

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

**SERAMİK KAPLANMIŞ BİR DİZEL MOTORUNDA BİYODİZEL
KULLANIMININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Uğur ÖZTÜRK

**Anabilim Dalı : Makine Eğitimi
Programı : Otomotiv**

OCAK 2010

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

**SERAMİK KAPLANMIŞ BİR DİZEL MOTORUNDA BİYODİZEL
KULLANIMININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Uğur ÖZTÜRK

07119102

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 04 Ocak 2010
Tezin Savunulduğu Tarih : 20 Ocak 2010**

**Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Hanbey HAZAR
Diğer Jüri Üyeleri : Yrd. Doç. Dr. Halit Lütfi YÜCEL
Yrd. Doç. Dr. Cumali İLKILIÇ**

OCAK 2010

ÖNSÖZ

Tez çalışmam boyunca, deneysel çalışmalarımın her aşamasında sahip olduğu tecrübeleri, bilgi birikimini benimle paylaşan ve yol gösteren değerli hocam Yrd.Doç.Dr. Hanbey HAZAR'a yaptığı tüm katkılarından dolayı teşekkür ederim. Ayrıca değerli arkadaşım Uzman Korhan KAYIŞLI'ya da tecrübelerini benimle paylaştığı ve her konuda yardımına koştuğu için şükranlarımı sunarım. Değerli eşim Yasemin ÖZTÜRK'e ve aileme her konuda yanımda oldukları için teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Uğur ÖZTÜRK

ELAZIĞ-2010

İÇİNDEKİLER

Sayfa No.

ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET.....	VII
SUMMARY.....	VIII
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	IX
TABLolar LİSTESİ.....	XI
SEMBOLLER LİSTESİ.....	XII
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Yüzey Modifikasyon Yöntemleri.....	3
1.1.1. Eritme Yöntemleri.....	3
1.1.2. Elektro Kimyasal Yöntemler.....	3
1.1.3. Kimyasal Yöntemler.....	3
1.1.4. Termokimyasal Yöntemler.....	3
1.1.5. Mekaniksel Yöntemler.....	4
1.1.6. Dönüşüm Sertleşmesi Yöntemleri.....	4
1.1.7. Buhar Fazı Yöntemleri.....	4
1.1.8. Termal Spreyleme Yöntemleri.....	4
1.2. Termal Spreyleme Yöntemine Genel Bakış.....	5
1.2.1. Termal Spreyleme İşleminin Tarihi Gelişimi.....	6
1.2.2. Termal Spreyle Kaplanmış Yüzeylerin Yapısal Özellikleri.....	7
1.2.2.1. Bağlanma Bonding).....	8
1.2.2.2. Mikro Yapısal Özellikler.....	8
1.2.2.3. Gerilme Kuvveti.....	9
1.2.3. Termal Sprey Teknolojisinde Kullanılan Kaplama Tozları ve Özellikleri.....	10
1.2.4. Termal Spreyleme İşleminde Kullanılan Malzemeler.....	11
1.2.4.1. Tek Fazlı Malzemeler.....	11
1.2.5. Toz Tane Boyutu.....	12
1.2.6. Termal Sprey İşlem Teknikleri.....	13

	<u>Sayfa No.</u>
1.3. Plazma Arkla Spreyleme Yöntemi.....	17
1.3.1. Plazma Sprey İşlemlerinin Sınıflandırılması.....	18
1.3.2. Plazma Sprey İşleminde Tabaka Oluşumu ve Kaplama Karakteristikleri.....	19
1.3.2.1. Mikroyapı özellikleri.....	19
1.3.2.2. Bağ Mukavemeti (Yapışma Mukavemeti).....	20
1.3.2.3. Porozite.....	20
1.3.2.4. Sertlik Değeri.....	20
1.3.2.5. Aşınma Direnci.....	21
1.3.3. Plazma Sprey Kaplama Sistemi.....	21
1.3.3.1. Güç Ünitesi.....	22
1.3.3.2. Gaz Besleme Ünitesi ve Plazma Gazları.....	22
1.3.3.3. Toz Besleme Ünitesi.....	23
1.3.3.4. Plazma Sprey Tabancası.....	23
1.3.4. Plazma Spreyde Proses Parametreleri.....	24
1.3.5. Isıl Püskürtme İşleminde Kaplama Prosedürü.....	25
1.3.5.1. Yüzey Hazırlama.....	25
1.3.5.2. Solvent Temizleme.....	25
1.3.5.3. Kumlama.....	26
1.3.5.4. Maskeleme.....	26
1.3.6. Kaplama Yöntemi ve Kaplama Malzemesi Seçimi.....	26
1.3.7. Plazma Püskürtme ile Kaplama Yöntemlerinin Avantajları.....	26
1.4. İçten Yanmalı Motorlarda Plazma Ark Spreyleme Yöntemi Uygulamaları ve Düşük Isı Kayıplı Motorlar.....	27
1.4.1. DIKM' lar Üzerine Yapılan Deneysel Araştırmalar.....	28
1.4.2. Yanma Olayında İzolasyonun Etkisi.....	30
1.4.3. Motor Performansında İzolasyonun Etkisi.....	31
1.4.3.1. Volumetrik Verim.....	31
1.4.3.2. Termal Verim.....	31
1.4.3.3. Yakıt Tüketimi.....	31
1.4.3.4. Püskürtme Karakteristiklerinin DIKM ların Performansına Etkisi.....	32

	<u>Sayfa No.</u>
1.4.4. İzolasyonun Emisyon Üzerindeki Etkileri.....	32
1.4.4.1. Yanmamış Hidrokarbonlar (UBHC).....	32
1.4.4.2. Karbonmonoksit (CO).....	33
1.4.4.3. Nitrojenoksitler (NOx).....	33
1.4.4.4. İs ve Partikül.....	33
1.4.5. Termal Bariyer Kaplamalar.....	34
1.4.6. Ses-Gürültü.....	35
1.4.7. DIKM lar ve Yakıt Çeşitliliği.....	35
1.5. Biyodizel.....	36
1.5.1. Biyodizel Teknik Özellikler.....	37
1.5.1.1. Yoğunluk.....	37
1.5.1.2. Parlama Noktası.....	38
1.5.1.3. Kalori Değeri.....	39
1.5.1.4. Kinematik Viskozite.....	39
1.5.1.5. Soğukta Filtre Tıkanması.....	41
1.5.1.6. Soğukta Akış Özelliği	41
1.5.1.7. Setan Sayısı	42
1.5.1.8. Karbon Artığı	42
1.5.1.9. İyot Sayısı	42
1.5.1.10. Kükürt İçeriği	42
1.5.1.11. Su İçeriği	43
1.5.1.12. Depolama ve Taşıma	44
1.5.2. Biyodizel Uluslararası Standartları	45
1.5.3. Biyodizel Üretimi	47
1.5.3.1. Tüketici Ölçekli Biyodizel Üretim Sistemi.....	48
1.5.3.2. Transesterifikasyon.....	48
1.5.3.3. Alkol.....	49
1.5.3.4. Katalizör.....	49
1.5.4. Biyodizel Üretimi İşlem Basamakları.....	50
1.5.4.1. Alkol ve Katalizörün Karıştırılması.....	50
1.5.4.2. Reaksiyon.....	50

	<u>Sayfa No.</u>
1.5.4.3. Ayırma.....	50
1.5.4.4. Alkolün Uzaklaştırılması.....	50
1.5.4.5. Gliserin Nötralizasyonu.....	51
1.5.4.6. Metil Ester Yıkama İşlemi.....	51
1.5.5. Biyodizel ve Petrodizelin Karşılaştırılması.....	51
2. MATERYAL ve METOD.....	53
3. BULGULAR.....	60
3.1. Performans.....	60
3.2. Egzoz Emisyonları.....	63
3.3. Çalışma Sonrası Yüzeylerin Mikroyapı Analizleri.....	67
4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA.....	71
5. ÖNERİLER.....	74
KAYNAKLAR.....	75
ÖZGEÇMİŞ.....	80

ÖZET

Günümüzde petrol fiyatlarındaki artış, sınırlı fosil yakıt kaynakları, global ısınma ve çevreyi korumaya yönelik düşünceler göz önüne alındığında dikkatler metil ester yakıtlar üzerine yoğunlaşmaktadır. Metil ester yakıtlar, LHR (Low Heat Rejection) diye adlandırılan düşük ısı kayıplı motorlarda verimli bir şekilde kullanılabilir. LHR motorları; yanma odası elemanlarının termal bir bariyerle kaplanarak yanma odası sıcaklığının artırılması prensibine dayalı çalışan motorlardır. Bu çalışmada piston, silindir kafası, egzoz ve emme supapları seramik bir malzeme olan $Al_2O_3-TiO_2$ (87-13) ile plazma sprey yöntemi kullanılarak kaplanmıştır. Bu kaplama neticesinde yanma odası elemanlarına termal bariyer özellik kazandırılmıştır. Transesterifikasyon yöntemi kullanılarak elde edilen mısır yağı metil ester ve D2 yakıtları önce kaplanmamış daha sonra kaplanmış motorda aynı şartlar altında test edilerek performans ve egzoz emisyon değerleri ölçülmüştür. Tüm test yakıtları için, kaplanmış motor, kaplanmamış motorla karşılaştırıldığında; kaplanmış motorun gücünde ve özgül yakıt tüketiminde düşüş, egzoz gaz emisyonlarında NO_x hariç belirgin bir iyileşme tespit edilmiştir

Anahtar kelimeler: Dizel Motor, LHR, Metil Ester, Egzoz Emisyonları, Plazma Sprey

SUMMARY

An Experimental Investigation of Using Biodiesel Fuel on a Ceramic Coated Diesel Engine

Today, the methyl ester fuels have been taken under focus as a results of the increasing of the oil prices, limited fossil fuel resources, environmental considerations and global warming. Methyl ester fuels can be used more efficiently in the engines with called (low heat rejection) as LHR based on the principle of increasing combustion chamber temperature due to coating thermal barrier. In this study, the piston, cylinder head, exhaust and inlet valves of a diesel engine were coated with the ceramic material $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ by the plasma spray method. Thus, a thermal barrier was provided for the parts of the combustion chamber with these coatings. The effects of corn oil methyl ester that produced by the transesterification method, and No. D2 fuels' performance and exhaust emissions' rate were studied by using equal in every respect coated and uncoated engines. Tests were performed on the uncoated engine, and then repeated on the coated engine and the results were compared. A decrease in engine power and specific fuel consumption, as well as significant improvements in exhaust gas emissions (except NO_x), were observed for all test fuels used in the coated engine compared with that of the uncoated engine.

Keywords: Diesel engine; Low heat rejection engine; Methyl ester; Exhaust emissions, Plasma spray

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No.

Şekil 1.1.	Kaplama tane yapısı.....	9
Şekil 1.2.	Termal sprej teknolojilerinde kullanılan kaplama malzemeleri.....	10
Şekil 1.3.	Termal sprej yöntemine bağılı olarak kullanılan toz tane boyutu dağılımı	12
Şekil 1.4.	Termal sprej yöntemlerini sınıflandırma.....	13
Şekil 1.5.	Plazma sprej tabancasının kesiti ve plazma oluşumu.....	17
Şekil 1.6.	Plazma sprejin kaplama yöntemlerinin sınıflandırılması.....	19
Şekil 1.7.	Plazma sprej kaplama ünitesinin şematik gösterimi (Sulzer Metco).....	24
Şekil 1.8.	Plazma tabancası kesit.....	25
Şekil 1.9.	Termal plazma sprej prosesine etki eden parametreler.....	38
Şekil 1.10.	Petrodizele biyodizel eklenmesiyle yoğunluk değişimi.....	38
Şekil 1.11.	Biyodizel yoğunluk değerleri.....	38
Şekil 1.12.	Petrodizele biyodizel eklenmesiyle parlama noktası değişimi (ODTÜ Petrol araştırma merkezi biyodizel numune analiz sonuçları 2005- 2006).....	39
Şekil 1.13.	Biyodizel parlama noktası (ODTÜ petrol araştırma merkezibiyodizel numune analiz sonuçları 2005-2006).....	39
Şekil 1.14.	Biyodizel viskozite değerleri (ODTÜ petrol araştırma merkez biyodizel numune analiz sonuçları 2005-2006).....	40
Şekil 1.15.	Petrodizele biyodizel eklenmesiyle viskozite değişimi. (ODTÜ petrol araştırma merkezi biyodizel numune analiz sonuçları 2005-2006).....	40
Şekil 1.16.	Soğukta filtre tıkanma noktası (ODTÜ petrol araştırma merkez biyodizel numune analiz sonuçları 2005-2006).....	41
Şekil 1.17.	Biyodizel iyot sayısı (en fazla 120)(ODTÜ petrol araştırma merkezi biyodizel numune analiz sonuçları 2005-2006).....	42
Şekil 1.18.	Biyodizel kükürt içeriğı (en çok 10 mg/kg)(ODTÜ petrol araştırma merkezi biyodizel numune analiz sonuçları 2005-2006).....	43
Şekil 1.19.	Biyodizel su içeriğı (ODTÜ petrol araştırma merkezi biyodizel numune analiz sonuçları 2005-2006).....	44
Şekil 1.20.	Yakıt özelliklerini iyileştirme yöntemleri.....	47
Şekil 1.21	Transesterifikasyon işlemi.....	48
Şekil 2.1.	Deney düzeneğı.....	55

	<u>Sayfa No.</u>
Şekil 2.2. Deney düzeneği.....	57
Şekil 2.3. Plazma ark spreyleme cihazı.....	58
Şekil 2.4. Plazma ark spreyleme işleminin yapılışı.....	58
Şekil 2.5. Kaplama öncesi piston fotoğrafı.....	59
Şekil 2.6. Kaplama işlemi sonrası piston fotoğrafı.....	59
Şekil 3.1. Kaplama işlemi sonrası supap ve piston görüntüsü.....	60
Şekil 3.2. Kaplanmış motor (KM) ve kaplanmamış standart motorda(SM) kullanılan yakıt çeşidine göre özgül yakıt tüketim (SFC) değerleri.....	61
Şekil 3.3. Test yakıtlarının 2500 d/dk'da motor güç değişimleri.....	63
Şekil 3.4. Test yakıtlarının %50 yük durumundaki termal verim değerleri....	64
Şekil 3.5. Test yakıtlarının CO emisyon değişimleri.....	65
Şekil 3.6. Test yakıtlarının is emisyon değerleri.....	66
Şekil 3.7. Test yakıtlarının NOx emisyon değişimleri.....	67
Şekil 3.8. Test yakıtlarının gaz sıcaklık değişimleri.....	69
Şekil 3.9. Kaplanmış Pistonun Kesit Görüntüsü (100µm).....	70
Şekil3.10. Çalışma sonrası kaplanmış piston üst yüzeyinin SEM görüntüsü....	71

TABLOLAR LİSTESİ

	<u>Sayfa No:</u>
Tablo 1.1. Termal spre y işlemlerinin karşılaştırılması.....	14
Tablo 1.2. Endüstriyel sektörler e göre termal spre y işle mi uygulamaları.....	15
Tablo 1.3. Arzu edilen amaca göre termal spre y yöntemi kullanım alanları.....	16
Tablo 1.4. DIKM larla ilgili yapılan deneysel çalışmalar.....	29
Tablo 1.5. Seramik malzemelerin özellikleri.....	34
Tablo 1.6. Biyodizel için EN 14214 standartları.....	46
Tablo 1.7. Petrodizel ve biyodizelin yakıt özellikleri.....	52
Tablo 2.1. Kullanılan yakıtların fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	54
Tablo 2.2. Deneyde kullanılan diz el motora ait teknik özellikler.....	55
Tablo 2.3. Kaplama işleminde kullanılan plazma ark spre y parametreleri.....	57

SEMBOLLER ve KISALTMALAR

HVOF	: High Velocity Oksi Fuel
PVD	: Physical Vapor Deposition
CVD	: Chemical Vapor Deposition
VPS	: Vakum Plazma Sprey
DIKM	: Düşük Isı Kayıplı Motor
LHR	: Low Heat Rejection
HC	: Hidrokarbon
UBHC	: Unburned Hydrocarbon
CO	: Karbon Monoksit
NO_x	: Nitrojenoksit
SFC	: Specific Fuel Consumption
KM	: Kaplanmış Motor
SM	: Standart Motor
MYME	: Mısır Yağı Metil Esteri
(PSZ)	: Partial Stabilized Zirconia

1.GİRİŞ

Son yıllarda, içten yanmalı motorların yanma odası elemanları olarak adlandırılan piston, silindir, silindir gömleği, supaplar gibi parçaların yüzey karakteristiklerini modifiye ederek, güç ve performans artırma ve çevresel felaketlere sebep olan zararlı gazların doğaya salınımını azaltarak emisyon değerlerini düşürme, bilim insanlarının önemli bir çalışma alanını teşkil etmektedir.

Hızla gelişen teknoloji ve değişen dünya şartlarında arz talep döngüsü, kısıtlı olan hammadde ve fosil yakıt kaynaklarını tehlike altına sokmaktadır. Bu tehlikeli süreç bilim insanlarını mevcut kaynakları verimli bir şekilde kullanmaya yönelik çalışmalara ya da yeni/yenilenebilir ve temiz enerji kaynakları bulmaya yöneltmektedir.

Mevcut kaynakların idareli bir şekilde kullanılabilmesi için, tüketimi yapan araçlarda modifikasyon gerekli hale gelmektedir. Endüstride kullanılan ekipmanlar sahip oldukları yüzey karakteristikleri ile talep edilen ihtiyaçları tek başlarına karşılayamamakta dolayısıyla bu ekipmanların fiziksel veya kimyasal olarak yapısal değişimlere uğraması gerekmektedir. Bu noktada malzeme mühendisliğinin önemli bir dalı olan yüzey mühendisliği devreye girmekte ve talep edilen özelliklere sahip malzemelerin elde edilmesi kolaylaşmaktadır. Uygulanan yüzey modifikasyon işlemleriyle, mevcut malzemelerin servis ömürleri uzamakta, yüzey kalitesi artmakta, ağır çalışma şartlarına dayanıklı mühendislik malzemeleri ortaya çıkarılıp, ekonomik açıdan da verimlilik sağlanmaktadır.

İçten yanmalı motorların çalışma şartları düşünüldüğünde; özellikle yanma odası elemanlarının yüzeyinde yüksek sıcaklık, yüksek basınç, termal şok, düzensiz termal gerilimler, sürtünme, aşınma, asidik ortam, korozyon ortam gibi istenmeyen durumlar meydana gelmektedir. Bu durumlar ilerleyen tekrarlı süreçlerde, malzeme yüzeyinde deformasyon ve hasarlara sebep olarak yüzey kalitesini düşürmekte ve ilerleyen süreçlerde motorun etkin çalışmasını ve verimini azaltırken, kalitesiz bir yanma sonucu motordan atılan egzoz gazlarının emisyon değerlerinin yükselmesine neden olarak çevreye zarar verir hale gelmektedir. Bu noktada yüzey modifikasyonları, ortaya çıkan bu negatif etkileri engellemede yada gidermede en etkin çözüm yolu olarak görülmektedir.

Yüzey Mühendisliği, istenen özellikleri elde etmek ve mevcut ürünün de işlevliğini geliştirmek için, bir malzeme yada elemanın yüzey özelliklerini, metalürjik, mekanik ve kimyasal olarak veya bir kaplama ilavesi sağlayarak iyileştirmektir. Yüzey mühendisliği

geçmişten günümüze kadar elde edilen birikim neticesinde, bugün uçak sanayisinden biyomedikal uygulamalara, paketleme sanayinden sert kesici takım aletlerine kadar çok geniş bir sahada uygulama alanı bulmaktadır [1].

Katı malzeme yüzeyleri, dış ortamdan yada çevreden kaynaklanan bozunmalara uğrarlar. Bu bozunma şekilleri, kimyasal (tuzlar, çözeltiler), ısı (yüksek sıcaklık, doğrudan alev), atmosferik (nem, güneş ışığı) ve mekaniksel (titreşim, adezyon/yapışma) gibi tehlikeli süreçlerin korozyona, aşınmaya, yırtılmaya, çatlamaya ve tabakalar halinde kalkmaya sebep olması şeklinde ortaya çıkabilmektedir[2].

Malzemenin yüzey özelliklerini değiştirmeye yönelik her türlü işleme “yüzey işlemleri” ve bu amaçla kullanılan teknolojilere de “yüzey teknolojileri” denir [3]. Teknolojinin hızla ilerlemesiyle metalik malzemelerin herhangi bir işlem uygulanmadan göstermiş olduğu performansı, ağırlaşan şartlar altında yetersiz kalmaktadır. Malzeme Bilimi ve Mühendisliği bu gelişmelere paralel olarak hızla gelişerek, hem gelişen teknolojinin ihtiyacı olan malzemelerin üretilmesine imkân sağlamakta, hem de teknolojik alanlarda bazı yeniliklere öncülük etmektedir. Malzemelerin endüstride kullanılabilmesi için bazı yüzey özelliklerini bünyesinde taşıması gerekmektedir [4].

Yüzey teknolojilerindeki ana düşünce; altlık/tabana malzemesinin koruyuculuk değeri yüksek, ince ve fonksiyonel ilave bir katman ile korunmasıdır. Yüzey kaplama teknolojileri, yüzey modifikasyon ve kaplama teknikleri olmak üzere iki ana gruba ayrılabilir. Yüzey modifikasyon uygulamaları, iş parçası yüzeyinde dışa büyüyen bir tabakadan ziyade malzeme içine ametallerin impregne edilmesiyle veya klasik ısı işlem prosedürleri şeklindedir. Kaplama teknolojisi ise altlık yüzeyinde dışa büyüyen, kalın veya ince tabaka elde edilmesine imkan sağlayan bir çok alt grubu kapsamaktadır. En genel sınıflandırmayla bu yöntemler ince film üretimine olanak sağlayan buhar fazı teknikleri, solüsyonlu sistemler (elektrolitik) ve kalın kaplama üretiminin gerçekleştirilebildiği püskürtme sistemleridir. Prosesler, avantaj ve dezavantajlarıyla, malzemelerin kullanım alanına göre tercih edilmektedir[5].

1.1. Yüzey Modifikasyon Yöntemleri

Günümüz endüstrisinde malzemelerin yüzey özelliklerini geliştirmek, modifiye etmek ve istenilen yüzey kalitesini elde etmek için birçok teknolojik yöntem uygulanmaktadır. Bu yöntemleri aşağıdaki başlıklar altında sıralayabiliriz[6].

- Eritme Yöntemleri
- Termal Püskürtme Yöntemleri
- Elektro Kimyasal Yöntemler
- Kimyasal Yöntemler
- Termokimyasal Yöntemler
- Mekaniksel Yöntemler
- Dönüşüm Sertleşmesi Yöntemleri
- Buhar Fazı Yöntemleri

1.1.1. Eritme Yöntemleri

Metalik malzemenin yüzeyinde kendisine yakın yada daha üstün özelliklere sahip ilave bir malzemenin harici bir ısı kaynağı kullanarak eritilmesi ve hemen katılaştırılması ile bir kaplama tabakasının oluşturulması işlemidir

1.1.2. Elektrokimyasal Yöntemler

Metalik malzemenin yüzeyindeki oksit tabakasının elektro kimyasal olarak geliştirilmesiyle kendisinden daha üstün özelliklere sahip bir kaplama tabakasının oluşturulması işlemidir. Bu yönetime örnek olarak; elektrolitik sert krom kaplama ve Alüminyumun sert anodik oksidasyonu gösterilebilir.

1.1.3. Kimyasal Yöntemler

Metalik malzemenin yüzeyinde kimyasal olarak redükleyici etkisiyle kendisinden daha üstün özelliklere sahip bir kaplama tabakasının oluşturulması işlemidir. Akımsız nikel kaplama yöntemi bunlardan biridir.

1.1.4. Termokimyasal Yöntemler

Metalik malzemenin yüzeyinde difüzyon ile kendisinden daha üstün özelliklere sahip bir tabakanın oluşturulması işlemidir. Aşağıda termokimyasal yöntemlerden 6 tanesi görülmektedir.

- Borlama
- Karbürleme ve karbonitrileme
- Nitritleme ve nitrokarbürleme

- Plazma nitrürleme
- Termoreaktif difüzyon yöntemi
- İyon implantasyonu

1.1.5. Mekaniksel Yöntemler

Metalik malzemenin yüzeyinde kimyasal bileşimini değiştirmeksizin sadece mekaniksel bir işlemle kendisinden daha üstün özelliklere sahip bir tabakanın oluşturulması işlemi olup bilyalı dövme ve kumlama bu yöntemler arasındadır.

1.1.6. Dönüşüm Sertleşmesi Yöntemleri

Metalik malzemenin yüzeyinde kimyasal bileşimi değiştirmeksizin sadece mikro yapısal faz dönüşümüyle kendisinden daha üstün özelliklere sahip bir tabakanın oluşturulmasıdır ve aşağıdaki yöntemleri kapsamaktadır.

- Alevle ve indüksiyonla sertleştirme
- Elektron ve lazer ışınıyla sertleştirme

1.1.7. Buhar Fazı Yöntemleri

Metalik malzemenin yüzeyinde buhar fazındaki bir maddenin katı formda çöktürülmesi ile çok sert kaplamaların (ince filmlerin) elde edilmesi işlemidir. İki çeşit teknik bu yöntem için kullanılmaktadır.

- Fiziksel buhar biriktirme (PVD)
- Kimyasal buhar biriktirme(CVD)

1.1.8. Termal Spreyleme Yöntemleri

Bir ısı kaynağı kullanılarak malzeme yüzeyine kaplanacak malzemenin toz veya farklı bir formda püskürtülmesiyle elde edilen kaplama yöntemidir ve aşağıda belirtilen 9 yöntemle gerçekleştirilebilir. Her yöntemin kendine özgü parametreleri ve özellikleri vardır

- Alevle tel veya toz püskürtme
- Elektrik ark tel püskürtme
- Püskürtme ve eritme
- Elektrik ark plazma püskürtme

- Detanasyon (patlamalı) püskürtme
- Yüksek hızlı alevle püskürtme (HVOF)
- Soğuk püskürtme
- Lazer kaplama
- Sert tabaka dolgu kaynağı

1.2.Termal Sprey Yöntemine Genel Bakış

Termal sprej terimi metalik ve nanmetalik malzemelerle uygulanan kaplama işlemlerine verilen genel bir kavramdır. Termal spreyleme 3 temel kategoriye ayrılmaktadır. Bunlar; alev sprej, elektrik ark sprej ve plazma ark sprej yöntemleridir. Bu işlemlerde kullanılan enerji kaynakları, kaplama malzemesini ısıtarak eriyik veya yarı eriyik hale getirmektedir.Sonuç olarak ısıtılmış partiküller işlem gazları veya atomizasyon jetleriyle hızlandırılıp önceden hazırlanmış kaplama yüzeyine doğru itilir.Yüzeye çarpan partiküller birikerek lamelar yapı meydana getirir ve kalın bir kaplama tabakası oluştururlar[7].

Partiküller altlık malzemeye mekaniksel olarak yapışmakta olup, bazı durumlarda metalürjik olarak da yapışabilmektedir. Partikül hızı, altlığın pürüzlülüğü,partikül boyutu, malzeme kimyası,partikül sıcaklığı ve altlık sıcaklığı, kaplama malzemesinin bağ gerilimini direkt olarak etkilemektedir.

Termal spreyle kaplama işlemi ekonomik olması ve malzeme çeşitliliği gibi avantajları nedeniyle çok yönlü modern yüzey işlemlerinden birisi olarak kabul edilmektedir. Termal sprej işlemi yüksek performanslı malzemelerin farklı işlem geometrileri ve ölçülerinde 25 mm’den fazla kalınlığa kadar hızlı bir şekilde kaplanmasını sağlayan bir yöntem olup; piston segmanları, yataklar, konveyörler, transformatör kasaları, gemi gövdeleri, tanker gemilerin kompartımanları, asma köprüler gibi bir çok alanda kullanılmaktadır.Tüm termal sprej kaplama yöntemleri 3 temel işlem mekanizmasına dayanmaktadır[8]. Bunlar aşağıdaki gibi sıralanır;

1. Tel veya toz formunda olan kaplama malzemesinin ısıtarak ergimiş veya plastik hale getirilmesi
2. Isıtılmış malzemenin partikül şeklinde ileri doğru itilmesi
3. Kplama malzemesinin iş parçasının yüzeyine hızlı bir şekilde çarpması, katılaşması ve birbirine yapışması neticesinde yüzeyde yoğunlaşarak, koruyucu bir tabakanın oluşması

Termal spreyleme yöntemi ile aşınma ve korozyon indirgenmekte, düşük maliyete sahip ana malzeme üzerine yüksek performanslı kaplama malzemesi püskürtülerek, malzemenin servis ömrü uzamaktadır. Termal spreyl işleminin uygulanma sebepleri aşağıdaki gibi kategorize edilebilir[9].

- Aşınma direncine karşı
- Oksidasyon direncine karşı
- Korozyon direncine karşı
- Boyutsal restorasyon
- Çevresel aşınma kontrolü eldesi
- Termal bariyer oluşturma
- Elektriksel iletim veya direnç kazandırma
- Biyomedikal uygulamalar

Seçilecek termal spreyl metodunda ise aşağıdaki etkenler belirleyici olmaktadır;

- Talep edilen kaplama malzemesi
- Kaplamanın performans ihtiyaçları
- Ekonomikliği
- Maddi değer ve taşınabilirlik.

