kat daha büyüktür. Ara yüzey elastomerin ana kütlesi kadar dayanıma sahip olmadığından, bu bir sürpriz değildir ve bu yüzden $\tau < \sigma_0$ dir. Gerçek temas alanının, nominal değer A' dan daha küçük olması ihtimalden ziyade gerçektir. Bu değişikliklerle teorik ve deneysel sonuçların daha yakın bir şekilde uyuşacakları kesindir. Böyle bir uyum olmaması halinde bile yine de teori, kapsamlı bir sürtünme kuvveti

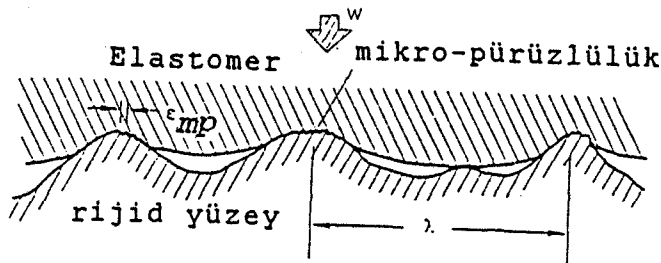
taininde A ve τ terimlerinin açıkça vurgulaması bakımından büyük avantaja sahiptir.

3.6.4 Bir Temas Problemi Olarak Adhezyon

Bundan önce tartışılan adhezyon teorileri, mikro pürüzlülüğün ara yüzeyde var olduğunun düşünülüp düşünülmediği belli olmamasına rağmen nominal olarak düz kayma yüzeyleri gözönüne alınmıştır. Pratikte yüzeyler yine de, Şekil 3.12 de gösterildiği gibi, hem makro hem de mikro pürüzlülük etkilerini ortaya koyar ve bunlar, bu esnada uygulanan W yükünün etkisi altında elastomerin bu yüzeyler üzerinde deforme olduğu zaman gerçek temas alanını direkt olarak tayin eder. Makro pürüzlülük belli bir ortalama λ dalga boyuna sahiptir ki bunlar genellikle işlenmiş yüzeylerde 1/100 inç, kaba yüzeylerde 1/2 inç limitleri arasında değişirler. Verilen bir W yükü için, makro pürüzlülüğün her bir pürüzünde ortalama gerçek basınç p,

$$p = \left(\frac{A_{g\ddot{r}}}{A_{ger}} \right) p_{g\ddot{r}}$$

bağıntısına göre, görünür veya nominal basınç $p_{g\ddot{r}}$ ü epeyce geçer.



Şekil 3.12 Temas alanında makro ve mikro pürüzlülük etkileri

Burada $A_{g\ddot{or}}$ tamamen düz yüzeyler için temas alanı olarak tasavvur edilebilir ve A_{ger} ,  ekil 3.12 de gösterilen gerçek yüzey için pürüz tepelerindeki herbir alanın toplamıdır. Adhezyon teorilerinin hemen hemen hepsi f_A' nın p basıncı ile ters orantılı olduğunu gösterir. Öyleki makro p r zl l   n mevcut olması adhezyon katsayısını d    r r. (3.45) denklemine göre, sürtünme kuvveti F , $A_{ger} < A_{g\ddot{or}}$ olduğu için azalır. A_{ger} de daha fazla azalmanın meydana geldiği kesin olmasına rağmen bu safhada mikro p r zl l   n tam etkileri tahmin edilemez. Mikro p r zl l   n $\lambda \sum M_R$ dalga boyu (extra ince honlama işleminde) 10μ -in  (kaba yüzeylerde) 4000μ -in  arasında de i ir.

Bir yüzeyin optimum patinaj yapmama özelliklerini elde etmek için belirgin bir tekstür modeli göstermesi arzu edilir ve bu, adhezyon azalması ile  eli ir. Bu çelişkili görüntünün çözümü nemli ve kuru kayma şartları arasındaki belirginlikte yatar. Kuru durum için, düz yüzeylerde maksimum adhezyona ula ıldı ına şüphe yoktur ve ara yüzey alanı maksimum değerde iken moleküler ba  mekanizması en geniş alana yayılır. Nemli  artlar altında, yine de, sıvı ara yüzey filmi uniform olarak yayılır ve bu yüzeyin elektriksel pürüzlülüğünü etkili bir şekilde önler. Böylece adhezyon çok d    k bir değere iner. Katı yüzey belirgin bir makro p r zl l   e sahip olduğu zaman pürüzler arasındaki boşluklar nemli şartlar altındaki sıvı için depo gibi davranır ve herbir pürüz tepesindeki basınç dağılımı bölgeyi boşaltma etkilerini destekler. Bu yüzden yüzey, tamamen düz durumla kar ıla tırıldı ında, makro p r zl kl  k gösterdiği zaman nemli şartlar altında belli bir adhezyon için daha uygun şartların oluşması ihtimali mevcuttur. Bu olasılık pürüz tepelerinde belirgin bir mikro p r zl l  k sağlayarak epeyce arttırılır. Bütün sonuçlar, mikro p r zl l   n bir dereceye kadar azaltılmasına rağmen, rutubetli ortamda makro ve mikro p r zl l   n birle tirilmi  etkilerinin adhezyon katsayısındaki d      kuru haldeki değerin altında minimize etmesidir.

Verilen bir durumda, herhangi bir adhezyon teorisinin gözönünde bulundurulmamasının en uygun çözüm olduğu sonucuna varılır. Adhezyonun kendisi esasen bir temas problemidir. Bugünkü durum şudur ki elastomer ve herhangi bir p r zl l  kteki rijid karşı yüzey arasındaki tam temas alanının deneysel olarak saptamanın fevkalade zor olmasıdır.

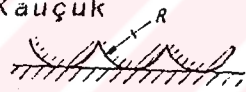
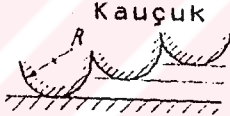
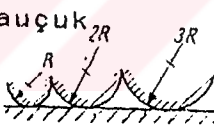
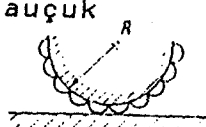
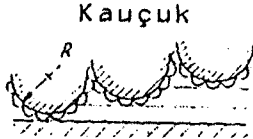
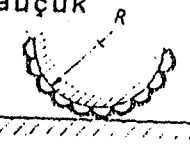
Matematik olarak modellenmiş bir veya birden fazla pürüz durumunda (genellikle silindirler ve küreler) sonuçlar literatürde mevcuttur ve bunlar rijid bir düz yüzey üzerine basan kauçuk bir kürenin farklı düzenlemelerinin durumu için Tablo 1. de verilmiştir. Gerçekten kauçuğun elastik olarak davrandığı kabul edilir ve Hertz denklemlerinin uygulanması genelde temas alanı A nın (p/E) ile orantılı olduğunu gösterir. Kragelskii $n = (2s/2s+1)$ i tanımlamıştır ki burada s belli bir geometrik düzenleme için modelin karmaşıklığı ile arttığı kabul edilen karakteristik bir değerdir. En karmaşık durumlar için $n \rightarrow 1$ olduğu gözlenmiştir. Fakat bu durumda bile rijid karşı yüzeyin de gerçekten böyle olmamasına rağmen düz olduğu kabul edilmiştir. Gerçek temas alanı ve buna bağlı olarak F , Tablo 1.deki verilerden hesaplanabilir.



Tablo 1. Düz rijid yüzey üzerindeki kauçuk kürelerin farklı düzenlemeleri için temas alanının tespiti.

Genel ifade : $F = A \cdot \tau$ $A (p/E)^n$

$$n = \frac{2s}{2s+1} \quad (\text{Kragelskii})$$

Yazar	Pürüz tipi	şematik	s	n
Schallamach	Muhtelif küreler	Kauçuk 	1	2/3
Archard	Muhtelif küreler lineer yükseklik dağılımı	Kauçuk 	2	4/5
Schallamach	Farklı yarıçaplarda muhtelif küreler	Kauçuk 	3	6/7
Lodge and Howell, Archard	Küresel çıkıntılara sahip tek küre	Kauçuk 	4	8/9
Archard	Bir önceki şeklin muhtelif küreleri lineer yükseklik dağılımı	Kauçuk 	7	14/15
Archard	Küresel çıkıntılara sahip küreler, herbiri küresel mikro-pürüzlülüklü	Kauçuk 	22	44/45

Pratikte, yine de, tekstürün, hızın, viskoelastik kıvrımın sıcaklık ve elastohidrodinamik etkileşiminin gelişigüzel oluşu (rutubetli şartlar için), tatminkar sonuçların hiçbir zaman uygulanamayacağı bir dereceye kadar herhangi bir analizi imkansız kılar. Bu yüzden gerçek temas alanını deneysel olarak tayin etmek için güvenilir bir metodun geliştirilmesi istenir. Öyleki adhezyon teorilerinden biriyle birleştirilmiş bu bilgi, düşük kayma hızlarında adhezyon sürtünme katsayısı veya sürtünme kuvvetini mukayese etmek için kullanılabilir.

3.7 SÜRTÜNMEYE ETKİ EDEN PARAMETRELER

İzafi kayma hızı, basınç veya yük, sıcaklık, nem, malzeme çifti ve yüzeylerin durumu sürtünmeye etki eden temel parametrelerdir.

3.7.1 İzafi Kayma Hızı

Daha önce yapılan deneylerde izafi kayma hızının sürtünme katsayısına etkisi araştırılmıştır. Blanchet ve Kennedy'nin [6] yaptığı deneylerde, dolgunsuz polimerlerde artan hızla birlikte sürtünme katsayısının da arttığı açık bir şekilde görülmesine rağmen dolgulu polimerlerde değişim bu kadar kesin değildir. Shirong'un [7] PVC üzerinde yaptığı deneylerde sürtünme katsayısının başlangıçta hızla birlikte düştüğü daha sonra ise sabit kaldığı görülmektedir. Tanaka'nın [8] yaptığı deneylerde ise düşük yoğunluklu polietilende (LDPE) sürtünme katsayısının artan hızla azaldığı buna karşın yüksek yoğunluklu polietilende (HDPE) arttığı gözlenmiştir.

Kısacası sürtünme katsayısının polimer cinsine bağlı olarak izafi kayma hızıyla değişimi hakkında kesin birşey söylenemez.

3.7.2 Basınç veya Yük

Metal-metale sürtünmede sürtünme katsayısı yüzey basıncının çok fazla bağlı olmamasına rağmen viskoelastik özelliklerinden dolayı polimer-metal sürtünmesinde sürtünme katsayısı yüzey basıncına bağlıdır. Shirong'un PVC üzerine yaptığı deneysel çalışmada sürtünme katsayısının başlangıçta basınçla azalırken daha sonra sabit kaldığı görülmektedir. Briscoe, Pogorian ve Tabor'un [9] yaptığı çalışmada da HDPE' in yük arttıkça sürtünme katsayısının başlangıçta sabit kaldığı daha sonra birden arttığı, dolgu HDPE in sürtünme katsayısının ise yük ile değişmediği görülmektedir.

Değişik deneysel çalışmalardan da anlaşılacağı gibi, basınç veya yükün sürtünme katsayısına etkisinin polimerin cinsine bağlı olduğu söylenebilir.

3.7.3 Sıcaklık

Bütün malzemelerin sürtünmesinde geçerli olan sıcaklıkla ilgili kural polimerler için de geçerlidir. Yani sıcaklık arttıkça sürtünme katsayısı düşmektedir.

Mens ve de Gee'nin [10] 18 tip dolgu ve dolgusuz polimer üzerine yaptıkları deneyler bu kuralı teyit eder niteliktedir.

3.7.4 Nem

Polimer-metal çifti arasındaki sürtünme, polimer içindeki ve ortamdaki nemden etkilenir. Mens ve de Gee'nin su içinde, çeşitli polimerler üzerine yaptıkları deneylerde, katkılı polimerlerin katsayısının

havaya göre daha yüksek olduğu, diğer polimerlerde ise daha düşük olduğu görülmektedir.

3.7.5 Malzeme Çifti

Polimer-metal sürtünmesinde, polimer cinsine bağlı olarak sürtünme katsayısı değişir. Dolgusuz polimerlerde malzemenin viskoelastik özelliklerinden dolayı sürtünme katsayısı düşükken dolgulu polimerlerde bu özellik azaldığından sürtünme katsayısı daha yüksektir.

3.7.6 Yüzey Pürüzlülüğü

Polimer-metal sürtünmesinde, malzeme yüzeylerinin pürüzlülüğü arttıkça sürtünme katsayısı da artacaktır. Mens ve de Gee nin yaptığı deneysel çalışmada dolgulu polimerlerin yüzey pürüzlülüğü saf polimerlere göre daha fazla olduğundan sürtünme katsayılarının da daha yüksek çıktığı görülmektedir. Ancak uygulanan yük ve gidilen yol, yüzey pürüzlülüğünün sürtünme katsayısına etkisini değiştirebilmektedir. Gong, Punjixue ve Wang ın [11] yaptığı deneysel çalışmalarda, bazı katkılı polimerlerin sürtünme katsayısı alınan yolla azalırken bazılarınıninkinde arttığı tespit edilmiştir.

BÖLÜM 4 . AŞINMA

4.1 TEMEL KAVRAMLAR

Polimerlerin aşınması ve abrazyonu, proseslerin kombinasyonuna bağlı olarak mekaniği, mekanik kimyayı ve termokimyayı içerecek tarzda kompleks bir olaydır. Böylesine kompleks bir olayın mekaniğini incelemek için öncelikle daha basit prosesler detaylı olarak incelenmelidir. Daha sonra aşınma olayının genel hatları ile ortaya çıkan sonuçlarını buna bağlamak gerekir. Sürekli aşınmanın tam olarak ne olduğu, nasıl ölçülmesi gerektiği, büyüklüğünde hangi faktörlerin rol oynadığı, nasıl minimize edilebileceği ve nasıl kontrol edileceği gibi sorulara gittikçe daha çok dikkat edilmektedir.

