

İçten Yanmalı Motorlarda Sürtünen ve Yuvarlanan Parçaların Plazma Yöntemi ile
Kaplanarak Aşınma Etkisinin İncelenmesi

Ömer Selman Ekem

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak 2011

Investigation of Wearing Effects of Plasma Coating on Friction and Rolling Elements of
Internal Combustion Engines

Ömer Selman Ekem

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Mechanical Engineering

January 2011

İçten Yanmalı Motorlarda Sürtünen ve Yuvarlanan Parçaların Plazma Yöntemi ile Kaplanarak
Aşınma Etkisinin İncelenmesi

Ömer Selman Ekem

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Yrd.Doç.Dr.Ramazan UĞURLUBİLEK

Ocak - 2011

ONAY

Mühendislik Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Ömer Selman Ekem'in YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "İçten Yanmalı Motorlarda Sürtünen ve Yuvarlanan Parçaların Plazma Yöntemi ile Kaplanarak Aşınma Etkisinin İncelenmesi" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Danışman : Yrd.Doç.Dr.Ramazan UĞURLUBİLEK

İkinci Danışman : -

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ramazan UĞURLUBİLEK

Üye : Prof. M. Selami KILIÇKAYA

Üye : Prof. Dr. Bilal PAR

Üye : Yrd. Doç. Dr. Nedret AYDINBEYLİ

Üye : Yrd. Doç. Dr. Mustafa ULUTAN

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Nimetullah BURNAK

Enstitü Müdürü

ÖZET

Makine Mühendisliğinin birçok çalışma alanında sürtünme ve aşınmanın istenen veya istenmeyen etkileri söz konusudur. Bu etkilerin yok edilmesi veya geliştirilmesi yönünde iyileştirme çalışmaları daima gereklidir.

Bu çalışmada öncelikle ıslak gömleklili içten yanmalı Renault marka otomobilin motor silindir gömleğinden alınan numunelerden bir kısmına azot kaplaması yeni bir plazma kaplama yöntemi olan Termiyonik Vakum Ark (TVA) sistemi kullanılarak ilk defa yapılmıştır.

Ayrıca sürtünme ve aşınma etkilerinin belirlenebilmesi amacıyla bir yarı tribo çift test cihazı tasarlanmış ve imalatı gerçekleştirilmiştir.

Sonuç olarak kaplanmamış ve azot kaplanmış numunelerin yarı tribo çift test cihazında sürtünme katsayıları belirlenmiş ve birbirleri ile mukayese edilerek yapılan plazma ile azot kaplanması sonucunda sürtünme katsayısının düşürülebildiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: sürtünme katsayısı, TVA kaplama.

SUMMARY

The required and undesirable effects of friction and wear are in the major concerns of mechanical engineering studies. The new research studies on friction and wear are always necessary.

In the beginning of this study the samples of a Renault engine cylinder liner were coated nitrogen by using Thermoionic Vacuum Arc plasm coating method as a new method of plasm coating process.

Additionally a semi tribo couple test device was designed and manufactured to be able to determine the friction and wearing characteristics of samples.

Finally the friction coefficients of coated and uncoated samples were measured with semi tribo couple test device. As a result of evaluating friction coefficients measurements, it was introduced that the friction coefficient of cylinder liner can be reduced by Thermoionic Vacuum Arc plasm nitrogen coating methode.

Key Words: friction coefficient, TVA coating.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmalarında, gerek derslerimde ve gerekse tez çalışmalarında, bana danışmanlık ederek, beni yönlendiren ve her türlü olanağı sağlayan danışmanım Yrd. Doç. Dr. Ramazan UĞURLUBİLEK'e teşekkür ederim.

Mühendislik ile ilgili deneysel ve teorik çalışmalarım sürecinde her türlü yardım, ilgi ve bilgileriyle çalışmalarına ışık tutan Yrd. Doç. Dr. Nedret AYDINBEYLİ, Prof. Dr. Remzi GÜRLER, Yrd. Doç. Dr. Osman Nuri ÇELİK, Yrd. Doç. Dr. Mustafa ULUTAN, Yrd. Doç. Dr. Ümit ER ve Yrd. Doç. Dr. İbrahim ÇELİKYÜREK'e teşekkür ederim.

Plazma ile ilgili deneysel ve teorik çalışmalarım sürecinde bilgilendirme ve yol gösterici yardımları yanı sıra laboratuvar olanaklarını çalışmalarım için kullanıma açan, deneysel düzeneklerin kurgulanmasında ve kurulmasında katkı sağlayan Prof. Dr. Naci EKEM, Yrd. Doç. Dr. Şadan KORKMAZ, Yrd. Doç. Dr. Suat PAT, Yrd. Doç. Dr. M. Zafer BALBAĞ'a teşekkür ederim. Katkıları yanı sıra arkadaşlıklarıyla da destek veren Niyazi Emre ÇETİN, Murat ÖZMUMCU, Sinan TEMEL, Saliha ELMAS ve teknisyen Saadettin ALEMDAR'a teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olan, desteklerini esirgemeyen eşim ve tüm aile fertlerime sonsuz teşekkür ederim.

ÖMER SELMAN EKEM

İÇİNDEKİLER

ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiv
1.Bölüm GİRİŞ	1
2.Bölüm SÜRTÜNME	6
2.1.Sürtünme Kuvveti, Kinetik ve Statik Sürtünme ve Sürtünme Katsayıları	7
3.Bölüm AŞINMA	12
3.1.Triboloji ve Tribolojik Sistem	13
3.2.Aşınmaya Etki Eden Faktörler	15
3.3.Aşınma Direnci (Aşınmaya Karşı Dayanıklılık)	15
3.4.Aşınma Türleri	16
3.4.1.Abrasyon Aşınma (Abrasiv Aşınma) Mekanizması	16
3.4.2.Erozyon Aşınma (Erozif Aşınma) Mekanizması.....	18
3.4.3.Adhezyon Aşınma (Adhesiv Aşınma) Mekanizması	18
3.4.4.Korozyon Aşınma (Korozif Aşınma) Mekanizması	18
3.4.5.Yorulma Aşınma (Yüzzey Yorulmas) Mekanizması	19
3.5.Aşınmanın Ekonomik Açıdan Önemi	20
3.6.Aşınma Deneyleri, Test Ölçümleri ve Aşınma Test Cihazı Modelleri ile Deney Sistemleri.....	20
3.6.1.Aşınma Deneyleri ve Test Ölçümleri	20
3.6.2.Aşınma Test Cihazı Modelleri ile Deney Sistemleri	22
4.Bölüm PLAZMA	25
4.1.Plazmanın Tarihsel Gelişimi ve Tanımı.....	25
4.2.Plazmanın Özellikleri.....	28

İÇİNDEKİLER (Devam)

5.Bölüm PLAZMA İLE AZOT KAPLAMA (PLAZMA NİTRÜRLEME)	30
5.1.Plazma Yüzey İşlemleri	30
5.2.Plazma ile Azot Kaplama	31
5.3.Plazma ile Azot Kaplama Parametreleri	31
5.4.Plazma ile Azot Kaplama Yönteminin Avantajları	32
5.5.Plazma ile Diğer Termo Kimyasal Yüzey İşlemleri	33
6. Bölüm HAZIRLANAN DENEY DÜZENEKLERİ VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR	34
6.1.Sürtünme ve Aşınma DeneY Düzeneği	34
6.1.1.Tahrik Motoru	38
6.1.2.Eksen Ayarlayıcı	38
6.1.3.Bağlantı Milleri	39
6.1.3.a.Bağlantı Mili-1	39
6.1.3.b.Bağlantı Mili-2	39
6.1.4.Mil Taşıyıcı	39
6.1.5.Kuvvet Sensörü (Load Cell)	40
6.1.6.Yük Kolu	40
6.1.7.Aşındırıcıyı Tutan Eleman (Aşındırıcının Yerleştirildiği Eleman) ..	41
6.1.8.Numune (Aşınan) Tutucusu	41
6.1.9.Isıtıcı Eleman	42
6.1.10.Isılçift (Thermocouple)	42
6.1.11.Termostat	43
6.1.12.Yağ Haznesi	43
6.1.13.Yük	44
6.1.14.Havalandırma Sistemi	44
6.1.15.Elektrik Panosu	45
6.1.16.Osiloskop ve Filtre	49
6.1.17.Taşıyıcı Tabla	49
6.1.18.Acil Durdurma Düğmesi	50

İÇİNDEKİLER (Devam)

6.2.Plazma ile Azot Kaplama Deney Düzenegi	50
6.2.1.Termiyonik Vakum Ark (TVA) Sistemi.....	51
6.2.1.1.Vakum Odası	52
6.2.1.2.Pompalar Sistemi	53
6.2.1.3.Güç Kaynağı Sistemi	54
6.2.1.4.Elektron Tabancası Ünitesi (Doğrudan Isıtmalı Katot)	55
6.2.1.5.Ampermetre/Voltmetre Paneli	55
6.2.1.6.Soğutma Sistemi	56
6.2.1.7.Vakum Ölçüm Ünitesi	56
6.2.2.Termiyonik Vakum Ark (TVA) Sisteminde Yapılan Değişiklikler	57
6.2.2.1.Isıtıcı	57
6.2.2.2.Dijital Sıcaklık Ölçer	58
6.2.2.3.Gaz Karıştırıcı.....	58
6.3..Deneyisel Çalışmalar.....	59
6.3.1.Islak Gömleklili İçten Yanmalı Renault Marka Bir Otomobil Motorunun Silindir Gömleğinden Alınan Numulerin Plazma ile Azot Kaplanması Deneyi	59
6.3.2.Kaplanmamış Numunenin Ve Kaplanmış Numunenin Sürtünme Katsayısı Değerlerinin Ölçülmesi Deneyi	64
6.3.2.1.Kaplanmamış Numunenin Sürtünme Katsayısı Hesaplanması	67
6.3.2.2.Kaplanmış Numunenin Sürtünme Katsayısı Hesaplanması	68
6.3.3.Deneyisel Sonuçların Değerlendirilmesi	70
7. Bölüm KARŞILAŞTIRMA ÖLÇÜMLERİ.....	71
7.1. CSM Tribometer Marka Tam Otomatik Ölçüm Cihazındaki Test Sonuçları	71
7.2. Sürtünme Katsayısı Değerlerinin Karşılaştırılması	73
8. Bölüm SONUÇ	74
9. Bölüm KAYNAKLAR.....	75

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Normal kuvvet ve sürtünme kuvveti, blok ve zemin yüzey arasında kalan yüksek noktalardaki moleküllerin birbiriyle etkileşiminden kaynaklanır.....	7
2.2 Bir cisim blok bir yüzey üzerinde itildiğinde veya çekildiğinde, yüzey bloğa bir dokunma kuvveti uygular.....	7
2.3 Kinetik ve statik sürtünme.....	10
3.1 Tribolojik Sistemin Şematik Gösterimi	13
3.2 Abrasiv aşınma mekanizmaları	17
3.3 Üç elemanlı abrasiv aşınma	17
3.4 Aşınma testlerinin gerçeklik derecesine göre sınıflandırılması.....	22
3.5 Bazı kayma, sürtünme, aşınma test modellerinin şematik gösterimi.....	23
4.1 Maddenin dört hali	26
6.1 Sürtünme ve aşınma test cihazının üstten çekilmiş fotoğrafı	34
6.2 Sürtünme ve aşınma test cihazının fotoğrafı	35
6.3 Sürtünme ve aşınma test cihazının basit şematik çizimli gösterimi	37
6.4 Sürtünme ve aşınma test cihazının tamamının şematik gösterimi.....	37
6.5 Tahrik motorunun fotoğrafı	38
6.6 Eksen ayarlayıcı elemanın fotoğrafı	38
6.7 Mil taşıyıcının fotoğrafı	39
6.8 Kuvvet sensörünün fotoğrafı.....	40
6.9 Yük kolu ve aşındırıcı tutan elemanın fotoğrafı.....	40
6.10 Aşındırıcı tutan elemanın fotoğrafı	41
6.11 Numune (aşınan) tutucusunun fotoğrafı	42
6.12 Isıtıcı elemanın fotoğrafı.....	42
6.13 Isılçiftin fotoğrafı	42
6.14 Termostatın fotoğrafı	43
6.15 Yağ haznesi ve yükün birlikte fotoğrafı.....	43
6.16 Havalandırma sisteminin fotoğrafı	44
6.17 Elektrik panosunun iç fotoğrafı	45
6.18 Açma-kapama ünitesi paket şalter şeması	46
6.19 Kontrol panosu bağlantıları şeması	46
6.20 Motor ve konventör on/off kontrol devreleri şeması.....	47
6.21 Yük sensörü bağlantı şeması	47
6.22 Isıtıcı ve termostat bağlantı şeması	48
6.23 Elektrik panosunun ön kapak fotoğrafı	48
6.24 Osiloskop ve filtrenin fotoğrafı	49
6.25 Acil durdurma düğmesi	50
6.26 Termiyonik vakum ark sisteminin şematik gösterimi.....	51
6.27 Vakum odası	52
6.28 Mekanik ve difüzyon pompası fotoğrafları.....	53

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

<u>Sekil</u>		<u>Sayfa</u>
6.29	Termiyonik Vakum Ark Güç Kaynağı Sistemi	54
6.30	Elektron tabancası ünitesi	55
6.31	Ampermetre/voltmetre panelinin fotoğrafı.....	55
6.32	Vakum ölçüm ünitesi.....	56
6.33	Plazma ile azot kaplama sistemi	57
6.34	Isıtıcı ve numune tutucu.....	57
6.35	Dijital sıcaklık ölçer.....	58
6.36	Gaz karıştırıcı ünite	58
6.37	Kaplanmamış numunenin XRD değerleri	62
6.38	180 dakika süreyle plazma ile azot kaplanması yapılmış numunenin XRD değerleri	63
7.1	CSM-Tribometer cihazının fotoğrafı.....	71
7.2	Kaplanmamış numunenin CSM Tribometer marka tam otomatik ölçüm cihazından alınan sürtünme katsayısı (μ_{K1}) değeri	72
7.3	Kaplanmış numunenin CSM Tribometer marka tam otomatik ölçüm cihazından alınan sürtünme katsayısı (μ_{K2}) değeri.....	72

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 Plazma Teknolojilerini ticari geliştiricileri ve uygulama alanları.....	2
2.1 Yaklaşık sürtünme katsayıları.....	9
6.1 İçten yanmalı Renault marka bir otomobil motorunun silindir gömleğinden alınan numunelerin spektral analiz değerleri.....	60
6.2 İçten yanmalı Renault marka bir otomobil motorunun silindir gömleğinden alınan numunelerin plazma ile azot kaplanması sürecinde plazma işlem parametrelerinin 180 dakikalık süredeki değerleri	61
6.3 Kuvvet sensörünün uygulanan kuvvetlere karşılık gösterdiği voltaj değerleri	65
6.4 Sürtünme ve aşınma test cihazında istenmeyen etken kuvvetlerin kuvvet sensörüyle alınan gerilim değerleri.....	66
6.5 Kaplanmamış numuneye etki eden kuvvetlerin (sürtünme kuvveti+istenmeyen kuvvetler) kuvvet sensöründen okunan voltaj değerleri.....	67
6.6 Kaplanmış numuneye etki eden kuvvetlerin (sürtünme kuvveti+istenmeyen kuvvetler) kuvvet sensöründen okunan voltaj değerleri.....	68
7.1 Yarı triboçift test cihazı ile CSM Tribometer marka model test cihazında alınan sürtünme katsayıları karşılaştırma tablosu	73

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklamalar</u>
° C	Santigrad derece
AC	Alternatif Akım
AFM	Atomik kuvvet mikroskobu
Al	Alüminyum
Ar	Argon
BKNZ.	Bakınız
cm	Santimetre
CVD	Kimyasal Buhar Depolama
DC	Doğru Akım
ESOGÜ	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
et al.	Ve diğerleri
e	Elektron Yüğü
E _i	İyonizasyon Enerjisi
E ₁ ,E ₂ ,E ₃	Enerji
E _a	Ayrışma Enerjisi
f	Sürtünme Kuvveti
f _k	Kinetik Sürtünme Kuvveti
f _s	Statik Sürtünme Kuvveti
F _T	Toplam Yatay Kuvvet
F _d	İstenmeyen Yatay Kuvvet
g	Gram
HV	Yüksek Voltaj
Hz	Hertz
μ _s	Statik Sürtünme Katsayısı
μ _k	Kinetik Sürtünme Katsayısı
mm	Milimetre
ms	Milisaniye
mV	Milivolt
m ³	Metreküp
F _n	Normal Kuvvet
N	Newton
N ⁺	Azot İyonu
N ₂	Azot Gazı
RMS	Root Mean Square
t	Zaman
T	Çekme Kuvveti
TVA	Termiyonik Vakum Ark
vb.	Ve benzeri
vd.	Ve diğerleri
XRD	X-Işınları Difraksiyonu
W	Watt

1. GİRİŞ

Tribolojinin ana çalışma alanı olan sürtünme ve aşınma tamamen yok edilemediği ve edilemeyeceği için çok önemli bir problem olarak güncelliğini korumaktadır.

Sürtünmenin söz konusu olduğu makine elemanlarında ortaya çıkan aşınma problemlerini azaltmak, metal elemanların ve takımların yüzey ve yüzeye yakın yerlerinde daha iyi mekanik özellikler elde etmek önemli birer mühendislik çalışma alanları haline gelmiştir. Yüzey işlemleriyle malzemenin sertlik, yorulma gibi mekanik özelliklerinin yanında sürtünme ve aşınma, oksidasyon ve korozyon gibi özellikleri de iyileştirilebilmekte ve geliştirilebilmektedir.

1982 yılında Amerikan Ulusal Teknoloji Enstitüsü'nün araştırmasına göre korozyon ve aşınmadan kaynaklanan zararın, gayri safi milli hasılanın %6'sını (178,5 milyar dolar) teşkil ettiği görülmüş ve bu yöndeki çalışmalara ağırlık verilmesi önerilmiştir (Saklakoğlu ve Saklakoğlu, 2004).

Özellikle çelik malzeme üzerinde araştırma geliştirme (AR-GE) çalışmaları çok yoğun olarak yapılmaktadır. Çelikten imal edilen ürünler imalat sektöründe önemli bir yer işgal etmektedir. Kalıp sektöründe de malzemelerin mekanik özelliklerinin geliştirilmesi üzerine AR-GE çalışmaları çok yoğun bir şekilde yapılagelmektedir.

Son yıllarda yüzey iyileştirme ile ilgili AR-GE çalışmaları çeşitli plazma yöntemleri kullanılarak kaplama, nitrürleme ve iyonizasyon çalışmaları üzerine yoğunlaşmaktadır.

A.B.D Los Alamos Araştırma ve Geliştirme Laboratuvarlarında iyonizasyonla ilgili başarılı çalışmalar sürdürülmekte olup, çok büyük (yaklaşık 8 m³) bir işlem odasında ağırlığı 1 tonun üzerinde olan General Motors' a ait kalıp bloklarına çeşitli plazma yöntemleri uygulanarak iyonlama ile sertleştirme çalışmaları yapılmaktadır. Yine General Motors için 1000 adet pistonun aynı anda iyileştirme çalışmasına tabii

tutulabileceği bir sistem geliştirilmiştir. Mekanik uygulamalarda geniş ölçekli boyutlarda ve karmaşık yapılarda yüksek verim elde edilebilmektedir (Saklakoğlu ve Saklakoğlu, 2004).

AR-GE çalışmalarında aşınma, sertlik, sürtünme, yorulma ömrü, kırılma gevrekliği, oksidasyon, korozyon ve optik özellikler gibi bazı yüzey karakteristiklerinin iyileştirilmesi için başta metal malzemeler olmak üzere daha çok çelik, seramik, plastik, karbür, titanyum ve cam malzemelere uygulanan çeşitli plazma yöntemleri ile oldukça iyi yüzey özellikleri elde edilmiştir.

Plazma teknolojilerini geliştirerek ticari amaçlı kullanan bugünün büyük şirketlerinden bazıları tablo 1.1’ de verilmiştir.

Tablo 1.1 Plazma teknolojilerini ticari geliştiricileri ve uygulama alanları
(Saklakoğlu ve Saklakoğlu, 2004)

Şirket	Uygulama Alanı
Varian, Palo Alto, Cal. A.B.D.	Mikroelektronik
Silicon Genesis, Campbell, Cal. A.B.D.	Mikroelektronik
Panasonic, Osaka, Japonya	Mikroelektronik, Triboloji
Ionex, Traverse City, Michigan, A.B.D.	Otomotiv Sanayi
PVI, Oxnard, Cal. A.B.D.	Uzay San., Mikroelektronik, Optik Kaplama
Empire Hard Chrome, Chicago A.B.D.	Otomotiv, Döküm Endüstrisi
ANSTO, Sydney, Avustralya	Triboloji
Diversified Technologies, Boston A.B.D.	Genel
North Star Research Corp., New Mexico A.B.D.	Genel

Uzay çalışmalarında sürtünme ve aşınma ile ilgili problemlerin, en üst düzeyde plazma teknolojileri ile çözülebildiği söylenmektedir.

Günümüzde metal yüzeylerinin dış ortamların etkilerinden korunması, kullanım yerlerinde maruz kaldıkları yorulma, korozyon, sürtünme ve aşınma etkilerine direnç

göstermesi amacıyla kullanılan kaplama ve yüzey geliştirme tekniklerine olan ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır. Malzeme yüzeyinin sert ve aşınmaya dayanıklı, ana malzemenin de yeterli mukavemette ve tok olması gerektiğinden, pratik uygulamalarda yüzey sertleştirme veya yüzey kaplama yöntemleri tercih edilir. Malzeme yüzeyinin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde en çok uygulanan yöntem çeliklerde yapılan yüzey sertleştirme işlemleridir. Bu yöntemler; malzeme yüzeyinin sert, mukavemetli ve aşınmaya dayanıklı olmasını; iç kısmının da enerjiyi absorbe edecek özellikte tok kalmasını sağlar. Yüzeyin sertleştirilmesinde, normal koşullarda yüzeyde yeterli düzeyde sertlik değerine ulaşamayan çeliklerin yüzeyine sementasyonla karbon difüzyonu sağlanarak (Brandt and Warner, 2005) ya da nitürasyon ve borlama gibi tekniklerle yüzeye sertliği artırıcı element atomlarının geçişi sağlanıp yüzeyde doğrudan sertleşmenin olması gerçekleştirilir (Schneider and Hiebler, 1998; Baranowska, et al., 2001; Kop, et al., 2002; Ulutan, 2007).