1.2.1.Termal Spreyleme İşleminin Tarihi Gelişimi

Termal spreyleme yöntemi ile ilgili ilk kayıtlar 1882-1889 arasında olup Zürih-İsviçre de M.U. Schoop tarafından patentleştirilmiştir. Bu ilk patentde, kurşun ve kalay tel beslemeli oksiasetlen kaynak torçları kullanılmıştır. Daha fazla metal çeşidinin kullanıldığı ilk elektrik ark spreyl de yine Schoop tarafından 1908 yılında patentleştirilmiştir. Çinkonun koruyucu bir kaplama tabakası olarak korozyona karşı kullanılması da bu işlemi önemli ölçüde tanınmasına sebep olmuş ve böylece metal kaplama endüstrisi ortaya çıkmıştır.

II. Dünya Savaşının öncesine kadar toz spreyleme ve plazma spreyleme teknolojisinde belirgin bir gelişme olmamıştır. Ancak savaş sonrasında birçok gelişme meydana gelmiş fakat temel kullanım prensipleri değişmemiştir. Daha sonraları yüksek hızlı jetlerin geliştirilmesiyle birlikte tozlar direkt olarak alev içerisine yanma ekipmanları vasıtasıyla beslenmeye başlamıştır. Bununla birlikte kullanılan hammadde çeşitliliğinde de belirgin bir artış meydana gelmiştir.İlk plazma spreyl kaplama işlemi ise Reineeke tarafından 1939

yılında yapılmıştır. Kaynak teknolojisinin gelişimiyle beraber plazma spreyleme yönteminde de önemli ilerlemeler olmuştur. Reineke'den kısa bir süre önce kapalı ark gaz ısıtıcı sistemler kullanılmaya başlanmış olup, bu sistemler sayesinde birleştirme ve kesme işlemleride yapılabilmektedir. Reineke, toz partiküllerinin plazma ark gaz ısıtıcıya enjekte edilerek yüksek sıcaklıkta eriyen partiküllerin yüzeye püskürtülmesi ile bir tabaka oluşabileceğini gösteren ilk kişi olmuştur. Plazma spreyleme işleminin yanma spreyleme işlemine göre avantajlarından en önemlisi, göze çarpan derecede yüksek işlem sıcaklığıdır. Tel ark spreyleme yöntemine göre önemli bir avantajı ise ısı kaynağından bağımsız malzeme besleme özelliğidir.

Uzay endüstrisinin ihtiyaçlarına paralel olarak birçok şirket, ileri teknoloji uygulamalarında bu kaplama yöntemini uygulamak için plazma ark ısıtıcılarını geliştirmişlerdir. Böylece, plazma spreyleme yöntemi 1970'lerde en çok kullanılan ileri teknoloji termal kaplama yöntemi haline gelmiştir. Başlangıçta 20-40 kW arasında güce sahip olan plazma spreyleme tabancaları günümüzde 250 kW güce kadar kullanılabilmektedir. Suda soğutma, elektrotlardaki gelişme ve yüksek ark voltajlarının kullanılmasıyla birlikte sistemin kesintisiz kullanımı mümkün hale gelmiştir. Plazma tabancalarında ki gaz çıkış hızının ses altı seviyelerden süpersonik seviyelere yükselmesiyle birlikte gaz akışı da hızlanmıştır. Partikül hızındaki artışa paralel olarak kaplamanın yoğunluğu ve bağlanma mukavemeti artmış ve özellikle plazma spreyleme kaplama yöntemi bu özellikleri sebebiyle havacılık ve biyomedikal kaplamalarda da kendisine geniş kullanım alanı bulmuştur. Termal spreyleme yöntemindeki araştırma geliştirme çalışmaları işlem kontrolü ve bilgisayar kontrollü konsollar, robotik işlemler, bilgisayar kontrollü hedef konsolları, gerçek zamanlı sensörler üzerine yoğunlaşmıştır[10].

1.2.2.Termal Spreyleme Kaplanmış Yüzeylerin Yapısal Özellikleri

Aşağıda genel olarak termal spreyleme kaplanmış yüzeylerin bağlanma (bonding), mikro yapısal özellikler ve gerilme kuvvetleri hakkında bilgi verilmiştir.

1.2.2.1.Bağlanma (Bonding)

Yüzeyde oluşturulan kaplamanın bağlanma mukavemeti; kaplama matrisinde meydana gelen artı gerilmelere, temas yüzeyindeki partiküllerin erimesine ve yerleşimine, Vander Vals kuvvetlerine ve mekaniksel olarak birbirine bağlanmasına bağlıdır.

Ölçülebilir bağlanma mukavemeti, kaplama içindeki artık gerilimler vasıtasıyla kontrol edilebilmektedir. Kaplama kusurları genellikle yüzey ve kaplama arasındaki ara yüzeyde meydana gelmektedir ve kaplamada oluşan adhesiv ve kohesiv kusurlar genellikle kaplamanın iç yapısındaki gerilimlerle alakalıdır.

Kaplanacak yüzeydeki oksitler, kirler veya yağlar çoğu zaman lokal bağlanmayı düşürücü veya engelleyici etkenler olarak karşımıza çıkmaktadır. Mekanik ve termal yükler altında çalışmanın güvenilirliğini, kaplamanın bağlanma derecesi belirlemektedir. Bu sebeple yüzey hazırlama, temizleme, pürüzlendirme işlemleri termal spreylemeden önce dikkat edilmesi gereken çok önemli adımlardır. Oluşan hataların büyük kısmı altlık dizaynını dikkate almamak, yanlış malzeme seçimi ve işlem basamaklarındaki eksik ve hatalardan meydana gelmektedir.

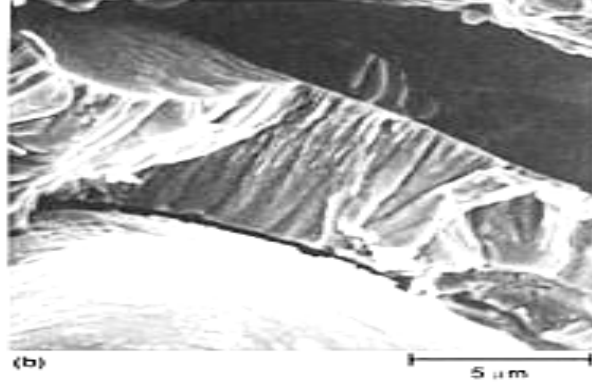
Spreyleme işleminde, altlıkla temas ederek yüzeyde biriken ilk tabaka katılaşır daha sonra gelen ikinci tabaka ise kaplamanın bağ tabakası yani kohezyon olarak adlandırılır. Basitçe kohezyon, splat partikülleri arasındaki yapışmadır ve kaplama mukavemetini büyük oranda kohesiv gerilimler belirler. Ayrıca porozite, oksit kalıntıları ve erimemiş partiküllerde kaplama mukavemetine etki eder[11].

1.2.2.2.Mikro Yapısal Özellikler

Termal spre yay kavramı, kimyasal (yanma) veya elektriksel (plazma veya ark) metotlar kullanarak üretilen termal enerjiyle, erimiş partiküllerin veya damlacıkların ortalama 50-1000 m/sn hızlandırılması işlemi olarak adlandırılmaktadır. Hızlanmış ve yüksek sıcaklığa ulaşmış partiküller yüzeye çarpmaları neticesinde belirgin bir deformasyona uğrayarak ince bir tabaka veya lamellae oluşturarak altlık yüzeyine yapışırlar. Sürekli akış neticesinde hızla katılan damlacıklar, yüzeyde bir tabaka oluşturur. Her bir damlacığın ortalama soğuma süresi $>10^{-6}$ K/sn dir. Bu hızlı akış ve soğuma neticesinde yüzeyde üniform,taneli ve polikristalli bir yapı meydana gelir[10].

Spreylenmiş tabaka; erimemiş veya kısmen erimiş partiküller, tam erimiş ve deformasyona uğramış splatlar, metastabil fazlar ve havadan gelen oksidasyon sebebiyle porozite içerebilir. Bu porozite ortalama %0-10 arasında olabilir. Termal spre kaplama işlemlerinde, porozite değerleri uygulanan spre yöntemi, partikül hızı ve dağılımına ve spre mesafesine bağlı olarak farklılık gösterebilir. Tribolojik sistemlerde porozite, kayganlaştırıcı yağ filmlerini koruması sebebiyle faydalı da olabilmektedir. Lamelar oksit tabakalarda, bazı oksit tabakaların kayganlık özelliği sebebiyle aşınma ve sürtünmeyi

düşürebilir. Termal spreycaplamaların bir diğer önemli özelliği de çok iyi tane yapısı ve sütun halinde olan oryantasyonudur ve bu yapı şekil.1.1 de görüldüğü gibidir.



Şekil1.1.Kaplama tane yapısı

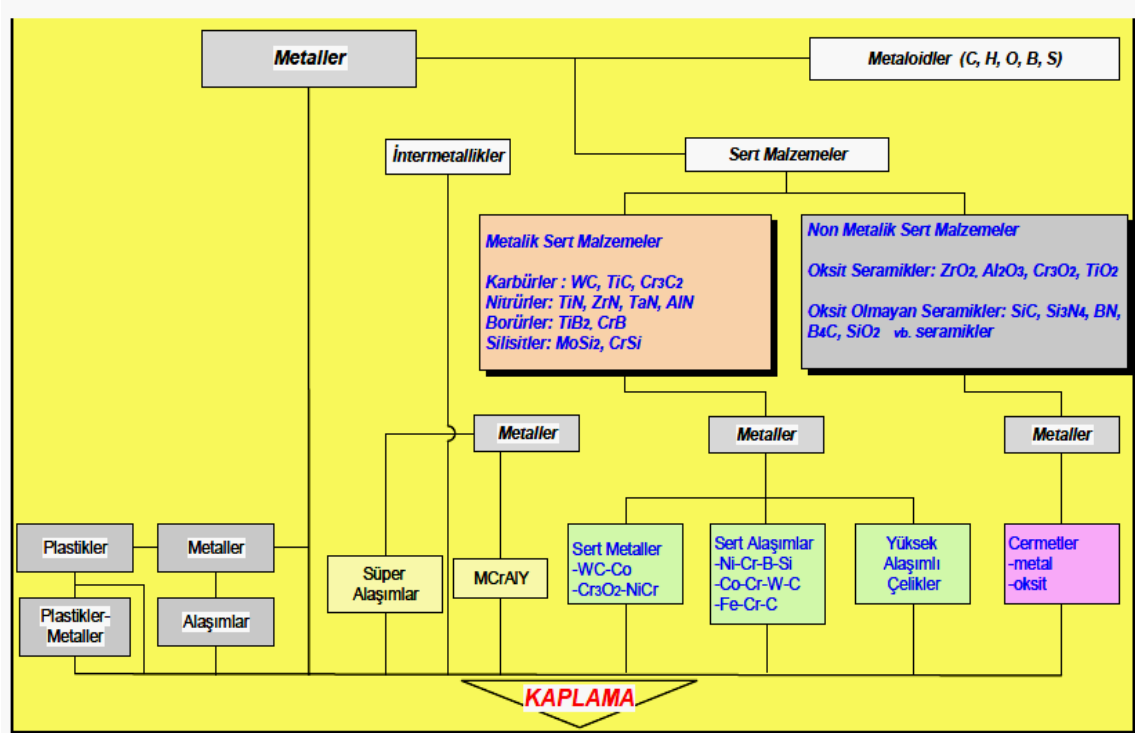
1.2.2.3.Gerilme Kuvveti

Spreylenmiş yüzeylerin gerilme kuvvetleri, döküm ve işlenmiş malzemelerde kullanılan spreyc yöntemine bağılı olarak %10-60 arasında değişmektedir. Yüksek oksit seviyeleri ve düşük kaplama yoğunluğuna sebep olan kaplama ortamları en düşük dayanımı ortaya çıkarmaktadır. Kontrollü atmosferle spreyleme işlemi kullanılarak %60 dayanım elde edilebilir. Yapışma ve birleşmeyi sınırlandıran en önemli faktör splatların hızlı soğuması sonucu oluşan artık gerilimdir. Biriken artık gerilimler kaplama kalınlığını da sınırlandırmaktadır[12].

Termal spreyc işleminin en önemli avantajı çok geniş çeşitlilikte malzemenin kaplama işlemi için kullanılabilmesidir. Eriyerek ayrıışmayan hemen hemen her malzeme kaplama işlemi için kullanılabilir. İkinci önemli avantajı ise tüm termal spreyc işlemlerinde uygulanılacak kaplama yüzeyine aşırı ısı girişinin olmamasıdır. Bu yüzden tungsten gibi çok yüksek erime noktasına sahip malzemelerle kaplanacak yüzeyler, termal gerilime uğramadan ve yüzey özellikleri değişmeden kaplanabilmektedir. Üçüncü önemli özelliği de kaplama yüzeyinin kaldırılmak istendiğinde yüzey özelliklerinde ve ölçülerinde herhangi değişim ve deformasyonun olmamasıdır. Bu işlemlerin dezavantajı ise görüş mesafesinin dar olmasıdır. Sadece torcun veya tabancanın görebileceğı alanlar kaplanabileceğinden ölçü sınırı da bulunmaktadır[13].

1.2.3. Termal Sprey Teknolojisinde Kullanılan Kaplama Tozları ve Özellikleri

Termal sprej teknolojisi yardımıyla kaplama uygulamalarında sınırsız bir malzeme grubu ile çalışmak mümkündür. Toz formunda üretilebilen ve süblime olmayan tüm malzemeler, plastikler, seramikler, karbürler ve metaller kaplama malzemesi olarak kullanılabilir. Şekil 1.2.'deki diyagramda kullanılan malzeme çeşitleri görülmektedir. Kaplama proseslerinde kullanılan tozlar farklı tane boyut dağılım aralığında ve morfolojide olabilir. Tozlardan beklenen en önemli özellikler; ergitme ortamına iyi beslenebilmesi (akışkanlık) ve homojen ergime davranışdır[14].



Şekil 1.2. Termal sprej teknolojilerinde kullanılan kaplama malzemeleri[15,16].

Termal sprej kaplamalarda, optimum tabaka özelliklerine amaca uygun proses ve malzeme seçimi ile ulaşılır. Kaplamanın yüzey kalitesi ve mikro yapı özelliği olan porozite, lamellar mikro yapı, kimyasal bileşim ve faz yapısı, özelliklere doğrudan etki etmektedir. Kaplama özellikleri; kullanılan toz özellikleri, sprej teknolojisi ve kaplama şartlarından etkilenir. Örneğin; plazma sprej teknolojisinde ergitmede kullanılan yüksek enerji yoğunluğu ve ergime noktası tozların kullanılmasına imkan sağlar. Buna karşılık HVOF teknolojisinde kullanılan tozlarda, toz boyutunda ciddi sınırlamalar söz konusudur. Kaplama prosesinde, ergitilen toz partiküllerinin süpersonik hızla yüzeye püskürtülmesi nedeniyle, partiküllerin çok kısa uçuş yörüngesinde ergimiş olması açısından önemlidir.

Toz boyutunun büyük olması yeterli ergime için zaman yok anlamına gelir ve bu durumda üretilen kaplama bünyesinde ergimemiş partiküllere rastlanabilir. Uygulamalarda seçilen HVOF yöntemine (kerosen, hidrojen veya propanlı sistem) bağlı olarak, toz seçiminde kaplanacak tozların ergime sıcaklığına da dikkat edilmelidir[14].

1.2.4.Termal Spreyleme İşleminde Kullanılan Malzemeler

Termal spreyleme işleminde 3 tip temel kaplama içeriği uygulanabilmekte olup bunlar;

1. Tek fazlı malzemeler (metaller,alaşımlar,intermetalikler,seramikler ve polimerler)
2. Kompozit malzemeler ($WC/Co, Cr_3C_2/NiCr, NiCrAlY/Al_2O_3$) destekli metal ve polimerler
3. Tabakalı fonksiyonel malzemelerdir.

1.2.4.1.Tek Fazlı Malzemeler

Metaller; Tungsten,Molibden, Rhenyum, Niobyum, süper alaşımlar, Çinko, Alüminyum,Bronz paslanmaz çelikler,NiCr alaşımları,Kobalt esaslı satelitler,Kobalt/Nikel esaslı alaşımlar NiCrBSi alaşımları gibi birçok saf metal ve metal alaşımları termal spreylenebilir malzemelerdir. Spreylenmiş alaşımlar, birçok metalin ihtiyacı olan yüksek dayanım, korozyon, aşınma ve oksidasyon direnci gibi avantajlara sahiptir. Bu tarz kaplamalar, otomotiv endüstrisinde silindir kaplamalarında, piston, valf kaplamalarında, türbin motor kanatçıklarında, petro kimyasal pompa ve vanalarda, aynı zamanda tarım ve madencilikte kullanılan ekipmanlarda uygulanmaktadır.

Seramikler; Metal oksitler (Al_2O_3), stabilize ZrO_2 , TiO_2 , Cr_2O_3 ve MgO , karbürler (Cr_2C_2, TiC, Mo_2C, SiC), Nitrürler (TiN, Si_3N_4) gibi seramik formlarının birçoğu termal spreylenebilir malzemelerdir. Bu malzemelerin spreylenecek tabaka oluşturması, malzeme yüzeyine; aşınma direnci ($Al_2O_3, Cr_2O_3, TiO_2, Cr_3C_2, TiC, Mo_2C, ve TiN$), termal koruma ($Al_2O_3, ZrO_2 ve MgO$), elektriksel yalıtım ($Al_2O_3, TiO_2 ve MgO$) ve korozyon direnci kazandırır. Seramikler plazma spreynin sahip olduğu yüksek sıcaklık kabiliyetinden dolayı, bu yöntem ile mükemmel bir şekilde kaplanabilmektedir.

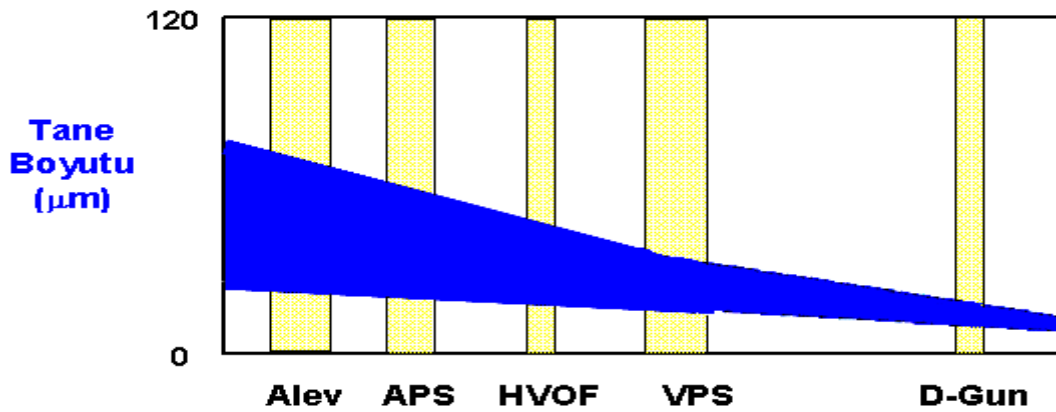
İntermetalikler; $TiAl, Ti_3Al, Ni_3Al, NiAl$ ve $MoSi_2$ gibi intermetalik malzemeler termal spreylenebilen malzemelerdir. İntermetaliklerin pek çoğu yüksek sıcaklıkta çok reaktif aynı zamanda oksidasyona karşı hassas oldukları için plazma spreyleme işlemi boyunca inert atmosferde kullanılması şarttır[12].

Polimerler; Partikül halinde bulunan polimerler de başarılı bir şekilde termal olarak spreylenebilmektedirler.1980'lerden beri polimerler ticari olarak spreyleme işleminde kullanılmaktadır ve giderek artan bir oranda üretan, etilen vinil alkol, nylon, politetraflorositilin, etilentetraflorotilin, polietherketon, polimetilmetakirilet, polimid, polikarbonat içeren termoplastik, termosetpolimerler spreylene işleminde kullanılmaktadır. Polimerler için konvansiyonel alev püskürtme ve HVOF en çok tercih edilen termal spray metotlarıdır.

Kompozit ve Sermet Malzemeler; Özellikle, fiber ve whisker takviyeli kompozitler birçok alanda kullanılmaktadır. Aşınma takviyeli-dayanıklı sermet kaplama eldesi için (WC/Co, $Cr_3C_2/NiCr$ ve $TiC/NiCr$) en çok tercih edilen malzemelerdir. Termal spray kompozit malzemeler %10-90 oranında takviye fazlar içerebilir.

1.2.5.Toz Tane Boyutu

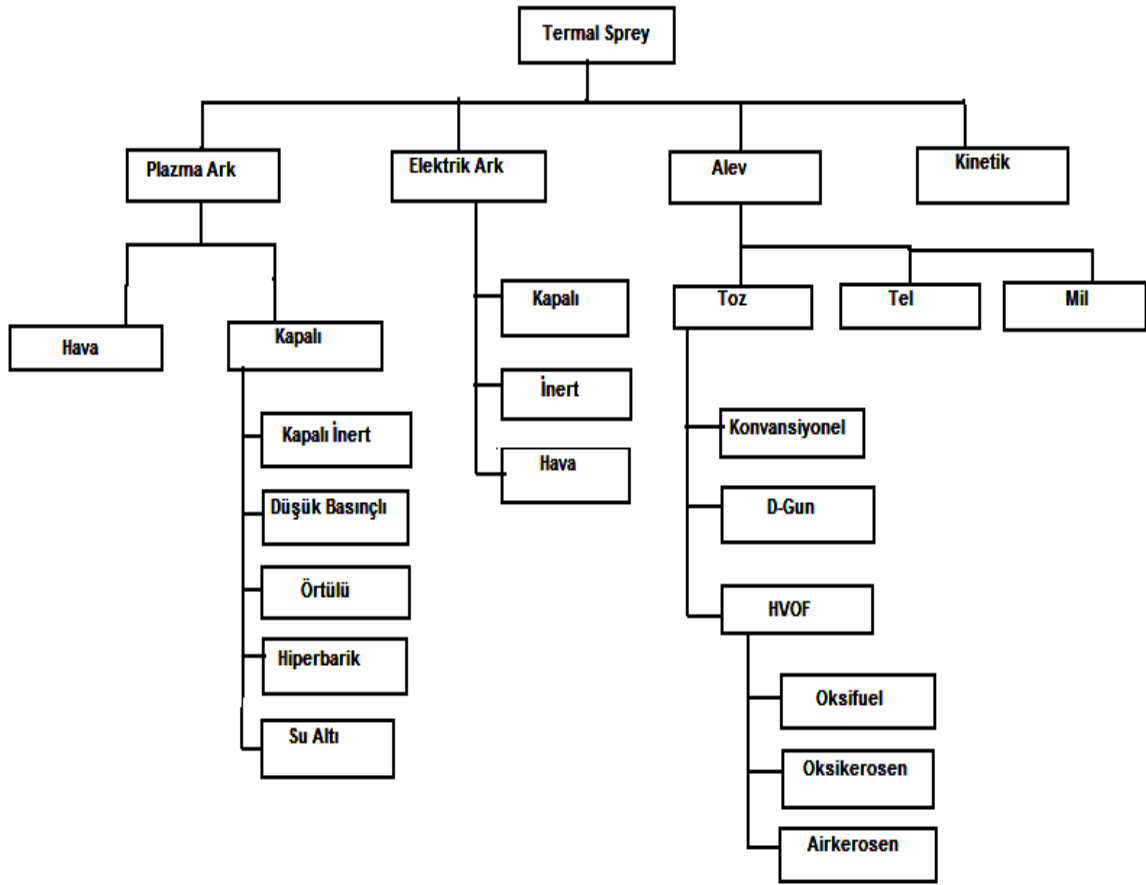
Kaplama uygulamalarında kullanılan tozun tane boyutu ve boyut dağılım aralığı en önemli parametrelerden biridir. Seçilen kaplama yöntemine bağlı olarak kullanılan tozun tane boyut dağılımı 5-120 μm arasında değişmektedir.Şekil 1.3.te toz tane boyut dağılımı görülmektedir. Genel kaide olarak 5 μm altındaki tozlar termal spray uygulamalarında kullanılmazlar. İnce boyutlu tozlar, toz besleme ünitesinin tıkanmasına veya arızalanmasına yol açabilir. Uygulamalarda kullanılan her kaplama yöntemi ve her toz için belirli bir tane boyut dağılım aralığına ihtiyaç duyulur. Toz boyut dağılımında genellikle alt ve üst limitler belirtilir. Tane boyutunun seçilen kaplama yöntemine uygun olmaması veya istenen limitlerin çok altında veya üzerinde olması kaplama üzerine olumsuz etki yapmaktadır. Tane boyutunun çok büyük olması, tozların yeterince ergimemesine çok küçük olması ise ergitme zonunun kötü beslenebilmesine yol açmaktadır [17-19].



Şekil 1.3.Termal spray yöntemine bağlı olarak kullanılan toz tane boyutu dağılımı [19].

1.2.6.Termal Sprey İşlem Teknikleri

Termal sprey işlemleri 3 temel gruba ayrılır. Bunlar; alev sprey, elektrik ark sprey ve plazma ark sprey işlemleridir. Ayrıca bunlarda kendi aralarında birçok alt sınıfa ayrılır. Bu sınıflandırma şekil 1.4. de görülmektedir. Soğuk sprey uygulaması en son olarak bu gruba eklenen bir termal sprey çeşididir. Termal sprey işlemleri ve kullanım alanları ile ilgili karşılaştırmalı tablolar; tablo 1.1, tablo 1.2. ve tablo 1.3. aşağıda verilmiştir.



Şekil 1.4.Termal spre yöntemlerini sınıflandırma [10].

Tablo1.1 Termal sprey yöntemlerinin karşılaştırılması[10].

İşlem	Toz alev	Tel alev	HVOF	Patlamalı tabanca	Tel ark	Açık hava plazma	Yüksek enerjili plazma	Vakum plazma
Eritme için gerekli enerji kW/kg	11-22	11-22	22-200	220	0.2-0.4	13-22	9-13	11-22
Güç kW	25-75	50-100	100-270	100-270	4-6	30-80	100-850	50-100
Maksimum sprey oranı kg/s	7	9	14	1	16	5	23	10
Oksit içeriği %	6	4	0.2	0.1	0.5-3	0.5-1	0.1	-
Bağlanma dayanımı	Düşük	Orta	Çok yüksek	Çok yüksek	Yüksek	Yüksek	Çok yüksek	Çok yüksek
Nispi yapışma dayanımı a	3	4	8	8	6	6	8	9
Partikül çarpma hızı m/sn	30	180	610-1060	910	240	240	240-1220	240-610
Alev veya plazma sıcaklığı C	2200	2800	3100	3900	5500	5500	8300	8300
Gaz akışı m ³ /s	11	71	28-57	11	71	4.2	17-28	8.4

Tablo 1.2.Endüstriyel sektörlere göre termal sprey işlemi uygulamaları[10].

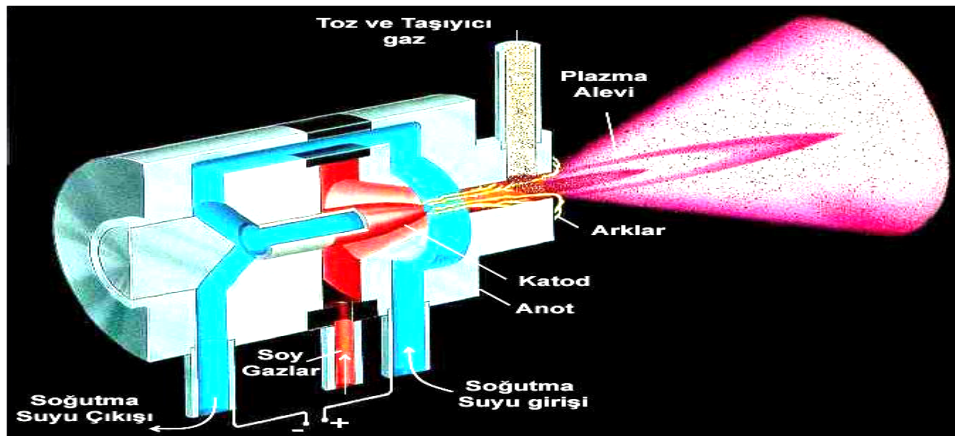
Oksi fuel	Sprey	HVOF	D-gun	Havaplazma	Vakum plazma	Örtülü plazma	Endüstri sektörü
X		X	X	X	X	X	Hava gaz türbinü
X		X		X			Otomotiv motorları
	X	X	X	X			Ticari ekipmanlarda
X	X	X					Çimento ve yapı malzemeleri
X		X	X	X			Kimyasal işlemlerde
X							Bakır ve prınç fabrikaları
X		X	X	X	X		Havacılık ve savunma
X		X		X			Dizel motorlar
		X	X	X	X		Elektrik ve elektronik
		X		X			Elektrik sektörü
X		X					Dövme metal
X		X	X	X	X	X	Hidro enerji türbinleri
		X		X			Demir çelik döküm
X							Marina üretimi ve tamiri
		x	X	X	X	X	Medikal
X	X	X		X			Madencilik
		X	X	X			Nükleer
X	X	X	X	X			Petrol endüstrisi
X		X		X			Demiryolu

Tablo1.3.Arzu edilen amaca göre termal sprey yöntemi kullanım alanları [10].