Bağ oluşum mekanizması, gerilmenin ve kırılmanın enerji kaybı olduğu, bu nedenle de geri dönülemez bir işlem olduğunu anlatan adhezyonun moleküler-kinetik teorilerini tamamlar. Adhezyonun varlığı geri dönülmezliğin bir göstergesidir ki burada adhezyon ne kadar küçük olursa olsun kayma yüzeylerinde bazı fiziksel bozulmalara sebep olur. Bu görüş, rijid ve pürüzlü yüzey üzerinde polimerler için kabul edilir. Fakat, rijid yüzeyin düz olması halinde bu, tartışmaya açıktır. Yine de, gerçekten düz veya pürüzlü yüzeylerde ortaya çıktığı görüşünü savunmak tutarlı olmayacaktır. Bir Sovyet araştırması düz yüzeylerin, polimerin yüzey tabakaları içindeki yuvarlanma oluşumu yüzünden, abrazyonun yeni formuna katkıda bulunduğunu açıkça göstermektedir. Abrazyonun büyüklüğü fiziksel ölçüm olarak çok küçük ve mikroskopik olduğundan, en düz yüzeyler arasındaki en küçük kayma hızlarının ürettiği aşınma veya abrazyonu deneysel olarak göstermek epeyce zordur. Yine de bütün durumlarda abrazyonun adhezyona eşlik ettiğini farzetmek makul görünür ve pratik tasarımlar, minimum aşınma ile maksimum adhezyonun çelişkili oluşma şartları arasında bir uzlaşma sağlamalıdır.

Tasarımcılar ve teknolojik gelişmelere katkıda bulunanlar, izafi kayma hareketi yapan makina parçaları arasındaki yağlama azaldığında ortaya çıkacak sonuçları bilmelidirler ve bu nedenle türleri, aşınma mekanizmalarını ve teorilerini göstermek ve adhezyon ve abrazyon arasındaki mümkün olan bağıntıları kurmak gerekir.

4.2 AŞINMANIN ÖLÇÜLMESİ

Aşınma; ya ağırlık kaybı olarak, ya hacim değişimi olarak ya da sürtünen parçaların bir veya ikisinin boyutundaki ya da hacmindeki değişiklik olarak ölçülebilir. Bir araştırma sonuçları bu aşınma ölçülerinin her ikisinin de kullanımını gösterir ve bu araştırmada üç farklı aşınma kriteri ileri sürülmüştür:

1. Lineer Aşınma Hızı

$$K_L = \frac{\text{Aşınan tabakanın kalınlığı}}{\text{Kayma mesafesi}} \quad 4.1$$

$$K_L = \frac{h}{L}$$

2. Volumetrik Aşınma Hızı

$$K_v = \frac{\text{Aşınan tabakanın hacmi}}{\text{Kayma mesafesi} \times \text{Görünür alan}} \quad 4.2$$

$$= \frac{\Delta V}{LA_g}$$

3. Enerjitik Aşınma Hızı

$$K_E = \frac{\text{Aşınan tabakanın hacmi}}{\text{Sürtünme İş}} \quad 4.3$$

$$= \frac{\Delta V}{FL}$$

$\Delta V = A_E \cdot h$ olduğundan lineer ve volumetrik aşınma hızları boyutsuz ve idantiktir. Enerji bazlı ve lineer aşınma hızları, aşağıdaki gibi, birbirleri ile bağıntılıdır:

$$K_E = K_L \cdot (A_g / F) \quad 4.4$$

Burada F sürtünme kuvvetidir. K_E abrazyonun enerji indeksi olarak ifade edildiğinden F_L kilowatt-saat olarak ölçülür. Bazen ağırlığa dayalı K_W aşınma hızı aşağıdaki gibi kullanılır:

$$K_W = \frac{\Delta V}{LA_g} = \rho K_v \quad 4.5$$

ΔW , ana malzemeden aşınma nedeni ile kopan parçalar yüzünden oluşan ağırlık kaybı ve ρ , aşınmış polimerin yoğunluğudur.

Lineer volumetrik, ağırlığa dayalı ve enerji bazlı aşınma hızları denklemlerle tanımlanmıştır. Bunlar tipik temas noktasının a boyutu ile kayma mesafesi L nin yer değiştirmesi ile düzeltilebilirler. Bu şekilde parametrelerin yeni durumu elde edilir ve bunlar genellikle spesifik aşınma hızları olarak sınıflandırılırlar. Düzeltilmiş bu parametreleri yeniden elde etmenin burada herhangi bir faydası yoktur ve bunlar önceki tanımlamalara pek fazla katkıda bulunmazlar. Önemli bir aşınma indeksi abraziv olarak aşınabilirlik şeklinde verilmiştir:

$$\gamma = \frac{\text{Abrazyona uğrayan hacim}}{\text{Sürtünme işi}}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{\Delta V}{FL} = \frac{\Delta V}{fWL} \\
&= \frac{(\Delta V / WL)}{f} \\
&= \frac{A'}{f}
\end{aligned}
\tag{4.6}$$

Burada L kayma mesafesi, A' abrazyon faktörüdür. (4.3) ve (4.6) denklemlerinden enerji bazlı aşınma hızı K_E ve aşınabilirlik γ idantiktir. Böylece;

$$K_E = \gamma \tag{4.7}$$

Bu konudaki bir araştırma enerji bazlı aşınma hızı tanımını kullanmıştır. Halbuki İngiltere'de aşınabilirlik parametresi tanımlanmıştır. Abrazyon faktörü A' önemlidir. Çünkü sürtünme katsayısı f ye abraziv olarak aşınabilirlik γ bağlıdır ve aşınma faktörü yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Sovyet çalışması abrazyon çalışması için alternatif bir ölçüm metodu kullanmıştır. Diğer bir deyişle abrazyon direnç katsayısı β ;

$$\beta = \frac{\text{Sürtünme işi}}{\text{Abrazyona uğramış hacim}}$$

$$= \frac{FL}{\Delta V}$$

$$= \frac{1}{\gamma} = \frac{f}{A'}$$

$$= \frac{1}{K_E}$$

4.8

dir. Bu tanımlamalar ileriki bölümlerde abrazyon teorilerini kurmada çok faydalıdır ve bunlar metal-metal ve polimer-metal sürtünme olaylarına aynı derecede uygulanabilirler. [12]

Metallerin durumunda, yine de aşınma etkisinin özel bir ölçümünden bahsetmeye değer. Düzgün ara yüzeyde ortaya çıkan serbest aşınma partiküllerinin ortalama çapı daha yumuşak metalin yüzey enerji/sertlik oranı ile bağıntılıdır. Yani;

$$d = K \left(\frac{W_{ad}}{H} \right) \quad 4.9$$

dir. W_{ad} temas halindeki metallerin adhezyon işi olarak tanımlanır. (Yüzey enerji terimleri için de ifade edilebilir.) H daha yumuşak malzemenin sertliği ve K bir sabittir. K sabiti işletme şartlarında bütün metal çiftleri için aynı değere sahiptir. (4.9) denkleminin genelliği aşınma ölçümünü faydalı ve makul bir hale getirir ve verilen herhangi bir kayma hareketinde aşınma parçacıklarının sayısı hakkında bir fikir vermemesine rağmen özellikle metal kesme ve talaşlı imalatla uygulanabilir.

Bu bölümde verilen denklemlere göre, herhangi bir özel uygulamada uygun aşınma indeksi seçimi için kafi miktarda kriter ortaya çıkmaktadır. Aşınma testlerinde sürekli ortaya çıkan bir ölçme problemi de makul bir test zamanı için elde edilen toplam aşınma miktarının çok küçük olmasıdır. Gerçekten bu, ağırlık kaybı ölçümlerinin genelde hatalı olmasının bir sebebidir. Polimerlerin durumunda, yine de polimerlerin kayma düzleminde izotopların veya radyoaktif izlerin kullanımı çok kısa bir test süresi için aşınma miktarının çok hassas bir ölçümünü verir. Teknik, polimerin yüzeyinde radyoaktif sayım içindeki farkın hesabını gerektirir ve testten önceki ve sonraki aşınmış tabakanın kalınlığı ile bu farkı birbirine bağlar. [13]

Düz ve pürüzlü yüzeyler üzerindeki polimerlerin kayması için aşınma mekanizmasının bütünü ile incelenmesi gerekir.

4.3 AŞINMA MEKANİZMALARI

Rijid yüzey üzerinde polimer kaydığı zaman üç ayrı aşınma mekanizması saptanabilir ve bunlar yüzey pürüzlülüğünün yapısına bağlıdır:

- **Abraziv Aşınma:** Karşı yüzeydeki keskin tekstür yapısı abrazyona ve kayan polimerin yırtılmasına sebep olur. Abrazyona uğramış polimer yüzeyinde mikro kesme ve boyuna yarıklar gözlenir.
- **Yorulma Aşınması:** Eğer karşı yüzeyde çıkıntılar pek keskin değilse polimerin yüzeyi dairesel deformasyona maruz kalır ve yorulur. Bunun sonucu olarak da hasar meydana gelir.
- **Yuvarlanma Oluşumu:** Düz yüzeylerde, çok elastik malzemelere özgü olan yeni bir aşınma mekanizması, kayan ara yüzeylerde yuvarlanma oluşumuna ve sonuç olarak yuvarlanmış parçaların yırtılmasına sebep olur.

Pürüzlü yüzeylerde abraziv ve yorulma aşınmasının geldiği gözlenmiştir. Oysaki yuvarlanma oluşumu yüksek sürtünme katsayısına sahip düz yüzeylerin karakteristiğidir. Abraziv ve yuvarlanma aşınması genellikle çok şiddetlidir, fakat yorulma aşınması nispeten hafiftir. Yine de, yorulma aşınması en az zarar veren mekanizma olmasına rağmen pek çok kayma işleminde önemlidir ve polimerle aşındıran arasında nispeten düşük sürtünme katsayısı gerektirir. Deneyler, yüksek abrazyon direncine sahip polimerlerin nispeten düşük sürtünme katsayısına sahip olduklarını gösterirler ve bu gözlem, sürtünmenin artması ile daha fazla aşınma ve abrazyon olduğu şeklindeki genel teoriyi doğrular. Yüksek sürtünme katsayılı polimerlerin abrazyon direnci, sadece katsayı azaltılarak artırılabilir. Şöyle ki polimerin yüzeyi talkla pudralanarak veya birleşim süresince anti sürtünme yağlayıcıları katılarak abrazyon direnci epeyce artırılabilir.

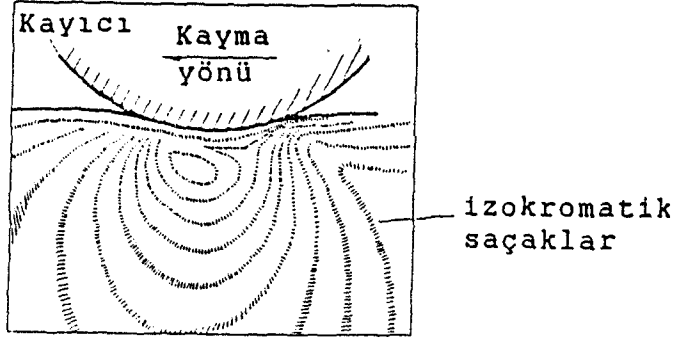
Aşınmaya etki eden temel faktörler, polimerlerin basıncı, kayma hızı, sürtünme katsayısı, yüzey tekstürü, elastisite modülü, dayanım ve yorulma direncidir.

4.4 AŞINMA TEORİLERİ

4.4.1 ABRAZİV AŞINMA TEORİSİ

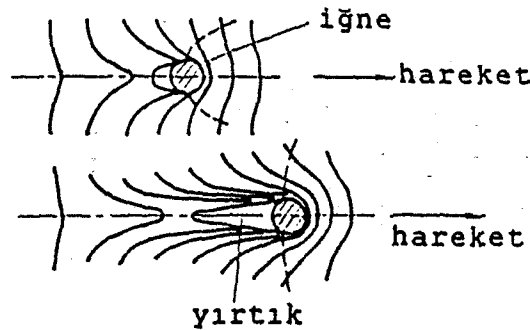
Polimerler için abraziv aşınmada en basit testler, kontrollü şartlar altında polimer yüzeyini çizmek için iğne ve daha sonra 1 mm çapında yarım küre kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kaba yüzeyin pürüz tepeleri geometrik olarak bir hayli değişikliklerinden, bu gibi deneylerde kullanılan kayan elemanın, şeklinde ve keskinliğinde zorluklar başgösterir. Yine de genel düşünürsek, bu tepeler ya keskin ya da yuvarlatılmış bir uca sahiptir ve başka olasılık yoktur. Kör veya yuvarlatılmış pürüz tepeciğini simüle etmek için yarı küre, çok keskin veya sivri uçlu pürüz tepeciğini simüle etmek için ise, iğne seçilmiştir.

Polimer üzerinde kayan kör bir ucun bıraktığı izler, yüksek yüklerde, yörüngeye dik istikametde oluşan sürekli olmayan yırtıkları açıkça gösterir. Yüzey bozukluğunun periyodik yapısı kayma süresince stick-slip mekanizmasının varlığını gösterir. Polimer yarıküresel ucu lokal olarak yapışır ve elastik geri getirme kuvveti, limitteki sürtünme sınırını aşana kadar, hareket istikametinde gerilir. Daha sonra polimer arkadan kopar. Polimerin sertliği azaldıkça, hareket doğrultusunda yırtıkların aralıkları artar, aynı anda boyu da büyür. Bu karakteristik yırtılmaların sebebi olan temas alanının civarındaki gerilme dağılışı fotoelastik olarak incelenebilir. (Şekil 4.1 de şeffaf polimer üzerindeki silindir için gösterildiği gibi) Temas alanının gerisindeki gerilme yığılması renkli sınırların birbirlerine yakınlıkları ile ölçülür ve polimer bu noktada gerilme altındadır. Bu gerilme yığılması etkisinin sonucu olarak tekrarlanan kayma yüzünden, herhangi bir hasarın, hareket yönüne dik istikamette yırtığın başlangıcında olması beklenebilir.