Dökme demirlerde uygulanan değişik yüzey sertleştirme yöntemlerinin tümünde amaç sert ve aşınmaya dayanıklı bir yüzey ile, tok bir ana kütle elde etmektir. Yüzey sertleştirme işlemleri ile dış kısımlarda genellikle basma iç gerilmeleri oluşturarak parçanın yorulma dayanımı da artırılır (Ulutan, 2007).

Bugün için ülkemizdeki bilimsel çalışmalarda da plazma teknolojilerinden yararlanılmaya başlanıldığı görülmektedir. Özellikle sürtünme ve aşınma problemlerinin aşılmasında ve malzemelerin sertleştirme ve yüzey iyileştirme çalışmalarında plazma teknolojilerinden yararlanıldığı, çeşitli plazma yöntemlerinin kullanıldığı belirlenmiştir. Bu belirlemeler, az da olsa yapılan yüksek lisans ve doktora tez çalışmaları yanı sıra çeşitli bilimsel dergilerdeki yayınlar ile makalelerden elde edilmiştir (Ülker, 2006; Arman, 2005).

Plazma ile azot kaplama günümüzde savunma sanayinde, özel sektörde, motor pistonlarında, krank millerinde, valflerde, kam milinde, dişlilerde, matkap, zımba gibi kesici takımlarda, dönme ve eğilmeye maruz kalan tüm makine parçalarında kullanılmaktadır. Bu işlemin ekonomik ve kolay uygulanabilmesi endüstride kullanım alanını artırmıştır (Çelik vd. 2002; Ülker 2006).

Bu çalışmada;

1. Sürtünme ve aşınmanın makine mühendisliğinin tüm çalışma alanlarında önemli bir konu olması nedeniyle bu kavramlardan kısaca bahsedilmiş ve sürtünme ve aşınma etkilerini ölçebilecek bir deney sistemi kurgulanarak, sadeleştirilmiş parça testi yapabilen yarı triboçift test cihazı imal edilmiştir.
2. Sürtünme ve aşınma etkilerinin azaltılması, malzemenin bu etkilere karşı direncini arttırmak ile mümkün olabilmektedir. Bu amaçla günümüzde birçok çalışma yapılmaktadır. Makine mühendisliğinde en çok kullanılan yüzey sertleştirme işlemlerinden birisi nitrürlemedir. Plazma ile azot kaplama (plazma nitrürleme) ise literatürde günümüzdeki en etkin nitrürleme işlemi olarak yer almaktadır. Termiyonik Vakum Ark (TVA) sistemi plazma kaplama alanındaki en gelişmiş sistemlerden biridir. Böyle bir sistem ele alınarak plazma ile azot kaplamak üzere modifiye edilmiştir.
3. a) Islak gömlekli içten yanmalı Renault marka bir otomobil motorunun silindir gömleğinden alınan 10x25x3,5 mm' lik kaplamasız numunenin (ana malzeme) tasarlanan ve imalatı gerçekleştirilen yarı triboçift test cihazında sürtünme katsayısı (μ_{K1}) ölçülmüştür.
b) Islak gömlekli içten yanmalı Renault marka bir otomobil motorunun silindir gömleğinden alınan 10x25x3,5 mm' lik numunenin TVA plazma ile azot kaplama sisteminde plazma kaplaması yapılmıştır.
c) Islak gömlekli içten yanmalı Renault marka bir otomobil motorunun silindir gömleğinden alınan 10x25x3,5 mm' lik plazma ile azot kaplaması yapılmış numunenin yarı triboçift test cihazında sürtünme katsayısı (μ_{K2}) ölçülmüştür.
4. Islak gömlekli içten yanmalı Renault marka bir otomobil motorunun silindir gömleğinden alınan 10x25x3,5 mm' lik kaplanmamış numunenin sürtünme katsayısı μ_{K1} değerleri ile aynı malzemenin plazma ile azot kaplanmış halindeki sürtünme katsayısı μ_{K2} değerleri karşılaştırılmıştır.

5. Islak CSM Tribometer marka model test ölçüm cihazı ile μ_{K1}' ve μ_{K2}' sürtünme katsayı değerleri tekrar ölçülmüştür.
6. Tasarlanıp imal edilen yarı triboçift test cihazı ölçüm sonuçları ile CSM Tribometer marka model test cihazı ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır.

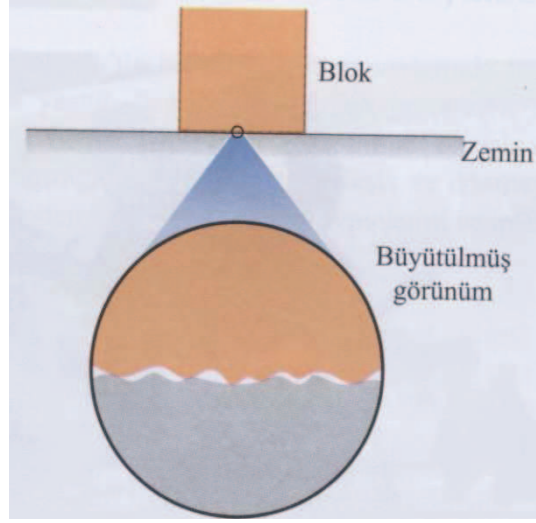
2. SÜRTÜNME

Sürtünme (Friction), latince fricare kelimesinden gelmekte olup, sürtünme ve ovalama anlamı taşır. Bu olgu insanlık tarihi kadar eskidir (Akbulut, 2007).

Leonardo da Vinci (1452-1519) yaptığı çalışmalar sonucunda sürtünme kuvvetinin, kayan kütlelerde normal yükü ilişkili, kontak alanından bağımsız olduğunu gözlemlemiştir. Amontons (1663-1705), Leonardo'nun tespitini teyit ederek 1699'da ilk sürtünme kanununu tarif etmiş ve malzemelerden bağımsız olarak, sürtünme katsayıları için sabit değerler elde etmiştir (Zumgahr, 1987). Coulomb, 1785'te statik sürtünme ile kinetik sürtünmeyi birbirinden ayırarak mevcut sürtünme kanunlarını geliştirmiştir (Gedikli, 2000).

Otomobil motorlarında kullanılan yağ, motor parçaları arasındaki sürtünmeyi azaltır. Fakat otomobil tekerlekleriyle yol arasında sürtünme olmadığı takdirde otomobili ne sürebilir ne de kontrol altına alabiliriz. Hayatın pek çok alanında önemli bir yere sahip olan sürtünme teknikte bazen azaltılmak, bazen de artırılmak için ele alınır.

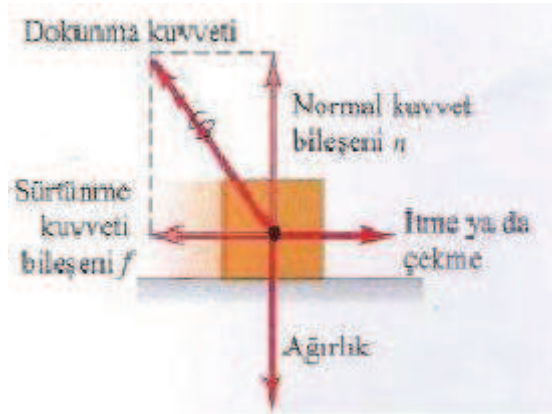
En pürüzsüz olduğu düşünülen yüzeylerin bile mikroskobik düzeyde incelendiğinde pürüzlü oldukları görülür. İki katı cismin birbiri ile temas halinde olmaları durumunda pürüzlerden dolayı sürtünme ve normal kuvvet her zaman mevcuttur. Bu kuvvetler moleküller arası etkileşimden (temel olarak elektriksel karakteristikli etkileşimler) kaynaklanır (Şekil 2.1) (Young ve Freedman, 2008).



Şekil 2.1 Normal kuvvet ve sürtünme kuvveti, blok ve zemin yüzey arasında kalan yüksek noktalardaki moleküllerin birbiriyle etkileşiminden kaynaklanır (Young ve Freedman, 2008).

2.1. Sürtünme Kuvveti, Kinetik ve Statik Sürtünme ve Sürtünme Katsayıları

Bir cisim bir yüzey üzerinde duruyor veya kayıyorsa yüzeyin cisme bir dokunma kuvveti uyguladığını düşünebiliriz.



Şekil 2.2 Bir blok bir yüzey üzerinde itildiğinde veya çekildiğinde, yüzey bloğa bir dokunma kuvveti uygular (Young ve Freedman, 2008).

Bu dokunma kuvvetinin yüzeye dik olan bileşenine **Normal Kuvvet** denir ve F_n ile gösterilir. Dokunma kuvvetinin yüzeye paralel olan bileşenine ise **Sürtünme Kuvveti** denir ve \vec{f} ile gösterilir (Şekil 2.2).

Eğer cisim ile yüzey arasında sürtünme yok ise :

$$\vec{f} = 0$$

dır, dokunma kuvvetinin düşey bileşeni olan F_n normal kuvveti daima vardır. Sürtünme kuvvetinin yönü daima iki yüzeyin birbirine göre olan göreceli hareketine zıt yöndedir.

Bir cisim yüzey üzerinde hareket ederken cisme etki eden sürtünme kuvvetine **kinetik sürtünme kuvveti** (\vec{f}_k) denir. Burada kullanılan kinetik sıfatı, iki yüzeyin birbirine göre göreceli olarak hareket ettiğini belirtir. Şayet bu hareket birbirlerine göre dönme hareketi ise sürtünme kuvveti kinetik dönme sürtünme kuvveti adını alır. Eğer yüzeylerin birbirine göre göreceli hareketi bir kayma hareketi ise sürtünme kuvveti kinetik kayma sürtünme kuvveti adını alır (Young ve Freedman, 2008).

Cisme etki eden kinetik sürtünme kuvvetinin büyüklüğü, normal kuvvet şiddeti arttığında genellikle artar. Örneğin otomobil frenlerinde fren disklerine daha fazla bastırıldığında daha fazla frenleme sağlanması bu sebeptendir. Deneysel sonuçlar bize kinetik sürtünme kuvvetinin büyüklüğünün normal kuvvetin büyüklüğü ile doğru orantılı olduğunu ortaya çıkarmıştır. Kinetik sürtünme kuvveti ile normal kuvvet arasındaki bağıntıyı şu şekilde yazabiliriz.

$$f_k = \mu_k \cdot F_n$$

Burada μ_k , kinetik sürtünme katsayısı olarak isimlendirilir. μ_k iki kuvvetin büyüklüklerinin (birbirine daima dik olan sürtünme ve normal kuvvetlerin) birbirine oranı olduğu için sadece bir sayıdır ve birimsizdir. Yüzey kayganlaştıkça bu katsayı küçülür.

Bir katı cisim diğer bir katı yüzey üzerinde kayarken, iki yüzey arasında sürekli olarak bağlar oluşup kopmaktadır ve bu tip bağların toplam sayısı her zaman değişir. Bu nedenle de kinetik sürtünme (dolayısıyla kinetik sürtünme katsayısı) tam olarak sabit değildir.

Yüzeyleri daha pürüzsüz hale getirmek gerçekte yüzeylerdeki sürtünmeyi artırabilir. Zira daha fazla molekül etkileşebilir ve bağ yapabilir. Dahası aynı metalin iki pürüzsüz yüzeyini birbirine dokundurmak iki yüzeyin birbirine “soğuk kaynak”

yapmasına sebep olabilir. Kayganlaştırıcı yağlar sürtünmeyi azaltır; şöyle ki iki temas yüzeyi arasında yağ bir film tabakası oluşturarak bu yüzeylerin birbiri ile temas etmelerine engel olur (örneğin içten yanmalı motorlardaki silindir ve piston duvarları arasındaki olası durum) (Young ve Freedman, 2008).

Tablo 2.1’ de bazı önemli kinetik sürtünme katsayıları (μ_k) görülüyor. Bu değerler yaklaşık değerlerdir. Sürtünme kuvveti cisimlerin hızlarına bağlı olarak da değişebilir.

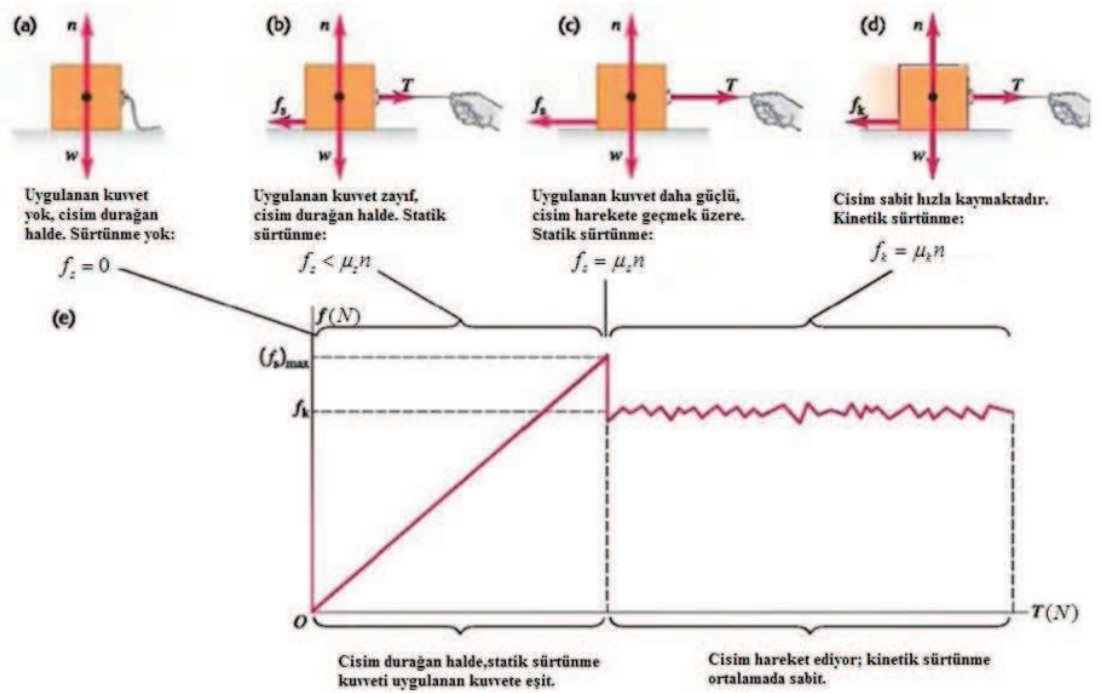
Tablo 2.1 Yaklaşık Sürtünme Katsayıları (Young ve Freedman, 2008; Giancoli, 2007)

Malzeme	Statik Sürtünme Katsayısı, μ_s	Kinetik Sürtünme Katsayısı, μ_k
Metal üzerinde metal (yağlanmış)	0.15	0.07
Çelik üzerinde çelik (yağlanmış)	0.74	0.57
Yağlanmış bilyeli yatak	<0.01	<0.01
Çelik üzerinde alüminyum	0.61	0.47
Dökme demir üzerinde çinko	0.85	0.21
Dökme demir üzerinde bakır	1.05	0.29

Sürtünme kuvvetleri herhangi bir göreceli hareket olmasa da etkin olabilirler. Bir cismi yüzeyde kaydırmaya çalıştığımızda kutu hareket etmeyebilir çünkü yer cisme bizim uyguladığımız kuvvete denk ancak zıt yönlü bir sürtünme kuvveti uygular. Buna **statik sürtünme** adı verilir ve f_s ile gösterilir. Şekil 2.2’ de gösterilen cismin ağırlığı w ve yukarı doğru normal kuvvet F_n etkisi altında dengededir. Normal kuvvet cisme yer

tarafından uygulanan kuvvettir ve büyüklük olarak kutunun ağırlığına eşittir ($F_n = w$) (Young ve Freedman, 2008).

Cisme bir ip bağlanıyor ve şekil 2.3' de gösterildiği şekilde artan bir kuvvet ile çekilmeye başlanıyor, yani ipteki çekme kuvveti T sürekli olarak artırılıyor. Başlangıçta cisim durağan haldedir, ipteki çekme kuvveti T arttıkça statik sürtünme kuvveti f_s (büyüklük olarak T ' ye orantılı şekilde) artmaya devam eder.



Şekil 2.3 Kinetik ve statik sürtünme (Young ve Freedman, 2008)

Ancak bir noktada, T yerin uygulayabildiği statik sürtünme kuvveti f_s ' den daha büyük olduğunda cisim serbest kalır (bu noktada T kuvveti cisim ile yüzey arasında oluşan bağları kırmaya yeterlidir) ve kaymaya başlar. Şekil 1.3(c) T kuvvetinin kritik kırılma noktasına ulaştığı anı gösteriyor. T kuvveti bu kritik noktayı aştığı anda cisim artık denge durumunda değildir. Verilen bir yüzey çifti için statik sürtünme kuvvetinin en büyük değeri $(f_s)_{maks}$ normal kuvvete bağlıdır. Deneyler pek çok durumda bu $(f_s)_{maks}$ değerinin normal kuvvetle yaklaşık olarak doğru orantılı olduğunu gösteriyor; aradaki orantı sabitine *statik sürtünme katsayısı* (μ_s) adı verilir. Tablo 2.1' de bu sabitin değişik

değişik yüzey çiftleri için değeri verilmiştir. Bazı özel durumlarda statik sürtünme kuvvetinin gerçek büyüklüğü, sıfır (yüzeye paralel herhangi bir kuvvet olmadığı durum) ile $\mu_s F_n$ ' in maksimum değeri arasında herhangi bir büyüklük olabilir. Sembolik olarak ifade edersek;

$$f_s \leq F_n \cdot \mu_s$$

şeklinde yazılabilir.

Şekil 2.3(d)' de görüldüğü üzere, cisim kaymaya başladığı anda sürtünme kuvveti genellikle azalır; cismi hareket halinde tutmak için gerekli olan kuvvet, cismi harekete geçirmek için gerekli olan kuvvetten daha azdır. Bu nedenle tablo 2.1' de görüldüğü gibi statik sürtünme katsayıları kinetik sürtünme katsayılarından büyüktür. Şekil 2.3(e)' de görüldüğü gibi sıfır kuvvetten başlayarak cisme uygulanan kuvveti artırırsak sürtünme kuvveti de doğru orantılı olarak artacaktır (şekil 2.3(c)).

Bazı durumlarda yüzeyler sürekli olarak birbirine yapışacak (statik sürtünme) ve koparak kayacaktır (kinetik sürtünme). Buna **yapışma-kayma hareketi** denir. Örnek olarak; arabaların cam sileceklerinin çıkardıkları sesler ya da asfaltta kayan araba lastiklerinin sesleri verilebilir (Young ve Freedman, 2008).

3. AŞINMA

Makine elemanlarının yaklaşık olarak %70'inin işe yaramaz hale gelmesinin nedeni aşınmadır. Aşınma sonucunda yüzeyler ilk şekillerini kaybeder; parçalar arası boşluklar büyür ve amaçlanan fonksiyon normal şekilde yerine getirilemez. İçten yanmalı motorlarda meydana gelen aşınmanın birçok sebebi vardır. Bu ve buna benzer nedenlerden dolayı, aşınma ile ilgili bilimsel ve teknik çalışmalar gün geçtikçe daha yoğun olarak devam etmektedir (Hazar ve Öner, 2007).

Genel sözlük anlamıyla, aşınmak birbirine sürtünerek incelmek, yıpranmak, silinmek, düzleşmek anlamlarına gelir. Aşınma ise aşınmak işidir (T.D.K 2007). Türk Standartlar Enstitüsü (TSE)'nin kabul ettiği, Alman Standartlar Enstitüsü (Deutsches Institut Für Normung) DIN5032, ve Amerikan Standartlar Birliği (American Society For Testing and Materials) ASTM G4093 standartlarına göre aşınma; kullanılan malzemelerin başka malzemelerle (katı, sıvı veya gaz) teması sonucu mekanik etkenlerle yüzeyden küçük parçacıkların ayrılmasıyla meydana gelen ve istenmeyen yüzey bozulması olarak tanımlanır (Korkut,1997; Ulutan,2007).

Mekanik sistemlerde malzemelerin aşınma davranışlarının iyileştirilmesi yanında, yüzey kalitesinin artırılmasına ve sürtünme katsayısının düşürülmesine çalışılır. Hareketli makine sistemlerinde sürtünmenin neden olduğu enerji kayıplarının azaltılması için yağlar ve yağlama teknikleri üzerinde de çalışmalar yapılmaktadır. Sürtünmenin sebep olduğu enerji kayıplarının yanı sıra aşınmadan dolayı meydana gelen malzeme kayıpları ve makine onarımı için harcanan zaman göz önüne alınırsa, aşınma makine tasarımı ve malzeme geliştirme alanında önemini korumaktadır (Akkurt, 1982).

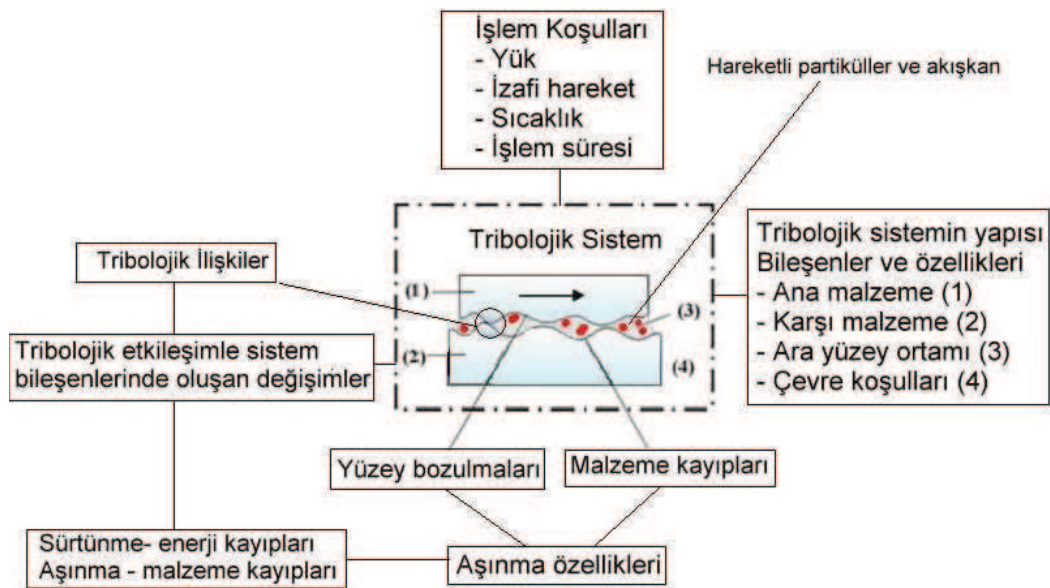
Aşınma miktarı; malzemenin cinsine, sürtünen yüzeylerin şekil ve pürüzlülüğüne, sürtünme koşullarına ve çevrenin çeşitli kimyasal etkilerine bağlıdır. Büyük ekonomik kayıplara neden olduğundan bu konu üzerinde yoğun araştırmalar yapılmaktadır. Ancak çok çeşitli etkenlerin rol aldığı bir olay olduğundan laboratuvar koşullarında elde edilen sonuçlara dayanarak uygulamadaki aşınma miktarını tam olarak

tahmin edecek bir bağıntı henüz geliştirilememiştir. Aşınmayı tamamen engellemek olanaksızdır. Ancak bu olayı yakından tanımanın ve etkiyen faktörleri iyi bir şekilde saptamanın aşınmayı en düşük düzeyde tutma bakımından çok yararlı olacağı açıktır (Onaran, 1992).