Elektriksel İletim direnci		X																
Korozyon/ oksidasyon	X	X		X	X	X		X	X	X	X	X		X	X	X	X	X
restorasyon	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X			X		X	X
Termal bariyer	X	X					X	X										
Darbe aşınması		X		X			X	X	X	X		X			X		X	X
Kativasyon aşınması							X		X		X				X			
Erozyon aşınması	X	X			X		X	X	X		X	X			X		X	
Sürtünme aşınması	X		X				X				X			X				
Adesiv aşınma	X	X	X				X	X	X	X	X						X	X
Abrasiv aşınma	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X
Endüstri sektörü	Hava gaz türbünü	Otomotiv motorları	Ticari ekipmanlarda	Çimento ve yapı	Kimyasal işlemlerde	Bakır ve prınç fabrikaları	Havacılık ve savunma	Dizel motorlar	Elektrik sektörü	Dövme metal	Hidro enerji türbinleri	Demir çelik döküm	Marina üretimi ve tamiri	Medikal	Madencilik	Nükleer	Petrol endüstrisi	Demiryolu

1.3.Plazma Arkla Spreyleme Yöntemi

Plazma arkla spreyleme yöntemi, termal spreyleme yöntemleri içerisinde en sofistike ve çok yönlü kullanıma sahip olan yöntemlerden birisidir. Sıcaklık, ticari gaz ekipmanları kullanılarak 11000 °C üstüne çıkabilir ve bu sıcaklık bilinen her türlü malzemenin erime sıcaklığının üzerindedir. Plazma tarafından meydana getirilen yüksek gaz hızı sayesinde spreyleme esnasında malzeme de herhangi bir ayrışma veya çözülme meydana gelmez. Plazma işlemi ayrıca kaplama malzemesinin iletimi ve erimesi için kontrollü bir atmosfer sağlar ve yüksek gaz hızı sayesinde yüksek yoğunluklu kaplama tabakası meydana gelir[20]. Plazma spreyl yönteminde, suni bir plazma oluşturularak yüksek sıcaklığa ulaşılır. Plazma, kaplama tabancası içerisinde su soğutmalı bakır anot ile toryumlu katot arasında oluşturulan yüksek voltaj arkı(doğru akım) içerisinde plazma gazları olarak nitelendirilen Ar, H₂, N₂ ve He gazının geçirilmesiyle elde edilir. Plazma gazlarının elektrik arkı içerisinde nötr durumları bozulur, disosiyasyon, iyonizasyon ve rekombinasyon olayları sonucu 20.000°K'e kadar çıkan yüksek sıcaklık meydana gelir. Isınan gazlar, radyal ve eksenel olarak genişler ve partikül hızını arttıran süpersonik genişlemeye, gazların dar boğazlı bir nozul içerisinde geçirilmesiyle ulaşılır. Şekil1.5'te spreyl tabancanın kesiti ve plazma oluşumu görülmektedir. Kapsama tozları, plazma hüzmesinin içerisine taşıyıcı Ar gazı yardımıyla beslenir. İyonize gaz içerisinde eriyen tozlar, çok hızlı bir şekilde önceden hazırlanmış altlığın/iş parçasının yüzeyine püskürtülür. Yüzeye çarpan ergimiş veya yarı ergimiş tozlar/partiküller yassılaşıp, lamelli bir hal alır ve çok ani soğuma sonucu (10^{-6} °K/sn) katılaşır [21,22]. Altlık yüzeyine bu şekilde biriken milyonlarca toz partikülü ince tabakalı/lamelli kaplama tabakasını meydana getirir. Proses çok kısa bir sürede gerçekleşir [23,24].



Şekil1.5. Plazma spreyl tabancasının kesiti ve plazma oluşumu[21].

Kaplama teknolojisinde iş parçası yüzeyine biriktirilmek istenen metalik, seramik, karbür, oksit, plastik veya kompozit karakterli tozların bir plazma enerjisinde ergitilmesi esastır. Plazma, prosesin temel enerji kaynağıdır. Egzotik bir ifade olan plazma kavramı birçok değişik tanımlara sahiptir. En yalın haliyle plazma, bünyesinde eşit sayıda serbest elektron ve pozitif iyon bulunduran, genellikle maddenin 4.hali olarak nitelenen yüksek enerji seviyesine yükseltilmiş bir gaz buharı olarak tarif edilebilir. Plazma oluşturmak için bir gaz kütlesine mekanik, ısı, ışın, manyetik ve elektrik enerjisi yardımıyla bir enerji vermek gereklidir. En basit ve yaygın yöntem, gaz kütlesine elektrik boşalması şeklinde enerji vermektir. Bu durum kararlı gaz yapıların bozularak denge dışı yoğun enerji bulutunun ortaya çıkmasına neden olur. Plazmanın en önemli avantajı, çok yüksek sıcaklığa çıkabilmesi ve maddelere iyi ısı transferi sağlamasıdır [25,26].

Plazma işlemi sonucunda üretilen yüksek sıcaklık ve yüksek gaz hızı ile kaplamaların mekanik ve metalürjik özellikleri geliştirilir. Plazma işlemi seramik malzemelerle yüksek kaliteli kaplama işlemlerinde (türbin motorlarının zirkonyumla kaplanması, matbaa merdanelerinin kromoksitle kaplanması) çok verimli ve etkindir.

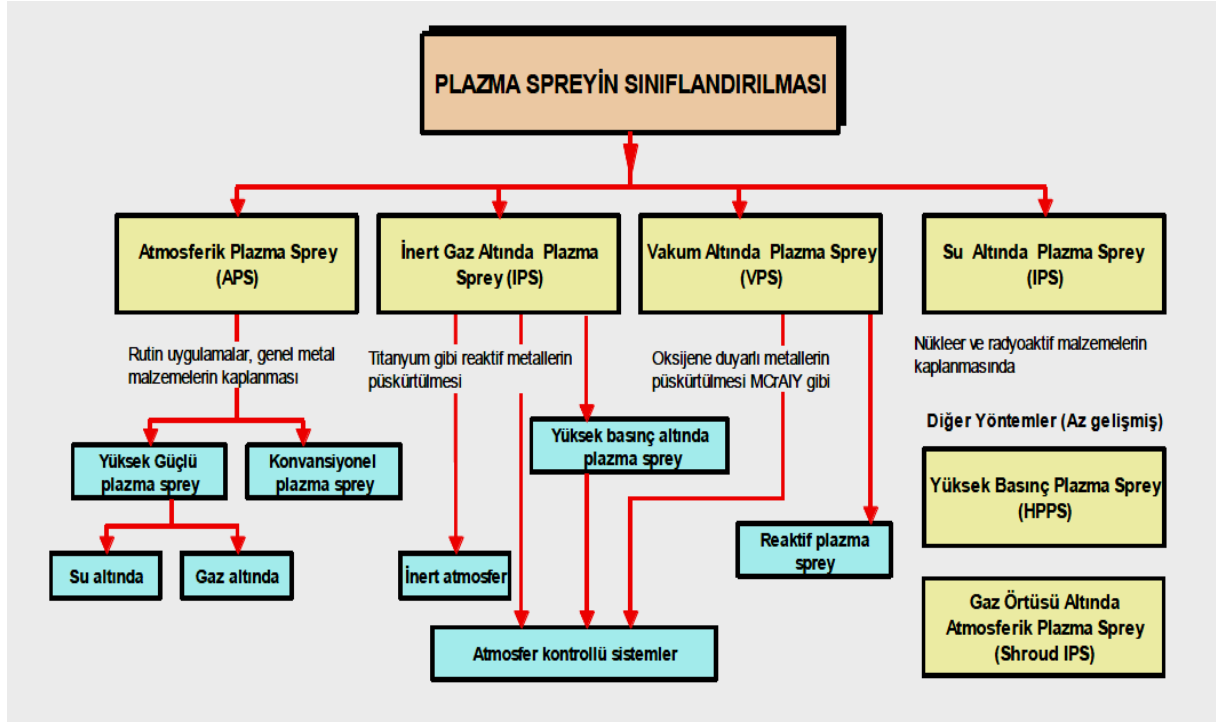
Günümüz plazma sprej teknolojisi, tam otomatik dur-kalk, güç seviyelerinin bilgisayarla kontrolü, plazma gaz akışı ve toz besleme oranının tayinini mümkün kılmaktadır. Metalik kaplamaların kalitesi, kaplama içerisindeki oksitlerin azaltılmasıyla, kaplama adhezyonunun yükselmesiyle, porozitenin engellenmesiyle artmıştır. Kaplama malzemesinin türü, ölçüsü ve partiküllerin şekli termal sprej yönteminde kullanılan alevin verimli ve etkin bir şekilde malzemeyi eritmesine önemli ölçüde etki etmektedir. Her bir özel kaplama malzemesi ve tabanca kombinasyonu, optimum partikül ölçüsüne sahiptir. Partiküller ideal ölçüden küçük olduğu takdirde, aşırı erime ve buharlaşma meydana gelir. Bu ölçüden daha büyük olması durumunda ise erime gerçekleşmeyecektir[27].

1.3.1. Plazma Sprej İşlemlerinin Sınıflandırılması

Plazma sprejin çok yaygınlaşmasının sebebi prosesin spesifik özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Plazma sprej, termal sprejin bir alt üyesi iken prosesin çok yönlülüğü, yöntemin kendi başına bir kaplama prosesi olmasını sağlamıştır [28].

Plazma sprejin varyasyonları, genellikle benzer esaslara dayanmaktadır. Sınıflandırma kaplama tabancasının bulunduğu ortama göre yapılmaktadır. Kaplama tabancası, açık atmosfer ortamı ve basıncında bulunuyorsa atmosferik plazma sprej, eğer inert gaz veya

vakum altında bulunuyor ise, inert plazma sprej ve vakum plazma sprej olarak tanımlanır. Bu sınıflandırma şekil 1.6.da görülmektedir. En gelişmiş ve yaygın yöntemler; APS, VPS ve IPS yöntemleri olmakla birlikte özellikle indüktif plazma sprej sahasında yoğun araştırmalar devam etmektedir[29].



Şekil 1.6. Plazma sprej kaplama yöntemlerinin sınıflandırılması [30].

1.3.2. Plazma Sprej İşleminde Tabaka Oluşumu ve Kaplama Karakteristikleri

1.3.2.1. Mikroyapı özellikleri

Plazma huzmesi içerisinde ergitilen partiküller, altlığı ulaşınca kadar yüzey gerilimlerinin sonucu olarak yağmur damlası veya küresele yakın formda bulunur. Ergiyen partiküller çok yüksek kinetik enerjiyle, tam sıvı veya yarı ergimiş hamurumsu şekilde ana malzeme yüzeyine çarptığı anda ince taneli tabaka halinde katılır. Bu şekilde milyonlarca ergimiş tozun üst üste birikmesiyle lamelli yapıda bir kaplama tabakası meydana gelir. Yüzeye çarparak deforme olan her yapıya “splat” denir. Tabaka özellikleri; partiküllerin sıcaklığı, hızı ve viskozitesine bağlı olarak elde edilen splatların şekli tarafından belirlenir. Splatların katılma hızı 10^{-6} °K/sn kadar olabilir ve elde edilen kaplama yapısı, yarı kararlı veya amorf faz halinde olabilmektedir [31,32].

1.3.2.2.Bağ Mukavemeti (Yapışma Mukavemeti)

Kaplamaların bağ/yapışma mukavemeti, kaplama parametrelerine, kaplanması istenen malzeme özelliğine, ve altlığın cinsine (demir veya demir dışı) ve altlık yüzeyinin durumuna (temizliğine, pürüzlülük derecesine ve geometrisine) bağlı olarak değişmektedir[33]. Termal spreycaplamalarının ana malzeme üzerine yapışması, kumlanmış yüzeylerde mekanik (genellikle seramik esaslı kaplamalar), Wander-Wals kuvvetleri (metal esaslı kaplamalar) ve noktasal bölgelerde görülen sınırlı bir difüzyon ile gerçekleşir. Plazma spreyle üretilen seramik kaplamalar, gevrek ve kırılgan yapıları nedeniyle, metal esaslı kaplamalara nazaran daha düşük yapışma mukavemetine sahiptir. Kaplamaların yapışma mukavemeti artan tabaka kalınlığı nedeniyle azalır. Altlık ile seramik tabaka arasındaki termal genleşme uyumsuzluğunun giderilmesine yönelik uygulanan ara metalik kaplamalar (Ni-Al, Ni-Cr, NiAlCrY), yapışma mukavemetini olumlu yönde etkiler.

1.3.2.3.Porozite

Porozite, püskürtme yoluyla üretilen kaplamaların karakteristik özelliğidir ve tabaka içerisindeki boşlukları ifade etmektedir. Plazma spreycaplamalarda, porların geometrisi ve dağılımı üniform değildir. Porların çapları 20 ila 100µm arasında değişmektedir. Porozite, kaplama malzemelerinin yüzeye düzensiz bir şekilde birikmesi sonucu oluşur. Kaplamalarda porozite, artan tabanca (ergitme) gücü ve spreycaplamasının azalmasıyla düşmektedir. Porozite kaplamaların, sertlik, aşınma direnci ve yapışma mukavemetini azaltır ve kullanım ortamına bağlı olarak iş parçasının servis ömrünü kısaltabilmektedir[34,35].

Özellikle uçak motorlarında kullanılan türbin kanatçıklarının kaplanması, porozite arzu edilen bir durumdur. Termal bariyer olarak üretilen $ZrO_2+Y_2O_3$ türü kaplamalarda porozitenin %10 ila %20 arasında olması çok önemlidir. Kaplama bünyesindeki porların içine hapis olan hava tabakanın ısı iletkenliğini düşürür ve metalik türbin palesi için etkin bir koruma sağlamaktadır.

1.3.2.4.Sertlik Değeri

Oksit esaslı seramikler yüksek sertlikleri ve ergime sıcaklıkları nedeniyle özellikle aşınma uygulamalarına karşı başarıyla kullanılmaktadır. Kaplamaların sertliği; püskürtülen malzemeye, spreycaplamasına ve proses parametrelerine bağlıdır. Artan püskürtme hızı ile

1.3.3.1.Güç Ünitesi

Plazmayı oluşturacak gaz karışımlarının iyonlaştırılması ve kaplama tozlarının tabancaya taşınması için gerekli elektrik gücü sağlayan sistemdir. Sistemde kullanılan güç, kaplamaların kalitesine doğrudan etki etmektedir. İlk zamanlar kullanılan plazma sprej sisteminin gücü 40 kW iken daha sonraları 80, 120 ve 220 kW'lık güç üniteleri kullanılmaya başlanmıştır. Gücün artmasının kaplama özelliklerine olan etkisi, katottan yayılan serbest elektronların hızının, anot ile katot arasında olan potansiyel farkına bağlılığından dolayıdır. Bu durumda plazma gazı, elektronların hızlı çarpma etkisi ile daha fazla iyonize olmaktadır. Bu da tozların daha hızlı olarak yüzeye çarpmasına ve daha yoğun kaplama üretimine imkan sağlamaktadır.

1.3.3.2.Gaz Besleme Ünitesi ve Plazma Gazları

Plazma gazının fonksiyonu, malzemeyi püskürtmek, parçacıkları hızlandırmak ve kaplama yüzeyine taşımaktır. Ayrıca parçacıkların etrafını sarma ve atmosferin kimyasal etkisinden sıcak yüzeyi koruma görevi de vardır. Plazma sprej kaplama teknolojisinde kullanılan gazlar, farklı ısı kapasiteleri, farklı iyonlaşma özelliği ve disosiyasyon gösterdiklerinden dolayı önemlidir.

Plazma; maddenin katı, sıvı ve gaz hali yanında dördüncü hali olarak adlandırılan yüksek enerji düzeyine ulaşmış yoğunlaştırılmış bir gazdır. Gazların iyonlaşması sonucu toplam enerjinin bir bölümü ışık enerjisine dönüşerek kaybolmaktadır. Çift atomlu gazlardaki (N_2 ve H_2) kayıplar tek atomlu gazlardaki (Ar ve He) kayıplara oranla çok daha fazla olmaktadır. Plazma gazlarının kullanım özelliklerini şu şekilde sırlayabiliriz :

1. Hava plazma sisteminde plazmayı oluşturmak için genellikle Argon ve Hidrojen gaz karışımları kullanılmaktadır ve çoğu zamanda Argon gazı esas gaz olarak seçilmektedir. Argon gazı Azota göre daha düşük gerilimde ve yaklaşık iki kat fazla plazma ısıyı verdiği için yoğun kaplamaların üretimine olanak sağlamaktadır.
2. Azot, nadiren plazma gazı olarak kullanılır. Reaktif bir gaz olmasından dolayı, vakum plazma sisteminde koruyucu ortam olarak kullanılarak AlN, TiN, TiAlN, MoN gibi nitrür esaslı kaplamaların üretilmesine imkan sağlar.

3. Hidrojen gazının ısı iletim katsayısı Argon ve Azot gazlarının neredeyse on katıdır fakat; iyonlaşma sonucu ortaya çıkan plazma ısı çok daha düşüktür ve çift atomlu gaz olması nedeniyle gazın plazmaya transfer olması için daha yüksek çalışma voltajları gerektirmektedir. Bunun için, Argon gazının yanında %5-25 oranlarında yardımcı gaz olarak katılır. Hidrojen içeren plazmanın hava ile teması sonucu zararlı nitrik asit (HNO_3) buharı oluşturma durumu da vardır.
4. Helyum gazı da Hidrojen gibi Argon ve Azota kıyasla çok daha yüksek bir ısı iletkenliğe sahiptir. İyonlaşma sonucu oluşturduğu ısı kapasitesi Hidrojenin dört katıdır. Fakat, iyonlaştırma için yüksek çalışma gerilimlerine ihtiyaç duyulur. Yüksek basınçlı vakum kaplama sistemlerinde Argon-Hidrojen karışımlarının ısı enerjisini artırmak için üçüncü gaz olarak sisteme ilave edilir. Kullanım açısından Helyumun ABD’de bulunması nedeniyle Avrupa’da kullanımının çok pahalı olması bu gazın bir dezavantajıdır.[38]

1.3.3.3.Toz Besleme Ünitesi

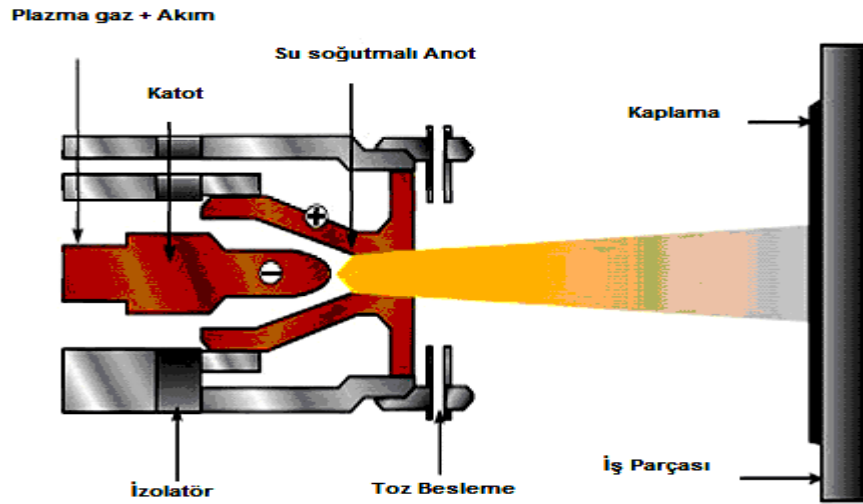
Kaplama prosesinde, farklı yöntemlerle üretilen ve farklı akış özellikleri gösteren tozları plazma hüzmesi içerisine taşıma görevi, toz besleme ünitesine aittir. Tozların düzenli ve istenen miktarlarda eritme ortamına taşınması homojen kalınlık ve kaliteli bir tabaka elde etmek için önemlidir. Tozların taşınmasında genellikle azot (N_2) veya argon (Ar) gazları kullanılır. Proseste kullanılan tozların çalışma parametreleri, toz üreticisi firmaların tavsiyelerine göre ayarlanmaktadır.

1.3.3.4.Plazma Sprey Tabancası

Plazma sprej tabancası, prosesin en önemli bileşenidir. Plazma enerjisinin üretilmesindeki tüm süreçler (dissosiyasyon, iyonizasyon ve plazma hali) püskürtme tabancası içerisinde meydana gelir. Tabancanın tip, dizayn ve güç özelliklerinin kaplama kalitesi üzerine doğrudan etkisi söz konusudur.

Püskürtme oranı büyük ölçüde tabanca dizaynına, plazma gazlarına, toz enjeksiyon düzenine, malzeme özelliklerine ve özellikle boyut, erime noktası,morfoloji,yoğunluk, dağılım gibi partikül özelliklerine bağlıdır[39].Plazma tabancası, gazın enerji halinin elektrik arkının içinden geçmesini sağlar ve böylece çok yüksek sıcaklıklar elde edilir. Nitrojen veya argon gibi gazlar direkt olarak Tungsten katot ve bakır anot arasından

geçmektedir ve bu noktada plazma gazı ayrışmaktadır (nitrojenin 2 atoma ayrışması). Akabinde iyonizasyon sonucunda serbest atomlar ortaya çıkar. Elektronlar elektrik arkının hemen dışında tekrar birleşir, ardından enerji ısı ve ışığa ayrışır. Buna ek olarak sık çarpışmalar, enerjiyi elektronlardan pozitif iyonlara transfer etmekte ve hızlanarak plazma denge durumuna gelene kadar sürmektedir. Termal plazmanın sonucu olarak elektronların enerjisi entalpiye veya ısı içeriğine dönüşmektedir[40]. Bu noktada toz kaplama malzemesi gazla birlikte plazmanın içerisine enjekte edilmekte ve sonuç olarak erimiş partiküller iş parçasına doğru itilmiş olur. Pratikte voltaj ve termal enerjiyi opere etmek için az miktarda hidrojen veya helyum gibi ikincil gaz ilk plazma gazıyla karıştırılır. Plazma tabancası kesiti Şekil 1.8. de gösterilmektedir.



Şekil 1.8. Plazma tabancası kesiti

1.3.4. Plazma Spreyde Proses Parametreleri

Kaplama prosesini kontrol eden parametreleri üç temel gruba ayırmak mümkündür. Bunlar, kaplama tabancasına, kaplama malzemesine, püskürtme süreci ve altlık malzemesine bağlı kompleks bir süreçtir. Genel olarak yüzden fazla parametrenin kaplama sürecinde etkin olduğu literatürde belirtilmekle birlikte Şekil 1.9.'da proses parametrelerine genel bir bakış verilmektedir. Başarılı bir kaplama üretmek için tüm parametrelerin optimize ve birbiriyle senkronize olması önemlidir. Bu noktadan bakılınca plazma sprej prosesinin çok basit bir teknoloji olmadığı, teknolojik ve bilimsel bilgiye ihtiyaç gösterdiği ortadadır.

1.3.5.3.Kumlama

Solvent temizleme işlemini takiben mikron boyutundaki sert alüminyum oksit, silisyum, karbür veya köşeli çelik aşındırıcı tanelerin altlık malzeme yüzeyine basınçlı hava ile püskürtülmesi ile hem yüzey temizleme hem de pürüzlendirme işlemi aynı anda gerçekleştirilebilir. Püskürtme işlemi yaklaşık 15 cm öteden ve parça ile 45-70 derece açı yapacak şekilde olmalıdır. Kumlama işleminden sonra yüzeyde aşındırıcıdan kalan atıklar basınçlı hava ile temizlenir. İşlem sonrası altlık malzemenin yüzeyi atmosferik korozyona karşı çok daha hassaslaşır. Bu nedenle, en geç 4 saat içinde kaplamanın yapılması gerekmektedir.

1.3.5.4.Maskeleme

Maskeleme, kaplanacak malzemenin kaplanmasını istemediğimiz yüzeylerini erimiş partiküllerin yapışmasını önlemek için sürülebilir bir macun ile örtülmesi işlemidir.

1.3.6.Kaplama Yöntemi ve Kaplama Malzemesi Seçimi

Öncelikle altlık malzemesinin kullanıldığı ortam, taşınabilirliği ve hangi tür aşınmaya maruz kaldığı tespit edilmeli ve bu veriler ışığında kaplama işlemi için uygun malzeme ve kaplama yöntemi seçilmelidir. Kaplama tozunu eritme ve püskürtme parametreleri; tozun cinsine, kaplamanın yöntemine ve püskürtme tabancasının gücüne bağlı olarak değişim gösterir[41].

1.3.7.Plazma Püskürtme ile Kaplama Yöntemlerinin Avantajları

Plazma püskürtme ile kaplamanın avantajlarını aşağıdaki maddeler şeklinde sıralayabiliriz

1. Plazma alevi ile ulaşılan yüksek sıcaklıklar sayesinde yüksek erime sıcaklığına sahip seramik tozlarının eritilmesini mümkün kılmaktadır.
2. Çok küçük ve büyük parçaların kaplanması mümkün olabilmektedir.
3. Şekilli parçaların üretimi mümkün olabilmektedir.
4. Sistem otomasyona entegre olabilecek esnekliğe sahiptir.
5. Gözeneğin belli bir orana kadar kaplama içinde gerekli görüldüğü bazı durumlarda, püskürtme parametreleri değiştirilerek istenen oranda gözenek oluşturmak mümkün olabilmektedir.

6. Kaplanacak parçanın yüzey temizliği ve ön ısıtma işlemleri hava plazma ile plazma tabancası vasıtasıyla yapılabilir. Fakat ; önceden pürüzlendirilmiş olan yüzeyin atmosferik ortamda ön ısıtma işlemi, yüzeyde oksitlenmeye neden olacak ve kaplama kalitesini bozacaktır. VPS sisteminde ise hem parçanın ısıtılması hem de yüzey temizleme ve pürüzlendirme işlemleri herhangi bir kumlama tozu kullanılmadan yine vakum altında sıkıntısız gerçekleştirilir.
7. Kaplamanın yapılacağı ortamın çevreden izole edilesi ile çevre dostu bir sistemdir

1.4.İçten Yanmalı Motorlarda Plazma Ark Spreyleme Yöntemi Uygulamaları ve Düşük Isı Kayıplı Motorlar

Geçmişten günümüze enerji korunumu ve verimi, içten yanmalı motorlarla ilgili çalışma yapan mühendislerin ve araştırmacıların ilgi odağı olmuştur. Dizel motorlar, benzinle çalışan motorlara göre daha iyi bir yakıt ekonomisi süreci göstermektedir. Dizel motorlarda, yakıtın yanmasıyla ortaya çıkan ısı enerjisinin üçte ikisi hiçbir şekilde kullanılamayıp kaybolmaktadır. Hiçbir şekilde faydalanılamayan bu ısı enerjisinin üçte biri soğutucuya, diğer üçte biri egzoz gazlarıyla birlikte dış atmosfere atılmaktadır. Sadece kalan üçte birlik kısımdan faydalı bir şekilde yararlanılmaktadır. Teorik olarak termodinamiğin ikinci kanununa göre eğer ısı kaybı düşürülebilirse, termal verim artırılabilir. Düşük ısı kayıplı motorlarda amaç bunu yaparak soğutucuya gidecek ısıyı düşürmektir.

Yanma odası duvarları ve elemanları seramiklerle izole edilmiş dizel motorlara Düşük Isı Kayıplı Motorlar (DIKM) (Low Heat Rejection Engine LHR) denilmektedir. DIKM, temel olarak konvansiyonel soğutma sistemini elemine ederek yakıt ekonomisini geliştirme ve artık egzoz enerjisini, turbo şarj kullanarak şaftların çalışmasına çevirme esasına dayalı olarak tasarlanmışlardır.

Kamo ve Bryzik'in sunduğu "DIKM"le birleştirilmiş turbo bileşimli sistemlerde yeni bir konsept" çalışmasından günümüze DIKM'nın performansı, yapısı ve dayanımı üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Araştırmalar sonucunda umut verici sonuçlar elde edilmiştir. Çalışmaların birçoğu izolasyonun ısı transferini düşürdüğünü, termal verimi artırdığını ve egzozdaki enerji kullanılabilirliğini artırdığını göstermiştir.

1.4.1.DIKM' ler Üzerine Yapılan Deneysel Araştırmalar

DIKM üzerine pek çok deneysel araştırma yapılmıştır. Bunların bir kısmında hem DIKM hem de konvansiyonel soğutmalı motorlarda hava-yakıt karışım oranı ve azami şartlar gibi işlemsel kısıtlamalar aynı anda sabit oranlarda uygulanmış, bazı çalışmalarda ise işlem şartları sabit olarak uygulanmamıştır. Aynı işlem şartlarında yapılan çalışmalarda, yakıt tüketiminde oldukça belirgin ilerlemeler, termal verimde artış, ve egzoz emisyon değerlerinde önemli ölçüde azalma tespit edilmiştir. DIKM'lerle ilgili yapılan deneysel çalışmaları yansıtan veriler tablo 1.4'de gösterilmiştir.

R.H.Thring yaptığı çalışmada seramik kaplanmış tek silindirli dizel motorun yakıt ekonomisinde % 7, turboşarjlı motorda ise %15 düzelme tespit etmiştir. Ayrıca emisyon değerlerinde de önemli ölçüde gelişmeler tespit etmiştir. Bu tespitlere göre is oranında %80, ve HC ve CO emisyonlarında ise % 50 azalma, buna karşın NOx emisyonlarında ise % 15 artış olduğunu belirtmiştir[42].