Şekil 4.1 Şeffaf kauçukta fotoelastik gerilme dağılımı

Polimer, bir iğne ile gerildiğinde polimerle iğne arasındaki mekanik kilitlenme nedeni ile çekim kuvvetleri, kör bir noktadaki çekim kuvvetlerinden daha büyüktür. Bu farkın önemli bir sonucu, iğne kullanıldığında yüzey bozulmasının şiddetli olmasıdır ve polimer üzerindeki iğnenin tek geçişi, polimer partiküllerinin nihai ayrılmasını gerekli kılabilir. Şekil 4.2 referans çizgilerinin distorsiyonunun orijinal olarak birbirinden eşit aralıktta olduğunu gösterir ve bu sıra ile iğne noktasının çevresindeki gerilme yığılmasını gösterir. Gerilme yığılması iğnenin önünde en yoğun olmasına rağmen bu bölgedeki iğne ve polimer arasındaki adhezyon sürtünmesi yırtılmaları önler. Bu yüzden polimer ön tarafından değil, iğne ile teması ilk kaybettiği noktada yırtılır ve yırtıklar, Şekil 4.2 de kesikli çizgilerle gösterildiği gibi yana doğru genişler. Çok keskin pürüzlerde, pürüz tepeleri, ve polimer arasındaki mekanik kilitlenmenin ve adhezyon sürtünmesi tarafından üretilmiş lokal gerilme yığılmasının, abrazyonun sebebi olduğu sonucuna varılabilir. Dolgulu veya dolgunsuz polimerin kimyasal bileşenlerinin, keskin pürüzler için abrazyon mekanizmasında bir etkisinin olmadığı görülür.



Şekil 4.2 Polimer bir yüzeyin iğne ile yırtılmasında ve deformasyonunda iki bölge

Yırtığın bir kez oluştuğundan sonra kayma yönüne dik ilerlediğini vurgulamak önemlidir. Bundan sonra aşındırıcının sürekli gidip gelmesi bu bölgeden polimer partiküllerinin kopmasına neden olacaktır. Aşağıdaki teoriler farzedilmiş olsun:

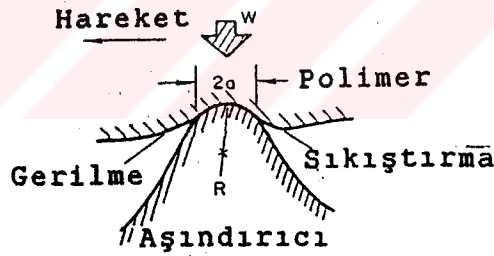
1. Yırtığın uzunluğu, polimer ile aşındırıcı (abraziv partikülü, iğne veya yarı küre) arasındaki temas genişliği ile orantılıdır.

2. Kopan polimer parçasının hacmi, orijinal yırtığın boyunun 3. kuvveti ile orantılıdır.

Eğer temas alanının ortalama çapı $2a$ ise R abrasiv parçacığının ucundaki ortalama eğrilik yarıçapı ise bu takdirde;

$$a = \phi(R, W, G)$$

4.10



Şekil 4.3 Kayma süresince polimerin ve aşındırıcının etkileşimi

Burada f fonksiyonel bağımlılık, W , parçacığa uygulanan yük ve G , polimeri karakterize eden elastik sabittir. Boyutsuz iki parametre aşağıdaki gibi oluşturulabilir:

$$\frac{a}{R} \text{ ve } \frac{W}{GR^2}$$

ve bunlar bir bağıntıda toplanabilir:

$$\left(\frac{a}{R}\right) = \text{sabit}_1 \left(\frac{W}{GR^2}\right)^a \quad 4.11$$

a deneysel olarak tayin edilmesi gereken bir üstür. n^2 birim alan başına düşen abrazyon parçacıkları olsun ve birim alan başına normal yük

$W_{\text{top}} = W \cdot n^2$ bağıntısı ile verilsin. Volumetrik aşınma hızı, K_v , ayrılmış polimer parçacıklarının toplam hacmi ile orantılı olduğundan, 1 ve 2 kabullerine göre;

$$K_v \sim n^2 a^3 \quad 4.12$$

yazılabilir ve a değeri (4.11) de yerine konulursa;

$$K_v = \text{Sabit}_2 n^2 R^3 [W_T/G \cdot n^2 \cdot R^2]^{3a} \quad 4.13$$

bağıntısı elde edilir. Abrasyona maruz kalmış polimerin üst yüzeyi ana kütledeki polimerden, sürekli tekrarlanan büyük deformasyonlar yüzünden ve burada oluşan mikro kesme yüzünden, çok daha yumuşaktır. Bu nedenle G modülünün etkin değerinin ana kütle ile aynı olmadığı belirtilmelidir. Deneylerden a'nın 1/3 değerinde olduğu bulunmuştur. a'nın bu değeri (4.11) ve (4.13) de yerine konularak;

$$a = \text{sabit}_1 [(W \cdot R)/G]^{1/3} \quad 4.14$$

ve

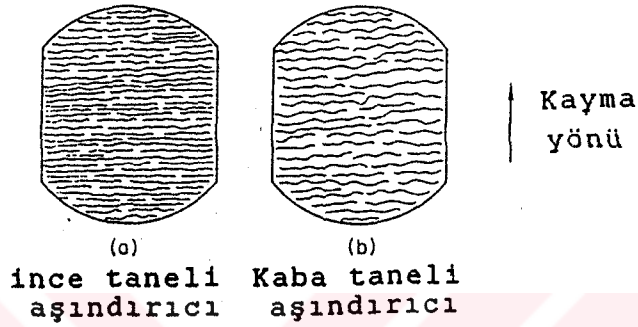
$$K_v = \text{sabit}_2 [(W_T \cdot R)/G] \quad 4.15$$

elde edilir. Bu bağıntılar doğal kauçuğun 4 değişik bileşimi kullanılarak yapılan deneylerle doğrulanmıştır.

•Gerçek Abrasyon ve Abrasyon Modelleri

Kauçuk veya polimer yön değiştirmeksizin aşındırıldığında harekete dik doğrultuda yüzey üzerinde paralel çizgi grupları bulunur. Bu çizgi gruplarına abrazyon modelleri denilir. Bunlar doğal kauçuk için şekil 4.4 de gösterilmiştir. Abrasyon modelinin oluşumu, gezinti yönünün periyodik olarak değişmesi ile sağlandığı zaman, ortaya çıkana gerçek abrazyon denir.

Abrasyon modelinin abrazyon neticesinde oluşan yüzey fonksiyonu ek bir aşınmaya sebep olur ki belli şartlar altında önemli olabilir ve şekil 4.5 de gösterildiği gibi abrazyon modeli boyunca dik kesit düşünülerek tasavvur edilebilir. Testere dişi profili abrazyon yönüne terstir ve aşındırıcının hareketine maruz kalan alt kısım yüzünden aşındırıcının hareketi süresince dişler geriye doğru eğilirler.



Şekil 4.4 Dolgulu doğal kauçuk üzerindeki abrazyon modelleri



Şekil 4.5 Tipik bir abrazyon modelinin profili

Aynı zamanda bunların yüzeyinin bir kısmı geride abrazyondan korunur. Bu sonuç bir alttan kesme etkisidir. Dişler, diş tepeleri yırtılıp ayrılanaya kadar, kenarları körleştirilerek ve gitgide incelenerek aşınırlar. Aynı zamanda çizgiler ana kütleden dışarı doğru büyümeye devam eder ve olay kendi kendine sürer. Burada açıklandığı tarzda, doğal abrazyon içinde abrazyon modeli tarafından üretilmiş, abrazyona uğramış parçacıkların boyutları arasında büyük bir fark vardır.

Polimer yüzeyinde oluşan çizgiler arasındaki ağ aralığı $2a$ temas çapı ile orantılı olduğu ve ortalama partikül boyutu d nin $1/n$ ile verildiği kabul edilirse (4.14) denklemi aşağıdaki gibi olur:

$$\left[\frac{W_T R d^2}{G} \right]^1 s \sim \left[\frac{W_T R d^2}{G} \right]^{1/3} \quad 4.16$$

veya

$$s \sim d^{2/3} \quad 4.16.1$$

Aşındırıcının ortalama partikül boyutu d ve aşınmış polimer yüzeyinin çizgileri arasındaki ortalama aralık s ölçülerek, bu bağıntı kalitatif olarak doğrulanır.

Abraziv yüzeyin, birbiri ile temas halindeki yarı kürelerden oluştuğu düşünülerek ilginç bir sonuç elde edilir. Öyle ki $d=2R$ dir.

Bu durumda (4.15) ve (4.16) denklemlerinden;

$$\left(\frac{K_v}{s} \right) \sim \left(\frac{W_T}{G} \right)^{2/3} \quad 4.17$$

Modelin abrazyonu ve aralığı bu nedenle birbiri ile orantılıdır.

Bu teorideki abrazyon prosesinin şekil 4.2 de iğne deneylerinde gösterildiği gibi, polimerin çekmeye maruz kalması ile ortaya çıkan hasardan oluştuğu varsayılır. Polimer moleküllerinin ana kütleden ayrılmasına, iz üzerindeki keskin tepeciklerin arkasındaki katastrofik yırtılma neden olur ve bunu çok yüksek birim uzama takip eder. (% 10.000/sec)

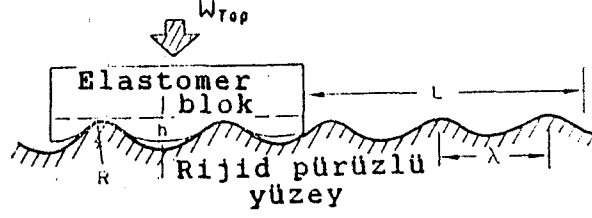
4.4.2 YORULMA AŞINMASI TEORİSİ

Pürüz tepeleri keskinden daha yuvarlağa getirildiğinde, polimer katları içindeki tersinir kesme gerilmelerini ve tekrarlanmış genişlemeyi ve basmayı takiben herhangi bir yorulma mekanizması nedeni ile hasar meydana gelir. Şekil 4.6 da gösterildiği gibi, sinüsoidal tepeler şeklinde modellenmiş rijid bir kabayüzey düşünölsün ve polimer blok bu yüzey üzerinde W_{top} yükü altında hareket etsin. Yorulan ve sonunda hasara uğrayan polimerin yüzey tabakasının h etken kalınlığına haiz olduğu farzedilirse bu takdirde;

$$\Delta V = N.A.h$$

4.18

Burada N test süresince abrazyona uğramış yüzey tabakası sayısıdır.



Şekil 4.6 Pürüzleri yuvarlatılmış bir yüzeyde abrazyon

Yorulma direnci M, hasar ve kopma meydana gelmeden önce, yüzey tabakasının verilen abrazyon şartlarına maruz kalması gerektiği tersinir gerilme çevriminin ortalama sayısı olarak tanımlansın. Eğer λ , pürüz tepciklerinin ortalama dalga boyu ise, o zaman gerekli kayma mesafesi L şu şekilde yazılır.

$$L = \lambda \cdot M \cdot N$$

4.19

Bu takdirde toplam sürtünme işi şöyle yazılabilir:

$$\begin{aligned} W_f &= (f \cdot W_T) \cdot L \\ &= (f \cdot W_T) \cdot \lambda \cdot M \cdot N \quad (4.19 \text{ denkleminde}) \\ &= q \cdot M \cdot N \end{aligned}$$

4.20

q tek bir çevrime ve λ kayma mesafesine karşılık gelen sürtünme işidir. (4.18) ve (4.20) denklemlerinden, daha önceki (4.8) denklemi ifadesindeki gibi, abrazyon diranç katsayısı β ;

$$\beta = \frac{q \cdot M}{A \cdot h}$$

4.21

Abrazyona uğramış tabakanın h kalınlığı için bir ifade çıkarmaya gerek vardır ve bunun batma derinliği z ile ve bir dereceye kadar yüzey pürüzlülüğü ile orantılı olduğu varsayılır. Tek bir küre için ortalama batma

derinliği, Hertz bağıntısı ile verilir;

$$z = \left[\frac{3}{4} (1 - \nu^2) \right]^{2/3} \frac{W^{2/3}}{E^{2/3} R^{1/3}} \quad 4.22$$

Kauçuk için Poisson's oranı $\nu=0.5$ alınarak denklem düzenlenirse;

$$z = 0.683 \frac{W^{2/3}}{E^{2/3} R^{1/3}} \quad 4.22.1$$

olur. Burada R pürüz tepeciklerinin yarıçapı, E kauçuğun elastisite modülü, W bir tepeciğe uygulanan yükür. Tepeciklerin sayısı n' , yük veya alan oranından elde edilir:

$$n' = \frac{W_T}{W} = \frac{A}{\lambda^2} \quad 4.23$$

(4.23) den W alınıp (4.22.1) de yerine konulursa;

$$z = 0.683 \left(\frac{\lambda^2}{A} \right)^{2/3} \frac{W^{2/3}}{E^{2/3} R^{1/3}} \quad 4.24$$

denklemini bulunur. Eğer yüzey pürüzlölük parametresi, tek bir pürüzün yaklaşık alanı olarak ifade edilirse; $\pi \cdot R^2$ iki pürüz arasındaki mesafenin λ^2 ortalama alanına bölünürse;

$$h = k' z \left(\frac{\pi R^2}{\lambda^2} \right) \quad 4.25$$

olduğu varsayılabilir. Burada k' bir sabittir. (4.24) deki z (4.25) de yerine konulup buradaki h değeri ve (4.20) deki q değeri (4.21) denkleminde yerlerine konulduğunda;

$$\beta = \left(\frac{fM}{2.14k'} \right) E^{2/3} \left(\frac{W_T}{A} \right)^{1/3} \left(\frac{\lambda}{R} \right)^{5/3} \quad 4.26$$

denklemini elde edilir. Bu denklemin aşağıdaki gibi bir form alması ilginçtir:

$$\left(\frac{\beta}{f} \right) = \phi' M \quad 4.26.1$$

Bu denklem, yorulma direnci M büyüdükçe abrazyon direncin sürtünmeye oranının da büyüdüğünü açıkça gösterir. (4.8) denkleminde, keskin yüzeyler üzerindeki abrazyon aşınma durumu için (4.26.1) e karşılık gelen denklem elde edilir:

$$\left(\frac{\beta}{f} \right) = \frac{1}{A'} \quad 4.8.1$$

Bu denklem, hacim küçüldükçe abrazyon direnç katsayısının sürtünme katsayısına oranının da büyüdüğünü gösterir.