3.1 Triboloji ve Tribolojik Sistem

Aşınmanın yanı sıra sürtünme ve yağlanma konularının bilimsel olarak incelenmesi ve bu bilgilerin teknik olarak uygulanması triboloji adı altında gerçekleştirilir (Zumgahr,1987; Koç,2010).

İçinde aşınma ve sürtünme olaylarının gerçekleştirildiği teknik sistemlere tribolojik sistemler denir. Bir tribolojik sistemin DIN 5032 normuna uygun bir şematik gösterimi şekil 3.1’ de verilmiştir.



Şekil 3.1 Tribolojik Sistemin Şematik Gösterimi (Ulutan,2007)

Mühendislik malzemelerinin sürtünme ve aşınma davranışlarının araştırılmasındaki tüm mekanik sistemler birer tribolojik sistemdir. Bu nedenle aşınma olayı bir sistem bütünlüğü içinde ele alınmalıdır (Karamış,1985; Odabaş,1995; Koç 2010).

Aşınma olayının temel unsurları bundan böyle tribolojik sistemi oluşturan unsurlar olarak ifade edilecektir.

Bir tribolojik sistemi oluşturan unsurlar; ana malzeme (aşınan), karşı malzeme (aşındıran), ara malzeme, yük (temas kuvveti), izafi hareket ve çevre koşullarıdır. Bir tribolojik sistem bu unsurların bir veya birçoğunu içinde bulundurur.

Bu tribolojik unsurlar tanımlanırsa;

- Ana Malzeme (Aşınan); Fiziksel ve kimyasal özellikleri, yüzey yapısı bilinen ve aşınma özelliği incelenen cisimdir.
- Karşı Malzeme (Aşındıran); Aşınmanın meydana gelmesine neden olan malzemedir.

Ana malzeme ile karşı malzeme birlikte bir “Aşınma Çifti” oluştururlar.

- Ara Malzeme; Aşınma çiftinin arasında yer alan katı, sıvı, gaz veya bunların karışımı şeklindeki malzemedir. Ara malzeme özel olarak bilinen bir malzeme örneğin yağ, olabileceği gibi, istenmeyen bir malzemede olabilir, örneğin kum taneleri gibi. Ayrıca aşınma esnasında aşınma çiftinden kopan parçacıklarda ara malzeme gibi davranabilir.
- Yük; Etki eden kuvvettir. Kuvvetin büyüklüğü, türü (statik, dinamik, darbeli, titreşimli vb.), doğrultusu, yönü, zamana göre değişimi, yükün özelliğini belirler.
- İzafi Hareket; Temel sürtünme elemanı (Aşınan) ile karşı sürtünme elemanı (Aşındıran)’nın birbirine göre hareketidir. Cinsi (kayma, yuvarlanma, çarpma vb.), büyüklüğü ve doğrultusu ile izafi hareket tam olarak belirlenir.
- Çevre Koşulları; Sistemi içine alan ortamdır.(gaz, sıvı, plazma gibi)

3.2 Aşınmaya Etki Eden Faktörler

Tribolojik unsurların (aşınmanın temel unsurları) her birisinin aşınma sürecindeki özellikleri veya nitelikleri aşınmayı farklılaştırabilir bu nedenle her birinin aşınma sürecindeki durumları birer etki faktörü olarak ele alınmalıdır. Bu anlamda aşınmaya etki eden faktörler için bir gruplandırma yapılırsa ;

1. Ana malzemeye bağlı faktörler; Ana malzemenin kristal yapısı, sertliği, elastiklik modülü, deformasyon durumu, yüzey pürüzlülüğü, boyutu, vb.
2. Karşı malzemeye bağlı faktörler; Karşı malzemenin kristal yapısı, sertliği, elastiklik modülü, deformasyon durumu, yüzey pürüzlülüğü, boyutu, v.b.
3. Çevre koşullarına bağlı faktörler; Aşınma sürecindeki ortamın sıcaklık, nem, basınç vb. değerleri.
4. Yük'e bağlı faktörler; Kuvvet vektörünün süreçteki doğrultu, yön ve şiddet değerleri.
5. İzafi harekete bağlı faktörler; İzafi hareketin süreçteki şekli.

3.3 Aşınma Direnci (Aşınmaya Karşı Dayanıklılık)

Birbiriyle sürtünen yüzeylerden malzeme kaybı aşınma olarak ifade edilirse aşınma miktarı, malzemenin türüne, sürtünen yüzeylerin biçimine, sürtünme koşullarına ve çevrenin kimyasal etkilerine bağlı olarak değişir. Örneğin motorlarda sürtünen ve/veya yuvarlanan hareketli parçalar zamanla böyle bir aşınma etkisine girerler.

Aşınan malzemenin yapısı gereği aşınmaya karşı gösterdiği dayanıklılık "Aşınma Direnci" olarak tanımlanabilir. Bu anlamda alaşımların mikro yapılarında bulunan karbürler alaşımın aşınmaya karşı dayanıklılığını artırır (Yıldırım et al.,2007). Karbürlerin çok küçük ve sık dağılımı malzemenin sertliğini arttırarak

aşınmayı yavaşlatabilir. Aşındırıcının karbürlerden daha sert olması ise karbürlerin kesilmesine, çatlmasına, dökülmesine ve aşınma direncinin azalmasına neden olur.

Aşınan malzemelerdeki matrislerin desteği ile malzeme kaybına neden olacak bir aşınmada, karbürlerin dökülmesi önlenir. Daha iyi bir aşınma direncinin, matris fazın artan mikro sertliği ile elde edilebilmesi söz konusudur. Her ne kadar sert ve saf metallerdeki sertlik ve aşınma direnci arasındaki ilişki doğrusal ise de çok bileşenli alaşımlar için basit bir kural bulunamamıştır. Malzeme kaybına neden olan aşınmada aşınmış yüzeylerdeki deformasyon sertleşmeye neden olabilir. Aşınan yüzeyin sertliği ise aşınma direncini belirler (Kuzucu et al.,1997,Ulutan,2007).

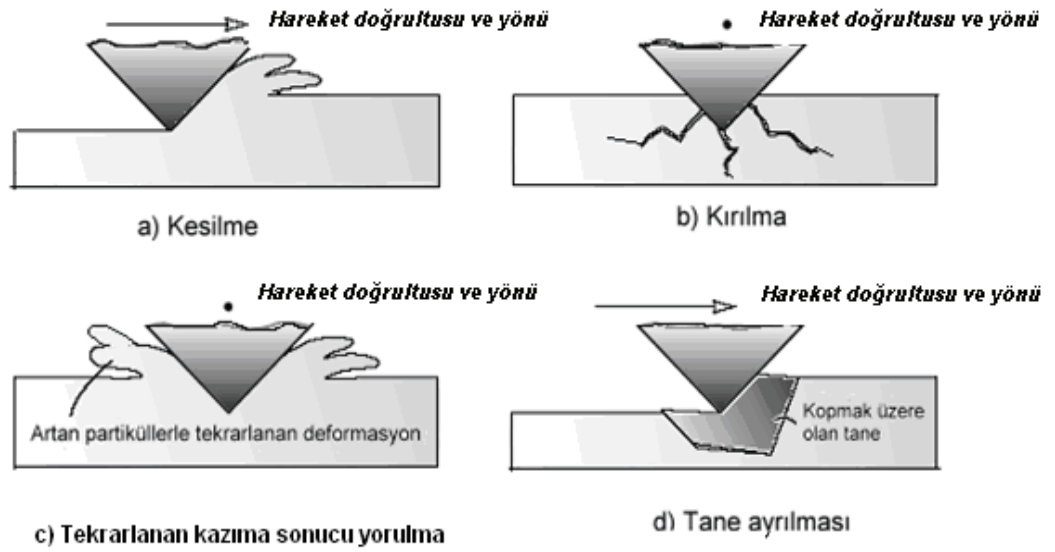
3.4 Aşınma Türleri

Aşınan yüzey üzerine gelen yük miktarı, aşındırıcı parçacığın boyutu ve aşındırma şekli, aşınan ve aşındıran yüzeylerin temas geometrisi etkenleri dikkate alınarak yapılan bir sınıflandırma; “Abrazyon, Erozyon, Adhezyon, Korozyon ve Yorulma” aşınmaları şeklinde olabilir. Makine elamanlarında en sık karşılaşılan aşınma türleri bunlardır ve en fazla aşınma kaybı abrazyon aşınması türünde görülür. Bu aşınma türlerine ait alt sınıflandırmalar yapılabilir. Her bir aşınma; tribolojik sistem içerisinde birer aşınma mekanizması olarak ifade edilir.

3.4.1 Abrazyon Aşınma (Abrasive Aşınma) Mekanizması

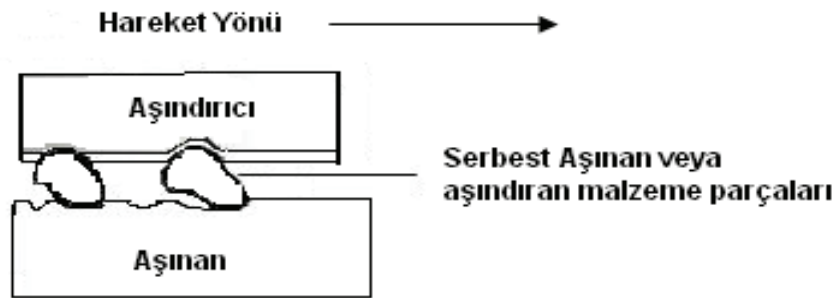
Katı bir yüzey (aşınan) üzerinde hareket eden sert parçacıkların (aşındıran) yapmış olduğu aşınmadır. Yüzeyden malzeme kaybına neden olur. Talaşlı imalat yöntemleri bu tür aşınmaya dayalı olarak yapılmaktadır. Metal şekillendirmede yaygın olarak faydalanılır. Sert aşındırıcı malzemelerin metale batması ve aşınan yüzey üzerinde parçacık koparması (örneğin sisteme dışarıdan giren kum taneleri veya motordaki yanma ürünleri) da bu tür aşınmadır.

Bu aşınma iki elemanlı veya üç elemanlı olmak üzere ikiye ayrılır. İki elemanlı bir abrasiv aşınmada dört farklı aşınma mekanizması oluşabilir (şekil 3.2).



Şekil 3.2 Abrasiv aşınma mekanizmaları (Stachowiak and Batchelor, 2000, Ulutan, 2007).

Üç elemanlı abrasiv aşınmada aşınan ve aşındırıcının arasında aşınma sırasında yüzeylerden kopan parçacıklar bir üçüncü eleman olarak sistemde yer alırlar.



Şekil 3.3 Üç elemanlı abrasiv aşınma (Ulutan,2007)

Abrazyon aşınması içerisinde değerlendirilebilecek alt sınıf aşınmalar; Düşük Gerilmeli Abrazyon, Yüksek Gerilmeli Abrazyon, Eşme, Yongalama, Oyma (Yontma), Parlatma şeklinde sınıflandırılabilir.

3.4.2 Erozyon Aşınma (Erozif Aşınma) Mekanizması

Bir akışkan içerisindeki sert partiküllerin (aşındırıcıların), malzeme yüzeyinden hızla kayması ve yuvarlanması sürecinde yüzeyden (aşınan) parça kopmasına “Erozyon” denir.

Erozyon aşınması içerisinde değerlendirilebilecek alt sınıf aşınmalar; Katı Parçacık Çarpması (Oyma), Akışkan Çarpması (Öğütme), Kavitasyon, Çamur şeklinde sınıflandırılabilir.

3.4.3 Adhezyon Aşınma (Adhesiv Aşınma) Mekanizması

Birbiriyle çok yakın temasta bulunan iki farklı maddenin molekülleri arasındaki çekim kuvvetine Adhezyon Kuvveti denir. Birbiriyle kayma sürtünmesi yapan metal-metal aşınma çiftlerinde adhezyon kuvvetleri sonucunda bir temas bağı oluşarak maddelerin birbirlerine yapışması söz konusudur (Hutchings, 1992).

Her hangi bir dış kuvvet etkisiyle yapışık olan bu iki malzemenin karşılıklı yüzeyleri üzerindeki pürüzlü tepelikler üzerine basınç ve gerilme uygular. Bu kuvvet etkisiyle pürüzler plastik deformasyona uğrar. İki yüzey birbirinden ayrılırken yüzeylerden kütleli olarak parçalar kopar.

Adhezyon aşınması içerisinde değerlendirilebilecek alt sınıf aşınmalar; Kaynama, Yeme, Sıyırılma (Kaldırma), Oksidatif aşınma olarak sınıflandırılabilir.

3.4.4 Korozyon Aşınma (Korozif Aşınma) Mekanizması

Korozyon aşınması; metal yüzeylerinin oksitlenme ya da başka kimyasal etkilerle aşınmasına denir. Demirin paslanması, alüminyumun oksitlenmesi en çok karşılaşılan örneklerdir.

Korozyon aşınmasında tribokimyasal reaksiyonla yüzeyde bir reaksiyon tabakası oluşur. Aynı zamanda, bu tabaka sürtünme ile ortamdan uzaklaşabilir. Bu yüzden

reaksiyon tabakalarının kısmen oluşum hızı ve bozulma miktarı aşınma oranını belirler (Bhushan, 2001; Ulutan, 2007).

Yüzeydeki kimyasal reaksiyonlar adhesiv aşınmanın önlenmesinde yararlı olmaktadır. Ancak kimyasal reaksiyon kontrolsüz bir şekilde gerçekleşirse, önemli malzeme kayıplarına yol açabilir. Eğer malzeme bir film oluşumu ile korozyona uğramışsa ve aynı anda bir kaymalı temas da varsa, birbirini takip eden, aşağıda belirtilen dört durum ortaya çıkabilir:

- Korozyon ve aşınmanın oluşumunu engelleyen sabit bir yağlayıcı film tabakası oluşmuş olabilir.

- Kaymalı temas altında kalan, oluşmuş durumdaki zayıf film kısa ömürlü olur ve bu tabakanın düzenli bir şekilde oluşup tekrar bozulması ise, yüksek oranda aşınmaya neden olabilir. Sürtünme katsayısı bu oluşum esnasında düşük olabilir.

- Koruyucu yüzey filmleri aşınmış olabilir. Kalan film tabakası ve ana malzeme arasında bir galvanik çift oluşabilir ve sonuçta yüzeyde korozyon nedeniyle, çok hızlı aşınmış bir bölge oluşması söz konusu olur.

- Korozif etki ve aşınma işlemleri birbirinden bağımsız olarak hareket ettiği gibi, birbirine eklenerek birlikte de hareket edebilirler (Stachowiak and Batchelor, 2000; Ulutan, 2007).

3.4.5 Yorulma Aşınma (Yüzey Yorulma) Mekanizması

Yorulma aşınması belirli sayıda tekrarlanan titreşim zorlamalarında oluşur (Bhushan, 2001, Ulutan, 2007). Zamanla yüzeylerde oluşan mekanik gerilmeler sonucunda birçok aşınma prosesinde yorulma aşınması görülebilir. Yorulma aşınmaları sonucunda yüzeyde çatlaklar oluşması, parçacıkların ayrılması, çukur ve oyukların meydana gelmesi mümkündür.

3.5 Aşınmanın Ekonomik Açıdan Önemi

Herhangi bir cismin kullanılamaz hale gelmesinin üç sebebi olabilir: modasının geçmesi, hasar görmesi ve/veya iyi çalışmaması. Örneğin bir otomobil, modeli geçmiş olması veya kazada hasar görmüş olması ya da iyi çalışmaması nedeniyle kullanılmaz veya satışa çıkarılır. Burada üçüncü neden aşınma sonucu oluşur (Oğuz, 1993).

Bu olayda dikkat çekici olan: modasının geçmişliği ve kazada hasar görmüş olmasının kolayca gözle görülebilmesine karşın, aşınma etkisinin rastgele bir incelemeyle görülemeyişidir. Gerçekten hurdaya çıkmış bir arabada aşınma sonucu sadece birkaç gramlık bir eksilme söz konusudur.

Bu verdiğimiz örnek aşınmanın; büyük bir ekonomik değişikliğe neden olabildiğini açıkça göstermektedir.

Konunun bugüne kadar ihmal edilmesinin 3 nedeni vardır. Birincisi; mekanizmalarda faydalı ömür kavramının tam yerleşmemiş olması, ikincisi; aşınmaları yeterli hassasiyette ve mertebede ölçecek cihazların yeterli düzeyde gelişmemiş olması, üçüncüsü ise bilim adamlarının ve mühendislerin aşınmaya yönelik gerekli hassasiyet ve tutumu gösterememiş olmalarıdır.

3.6 Aşınma Deneyleri, Test Ölçümleri ve Aşınma Test Cihazı Modelleri ile Deney Sistemleri

3.6.1 Aşınma Deneyleri ve Test Ölçümleri

Malzeme kaybı olarak tanımlanan aşınma ile ilgili deneylerde ve test ölçümlerinde kayıp malzeme miktarı, birbiriyle temas halinde olan aşınan ve aşındıran yüzeylerin birinde veya her ikisindeki hacim ve ağırlık kaybı esas alınarak yapılır.

Aşınmanın gerçek sistemlerde yani çalışmakta olan sistemlerin ve makinelerin çalışma sürecinde belirlenmesi zordur. Halbuki ekonomik nedenler aşınmanın tüm detaylarıyla bilinmesi gereğini ve önemini göstermektedir. Bu nedenlerle makine

imalatında aşınmaya maruz kalabilecek yerlerde aşınma direnci yüksek malzemeler kullanılmalıdır. Bu malzemelerin belirlenebilmesi için de mutlaka birçok laboratuvar deneyleri ve test ölçümlerinin yapılması gerekir.

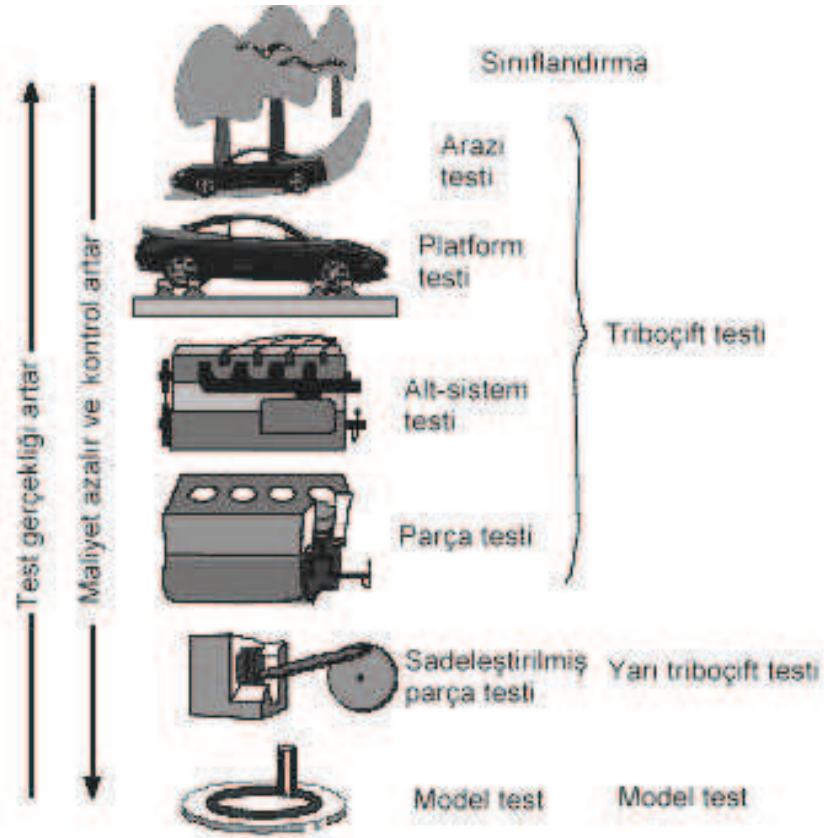
İmalat sektöründe aşınma tespiti için yapılan deney ve çeşitli test ölçümlerinin mümkün olabildiğince gerçek sisteme yakınlığı istenir. Deney ve test çalışması ne kadar gerçeğe yakın olursa;

- Maliyet o derece artar.
- Değişkenlerin sayısı artar.
- Deney ve test kontrolü azalır.

Diğer bir deyişle; deney ve test çalışmaları ne kadar gerçekten uzak ise ;

- Maliyet o derece ucuzlar.
- Değişkenlerin sayısı azalır.
- Deney ve test kontrolü fazla olur.

Aşınma deney ve testlerinin gerçeğe yakınlığını Bhushan, 2001 yılında şekil 3.4' de görüldüğü gibi sınıflandırmıştır.