T.Morel yaptığı deneysel çalışmada Cummins tek silindirli motora, plazma sprey işlemi uygulayarak Zirkonya ile kaplamıştır. Çalışma neticesinde ısı akışında azalma tespit etmiştir. Bu olayda ısı transfer işleminin duvar sıcaklığının artmasıyla sabit kaldığını ve motorun yanma odası duvarlarının izolasyonu ile duvar sıcaklığının arttığını ve böylece ısı transferinin azalarak termal verime olumlu etki sağladığını göstermiştir[42].

Y.Miyari yaptığı deneysel çalışmada tek silindirli dizel motoru kısmi stabilizeli zirkonya ve sinterlenmiş silikon karbür ile kaplamıştır. Çalışma neticesinde motor performansı ve NOx emisyon değerlerinde artış HC emisyon değerlerinde ve volumetrik verimde ise azalma tespit etmiştir. Özgül yakıt tüketiminde de doğal soğutma şartları altında %7 azalma gözlemlenmiştir. Deneysel çalışma esnasında yakıt enjeksiyon sistemi ve yakıt enjeksiyon miktarında herhangi bir düzeltmeye gidilmemiştir. Ceket soğutma suyu ve yağlama sıcaklığı deney süreci boyunca 80 °C'de tutulmuştur. Tribolojik problemlere karşı korumak için silindir gömleği suyla soğutulmuştur [42].

D.W. Dickey Düşük Isı Kayıplı Motorlarda motor performansı, emisyon değerleri ve yanmanın etkisini incelemek için tek silindirli dizel motorun egzoz ve emme supapları, piston tepesini ve silindir gömleğini seramik bir malzeme olan Yttria stabilize zirkonya ile kaplamıştır. İzole edilen motor 82-104 °C sıcaklıkları arasında değişen soğutucu ortamda test edilmiştir. Deneyde silindir kafası düzenli sıkıştırılmış hava ile ve silindir gömleği ise Etilen glikol ile soğutulmuştur. Testler farklı hız ve yük şartlarında 3 farklı enjeksiyon zamanına göre uygulanmıştır. Hava- yakıt karışım oranı deney boyunca sabit tutulmuştur.

Deney sonucunda düşük termal verimle birlikte yüksek is, partikül, CO, ve NOx emisyonları ve daha düşük HC emisyonları tespit edilmiştir. Zayıf motor performansı ise düşük karışımli yanma ve düşük ısı dağılımı gibi düşük yanma karakterlerine bağlanmıştır[42].

Tablo 1.4.DIKM’lerle ilgili yapılan deneysel çalışmaları[42].

ARAŞTIRMACI	TEST MOTORU	İZOLASYON İÇERİĞİ	İŞLEMSEL SINIRLAMALAR	KONVANSİYONEL MOTORA GÖRE DIKM PERFORMANSI
W.R.Wade	Tek silindirli direkt püskürtmeli dizel motor	Silindir kafası ve valfler 1mm zirkonya kaplama	Aynı hava yakıt oranında aynı akış oranında	Yakıt tüketiminde % 4-7 iyileşme
R.H.Thring	Tek silindirli dizel motor	Piston tepesi ve valfler 0.03 inç kromoksit	Aynı hava akış oranı, farklı hava-yakıt oranı, iki farklı hız	Yakıt ekonomisinde % 7 iyileşme CO emisyonunda %15 iyileşme
T.Morel	Tek silindirli turboşarjlı motor	Piston ve silindir kafası 0.05 inç zirkonya kaplama	Her iki motordada su sirkulasyonlu soğutma	Silindirde ısı transfer düşüşü, silindir duvarında sıcaklık yükselmesi,düzenli yanma
Y.Miyairi	Tek silindirli dizel motor	Sinterlenmiş seramik malzeme ile yanma odası duvarlarını kaplama	Yakıt enjeksiyon sistemi ve yakıt enjeksiyon miktarı sabit, silindir gömleği su soğutmalı	Kendinden soğutma ortamında özgül yakıt tüketiminde % 7 azalma
Cheng and Wong	Tek silindir işlemine göre modifiye edilmiş 8 silindirli motor	Piston ve silindir tepesi 1.52 mm zirkonya ile kaplama	Hava akış oranı sabit,hava-yakıt karışımı farklı ve aynı hızda	Tüm test yüklerinde zayıf performans, özgül yakıt tüketiminde %17 artış,düzensiz yanma, egzoz ve yüzey sıcaklıkları yüksek
R.Kamo	6 silindirli turboşarjlı dizel motor	Piston üstü ve silindir tepesi 0,13 mm zirkonya-NiCrB termal bariyer kaplama silindir gömleği 0,5 mm demir titanik asit kaplama	Her iki motorda %93 yükte 1600-2600 rpm hızlarda aynı. DIKM de sabit emme hava sıcaklığı	Tüm yük ve hızlarda %5-6 yakıt veriminde artış, ısı transfer kaybında azalma, yüksek oranda ısı dağılımı

D.Assanis yaptığı deneysel çalışmada tek silindirli bir dizel motoru seramik malzeme ile kaplayarak motor performansı ve egzoz emisyon değerlerini araştırmıştır. Testler ortalama motor hızlarının üstünde ve tam yük değerlerinde standart metal piston ve 0,5 ve 1 mm kalınlıkta seramik malzemeyle kaplanmış pistonlarda uygulanmıştır. Test sonuçlarında 0,5 mm seramikle kaplanmış pistonun kaplanmamış pistona göre %10 daha yüksek termal verim sağladığı, 1 mm kaplı pistonun ise normal konvansiyonel motora göre % 6 oranında termal veriminin yüksek olduğunu göstermiştir. Çalışma neticesinde DIKM'lerin emisyon değerlerinde de önemli ölçüde iyileşme gözlemlendiği, CO emisyonlarında %30-60 seviyesinde azalma, yanmamış HC değerlerinde %35-40 iyileşme ve NOx de ise %10-30 arasında artış tespit edilmiştir. Ve bu değerlerdeki düşüşü izole edilmiş yanma odasında meydana gelen tam yanmaya dayandırmıştır[42].

Havstad yaptığı deneysel çalışmada seramik kaplı motorun özgül yakıt tüketiminin konvansiyonel motora göre %5-10 arasında daha iyi olduğunu ve ölçümler sonucunda izole edilen yanma odasıyla ısı kaybının %30 değerine ulaştığını göstermiştir. Yapılan deneyler boyunca izole edilen motor ve konvansiyonel motorda hava-yakıt karışım oranı sabit tutulmuştur [42].

1.4.2.Yanma Olayında İzolasyonun Etkisi

DIKM'lerde yanma odasının duvarının sıcaklığı konvansiyonel su soğutmalı motorlara göre daha yüksektir. Bundan dolayı silindir içine dolan hava, yüksek sıcaklığa sahip yanma duvarından çıkan ısıyı absorbe eder. Ve böylece dolan hava genişler ve emilen hava miktarı azalır. Güç çıkışında artış gerçekleştiği takdirde, emme havasının miktarını artıran ve yüksek egzoz enerjisini kullanan turboşarj, turbo bileşenli sisteme gidecek egzoz enerjisini korur ve ek bir güce çevirir.

Suzuki'nin soğutmasız turboşarjlı motordaki araştırma sonuçları atık gaz oranının su soğutmalı turboşarjlı aynı tip motora göre %1-7,6 oranında azaldığını ortaya koymuştur.Ayrıca aynı motorun egzoz aralığında yapılan testlerde de artık havanın miktarında %2-4,2 oranında artış tespit etmişlerdir[42].

Daha önce yapılan birçok araştırmanın sonuçları ön karışımli yanma oranındaki azalmanın, tutuşma gecikmesinin kısaldığını ve yanma difüzyonunun arttığını göstermiştir. Yanma difüzyon fazındaki ısı dağılım oranı, erkenden orta periyoda doğru azalma trendinde yanma periyodundan sonra ise uzamayı göstermektedir.

Volumetrik verimdeki azalma ve tutuşma gecikmesindeki kısılmanın yavaş ve bozuk yanmadan kaynaklanan iki sebebi olduğu söylenebilir. Zayıf hava-yakıt karışımının DIKM’lerde yanmanın bozulmasının sebeplerinden biri olduğu bildirilmektedir. Ayrıca yanmış gazların yoğunluğundaki yükselme zayıf karışım oranına büyük oranda etki etmekte ve yanmada bozulmaya sebep olmaktadır.

1.4.3.Motor Performansında İzolasyonun Etkisi

1.4.3.1.Volumetrik Verim

Volumetrik verim motorun nefes alabilme kabiliyetinin bir göstergesi olup motorun çalışma ve ortam şartlarına bağlı olarak değişmektedir. Seramik izolasyonla birlikte ısı kaybının azalması, DIKM’lerin yanma odası duvarlarının sıcaklığının artmasına sebep olur. Volumetrik verim sıcak duvarlardan dolayı azalabilir ve atık gaz, alınan havanın yoğunluğunu düşürür. DIKM’lerde volumetrik verimdeki bozulma turboşarj yardımıyla engellenebilir ve egzoz gaz enerjisinden daha verimli bir şekilde faydalanılabilir.

1.4.3.2.Termal Verim

Motora giren yakıt, yanma sonucunda kimyasal bir ısı enerjisine çevrilir. DIKM araştırmalarında temel amaç motorun silindirinde ısı transferini azaltmak ve termal verimini artırmaktır. Bu konuyla ilgili olarak pek çok enstitü ve araştırmacı ısı kaybını azaltma ve termal verimle alakalı çalışmalar yapmıştır ve DIKM’lerde termal verimin arttığını bildirmişlerdir. Bunun sebebini de silindirdeki ısı transferinin azalmasına ve daha düşük ısı akımına bağlamışlardır. Birçok araştırmacıda bunun izolasyonla sağlandığını bildirmişlerdir. DIKM’lerde ısı transfer karakterleri tam olarak anlaşılamamış olup, yanma odasının izolasyonunun ısı kaybını azaltmadaki etkisi ve termal verim net olarak kavranamamıştır[42].

1.4.3.3.Yakıt Tüketimi

Birçok araştırmacı yanma odası elemanlarının izolasyonunun yakıt tüketimine etkisi üzerine deneyler ve analizler yapmış ve DIKM’lerde yakıt tüketiminde azalmanın meydana geldiğini bildirmişlerdir. Yakıt ekonomisinde meydana gelen bu ilerlemeler %2-12 oranlarında değişmekte olup bunun sebebi de silindir komponentlerindeki izolasyona bağlanmaktadır. Bir araştırmada yakıt tüketiminde meydana gelen bu azalmanın yüzey

sıcaklığındaki artışla sürtünmenin azalmasına bağlamıştır ve termodinamikle alakalı, aynı zamanda yakıt tüketimi ile ilgili ölçülebilir bir gelişmenin olmadığını bildirmiştir. Genel olarak konvansiyonel soğutmalı motorlarla karşılaştırıldığında; doğal soğutmalı DIKM'lerde %0-10 oranında daha fazla, turbo şarjlı DIKM'lerde %0-10 ve turbobileşimli DIKM'lerde ise %0-15 oranlarında daha az yakıt tüketimi olduğu bildirilmiştir[42].

1.4.3.4. Püskürtme Karakteristiklerinin DIKM'lerin Performansına Etkisi

Ağır yük dizel motorlarında temel fiziksel faktörler olarak havanın hareketinden daha ziyade momentum ve püskürtülen yakıtın enerjisi öne çıkmaktadır. Bu sebeple ağır yüklü soğutmasız DIKM'lerin yakıt püskürtme sisteminin optimize edilmesi gerekmektedir

DIKM'lerin yakıt ekonomi seviyesi, su soğutmalı motorların orta yük seviyesiyle aynı orandadır. Bu düzey yüksek yük şartlarında belirgin olarak kötüye gitmektedir. Bunun sebebi de yanma odası duvarlarındaki ısının yükselmesi ve ısınan enjektör memesinin yakıt viskozitesini düşürmesinden kaynaklandığı bildirilmektedir. Bunun neticesinde ağır sızıntı, yakıtın nozulun içerisine girerek enjeksiyon zamanını uzatmasına sebep olmaktadır. Farklı enjektör tip ve konfigürasyonlarıyla daha iyi veya eşdeğer yakıt tüketimlerine de ulaşılabilir. Enjeksiyon zamanının uygun bir şekilde ayarlanması izolasyonun ısı dağılım oranındaki kötü etkisini kısmen dengeleyebilmektedir. Ayrıca püskürtme basıncı ve oranı da izolasyonun istenmeyen etkilerini dengeleyebilir.

1.4.4. İzolasyon Emisyon Üzerindeki Etkileri

1.4.4.1. Yanmamış Hidrokarbonlar (UBHC)

DIKM'ler de meydana gelen yanmamış HC emisyonundaki azalma; kısalmış sönüm aralığı ile ilgilidir. DIKM'lerin yanma odası duvarlarının ve içerdeki gazların yüksek sıcaklığı, oksidasyon reaksiyonlarının tam olarak bitmesine yardımcı olur. Birçok araştırmacıda yaptıkları deneysel çalışmalarda bunu ispat etmişlerdir. Ancak bir kısım araştırmacıda bunun tam aksine HC emisyon miktarlarının arttığını gözlemlemiş ve bunu da yanma difüzyonunun bozulmasına bağlamışlardır. Yüksek duvar sıcaklıklarından dolayı kayganlaştırıcı yağın yanması da yanmamış HC'lerin seviyesinin artmasının sebeplerinden biri sayılmaktadır.

1.4.4.2.Karbonmonoksit (CO)

Yanmamış hidrokarbon miktarının azalmasına benzer sebepler CO içinde geçerlidir. Birçok araştırmacıda buna benzer sonuçlar ortaya koymuştur ve bunun sebebini de yanma odasının duvarlarının ve gaz sıcaklıklarının yüksekliğine bağlamışlardır. İzole edilen motorun ön karışımli yanma seviyesinin azalması, ilk olarak meydana gelen CO emisyonunu azaltır ve yanma difüzyonu boyunca oluşan yüksek sıcaklıklar CO'nun oksidasyonunu hızlandırmaktadır.

1.4.4.3.Azotoksitler (NOx)

NOx emisyonu havanın içindeki Azot ve Oksijeni kapsayan zincirleme reaksiyonlar sonucunda oluşur. Bu reaksiyonlar yüksek sıcaklıkla alakalı reaksiyonlardır. Dizel motorların sıkışan havayla çalışmasından dolayı, NOx emisyonları gaz sıcaklığının ve Azot'un içerde kalma süresinin sonucudur. Son zamanlarda yapılan çalışmaların çoğu DIKM'lerin NOx emisyonlarının su soğutmalı motorlarındkinden daha yüksek olduğunu göstermiştir. Bunun sebebini de yüksek yanma sıcaklığına ve daha uzun yanma süresine bağlamışlardır.

Alkidas araştırmasında DIKM'lerde NOx emisyonunun oluşumunun esas kontrol faktörünü yanma yayılmasındaki artış olarak bildirmiştir. Bir kısım araştırmacıda, çalışmalarında NOx miktarının azaldığını ve bununda tutuşma gecikme süresindeki kısalmadan kaynaklandığını belirtmiştir[42].

1.4.4.4.İs ve Partikül

DIKM'lerin standart motorlara göre yüksek gaz sıcaklığı ve yüksek yanma duvarı sıcaklığına sahip olması nedeniyle daha az is ve partikül üretirler. Yakın zamanda yapılan çalışmaların bir kısmında is ve partikül emisyonlarının yüksek, bir kısmında ise düşük çıktığı gözlemlenmiştir. Yapılan bir çalışmada is emisyonunun belirgin bir şekilde düşük çıktığı ve bunun sebebinin de, yüksek yanma sıcaklığıyla meydana gelen basıncın yoğun türbülansa neden olmasına ve bu yoğun türbulasyonunda is oksidasyonu artırmasına bağlamıştır[42]. Yapılan bir diğer çalışmada ise is miktarının yüksek çıktığı bunun sebebinin de yüksek sıcaklıklardaki artan yağ tüketiminin sonucu olarak oluştuğunu bildirilmiştir. Ayrıca kısa tutuşma gecikmesi, fakir hava yakıt karışımı da is ve partikül oluşumunun sebepleri arasında sayılmaktadır.

1.4.5.Termal Bariyer Kaplamalar

Termal bariyer kaplamalar, DIKM'lerde termal izolasyonu sağladıkları için artan bir öneme sahip komponentlerdir. Bir motorda kullanılacak izolasyon malzemesinin; düşük termal iletim, düşük özgül ısı, yüksek dayanım, yüksek kırılma tokluğu, yüksek termal şok direnci, düşük sürtünme ve aşınma direnci, yüksek sıcaklık kapasitesi, yüksek genleşme katsayısı, yüksek erozyon direncine ve erozyona karşı kimyasal durağanlık gibi özelliklere sahip olması şarttır.

1943'lerin ortalarında SiC ve Si₃N₄ gibi malzemeler, motorların silindir imalatında kullanılan ilk malzemeler olmuştur. Tane boyutundaki SiC, iyi aşınma direnci, yüksek sıcaklık kapasitesi, düşük sürtünme katsayısı, iyi korozyon direncine sahiptir. Bu yüzden DIKM'ler gibi yüksek sıcaklık uygulamalarında başarılı bir şekilde kullanılmışlardır. Aynı zamanda Si₃N₄, Al₂O₃-TiO₂, Aliminyum Magnezyum Silikat (AMS) gibi malzemelerde bu gruba girmekte olup özellikleri ise tablo1.5' de gösterilmiştir.

Tablo1.5. Seramik malzemelerin özellikleri

Malzeme	Son bükülme gerilimi (MPa)	Yoğunluk (g/ml)	1260 °C de Young modulu (GPa)	Termal genleşme katsayısı (300-1260° K 10 ⁻⁶ /K)	Isıl iletim katsayısı (W/m°K)
Si ₃ N ₄	300	3.1	300	3.2	12
SiC	450	3.15	400	4.5	40
AMS	20	2.2	12	0.6	1
ZrO ₂	300	5.7	200	9.8	2.5
Al ₂ O ₃ -TiO ₂	20	3.2	23	3.0	2

Seramik bir malzeme olan Zirkonya çok düşük termal iletim değeri, iyi dayanım ve metallere yakın termal genleşme katsayısı ile yüksek sıcaklıklara metallere göre daha iyi dayanım gösterir. Bununla birlikte tek dezavantajı artan ısı ile birlikte faz karakterlerinin değişmesidir. Bu faz değişimini elimine etmek , bu malzemelerin motorlarda kullanımını kolaylaştıracaktır.

Kısmi stabilizeli zirkonya (PSZ) meydana gelen bu faz değişimlerini önemli ölçüde azaltmak için geliştirilmiştir ve günümüzde sahip oldukları mükemmel izolasyon

karakteristikleri, yeterli dayanım karakteristikleri ve birçok metale yakın termal genleşme karakteristikleri nedeniyle adyabatik motor uygulamalarında istenen malzeme konumuna gelmiştir.

M.Marmarch yaptığı araştırmada sertleştirilmiş kısmi stabizeli Zirkonya (PSZ) seramiklerinin geliştirilmiş motor malzemeleri için ve özellikle adyabatik motorlar için birçok avantaja sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca Magnezyum kısmi stabilizeli Zirkonyanın (Mg-PSZ) DIKM malzemesi içi uygun olduğunu bildirmiştir. Magnezyum ve Nikel, kısmi stabilizeli Zirkonyanın sırasıyla malzemenin dayanım ve süneklik karakterlerini iyileştirmektedir. Magnezyum kısmi stabilizeli zirkonyanın (Mg PSZ) sahip olduğu termal genleşme katsayısı ve elastisite modülü, demir ve çeliğinkine yakın olup, içten yanmalı motorlarda yüzey astarları, valf yuvaları, sıcak plakalar, manevela araları ve silindirdeki piston tepeleri için uygundur. MgPSZ %20-24 oranında magnezyum içerir ve tüm PSZ malzemeleri içinde en yüksek kırılma tokluğuna sahip olan malzemedir.

Zirkonyanın stabilizasyonu, CaO, MgO ve Y_2O_3 eklenmesiyle de sağlanabilmektedir ancak bu iri taneli formasyonlar, malzemeye dayanıksız, sert ve zayıf termal şok direnci kazandırmaktadır. %20 Yttria veya %5 kalsiya'lı alaşımlar tam stabilizeli zirkonya oluşturmaktadır ve iyi termal genleşme katsayısına sahiptir.

Gelecek için ümit vadeden bir malzemedir Syalon (Si-Al-O-N) seramikleridir. Silikon nitrürde bahsedilen bu sınıflandırmanın bir türevidir ve bu malzemenin en büyük avantajı yüksek sıcaklıklarda düşük sürtünme karakteristikleridir. Ayrıca malzeme düşük yoğunluk ve düşük sürtünme katsayısına sahiptir. Bu özelliği ile supap ve yatak gibi parçalarda kullanımı oldukça uygundur.

1.4.6.Ses-Gürültü

Seramikler genel olarak metallerle ve alaşımlarla karşılaştırıldığında, sahip oldukları düşük yoğunluk sebebiyle daha hafif malzemelerdir. Bu nedenle bu malzemelerin motor parçasında kullanımının motorun gürültüsünü düşüreceği beklenmektedir. Hafif malzemelerin motor sistemi içerisinde kullanımı vibrasyonu ve sürtünme yi de azaltacağından dolayı buna paralel olarak ses oluşumunu da düşürmektedir.

1.4.7.DIKM lar ve Yakıt Çeşitliliği

DIKM larda silindir içerisinde artan sıcaklık daha geniş oranda yakıt kullanımına imkan vermektedir. Silindir içerisinde meydana gelen 600 °C'nin üzerindeki sıcaklıklar daha

uçucu yakıtların otomatik olarak ateşlenmesine imkan vermektedir. Adyabatik motorların yüksek yanma duvarı sıcaklıkları, daha yüksek kompresyon dolum sıcaklıklarıyla birlikte tutuşma gecikmesinde birbirini takip eden düşüslere sebep olmaktadır. Kısa tutuşma gecikmesi yakıt çeşitliliğine imkan sağlamaktadır. Adyabatik motorların yüksek işlem sıcaklıkları, alkol, aromatik yağlar, hint yağı, gaz yağı ve düşük setana sahip yakıtların kullanımına imkan vermektedir[42].

1.5.Biyodizel

Biyodizel, kolza (kanola), ayçiçek, soya, aspir gibi bitkisel yağlı tohumlardan, kullanılmış atık kızartma yağlarından, hayvansal yağlardan ve her türlü biyolojik kökenli yağlardan bir katalizör eşliğinde kısa zincirli bir alkol ile (metanol veya etanol) reaksiyon sonucunda oluşan ve yakıt olarak kullanılan yağ asidi metil esterleri olarak ifade edilir[43].

Dizelle belli oranlarda karıştırılarak kullanılabilir. Bu oran; ekonomi, gaz emisyonu, yanma özelliği gibi birçok faktöre bağlıdır ve genelde %20 biyodizel + %80 dizel karışım kullanılır. Biyodizel bakterilerle ayrışabilen, zehirsiz, sülfürsüz ve hoş kokuludur. Bitkisel yağların metil veya etil esteridir. Bu konuda araştırma ve üretim yapan ülkelerin favori ürünü soya fasulyesidir. Elde edilen bitkisel veya biyolojik yağlar alkolle (genelde metanol) karıştırılır ve sodyum hidroksitle tepkime hızlandırılır. Kimyasal reaksiyon sonunda bir ester ve gliserin oluşur. Ester yakıt olurken gliserinde değerli bir ürün olarak birçok sektörde kullanılır

Biyodizel mevcut dizel motorlarda büyük çaplı bir modifikasyona ihtiyaç duyulmaksızın kullanılabilir alternatif bir dizel motor yakıtıdır. Ham petrolden üretilen motorine eşdeğer özelliklere sahip olduğundan, herhangi bir oranda ham petrol kökenli motorin (dizel yakıtı) ile karıştırılıp veya doğrudan yakıt olarak kullanılabilir Biyodizel doğrudan (%100) veya motorin ile karışımları halinde kullanılabilir. En yaygın kullanılan karışım oranı %20 biyodizel ve %80 motorin şeklindedir. Aynı zamanda biyodizel geleneksel ve motoru üzerinde herhangi bir değişime gidilmemiş dizel motorlarda kullanılabilir bilinen tek alternatif yakıt çeşididir [44].

Biyodizel, dizel ile karışım oranları bazında aşağıdaki gibi adlandırılmaktadır

B5	:	%	5	Biyodizel	+	%95	Dizel
B20	:	%	20	Biyodizel	+	%80	Dizel
B50	:	%	50	Biyodizel	+	%50	Dizel
B100 : %100 Biyodizel							

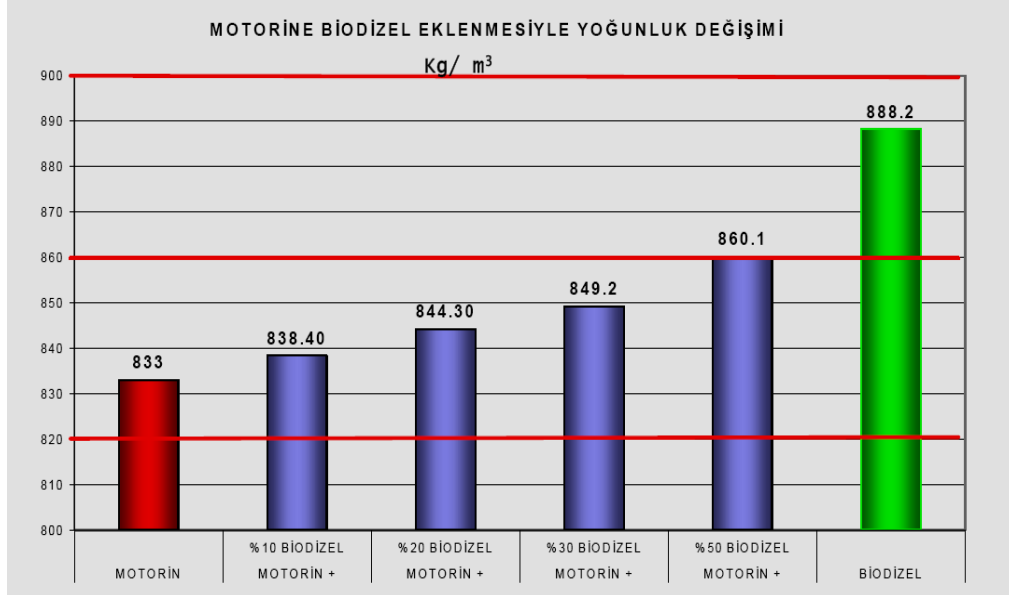
Literatür bilgilerine göre motorlarda bitkisel kökenli yağın yakıt olarak kullanımı Rudolf Diesel'in 10 Ağustos 1900 yılında Paris Fuarında sergilediği ve yerfıstığı yağı ile çalışmak üzere tasarladığı motora kadar uzanmaktadır. Rudolf Diesel o tarihte bitkisel yağlar için "Bitkisel yağlar önemli bir motor yakıtıdır. Bugün için önemsiz görünse de ileride önemi anlaşılacaktır." demiştir[49]. Bu fuarda, dizel motor hiçbir zorlukla karşılaşmadan belirtilen yağla çalıştırılmış ve yapılan testlerde özgül yakıt tüketimi 240 gr/BGh ve yağın ısı değeri 8600 kalori/kg olarak ölçülmüştür. Dizel motordaki benzer çalışmalar St. Petersburg'da bitkisel ve hayvansal yağlarla devam etmiştir. Motor için gerekli olan yüksek miktardaki yağlar özellikle Afrika'daki kolonilerden sağlanmıştır. Bitkisel yağlar I. Dünya Savaşı sırasında bazı ülkelerce acil durum yakıtı olarak kullanılmıştır. Yine bu yıllarda ikiz yakıt projeleri Ohio State Üniversitesinde pamuk ve mısır yağının petro dizel ile karışımı alanında yoğunlaşmıştır. Bugün biyodizel olarak bilinen yakıt ile ilgili ilk resmi doküman, 31 Ağustos 1937 de Brüksel Üniversitesinden G.Chavanne tarafından 422.87 patent numarası ile yapılan çalışmadır. Bu çalışmada biyodizel; Palm Yağı Etil Esteri olarak tanımlanmıştır. Burada asit katalizörlü transesterifikasyon yöntemi kullanılmıştır. Üretilen yakıt 1938 yazında Brüksel ile Leuven arasında çalışan ticari araçlarda kullanılmıştır. Bu kullanımda petrodizelden yegane farklılık viskozite olarak değerlendirilmiştir. Viskoziteyi azaltmak adına ayçiçeği metil ester alanına çalışmalar yürütülmüştür. Etil ya da metil ester ismi 1988 yılında basılan bir makalede "biyodizel" olarak isimlendirilmiş ve bu terim dünya da yaygınlık kazanmıştır[45].