(4.26) denkleminin bir adım daha geliştirilmesi, polimer veya kauçuğun yorulma direncini karakterize eden M nin anlamını bulmak için gereklidir. Aşağıdaki ampirik bağıntının geçerli olduğu farzedilsin;

$$M = \left(\frac{\sigma_0}{\sigma} \right)^b \quad 4.27$$

Burada, s_0 basit bir çekme deneyinde bulunan polimerin çekme dayanımı, s alternatif gerilmenin genliği ve b malzemeye bağlı bir üstür. s nin, bir pürüz tepesi üzerindeki ortalama basınç p ile orantılı olduğu farzedilirse;

$$\sigma = k'' \left[\frac{W^{1/3} E^{2/3}}{R^{2/3}} \right] \quad 4.28$$

olur. W, (4.23) den alınıp (4.28) e konulursa ve sonuç (4.27) e yerleştirilirse;

$$M = \left[\frac{\sigma_0}{k'' (W/A)^{1/3} E^{2/3} (R/\lambda)^{-2/3}} \right] \quad 4.29$$

bulunur. Bu denklem, kauçuğun diğer elastik özellikleri ve çekme dayanımı terimlerindeki ve de ana yüzey yükleme şartlarının geometrik terimlerindeki yorulma direnci M yi ifade eder. Son olarak (4.29), (4.26) da yerine konulursa şu denklem elde edilir:

$$\left(\frac{\beta}{f}\right) = K \sigma_0^b E^{2(1-b)/3} \left(\frac{W_T}{A}\right)^{(1-b)/3} \left(\frac{\lambda}{R}\right)^{(5-2b)/3} \quad 4.30$$

Burada k bir sabittir. (4.30) denklemine göre, kauçuğun veya polimerin özellikleri, bunların çekme dayanımı σ_0 , elastisite modülü E , yorulma direnç katsayısı β ve abrazyona uğrayan yüzeydeki sürtünme katsayısı f tarafından tayin edilir. Sadece normal W_{top} etkileri malzemenin özelliklerinin değişmesi ile dolaylı olarak incelenebilir.

Keyfi varsayımlar yapılmasına rağmen (4.30) denklemi yorulma aşınmasını kanıtlamak amacı ile son derece faydalıdır ve bu belli durumlarda deneysel olarak doğrulanmıştır. Örneğin verilen bir dizi özellik için (bir polimer), (4.30) denklemi şöyle olur:

$$\left(\frac{\beta}{f}\right) = \text{sabit} \cdot W_T^{(1-b)/3} \quad 4.31$$

Bu denklem, abrazyon katsayısının sürtünme katsayısına oranının, verilen kauçuk veya polimer için sadece ve sadece normal yüke bağlı olduğunu göstermekte olup, deneysel olarak da kanıtlanmıştır.

(4.31) denklemi β/f oranının artan yükle azaldığını gösterir ki bu, fiziksel olarak abraziv aşınmadaki artış kadar W_{top} 'ın da arttığı şeklinde yorumlanabilir.

Yuvarlatılmış tepeliklere sahip kaba yüzeyler için, kauçuk bir polimerin izdüşümler üzerinde kaydığı zaman meydana gelen abrazyona, temas alanındaki tersinir çevrim deformasyonunun bir sonucu olarak yüzey

tabakalarının yorulmasının sebep olduğu sonucu çıkartılır. Bu yorulma mekanizması, yüzey etkisinden ziyade ana kütle şeklinde sınıflandırılabilen nispeten yumuşak bir aşınma formu meydana getirir ve bu, gerilme çevrimlerinin uzun zaman aralıklarında verildiği zaman önemlidir ve adhezyonun yeri nispeten küçüktür. Burada verilen teorinin, sınırlı sayıda deneyler tarafından doğrulandığı görülür.

4.5 AŞINMADA YÜKE BAĞIMLILIK

Kaba yüzey üzerinde polimerin kayması durumunda abrazyonun yüke bağımlılığı (4.15) denklemi ile verilmiştir. Yine de, bu denklemin daha genel bir formu aşağıdaki gibidir:

$$K_v = C K_p = C_p^\alpha \quad 4.32$$

Burada C bir sabit, p ara yüzey basıncıdır. Birim alan başına aşınmış hacim K, ve kayma mesafesi cm^3/cm^2 m olarak ölçülür, C ve α , tablo 2 de üç tip kauçuk için gösterildiği gibi, abrazyona maruz yüzeyin yapısına bağlı farklı değerler alırlar. p basıncı kgf/cm^2 olarak ölçülür ve C sabiti $p=1\text{kgf}/\text{cm}^2$ olduğu zaman sayısal olarak K_v aşınmasına eşittir.

Bu tablodan, üç kauçuk için tek bir α değeri olduğundan zımpara kağıdında aşınmayı belirlemek için sadece tek bir C sabiti istendiği gözlenir. Bu Schallamach teorisine göre, (4.15) denklemi ile örneklenmiştir. Yine de diğer yüzeyler için hem C yi hem de α yı belirlemek gerekir.

Tablo 2. Çelik, gauze ve zımpara kağıdı üzerinde polimerin aşınması

Polimer Cinsi	Yüzeyin Yapısı	Sabit Değerleri	
		$C \times 10^3$	α
A	Çelik	1.1	1.9
	Gauze	1.5	5.3
	Zımpara	240	1.1
B	Çelik	2.7	1.9
	Gauze	1.1	2.0
	Zımpara	305	0.9
C	Çelik	1.2	3.1
	Gauze	5.4	3.0
	Zımpara	65	1.0

α kauçuk kompozisyonunun veya abrazyona maruz yüzeyin değişmesi ile değiştirilebilir. Şişme derecesindeki artış zıt etkiye sahipken aktif dolguların eklenmesi genelde α' yı arttıracaktır. Verilen kauçuk kompozisyonu için α' nın aşındırıcıya bağımlılığından çok daha büyük değerlere ulaşabileceği tablo 2 den görülür. Eğer Gauzenin kafes aralığı ve kafes telinin yarıçapı giderek azaltılırsa α daha büyük değerler alabilir. Aşağıdaki bağıntıda (4.27) deki yorulma üssü b nin α ile olan bağıntısı verilmiştir.

$$b=1/3(\alpha+2)$$

4.33

Bu bağıntı özellikle aşınmanın açıkça bir yorulma mekanizması olduğu Gauze durumuna uygulanabilir. C sabiti abraziv aşınmanın şiddetini gösteren zımpara kağıdı için aşın derecede büyüktür. Bu durumda yüzey tabakası öyle hızlı kopar ki yorulma etkisi önemsiz kalır.

(4.32) denklemi, p basıncı artırıldığı için izdüşüm ne kadar keskinse K_v aşınmasının o kadar büyük olduğunu gösterir. Ayrıca aşındırıcının tane büyüklüğünün artması, kauçukların ve polimerlerin, metallerde gözlendiği gibi, aşınma etkisini arttıracaktır. Verilen bir normal yük için, birim alan başına tepecik sayısı arttığı zaman herhangi bir tepecikteki ortalama basıncın arttığı gösterilebilir. Bu, (4.32) denklemine göre aşınmış K_v hacmini

büyütür. Öyle ki çok çeşitli malzemeler için bu konuda teorik ve deneysel çalışmalar arasında bir uyum mevcuttur. α nın kauçuk için daha yüksek değerlere çıkması daha önce şekil 4.8 deki eğrilerle gösterilmiştir.

4.6 AŞINMAYA ETKİ EDEN PARAMETRELER

Sürtünmede olduğu gibi aşınmada da bazı parametreler gözönüne alınmalıdır. Bu parametreler kayma hızı, basınç veya yük, aşınma mesafesi, sıcaklık, malzeme çifti ve yüzey pürüzlülüğüdür.

Aşınmada hemen hemen bütün parametreler birbirine bağlı olup aşınma miktarına etkileri değişiktir.

4.6.1 KAYMA HIZI

Blanchet ve Kennedy' nin yaptığı deneysel çalışmada saf PTFE' nin (politetrafloretlen) aşınma miktarının hız arttıkça arttığı, bronz katkılı PTFE ile cam elyaf katkılı PTFE' nin aşınma miktarlarının hız arttıkça azaldığı görülmektedir. Lhymn'in [14] yaptığı çalışmada da, yüke bağlı olarak, katkılı polimerlerin başlangıçta yüksek aşınma miktarlarına sahip olduğu, hız artarken aşınma miktarının azaldığı, yük artırıldığında aşınma miktarlarının hızla değişmediği gözlenmektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, aşınma miktarı hız arttıkça azalmaktadır.

4.6.2 BASINÇ VEYA YÜK

Briscoe, Pogasian ve Tabor'un çalışmasında zaman ve kayma hızına bağlı olarak, HDPE' nin aşınma miktarı başlangıçta yüklerle değişmezken yük arttıkça miktar da artmaya başlamaktadır. Dolgulu HDPE' de ise aşınma miktarı diğeri kadar fazla olmamaktadır. Lhymn'in çalışmasında da katkılı polimerler incelenmiş olup aşınma miktarının yüklerle fazla değişmediği gözlenmiştir. Bijwe, Logani ve Tewari'nin [15] yaptığı çalışmada ise

polimerlerin aşınma miktarının yola ve hıza bağlı olarak yük arttıkça arttığı görülmektedir.

4.6.3 SICAKLIK

Daha önce yapılan çeşitli deneysel çalışmalarda polimer cinsine bağlı olarak aşınmanın sıcaklıkla değiştiği görülmektedir.

4.6.4 AŞINMA MESAFESİ

Aşınma hızı, bütün malzemelerde olduğu gibi, aşınma mesafesi ile artmasına rağmen bu artışın karakteri polimerin cinsine bağlıdır. Bazı polimerlerde artış çok belirginken, bazı polimer cinslerinde de sabite yakın bir değişim göstermektedir.

4.6.5 DİĞER PARAMETRELER

Nem, katkılı polimerler haricindeki polimerlerde aşınma miktarını azaltırken, katkılı polimerlerde arttırmaktadır.

Aşınan yüzeylerin yüzey pürüzlülüğünün aşınma miktarına etkisi oldukça fazladır. Pürüzlülük arttıkça aşınma da artmaktadır.

Aşınma malzeme çiftine de bağlıdır. Malzemenin dayanımı arttıkça aşınma azalmaktadır.

BÖLÜM 5. DENEYSEL METODLAR

Tanımlanan metodlar tipik triboloji laboratuvarlarının ayrıntılarına sahip olmasa da halen kullanılan deneysel tekniklerin geniş kullanım alanlarını gösterir. Herhangi bir deneysel tesisatın uygun bir şekilde basitleştirilmesi Williams-Landel-Ferry transformasyonunu uygulayarak elde edilir. Bu nedenle frekans ve sıcaklık etkileri birbirinin yerine konulabilir. Böylece sürtünme kuvvetinin hız ve frekansla değişimi değerlendirmek için sabit sıcaklıktaki kayma hızı veya frekans değişimini veya sabit hızda sıcaklık değişimini temin etmek gerekir. Bu sonuç önceki konularda özetlendiği gibi polimerik sürtünmenin viskoelastik yapısından elde edilir ve deney ekipmanının karmaşıklığını ve maliyetini azaltır. Şüphesiz kayma hızını değiştirmek için değişken hızlı motorun kullanımı veya deneyler için sıcaklığı kontrol edilen bir ortamın sağlanması tercih meselesidir. [16,17,18]

Bu bölümde, düşünülen uygulamaya göre, yeterli bir deney standının kurulması için özel bir deneyin felsefesine, belki de gerekli hassasiyetin derecesine bağlı olarak beş deney kategorisi ve techizatı verilmiştir:

1. Dönen disk tertibatı,
2. İç tambur aparatı,
3. İnterferometrik techizat,
4. Aşınma ve abrazyon makinası,
5. Yüzey tekstürü laboratuvarı.

5.1 DÖNEN DİSK TERTİBATI

En basit ve daha yaygın olarak kullanılan tertibat dönen disk tertibatıdır. Bu tertibat, üzerinde denenecek dairesel kesitli bir polimer bulunan yatay bir diskten ibarettir. Karşı yüzey genellikle sert malzemeden (metal) imal edilmiş olan silindirik pim, küre veya konidir ve bu bir manivela kolu üzerine yüklenir. Verilen diskin çevre hızı için pim veya küre ile polimer arasındaki izafi kayma hızı, diski dönme merkezi ile temas noktası arasındaki radyal mesafenin ayarlanması ile geniş bir aralıkta değiştirilebilir. Sürtünme kuvveti genellikle manivela koluna yerleştirilen strain-gagelerle ölçülür ve sürtünme katsayısı okunan değerlerin normal yüke bölünmesi ile hesaplanabilir. Hareket esnasındaki temas sıcaklıkları, kayan parça içine bir yalıtım ile yerleştirilmiş termokupl yardımı ile elde edilir. Bir başka yöntem ise, seri bir termokupl çiftinin polimer yüzeyinin hemen altına yerleştirilmesidir. [19]