Şekil 3.4 Aşınma testlerinin gerçeklik derecesine göre sınıflandırılması (Bhushan 2001,Ulutan 2007)

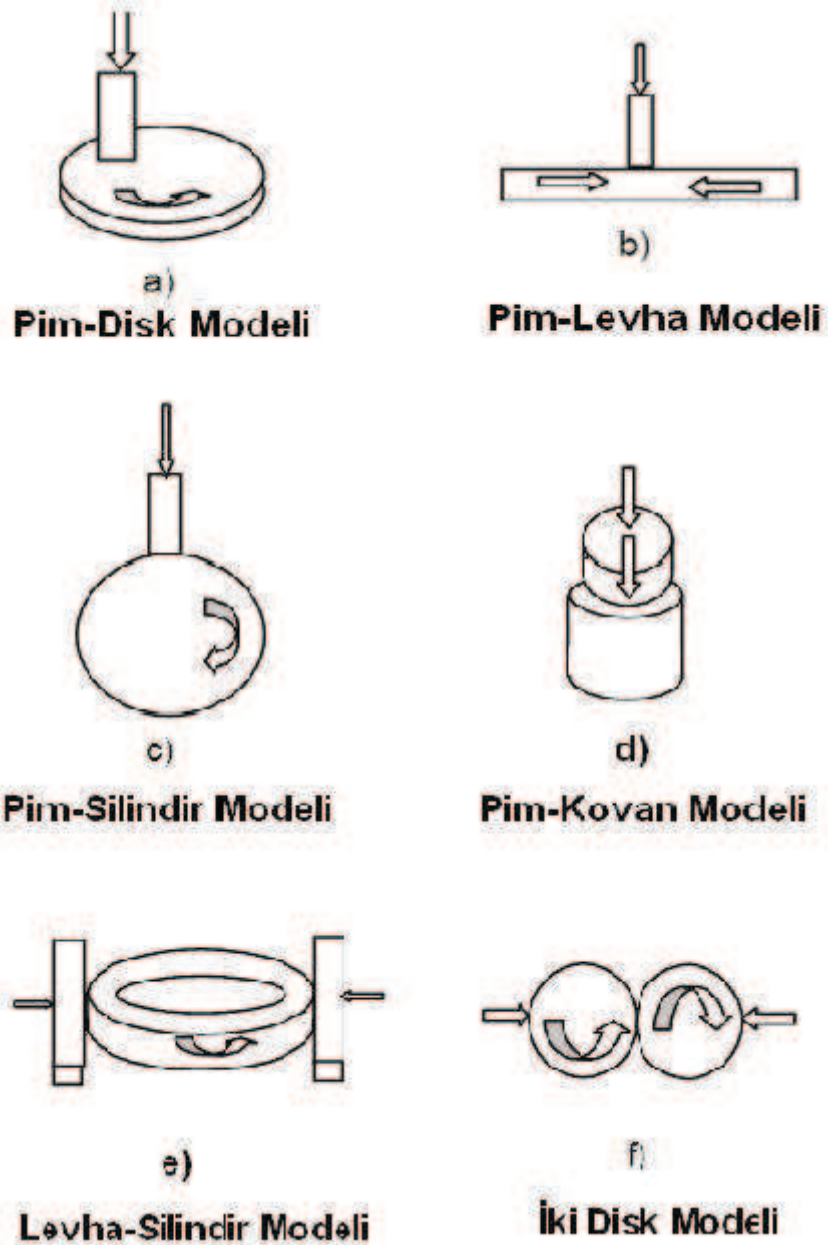
Maliyet ve zaman kısıtlamaları dikkate alındığında deney ve test cihazları daha basit olmak zorundadır. Deney ve testlerde kullanılacak aşınan elemanlar gerçek olmalıdır. Tribolojik sistemin geri kalanı ise laboratuvar ortamında aşınma mekanizmasını tam olarak canlandırmalıdır (Ulutan,2007).

3.6.2 Aşınma Test Cihazı Modelleri ile Deney Sistemleri

Laboratuvar çalışmalarında gerçek sistemin kullanılmaması sistemin bir modelini yapmayı zorunlu kılar.

Model cihazlarda, tribolojik sistem unsurlarının gerçek sisteme uygun şekilde oluşturulması ve sonuçların tekrarlanabilir olması bu cihazlardan beklenen en önemli özelliklerdir. Ayrıca parametrelerin kolayca kontrol edilebilir olması, gerektiğinde değiştirilebilmesi de istenir.

Şekil 3.5’ de tribolojik prensiplere göre oluşturulmuş, kayma, sürtünme ve aşınma test modellerinden bazı örnekler verilmiştir. Bu modeller; a)Pim-Disk Modeli b)Pim-Levha Modeli c)Pim-Silindir Modeli d)Pim-Kovan Modeli e)Levha Silindir Modeli f)İki Disk Modeli gibi basit geometrik şekil isimleri ile adlandırılırlar.



Şekil 3.5 Bazı kayma, sürtünme, aşınma test modellerinin şematik gösterimi (Demirci,1982; Hutchings,1992; Soydan ve Ulukan,1988; Ünlü vd., 2009).

Model aşınma cihazlarıyla yapılan testlerin amaçları genellikle şöyle sıralanabilir: Sistem elemanlarının verimini, ömrünü, güvenilirliğini, fonksiyonunu, bakım yapılabilirliğini belirlemek kalite kontrolü yapmak, malzemelerin ve yağlayıcıların tribolojik davranışlarını belirlemek, malzeme kayıplarının araştırılması, yeni malzeme veya sürtünme ve aşınma azaltıcı yöntemlerin geliştirilmesidir (Ünlü vd., 2009).

4. PLAZMA

4.1. Plazmanın Tarihsel Gelişimi ve Tanımı

Plazma çalışmaları, 1808 yılında ünlü Fizikçi Sir Humphry Davy tarafından kararlı hal DC ark deşarjın ve 1830 yılında Michael Faraday tarafından yüksek voltaj DC elektrik deşarj tüpünün geliştirilmesi ile mümkün oldu. Plazma ilk kez 1879 yılında Sir William Crookes tarafından “maddenin dördüncü hali” olarak tanımlandı. Bu ifadeye göre; düşük sıcaklıklardan başlayarak katı bir maddeye ısı verilirse, katı eriyerek sıvı fazına geçer ve daha sonra buharlaşarak gaz haline dönüşür. Eğer daha fazla ısı verilmeye devam edilirse sıcaklık yükselir ve maddeyi oluşturan atomlardan elektronlar koparılır ve böylelikle pozitif yüklü iyonlar oluşur. 1928 yılında gaz deşarjlarında plazma tanımlanması Irving Langmuir tarafından yapılmıştır. Bu tanımlı yaparken Langmuir hemen hemen elektriksel olarak nötr olan aynı zamanda elektrik, manyetik alanlara tepki veren gaz atomu içeren veya içermeyen elektronlar ve iyonlar topluluğunu ifade etmek istemiştir (Aydın, 2006).

Ark ve DC elektriksel deşarj plazmaları ondokuzuncu yüzyıl boyunca birçok laboratuvarında yaygın bir şekilde araştırılmıştır. 1920’li yıllarda magnetohidrodinamik (MHD) teorisinin gelişmesi ile plazma fiziğinde çok büyük gelişmeler olmuştur. İkinci dünya savaşı boyunca radar sistemi için mikrodalga teknolojisinin gelişmesi ile 1940’lı yılların sonunda mikrodalga deşarjlarla plazmalar üretilmeye başlanmıştır. 1970’li yıllardan bu yana plazmalar yaygın bir şekilde sanayi ve teknolojinin her alanında kullanılmaktadır (Ekem,2000; Arman,2005).





Maddenin kendine has özellikleri bulunan katı, sıvı, gaz ve plazma hali olmak üzere dört hali vardır. Bu haller arasındaki esas fark sahip oldukları enerjidir. Yani maddenin herhangi bir konumdaki (hal) enerjisini değiştirmek suretiyle maddeyi diğer bir konuma geçirmek mümkündür. Örneğin, katı haldeki bir maddeyi, o maddeye özel bir enerji vermek suretiyle sıvı, sıvı haldeki bir maddeye belirli bir enerji vererek gaz, gaz haldeki bir maddeye belirli bir enerji vererek plazma haline geçirmek mümkündür.

Bu işlemin tersi yapılarak, yani verilen bu enerjileri geri alınarak tekrar plazma halinden gaz, sıvı ve katı hale geçmek mümkündür (Arman,2005):



Bu hallerden en küçük enerji konumunda olan katı hal, en büyük enerji konumunda olan ise plazma halidir (Aydın, 2006).

Şekil 4.1' de maddenin halleri arasındaki geçişler gösterilmiştir (Arman,2005).

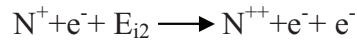
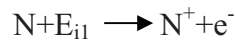
KATI	SIVI	GAZ	PLAZMA
Buz H_2O	Su H_2O	Buhar H_2O	iyonize gaz $H_2 \rightarrow H^+ + H^+ + 2e^-$
SOĞUK $T < 0^\circ C$	ILIK $0 < T < 100^\circ C$	SICAK $T > 100^\circ C$	ÇOK SICAK $T > 100,000^\circ C$
			
Moleküller örgüde toplanmıştır	Moleküller serbest hareket ediyorlar	Moleküller daha geniş alanda serbest hareket ediyorlar	Elektronlar ve iyonlar bağımsız hareket ediyorlar

Şekil 4.1 Maddenin dört hali (Aydın,2006)

Plazma; içerisinde iyon, elektron, uyarılmış atom, foton, nötr atom ve nötr moleküller içeren bir karışımdır. Plazmayı oluşturan parçacıklar (Karadeniz, 1990; Gülseven, 2004);

- *İyon:* İçerdiği pozitif veya negatif yük sayısının diğer yük sayısından büyük olan atomlardır. Nötral bir atoma, onun iyonizasyon enerjisinden daha büyük bir enerji verildiğinde, bu atom en az bir elektronunu(negatif yükünü) kaybeder ve pozitif iyon haline geçer ya da atom dışarıdan bir elektron alarak negatif iyon haline geçer, yani iyonize olur. Bir atom çeşitli yollarla iyonize olabilir. Bunlardan bazıları;

1. Termik iyonizasyon
2. Işın iyonizasyonu
3. Elektriksel boşalma ile iyonizasyon
4. Çarpışma iyonizasyonudur (Ülker, 2006).



- *Elektron:* Atomun negatif yükü olup, değeri $1,6 \cdot 10^{-19}$ Coulomb'tur.

- *Uyarılmış Atom:* Üzerine iyonlaşma enerjisinden daha küçük enerji verilmişse atom elektron kaybetmez. Bu durumda atom aldığı enerji ile elektron veremediğinden elektronlarının bir veya bir kaç orbital değiştirir. Yani bir üst enerji seviyesine geçer. Böylece uyarılmış atom meydana gelir (Karadeniz, 1990; Gülseven, 2004).

- *Foton:* Enerji yüklü ışık parçacıdır.

- *Nötr Atom ve Nötr Molekül:* Pozitif yük sayısının negatif yük sayısına eşit olduğu atom ve moleküllerdir. Nötral bir moleküle, o molekülün ayrışma enerjisinden (E_a) daha büyük bir enerji verilirse, molekül atomlarına ayrışır. Bu olaya *ayrışma* denir.

Azot molekülü için ayrışma olayını göstermek istersek;



Sonuç olarak plazma, nötralitesini koruyan hemen hemen eşit yoğunluklu, sürekli hareket halindeki negatif ve pozitif yüklü parçacıklardan oluşan maddenin dördüncü halidir (Arman, 2005).

Plazmayı elde etmenin birçok yöntemi vardır. Temelde yapılması gereken, sistemin üzerine çok yüksek büyüklükte enerji vermektir. Bu enerji; mekanik, elektriksel, ısı işleme, ışımaya vd. bir yöntemle olabilir. Genelde bu enerji, gaz boyunca bir elektrik deşarjının oluşturulması ile verilir. Plazma, sıcaklığı çok yüksek ve yüksek enerjili bir ortamdır (Grill, 1993; Gülseven 2004).

4.2. Plazmanın Özellikleri

Plazmanın temel karakteristik özellikleri aşağıda verilmiştir.

- Plazma elektriksel olarak nötral olmasına rağmen elektrik ve magnetik alanlarla etkileşebilir.
- Plazma halinde kimyasal reaksiyonlar, gaz halinden daha büyük hızlarda gerçekleşir.
- Gazlar elektriği iletmez. Plazma ise elektriksel nötraliteye sahip olmasına rağmen bazen bakır ve gümüşten daha iyi bir iletkendir.
- Plazma içindeki herhangi bir pertürbasyonun yayılması elektromagnetik dalga hızında gerçekleşir. Bu yayılım gaz içinde ancak ses hızında olmaktadır.
- Plazma içinde yüklü parçacıklar arasındaki Coulomb çekim kuvvetleri çok uzak mesafelerde bile etkilidir. Bu nedenle plazma içindeki her parçacık çevresindeki tüm parçacıklarla sürekli etkileşim halindedir.

- Plazma elektromagnetik alanlarla etkileştiği gibi, kendisi de elektromagnetik alan oluşturur.

- Gazların boş olan her şeyi doldurma özelliğine karşılık, plazmalarda bir toplanma eğilimi vardır (Aydın, 2006).

5. PLAZMA İLE AZOT KAPLAMA (PLAZMA NİTRÜRLEME)

Plazma ile yüzey sertleştirme ya da plazma ile kaplama işlemleri birçok şekilde yapılmakta olup, birçok ad ve içerik altında bilinmektedir. Plazma ortamında iyon aşılama, plazma iyon aşılama, plazma iyon kaplama, plazma nitrürleme, plazma kaplama, metal plazma iyon aşılama ve biriktirme, plazma iyon aşılama ve biriktirme, iyonitürasyon gibi birçok isim kullanılmaktadır (Saklakoğlu ve Saklakoğlu, 2004; Özdemir ve Erten, 2003; Epik vd., 2004).

Ayrıca plazma kaplama teknolojisi A.B.D' de plazma kaynaklı iyon aşılama olarak adlandırılırken, Avustralya' da ise plazma ortamında iyon aşılama olarak adlandırılmaktadır (Saklakoğlu ve Saklakoğlu,2004).

Sadece Türkiye' de değil dünyada da söz konusu olan bu kavram kargaşası tam çözülememiş olup günümüzde de sürmektedir. Tarafımızca daha fazla bir karışıklık yaratmamak için bu tezde, plazma ile azot kaplama yerine plazma nitrürleme veya nitrüzasyon gibi terimler kullanılmayacaktır.

5.1 Plazma Yüzey İşlemleri

Yüzey işlemlerinde plazma ortamının kullanılmasının temelleri bundan yaklaşık 70 yıl önce Bernhard Berghaus tarafından atılmış ve günümüzde endüstri için vazgeçilmez bir unsur olmuştur (Çelik vd., 2004; Arman, 2005).

Plazma ile yüzey işlemlerinde malzemenin yüzey ve yüzeye yakın bölgelerinin yapısal özellikleri değiştirilerek aşınma, sürtünme direnci ve yorulma mukavemeti artırılır. Plazma yüzey işlemleri değişik endüstriyel uygulamalarda kullanılır (Çelik vd., 2004; Arman, 2005).

Mühendislik uygulamalarında, özellikle sürtünmenin söz konusu olduğu makine elemanlarında ortaya çıkan aşınma problemlerini azaltmak, sürtünen metal elemanlarının ve takımların yüzey ve yüzeye yakın yerlerinde daha iyi mekanik

özellikler elde etmek amacıyla son yıllarda endüstriyel uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Saklakoğlu ve Saklakoğlu, 2004; Arman, 2005).

5.2 Plazma ile Azot Kaplama

Plazma ile azot kaplama işlemleri; otomotiv sanayinde, metalurji sektöründe sürtünme ve aşınmanın söz konusu olduğu makine elemanlarında ve takım imalat sanayinde özellikle motor pistonlarında, krank millerinde, valflerde, kam milinde, dişlilerde, matkap, zımba gibi kesici takımlarda, dönme ve eğilmeye maruz kalan tüm makine parçalarında yapılmaktadır. Bu işlemin ekonomik ve kolay uygulanabilmesi endüstride kullanım alanını artırmıştır(Çelik vd., 2002; Özdemir ve Erten, 2003).

Plazma ile azot kaplama, elektriksel boşalma şartlarında oluşur. Malzeme yüzeyine iyonize edilmiş azotu yaymak için aktif ve reaktif plazma hali kullanılır. Plazma ile azot kaplama işlemi azotun soygazlarla beraber, 200-600° C arasında kaplanacak malzeme üzerine gönderilmesi ile gerçekleştirilebilir. Yüzeyi sertleştirilecek malzemenin Cr, Al, V, Mo ve Ti gibi alaşım elemanlarını içermesi yüzey sertliğini daha da arttıracaktır. İşlem teorik olarak N ara yer atomunun yayınma işlemidir. Kaplanacak malzemelerin seçimi ve ara yer atomu olarak N veya başka bir elementin kullanılması malzeme biliminin temel konularındandır (Arman, 2005; Çelik vd., 2002).

5.3 Plazma ile Azot Kaplama Parametreleri

Genelde yük, işlem süresi, gaz karışım oranı sıcaklık temel parametreler olarak görülür. Bu parametreler, malzemenin aşınmaya karşı direncindeki etkinlikleri birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir (Özdemir ve Erten, 2003).

Plazma ile azot kaplama deney sürecinde ise işlem süresi, sıcaklık, hızlandırıcı potansiyel, iyon akımı, plazma potansiyeli, plazma akımı ve basınç değerleri işlem parametreler olarak alınmıştır.

5.4 Plazma ile Azot Kaplama Yönteminin Avantajları

Plazma ile azot kaplama yönteminin, diğer nitrürasyon yöntemlerine göre sağladığı üstünlükler şöyle sıralanabilir:

1. Sadece iş parçasının ısıtılması nedeniyle enerji tasarrufu sağlanır ve ısı verim yüksektir.
2. İşlem süresi açısından değerlendirme yapıldığında; diğer nitrürasyon yöntemlerine göre aynı sıcaklık ve derinlik için işlem süresi yaklaşık %50-70 daha kısadır.
3. İşlem sırasında ölçü değişimi ve deformasyon riski minimum düzeydedir.
4. Düşük basınçlarda çalışıldığında gaz tasarrufu sağlanabilir.
5. Sert ve daha az kırılabilir bir yüzey elde edilir.
6. Nitrürasyon yapılmak istenilmeyen yüzeylerin mekanik olarak izolasyonu mümkündür.
7. Gaz veya diğer atıklarla çevreyi kirletmez, insan sağlığı açısından zararlı değildir.
8. Otomasyona uyumludur. Sistem değişkenlerin kontrol altında tutulması kolaydır.
9. İş parçası üzerindeki tüm girinti, çıkıntı ve delikler üzerinde homojen bir azot difüzyonu sağlanabilir.
10. Reaksiyonun gerçekleştiği fırında hareketli parçalar söz konusu olmadığından fırın bakım masrafları daha düşüktür.
11. Nitrürlenecek parçanın büyüklüğü ve ağırlığı önemli değildir (Özdemir ve Erten, 2003).

5.5 Plazma ile Diğer Termo Kimyasal Yüzey İşlemleri

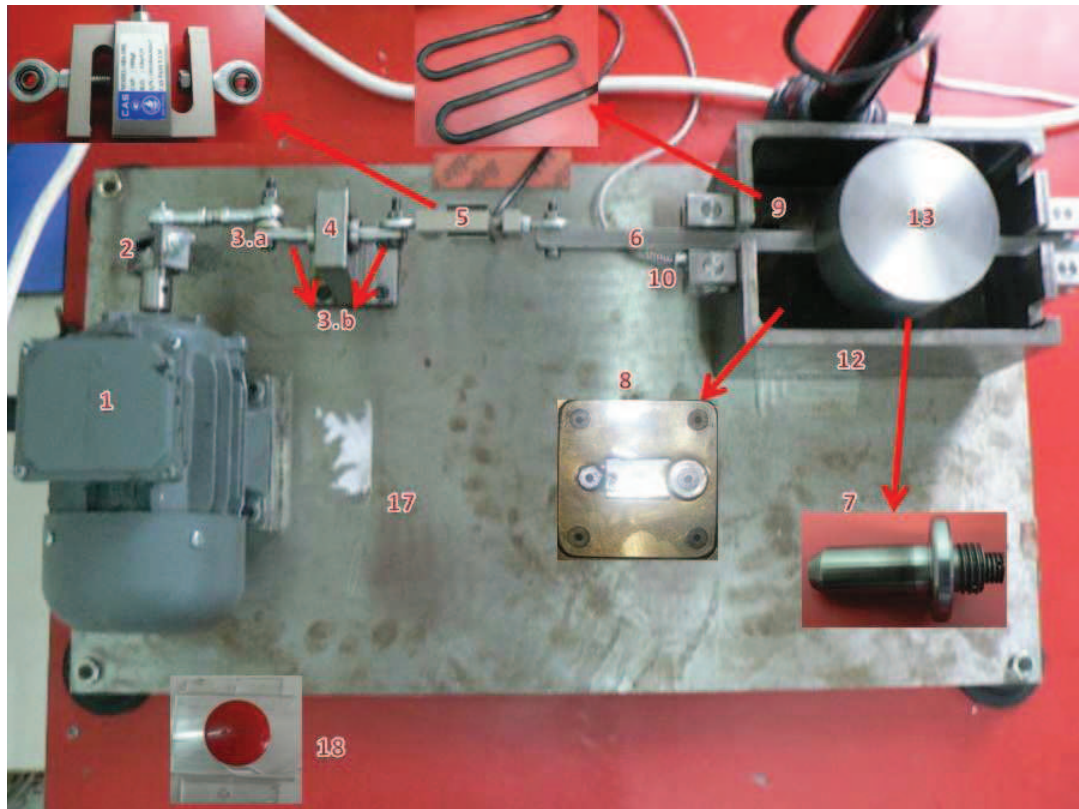
Genel olarak termokimyasal işlemler katı, sıvı veya gaz ortamında gerçekleştirilir. Son yıllardaki gelişmelerle, bu işlemlerin çoğu için elektriksel deşarj ile yapılabilmektedir. Plazma destekli yüzey işlemlerinde amaç, karbon, bor veya azot gibi atomları ya da iyonları parça yüzeyine göndermektir (Çelik vd., 2002). Bu termo kimyasal işlemler, plazma oksidasyon, plazma karbürleme, plazma borlama ve plazma nitrokarbürleme gibi işlemlerdir.

6. HAZIRLANAN DENEY DÜZENEKLERİ VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Tez çalışmasında iki farklı deney düzeneği hazırlanmıştır. Birincisi sürtünme ve aşınma ile ilgili deney düzeneği, ikincisi ise kaplama ile ilgili deney düzeneğidir. Sürtünme ve aşınma ile ilgili olan düzenek tasarlanıp, imal edilmiş ve deneysel çalışmada kullanılmıştır. Kaplama ile ilgili düzenek ise katı malzemelerin plazma ile kaplamalarına yönelik TVA sistemi gazlarla plazma kaplamayı gerçekleştirmek üzere modifiye edilmiş ve deneylerde kullanılmıştır.

6.1 Sürtünme ve Aşınma Deney Düzeneği

Sürtünme ve aşınmaları test edebilecek bir test cihazı tasarlanmış ve imalatı gerçekleştirilerek deney ve test ölçümlerinde kullanılmıştır (Şekil 6.1).