1.5.1. Biyodizel Teknik Özellikler

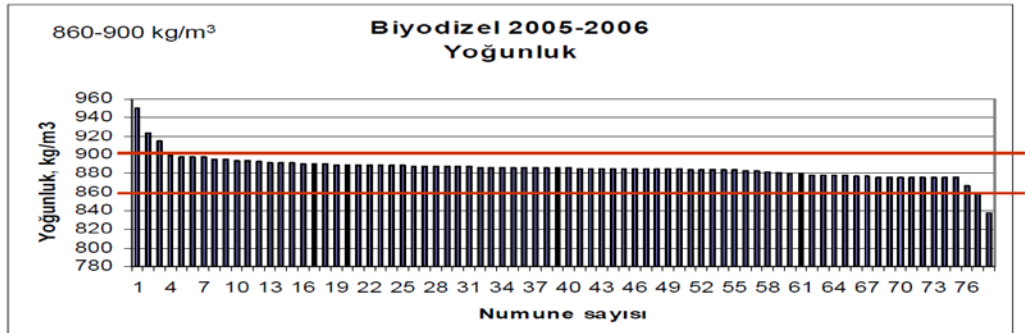
1.5.1.1. Yoğunluk

Bitkisel yağların yoğunluğu, genellikle yağ çeşidine göre değişmesine rağmen 15 °C'de 880-920 kg/m³ gelmektedir. Bu belirleme DIN EN ISO 3648 veya DIN EN ISO 12185 e

göre yapılmaktadır. Elde edilen biyodizelin yoğunluğu ise yağa göre düşmekte ve motorinin seviyesine inebilmektedir. Şekil 1.10 ve şekil 1.11’de biyodizelle dizel yakıt eklenmesiyle yoğunluk değişimi görülmektedir.



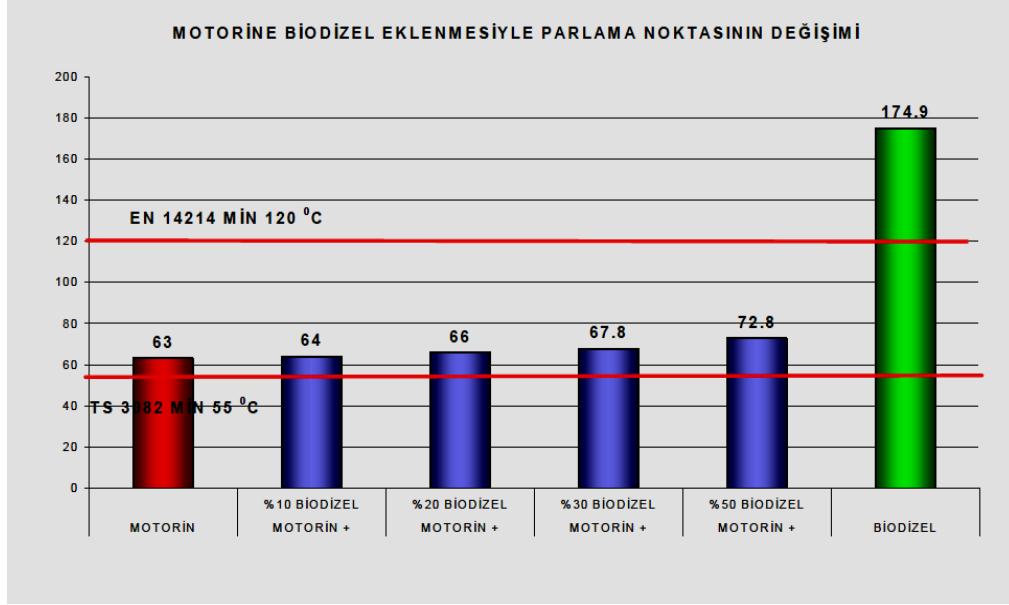
Şekil 1.10. Petrodizelle biyodizel eklenmesiyle yoğunluk değişimi (ODTÜ Petrol araştırma merkezi biyodizel numune analiz sonuçları 2005-2006)



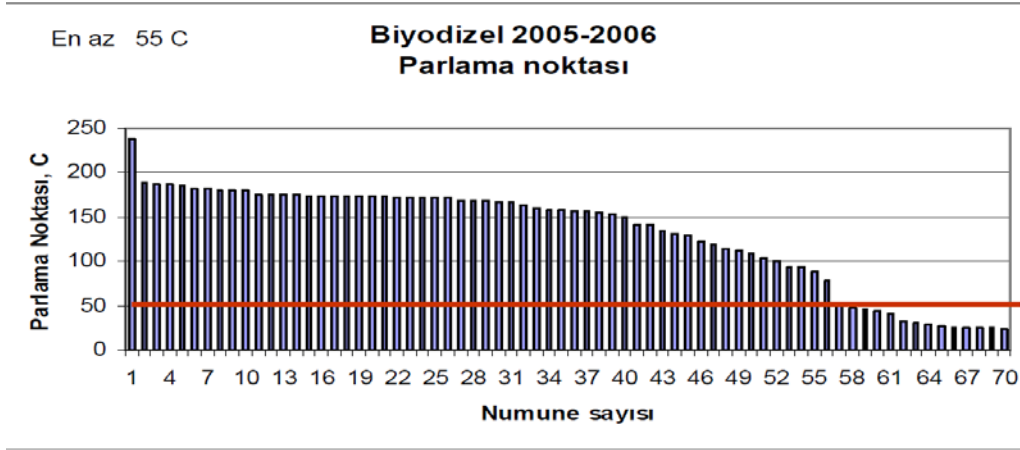
Şekil 1.11. Biyodizel yoğunluk değerleri (ODTÜ Petrol araştırma merkezi biyodizel numune analiz sonuçları 2005-2006)

1.5.1.2. Parlama Noktası

Parlama noktası, yakıtların risk sınıflamasında çok önemlidir. Taşıma ve depolanma için parlama noktasının yüksek olması istenir. Dizel yakıtının parlama noktası 47 °C olmasına rağmen; bitkisel yağların parlama noktası 300 °C den yukarıda, biyodizelin parlama noktası ise 120-220 °C civarındadır. Şekil 1.12. ve şekil 1.13.’te biyodizel parlama noktaları görülmektedir. Biyodizelin alevlenme noktası, dizelden daha yüksektir (>110 °C). Bu özellik biyodizelin kullanım, taşınım ve depolanmasında daha güvenli bir yakıt olmasını sağlamaktadır [43].



Şekil1.12. Petrodizele biyodizel eklenmesiyle parlama noktası değişimi (ODTÜ Petrol araştırma merkezi biyodizel numune analiz sonuçları 2005-2006)



Şekil 1.13. Biyodizel parlama noktası (ODTÜ Petrol araştırma merkezi biyodizel numune analiz sonuçları 2005-2006)

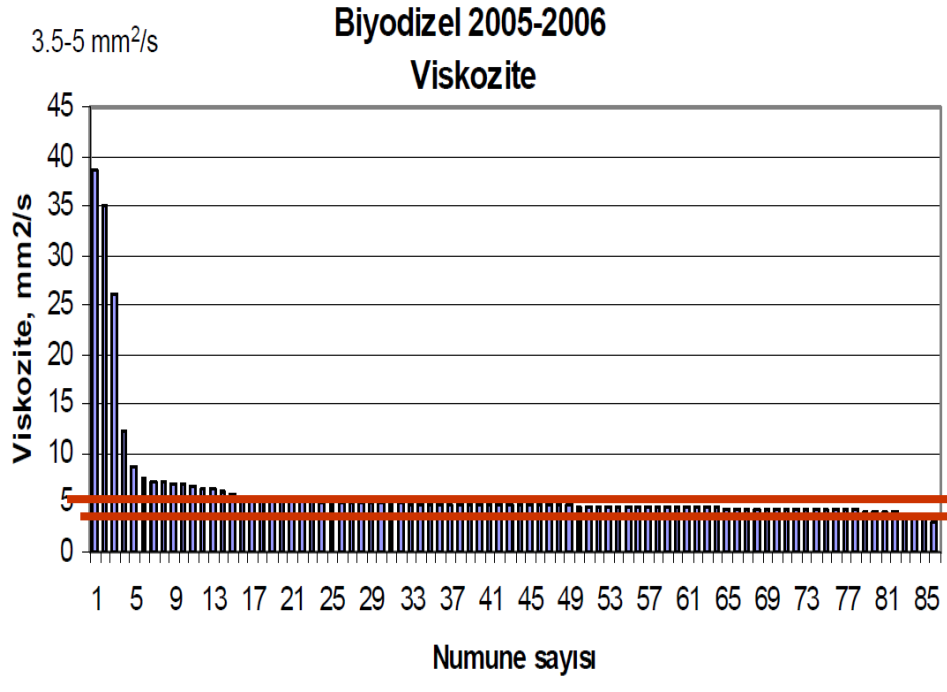
1.5.1.3. Kalori Değeri (Isıl Değeri)

Isıl değer motorun optimum çalışması için önemlidir ve yakıt kalitesi kriteridir. Genellikle biyodizelin ısı değeri 35 Mj/kg'dan daha büyüktür.

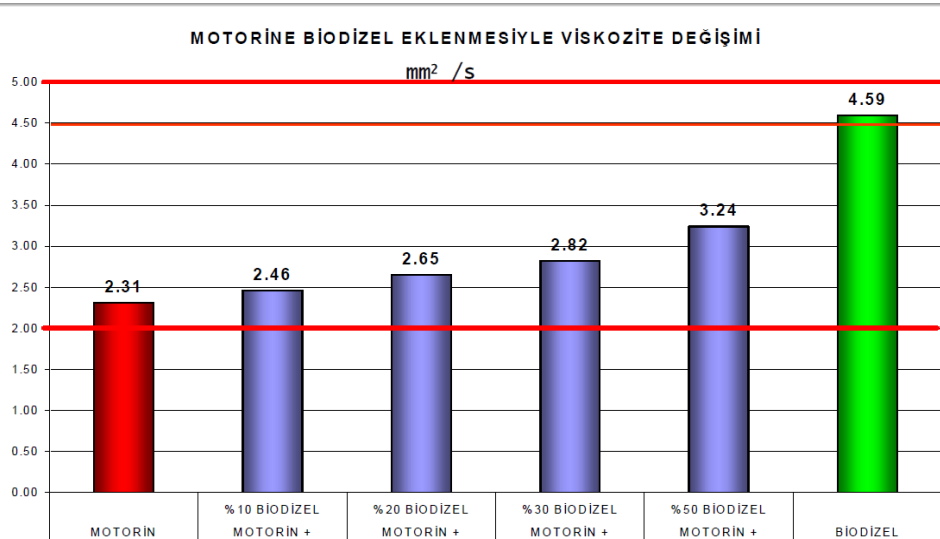
1.5.1.4. Kinematik Viskozite

Kinematik viskozite yoğunluğa benzer şekilde doğal bir özelliktir ve biyodizelin karakteristik özelliğidir. Yüksek viskozite yakıtın fakir atomizasyonuna, kötü yanmaya, enjektörlerin tıkanmasına, segmanlarda karbon birikmesine ve yağlama yağının

bozulmasına sebep olmaktadır. Yüksek viskozite pompalanabilmeyi ve enjektörlerin püskürtmesini azaltır. Viskozite sıcaklığa bağlıdır. Biyodizelin viskozite değeri 40 °C’de 3,5-6 mm²/s arasında değişmektedir. Şekil 1.14.ve Şekil 1.15’te sırasıyla Petrodizele biyodizel eklenmesiyle viskozite değerlerindeki artış gösterilmektedir.



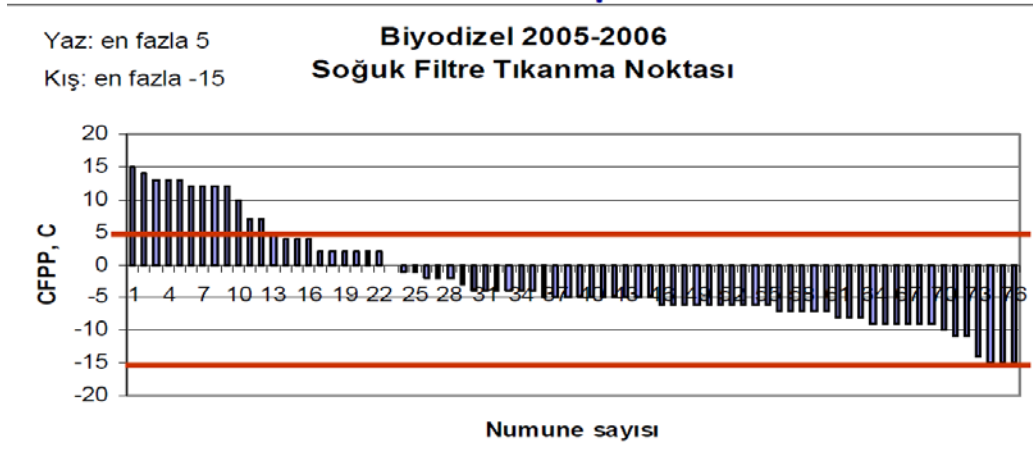
Şekil 1.14. Biyodizel viskozite değerleri (ODTÜ Petrol araştırma merkezi biyodizel numune analiz sonuçları 2005-2006)



Şekil 1.15. Petrodizele biyodizel eklenmesiyle viskozite değişimi. (ODTÜ Petrol araştırma merkezi biyodizel numune analiz sonuçları 2005-2006)

1.5.1.5. Soğukta Filtre Tıkanması

Dizel motor yakıtları için yapılan önemli testlerden birisi, soğukta filtre tıkanma noktasıdır. Bu özellik bilhassa soğuk şartlarda dizel motorlar için hayati önem taşımaktadır. Bu özellik standart yöntemlerle belirlenmektedir. Şekil 1.16'da soğukta filtre tıkanma noktası maksimum olarak 15 Nisan-30 Eylül arasında 0 °C, 1 Ekim-15 Kasım arasında -10 °C, 16Kasım-28 Şubat arasında -20 °C, 1 Mart-14 Nisan arası -10 °C olarak verildiği görülmektedir [44].



Şekil 1.16. Soğukta filtre tıkanma noktası (ODTÜ Petrol araştırma merkezi biyodizel numune analiz sonuçları 2005-2006)

1.5.1.6. Soğukta Akış Özelliği

Dizel yakıtı için soğukta filtre tıkanması veya akma noktası dizel yakıtına benzer şekilde tayin edilebilmektedir. Biyodizel ve biyodizel-motorin karışımları, motorinden daha yüksek akma ve bulanma noktasına sahiptir. Bu durum yakıtların soğukta kullanımında sorun çıkarabilmektedir. Akma ve bulanma noktaları uygun katkı maddelerinin (anti-jel) kullanımı ile düzenlenebilmektedir. Biyodizel-motorin karışımları 4°C üzerinde harmanlama ile hazırlanmalıdır. Soğukta harmanlamada biyodizelin motorin üzerine eklenmesi, sıcakta harmanlamada ise karışımda daha fazla olan kısmın az kısım üzerine eklenmesi önerilmektedir. Eğer harmanlamada soğumaya bağlı olarak kristal yapılar oluşursa, harmanın tekrar normal görünümünü kazanması için bulutlanma noktası üzerine ısıtılması ve karıştırılması gerekmektedir [46].

1.5.1.7. Setan Sayısı

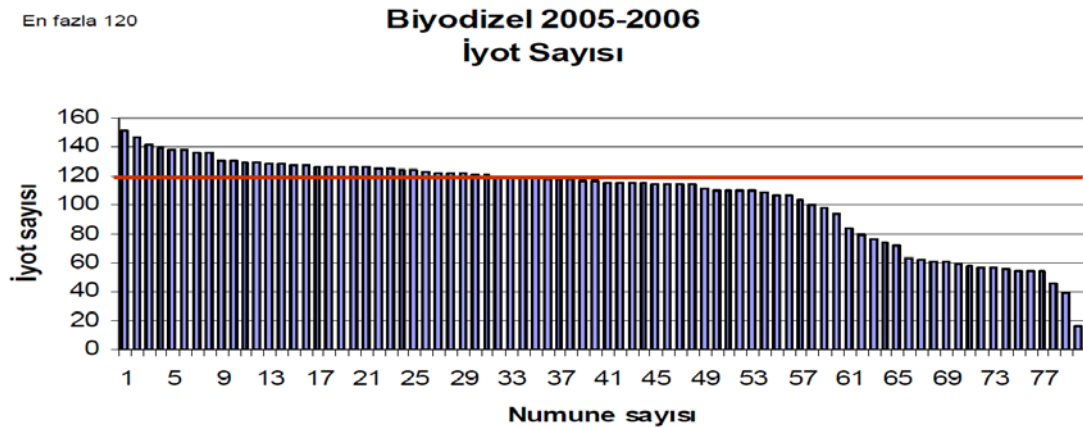
Yakıtın kendiliğinden tutuşabilirliğinin bir ölçüsüdür. Biyodizelin setan sayısı elde edildiği ham maddeye bağlı olarak 40 ile 49 arasında değişmektedir. Motor performansı ve egzoz gazı emisyonları ile yayılan gürültü seviyesi için önemli bir karakteristik özelliktir. Setan sayısının ölçülmesi özel motorlar (sıkıştırılma oranı değiştirilebilir motor) yardımı ile olmaktadır. Biyodizelin setan sayısı dizelin setan sayısından daha yüksek olduğu için motor daha az vuruntulu çalışmaktadır.

1.5.1.8. Karbon Artığı

Karbon artığı enjektör deliklerinden veya yanma odasında karbon birikmesine sebep olmaktadır. Denemeler biyodizelin pratikte yok denecek kadar az karbon artığı bıraktığı ve maksimum değerin kütlenin % 0.4'ü olduğunu göstermiştir.

1.5.1.9. İyot Sayısı

Yağın toplam doymamışlığın bir ölçüsü olan, İyot sayısı bitkisel yağların özelliği ve çift bağ sayısına göre değişmektedir. Yüksek iyot sayılı yakıtlar enjektör deliklerinde tıkanmalara veya yanma odasında polimerleşmeye ve hasara sebep olabilmektedir. Şekil 1.17'de iyot sayısı görülmektedir.

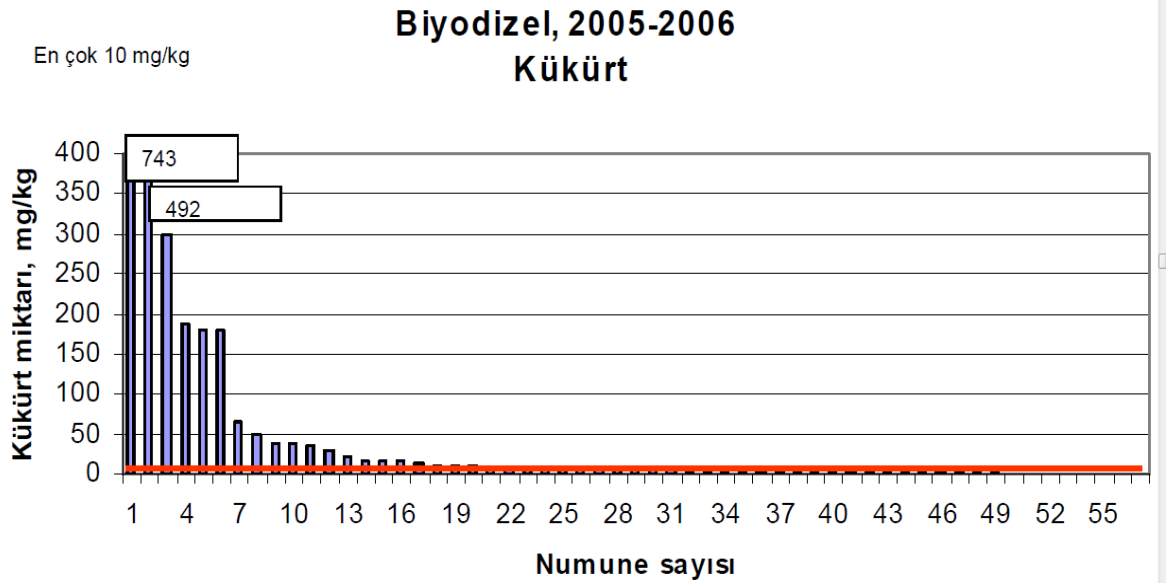


Şekil 1.17. Biyodizel iyot sayısı (en fazla 120) (ODTÜ Petrol araştırma merkezi biyodizel numune analiz sonuçları 2005-2006)

1.5.1.10. Kükürt İçeriği

Bitkisel yağların kullanılması durumunda dizel yakıtıyla karıştırıldığı zaman kükürt miktarlarında azalma olduğu Şekil 1.18'de görülmektedir. yakıtta yağlayıcılık özelliği kazandıran kükürt oranının uygulamaya konulan yeni emisyon standartlarında 10 ppm'den de aşağıya çekilmesinin hedeflenmesi, motorine biyodizelin katılmasını zorunlu hale

getirmektedir. Biyodizel kullanımı ile motorine kıyasla, CO₂ emisyonunda %80, yanmamış hidrokarbon emisyonunda %90, aromatik hidrokarbonun emisyonunda ise %48-90 oranlarında azalma saptanmıştır. Biyodizel kükürt içermediğinden kükürtdioksit emisyonu oluşturmaz. Bu çok önemli bir avantajdır. Bu emisyon özellikleri kanser yapıcı etkenleri azalmakta ve kanser riski % 90'a varan oranlara düşmektedir. Biyodizel ağırlıkça %11 oksijen içerir. Biyodizel, motorine göre daha iyi bir yağlayıcı olduğundan motorun ömrünü uzatır. Biyodizelin biyolojik olarak kolay ve hızlı parçalanabilir olması, kullanım ve taşımada emniyet sağlar; sofra tuzundan on kat daha az toksittir.



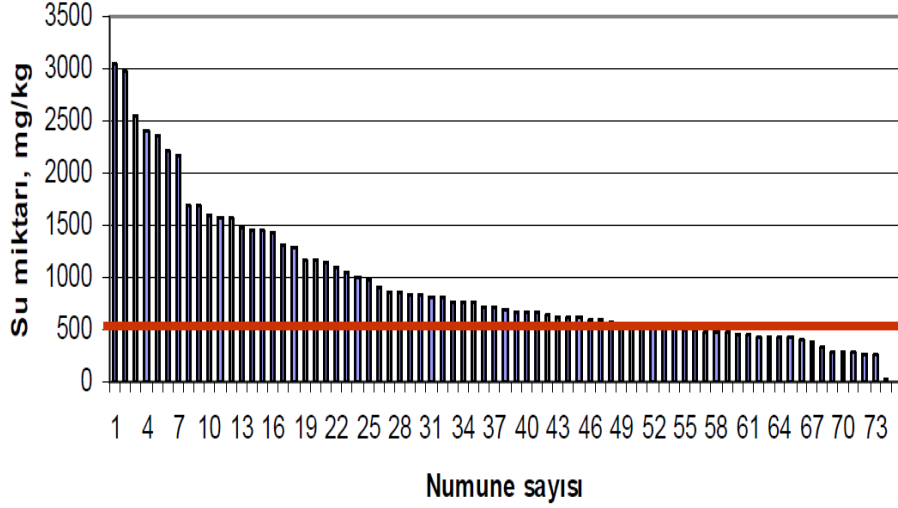
Şekil 1.18. Biyodizel kükürt içeriği (en çok 10 mg/kg)(ODTÜ Petrol araştırma merkezi biyodizel numune analiz sonuçları 2005-2006)

1.5.1.11.Su İçeriği

Bitkisel yağlar temelde su içermezler.Ancak bitkisel yağların üretimi ve depolanması esnasında su karışabilmektedir.Yakıtların belli oranda su içermeleri motor için bir dezavantaj değildir. Su/yakıt emülsiyon oranının uygun olması durumunda yanma sıcaklığını ve NOx emisyonlarını azaltabilir. Ancak yüksek basınçlı enjeksiyon sistemlerinde su yakıttan ayrılarak enjektör sisteminde bölgesel çürümelere sebep olabilir. Bitkisel yağlar için belirlenen maksimum değer kütlenin % 0,048'i geçmemelidir. Şekil 1.19'da biyodizel de bulunan su içeriği görülmektedir

En çok 200 mg/ kg

Biyodizel 2005-2006 Su Miktarı



Şekil 1.19.Biyodizel su içeriği (ODTÜ Petrol araştırma merkezi biyodizel numune analiz sonuçları 2005-2006)

1.5.1.12.Depolama ve Taşıma

Motorin için gerekli depolama yöntem ve kuralları biyodizel için de geçerlidir. Biyodizel temiz, kuru, karanlık bir ortamda depolanmalı, aşırı sıcaktan kaçınılmalıdır. Depo tankı malzemesi olarak yumuşak çelik, paslanmaz çelik, florlanmış polietilen veya florlanmış polipropilen kullanılabilir [46].

Biyodizel taşıma ve depolama açısından güvenlidir. Ancak biyodizelin kara yolundaki asfaltı yumuşatma ve eritme etkisi vardır.Bu nedenle depolara ve tanklara biyodizel doldurulurken dikkatli olunmalıdır. Petrodizelin taşınması sırasında güvenliğini arttırmak amacıyla içerisine belli oranlarda biyodizel karıştırılması uygulamaları yapılmaktadır.

Biyodizelin depolanmasında herhangi bir sorunla karşılaşmaz. Biyodizelin soğuk iklim şartlarında depolama kurallarına uymak şartıyla en az altı ay süreyle depolanabilir. Depolama için petrodizelin depolandığı tanklar ve ortamlar kullanılabilir. Depolama yapmadan önce, depolama tankında eğer su varsa bu uzaklaştırılmalıdır. Ayrıca depolama tankındaki bakır, pirinç ve bronz malzemeler çelik yada alüminyum olanlarla değiştirilmelidir. Uzun süreli depolanmış biyodizelin, kullanımından önce pH'si test edilmeli ve 7 ile 10 sınırları arasında olmasına dikkat edilmelidir. Yine aynı şekilde uzun süre beklemiş biyodizelin kullanımından önce özgül ağırlığının 0,9'u aşp aşmadığı belirlenmelidir. Biyodizel tankları mümkünse tamamen dolu tutulmalıdır. Bunu

yapmaktaki amaç, biyodizel ile havanın temasını en aza indirmektir. Eğer biyodizel nemli ve ılık iklimde depolanacak ise biyodizel depo tanklarına katkı maddesi ilave etmek gereklidir. Biyosit olarak adlandırılan ve sıvı formda bir zehir olan bu madde, depo içerisindeki mikro organizmaları yok etmede kullanılır. Yakıt tankının içerisine ilave edilecek biyosit miktarı 50-60 gr dır. Dökülen bu miktar depo 3 defa boşalana kadar etkisini sürdürür. Eğer dizel motor iki haftadan daha uzun bir süre kullanılmayacak ise depo yakıtla doldurulur ve depo içerisine yine 50-60 gr biyosit veya biyostat konulur. Bakteri gelişimini engelleyen biyostat özellikle, ılık ve nemli bölgelerde bakteri gelişimini mümkün mertebe engellemek için yakıt içerisine periyodik olarak ilave edilmelidir

1.5.2.Biyodizel Uluslararası Standartları

1991 yılı içinde Almanya DIN E 51606 standardının düzenlenmesi için bir çalışma yapılmış ve Fransa, İtalya, İsveç ulusal standart normları belirlenmiştir. Avrupa standardına paralel olarak ABD biyodizel standardını American Society for Testing and Materials kuruluşu ASTM D 6481-02 kodu altında tamamlamıştır. En son biyodizel için tasarı standardı CEN için tamamlanmıştır ve Avrupa’da geçerlidir (EN 14214 -2002) [47]. Tablo1.6’da biyodizel EN 14214 standartları görülmektedir.