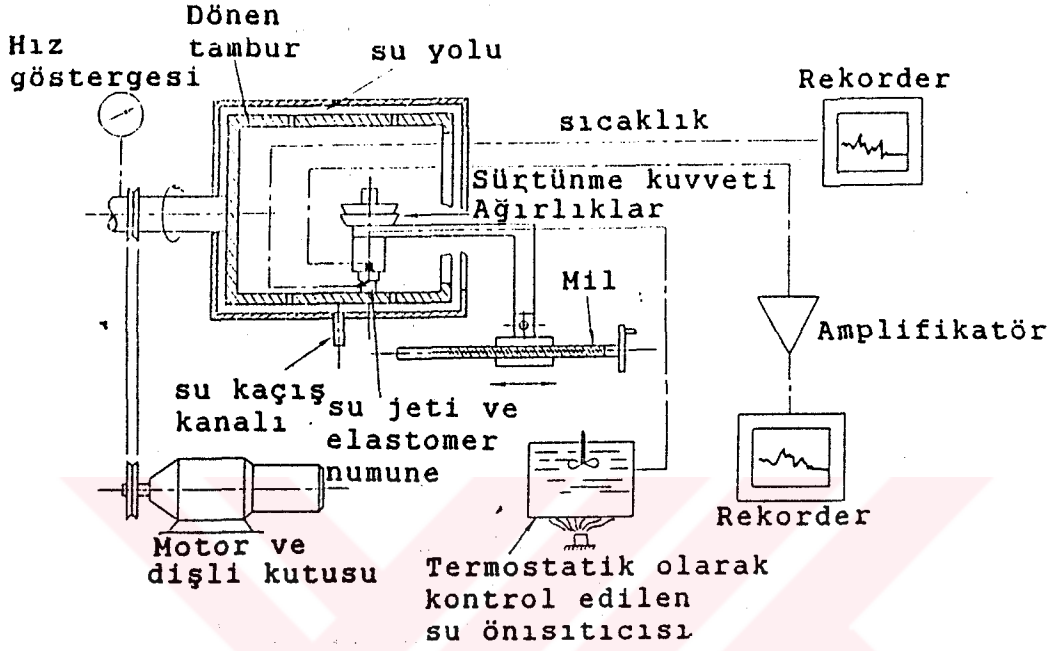
Elde edilen veriler güvenilir ve büyük ölçüde tutarlı olmasına rağmen, yukarıda tanımlanan dönen disk tertibatı ile elde edilen ölçümler hassas olarak değerlendirilmeyebilir. En önemli zorluklar, numuneye normal yük uygulayan manivela kolunun titreşimlerinden ve izafi olarak az sayıda devirden sonra diskin temas noktasında aşınarak yüzeyde kod farkının ortaya çıkmasından kaynaklanır. Mekanik sönüm elemanlarının ve ölü ağırlıkların tersine bir hidrolik silindir tarafından uygulanan normal yük, istenmeyen titreşimleri azaltır ve elektriksel bir filtre ağı strain-gageden gelen dinamik sinyalin dağılmasını hemen hemen yok eder. Diskin aşınması ise, ya diskin dönme sayısı azaltılarak ya da test edilecek numunenin yörüngesine disk merkezinden dışarı doğru sürekli değişen bir radyal aralık verilerek minimize edilebilir. Diskin aşınması normalde azdır ve polimer yüzeydeki aşınma etkisi ile karşılaştırıldığında ihmal edilebilir. [20, 21]

5.2 İÇ TAMBUR APARATI

Sürtünmeye ait bilgileri elde etmekte en hassas metod iç tambur aparatı kullanmaktır. Şekil 5.1 tamburu ve bununla beraber kullanılan techizatı şematik olarak gösterir. Tamburun iç yüzeyi çamurlu modellerde yarı küresel, silindirik veya konik pürüzlülükleri olan ayrı bir yüzey yapısı gösterir. Kullanılan bütün konik pürüzlerin tepeleri aşırı aşınmayı önlemek için veya izafi kayma esnasındaki sabit polimer blokunun kopmasını önlemek için yuvarlatılır. Pürüzler dairesel bantlarla gruplanır ve polimer numune şekil 5.1 de gösterilen ayarlanabilir hareket vidası ile doğrudan özel band üzerine yerleştirilebilir. Yük, polimer bloğa ağırlıklar yardımı ile tatbik edilir ve tambur bir elektrik motoru ve 0.05 cm/s ile yaklaşık 180 km/h aralığında kayma hızlarını sağlayan özel bir dişli kutusu ile tahrik edilir.

Nemli şartlar için, termostatik olarak kontrol edilen ön ısıtıcıdan temin edilen su jeti, polimer numunenin hemen önüne yerleştirilir. Su sıcaklığı, oda sıcaklığı ve yaklaşık 80°C arasında değişir. Tamburun dönmesi esnasında oluşan merkezkaç kuvveti stabil ve düzgün bir su filmi kalınlığı oluşturur ve suyun radyal yönde akması şeklindeki gibi tambur yüzeyine açılmış delikler sayesinde olur. Sabit silindirik kafes, tamburu çevreler ve daha sonra su kaçış kanalına geri dönen suyu toplar.

Polimer yüzeyindeki sürtünme kuvveti çelik blokta çok küçük bir sapma yaratır ve bunlar sıra ile 4 adet sıcaklık kompanzasyonu yapılmış straingage ile ölçülür. Sonra çıkış sinyali büyütülür ve kaydedilir. Polimerdeki sıcaklıklar deneyler esnasında polimerin değişik derinliklerine yerleştirilen termokupllar ile ölçülür. Tambur elemanlarının hassas işlenmesi ve rotorun dikkatle dengelenmesi, geniş bir hız aralığında çalışmak için gereklidir ve bu şekil 5.1 de gösterilen modelle gerçekleştirilir. Daha yüksek hız aralığı, histeresis ve aşınma için ısınma etkisi kadar değerli datalar verir ve düşük



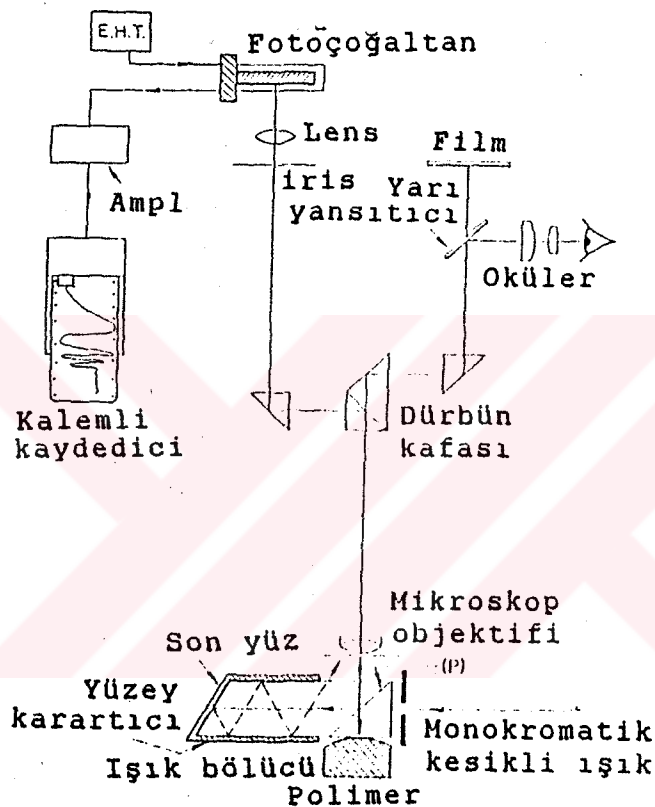
Şekil 5.1 İç tambur aparatının şematik yapısı

hızlarda adhezyon ağır basabilir. Polimer yüzeyi tamburun içine ve tek bir pürüz tepesiğini polimer blok içine yerleştirmek mümkündür. Böylece tek tek pürüzlerin sürtünmesi incelenebilir.

5.3 İNTERFEROMETRİK TECHİZAT

Yağlayıcı filmin kalınlığı hakkında en hassas datalar şekil 5.2 de şematik olarak gösterilen optik ferometrik aparat ile elde edilebilir. Optik olarak küresel eğriliği olan pürüzsüz kauçuk yüzey, şeklin aşağısında gösterildiği gibi, konveks yüzeyin en üst noktası ile sabit pozisyonda tutulur. Uygun yağlamadan sonra bir düz cam yüzeyin yavaşça manivela kolu

yardımı ile kauçuk yüzey üzerine yatay pozisyonda yüklenir. Sonra temas bölgesi mikroskoptan geçen monokromatik halkaları, yüzeyi gümüşlemeye ihtiyaç olmaksızın kauçuk ile cam arasında görülür ve şiddeti, sıvı bulunması halinde oldukça azalır. Işık saptırıcı prizma, sıvı temas için izlerin görünür kalmasını sağlamada kullanılır. [22]



Şekil 5.2 Optik interferometrik ekipman şeması

5.4 AŞINMA VE ABRAZYON MAKİNASI

Polimerlerde aşınma ve abrazyon ölçümü, aşınmanın makul derecede ölçülmesine ve saptanmasına imkan veren bir hareket mesafesini gerektirir. İzafi hareketi dönel veya öteleme hareketi ile temin eden iki deneysel metod düşünülebilir. Önceden tanımlanan iç tambur aparatı ilkinde örnektir. Başlıca nemli ve kuru şartlarda histeresis kaybı ve sıcaklık etkilerini

ölçmek için de kullanılabilir. İzafi öteleme hareketi aşınma ve abrazyon makinası ile çeşitlendirilir.

Aparat, direkt olarak platforma monte edilmiş olup ve sabit bir hızla tahrik edilen bir motor ve değişken hızlar verebilen bir varyatörden oluşur. Bu platform, lineer olarak hareket edebilir. Platformun üzerinde kaydığı gövde bloku, taban üzerine monte edilir ve bu sürtünmesiz silindirler üzerinde bulunan düz yatay bir levha içerir. Bu levha uzunluk doğrultusunda sabitlenir ve kauçuk bir blok taşır. Platform, pistonu 0...50 kgf arasında normal yük uygulayan hassas bir pnömatik silindir içerir. Değişik boyutlardaki çeşitli pürüz şekilleri pistonun ucuna eklenebilir. (yarıküre, koni, vb.) Pnömatik yük ünitesi, kayan parçanın yolunun değişmesine imkan verdiği için kauçuk blok üzerine yerleştirilebilir. Aşınma ve abrazyon makinası sadece platformun bir gidip gelmesine karşılık olan hassas düşük hızlı adhezyon testlerini gerçekleştirilebileceği gibi gerekirse günlerce süren yorulma-aşınma testlerini de yapabilir. Değiştirme şalteri, platformun hareket yönünden tersine harekete izin vermek için bloğun sonuna yerleştirilir. Bu şalterler arasındaki boşluklar ayarlanabilir. Bu nedenle hareket mesafesi değişkendir. Hız 0...10 cm/s arasında değişebilir ve takometre ile gösterilir. Kauçuk bloğu ile kayan parça arasındaki sürtünme kuvveti doğrudan düz ana levhaya iletilir ve levhanın lineer hareketini sınırlayan kuvvet transduceri ile kaydedilir.

Değişkenlerin sayısı bu gibi basit aparatlar için oldukça çoktur. Bu nedenle hız, yol, hareket mesafesi, yük, ara yüzey kirlenmesi ve yüzey pürüzlülüğü verilen bir adhezyon testinden ve frekans, strok ve çevrim sayısı verilen bir yorulma ya da aşınma testinden seçilebilir. Aşınmanın derecesini yaklaşık olarak hesaplamanın en hassas ve kesin metodu radyoaktif izleyici metodudur. Test başlamadan önce polimer yüzeyine radyoaktif izleyiciyi yerleştirmekten ve deney esnasında radyoaktif saymanın azalmasını izlemekten ibarettir. Bu metodun, hassasiyeti, gramın çok küçük yüzdeleri mertebesinde bir aşınma ölçümüne imkan verir ve böylece test zamanı epeyce kısalır.

Seçilen ara yüzey kirleticileri, su, deterjanlı su, mineral, değişik viskoziteli bitkisel yağlar, silikon akışkanlar vb. olabilir. Yüzey pürüzlülüğü modelleri arzulanın şekilde hem kayan parçaya hem de bloğa konulabilir. Kauçuk bloğu zımpara parçaları ile yerleştirmek ve pürüzlü yerdeki yk pistonunun gövdesine kauçuk veya polimer numune yerleştirmek mümkündür.