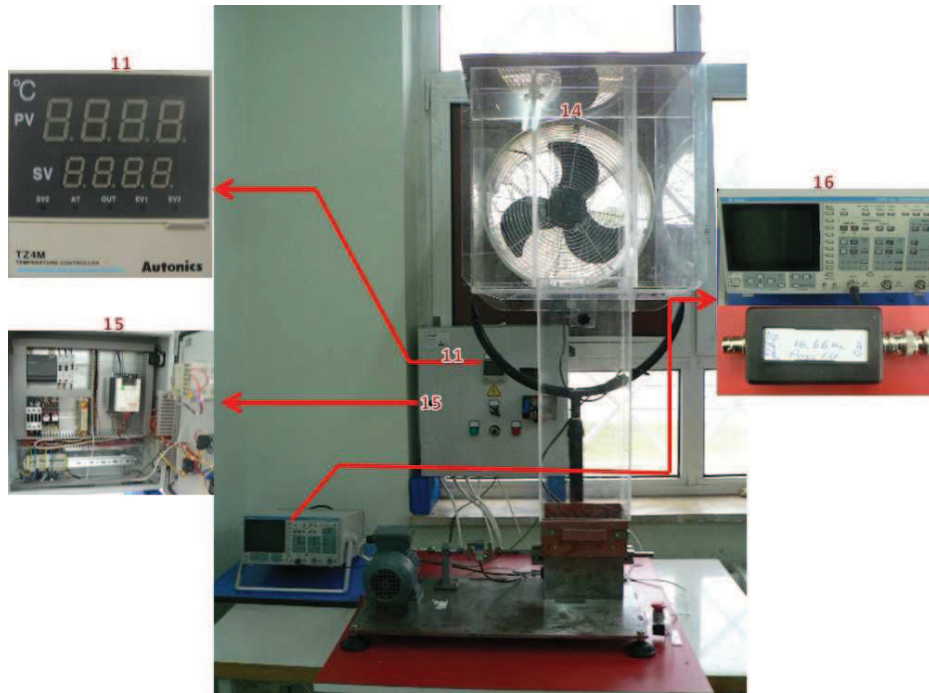


Şekil 6.1 Sürtünme ve aşınma test cihazının üstten çekilmiş fotoğrafı

Aşınmaların tespitinin gerçek bir aşınmaya yakın olması göz önüne alınmış ve tasarım aşınma testlerinin gerçeklik derecesine göre sınıflandırmasında model test cihazlarının bir üst sınıfında olan yarı triboçift testi cihazı olarak yapılmıştır. İmal edilen cihaz ile sadeleştirilmiş parça testleri yapılabilmektedir (Bhushan 2001, Ulutan 2007).

Yatay konumda doğrusal gidip gelme hareketi yapan karşı malzeme (aşındıran) ile yine yatay konumda levha üzerine yerleştirilen ana malzemeden (aşınan) oluşan tribolojik aşınma çifti arasında oluşan sürtünme olaylarını incelemek üzere bir pim-levha aşınma test cihazı tasarlanmıştır. Yatay y eksenini boyunca gidip gelme hareketi yapan karşı malzeme yani pim, ana malzeme üzerinde sürtünme hareketi yapacak şekilde temas halindedir.

Test cihazının oluşturduğu deney sistemi bir bütün olarak ele alındığında model test (döner bilyeli kuru sürtünme ve ıslak sürtünme testleri, sabit bilyeli kuru sürtünme ve ıslak sürtünme testleri) ölçümleri yanısıra yarı triboçift test (kuru ve ıslak orijinal aşındırıcı malzemeli test) ölçümleri yapılabilecek şekilde tasarlanmış ve imal edilmiştir.

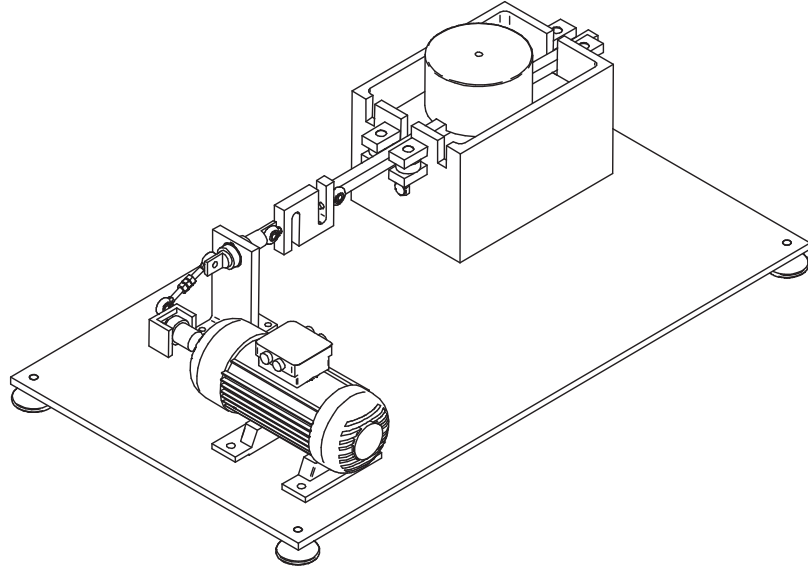


Şekil 6.2 Sürtünme ve aşınma test cihazının fotoğrafı

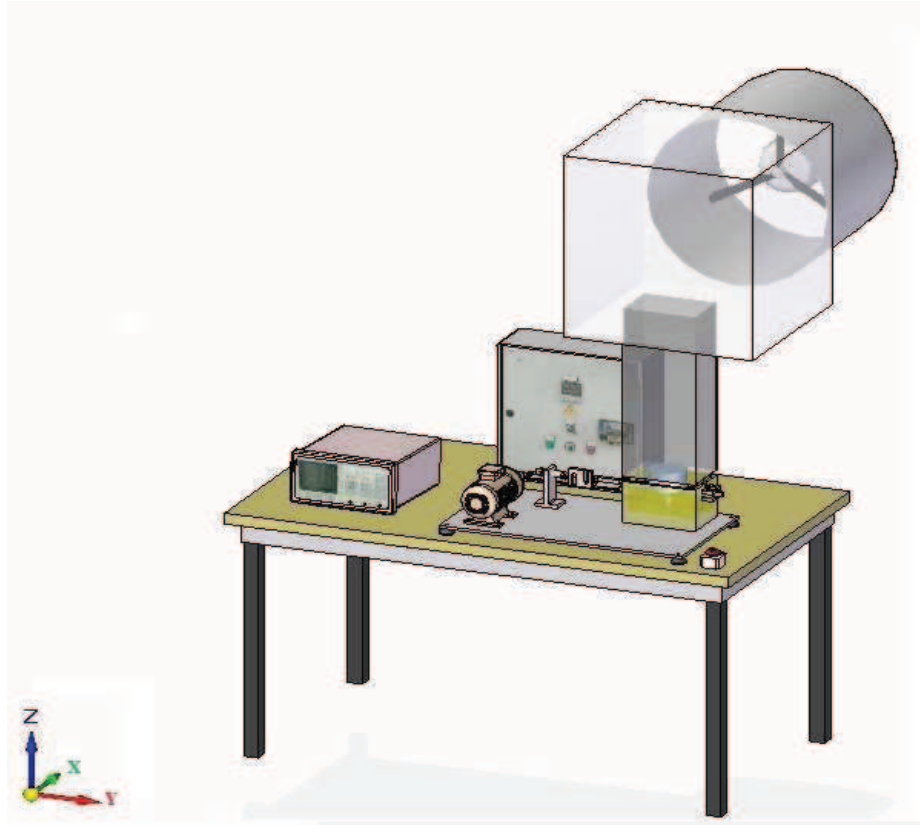
Şekil 6.1 ve şekil 6.2’ de çalışır konumda toplu fotoğrafı verilen bu sürtünme ve aşınma test cihazının elemanları sıralanacak olursa;

1. Tahrik Motoru
2. Eksen Ayarlayıcı
3. Bağlantı Milleri
 - a. Bağlantı Mili-1
 - b. Bağlantı Mili-2
4. Mil Taşıyıcı
5. Kuvvet Sensörü
6. Yük Kolu
7. Aşındırıcıyı Tutan Eleman (Aşındırıcının Yerleştirildiği Eleman)
8. Numune (Aşınan) Tutucu
9. Isıtıcı Eleman
10. Isılçift
11. Termostat
12. Yağ Haznesi
13. Yük
14. Havalandırma Sistemi
15. Elektrik Panosu
16. Osiloskop ve Filtre
17. Taşıyıcı Tabla
18. Acil Stop Düğmesi

Sürtünme ve aşınma test cihazının şematik çizimli gösterimi şekil 6.3 ve şekil 6.4’ de verilmiştir.



Şekil 6.3 Sürtünme ve aşınma test cihazının şematik gösterimi



Şekil 6.4 Sürtünme ve aşınma test cihazının tamamının şematik gösterimi

6.1.1. Tahrik Motoru

380 V şebeke geriliminde çalışan, 180 W güce sahip, delta (Δ) bağlantılı, 1340 devir/dakika maksimum kapasiteli GAMAK marka AC akım tahrik motoru kullanılmıştır. 220 V/AC girişli konvertör ile çıkışta trifaze olarak 0-1340 devir arasında motor devri kontrol edilebilmektedir. Motorun fotoğrafı şekil 6.5’ de gösterilmiştir.



Şekil 6.5 Tahrik motorunun fotoğrafı

6.1.2. Eksen Ayarlayıcı

Motorun x ekseninde sağladığı döndürmeyi y eksenine doğrusal hareket şeklinde entegre eder. Milin üzerinde istenen oranda eksantrik kaçırması yaparak y eksenindeki hareketin; merkezden belli bir uzaklıkta(3-4mm.) $-y$ ve $+y$ yönlerinde bir titreşim hareketi olmasını sağlar. Eksen ayarlayıcı, bağlantı mili-1 ile bağlı olup motordan gelen ilk hareketi alır ve mile iletir. Eksen ayarlayıcı ve bağlantı mili-1 arasında 90 derecelik bir açı vardır. Eksen ayarlayıcı elemanın bir fotoğrafı şekil 6.6’ da gösterilmiştir.



Şekil 6.6 Eksen ayarlayıcı elemanın fotoğrafı

6.1.3. Bağlantı Milleri

Motordan gelen ilk hareketi eksen ayarlayıcısından alıp kuvvet sensörü ve yük koluna aktaran ara bağlantı parçalarıdır.

a. Bağlantı Mili-1

Eksen ayarlayıcıya dönerli burçlarla bağlı olan, 87,4mm uzunluğundaki ara bağlantı parçasıdır. Eksen ayarlayıcıdan aldığı ilk hareketi bağlantı mili-2'ye aktarır. Böylece sistemin y ekseninde hareketli elemanları ileri geri bir titreşim hareketi yapar.

b. Bağlantı Mili-2

Bir kolu bağlantı mili-1'e bir kolu kuvvet sensörüne dönerli burçlarla bağlıdır. y eksenindeki hareketi kuvvet sensörüne aktaran 94,4 mm uzunluğundaki ara bağlantı milidir. Mil taşıyıcıdaki yatağa yerleştirilmiştir.

6.1.4. Mil Taşıyıcı

Taşıyıcı tabla üzerine sabit monteli olan mil taşıyıcı, bağlantı mili-2'yi taşımaktadır. Bu milin ve dolayısıyla hareketli elemanların hareketini y ekseni yönünde sabitler. Silindirik bilyeli bir yatağa sahip olup mil-2 elemanı bu yatak içerisinde y ekseni doğrultusunda hareket eder. Şekil 6.7' de mil taşıyıcı elemanının fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 6.7 Mil taşıyıcının fotoğrafı

6.1.5. Kuvvet Sensörü (Load Cell)

Bu test cihazında, CAS marka SBA-100L model S tipi kuvvet sensörü kullanılmıştır. Nikel kaplı çelik malzemeli kuvvet sensörü 0-100 kg aralığında ölçüm yapabilir. Kuvvet sensörü yatay olarak y eksenindeki itme ve çekme kuvvetlerini, elektrik panosu içinde bulunan yükseltici-ikaz cihazı ile dengelenerek osiloskopa aktarır. Osiloskoptan itme ve çekme kuvvetleri sinüs dalgası olarak ölçülür. Kuvvet sensörünün fotoğrafı şekil 6.8' de gösterilmiştir.



Şekil 6.8 Kuvvet sensörünün fotoğrafı

6.1.6. Yük Kolu

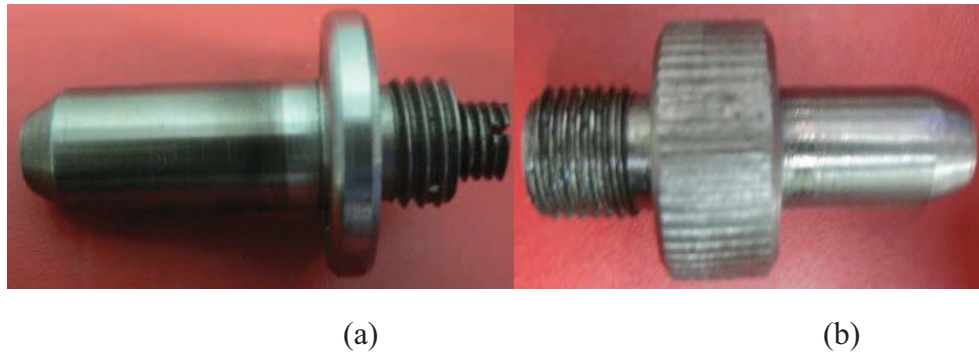
Bir ucu kuvvet sensörüne dönerli burçla bağlı olan 404x12x12 mm ebatlarındaki yük kolu, yağ haznesi üzerine monte edilmiş dört adet yataklayıcı rulmanlar sayesinde y eksenini doğrultusunda ileri-geri titreşim hareketi yapar. Ebatları 23x21 mm olan bir kare tutucu yük kolu ile aşındırıcı tutucu elemanı birbirine bağlar. Yük kolu üzerinde -z yönünde aşındırıcı tutan eleman ve +z yönünde yük bulunur. Yataklayıcı rulmanların yük koluna temas noktalarındaki sürtünmenin azaltılması için motor yağı ile yağlanır. Şekil 6.9' da yük kolu ve aşındırıcıyı tutan elemanın fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 6.9 Yük kolu ve aşındırıcı tutan elemanın fotoğrafı

6.1.7. Aşındırıcıyı Tutan Eleman (Aşındırıcının Yerleştirildiği Eleman)

Bu çalışmada aşındırıcı olarak 6mm çaplı İtalyan yapımı 100Cr6 çelik bilye kullanılmıştır. Aşındırıcıyı tutan eleman esas itibariyle karşı malzeme (aşındırıcı) nin yerleştirildiği elemandır. Yük koluna bağlı olan bu elemanın z ekseni üzerindeki en son ucuna aşındırıcı malzeme yerleştirilir. Bu aşındırıcı malzeme ana malzeme ile sürtünme yapmak üzere temas halinde bulunur. Tutucu elemanın ucundaki aşındırıcı malzeme, y ekseni boyunca ana malzeme üzerinde ileri-geri titreşim hareketi yapar. Sürtünme burada sağlanır ve yüzeyde bir iz oluşur. Aşındırıcıyı tutan eleman orijinal gerçek aşındırıcı malzemeyi (piston segman parçası) de tutabilecek şekle dönüştürebilmek mümkündür. Aşındırıcıyı tutan elemanların fotoğrafları şekil 6.10' da verilmiştir.



Şekil 6.10 Aşındırıcı tutan elemanının fotoğrafları

- (a) Aşındırıcı segman tutucu
- (b) Aşındırıcı bilya tutucu

6.1.8. Numune (Aşınan) Tutucusu

Numune tutucu, yağ haznesinin tabanına tam merkezde olmak üzere dört adet alyan vidayla sabitlenmiştir. Sürtünmeye maruz bırakılan ana malzeme iki ucundan numune tutucusuna sabitlenir. Şekil 6.11' de numune (aşınan) tutucusunun fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 6.11 Numune (aşınan) tutucusunun fotoğrafı

6.1.9. Isıtıcı Eleman

Isıtıcı eleman yağ haznesinin altına yerleştirilmiştir. 400° C dereceye kadar sistemi ısıtabilme kapasitesine sahiptir. Yağ haznesinin içindeki motor yağını ısıtmak için kullanılır. Isıtıcı elemanın fotoğrafı şekil 6.12’ de verilmiştir.



Şekil 6.12 Isıtıcı elemanın fotoğrafı

6.1.10. Isılçift (Thermocouple)

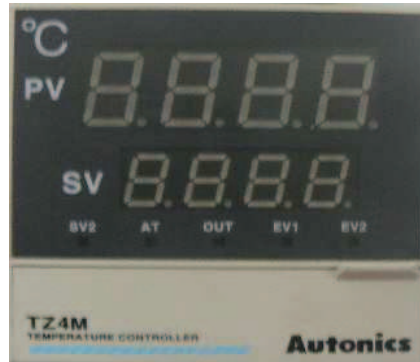
Isılçift, sistemin sıcaklığını dijital ortama iletmek amacıyla kullanılır. Yağ haznesindeki ısıtıcıya bağlıdır. Isılçiftin fotoğrafı şekil 6.13’ de verilmiştir.



Şekil 6.13 Isılçiftin fotoğrafı

6.1.11. Termostat

Autonics marka TZ4M_14R model dijital termostat yağ sıcaklığının istenen belli değerlerde kalmasını sağlar. Termostatın algılayıcı ucu ısıtıcıya bağlanır, termostatın elektrik panosu içerisinde yer alan diğer ünitelerine iletici kablo ile bağlanır ve kontrol elektrik panosu üzerinden yapılır. Şekil 6.14’de termostatın bir fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 6.14 Termostatın fotoğrafı

6.1.12 Yağ Haznesi

140x197x124 mm ebatlarında dikdörtgenler prizması şeklindeki yağ haznesi taşıyıcı tabla üzerine şekil 6.1 ve şekil 6.2’ de gösterilen konumda monte edilmiştir. y eksenini boyunca yük kolunun sağ ve sol tarafında dört adet yataklayıcı rulmanlar bulunur. İstenmesi halinde hazneye motor yağı veya başka bir ara malzeme (sıvı) konulabilir. Şekil 6.15’ de yağ haznesinin fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 6.15 Yağ haznesi ve yükün birlikte fotoğrafı

6.1.13 Yük

Yük, 3,45 kg ağırlığındaki demir parçadır. Yük koluna bir adet alyanlı vida ile bağlanır. Uygulanacak yük miktarına göre üstüne farklı ağırlıklardaki yükler konulacak Şekilde tasarlanmıştır. Yük Kolu ile temas bölgesi, oyuk dikdörtgenler prizması Şeklinde olup sisteme daha iyi tutunması sađlanmıŐtır. Yükün fotoğrafı Şekil 6.15' de yağ haznesi ile birlikte verilmiştir. Bu çalışmada, yük olarak 1 kg ağırlık kullanılmıştır.

6.1.14. Havalandırma Sistemi

Havalandırma sistemi; SINBO marka, 220 V/AC geriliminde alıŐan, 50 Hz frekansında ve 120 W güce sahip aspiratör ve havalandırma kanallarından oluşur. Yağ ile yüksek sıcaklıklardaki çalışmalarda, sistemin düşey havalandırma kanalı aŐađı doğru inerek yağ haznesi üzerine oturur. Böylece ısınan yağ buharı çalışma ortamından çekilerek alınır. Şekil 6.16' da havalandırma sisteminin fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 6.16 Havalandırma sisteminin fotoğrafı

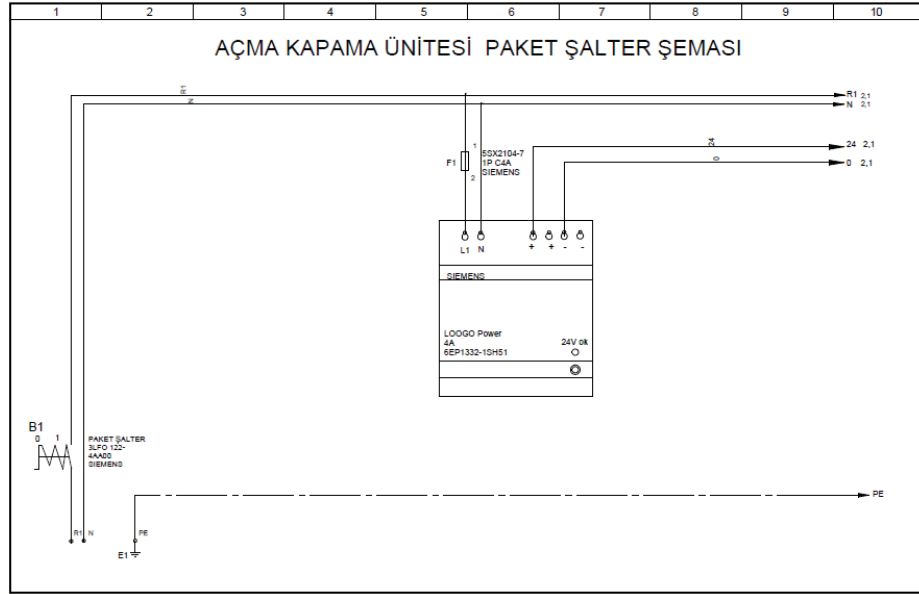
6.1.15. Elektrik Panosu

Elektrik panosu, sistemin bütün elektrik kontrolünü ve yönetimini yapan devreler ve parçaları içeren bir panodur. Panonun içinde programlanabilir mantıksal denetleyici (PLC; Programmable Logic Controller), konvertör, yükseltici-ikaz cihazı, dijital termostat, termik sigortalar, kontaktörler ve işaret lambaları bulunur. Ayrıca panonun ön kapağının üzerinde, potansiyometre, motor çalıştırma düğmesi, motor durdurma düğmesi, ısıtıcı göstergesi, ısıtıcı düğmesi ve dijital DC milivoltmetre bulunur. Şekil 6.17’ de elektrik panosunun fotoğrafı verilmiştir.