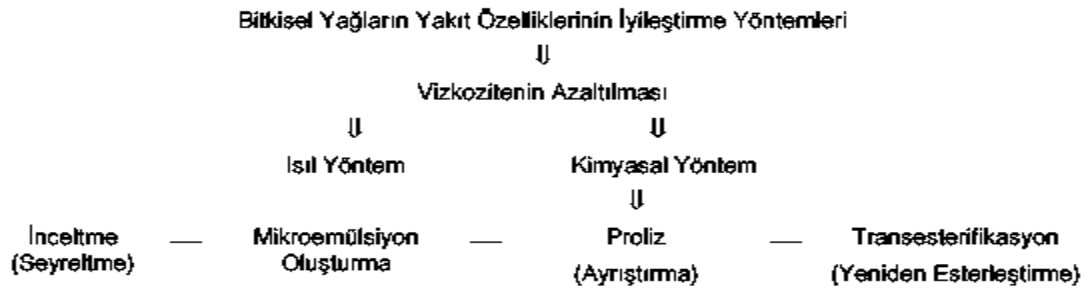
Tablo1.6. Biyodizel için EN 14214 standartları

Özellik	Birim	Sınırlar		Deney Yöntemi ^a
		En az	En çok	
Ester muhtevası ^a	% (m/m)	96,5 ^b	-	EN 14103
Yoğunluk ^c , 15°C'ta	kg/m ³	860	900	EN ISO 3675 EN ISO 12185
Viskozite ^d , 40°C'ta	mm ² /s	3,50	5,00	EN ISO 3104
Parlama noktası	°C	120	-	EN ISO 3679 ^e
Kükürt muhtevası	mg/kg	-	10,0	EN ISO 20846 EN ISO 20884
Karbon kalıntısı ^f (%10 damıtma kalıntısında)	% (m/m)	-	0,30	EN ISO 10370
Setan sayısı ^g		51,0	-	EN ISO 5165
Sülfatlanmış kül muhtevası	% (m/m)	-	0,02	ISO 3987
Su muhtevası	mg/kg	-	500	EN ISO 12937
Toplam kirlilik ^h	mg/kg	-	24	EN 12662
Bakır şerit korozyonu (50°C'ta 3 saat)	derece	Sınıf 1		EN ISO 2160
Oksidasyon kararlılığı, 110°C'ta	h	6,0	-	EN 14112
Asit sayısı	mg KOH/g	-	0,50	EN 14104
İyot sayısı	g iyot/100 g	-	120	EN 14111
Linolenik asit metil esterleri	% (m/m)	-	12,0	EN 14103
Poli doymamış (>=4 çift bağ) metil esterleri ⁱ	% (m/m)	-	1,0	
Metanol muhtevası	% (m/m)	-	0,20	EN 14110
Monoglisericit muhtevası	% (m/m)	-	0,80	EN 14105
Diglisericit muhtevası	% (m/m)	-	0,20	EN 14105
Triglisericit muhtevası ^j	% (m/m)	-	0,20	EN 14105
Serbest gliserol ^j	% (m/m)	-	0,02	EN 14105 EN 14106
Toplam gliserol	% (m/m)	-	0,25	EN 14105
Grup I metaller (Na+K) ^k	mg/kg	-	5,0	EN 14108 EN 14109
Grup II metaller (Ca+Mg) ^l	mg/kg		5,0	prEN 14538
Fosfor muhtevası	mg/kg	-	10,0	EN 14107

1.5.3.Biyodizel Üretimi

Biyolojik kaynaklardan elde edilen yağların yakıt olarak kullanılabilmesi için öncelikle yüksek viskozite sorununun çözülmesi gerekmektedir. Bu durumda yüksek viskozite sorunu, ya motor üzerinde bir takım değişiklikler yapılarak yada ham yağlara çeşitli ısı ve kimyasal işlemler uygulanarak aşmaya çalışılmaktadır. Yakıt olarak kullanılacak yağlardaki ilk işlem yoğunluğunu azaltmaktır. Yağları alkolle esterleme işlemi alkolün katalizör etkisinden de faydalanmak amacıyla tercih edilmektedir. Bu işlemlerin sonucunda her 100 birim biyodizel yakıt elde edilirken 11 birim gliserin ortaya çıkmaktadır. Atık gibi görünen gliserin birçok sanayi alanında kullanılmaktadır. Diğer bir yakıt üretim yöntemi ise Kolza (Brassica Napus: Avrupa kökenli sarı çiçekli yağlı bir yem bitkisi) tohumlarının soğuk preslenmesidir. Bu yöntemde gliserin yan ürünü ortaya çıkmaz. Kanada'nın Su ile Kimyasal İşlem ismini verdiği farklı bir yöntemi de vardır

Motorlarda yakıt olarak kullanılacak yağların özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla uygulanan baslıca yöntemler; seyreltme, mikro emülsiyon oluşturma, piroliz ve transesterifikasyon yöntemleridir. Şekil 1.20'de görülmektedir.



Şekil 1.20. Yakıt özelliklerini iyileştirme yöntemleri

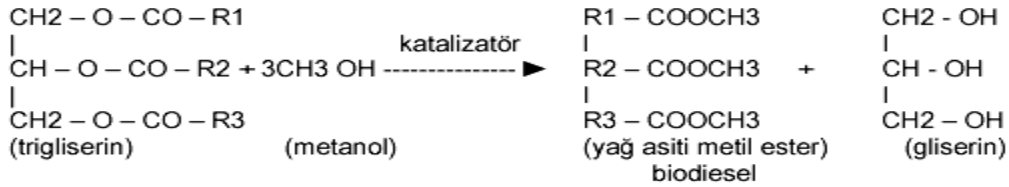
Dünyada en yaygın olarak uygulanan yöntem transesterifikasyon yöntemidir. Bu yönteme göre biyodizel; kolza (kanola), ayçiçeği, soya, aspir, fındık gibi yağlık ürünlerden elde edilen yağların veya hayvansal yağların bir katalizör (sodyum veya potasyum hidroksit) eşliğinde kısa zincirli bir alkol ile (metanol veya etanol) transesterifikasyon (esterleştirme) reaksiyonuna girmesiyle açığa çıkan ve yakıt olarak kullanılan bir üründür. Atık kızartma yağları da biyodizel hammaddesi olarak kullanılabilir. Biyodizel saf olarak veya her oranda motorin ile karıştırılarak, motor üzerinde herhangi modifikasyona gerek kalmadan veya küçük değişiklikler yapılarak yakıt olarak kullanılabilir [48].

1.5.3.1. Tüketici Ölçekli Biyodizel Üretim Sistemi

Biyodizel üretiminin çeşitli metotları olmakla birlikte günümüzde en yaygın olarak kullanılan yöntem transesterifikasyon yöntemidir. Yöntem Şekil 1.21’de gösterilmektedir. Transesterifikasyon; yağ asitlerinin (bitkisel yağlar, evsel atık yağlar, hayvansal yağlar) bazik bir katalizör eşliğinde alkol (metanol, etanol vb.) ile esterleşme reaksiyonudur [43].

1.5.3.2. Transesterifikasyon

Bitkisel yağlardan biyodizel elde etme işlemi transesterifikasyon olarak adlandırılır. Transesterifikasyon, bir tür esterin başka tür bir estere dönüştürülmesi işlemidir. Ester başka bir molekülle bağ yapabilen bir hidrokarbon zinciridir



Şekil 1.21. Transesterifikasyon işlemi

Tek bir bitkisel yağ molekülü, bir gliserin molekülüne tutunmuş üç esterden oluşmaktadır. Bir bitkisel yağ molekülünü benzetmek üzere üç ayaklı bir ahtapotu beynimizde canlandırabiliriz. Ahtapotun başı gliserin ve üç ayağı da esterlerdir. Bitkisel yağlar aynı zamanda trigliserid (triglyceride) olarak da adlandırılırlar. Buradaki tri üç ester ve gliserid de gliserini işaret eder. Bitkisel yağ molekülünün yaklaşık %20’si gliserindir. Gliserin, gliserol ve gliserid olarak da adlandırılırlar. Bitkisel yağ bünyesindeki gliserin yağın kalın (yüksek viskozite) ve yapışkan olmasına neden olur. Transesterifikasyon esnasında, bitkisel yağ bünyesindeki gliserin uzaklaştırılarak yağın incilmesi yani viskozitenin düşmesi sağlanır.

1.5.3.3. Alkol

Biyodizel elde etmek için, bitkisel yağ içerisindeki esterler gliserinden ayrıştırılırlar. Esterler biyodizel yakıtının temelini oluştururlar. Transesterifikasyon işlemi esnasında bitkisel yağın gliserin bileşeni alkol ile yer değiştirir. İşlem esnasında hem etil alkol (etanol) hem de metil alkol (metanol) kullanılabilir. Etanol tahılgillerden elde edilir. Metanol, kömür, doğal gaz veya odundan elde edilen bir alkoldür. Biyodizel üretiminde, daha kararlı biyodizel elde etme açısından metanol tercih edilmektedir. Öte yandan metanol lastik aksamı çözmekte ve insanlar tarafından solunduğunda ölümcül vakalara neden olmaktadır, bundan ötürü metanol kullanımı esnasında gerekli önlemler alınmalıdır. Metil Esterler ifadesi; metanol ve bitkisel yağdan elde edilen biyodizel anlamına gelir. Etil Esterler ifadesi, etanol ve bitkisel yağdan elde edilen biyodizel anlamına gelir. Alkali Esterler ifadesi, bitkisel yağ esterlerinin ve alkolün herhangi bir çeşidinin birleşimi anlamına gelmektedir. Hangi tür alkol ve bitkisel yağ kullanıldığına bakılmaksızın, biyodizel reaksiyonu trigliserid molekülünün üç ester ve bir gliserin molekülüne ayrılması temeline dayanır. Üç ester molekülünün her biri bir miktar alkol ile bağ yapar.

1.5.3.4. Katalizör

Trigliseridleri ayrıştırmak veya bitkisel yağı parçalamak için reaksiyonda bir katalizör yer alır. Katalizör diğer maddeler arasındaki reaksiyonu hızlandırmak için kullanılan bir maddedir. Biyodizel reaksiyonu için sodyum hidroksit (NaOH) veya potasyum hidroksit (KOH) katalizör olarak kullanılabilir. Sodyum hidroksit beyaz renkli bir kimyasal madde olup aynı zamanda kostik soda olarak da adlandırılır. Sodyum hidroksitin bulunmadığı durumlarda yerine potasyum hidroksit katalizör olarak kullanılabilir. Her iki katalizör de tehlikeli kimyasallar olup dikkatli bir şekilde kullanılmalıdır. Her iki katalizör, toz, taneli veya tablet şeklinde olabilir. Sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit deriye ve gözlere hasar verebilir ve ağız veya solunum yoluyla alındığında akciğerlere zarar verebilir. Biyodizel reaksiyonu için kullanılan katalizör, trigliseridleri kırarak esterlerin açığa çıkmasına yardımcı olur. Esterler açığa çıktıklarında alkol ile birleşirler. Katalizör, gliserin ile birleşerek dibe çöker [44].

1.5.4.Biyodizel Üretimi İşlem Basamakları

1.5.4.1. Alkol ve Katalizörün Karıştırılması

Katalizör tipik olarak sodyum hidroksit (kostik soda) veya potasyum hidroksittir. Katalizör standart bir karıştırıcı ve mikser kullanılarak alkol içerisinde çözülür.

1.5.4.2. Reaksiyon

Alkol/katalizör karışımı kapalı reaksiyon kabı içerisine doldurulur ve bitkisel veya hayvansal yağ ilave edilir. Daha sonra alkol kaybını önlemek amacıyla sistem tamamen atmosfere kapatılır. Reaksiyon karışımı, reaksiyonu hızlandırmak amacıyla belli bir sıcaklıkta tutulur ve reaksiyon gerçekleşir. Önerilen reaksiyon süresi 1 ile 8 saat arasında değişmektedir ve bazı sistemler reaksiyonun oda sıcaklığında olmasını gerektirir. Hayvansal veya bitkisel yağların kendi esterlerine tamamen dönüştürülmesinden emin olunmasını sağlamak için normal olarak fazla alkol kullanılır. Beslemedeki hayvansal veya bitkisel yağların içerisindeki su ve serbest yağ asitlerinin miktarının izlenmesi konusunda dikkatli olunmalıdır. Serbest yağ asiti veya su seviyesinin yüksek olması sabun oluşumu ve gliserin yan ürününün alt akım olarak ayrılması problemlerine neden olabilir.

1.5.4.3. Ayırma

Reaksiyon tamamlandıktan sonra iki ana ürün gliserin ve biyodizeldir. Her biri reaksiyonda kullanılan miktardan arta kalan önemli miktarda metanol içerir. Gerek görülürse bazen reaksiyon karışımı bu basamakta nötralize edilir. Gliserin fazının yoğunluğu, biyodizel fazınınkinden çok daha fazla olduğundan bu iki faz gravite ile ayrılabilir ve gliserin fazı çöktürme kabının dibinden kolayca çekilebilir. Bazı durumlarda bu iki malzemeyi daha hızlı ayırmak amacıyla santrifüj kullanılır.

1.5.4.4. Alkolün uzaklaştırılması

Gliserin ve biyodizel fazları ayrıldıktan sonra her bir fazdaki fazla alkol bir flaş buharlaştırma veya distilasyon prosesi ile uzaklaştırılır. Diğer sistemlerde, önce alkol uzaklaştırılır ve sonra reaksiyon karışımı nötralize edilir ve gliserin ve ester fazları ayrılır. Her iki durumda da alkol distilasyon donanımı kullanılarak geri kazanılır ve tekrar kullanılır. Geri kazanılan alkol akımı içerisinde hiç su birikimi olmadığından emin olunmalıdır.

1.5.4.5. Gliserin Nötralizasyonu

Gliserin yan ürünü, kullanılmamış katalizör ve bir asit ile nötralize edilmiş sabunlar içerir ve ham gliserin olarak depolanmak üzere depolamaya gönderilir. Bazı durumlarda bu fazın geri kazanılması sırasında oluşan tuz, gübre olarak kullanılmak üzere geri kazanılır. Pek çok durumda tuz gliserin içerisinde bırakılır. Su ve alkol, ham gliserin olarak satışa hazır olan % 80-88 saflıkta gliserin elde etmek amacıyla uzaklaştırılır. Daha sofistike işlemlerde gliserin %99 veya daha yüksek saflığa kadar distillenir ve kozmetik ve ilaç sektörüne satılır.

1.5.4.6. Metil Ester Yıkama İşlemi

Gliserinden ayrıldıktan sonra biyodizel bazen kalıntı katalizör ve sabunları uzaklaştırmak amacıyla ılık suyla yavaşça yıkanır, suyu uzaklaştırılır ve depolamaya gönderilir. Bazı proseslerde bu basamak gereksizdir. Bu normal olarak, açık amber-sarı renkte, petrodizele yakın viskoziteli bir sıvı veren üretim prosesinin sonudur. Bazı sistemlerde de biyodizel distillenir ve renksiz bir biyodizel üretmek amacıyla küçük miktarlardaki renkli cisimleri uzaklaştırmak için ilave bir basamak daha yer alır.

1.5.5. Biyodizel ve Petrodizelin Karşılaştırılması

Biyodizelin yanması sonucunda çevreye atılan zararlı gazların dizel yakıtı göre egzoz duman gazlarını azaltır CO₂ miktarında %78 azalma %15 daha az CO, %27 daha az HC %22 daha az partikül %50 daha az is sağlar. Tablo 1.7' de biyodizel ve petrodizelin yakıt özellikleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir

Biyodizel iyi bir yağlama yeteneğine sahiptir ve böylece motor aşınması oluşturmamaktadır. AB tarafından yayınlanan araştırma raporu sonuçlarına göre; aynı miktarda motorin ve biyodizel ile yapılan çalışmada motorin tüketimi ile 3,2 kg CO₂ emisyonu oluşurken, biyodizel tüketiminde bu miktar 2-2.5 kg azalarak 0.7 kg seviyesine kadar düşmektedir. Gelişmiş ülkelerde bu konuda yapılan Pazar Araştırması, Ürün Geliştirme, Bilinçlendirme ve Fiyat İyileştirme gibi araştırma faaliyetleri sonucunda üretimde büyük aşamalar kaydedilmiştir. Tüketimi ise sürekli verim ve etkileri konusunda izlenmektedir. İlk yaygın kullanım alanı eski model belediye otobüsleri olmuş (1993); fiyat konusunda dizelden pahalı olması sebebiyle %20 karışımı kullanılmıştır. Su araçlarında kullanımının çok daha fazla çevresel fayda oluşturduğu 180 Beygir Gücündeki bir test teknesinde kullanımıyla gösterilmiştir. Kaptan Bryan Peteson saf biyodizel yakıtla 40.000

Mil ve 40 ülkeyi kapsayan iki buçuk yıllık test gezisi yapmıştır. Diğer bir faydası Çift zamanlı, dört zamanlı, mekanik kontrollü, elektronik kontrollü, direk enjeksiyonlu ve endirekt enjeksiyonlu motorlarda yapılan deneylerde saf biyodizelin kullanılmasıyla motorun daha yeni ve temiz kaldığı gözlenmiştir . Karbon atımı azalmış ve çözülmüş organik saçılma artmıştır. Bu araştırmalar bir ürün standardı oluşturma çabasıdır, bu konuda Amerika ve Avrupa’da çalışmalar vardır ve ulaşmak istenen nokta bir dünya standardı oluşturmaktır[45].

Tablo 1.7. Petrodizel ve biyodizelin yakıt özellikleri

Yakıt Özelliği	Petrodizel	Biyodizel
Yakıt standardı	ASTM D 948	ASTM PS 121
Yakıt bileşimi	C10 – C21 EC	C12 – C22 FAME
Alt ısı değeri(MJ/l)	36,6	32,6
Kinematik viskozite (40 °C)	1.3 – 1.4	1.9 – 6.0
Özgül ağırlık (15 °C)	0.85	0.88
Su (ppm)	161	Maks. %0.05
Karbon (ağırlığın %si)	87	77
Hidrojen (ağırlığın %si)	13	12
Oksijen (ağırlığın %si)	0	11
Kükürt (ağırlığın %si) Maks	%0.05	0.0 – 0.0024
Kaynama noktası (°C)	118 – 343	182 – 338
Parlama noktası (°C)	60 – 80	100 – 143
Bulutlanma noktası (°C)	-15 ... +5	-3... +12
Akma noktası (°C)	-35... -15	-15... +10
Setan sayısı	40 – 55	48 – 65
Hava/Yakıt oranı	15	13

2.MATERYAL ve METOD

Saf bitkisel yağların yakıt olarak dizel motorlarda direkt kullanımı bazı sakıncaları da beraberinde getirmektedir. Bunlar; yağın yüksek viskozitesi, asit bileşimi, bağımsız yağ asidi içeriği, oksidasyon nedeniyle yapışma, depolama yanma esnasında polimerizasyon ve yanmayla alakalı problemlerdir. Bu olumsuz etkileri ortadan kaldırmak için ham bitkisel yağa birçok farklı metot uygulanmaktadır. Bu çalışmada, bu metodlar içerisinde en çok tercih edilen metot olan transesterifikasyon yöntemi kullanılmıştır. Ham bitkisel yağların, içten yanmalı motorlarda meydana gelebilecek sorunları minimize ederek kullanılabilmesi için transesterifikasyona tabi tutulması gerekmektedir. Biyodizel transesterifikasyon işlemi sonucunda ortaya çıkan bir ürün olup bakterilerle ayrışıp çevre tarafından emilebilen, toksik olmayan, sülfür içermeyen, tarımsal ve bitkisel kaynaklardan elde edilebilen eşsiz bir yakıttır. Transesterifikasyon işlemi ise hayvansal veya bitkisel yağların alkolle reaksiyonu neticesinde esterlerine ve gliserole ayrışma reaksiyonudur. Alkol trigliseridlerle bir araya gelerek gliserol ve ester formuna ayrışır. Transesterifikasyonla biyodizel üretiminde dikkat edilecek önemli parametreler; reaksiyon sıcaklığı, alkol ve yağın molar oranı, katalizatör, reaksiyon süresi, nem miktarı ve bağımsız yağ asitlerinin miktarıdır.

Reaksiyon boyunca kullanılacak olan katalizör ise reaksiyonun hızını ve verimini artırır. Biyodizel petrol içermez ancak petrodizel yakıt ile uyumludur ve istenilen oranda karışım yapılabilir. Petrodizel ile karışım oranı BXX olarak gösterilir. Buradaki XX, karışımındaki biyodizel miktarını ifade eder. Yapılan bu çalışmada kullanılan B20; %20 biyodizel ve %80 petrodizeli ifade etmektedir. Biyodizel ve transesterifikasyonla ilgili geniş bilgi giriş bölümünde verilmiştir.

Yapılan bu deneysel çalışmada alternatif yakıt olarak mısır yağı metil ester (MYME) ve D2 dizel yakıtı (ASTM No.D2) karışımı kullanılmıştır. ASTM No.D2 (D2) dizel yakıtı Elazığ'da mevcut ticari petrol istasyonlarından, mısır yağı ise yağ fabrikalarından tedarik edilmiştir. Ham mısır yağı, transesterifikasyon metodu kullanılarak esterifikasyon işlemine tabii tutulmuştur. Bu işlem Fırat Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi Otomotiv Bölümü laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Ham mısır yağı ve Methanol belirli oranlarda karıştırılmış ve 60 °C'de 9 saat boyunca bekletilmiştir. Karışımın en üstteki fazı karışımdan uzaklaştırılarak Sodyum Bikarbonat bileşimi yağın korozyon etkisini ortadan kaldırmak için

eklenmiştir. Daha sonra gerekli yıkama işlemi uygulanmıştır. Karışım filtre kağıttan geçirilerek metil ester elde edilmiştir. Isıl değer Julios bomb cinsi kalorimetreye ölçülmüştür. Her değer 5 testin aritmetik ortalaması olarak alınmıştır. Yakıtların fiziksel ve kimyasal özellikleri tablo 2.1.'de görülmektedir. D2 ve MYME %20 oranında karıştırılmıştır. Ayrıca testler boyunca %100 MYME ve %100 saf D2 yakıtları da kullanılmış olup, D2 yakıtı referans yakıt olarak belirlenmiştir. Karışım testlerden hemen önce hazırlanmıştır. Tablo 2.1.'e bakıldığında uygulanan transesterifikasyon yönteminden sonra bitkisel yağın viskozitesinde keskin bir düşüş meydana geldiği, parlama noktasının azaldığı ve kalorifik değerinin D2'ye yaklaştığı görülmektedir.

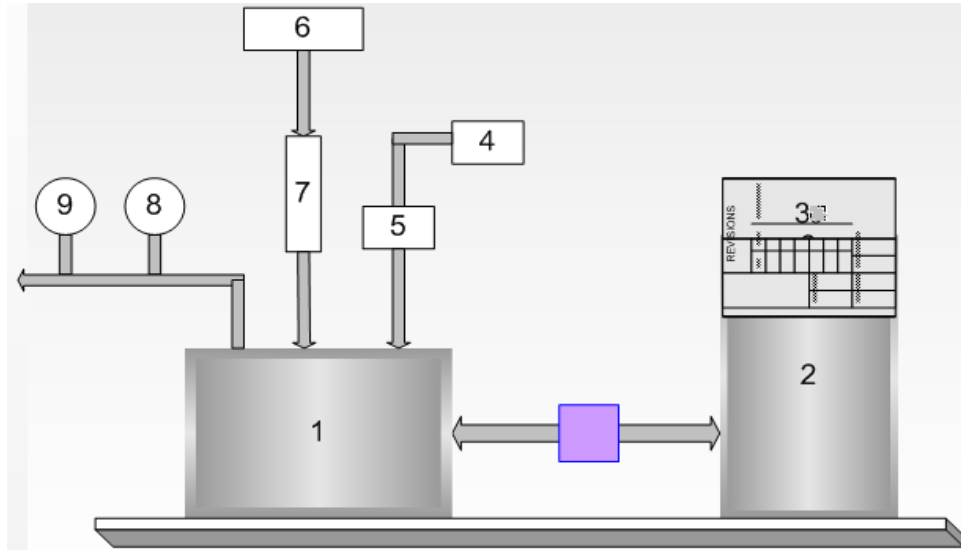
Tablo 2.1. Kullanılan yakıtların fiziksel ve kimyasal özellikleri

	Yoğunluk 20 C° (kg/l)	Viskozite 40 C° (mm²/sn)	Parlama Noktası (C°)	Kalorifik Değer (kJ/kg)
Mısır Yağı Metil Esteri (MYME)	0,89	4,21	88	39120
No. D2 (D2)	0,83	3,07	58	42300
Ham Mısır Yağı	0,917	34,9	230	37825

Deneyisel çalışma esnasında 4 zamanlı, tek silindirli, direkt enjeksiyonlu, hava soğutmalı 6LD 400 model Lombardini marka dizel motor kullanılmıştır. Bu dizel motora ait teknik özellikler tablo 2.2.'de verilmiştir. Tüm laboratuvar testleri Cussons P8160 Model elektrikli dinamometre düzeneğinde uygulanmıştır. Dinamometre düzeneği şekil 2.1.'de görülmektedir. Yüklemeler, motor hızı ve egzoz gaz sıcaklık değerleri elektrikli dinamo üzerindeki dijital ekrandan okunmuştur. Ayrıca dinamometre üzerinde, kullanılan yakıt miktarını belirlemek için hacimsel tipte mekanik kontrollü 10 ml ve 20 ml'lik iki cam tüpten yapılmış silindirik parçalar vasıtasıyla harcanan yakıt miktarı belirlenmiştir.

Tablo 2.2. Deneyde kullanılan dizel motora ait teknik özellikler

Motorun Markası ve Tipi	Lombardini 6LD 400
Strok Sayısı	4
Silindir Sayısı	1
Silindir Çapı	86 mm
Strok	68 mm
Motor Gücü	6.25/8.5 (kW/ hp)
Yakıtı	Dizel motorini
Püskürtme Şekli	Direkt enjeksiyonlu
Püskürtme Basıncı	200 kg/cm ²
Soğutma Şekli	Hava soğutmalı
Sıkıştırma Oranı	18:1
Devir	3600 dk/1



Şekil 2.1. Deney Düzeneği. (1) Motor, (2) Elektrik yük ünitesi, (3) Kontrol paneli, (4) Hava filtresi, (5) Hava ölçüm ünitesi, (6) Yakıt tankı, (7) Cam tüp, (8) Duman ölçer, (9) Egzoz emisyon cihazı.

NO_x ve CO emisyon değerleri Madur GA-21 Plus gaz analiz cihazıyla ölçölmüştür. Egzoz duman yoğunluğu (%) Protech opax 2000 II cihazıyla ölçölmüştür. Egzoz gaz sıcaklığı elektrikli dinamometre üzerindeki K tipi termokopulla ölçölmüştür. Test yakıtlarının kaplama tabakası üzerindeki etkisini incelemek amacıyla tüm ölçömler 2500 d/dk'da yapılmıştır. 2500 d/dk.'da yapılan ölçömler tüm devir aralığında yapılan ölçömler ile benzer sonuçlar vereceği düşünölerek bu devir seçilmiştir. Ölçüm değerleri alınmadan önce gaz analiz cihazları kalibrasyonu işlemi yapılmıştır. Egzoz emisyon değerleri egzoz borusu içinde motora 1 metre mesafeden ölçölmüştür.

Testlerde kullanılan dizel motora ait piston üst yüzeyi, silindir kafası, egzoz ve emme supaplarının sadece yanma odasına bakan yüzeyleri plazma ark sprey yöntemi kullanılarak kaplanmıştır. Kaplama işlemi; ilk etapta tüm yüzeylere ayrı ayrı 50'şer µm kalınlıkta NiAl bağlayıcı (bond) malzeme püskürtölerek başlamış ve daha sonra oluşturulan bu bağ tabakanın üzerine 250µm kalınlıkta Al₂O₃-TiO₂ (%87-13) tozu püskürtölerek sonlandırılmıştır. Bu işlemler neticesinde toplamda 300 µm kalınlığında kaplama tabakası elde edilmiştir. Kaplama işlemleri Sulzer-Metco type 3 MB atmosferik plazma ark cihazıyla gerçekleştirilmiştir. Kaplama işleminde uygulanan plazma ark sprey parametreleri tablo 2.3. de görölmektedir. Kaplama işlemi sonucunda 300 µm kalınlığında bir tabaka meydana gelmiş olup bu tabaka kalınlığının, kaplanmış motorun sıkıştırma oranını değiştireceği düşünölerek, standart motorla aynı sıkıştırma oranını elde etmek için oluşturulan kaplama kalınlığı miktarında malzeme (talaş), yüzeylerden kaldırılmış ve çift conta eklenerek standart sıkıştırma oranı elde edilmiştir. Böylece kaplama yapılmış ve yapılmamış motor aynı sıkıştırma oranına getirilmiştir. Motor, normal çalışma sıcaklığına ulaşması için D2 yakıtı ile 30 dakika çalıştırılmıştır. Deneylerde önce kaplanmamış motor test edilerek sonuçlar alınmış, daha sonra aynı motorun; piston yüzeyi, egzoz ve emme supapı kaplanarak aynı şartlar altında testler tekrarlanmıştır. Her hızda motor bir süre bekletilmiş ve daha sonra ölçüm sonuçları kaydedilmiştir. Bütün ölçömler her hızda en az 3 kez tekrarlanmıştır.Şekil 2.2. de plazma ark sprey cihazı, şekil 2.3.'de plazma ark sprey işleminin yapılışı, şekil 2.4.'de pistonun kaplamadan önceki resmi, şekil 2.5.'de pistonun kaplama işleminden sonraki resmi, şekil 2.6.'da kaplama işlemi sonrası supap ve pistonun resmi görölmektedir.

Tablo 2.3. Kaplama işleminde kullanılan plazma ark sprej parametreleri

Plazma Tabancası	Sulzer-Metco 3 MB
Akım (Amper)	500
Voltaj (Volt)	62
Sprej Mesafesi (mm)	70
Gaz Basıncı (psi) (Ar/H₂)	80/15
Uygulanan Kaplama Kalınlığı (µm)	250µm (Al ₂ O ₃ -TiO ₂)+ 50µm (NiAl)=300µm
Ara Malzeme (50 µm)	NiAl
Kaplama Malzemesi	(Al ₂ O ₃ -TiO ₂) (87-13)



Şekil 2.2. Plazma ark spreyleme cihazı



Şekil 2.3. Plazma ark spreyleme işleminin yapılışı



Şekil 2.4.Kaplama öncesi piston fotoğrafı



Şekil2.5. Kaplama işlemi sonrası piston fotoğrafı



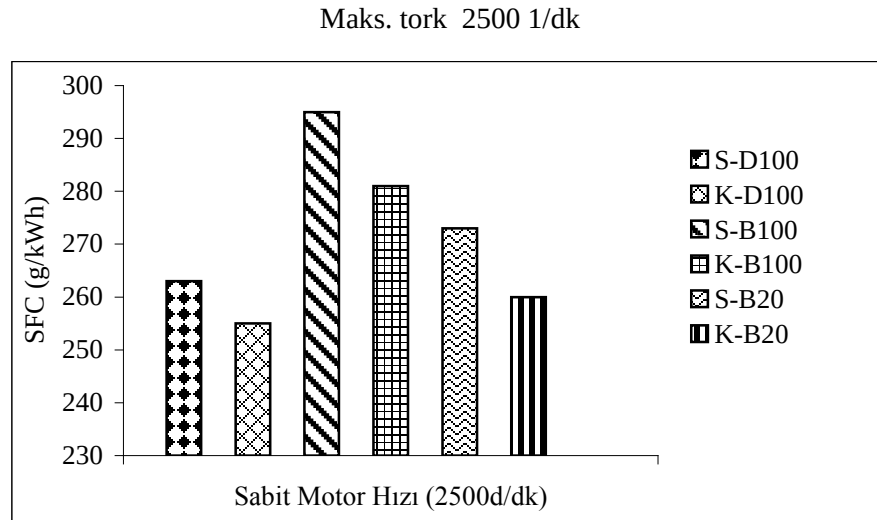
Şekil 2.6. Kaplama işlemi sonrası supap ve piston fotoğrafı.