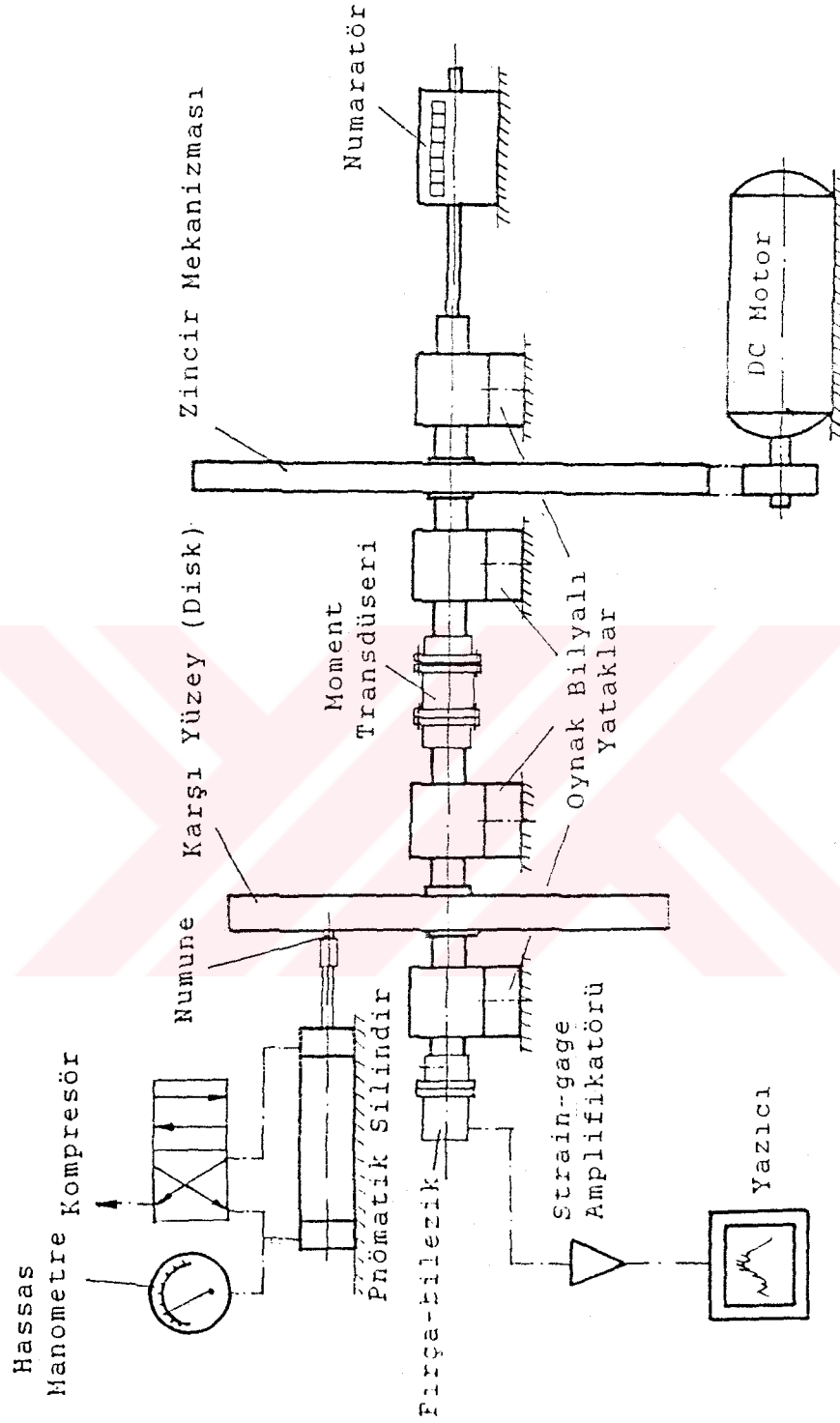


BÖLÜM 6. DENEY TESİSATI

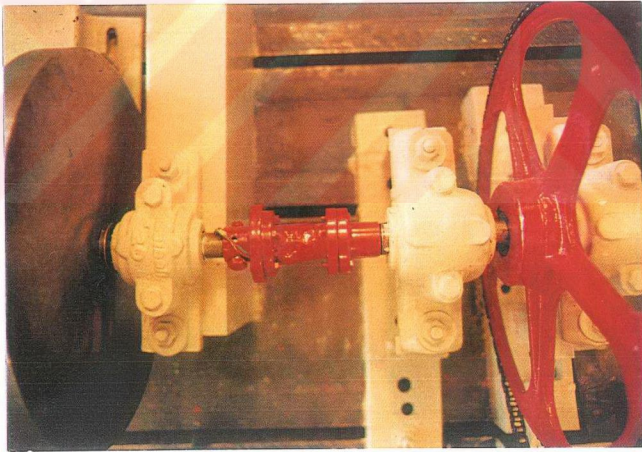
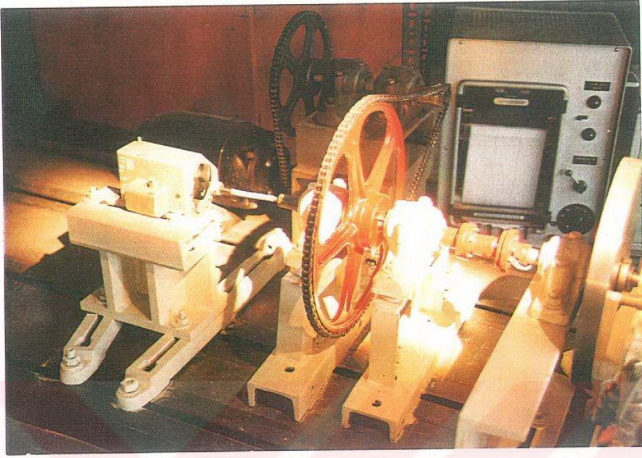
6.1 TESİSATIN TANIMI

Teknikte kullanılan polimer malzemelerin çeşitli parametrelere bağlı olarak sürtünme ve aşınma karakteristiklerinin tayini için bir pin-on disk deney standı geliştirilmiştir. (şekil 6.1) Şekilden de görüleceği gibi normal kuvvetin temini için klasik pin-on disk tertibatlarındaki mekanik yükleme yerine pnömatik bir devre kullanılmıştır. Bu devrenin kullanılma sebebi, montaj kolaylığı ve pnömatik silindir içindeki hava basıncının dar bir aralıkta arzu edildiği gibi ayar imkanının bulunmasıdır. Ayrıca mekanik yükleme esnasında oluşabilecek titreşimleri bertaraf etmektir. Disk, yerleştirme kolaylığı ve daha sonra yapılabilecek ilavelere imkan vermesi açısından yere dikey olarak yerleştirilmiştir.

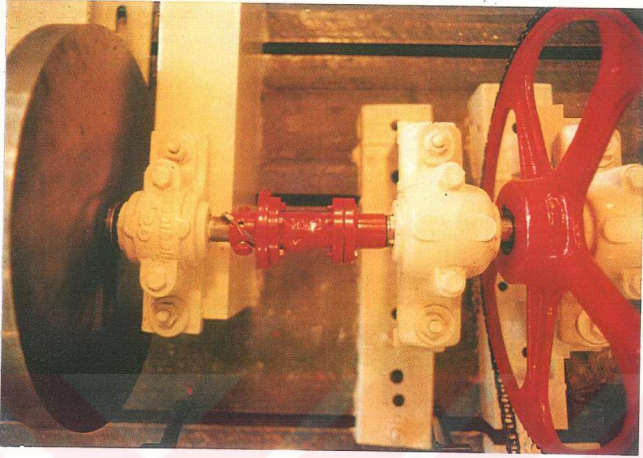
Sistemde, devir sayısı dakikada 0...1500 arasında ayar edilebilen 1,1 kW gücünde bir DC motor kullanılmıştır. Düşük devir sayılarında mildeki döndürme momentini arttırmak için motor ile mil arasına iki redüksiyon kademesi ilave edilmiştir. Bu ilave redüksiyon kademesi ile çok düşük hızlara (0.05 m/s) mümkündür. Hız, zincir dişlisine takılan mile adapte edilen bir takometre ile ayarlanmaktadır.



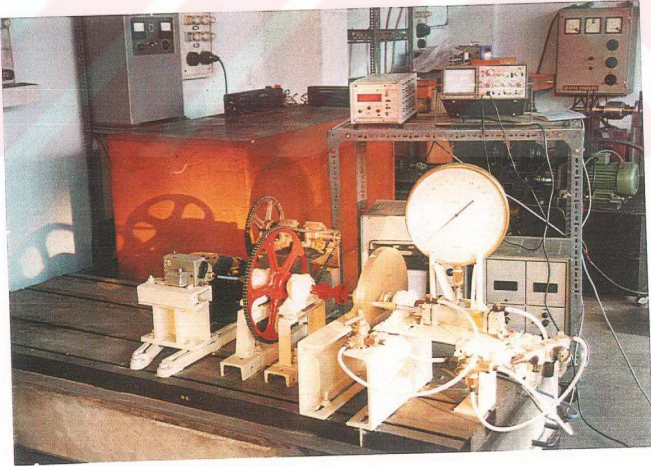
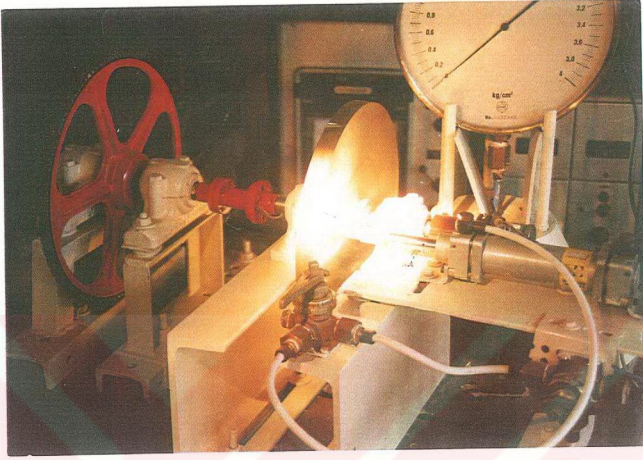
Şekil 6.1.a Tesisatın Şematik Görünüşü



Şekil 6.1.b Tesisatın Görünüşü



Şekil 6.1.c Tesisatın Görünüşü



Şekil 6.1.d Tesisatın Görünüşü

Sürtünme kuvvetinin ölçümü şekil 6.2 de gösterilen moment transduceri ile yapılmıştır. Buradan çıkan sinyaller strainage amplifikatöründen okunmaktadır. Sürtünme kuvvetinin değişimi amplifikatöre bağlanan osiloskop ve rekorderden takip edilmektedir.

Yükleme, bölümün başında da belirtildiği gibi, pnömatik devre ile sağlanmaktadır. Diske dikey konumda yerleştirilen silindir, gerekli havayı kompresörden almaktadır. Basınç ayarı, basınç ayar valfi ile yapılmaktadır.

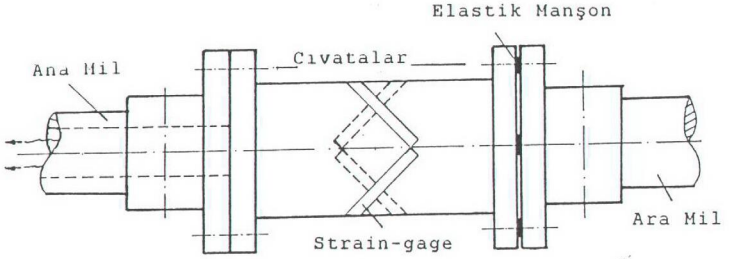
Deney numunelerindeki aşınma miktarlarını bulmak için çok hassas $\pm 0.001g$ hassasiyetde bir terazi kullanılmıştır. Aşınma mesafesi, diskin monte edildiği mile takılı numarator ile saptanmıştır.

6.2 TESİSATIN KURULMASI

İlk olarak redüksiyon kademesine ait zincir dişlisinin ve özel olarak imal edilmiş diskin takılacağı iki adet mil işlenmiştir. Miller dört adet oynak bilyalı yatak ve yuvaları ile birlikte önceden hazırlanmış zemin üzerine monte edilmişlerdir. Belli referans noktalarından ölçümler yapılarak iki milin eksenlerinin çakışması sağlanmıştır. Daha sonra birinci milin üzerine redüksiyon kademesine ait olan büyük zincir dişlisi, ikinci mile ise disk takılmıştır. Büyük zincir dişlisi, uygun uzunluktaki bir zincir vasıtası ile motor miline takılı pinyona bağlanmıştır.

İki mil, moment trasduceri vazifesini gören bir alüminyumdan flanşlı bir ara parça vasıtası ile birbirine bağlanmıştır. (Şekil 6.2)

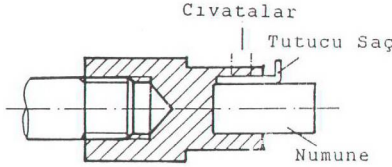
Bu işlemler bittikten sonra sistem, herhangi bir aksaklık olup olmadığını kontrol etmek için boşta çalıştırılmıştır.



Şekil 6.2 Moment Transduceri

Yüklemeyi sağlayacak olan pnömatik silindirdeki hava basıncının hangi yük değerine karşılık geldiğini saptamak amacı ile bir kuvvet transduceri hazırlanmıştır ve bu, bilinen yüklerle statik olarak kalibre edilirken amplifikatörde okunan değerler kaydedilmiştir. Daha sonra transducere pnömatik silindir vasıtası ile basınç uygulanarak çok hassas bir manometrede okunan basınç değerlerinin amplifikatördeki karşılıkları kaydedilerek hangi basınç değerlerinin hangi yüke karşılık geldiği bulunmuştur. Bulunan bu yük değerleri, sürtünme deneylerinin sonunda yapılacak olan sürtünme katsayılarının hesabında, normal kuvvet değerleri olarak alınacaktır.

Kalibrasyon işlemi bittikten sonra pnömatik silindir diske dik olarak profiller üzerine monte edilmiştir. Lastik hortumlarla silindir üzerine basınç ayar valfi, yön kontrol valfi ve hassas manometre takılmıştır. Deney için gerekli hava basıncı 0.2 ... 2 bar arasında ayar edilebilmekte olup, maksimum basıncı 15 bar olan bir kompresörden sağlanmaktadır. Deney numuneleri, pnömatik silindir ucuna bağlı bir ara parçaya yerleştirilmektedir. (Şekil 6.3)



Şekil 6.3 Tutucu

Sürtünme kuvvetini bulmak için kullanılan moment transduceri, önceden işlenen alüminyum flanş üzerine dört adet straingagein tam köprü olarak yapıştırılması suretiyle elde edilmiştir. Dönen bir sistemden dışarıya sinyal alabilmek için diske takılan milin ucuna bir adet fırça-bilezik (slip-ring) monte edilmiştir. Transducerin kalibrasyonunda kullanılmak üzere merkezden uzaklığı 387 mm olan bir manivela kolu işlenmiştir.

Atalet kuvvetlerinin ve yatak kayıplarının bulunması amacı ile sistem önce boşta çalıştırılarak okunan değerler kaydedilmiştir. Daha sonra ikinci milin ucundaki fırça bilezik sökülerek yerine manivela kolu takılmış ve kolun ağırlığının yarattığı değer amplifikatörden okunmuştur. Kol ucuna muhtelif ağırlıklar asılarak her bir ağırlığın yarattığı değerden, kolun yarattığı değer çıkartılarak kaydedilmiştir. Ağırlıkların oluşturduğu momentler hesaplanarak, bu değerlere karşılık gelen amplifikatördeki sapma - moment değeri arasında bir grafik çizilmiştir.

Aşınma miktarlarının hesabında gerekli olan aşınma mesafesinin bulunması için zincir dişlisinin takılı olduğu milin ucuna bir numaratör monte

6.3 DENEY NUMUNELERİ

Yapılan sürtünme ve aşınma deneylerinde 6 tanesi dolgusuz, 6 tanesi dolgulu olmak üzere 12 değişik tipte polimer numune kullanılmıştır. Herbir numune, çapı 10 mm, boyu 20 mm olacak şekilde ilenmitir.

Kullanılan polimerler Őunlardır:

- | | |
|---------------------------------|--------|
| 1. Poliamid6 | (PA 6) |
| 2. Düşük yoğunluklu Polietilen | (DYPE) |
| 3. Yüksek yoğunluklu Polietilen | (YYPE) |
| 4. Polioksimetilen | (POM) |
| 5. Polipropilen | (PP) |
| 6. Politetrafloretilen | (PTFE) |
| 7. PTFE + % 25 Karbon | |
| 8. PTFE + % 35 Karbon | |
| 9. PTFE + % 15 Cam Elyafı | |
| 10. PTFE + % 25 Cam Elyafı | |
| 11. PTFE + % 40 Bronz | |
| 12. PTFE + % 60 Bronz | |

Bu polimerlerin bastırılacağı karşı yüzey X38CrMoV 5 1 takım çeliğinden özel olarak imal edilmiş olup ve yüzey pürüzlülüğü $R_a=0.2$ mm' a drlmtir. Diskin apı 300 mm olup sürtünme kuvvetinin hesabında gerekli olan sürtünme yarıçapı 50...150 mm arasında ayar edilebilmektedir.