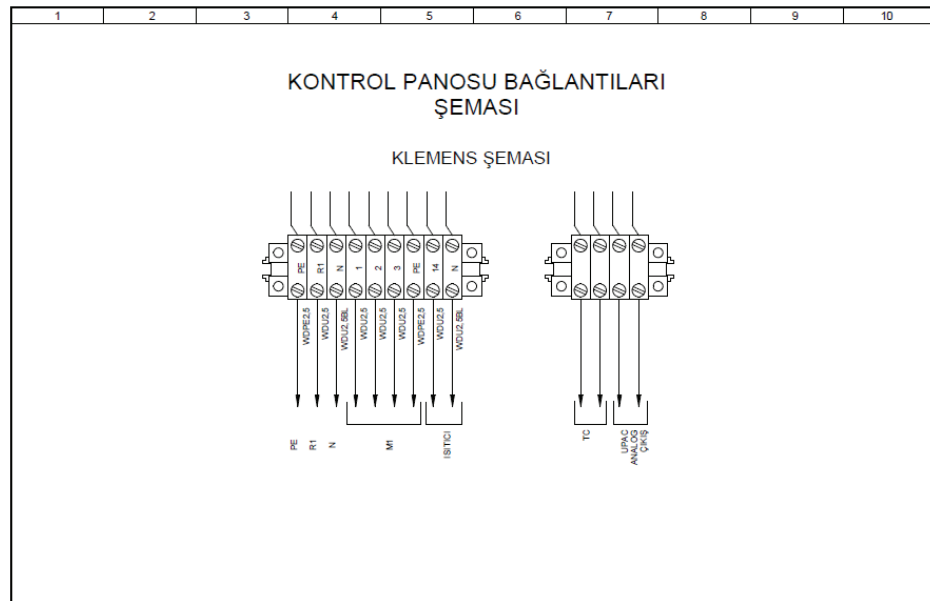


Şekil 6.17 Elektrik panosunun iç fotoğrafı

PLC Siemens Logo Power marka, 6EP1332-15HS1 modelidir. 24 volt/4 amper DC çıkışlı PLC, elektrikli sistemin ana ünitesidir. Pano içindeki bütün üniteleri besler ve kontrol eder. Şekil 6.18’ de açma-kapama ünitesi paket şalter şeması verilmiştir.



Şekil 6.18 Açma-kapama ünitesi paket şalter şeması

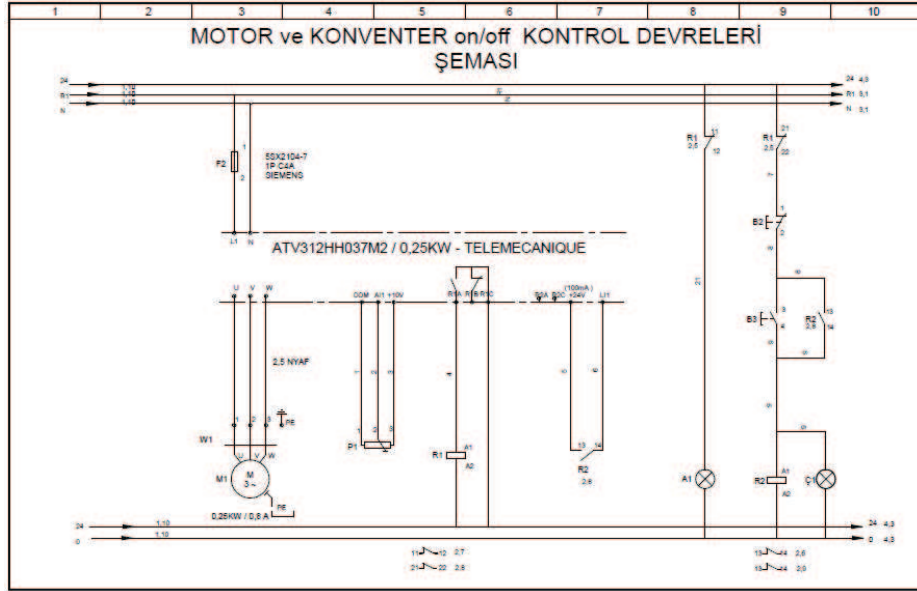


Şekil 6.19 Kontrol panosu bağlantıları şeması

PLC' ye gelen ve giden bütün kablolar şekil 6.19' da kontrol panosu bağlantıları şemasında gösterilmiştir.

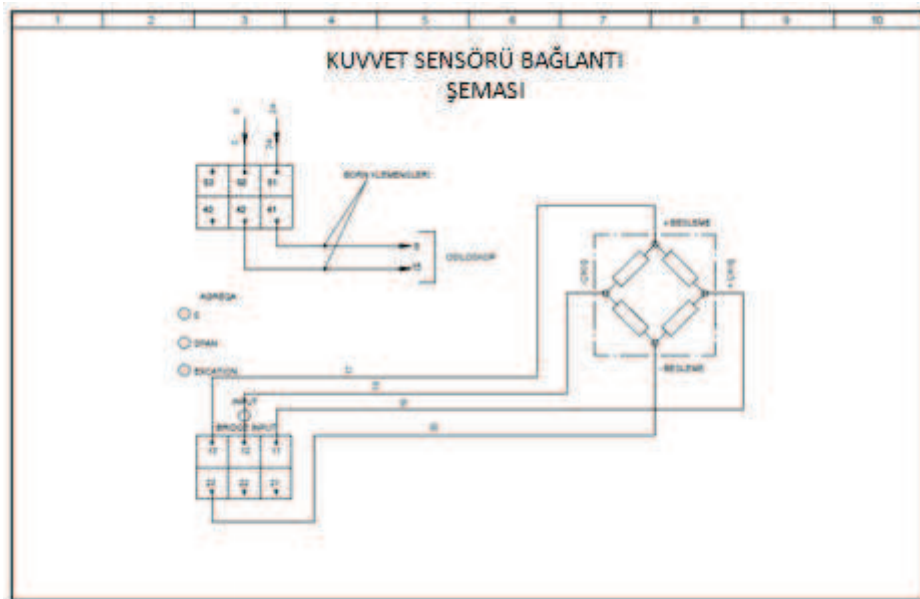
Konvertör, Schneider marka ve ATV 312HO37M2 modeldir. Tahrik motorunun 0-1340 devri potansiyometre yardımı ile 0-10 volt arasında analog olarak değiştirilerek

kontrol edilir ve istenilen devirde çalışması sağlanır. Şekil 6.20’ de kontrol devreleri şeması verilmiştir.



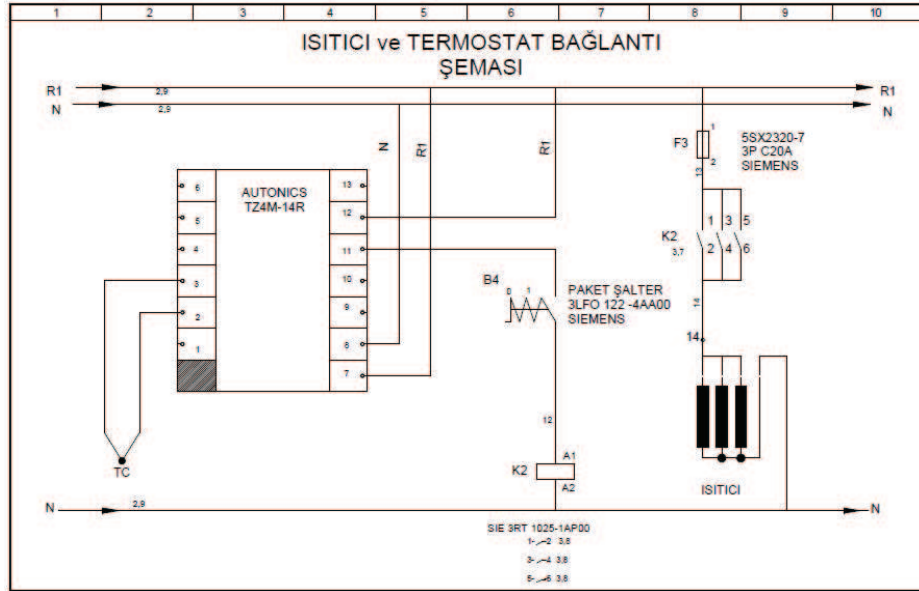
Şekil 6.20 Motor ve konvertör on/off kontrol devreleri şeması

Yükseltici ikaz-cihazı, kuvvet sensöründen gelen (kuvvetten doğan) sinyalleri yükselterek ve ayarlayarak, panonun yanındaki osiloskoba aktarır. Kuvvet sensörü bağlantı şeması şekil 6.21’ de verilmiştir.



Şekil 6.21 Kuvvet sensörü bağlantı şeması

Isılçiftten gelen uçlar dijital termostata bağlıdır. Göstergeden sıcaklık değerleri okunur. Isıtıcı ve termostat bağlantıları şeması şekil 6.22’ de verilmiştir.



Şekil 6.22 Isıtıcı ve termostat bağlantı şeması

Dijital DC milivoltmetre kuvvet sensörünün panodaki çıkış uçlarına bağlanarak, ağır devirdeki itme-çekme kuvvetlerini mV cinsinden gösterir.

Panonun ön kapağında bulunan motor açma düğmesi (yeşil) tahrik motorunu devreye sokar. Motor durdurma düğmesi (kırmızı) tahrik motorunun çalışmasını durdurur. Isıtıcı düğmesi ısıtıcı ünitenin çalışmasını kontrol eder. Şekil 6.23’ de elektrik panosunun ön kapak fotoğrafı verilmiştir.

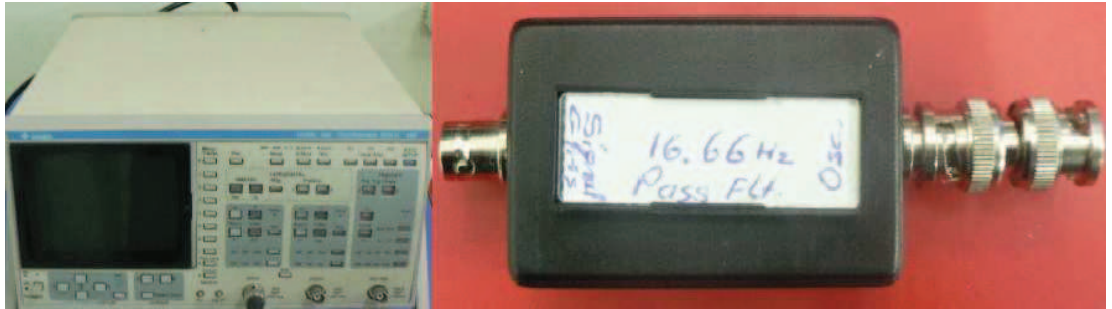


Şekil 6.23 Elektrik panosunun ön kapak fotoğrafı

6.1.16. Osiloskop ve Filtre

Osiloskop, Gould marka, 400 modelidir. Osiloskop, sistem çalışırken sensörden aldığı sinyali sinüzoidal dalga şeklinde ekranına yansıtır. Düşey eksen, genliği (AC/mV), yatay eksen ise frekansı (ms) gösterir.

Dıştan gelen statik ve manyetik etkenler osiloskopta parazitler şeklinde görünürler. Bu parazitler AC/mV biriminde ölçümlerin alınmasını zorlaştırır. Osiloskopta net bir görüntü elde edebilmek için ölçüm yaptığımız frekansta (1000 devir=16,66 Hz) filtre edilmesi zorunludur. Bu nedenle, 16,66Hz alçak geçiş (low pass) filtresi özel olarak üretilip osiloskoba bağlanmış ve daha net görüntü elde edilmiştir. Şekil 6.24' de osiloskop ve filtrenin birer fotoğrafı verilmiştir.



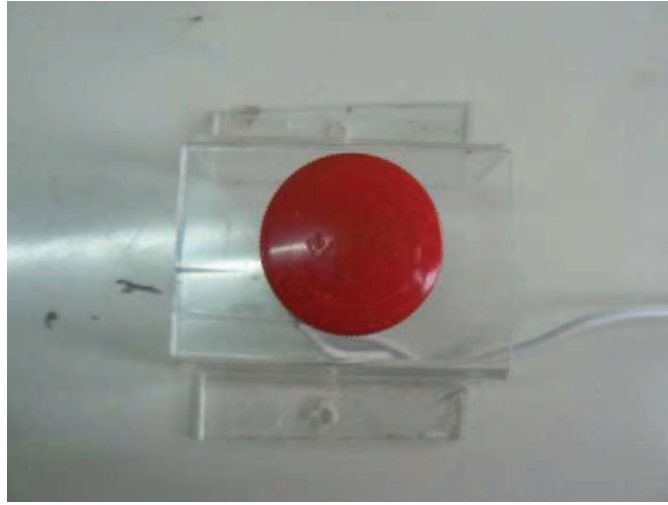
Şekil 6.24 Osiloskop ve filtrenin fotoğrafları

6.1.17. Taşıyıcı Tabla

Boyutları 370x671 mm olan demir malzemedan yapılmış taşıyıcı tabla hareketsiz masa üzerine 4 adet amortisörlü bağlantı ayaklarıyla sabitlenmiştir. Sistemde motorunun dönmesinden oluşan mekanik parazitleri azaltmak için taşıyıcı tabla üzerine yerleştirilen her bir eleman amortisör malzemesi ile taşıyıcı tablaya bağlanmıştır.

6.1.18. Acil Durdurma Düğmesi

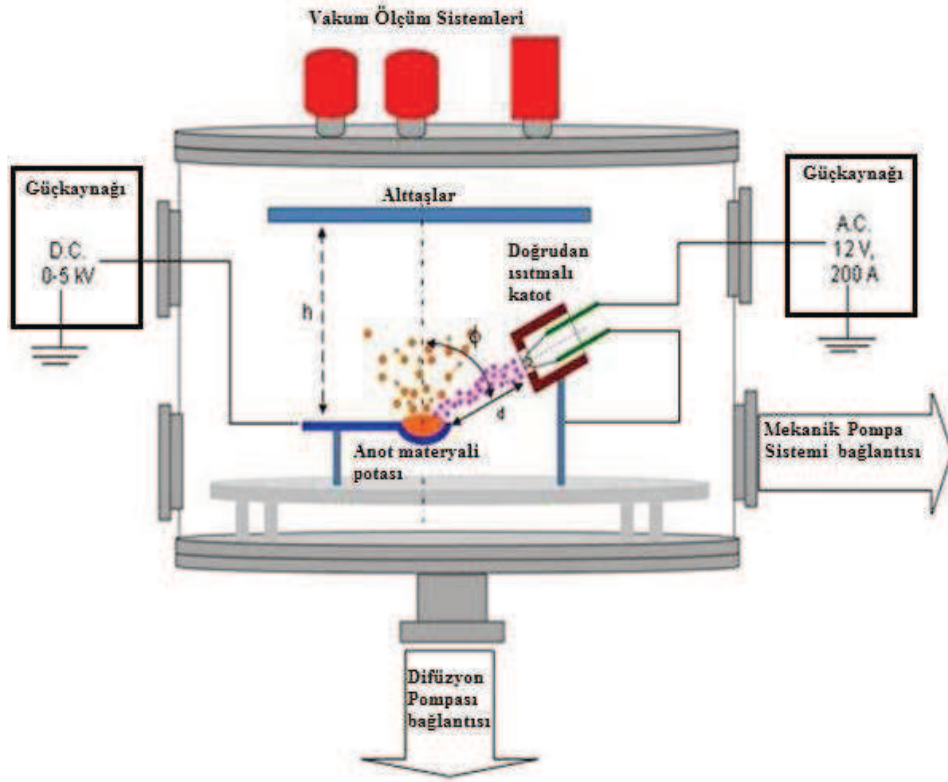
Taşıyıcı Tabla üzerine sabitlenmiş düğme, herhangi bir elektriksel arıza ya da tehlike anında sistemindeki bütün gücü kesmek amacıyla sisteme monte edilmiştir. Deney sırasında her an butona basılarak bütün elektriksel iletim kesilebilir. Şekil 6.25’ de acil durdurma düğmesinin fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 6.25 Acil durdurma düğmesi

6.2. Plazma ile Azot Kaplama Deney Düzeneği

Plazma ile azot kaplama deney düzeneğini gerçekleştirmek üzere bir termiyonik vakum ark (TVA) sistemi ele alınarak gerekli değişiklikler yapılmıştır. Termiyonik vakum ark (TVA) sisteminin şematik gösterimi şekil 6.26’ da gösterilmiştir.



Şekil 6.26 Termiyonik vakum ark sisteminin şematik gösterimi

6.2.1 Termiyonik Vakum Ark (TVA) Sistemi

Plazma ile azot kaplama sistemine dönüştürülmek üzere ele alınan TVA sisteminin elemanları aşağıda verilmiştir:

1. Vakum Odası
2. Pompalar Sistemi (Mekanik Pompa ve Difüzyon Pompası)
3. Güç Kaynağı Sistemi
4. Elektron Tabancası Sistemi (Doğrudan ısıtmalı katot)
5. Ampermetre/Voltmetre Paneli
6. Soğutma Sistemi
7. Vakum Ölçüm Ünitesi

Genel olarak katı malzemelerin plazmaları oluşturulmak üzere düzenlenmiş olan bu TVA sisteminin elemanlarına ait özellikleri ve resimleri aşağıda verilmiştir.

6.2.1.1 Vakum Odası

TVA sisteminin vakum odası, 455 mm çapında 430 mm yüksekliğinde bir silindir olup, yaklaşık 10^{-9} Torr luk yüksek vakum değerlerinde de çalışabilecek şekilde paslanmaz çelikten özel olarak imal edilmiştir. şekil 6.27' de vakum odasının bir fotoğrafı verilmiştir.



şekil 6.27 Vakum odası

6.2.1.2. Pompalar Sistemi

Pompalar sistemi, Edwards EM40EH250 marka bir adet mekanik pompa ve Edwards Diffstack M100 marka bir adet difüzyon pompasından oluşmaktadır. Mekanik pompa ile vakum odasının basıncı 10^{-4} Torr' a kadar inmekte, daha sonra difüzyon pompasının devreye girmesiyle de vakum odasının basıncı 10^{-6} Torr mertebelerine kadar düşürülebilmektedir. Şekil 6.28 (a) ve şekil 6.28 (b)' de mekanik ve difüzyon pompasının fotoğrafları verilmiştir.



a) Mekanik Pompa



b) Difüzyon Pompası

Şekil 6.28 Mekanik ve difüzyon pompası fotoğrafları

6.2.1.3. Güç Kaynağı Sistemi

Güç kaynağı sistemi aşağıdaki dört farklı güç kaynağını üzerinde bulundurmaktadır.

- 0-5 kV ve 10 kW kapasiteli ayarlanabilir çıkış voltajlı yüksek voltaj güç kaynağı,
- 27 V AC ve 1 kW kapasiteli ayarlanabilir çıkış voltajlı güç kaynağı,
- 220 V AC ve 3 kW kapasiteli güç kaynağı,
- 2x600 V DC 8,5 kW kapasiteli güç kaynağı.

Şekil 6.29' da termiyonik vakum ark (TVA) güç kaynağı sisteminin bir fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 6.29 Termiyonik Vakum Ark Güç Kaynağı Sistemi

6.2.1.4. Elektron Tabancası Ünitesi (Doğrudan ısıtmalı katot)

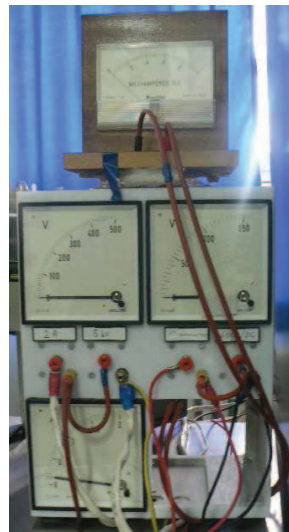
Elektron bombardımanı ile katı malzemelerin plazmasını oluşturmak için kullanılan ünitedir.



Şekil 6.30 Elektron tabancası ünitesi

6.2.1.5. Ampermetre/Voltmetre Paneli

Özel olarak tasarlanmış olan ampermetre ve voltmetreler yardımı ile uygulanan voltaj, flaman akımı, deşarj akımı gibi değerler buradan görülebilir. Şekil 6.31’ de ampermetre/voltmetre panelinin fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 6.31 Ampermetre/voltmetre panelinin fotoğrafı

6.2.1.6. Soğutma Sistemi

Difüzyon pompası üzerinde bulunan soğutma sistemi pompanın soğutulması için kullanılır.

6.2.1.7. Vakum Ölçüm Ünitesi

Vakum ölçüm ünitesi, Edwards marka 10^{-3} Torr' a kadar hassas ölçüm alabilen düşük basınçölçer ve 10^{-6} Torr' a kadar hassas ölçüm alabilen daha düşük basınçölçer ve dijital göstergelerden oluşur. Şekil 6.32' de vakum ölçüm ünitesinin fotoğrafları verilmiştir.



(a)



(b)



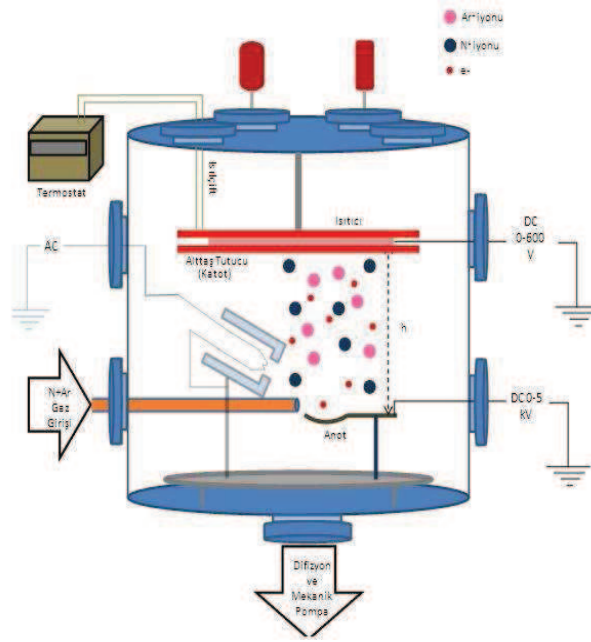
(c)

Şekil 6.32 Vakum ölçüm ünitesi

- a) Dijital basınç göstergesi,
- b) 10^{-6} Torr hassasiyetli basınçölçer,
- c) 10^{-3} Torr hassasiyetli basınç ölçer

6.2.2. Termiyonik Vakum Ark (TVA) Sisteminde Yapılan Değişiklikler

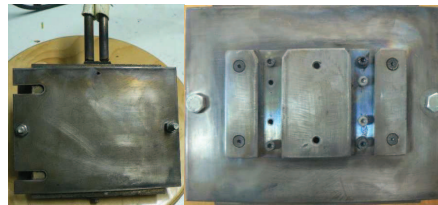
Termiyonik Vakum Ark sisteminde plazma ile azot kaplama işlemi yapmak için sisteme ısıtıcı, ısılçift, dijital sıcaklık ölçer ve gaz karıştırıcı üniteler eklenmiştir. Oluşturulan sistemin şematik resmi şekil 6.33 de verilmektedir.