3. BULGULAR

3.1. Performans

Dizel motorların özgül yakıt tüketim değerleri (SFC), motorlarda kullanılan yakıtın cinsine göre değişiklik gösterir. Çünkü her bir çeşit yakıtın kendine özgü ısı değeri, yoğunluk ve parlama noktası gibi fiziksel ve kimyasal özellikleri vardır. Dolayısıyla yanma reaksiyonu esnasında, yakıtlar sahip oldukları bu özellikler nedeniyle farklı karakterlerde tepkimeler gerçekleştirirler. Bu tepkimeler ise motorun verimini ve performansını yansıtır.

Biyodizel petrodizele göre %10 daha düşük ısı değere sahiptir. Bu durum biyodizelin içeriğindeki oksijen miktarından kaynaklanmaktadır. Bu iki yakıt cinsi özgül ağırlık değerleri açısından karşılaştırıldığında ise biyodizelin özgül ağırlığı (0,88), petrodizelin özgül ağırlığından (0,85) daha yüksektir. Genel olarak değerlendirildiğinde ise biyodizel petrodizele göre birim hacimde sadece %5'lik bir düşük enerjiye sahiptir[50]. Motorların özgül yakıt tüketimindeki değişiklikler, motor hızına ve yüküne bağlı olarak değişir[51]. Yakıt çeşidine bağlı olarak değişen özgül yakıt tüketim değerleri şekil 3.1.'de görülmektedir.



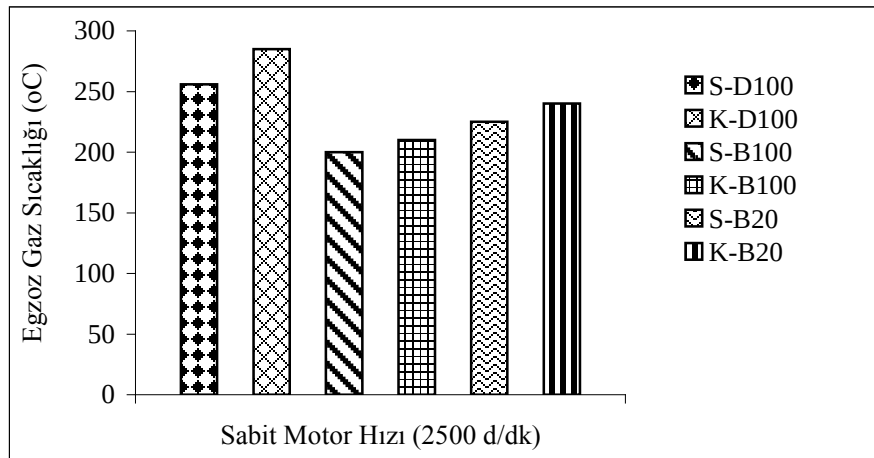
Şekil 3.1. Kaplanmış ve standart motorda kullanılan test yakıtlarının özgül yakıt tüketim değişimleri.

Kaplanmış motor (K) ve standart motor (S), özgül yakıt tüketim (SFC) değerleri açısından test yakıt cinslerine göre karşılaştırıldığında; K'nın SFC değerleri tüm test yakıt türleri için S'den daha düşük çıkmıştır. Bu değerler D2 yakıtı için %3.0, B100 için %4.7, ve B20 için ise %4.6 daha düşüktür. MYME'nin ısı değeri

D2 yakıtına göre daha düşüktür. MYME’i ve D2 yakıtı karışımlarının SFC değerleri her iki tür motorda da D2 yakıtına göre daha yüksektir. Bu durum motordan istenen performansı elde edebilmek için daha çok yakıtı ihtiyaç duyulacağı anlamına gelmektedir. Bu artışlara rağmen tüm test yakıtları için modifikasyon yapılmış motorda özgül yakıt tüketimi kaplanmamış motora göre azalmıştır. Modifikasyon yapılmış motorda ısı yalıtımı neticesinde silindir içi sıcaklık artmış ve bunun pozitif etkisiyle tüm test yakıtları için özgül yakıt tüketiminin azalmıştır.

Dizel motorda yanma odasında meydana gelen karışım homojen değildir. Yüksek basınç ve sıcaklık altındaki yanma odasında, yakıt püskürtülür püskürtülmez reaksiyonlar başlar. Bununla birlikte ilk kısa zaman dilimlerinde reaksiyonlar çok yavaş bir seyir izler ve basınçta belirgin bir artış görülmez. Tutuşma gecikme zamanının sonunda yanma odasında alev görülür ve basınçtaki yükseliş belirginleşir[52].

Yanma zamanındaki ateşleme gecikmesi boyunca yakıt damlacıklara ayrılır, buharlaşır ve havayla karışır. Bunlar fiziksel gecikmelerdir. Kimyasal gecikme ise yavaş kimyasal reaksiyon neticesinde meydana gelir. Bu gecikmeler eş zamanlı olarak meydana gelir. Daha sonra bunların hepsi birden toplam gecikme zamanı olarak adlandırılır. Eğer tutuşma gecikme zamanı uzarsa daha çok yakıt yanma odasına girer ve püskürtmeyle buharlaşır. Bununla birlikte K’lardaki tutuşma gecikme süresinin kısılması hem kimyasal hem de fiziksel reaksiyonları pozitif olarak etkiler. Bu durumun kaplanmış motorda kullanılan tüm test yakıtlarının özgül yakıt tüketim değerlerinin azalmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Şekil3.2. de test yakıtlarının motor güç değişimleri görülmektedir.

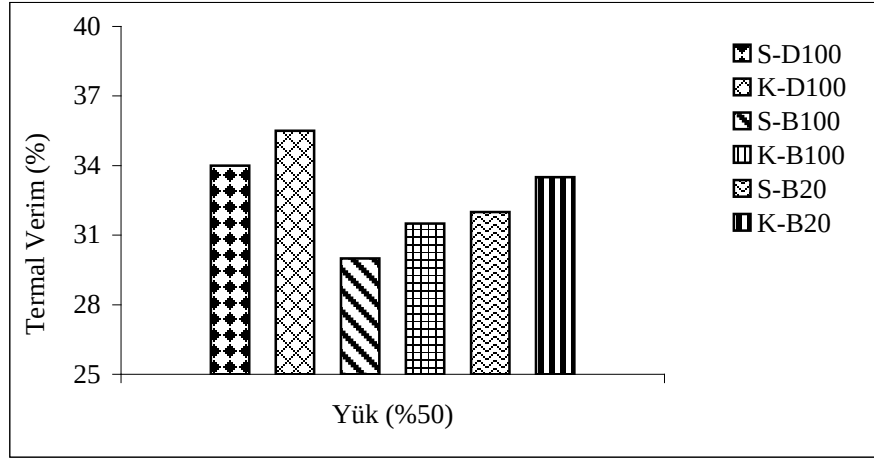


Şekil 3.2. Test yakıtlarının 2500 d/dk’da motor güç değişimleri

K ve S üretilen güç değerleri bakımından karşılaştırıldığında kaplanmış motor gücündeki ortalama düşüş değerleri standart motora göre; D2 yakıtı için % 1.7, B100 için %1.0, ve B20 için % 1.1 olarak tespit edilmiştir. Hem kaplanmış hem de kaplanmamış motorda kullanılan D2 yakıtı ile üretilen motor gücü, MYME-D2 yakıt karışımları ile üretilen motor güç değerlerinden yüksektir. Standart motorda kullanılan D2 ve B100 yakıtları, üretilen güç değerleri açısından karşılaştırıldığında; B100 ile üretilen ortalama güç değerinin D2 ile üretilen güç değerinden %9.6 daha düşük çıktığı belirlenmiştir. Aynı standart motorda bu kez D2 yakıtı B20 yakıtı ile karşılaştırıldığında ise güçteki düşüş değeri %5.3 olarak belirlenmiştir. Kaplanmış ve kaplanmamış motorlarda kullanılan B100 ve B20 yakıtlarından üretilen güç değerleri; D2 yakıtının kaplanmış ve kaplanmamış motorlarda ürettiği güç değerlerinden düşük çıkmıştır. Bu durum; MYME ve dizel yakıt karışımlarında yüksek oranda mevcut MYME'den kaynaklandığını ve D2 yakıtıyla karşılaştırıldığında MYME'nin sahip olduğu daha düşük ısı değer ve yüksek viskoziteyle açıklanabilir bahsedilen bu özellikler yakıtın yanma karakteristiklerini etkileyen önemli faktörlerdir.

Volumetrik verim motorun nefes alabilme kabiliyetidir ve motorun çalışma ve ortam şartlarına bağlıdır. K'da oluşturulan termal bariyer neticesinde; ısı yalıtımıyla birlikte ısı kaybı azalmış, yanma odası duvarlarının sıcaklığı artmıştır. Silindir içine dolan hava yüksek sıcaklığa sahip yanma duvarından çıkan ısıyı absorbe ederek, içeri dolan havayı genleştirmiş ve emilen hava miktarını azaltmıştır. Bu sebeple içeri alınan havanın yoğunluğunun düştüğü ve volumetrik verim azaldığı düşünülmektedir.

K'da kullanılan test yakıtlarının tümünde motor gücünde çok düşük miktarda azalma gözlemlenmiştir. Bununda K'da oluşan yüksek sıcaklık neticesinde, volumetrik verimde ki düşüşten meydana geldiği düşünülmektedir.Şekil3.3.'te kullanılan test yakıtlarının termal verimlerinin karşılaştırılması görülmektedir.



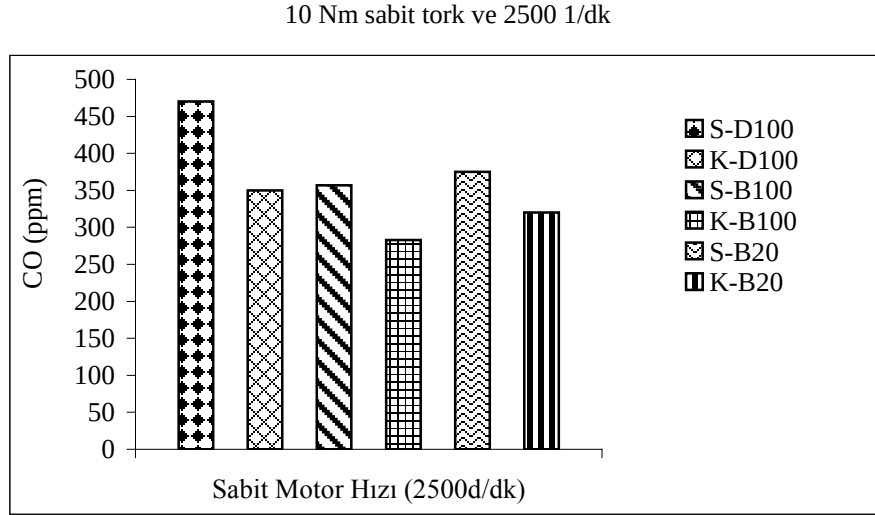
Şekil 3.3. Test yakıtlarının %50 yük durumundaki termal verim değişimleri

Şekil 3.3’ de görüldüğü gibi kaplanmış motorun termal verimi tüm test yakıtları için standart motora göre daha yüksektir. Kaplanmış ve kaplanmamış motorlarda kullanılan test yakıtları termal verim açısından karşılaştırıldığında kaplanmış motorda %50 yükte B100 için %5, B20 için %4.6, D2 yakıtı için ise %4.4 artış tespit edilmiştir. Bu artışlar; izolasyon neticesinde ısı iletiminin azaldığı ve özgül yakıt tüketimiyle termal verimin bir biriyle ters orantılı olduğu düşünüldüğünde beklenen bir sonuçtur.

3.2. Egzoz Emisyonları

Yanma olayı yakıt ve oksidan arasındaki kimyasal tepkime sonucunda oluşan egzotermik bir reaksiyondur. Tam yanma reaksiyonunda yanmaya iştirak eden bileşik ile oksit element reaksiyona girer ve yakıttaki her bir elementin oksijenle bileşimi sonucu yanma ürünü ortaya çıkar. Endüstriyel yanma reaksiyonlarında hava oksijen kaynağıdır. Eksik yanma olayı yakıtla reaksiyona girecek yeteri kadar O_2 ’nin olmadığı durumlarda meydana gelir. HC’ler O_2 ile reaksiyona girdiklerinde reaksiyon ürünü olarak CO_2 , H_2O , is ve NO_x gibi bileşimler ortaya çıkar. Yanma reaksiyonunda yeterli O_2 olmadığı takdirde ise CO_2 ’nin yerine CO meydana gelir.

Dizel motorlarda oluşan egzoz gaz emisyonlarından karbon monoksit (CO) emisyonu, hava yakıt karışım oranı, oksijen miktarı ve motor sıcaklığı gibi parametrelere bağlı bir emisyon çeşididir. CO, moleküler yapısında oksijen içermeyen petrol kökenli yakıtların eksik yanması sonucunda meydana gelir[50]. 10 Nm tork yükü ve 2500 1/dk devirde yakıt çeşitlerine bağlı olarak oluşan CO emisyon değerleri Şekil 3.4. te görülmektedir.

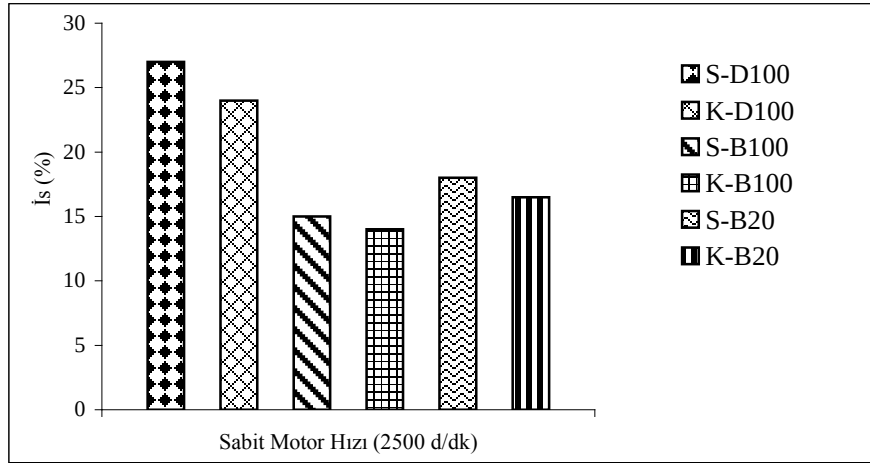


Şekil 3.4. Test yakıtlarının CO emisyon değişimleri

K’da kullanılan test yakıtlarına göre oluşan CO emisyon değerleri, aynı yakıtların S’de oluşan CO emisyon değerleriyle kıyaslandığında; K’nın CO emisyonlarında belirgin bir şekilde düşüş olduğu görülmektedir. Ortalama CO emisyon değerlerindeki düşüş oranı D2 yakıtı için %26.0, B100 için %22.0, ve B20 için ise %15.0 olarak belirlenmiştir. K’da oluşan CO emisyonundaki bu düşüş seramik kaplama neticesinde oluşan termal bariyer sayesinde, soğutma sistemine gidecek olan ısıнын bir kısmının reaksiyon sıcaklığını artırarak yanmamış HC’lerin yanma reaksiyonuna katılması şeklinde izah edilebilir. Ayrıca MYME, yapısal olarak kimyasında mevcut oksijen içeriği sayesinde reaksiyona giren O_2 miktarı artmış ve bu durumda CO emisyonunun azalmasına neden olmuştur

Isı transferi motor performansını, verimini ve emisyonları etkilemektedir. Kaplama işlemi neticesinde motorun izolasyonu yanma odasının duvar sıcaklığını artırır ve bu da yanma verimine pozitif yönde etki eder. Dizel motorlarda bölgesel şartlar, sıcaklık, basınç, karışım oranı ve oksijen miktarı yanmayı ve yanmanın sürekliliğini etkilemektedir. Bu sebeplerle sonuçlar açıkça göstermektedir ki seramik kaplama ile lokal şartlar düzelmiştir ve MYME’in yapısında mevcut Oksijen içeriğiyle CO emisyon değerleri azalmıştır.

Test yakıtlarının 10 Nm tork ve 2500 d/dk da duman yoğunlukları şekil3.5. de gösterilmektedir.



Şekil 3.5. Test yakıtlarının is emisyon değişimleri

Kaplanmış ve kaplanmamış motorlardaki test yakıtlarının duman yoğunlukları kıyaslandığında K’da yaklaşık olarak % 6.6-11.1 arasında bir düşüş belirlenmiştir K’da ortalama duman yoğunluklarındaki azalma standart motora göre; D2 yakıtı için %11.1, B100 için %6.6, ve B20 için ise % 8.3 olarak tespit edilmiştir. Bu değerlere göre tüm test yakıtları için K’da seramik kaplamanın sağladığı termal izolasyon sayesinde belirgin bir düşüş meydana gelmiştir. Bununla birlikte B100’ün duman yoğunluğu her iki motor içinde D2 yakıtı ve B20 karışımı yakıtından daha düşüktür. B100 ve B20 karışımının D2 yakıtı ile karşılaştırıldığında ortaya çıkan düşük duman yoğunluğunun, metil esterdeki yüksek oksijen içeriğinden ve verimli yanmadan kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

Kaplanmış motorlar standart motorlara göre yanma duvarlarında oluşan yüksek sıcaklık ve yüksek gaz sıcaklığı nedeniyle daha az is üretirler. Yapılan deneysel bir çalışmada is emisyonunun belirgin şekilde düşük çıktığı ve bunun nedenini yüksek yanma sıcaklığı ile meydana gelen basıncın yoğun türbülans oluşturması ve bu türbülans sayesinde artan is oksidasyonundan kaynaklandığını bildirmiştir[42].

Yakıtın oksijen içeriği oksidasyona katkı sağlayabilir ve böylece duman yoğunluğu azalabilir[53].Bu düşüş oranları tüm yakıt türleri için K’nın yanma odasında termal bariyerin oluşturulması neticesinde ısı transferinin azalması ve ortaya çıkan yüksek sıcaklık neticesinde reaksiyona daha çok karbon partikülünün girmesiyle açıklanabilir. Duman yoğunluğu karbon partiküllerinin eksik yanması sonucu meydana gelir. Yanma

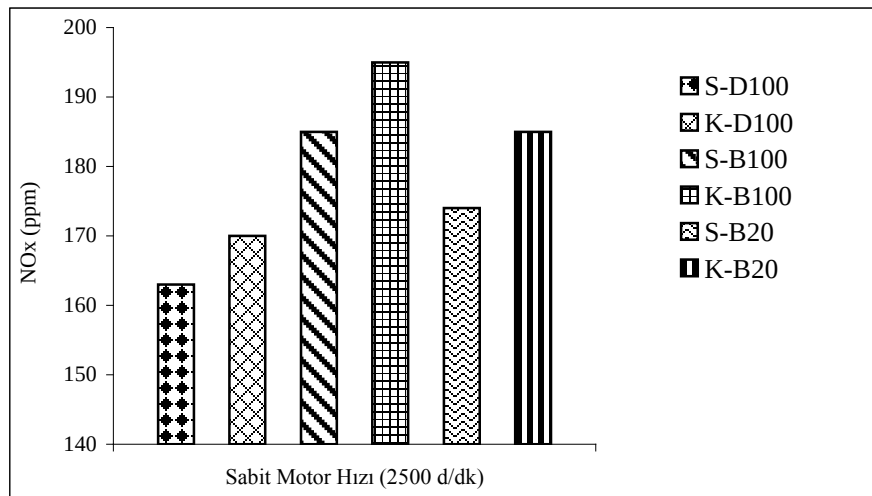
odası elemanlarının kaplanması, oluşan yüksek sıcaklık neticesinde yanma verimini artırmıştır.

Yanma reaksiyonu neticesinde ortaya çıkan emisyon ürünlerinden biri de NO_x'dir. İçten yanmalı motorlarda yanma reaksiyonu esnasında her 1 kg oksijen, 3,76 kg Nitrojenle reaksiyona girer.

NO_x, değişik miktarlarda azot ve oksijen içeren fazlaca reaktif bir gazdır. Hava yakıt karışımı içindeki NO_x, yanma odası sıcaklığı yaklaşık 1800 °C'ye yükseldiğinde Azot (N₂) ve Oksijen (O₂)'nin birleşmesiyle oluşur. Eğer sıcaklık 1800 °C'nin üstüne yükselmez ise; N₂ ve O₂, NO gazını meydana getirmeden, egzoz sisteminden dışarı atılır. Azot ve Oksijen gazlarının değişik moleküllerinin birleşmesi ile NO, NO₂, N₂O, N₂O₃, vb. gibi çeşitli gazlar ortaya çıkar ki bunların hepsine birden “Azot Oksitler” denir ve NO_x olarak ifade edilir.[55]

NO_x atmosferik Azot'un yüksek sıcaklıktaki oksidasyonu neticesinde meydana gelir. NO_x oluşumunun kinetiği oksijenin varlığıyla ilgilidir[54].Yanma sonucundaki sıcaklık artışı NO_x emisyonlarının artmasına sebep olur. Oksijen ve Azot arasındaki reaksiyonu hızlandıran tüm yardımcı faktörler NO_x oluşumunu artırır. Bu faktörlerden en önemlisi sıcaklık artışıdır. Bununla birlikte motor hızı, yanma odası içeriği,yanma odasının homojenliği,ve karışım yoğunluğu da ayrıca önemli faktörlerdir.

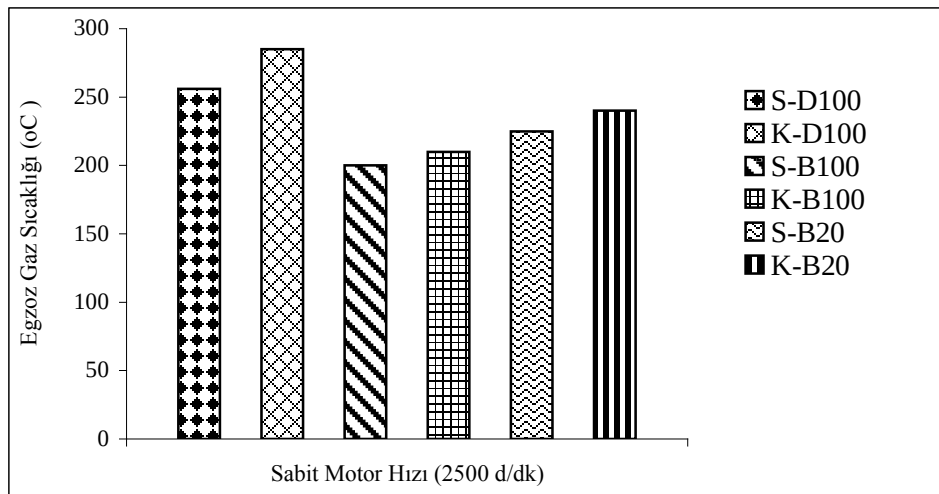
NO_x emisyonunun 10 Nm tork ve 2500 d/dk da kullanılan test yakıtlarına göre oluşumları şekil 3.6. da görülmektedir.



Şekil3.6. Test yakıtlarının NO_x emisyon değişimleri

Şekilden de anlaşılacağı gibi K'nın NOx emisyon değerlerinde S'nin NOx emisyon değerlerine göre artış tespit edilmiştir. K'da ortalama NOx emisyon artış oranları S ile karşılaştırıldığında D2 yakıtı için %6.2, B100 için %7.4, ve B20 için ise %8.8 olarak belirlenmiştir. Genel olarak K'da kullanılan test yakıtları için tespit edilen NOx emisyonundaki bu artış, kaplama neticesinde yanma odasının izolasyonu ile birlikte oluşan sıcaklık artışıyla alakalı olduğu söylenebilir. Çünkü NOx artışı en önemli faktör bilindiği gibi sıcaklık artışıdır ve bu da beklenen bir sonuçtur. Her iki motorda da kullanılan MYME ve karışımı yakıt, D2 yakıtıyla karşılaştırıldığında NOx emisyon değerleri yüksek çıkmıştır bu da içeriğinde mevcut oksijen miktarının fosil yakıtlara nazaran daha fazla olmasıyla alakalıdır[56].

Egzoz gaz sıcaklık ölçümleri, yanma odası içinde meydana gelen sıcaklık hakkında tahminde bulunmamıza yardımcı olan önemli parametrelerdir. Bu ölçümler sayesinde yanmış yakıtların ısı değerleri hakkında bilgi sahibi olabiliriz. Tersten gidilirse yani kullanılan yakıtın ısı değeri bilinirse, yanma sonucu oluşacak egzoz gaz sıcaklıkları da yakıtın ısı değeriyle doğru orantılı çıkması gerekir. Bu çalışma boyunca farklı ısı değerlere sahip test yakıtları kullanılmıştır. Doğal olarak her bir yakıtın yanması sonucu farklı bir ısı değeri çıkacağından, bu değerler egzoz sıcaklıklarına da farklı bir şekilde yansır. Bu değerlerde test yakıtlarının özelliklerini yansıtan önemli göstergelerdir. 10 Nm tork yükü ve 2500 d/dk'daki test yakıtlarının egzoz gaz sıcaklıkları şekil 3.7'de görülmektedir.



Şekil 3.7. Test yakıtlarının egzoz gazı sıcaklık değişimleri

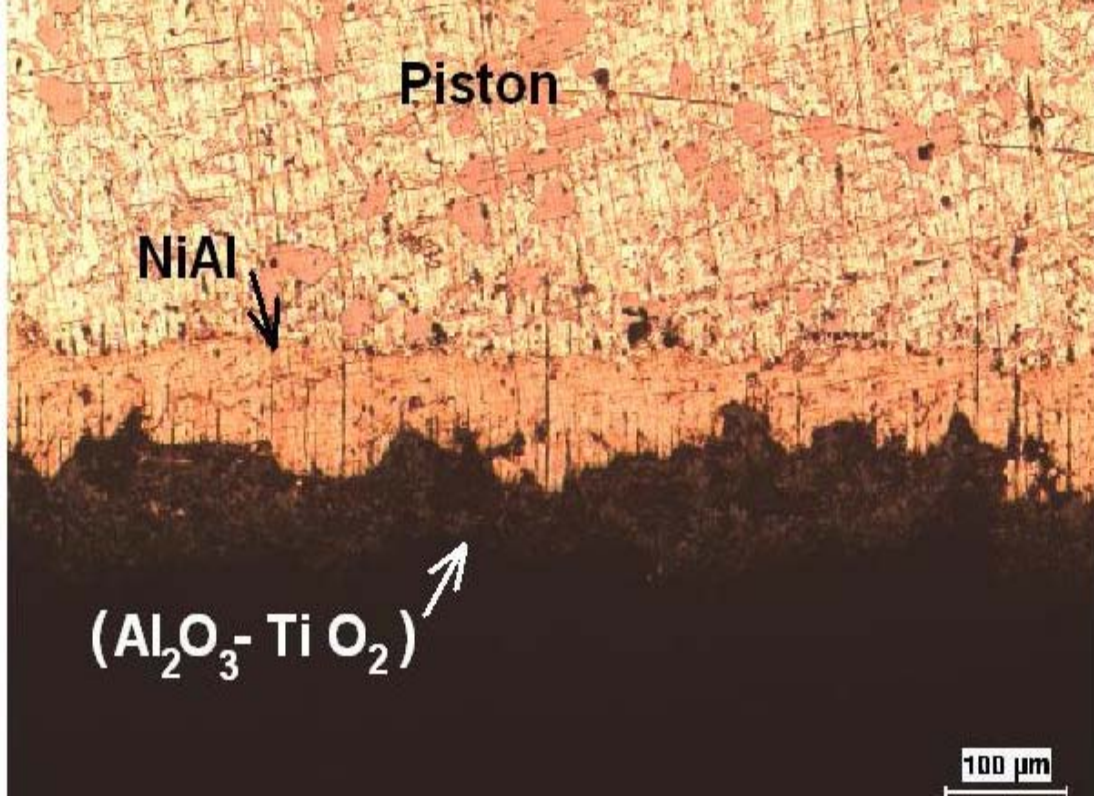
K'daki egzoz gaz sıcaklık değerlerindeki artış oranları S ile karşılaştırıldığında D2 yakıtı için %11.3, B100 için %5.0 ve B20 için ise %6.6 olarak tespit edilmiştir. Daha önce ifade edildiği gibi MYME'in ısı değeri D2 yakıtından daha düşüktür. Sonuç olarak egzoz gaz sıcaklığı da D2 yakıtının egzoz gaz sıcaklığıyla karşılaştırıldığında daha düşük çıkmıştır ve bu beklenen bir sonuçtur.

K'da kullanılan tüm test yakıtlarının egzoz gaz sıcaklıklarının kaplanmamış S ile karşılaştırıldığında yüksek çıkmasının sebebi soğutma sistemine gidecek olan ısıнын azaltılmasıyla izah edilebilir. Benzer sonuçlar daha önce yapılan farklı birçok çalışmada da gözlemlenmiştir[42].