Tablo 3 Bazı Polimerlerin Önemli Fiziksel Özellikleri

Polimer	Çekme Dayanımı N/cm ²	Uzama %	Isı iletkenlik katsayısı 10 ⁻⁴ cal-cm/ s.cm ² °C	Isı dayanımı °C	Özgül Ağırlık g/cm ³
PP	4116	600	2.8	127	0.91
HDPE	3097	1200	12	125	0.96
LDPE	3136	650	8	100	0.93
PA 6	5880	100	5.8	120	1.14
PTFE	3440	400	6	260	2.2
PTFE+%15 Cam Elyafı	2200	300	9	270	2.3
PTFE+%25 Cam Elyafı	1862	300	10	260	2.3
PTFE+%25 C	1500	100	17	270	2.15
PTFE+%35C	1500	90	21	270	2.15
PTFE+%60 Br	1800	140	20	270	3.8

6.4 DENEY ŞARTLARI

Deneyler 18° ...20°C ortam sıcaklığı ve yaklaşık % 45 nem oranındaki laboratuvar şartlarında gerçekleştirilmiştir.

Sürtünme katsayısının tayini için yapılan deneylerde, herbirinden üçer adet olmak üzere toplam 36 adet polimer numune kullanılmış olup, bunlara farklı hız ve basınç kademeleri uygulanmıştır. Kayma hızı v 0.05...0.2 m/s aralığında beş kademede ele alınmıştır. P basıncı ise 0.4 -1.5 bar aralığında beş kademede uygulanmıştır. Uygulanan bu hız ve basınç kademeleri aşağıda tabloda verilmiştir.

$P \backslash v$	0.05	0.08	0.012	0.16	0.2
0.4	μ	μ	μ	μ	μ
0.7	μ	μ	μ	μ	μ
1.0	μ	μ	μ	μ	μ
1.2	μ	μ	μ	μ	μ
1.5	μ	μ	μ	μ	μ

Aşınma deneylerinde, yine her polimer tipinden üçer adet olmak üzere toplam 36 adet numune denemeye tabi tutulmuş olup v hızı 0.05-0.16 m/s arasında üç hız kademesinde, P basıncı ise 1-1.5 bar aralığında iki kademede, numunelerin özellikleri de gözönünde bulundurularak tek kademede uygulanmıştır. Bu kademeler hız için 0.05 m/s, 0.12 m/s ve 0.16 m/s, basınç için 1 bar ve/veya 1.5 bar'dır.

BÖLÜM 7. DENEYLERİN YAPILIŞI

7.1 SÜRTÜNME DENEYLERİ

Daha önce belirtildiği gibi, sistemde oluşan yatak ve diğer sürtünme kayıpları deneyler başlamadan önce saptanmış ve bunların deney sonuçlarına olabilecek etkileri bertaraf edilmiştir.

Karşı yüzey ve polimer numune yüzeyleri, her deney başlangıcında teknik kuru yüzey elde etmek için karbontetraklorür ile temizlenmiştir.

Deney numuneleri pnömatik silindirin ucundaki özel olarak işlenmiş tutucuya yerleştirilerek, silindire, disk üzerine belirli bir normal kuvvetle bastırarak şekilde hava verilmiştir. Silindirdeki hava basıncının polimeri hangi normal kuvvetle diske bastırıldığı daha önceden yapılan kalibrasyon sonucu bilinmektedir. Basınç ölçümü 0-3 bar aralığında pnömatik silindire bağlı çok hassas bir manometreden takip edilmiştir. Silindir içindeki basıncın ayarı ise silindirin girişine bağlanan bir basınç ayar valfi ile sağlanmıştır. Pnömatik devre istenilen basınca ayarlandığında sistem DC motor vasıtası ile önceden belirlenmiş dönme hızında harekete geçirilmiştir. Belirlenen hız kademesi millerden biri üzerine tutulan optik takometre ile sağlanmıştır.

Sistem çalışırken, iki mili birbirine bağlayan moment transducerinden, fırça bilezik vasıtası ile amplifikatöre gelen sinyaller okunarak sistem boşta çalışırken kaydedilen yatak kayıpları değeri bu değerden çıkarılmıştır. Böylece daha önce yapılan moment transduceri kalibrasyonundan elde edilen amplifikatör değeri moment diyagramı yardımı ile polimer ve karşı yüzey arasındaki sürtünme momenti bulunmuştur. Bulunan bu moment değeri, polimerin karşı yüzeye baskı uyguladığı noktanın disk merkezine olan uzaklığına yani sürtünme yarıçapına bölünerek sürtünme kuvveti elde edilmiştir. Bu da normal kuvvete bölünerek sürtünme kuvveti elde edilmiştir. Bu da normal kuvvete bölünerek sürtünme katsayısı hesaplanmıştır.

Bu işlem, herbir numune için beş ayrı hız kademesinde beş değişik basınç değeri olmak üzere her hız kademesinde basınç değerleri değiştirilerek tekrarlanmıştır. Deneyler sonunda herbir polimer çeşidi için beş ayrı basınç kademesinde μ -v eğrileri çıkarılmıştır. Kıyaslama yapmak amacı ile, bütün eğriler ayrıca bir tek diyagram üzerinde toplu olarak gösterilmişlerdir.

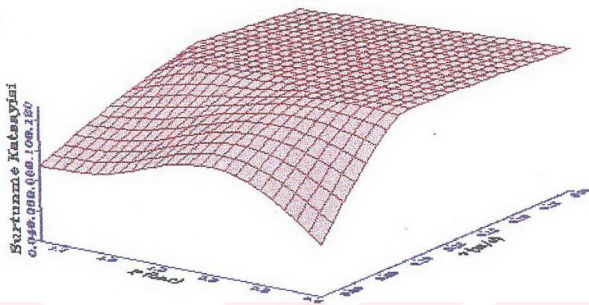
7.2 AŞINMA DENEYLERİ

Aşınma deneylerinde de, sürtünme deneylerinde olduğu gibi, hem karşı yüzey hem de numune yüzeyleri, teknik kuru yüzey elde etmek için, her deney başlangıcında karbontetraklorür ile temizlenmiştir.

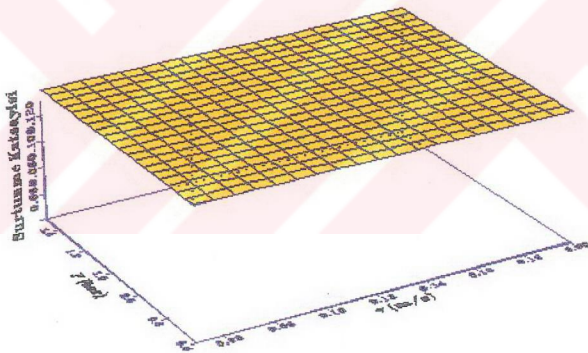
Herbir polimer çeşidindeki aşınma oranının hesabında, ağırlık kaybı ölçümü yapılmıştır. Numuneler, orandan sonra 4 decimal hassasiyetteki bir terazide tartılmıştır.

Deney başlangıcında, numune tutucuya takılarak pnömatik devre istenilen basınca ayarlanmış ve sistem belirlenen dönme hızında çalıştırılmıştır. Böylece numunenin her hız kademesinde basınç değerleri değiştirilerek 1000m aşınma mesafesinde yol katetmesi sağlanmıştır. Bu işlem herbir numune için tekrarlanarak, her hız kademesinde numune yerinden çıkartılıp ağırlık kayıpları bulunmuştur. Elde edilen değerler her polimer çeşidi için değişik basınçlarda w-v eğrileri şeklinde diyagramlarda gösterilmiştir.

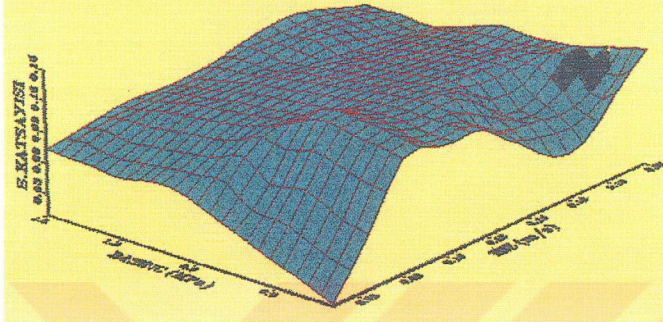
POM



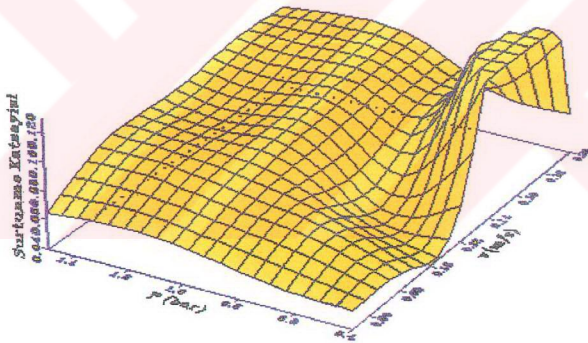
Poliamid 6



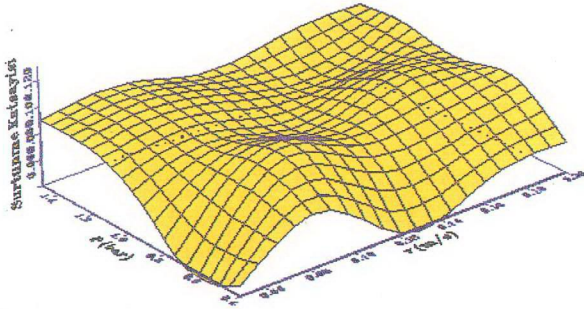
PTFE 15% Cam Elyaf Katkılı



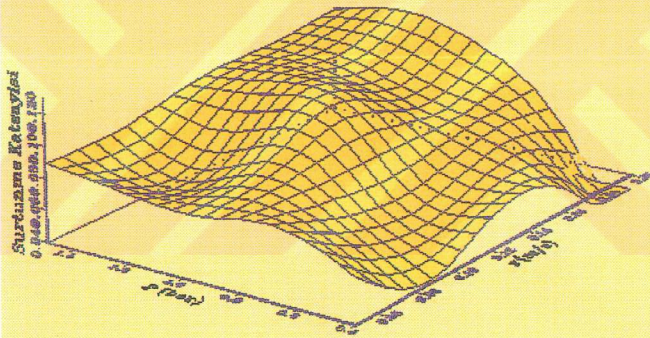
PTFE+%25 Carbon



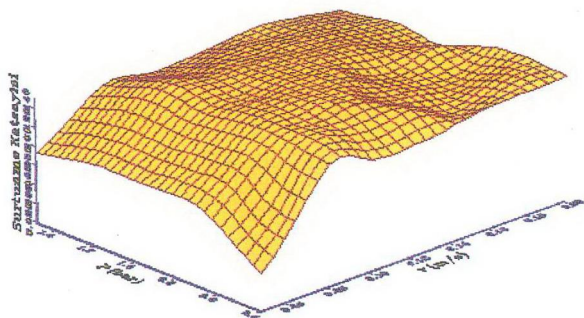
PTFE+%25 Cam Elyafli



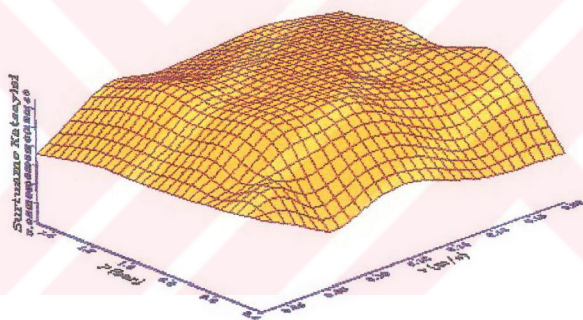
PTFE+35%Carbon



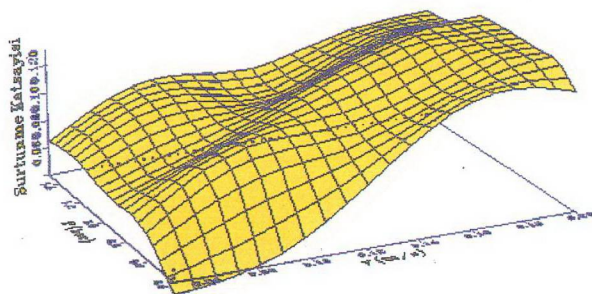
PTFE+%40 Br



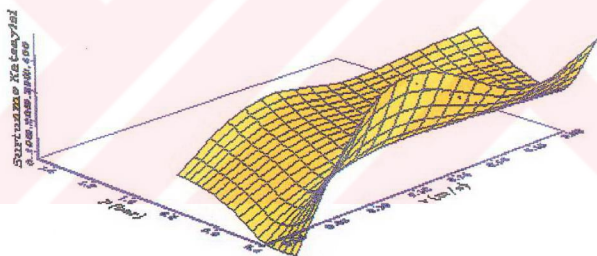
PTFE+%60 Br



ULPOLEN



PP

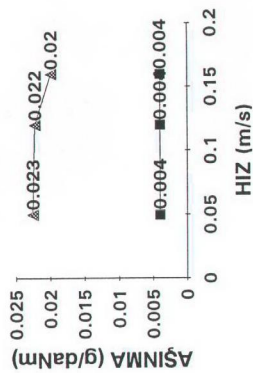


BÖLÜM 8. DENEY SONUÇLARI

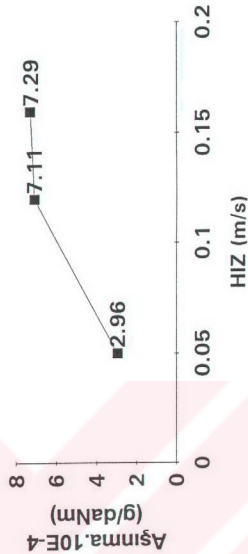
8.1 SÜRTÜNME DENEYİ SONUÇLARI

Bir önceki bölümde belirtilen program çerçevesinde yapılan deneylerin sonuçları bu bölümde verilmiştir. Şekil 8.1 de görüldüğü gibi çeşitli polimerlerin sürtünme katsayısının kayma hızı ve yüzey basıncı ile değişimi parametrelerin değişim tarzının daha rahat gözlenebilmesi için üç boyutlu bir grafik ile verilmiştir. Ayrıca sürtünme karakteristikleri birbirine yakın olan polimerler arasında bir karşılaştırma yapabilmek için özellikleri birbirine yakın olan polimerlerin, sabit basınç için sürtünme katsayısının kayma hızı ile değişimi şekil 8.2 de verilmiştir. Deneylerde ağırlıklı olarak PTFE incelendiği için, PTFE içine katılan dolgu maddesinin cinsine ve dolgu miktarına göre sonuçlar verilmiştir. Örneğin PTFE+%25 karbon ile PTFE+%35 karbonun sürtünme katsayılarının kayma hızı ile değişimleri dolgu maddesinin oranının da etkiye tarzını gösterebilmek amacı ile aynı grafik üzerinde verilmiştir.