Şekil 6.33 Plazma ile azot kaplama sistemi

6.2.2.1. Isıtıcı

İki plaka arasında sabitlenmiş pirinç malzemeden yapılmış ve 600° C kapasiteli ısıtıcıdır. Alt plakada numuneler için özel tutturma mekanizması vardır. Azot kaplanacak numuneler (iş parçaları) buraya sabitlenir. Isıtıcının sıcaklığı ısılçift ile ölçülür. Şekil 6.34' de ısıtıcı ve alıtış tutucunun fotoğrafları verilmiştir.



(a)

(b)

Şekil 6.34 Isıtıcı ve numune tutucu a) ısıtıcı b) alıtış tutucu

6.2.2.2. Dijital Sıcaklık Ölçer

Isıtıcı sıcaklığını dijital olarak kontrol etmeye ve ayarlamaya yarayan dijital göstergedir. Ayarlanan sıcaklık derecesine gelindiğinde otomatik olarak atar ve ısıtıcı soğumaya başlar. Şekil 6.35’ de dijital sıcaklık ölçerin fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 6.35 Dijital sıcaklık ölçer

6.2.2.3. Gaz Karıştırıcı

340 mm çapında, 270 mm yüksekliğinde silindir şeklindeki gaz karıştırıcının üzerinde bir adet basınçölçer ve vakumlama kanalları bulunmaktadır. Gaz tüplerine dışarıdan bağlı olup, gaz karışımları bu karıştırıcı içine depolanabilir. Daha sonra sisteme bağlı olan gaz hortumu üzerindeki vana açılarak vakum odasına gaz girişi yapılabilir. Şekil 6.36’ da gaz karıştırıcı ünitenin fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 6.36 Gaz karıştırıcı ünite

6.3. Deneysel Çalışmalar.

Teorik çalışmalar, içten yanmalı motorların silindir gömleklerindeki sürtünme ve aşınmaya karşı direncin artırılmasında plazma ile azot kaplama yönteminin kullanılabileceğini göstermektedir (Özdemir ve Erten, 2003; Saklakoğlu ve Saklakoğlu, 2004; Epik vd., 2004). Bu tez çalışmasında Renault marka otomobillerin ıslak gömlekli içten yanmalı motor silindir gömleklerinden alınan numunelerin, plazma ile azot kaplanması gerçekleştirilmiş ve daha sonra kaplanmamış ve kaplanmış numunelerin sürtünme kuvvetleri ölçülerek sürtünme katsayıları hesaplanmıştır.

Bu incelemenin yapılabilmesi için iki farklı deney kurgulanarak ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir.

Deney I. Islak gömlekli içten yanmalı Renault marka bir otomobil motorunun silindir gömleğinden alınan numunelerin plazma ile azot kaplanması

Deney II. Islak gömlekli içten yanmalı Renault marka bir otomobil motorunun silindir gömleğinden alınan kaplanmamış numunelerin ve plazma ile azot kaplanmış numunelerin sürtünme katsayısı değerlerinin ölçülmesi

Bu deneylerin gerçekleştirilmesi sonrası elde edilen değerler karşılaştırılmıştır.

6.3.1. Islak gömlekli içten yanmalı Renault marka bir otomobil motorunun silindir gömleğinden alınan numunelerin plazma ile azot kaplanması deneyi

Deney numunesi (alttaş) olarak ıslak gömlekli içten yanmalı Renault marka bir otomobil motorunun silindir gömleğinden 10x25x3,5 mm' lik parçalar hazırlanmıştır, bu parçalar bundan sonra kısaca numuneler olarak anılacaktır. Numunenin kimyasal yapısı TC Eskişehir Şeker Makine Fabrikası Spektral Analiz Laboratuvarlarında alınan spektral analiz değerleri ile belirlenmiştir. Tablo 6.1' de bu analiz sonuçları verilmektedir.

Tablo 6.1 İçten yanmalı Renault marka bir otomobil motorunun silindir gömleğinden alınan numunenin spektral analiz değerleri

QMatrix Analysis Results										
Sample Identification										
Creation By	OSMANGAZI UNIVERSITE				Creation Date	Modify By	QualityCheckec			
QualityOK					Quality	SampleNo				
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1.	3.199	2.774	0.677	0.091	0.078	0.749	0.0074	0.535	<0.0010	0.044
2.	3.171	2.705	0.692	0.106	0.058	0.764	0.0088	0.530	<0.0010	0.045
3.	3.163	2.757	0.682	0.100	0.051	0.763	0.0071	0.534	<0.0010	0.044
4.	3.151	2.783	0.684	0.107	0.062	0.765	0.0077	0.541	<0.0010	0.044
Ø	3.171	2.755	0.684	0.101	0.062	0.760	0.0077	0.535	<0.0010	0.044
σ	0.020	0.035	0.0062	0.0073	0.011	0.0075	0.00074	0.0045		0.00058
υ	0.631	1.270	0.906	7.228	17.74	0.987	9.610	0.841		1.318
	Cu	Nb	Ti	V	W	Mg	Fe			
	%	%	%	%	%	%	%			
1.	0.069	0.0017	0.029	0.021	<0.0040	<0.0010	91.72			
2.	0.067	0.0021	0.030	0.021	0.0045	<0.0010	91.79			
3.	0.065	0.0019	0.030	0.021	<0.0040	<0.0010	91.77			
4.	0.066	0.0019	0.029	0.021	<0.0040	<0.0010	91.73			
Ø	0.067	0.0019	0.029	0.021	0.0041	<0.0010	91.75			
σ	0.0017	0.00016	0.00082		0.00025		0.033			
υ	2.537	8.421	2.828		6.098		0.036			

Bölüm 6.2' de tüm detayları ile verilen sistemin elemanları şekil 6.33' de verildiği gibi düzenlenmiştir. Numune şekil 6.34 (b)' deki alttaş tutucuya yerleştirilerek ısıtıcıya monte edilmiştir.

Önce vakum pompaları çalıştırılarak vakum odası 10^{-2} torr mertebesine kadar vakum basınca getirilmiştir. Daha sonra vakum odasına hacmen %50 argon - %50 azot gaz karışımı verilmiştir.

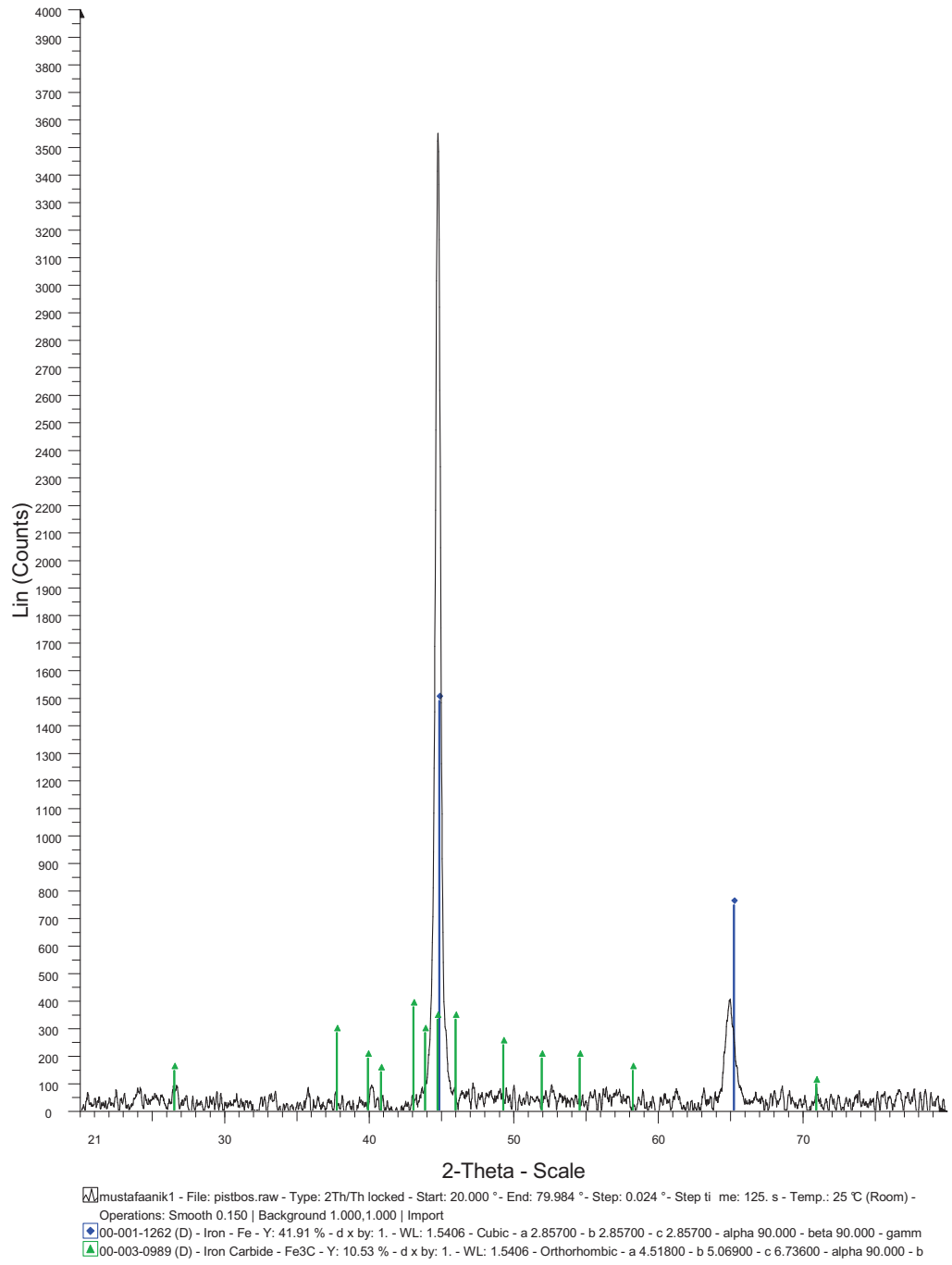
Basıncın 10^{-1} torr mertebesine gelmesi ile tablo 6.2' nin birinci sütunda yer alan parametre değerleri ile deney başlatılmıştır.

Tablo 6.2 İçten yanmalı Renault marka bir otomobil motorunun silindir gömleğinden alınan numunelerin plazma ile azot kaplanması sürecinde plazma işlem parametrelerinin 180 dakikalık süredeki değerleri

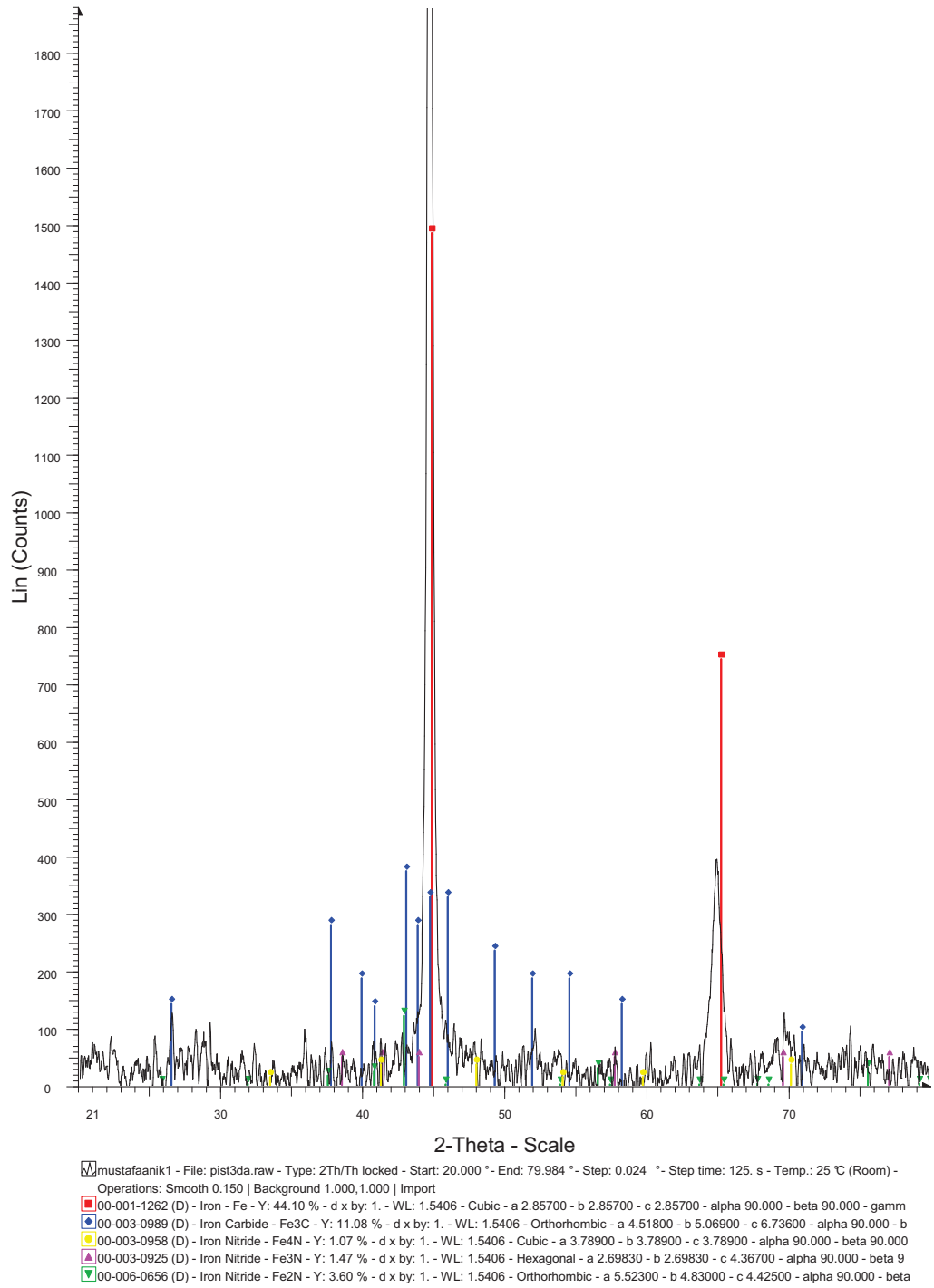
İşlem Süresi	00 ¹	30 ¹	60 ¹	70 ¹	90 ¹	120 ¹	150 ¹	180 ¹
Sıcaklık	250° C	190° C	148° C	170° C	149° C	174° C	145° C	116° C
Hızlandırıcı Potansiyel	-100 V	-114 V	-114 V	-150 V	-152 V	-150 V	-150 V	-150 V
İyon Akımı	0,4 A	0,4 A	0,4 A	0,5 A	0,5 A	0,5 A	0,5 A	0,5 A
Plazma Potansiyeli	400 V	450 V	450 V	450 V	400 V	400 V	400 V	400 V
Plazma Akımı	0,5 A	0,6 A	0,6 A	0,6 A	0,6 A	0,85 A	0,85 A	0,85 A
Basınç	2,8x10 ⁻¹ Torr	2,1x10 ⁻¹ Torr	1,6x10 ⁻¹ Torr	2,8x10 ⁻¹ Torr	1,6x10 ⁻¹ Torr	1,6x10 ⁻¹ Torr	3,2x10 ⁻¹ Torr	3,2x10 ⁻¹ Torr

180 dakika süre ile yapılan kaplama işleminin belli aralıklarla alınan plazma işlem parametre değerleri tablo 6.2' de verilmiş olup süre sonunda kaplanmış numunenin sürtünme katsayısı ölçülmek üzere deney II için hazır hale getirilmiştir.

Numunelerin kaplanmadan önceki XRD değerleri ve 180 dakikalık süre ile kaplama işlemi sonrasındaki XRD değerleri Bruker marka AXS D8 Advance model X-ışınları yardımıyla malzeme karakterizasyonu yapabilen X-ışınları kırınımı difraktometresi ile alınmıştır. Ölçüm değerleri şekil 6.37 ve şekil 6.38' de verilmiştir. Plazma ile azot kaplanmış numune grafiğinde Fe₄N, Fe₃N ve Fe₂N pikleri görülmektedir.



Şekil 6.37 Kaplanmamış numunenin XRD değerleri



Şekil 6.38 180 dakika süreyle plazma ile azot kaplanması yapılmış numunenin XRD değerleri

6.3.2. Kaplanmamış Numunenin Ve Kaplanmış Numunenin Sürtünme Katsayısı Değerlerinin Ölçülmesi Deneyi

Ölçümü yapılacak numuneler:

Islak gömlekleli içten yanmalı Renault marka bir otomobil motorunun silindir gömleğinden 10x25x3,5 mm' lik parçalar halinde alınmış kaplanmamış ve plazma ile azot kaplanmış numunelerdir.

Sürtünme katsayısı ölçülecek numune alkol ile temizlenerek şekil 6.11' de verilen numune (aşınan) tutucuya bağlanarak yağ haznesi içerisine yerleştirilmiştir. Yağ haznesi, Shell Helix HX3 marka motor yağı ile doldurulmuştur.

Yapılan ölçüm işlemlerinde yatay eksendeki hareketin genliği 2mm olarak alınmıştır.

Bir sürtünme katsayısı ölçümü için üç aşama kurgulanmıştır.

Birinci aşamada sistemde kullanılan kuvvet sensörünün kalibrasyon çalışmaları yapılarak, kuvvet sensörüne uygulanan kuvvet ile buna karşılık kuvvet sensörünün verdiği gerilim (voltaj) değeri arasında bir formül oluşturulması kurgulanmıştır.

İkinci aşamada çalışan sürtünme ve aşınma deney düzeneğinde sürtünme kuvvetini elde ederken, sistemde var olan fakat hesaplamalara etki etmesi istenmeyen diğer tüm kuvvetlerin (F_d) belirlenmesi kurgulanmıştır.

Üçüncü aşamada ise sürtünme katsayısı ölçülecek numuneye ait net sürtünme kuvvetinin (F_K) hesabı ve genel sürtünme katsayısı formülünden yararlanılarak sürtünme katsayılarının (μ_k) bulunması kurgulanmıştır.

1. Aşama: Kuvvet sensörüyle yapılan kalibrasyon çalışmaları sonucunda kuvvet uygulamalarına karşı sensörün gösterdiği voltaj (mV) değerleri tablo 6.3' deki şekliyle elde edilmiştir. Birinci sütundaki kuvvet değerleri (0,98 N = 100 gr-kuvvet) farkla artırılarak uygulandığında ikinci sütundaki voltaj değerleri elde edilmiştir.

Bu değerlere göre kuvvet sensörüne uygulanan her bir 0,98 N' luk kuvvet değişimine karşılık kuvvet sensöründe 70 mV' luk bir potansiyel değişimi görüleceği bulunmuştur. Bunu bir eşitlik olarak ifade edersek;

$$\frac{\text{Sensörden okunan voltaj (mV)} \times 0,98 \text{ N}}{70 \text{ mV}} = \text{Yatay kuvvet} \quad (1)$$

elde edilir. Bu yatay kuvvet, sensörün voltaj değerine karşılık gelen kuvvet değeridir.

Tablo 6.3 Kuvvet sensörünün uygulanan kuvvetlere karşılık gösterdiği voltaj değerleri

Kuvvet (N)	Voltaj (mV)	Kuvvet (N)	Voltaj (mV)	Kuvvet (N)	Voltaj (mV)
0,00	2190	11,772	3020	23,544	3860
0,981	2260	12,753	3090	24,528	3930
1,962	2330	13,734	3160	25,506	4000
2,943	2400	14,715	3230	26,487	4070
3,924	2470	15,696	3300	27,468	4140
4,905	2540	16,677	3370	28,449	4210
5,886	2610	17,658	3440	29,430	4280
6,867	2680	18,639	3510	30,411	4350
7,848	2750	19,620	3580	31,392	4420
8,829	2820	20,601	3650	32,373	4490
9,810	2890	21,582	3720	33,354	4560
10,791	2960	22,563	3790	34,335	4630

2. Aşama: Sistemde ölçmek istediğimiz sürtünme kuvvetinin dışında istenmeyen diğer etken kuvvetleri ölçmek amacıyla; kayma sürtünmesi yapmaksızın ve sisteme F_n

normal kuvveti yüklenmeksizin, sistem 1000 devir/dk ile çalıştırılarak kuvvet sensöründeki voltaj değerleri tablo 6.4' deki şekliyle elde edilmiştir.

Tablo 6.4 Sürtünme ve aşınma test cihazında istenmeyen etken kuvvetlerin kuvvet sensörüyle alınan gerilim değerleri

Süre (dk)	Sıcaklık (°C)	Motor Devri (devir/dk)	Sürtünme Şekli	Okunan Gerilim (mV)
0	28	1000	Yağlı dönme	34,2
5	28	1000	Yağlı dönme	34,6
10	28	1000	Yağlı dönme	34,4
15	28	1000	Yağlı dönme	34,6
20	28	1000	Yağlı dönme	34,6
25	28	1000	Yağlı dönme	34,6
30	28	1000	Yağlı dönme	34,2
35	28	1000	Yağlı dönme	34,4
40	28	1000	Yağlı dönme	34,6
45	28	1000	Yağlı dönme	34,6
50	28	1000	Yağlı dönme	34,6
55	28	1000	Yağlı dönme	34,6
60	28	1000	Yağlı dönme	34,3
65	28	1000	Yağlı dönme	34,6
70	28	1000	Yağlı dönme	34,6

Tablo 6.4' ün son sütununda gerilim değerlerinin ortalaması alınmış ve ortalama gerilim 34,5 mV olarak belirlenmiştir. Bu mV değerine karşılık gelen istenmeyen yatay kuvvet (F_d); eşitlik (1)' den;

$$\text{İstenmeyen yatay kuvvet } (F_d) = 0,483 \text{ N} \quad (2)$$

olarak hesaplanmıştır.

3. aşamadaki kurgulamaya göre sürtünme kuvvetleri ve sürtünme katsayıları her iki numune için aşağıda verilen sıralama ve başlıklarla gerçekleştirilmiştir.

6.3.2.1. Kaplanmamış Numunenin Sürtünme Katsayısı Hesaplanması

Kaplanmamış numune sürtünmeye tabii tutulmuş ve tablo 6.5' deki değerler elde edilmiştir.