3.3.Çalışma Sonrası Yüzeylerin Mikro yapı Analizleri

İçten yanmalı motorlarda yanma reaksiyonu, sıkıştırma zamanının sona ermesiyle başlar. Yanma olayı kimyasal bir reaksiyon olup neticesinde yüksek basınç, yüksek sıcaklık, aşırı yüklenmeler, termal şoklar ve termal gerilimler meydana gelir. Alev cephesinin düzensiz yayılması, kısmi alev çarpışmaları ve sürtünme ve tüm bu olumsuz etkenlerin üzerine yanma ürünü olan kimyasallar eklendiğinde yanma odası elemanlarının yüzey yapıları deformasyona uğrar ve aşınmanın birçok şekline maruz kalır.

Seramik malzemeler sahip oldukları yüksek ergime sıcaklığı, yüksek sertlik değeri, ısı iletim katsayılarının düşük olması ve yüksek korozyon dirençleri sayesinde, yanma reaksiyonu sonucunda oluşan tüm olumsuzlukları engelleyebilecek bir malzeme çeşididir. Seramik malzemenin seçiminde, uygulanacak yüzeyin maruz kalacağı tüm şartlar mutlaka göz önüne alınması gerekmektedir. Yapılan bu çalışmada bu şartlar düşünülerek Al_2O_3 - TiO_2 (%87-13) malzemesi seçilmiştir ve yüzeyden beklenen ve istenen performans elde edilmiştir. Kaplanan parçaların ekonomik ve servis ömürleri artırılmıştır. Şekil 3.8. de plazma spreyle kaplanmış piston numunesinin kesitinin optik mikroskopla çekilmiş fotoğrafı görülmektedir.



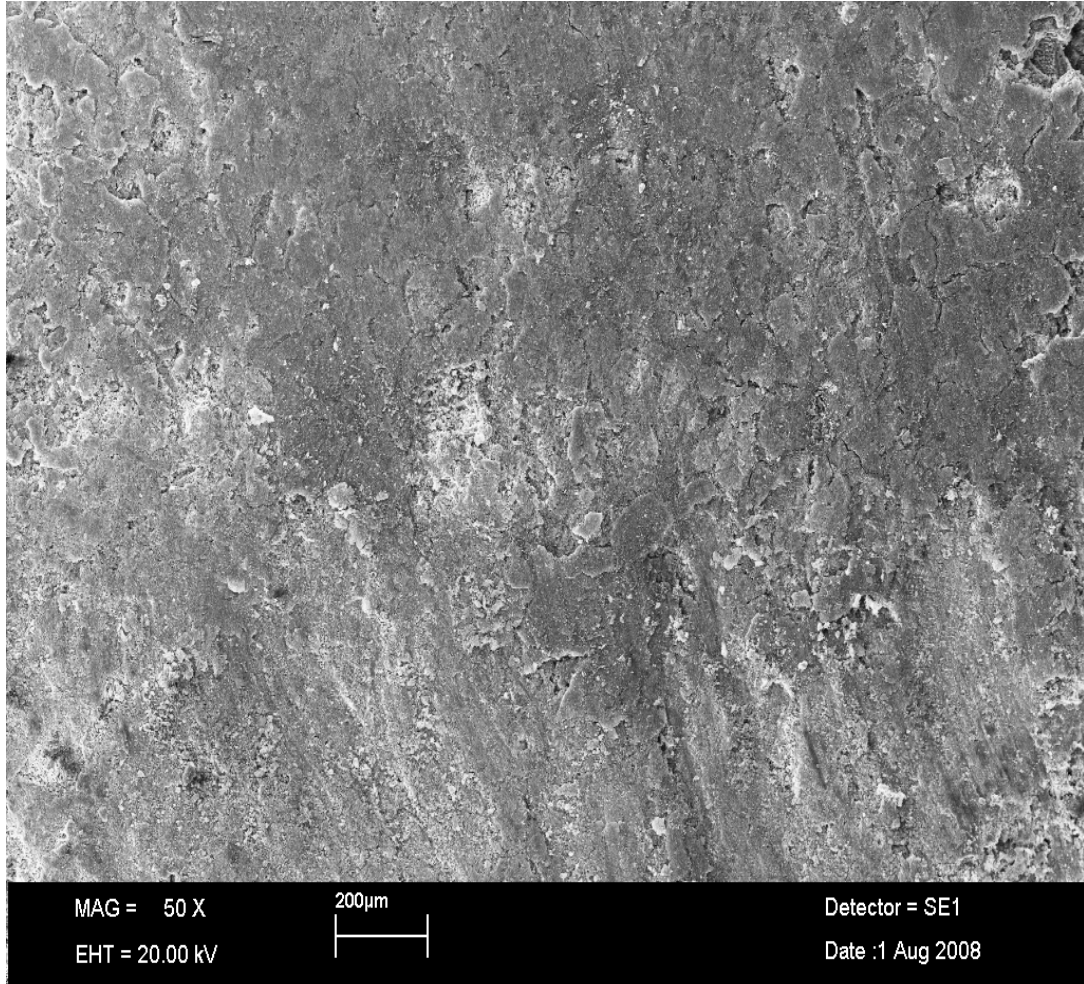
Şekil 3.8. Kaplanmış Pistonun Kesit Görüntüsü (100μm)

Şekil 3.8.'e bakıldığında kaplama tabakaları net bir şekilde görülmektedir. İri tane boyutuna sahip NiAl bağ tabakanın, ana malzeme yüzeyine mükemmel bir şekilde nüfuz ettiği ve dolayısıyla oksidasyon direnci görevini yerine tam olarak getirdiğini söyleyebiliriz. NiAl bağ tabakanın hemen üstünde bulunan 250 μm kalınlığındaki ana kompozit tabakanın da $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ (%87-13) bu bağ tabaka üzerine yapışma mukavemetinin yüksek olduğunu ve tabakalar arası sınırında net olduğu anlaşılmaktadır.

Plazma sprej yöntemi modern endüstri tarafından talep edilen yüksek performanslı yüzeylerin üretilmesinde kullanılan ileri teknoloji kaplama tekniklerinden biridir. Bu metotla üretilen plazmanın yüksek sıcaklığı bütün sprej malzemelerinin (seramik, metal, plastik ve diğer bileşimleri) kısa bir zaman içerisinde kaplanmasını sağlamaktadır. Bu metot sprej tozu, soğutma ve ergime süreçlerini tek bir işlem altında toplamaktadır. $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ kompozit kaplamaları, Al_2O_3 matris fazı ve TiO_2 destekleyici fazdan meydana gelir. Matrisin görevi gerilimleri homojen olarak kompozit malzemenin içine dağıtmaktır. İkinci fazın görevi ise malzemenin mekanik özelliklerine yardımcı olmaktır. Bu tip kaplamalar matris tozla destekleyici tozun harmanlanarak, plazma sprej vasıtasıyla

püskürtülmesi sonucu oluşturulur. Al_2O_3 - TiO_2 kompozit kaplamadaki titanya miktarının artmasının adhesiv gerilimlerin artmasına neden olduğu kabul gören bir gerçektir[57].

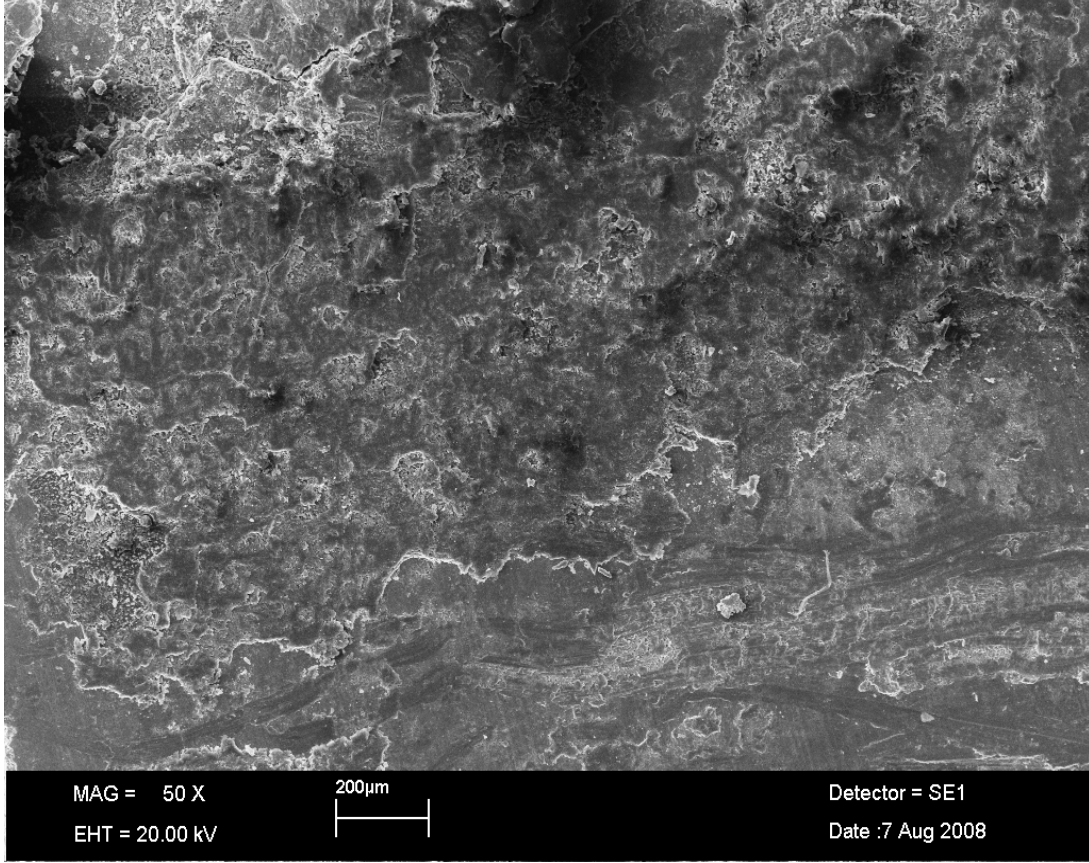
Şekil 3.9.'da pistonların çalışma sonrası SEM (scanning electron microscope)'le çekilmiş fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 3.9.Çalışma sonrası kaplanmış piston üst yüzeyinin SEM görüntüsü

Şekil 3.9.'da piston üst yüzeyinin mikro yapısı incelendiğinde kaplanmış piston üst yüzeyinin yüzey deformasyonunun ve pürüzlülüğünün şekil 3.10.'daki kaplanmamış piston görüntüsüne göre daha az olduğu görülmektedir. Yine kaplanan ve kaplanmayan piston üst yüzeyleri incelendiğinde kaplanan yüzey tabakasının daha üniform bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Bu durum Al_2O_3 matris fazının gerilimleri homojen olarak kompozit malzeme içine dağıtmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca genel olarak seramik kompozit kaplı yüzeyin çok fazla bir deformasyona uğramadığı ve dolayısıyla yüzey karakteristiğini önemli oranda koruduğunu söylemek mümkündür. Bu haliyle değerlendirildiğinde yanma olayı esnasında yüzeyde meydana gelecek deformasyonlar termal şoklar ve gerilimler

termal bariyer tabaka tarafından karşılandığı söylenebilir. Böylece uygulanan kaplamanın ana malzemenin ekonomik ve servis ömrünü uzattığı anlaşılmaktadır.



Sekil3.10. Çalışma sonrası kaplanmamış pistonunun SEM görüntüsü

Şekil 3.10.'da kaplanmamış yüzeye bakıldığında ise mikro yapısal olarak yüzey deformasyon miktarının fazla olduğu görülmektedir. Sınırları geniş ve derin oyukçuklar olduğu görülmektedir. Bunların da yanmanın kimyasal etkisi sonucu oluşan erozif aşınmalardan meydana gelmiş olduğu düşünülmektedir.

4.SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Yapılan bu deneysel çalışmada bir dizel motorun performansını artırmak, zararlı emisyonlarını azaltmak, yanmayı iyileştirerek termal verimini artırmak ve yüzeyi termal gerilimlerin ve şokların olumsuz etkilerinden koruyarak deformasyonları engellemek için termal bariyer bir kaplama tabakası oluşturulmuştur. Bu çalışmayla piston, emme ve egzoz supapları gibi yanma odası elemanları seramik bir malzemeyle $Al_2O_3-TiO_2$ (87-13) kaplanarak motora düşük ısı kaybı özelliği kazandırılmıştır. Bu çalışma neticesinde aşağıdaki sonuçları çıkarmak mümkündür.

1. Kaplanmış motorda kullanılan test yakıtlarında duman yoğunluklarının önemli oranda azaldığı tespit edilmiştir. Standart motorla karşılaştırıldığında kaplanmış motorun duman yoğunluk oranları; D2 yakıtı için %11.1, B100 için %6.6 ve B20 yakıt için ise % 8.3 düşük çıkmıştır. Bu düşük oranların termal bariyerle meydana gelen yüksek sıcaklığın oluşturduğu basınç ve bu basınç neticesinde oluşan türbülansla daha fazla HC'nin reaksiyona girmesi ve artan is oksidasyonundan kaynaklandığı düşünülmektedir.

2. CO emisyonu, tüm test yakıtları için kaplanmış motorda kaplanmamış motora göre düşüş göstermiştir. CO emisyonundaki düşüş kaplanmış motorda D2 yakıtı için %26, B100 yakıt için %22, B20 yakıt için ise % 15.0 olarak tespit edilmiştir. Ortaya çıkan bu düşüşün MYME'inde mevcut O_2 'nin reaksiyona girerek yanmayı iyileştirmesinden ve termal yalıtımla oluşan yüksek sıcaklığın daha çok HC'yi reaksiyona katmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

3. Kaplanmış motor standart motorla kıyaslandığında NO_x emisyon değerleri D2 yakıtı için %6.2, B100 yakıt için %7.4 ve B20 içinse % 8.8 arttığı tespit edilmiştir. Bu artışın sebebinin tüm test yakıtları için kaplanmış motorda oluşan yüksek gaz sıcaklığı ve daha fazla oksijenin yanma reaksiyonuna katılmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

4. Tüm test yakıtlarının özgül yakıt tüketimi kaplanmış motorda standart motora göre daha düşük çıkmıştır. Kaplanmış motor için ortalama özgül yakıt tüketimi değerlerindeki düşüş standart motorla kıyaslandığında; D2 yakıtı için %3.0, B100 yakıt için %4.7 ve B20 için ise %4.6 olarak tespit edilmiştir. Bu durum yanma odası elemanlarının kaplanmasıyla yanma sıcaklığının özgül yakıt tüketimine pozitif etkisiyle açıklanabilir.

5. Tüm test yakıtları için kaplanmış motorda kaplanmamış motora göre güç değerleri bakımından düşüş tespit edilmiştir. Bu değerler D2 yakıtı için % 1.7, B100 için %1.0, ve B20 için % 1.1 olarak tespit edilmiştir. Daha önce yapılan çalışmalarda SFC ile güç değerleri ters orantılı olduğu bilinmesine rağmen seramik kaplı motorda % 1-1.7 oranında düşüş tespit edilmiştir. Bu durumun çalışmada yapılan ölçümlerin tüm devir aralıklarında değil de sadece 2500 d/dk'da yapılmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Termal yalıtım neticesinde motorun volumetrik veriminin azalmasının da bu güç kaybına etki edeceği düşünülmektedir.

6. Kaplanmış ve kaplanmamış motorlar egzoz gaz sıcaklık değerleri açısından karşılaştırıldığında, kaplanmış motorda kullanılan test yakıtlarına göre egzoz gaz sıcaklıklarında artış tespit edilmiştir. Bu artış oranları; D2 yakıtı için %11.3, B100 için %5.0 ve B20 için ise %6.6 olarak belirlenmiştir. Bu artışların sebebinin termal bariyerle oluşturulan izolasyondan kaynaklandığı düşünülmektedir.

7. Yanma odası elemanları olan piston, silindir kafası, egzoz ve emme supapları seramik bir malzeme olan $Al_2O_3-TiO_2$ (87-13) ile kaplanmıştır. Bu kaplama neticesinde yüzeyde termal bir bariyerin yanı sıra aşınma ve korozyona dayanıklı bir yüzey elde edilmiştir. Bu kaplama işlemi sayesinde malzeme yüzeyleri yanmanın tüm negatif etkilerinden korunarak, servis ömürlerinin artacağı düşünülmektedir.

5.ÖNERİLER

Günümüzde otomotiv sektöründe ar-ge çalışmaları başlıca; motor performansını artırma, yakıt ekonomisi, yakıt çeşitliliği ve egzoz emisyon değerlerini düşürerek çevreye saygılı motorlar üretimi üzerine yoğunlaşmış durumdadır. Dünya da bir çok devlet Kyoto protokolü kapsamında zararlı emisyonları azaltmak için birçok kanuni düzenlemeye gitmiş ve otomotiv üreticilerini de bu konuda çevreye saygılı motor üretimi konusunda önemli yaptırımlara tabi tutmuştur.

Yapılan bu deneysel çalışma ile içten yanmalı motorların yapısal karakteristiklerinde çok büyük modifikasyonlara gerek duyulmadan seramik kaplama uygulanarak başarılı olunabileceği belirlenmiş olup aynı zamanda D2 ve MYME karışımlarının bu tip düşük ısı kayıplı motorlarda uygulanabileceği ve meydana gelecek zararlı emisyon değerlerinin standart motora göre kıyaslandığında daha az çıkacağı anlaşılmıştır.

Uygulanılan yüzey modifikasyon yöntemi olan plazma ark spreyi hem uygulama kolaylığı hem de uygulanılan yüzeye kazandırdığı yüksek performans nedeniyle tercih edilebilir bir yöntemdir. Kaplama işleminde kullanılan kaplama toz içeriği geniş bir yelpazeye sahip olup istenen performansa göre malzeme seçiminde kolaylık sunmaktadır.

Yakıt olarak kullanılan biyodizel çevreye zararsız ve petrol içerikli yakıtlara çok yakın performans değerlerine ve fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip bir yakıt olup alternatif yakıt olarak kullanılabilir. Hem bitkisel hem de hayvansal yağlardan elde edilebilmekte olup ve üretimi kolaydır.

Bu konuda çalışma yapmak isteyen araştırmacılar; kaplama kalınlığını artırarak ve azaltarak, kaplama içeriğini değiştirerek, farklı yakıt çeşitleri kullanarak motor performansı ve egzoz emisyonları üzerindeki etkisini araştırabilirler. Düşük devirden yüksek devir aralığına tüm ölçümler yapılabilir ve HC ve CO₂ emisyon değerleri de ölçülebilir. Ayrıca bu tip motorlarda avans değişikliğinin motor karakteristikleri üzerinde etkileri de incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Bülbül, F., “*Malzeme ve Yüzey Mühendisliği*” Metal Dünyası Mart 2008
- [2] <http://istil.univ-lyon1.fr/english/materiaux.html>
- [3] Özel, S., Somunkıran, İ., Kurt, B. (2006). “*Düşük Karbonlu Çelik Yüzeyine FeCr+Mo Tozunun PTA Yöntemi İle Alaşımlandırılması*”, 11. Uluslararası Malzeme Sempozyumu, 329-332, Denizli.
- [4] Sarıkaya, Ö., Anık, S., Çelik, E. (2004). “*Plazma Püskürtme Yöntemiyle Al-%12 Si Ana Malzemesi Üzerine Al-Si+B₄C Kaplamaların Hazırlanması ve Kaplama Özelliklerinin İncelenmesi*”, 10. Denizli Malzeme Sempozyumu ve Sergisi, 325-332, Denizli
- [5] Üstel,F.,Yüksek,E.,Altuncu,E., “*Plazma sprej Kaplama Uygulamaları ve Teknolojik Uygulamaları*” Galvanoteknik Dergisi Kasım-Aralık 2006/06, , Kasım -Aralık Sayısı, 44-49, (2006)
- [6] Sarıkaya, Ö., “*Aşınmaya Karşı Yüzey Mühendisliği Yöntemleri*” s. 95-98 Sakarya 2007
- [7] R.Knight and R.W. Smith, “*Thermal Spray Forming of Materials*”, Powder Metal Technologies and Applications, Vol 7, ASM Handbook, ASM International,1998,p 408-409
- [8] Burton, A. Kushner and Edward R. Novinski, “*Thermal Spray Coatings*” Handbook of Thermal Spray Technology Perkin-Elmer Corporation, Metco Division ASM 2004
- [9] E.R. Novinski, Application of Thermal Spray Processes to Conserve Critical Materials, *Workshop on Conservation and Substitution Technology for Critical Materials, Conference Proceedings*, Vanderbilt University, 16 June 1981
- [10] J.R.Davis, “*Introduction to Thermal spray Processing*”, Handbook of Thermal Spray Technology editor,p3-13 ASM International and the Thermal Spray Society,2004
- [11] J.R.Davis “*Introduction to Thermal spray Processing*”, Handbook of Thermal Spray Technology,editor,p.50 ASM International and the Thermal Spray Society,2004
- [12] R.Knight and R.W. Smith, “*Thermal Spray Forming of Materials*”, Powder Metal Technologies and Applications, Vol 7, ASM Handbook, ASM International,1998,p 412-414
- [13] R.C. Tucker, Jr., “*Thermal Spray Coatings*”,Surface Engineering,Vol 5,ASM Handbook,ASM International,1994,p497-509
- [14] Üstel F., Yılmaz F., “*Termal Sprej Kaplama Teknolojisinde Kullanılan Kaplama Tozları ve Karakterizasyonu*” 4. International Powder Metallurgy Conference May

- 18-22,2005 Türkisch Powder Metallurgy Association Sakarya University, Sakarya,
- [15] Pawlowski L. “*The Science and Engineering of Thermal Spray Coating*”, Wiley & Sons, New York, NY, 1995.
 - [16] Moderne Beschichtungsverfahren (Ed. Fr.-W. Bach, T. Duda), Wiley-VCH, 2000
Z. 38-44.
 - [17] Schnick, T. M. “*Thermisches Spritzen von inkongruent schmelzende Werkstoffsystemen auf der Basis von Silicium*”, Band 12, (Ed. B. Wielage) Chemnitz, 2002
 - [18] Bernd CC. *Materials Production for Thermal Spray Processes: A lesson from Thermal Spray Technology* Ph.D.,1991.
 - [19] Steine T. H. “Das thermische spritzen und dessen Anwendung”, Technica 11/95, pp. 45-46
 - [20] Burton A. Kushner and Edward R. Novinski, Friction, Lubrication, and Wear Technology was published in 1992 as Volume 18 of the ASM Handbook. p.1688-1689 “*thermal spray coatings*” Perkin-Elmer Corporation, Metco Division
 - [21] Üstel F. “*Plazma Sprey Kaplama Teknolojisi*”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik. Üniversitesi, Fen Bilimleri, İstanbul, 1995
 - [22] K. Smolka, “*Thermisches Spritzen*” DVS-Verlag, 50-57,1985.
 - [23] Lugscheider E. Jokiel P “*Plasmaspritzen- Verfahren, Anwendungen, Entwicklungen*”, Metall Heft 3, 230-235, 1993.
 - [24] Esschnauer H., Lugscheider E. “*Fortschritte beim thermischen Spritzen*”, Metall, Heft 3, 218-224,1985.
 - [25] Pawlowski L. “*The Science and Engineering of Thermal Spray Coating*”, Wiley & Sons, New York, NY, 1995.
 - [26] Robert B. Heinman “*Plasma Spray Coating*” VCH Verlag, ISBN 3-527-29430-9,1996.
 - [27] Burton A. Kushner and Edward R. Novinski, “*Thermal spray coatings*” Perkin-Elmer Corporation, Metco Division H. Herman, Plasma Sprayed Coatings, Sci. Am., Sept 1988
 - [28] Bernd CC. *Materials Production for Thermal Spray Processes: A lesson from Thermal Spray Technology*, Ph.D.,1991.
 - [29] Gabriele, Nutsch, “*Grundlagen der Oberflächentechnik*”, Physikalische Verfahren, TU ilmenau, German, 2000.

- [30] Yılmaz F., Yüzey İşlemleri Dergisi, Temmuz-Ağustos, sf. 30-33, 2002.
- [31] Houck, D.L., “*Thermal Spray Technology: New Ideas and Processes*”, National Thermal Spray Conference, Cincinnati, 1987.
- [32] Bach K., Möhwald, A.Laarmann, T.wenz “*Moderne Beschichtungs-Verfahren*” Wiley VCH, ISBN 3-527-30977-2005
- [33] Soykan S., Üstel F., Çelik E., Avcı E., “*Plazma Sprey Tekniğiyle Üretilen Seramik Kaplamaların Sürtünme ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi*”, Turkish Journal of Engineering & Environmental Sciences, Vol 21, Num. 6, 417-423, 1997.
- [34] Soykan S., Üstel F., Çelik Yüzeylerinin Kaplanması “*Termal Sprey Teknolojisi*” Bölüm 9., 221-248, 2006.
- [35] Tucker, R.C., Thermal Spray Coatings, Surface Engineering, vol. 5, ASM Handbook, ASM International, 1994.
- [36] Lugscheider, E., “*Handbuch der thermischen Spritztechnik, Technologien, Werkstoffe, Fertigung*”, (ed. E. Lugscheider), DVS –Verlag , Aachen 2002.
- [37] Babiak Z., Brune M., Duda T., Thermisches Spritzen-Grundlagen, (Ed. W. Bach, T. Duda), Wiley-VCH, (103-106) 2000.
- [38] Sarıkaya,Ö., “*aşınmaya karşı yüzey mühendisliği yöntemleri*” Sakarya 2007 s.123-124
- [39] M.L, Thorpe, “*Thermal Spray: Industry in Transition*”, Adv.Mater.Process., Vol 143 (No,5),1993,p 50-56
- [40] H. Herman, “*Plasma Sprayed Coatings*”, Sci. Am., Sept 1988
- [41] Sarıkaya,Ö., “*aşınmaya karşı yüzey mühendisliği yöntemleri*” Sakarya 2007 s.142-145
- [42] S.Jaichandar and P.Tamilporai Madras Institute of Technology, Anna University, Chennai “*Low Heat Rejection Engines- An Overview*” SAE Technical Paper Series 2003-01-0405 2003 SAE World Congress, Detroit,Michigan March 2003
- [43] http://www.eie.gov.tr/biyoenerji/02-biyodizel/bd_nedir.html
- [44] Erol,A., “*Yağlardan Elde Edilen Biyodizellerin Karşılaştırılması*” yüksek lisans tezi Kimya Mühendisliği Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Eylül 2006 Ankara
- [45] (<http://www.textara.com/biodizel-biyodizel-yakit-nasil-yapilir-uretilir-teknik?page=0%2C0>)
- [46] KARAOSMANOGLU, F., 2002. “*Çevre Dostu-Yenilenebilir Bir Yakıt Adayı: Biyomotorin*”, Ekojenerasyon Dünyası-Kojenerasyon Dergisi, ICC12002 Özel Sayısı, p:50-56, Nisan 2002, İstanbul.

- [47] Ültanır, M.Ö., “Biomass Enerjiye Genel Bakış”, *TermodinamikDergisi*, Ankara, 25, 1-40, (1997).
- [48] Emiroğlu, H., “Bir traktör modelinde yakıt olarak değişik oranlarda Biyodizel kullanımının Motor Karakteristiklerine etkilerinin belirlenmesi” A.M.Ü. Fen bilimleri Enstitüsü TM-YL-2007-0001 2007, Aydın
- [49] Demirbaş, A., “Biodiesel production from vegetable oil via catalytic and non catalytic supercritical alcohol transesterification and other methods: a survey”, *Energy , Conversion and Management* , 44: 2093-2109 (2003).
- [50] Agarwal, K., “Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines” *Progress in Energy and Combustion Science* 33 (2007) 233–271
- [51] Altın R, Çetinkaya S, Yücesu HS. “The potential of using vegetable oil fuels as fuel for diesel engines”. *Energy Conversation & Management* 2001;42:529-38.
- [52] Safgönül B, Arslan HE, Ergeneman M, Soruşbay C. “Internal combustion engines”. Istanbul: Çağaloğlu. 1995.
- [53] Tsolakis A, Megaritis A, Wyszynski ML, Theinnoi K. “Engine performance and emissions of a diesel engine operating on diesel-RME (rapeseed methyl ester) blends with EGR (exhaust gas recirculation)”. *Energy* 2007;32:2072-80.
- [54] Taymaz I, Cakir K, Gur M, Mimaroglu A. “Experimental investigation of heat losses in a ceramic coated diesel”. *Surface and Coating Technology* 2003;169:168-70.
- [55] Heywood, J.B., , *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw-Hill Publishing Company, New York, s.586-592, 1988.
- [56] Hazar, H., “Cotton methyl ester usage in a diesel engine equipped with insulated combustion chamber” *Applied Energy* 2009; 134-140
- [57] Salman, S., Köse, R., Urtekin, L. and Findık F., “An investigation of different ceramic coating thermal properties”, *Materials and Design*. Vol. 27, 585–590, 2006.

ÖZGEÇMİŞ

1978 Turhal/Tokat doğumluyum. İlk ve ortaokul eğitimimi Van'da tamamladım. Lise eğitimimi İzmit'te tamamladıktan sonra lisans eğitimimi 2002 yılında Sakarya Üniversitesinde bitirdim. 2007 yılından beri Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Otomotiv bölümünde yüksek lisans eğitimime devam etmekteyim. Halen Tokat GOP Üniversitesinde memur olarak çalışmaktayım. Evliyim, Tokat'ta ikamet etmekteyim.