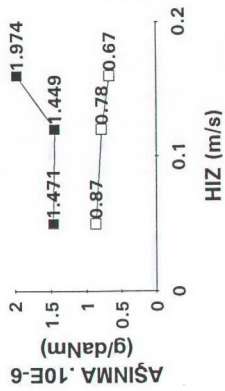
PTFE CARBON KATKILI



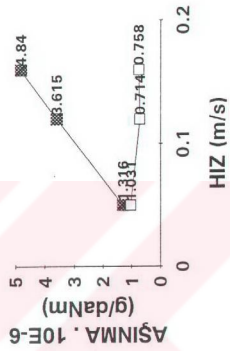
Saf PTFE

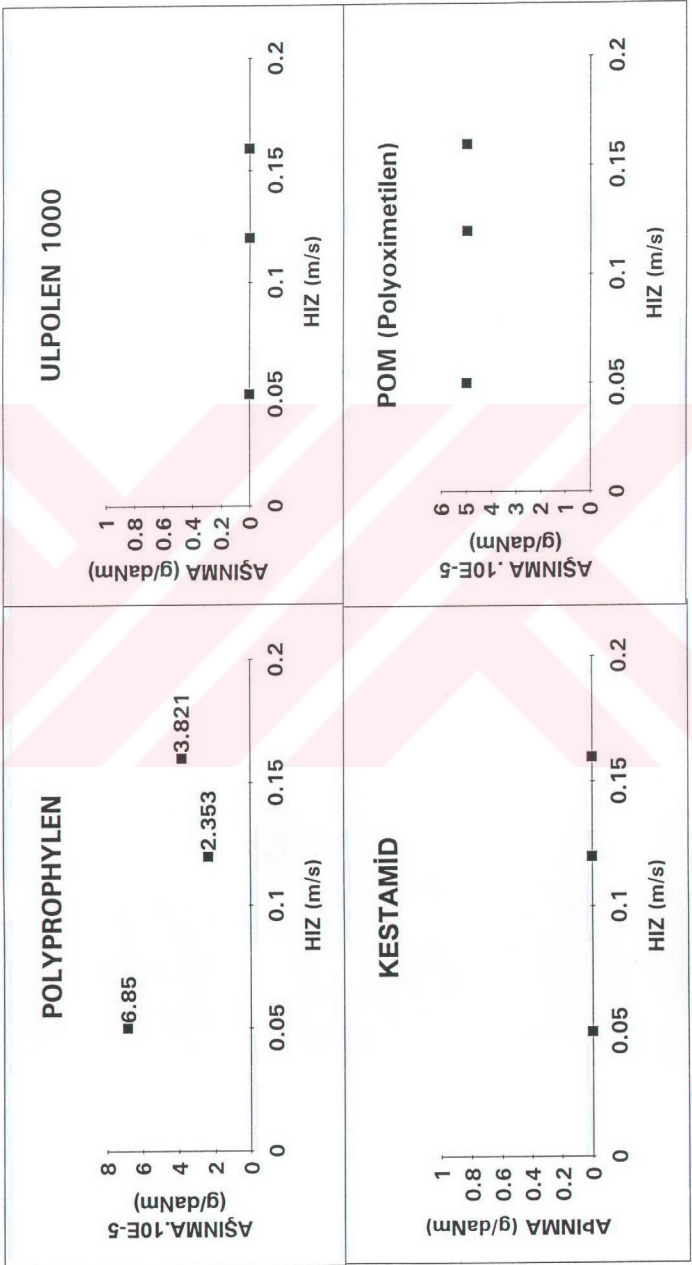


PTFE Cam Elyaf KATKILI

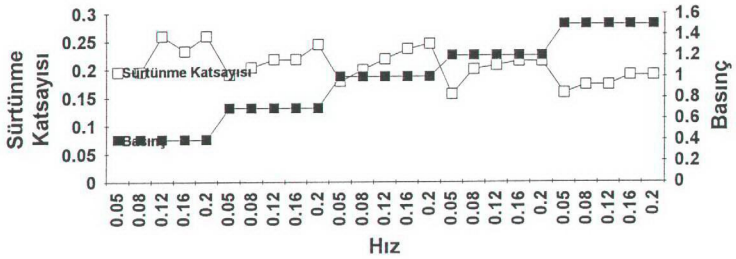


PTFE Bronz KATKILI

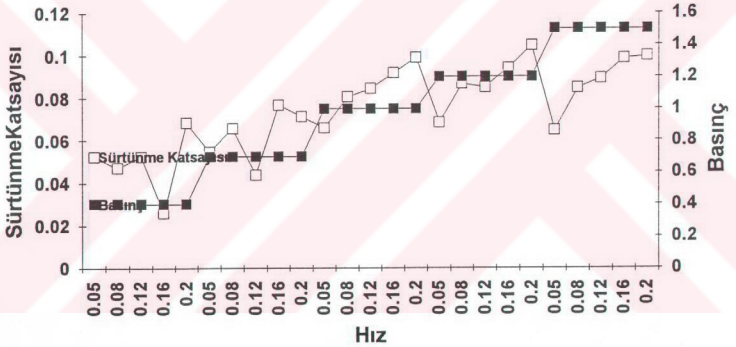




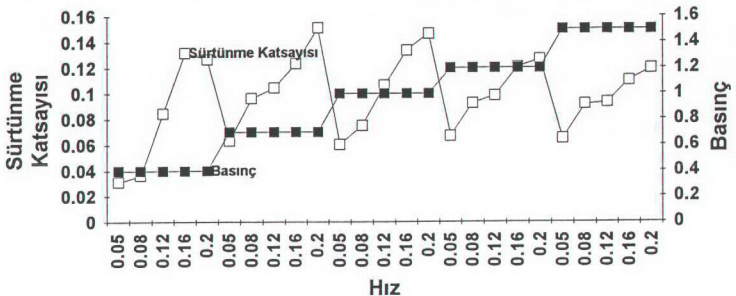
Poliamid 6 Basınç-Hız-Sürtünme Katsayısı Değişimi



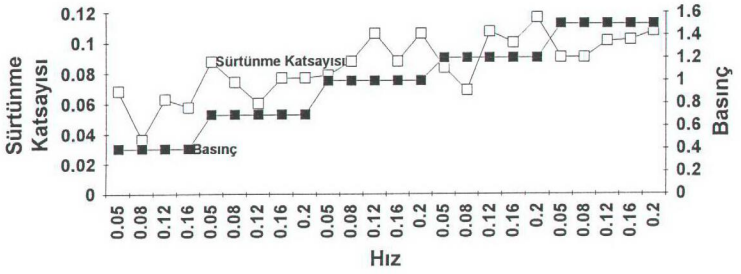
PTFE+ %25 Carbon, Hız-Basınç-Sürtünme Katsayısı Değişimi



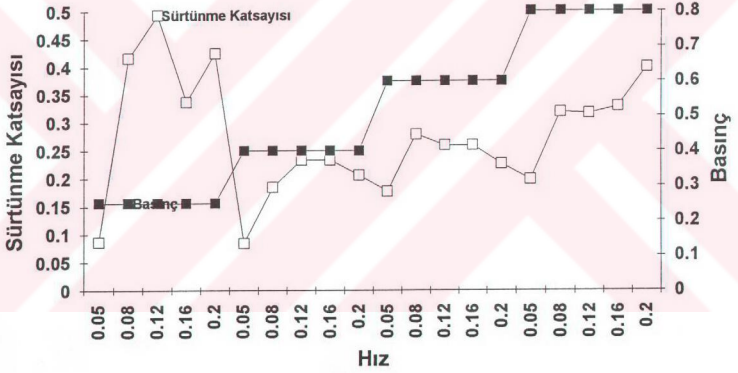
Ulpolen Hız-Basınç-Sürtünme Katsayısı Değişimi



PTFE + %35 Carbon, Hız- Basiñ- Sürtünme Katsayısı Değışimi



PP, Hız-Basiñ-Sürtünme Katsayısı Değışimi



BÖLÜM 9. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Deney numunelerinin değişik basınç ve hız kademelerinde verdiği sonuçlar değişiklik göstermektedir. Saf halde bulunan malzeme ile katkı malzeme arasında fark olduğu grafiklerden de ortaya çıkmaktadır. Aşınma değeri ile ilgili olarak da grafikler katkı polimerlerin daha az aşındığını göstermiştir. Özellikle hız ve basınç artması ile, sürtünme katsayısının arttığı gözlenmiştir.

LİTERATÜR

1. AKKURT, Selma Prof. Dr., Plastik Malzeme Bilgisi (1991)
2. BOWDEN, F. P. and TABOR, D., The Friction and Lubrication of Solids, Clarendon Press, Oxford (1964)
3. MOORE, D.F., The Friction and Lubrication of Elastomers, First Edition, Pergamon Press (1972)
4. KAR, M. K., and Bahadur, S., "Micromechanism of Wear at Polymer-Metal Sliding Interface" Wear, Vol. 146, pp 189-202, (1978)
5. POOLEY, C. M., and TABOR, D., " Friction and Molecular Structure: The Behaviour of Some Thermoplastics", Proc. R. Soc. Lond., A. 329, pp 251-274 (1972)
6. KRAGELSKI, I.V., Friction and Wear, Butter Worths, London, (1965)
7. BLANCHET, T.A., and KENNEDY, F. E., "Sliding Wear Mechanism of Polytetrafluoroethylene (PTFE) and PTFE Composites" Wear, Vol. 153, pp 229-243 (1992)
8. SHIRONG, G., "The Friction Coefficients Between The Steel Rope and Polymer Lining in Frictional Hoisting", Wear, Vol. 152, pp 21-29 (1992)
9. TANAKA, K., " Kinetic Friction and Dynamic Elastic Contact Behaviour of Polymers" Wear, Vol. 100 pp 243-262 (1984)
10. BRISCOE, B.J., POGOSIAN, A.K., and TABOR, D., " The Friction and Wear of High Density Polyethere: The Acion of Lead Oxide and Copper Oxide Fillers", Wear, Vol. 27, pp 19-34 (1974)
11. MENS, Y.W.M., and Gee, A.W.J., "Friction and Wear Behaviour of 18 Polymers in contact with Steel in Environments of Air and Water", Wear, Vol.149, pp 255-268 (1991)

12. GONG, D., XUE, Q., WANG, H., " Study of the wear of Filled Polytetrafluoroethylene" Wear, Vol. 134, pp 283-295 (1989)
13. RYMUZA, Z., " Designing Miniature Plastic Bearings", ASME Journal of Tribology, Vo. 112, pp 135-140, (1990)
14. BRISCOE, B.J., and ZHILONG, N., " The Friction and Wear of γ -Irradiated Polytetrafluoroethylene", Wear, Vol. 100, pp 221-242 (1984)
15. LHYMN, C., "Effect of Normal Load On The Specific Wear at Polymer-Metal Sliding Interface" Wear, Vol. 46, pp189-202 (1974)
16. BIJME, J., LOGANI, C.M., and TEWARI, U.S. "Influence of Fillers and Fibre Reinforcement on Abrasive Wear Resistance of Some Polymeric Composites" Wear, Vol. 138, pp-77-92 (1990)
17. POCOCK, G., and CADMAN, P., "The Application of Differential Scanning Calorimetry and Electron Spectroscopy to PTFE-Metal Reactions of Interest in Dry Bearing Technology" Wear, Vol. 37, pp 129-141 (1976)
18. GONG, D., XUE, Q., and WANG, H., "Esca Study on Tribochemical Characteristics of Filled PTFE", Wear, Vol. 148, pp 161-169 (1991)
19. GONG, D., ZHANG, B., XUE, Q., and WANG, H., " Investigation of Adhesion Wear of Filled Polytetrafluoroethylene by ESCA, AES, and XRD", Wear, Vol. 57, pp 25-39 (1990)
20. PAYNE, N. G., and BAYER, R. G., "Friction and Wear Tests For Elastomers", Wear, Vol.150, pp 67-77 (1991)
21. CADMAN, P., and GOSEEDGE, G.M., "Studies of Polytetrafluoroethylene Transfer Layers Produced by Rubbing in Ultrahigh Vacuum Using a Relatively Simple Apparatus", Wear Vol. 51, pp 57-65 (1978)

22. BRISCOE, B.J., STEWARD, M.D., and GROSZEK, A.J., "The Effect of Carbon Aspect Ratio on The Friction and Wear of PTFE" *Wear*, Vol. 42, pp 99-107 (1977)
23. GONG, D., ZHANG, B., XUE, Q., and WANG, H., "Effect of Tribochemical Reaction of Polytetrafluoroethylene Transferred Film with Substrates on its Wear Behaviour", *Wear*, Vol. 137, pp 267-273 (1990)
24. KUMMER, H,W Unified Theory of Rubber And Friction. English Bulletin B-94 The Pennsylvana State University 1966 July Pb 6-7
25. THIRION, P. *Revue Générale Caoutchouc* 23 (1946) 101-106
24. Çok Sayıda firma katalogu.

ÖZGEÇMİŞ

1971 yılında İstanbul' da doğdu. Maçka İlkokulu, ardından Özel Kadıköy Lisesini tamamladı. Liseden birincilikle mezun oldu. 1988 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümüne girmeye hak kazandı. 1992 yılında Makina Mühendisi ünvanı ile mezun oldu. 1992 yılında yine İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi'nde Yüksek Lisans programına girmeye hak kazandı.

Halen transformatör imal eden bir firmada Makina Mühendisi olarak görev yapmaktadır.