Tablo 6.5 Kaplanmamış numuneye etki eden kuvvetlerin (sürtünme kuvveti+istenmeyen kuvvetler) kuvvet sensöründen okunan voltaj değerleri

Süre (dk)	Sıcaklık (°C)	Motor Devri (devir/dk)	Sürtünme Şekli	Yük -F _n (N)	Okunan gerilim (mV)
0	28	1000	Yağlı kayma	10	90
5	27	1000	Yağlı kayma	10	90
10	28	1000	Yağlı kayma	10	90
15	28	1000	Yağlı kayma	10	90
20	28	1000	Yağlı kayma	10	90
25	28	1000	Yağlı kayma	10	90
30	27	1000	Yağlı kayma	10	90
35	27	1000	Yağlı kayma	10	90

Sensördeki voltaj değerinin ortalamasına karşılık gelen toplam yatay kuvvet (F_{T1}), eşitlik (1)' den;

$$\text{Toplam yatay kuvvet (F}_{T1}) = 1,26 \text{ N} \quad (3)$$

olarak hesaplanmıştır.

Kaplanmamış numuneye etki eden sürtünme kuvveti (2) ve (3) numaralı ifadelerden yararlanılarak sürtünme kuvveti (F_{K1}) için:

$$F_{K1} = F_{T1} - F_d$$

$$F_{K1} = 1,26 - 0,483$$

$$F_{K1} = 0,777 \text{ N} \quad (4)$$

olarak bulunmuştur.

Yatay bir düzlemde sürtünen iki cisim arasındaki sürtünmede sürtünme kuvveti ile sürtünme katsayısı (μ_k) ve F_n normal kuvvet arasındaki;

$$f_k = \mu_k \times F_n \quad (5)$$

genel denkleminde yararlanılarak;

$$\mu_k = f_k / F_n \quad (6)$$

denkleminde (4) eşitliği ile verilen sürtünme kuvveti ve normal kuvvet (yük) F_n değerleri yazılarak

$$\mu_{k1} = 0,777 \text{ N} / 10 \text{ N} \quad (7)$$

Kaplanmamış numunenin sürtünme katsayısı

$$\mu_{k1} = 0,077 \quad (8)$$

olarak hesaplanmıştır.

6.3.2.2. Kaplanmış Numunenin Sürtünme Katsayısının Hesaplanması

Plazma ile azot kaplanmış numune sürtünmeye tabii tutulmuş ve tablo 6.6' daki değerler elde edilmiştir.

Tablo 6.6 Kaplanmış numuneye etki eden kuvvetlerin (sürtünme kuvveti+istenmeyen kuvvetler) kuvvet sensöründen okunan voltaj değerleri

Süre (dk)	Sıcaklık (°C)	Motor Devri (devir/dk)	Sürtünme Şekli	Yük - F_n (N)	Okunan gerilim (mV)
0	28	1000	Yağlı kayma	10	85
5	27	1000	Yağlı kayma	10	85
10	28	1000	Yağlı kayma	10	84
15	28	1000	Yağlı kayma	10	83
20	28	1000	Yağlı kayma	10	85
25	28	1000	Yağlı kayma	10	83
30	27	1000	Yağlı kayma	10	84
35	27	1000	Yağlı kayma	10	83

Tablo 6.6' nın son sütununda gerilim değerlerinin ortalaması alınmış ve ortalama gerilim 84 mV olarak belirlenmiştir. Bu mV değerine karşılık gelen yatay kuvvet (F_{T2}), eşitlik (1)' den;

$$\text{Yatay kuvvet } (F_{T2}) = 1,176 \text{ N} \quad (9)$$

olarak hesaplanmıştır.

Plazma ile azot kaplanmış numuneye etki eden sürtünme kuvveti (2) ve (5) numaralı ifadelerden yararlanılarak sürtünme kuvveti (F_{S2}) için:

$$\begin{aligned} F_{K2} &= F_{T2} - F_d \\ F_{K2} &= 1,176 - 0,483 \\ F_{K2} &= 0,693 \text{ N} \end{aligned} \quad (10)$$

olarak hesaplanmıştır.

Yatay bir düzlemde sürtünen iki cisim arasındaki sürtünmede sürtünme kuvveti ile sürtünme katsayısı ve F_n normal kuvvet arasındaki;

$$f_k = \mu_k \times F_n \quad (5)$$

genel denklemden yararlanılarak;

$$\mu_k = f_k / F_n \quad (6)$$

denkleminde (10) eşitliği ile verilen sürtünme kuvveti ve normal kuvvet (yük) F_n değerleri yazılarak

$$\mu_{k2} = 0,693 \text{ N} / 10 \text{ N} \quad (11)$$

Islak gömlekleli içten yanmalı Renault marka bir otomobil motoru silindir gömleğinden alınan ve plazma ile azot kaplanmış numunenin sürtünme katsayısı

$$\mu_{k2} = 0,069 \quad (12)$$

olarak hesaplanmıştır.

6.3.3. Deneysel Sonuçların Değerlendirilmesi

Islak gömlekleli içten yanmalı Renault marka bir otomobil motoru silindir gömleğinden alınmış kaplanmamış ve plazma ile azot kaplanmış numunelerin sürtünme katsayıları sırasıyla;

$$\mu_{k1} = 0,077$$

$$\mu_{k2} = 0,069$$

olarak hesaplanmıştır.

Her iki ölüm için tüm deney koşulları birebir aynı olarak gerçekleştirilmiştir. Sürtünme sürecindeki iki numune arasındaki tek fark ikinci numunenin Deney I' de verilen plazma yöntemi ile azotla kaplanmış olmasıdır.

Elde edilen ölüm değerlerine göre plazma yöntemi ile azot kaplaması yapılan numunenin sürtünme katsayısı yaklaşık %10,5 azaltılmıştır. Yani sürtünmeye karşı direnci %10,5 oranında arttırılmıştır.

7. KARŞILAŞTIRMA ÖLÇÜMLERİ

Bölüm 6.3.2’ de ölçülen sürtünme katsayısı değerleri karşılaştırma yapmak üzere şekil 7.1’ de fotoğrafı verilen CSM Tribometer cihazı ile tekrar ölçülmüştür.



Şekil 7.1 CSM-Tribometer cihazının fotoğrafı

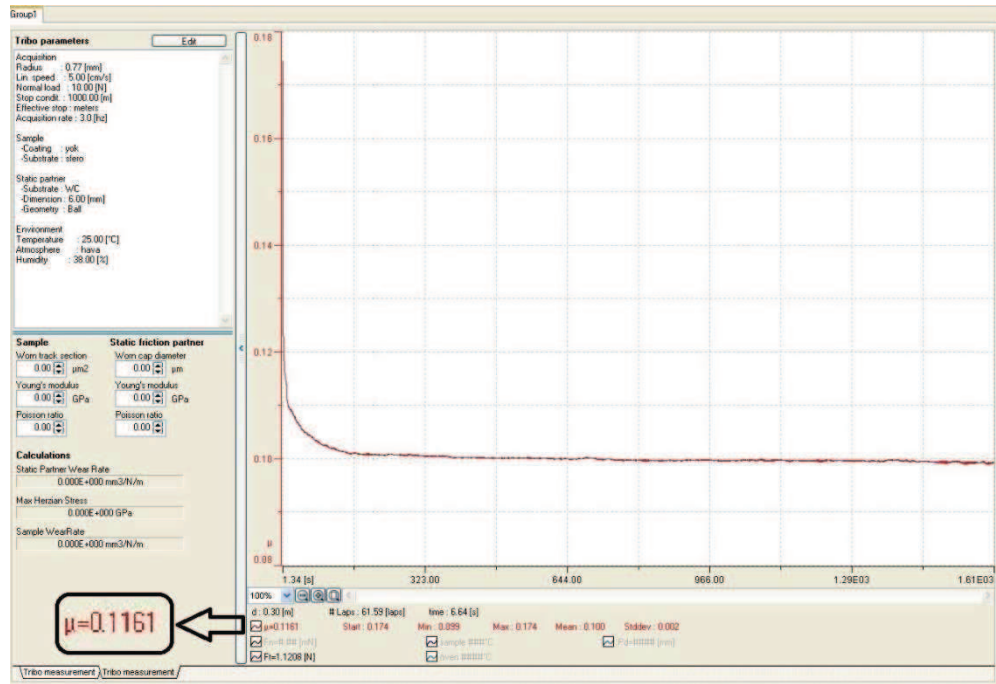
7.1 CSM Tribometer Marka Tam Otomatik Ölçüm Cihazındaki Test Sonuçları

Pim disk aşınma yapabilen maksimum sürtünme kuvveti 10 N, normal yükü 60 N, maksimum disk çapı 60 mm, maksimum devir 600 rpm, sürtünme katsayısı grafiğini çizebilen bilgisayar kontrollü aşınma cihazı ile ıslak gömleklili içten yanmalı Renault marka bir otomobil motoru silindir gömleğinden alınmış kaplanmamış numunenin sürtünme katsayısı (μ_{K1}^1) değeri ile plazma ile azot kaplanmış numunenin sürtünme katsayısı (μ_{K2}^1) değeri:

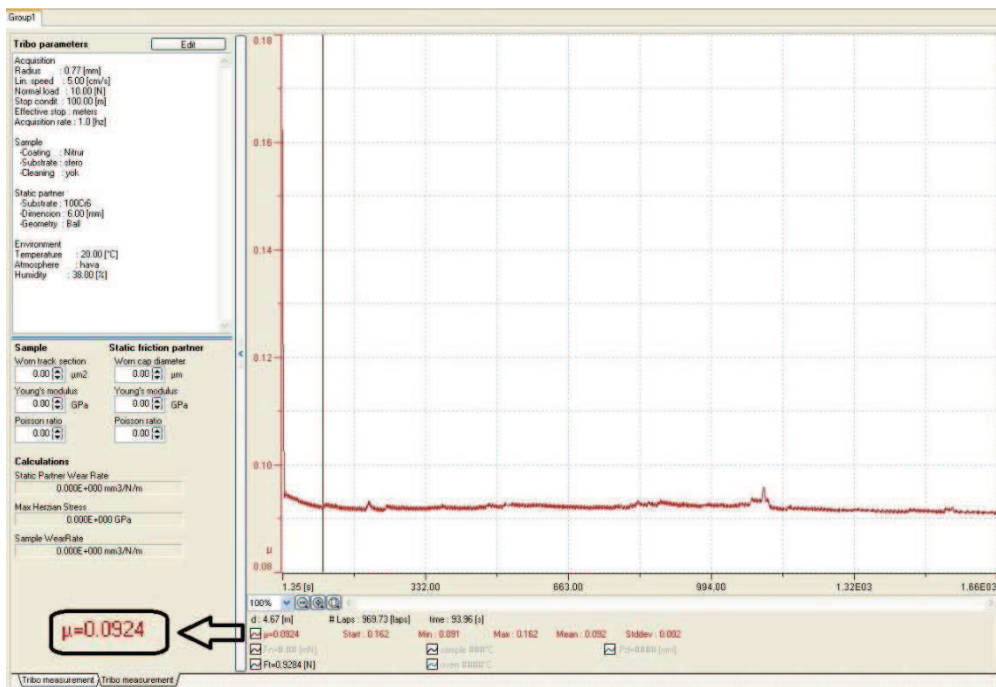
$$\mu_{K1}^1 = 0,1161$$

$$\mu_{K2}^1 = 0,0924$$

olarak ölçülmüşlerdir. Tam otomatik bilgisayar çıktısı olarak alınan bu ölçüm sonuçları şekil 7.2 ve şekil 7.3’ de grafikleriyle birlikte verilmektedir.



Şekil 7.2 Kaplanmamış numunenin CSM Tribometer marka tam otomatik ölçüm cihazından alınan sürtünme katsayısı (μ_{K1}) değeri



Şekil 7.3 Kaplanmış numunenin CSM Tribometer marka tam otomatik ölçüm cihazından alınan sürtünme katsayısı (μ_{K2}) değeri

7.2 Sürtünme Katsayısı Değerlerinin Karşılaştırılması

Her iki numune için her iki test cihazı ile ölçülen sürtünme katsayıları (μ_{K1} , μ_{K2} , μ_{K1}^1 , μ_{K2}^1) değerleri tablo 7.1' de verilmiştir.

Tablo 7.1 Yarı triboçift test cihazı ve CSM Tribometer marka model test cihazından alınan sürtünme katsayılarının karşılaştırma tablosu

Ölçüm Alınan Sistem	Kaplamasız Numunenin Sürtünme Katsayısı	Kaplanmış Numunenin Sürtünme Katsayısı
İmalatı Yapılan Yarı Tribo Çift Test Cihazı	$\mu_{K1} = 0,077$	$\mu_{K2} = 0,069$
CSM Tribometer Marka Model Test Cihazı	$\mu_{K1}^1 = 0,116$	$\mu_{K2}^1 = 0,092$

Bu değerler karşılaştırılmak üzere incelenirse şu belirleme yapılabilir:

Her iki sistemde de kaplanmış numunelerin sürtünme katsayıları değerleri kaplanmamış numunelerin sürtünme katsayı değerlerinden düşük bulunmuştur. Bu bulgu teorik çalışmalar ile tamamen uyum içerisindedir.

Yapılan çalışmalar ve incelemelerin sonucunda farklı değerlerin bulunmasının nedenleri olarak;

1. CSM Tribometer cihazının sürtünme işlemini dairesel bir yörüngede gerçekleştiriyor olmasına karşılık imal edilen sürtünme katsayısı ölçüm cihazının ise doğrusal bir yörüngede sürtünme yapıyor olması,
2. İmalatını yaptığımız ölçüm cihazının kalibre edilmemiş olması,
3. İmalatını yaptığımız ölçüm cihazının farklı görülemeyen bazı hata değerleri taşıyor olması,
4. Her iki ölçüm sisteminin aynı koşullarda çalıştırılmamış olması,

söylenbilir. Ölçüm sisteminin yapısından kaynaklanan sürtünme kuvverlerinin azaltılması ve kalibre edilmesi gibi iyileştirmelere açık olduğu ifade edilebilir.

8. SONUÇ

Bu tez çalışmasında deneysel çalışmalar sürecinin bir gereği olarak öncelikle bir sürtünme ve aşınma test cihazı tasarlanmış ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Bu test cihazı ile alınan ölçüm sonuçlarının literatür değerleri ile uyumlu olması yanı sıra tam otomatik hata yüzdesi çok düşük bir test cihazı ile de yaklaşık değerler veriyor olması imal edilen test cihazının kullanılabilir bir test cihazı olduğunu göstermektedir.

Deneysel çalışmada kullanılmak üzere modifiye edilen TVA sistemi ile azot kaplanmasının ilk defa yapılan bir çalışma olması ve uygun sonuçlar elde edilmesi, sistemin bu amaçlarla kullanılabilir olduğunu göstermiştir.

Bölüm 6.3.3' de belirtildiği gibi plazma yöntemi ile azot kaplaması yapılan ıslak gömleklili içten yanmalı Renault marka bir otomobil motoru silindir gömleğinden alınmış numunenin sürtünme katsayısı yaklaşık %10,5 azaltılmıştır. Sürtünme katsayısındaki bu azalma, ele alınan numunede, sürtünmeye karşı bir malzeme iyileştirmesinin gerçekleştirilebileceğinin bir göstergesidir. İyileştirme oranının yeterliliği ve artırılması bundan böyle yapılacak yeni araştırma ve geliştirme çalışmalarının konusu olacaktır.

Kaplanmış ve kaplanmamış deney numunelerinin XRD ölçüm sonuçları incelendiğinde, kaplanmış numunede azotun demire bağlandığı görülmektedir. Bu bağlanmanın malzeme iyileştirilmesi için yeterli olup olmadığı veya daha fazla bir iyileştirmenin bu yöntem ile nasıl gerçekleştirilebileceği ileri düzeyde yapılacak tribolojik çalışmalarla mümkün olabilir. Yapılan bu çalışma, kullanılan ve imal edilen cihaz ve sistemlerin bir iyileştirme için kullanılabileceğini göstermiştir.

9. KAYNAKLAR DİZİNİ

- Akbulut H., 2007, Malzemelerin Sürtünme ve Aşınma Davranışları Ders Notları.
- Akkurt M., 1982, Makine Elemanları, İkinci Cilt, İ.T.Ü. Maçka Makine Fakültesi.
- Arman Ö., 2005, Pulsu Plazma Kullanarak Metal Yüzeylerin İşlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 81 s.
- Aydın Ö., 2006, Plazma görüntü paneli, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 91 s.
- Baranowska, J., Szczecinski, K. and Wysiecki, M., 2001, Cathode sputtering as a pretreatment for gas nitriding, Vacuum, 63, 517-522.
- Bhushan, B. (Editor) , 2001, Modern Tribology Handbook, CRC Press LLC (pdf form), Ch. 13,1-18p., Ch.7,1-28 p.
- Çelik, A., Alsarar, A., Karakan, M., 2002, Plazma İle Termokimyasal Yüzey İşlemleri, Mühendis ve Makine, Sayı:510.
- Çelik A., Alsarar A. ve Karakan M., 2004, Plazma ile Termokimyasal Yüzey İşlemleri, Atatürk Üniversitesi.
- Demirci A.H., 1982, Ötektoidaltı Alaşımız Çeliklerin Isıl İşlemlere Bağlı Olarak Aşınma Davranışlarının incelenmesi ve Optimizasyonu, Doçentlik Çalışması, E. Ü. Makine Fakültesi, 8-10,12,15,17-21,28,30,44.
- Ekem N., 2000, Plazma Fizigi Ders Notları, Fizik Bölümü – Osmangazi Üniversitesi.
- Epik Ö., Epik H., Sever K. ve Karadeniz S., 2004, İyon İmplantasyonu ile Metal Yüzeyi Islahı, 2. Uluslararası Parçacık Hızlandırıcıları ve Uygulamaları Kongresi, TAEK.
- Gedikli H., 2000, Metal Şekillendirme İşlemlerinde Sürtünme Katsayısının Deneysel ve Sayısal Yöntemlerle Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, 101 s.
- Giancoli D.C., 2007, Fen Bilimcileri ve Mühendisler için Fizik, 113-115.
- Grill, A., 1993, Cold Plasma in Materials Fabrication, From Fundamentals To Applications, IBM Research Center Yorktown Heights.
- Gülseven, Y., 2004, Glow Deşarjın Radyal Optik Emisyon Spektroskopisinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 126 s.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- Hazar, H. ve Öner, C., 2007, CrN Kaplamanın Dizel Motor Silindir Gömleği Aşınmasına Etkisi, Mühendis ve Makine, Cilt:48, Sayı:575.
- Hutchings, I.M., 1992, Tribology, Friction and Wear of Engineering Materials.
- Karadeniz, S., 1990, Plazma Tekniği, TMMOB, Ankara.
- Karamış, M. B., 1985, Toprak İşleme Aletlerinde İş Organının Aşınmasının Etüdü, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, F.B.E.
- Koç R., 2010, Bilgisayar Kontrollü Aşınma Test Cihaz Tasarımı ve İmalatı, 2. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi Balıkesir, 129-37.
- Kop, T.A., Sietsma, J. and Zwaag, S. V., 2002, The influence of nitrogen on the austenite/ferrite interface mobility in Fe-Lat. % Si, Materials Science and Engineering A, 323, 403-408.
- Korkut, M.H., 1997, Ferritik paslanmaz çeliklerin mikroyapısı ve aşınması üzerine karbur yapıcı elementlerin etkilerinin araştırılması, Fırat Üniversitesi, FBE, Doktora Tezi, Elazığ, 127 s.
- Kuzucu, V., Aksoy, M., Korkut, M.H. and Yildirim, M.M., 1997, The effect of niobium on the microstructure of ferritic stainless steel, Materials Science and Engineering A 230, 75-80.
- Odabaş, D., Topal E.S., 1995, 100Cr6 Çeliginin İki Cisimli Abrasif Aşınma Davranışının Kuru veya Sıvı Sürtünme Şartlarında Deneysel Araştırılması, PA.Ü., Mühendislik Fakültesi, 6. Denizli Malzeme Sempozyumu, 396-405.
- Oğuz, B., 1993, Aşınma Sorunları ve Dolgu Kaynakları, Oerlikon Yayını, 11s.
- Onaran, K., 1992, Malzeme bilimi, Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul, 383 s.
- Özdemir, U. ve Erten, M., 2003, Plazma (iyon) Nitrürleme Yöntemi ve Malzeme Özellikleri Üzerindeki Etkisi, Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi, Cilt 1, Sayı 2, 41-48.
- Saklakoğlu, İ.E. ve Saklakoğlu, N., 2004, Plazma İyon Aşılama Yöntemi, Genel Prensipleri ve Uygulama Alanları, Mühendis ve Makine, sayı:528.
- Schneider, R. S. E. and Hiebler, H., 1998, Influence of increased nitriding temperatures on the hardness profile of low-alloy steels, Journal of Materials Science, 33, 1737-1744.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- Stachowiak, G. W. and Batchelor, A. W., 2000, Engineering Tribology (2nd ed.), Publisher Butterworth Heinemann, 430-440, 769 p.
- Soydan Y. ve Ulukan L., 1988, Sürtünme ve Aşınma Direnci Ölçme Yöntemleri, 8. Uluslararası Makine Tasarım ve İmalat Kongresi, ODTÜ, 581-588.
- Ulutan, M., 2007, AISI 4140 Çeliğinin Yüzey Sertleştirme İşlemleri Ve Kaplama Yöntemleri Sonrası Mekanik Davranışlarının Araştırılması, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 289 s.
- Ülker, Ş., 2006, Puls Nitrüleme Cihazının Tasarımı ve AISI 52100 Çeliğinin Plazma Nitrülenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Afyonkarahisar Kocatepe Üniversitesi, Makine Eğitimi Ana Bilim Dalı, 68 s.
- Ünlü, B.S., Paralı, L. ve Pinar, A.M., 2009, Pim-disk, Pim-plate, Pim-ring, Mil-yatak Aşınma Deney Cihazı Tasarımı ve İmalatı, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), Karabük, Türkiye.
- Yıldırım, M.M., Buytoz, S. and Ulutan, M., 2007, Mikrostrukturelle Änderungen an SiC beschichteten und mit WIGSchweistechnik erzeugten Metalloberflächen eines 45Mn5 Stahls, Prakt. Metallogr., 44-2, 59-69.
- Young, H. D. ve Freedman, R.A., 2008, Sears ve Zeamansky'nin Üniversite Fiziği , 12. Baskı, Cilt:1, 149-155.
- Zumgahr, K. H., 1987, Microstructure and Wear of Materials, Tribology Series, Vol. 10, Elsevier, p. 560.